

נחלים וניקוז - תהליכים, הנדסה ותכן

ערכו אריה בן-צביף נחמיה שחף ואורי צדקה

עומר, כסלו תשס"ט, נובמבר 2010

תוכן העניינים

ברכות

מבוא - אריה בן-צבי, אורי צדקה, נחמיה שחף	5
מטאורולוגיה - יאיר גולדרייך	8-7
הידרוליקה - אריה בן-צבי, ליאונד גריניס	26-9
הידרולוגיה - אריה בן-צבי	47-27
אגן היקוות - יחידה הידרו-מורפו-אקולוגית - יהודית לקח	70-49
גיאומורפולוגיה נהרית - משה ענבר	85-71
תמונות - שיטפונות בנחלים, זיהום נחלים, תחזוקה, נופי נחלים	112-99
הסחף הנחלי - יהודית לקח, יוליה אלכסנדרוב, יונתן לרון	113-144
מכניקת קרקע - אורי צדקה, איליה ויינשטיין	145-173
הנדסת מבנים - אורי צדקה, ליאונד גריניס	198-175
מבנים הידרולים - ליאונד גריניס, אריה בן-צבי	218-199
תכנון אפיקי נחלים ותעלות ניקוז - דן רוזנצביג	232-219
תמונות - נופי נחלים, ביצוע הסדרות, כנסים וטקסים, שיקום נחלים, תוכניות והדמיות לפרוייקטים	246-233
שימור קרקע - יצחק וולף, בהשתתפות צבי רבהון	264-247
תחזוקה - ניר שטרית	272-265
מאגרים - משה צוברוצקי	283-273
תכנון הידרולוגי באפיקי מים - שמואל פולק	288-285
קשר עם הסביבה - מוטי קפלן	307-289
היבטים כלכליים של מפעלי ניקוז - סיניא נתניהו	319-309
ניקוז, סחף קרקע ונחלים: המסגרת המשפטית והמנהלית -	
ראובן לסטר, דני לבני, אריאלה גרינברג	341-321
ניהול אינטגרטיבי של נחלים בישראל -	
נחמיה שחף, יוליה אלכסנדרוב, גדעון אורון, יהודה גרדוס	357-343

תמונת השער:

עיצוב, העמדה ועריכה גרפית: סטודיו רוה-פלג



משרד החקלאות

ברכת שר החקלאות

הספר "נחלים וניקוז - תהליכים הנדסה ותכן" מציג בהרחבה את מגוון הנושאים הקשורים לניקוז. הניקוז מהווה חלק חשוב של פיתוח הארץ מאז ראשית ההתיישבות ועד ימינו. הוא החל בייבוש ביצות כנגד מגפת המלריה וכדי להכשיר את קרקעות הביצה לשימוש חקלאי, המשיך באמצעים להקטנת נזקים מחמת שטפונות והתרחב בעת האחרונה גם לנושאי הסביבה ורווחת האדם. הספר כתוב בשפה פשוטה אך גם מקיף ומעמיק במידה מספקת. אני צופה שהספר יקדם את רמת העיסוק בניקוז ולשם כך תמך המשרד בהכנתו ובהוצאתו לאור.

שלום שמחון,
שר החקלאות
משרד החקלאות



המכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון

ברכת נשיא המכללה

ברכותיי החמות ליוזמה המשותפת והמבורכת בין רשות הניקוז והמחלקה להנדסת בניין במכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון (SCE) בכתובת הספר "נחלים וניקוז". עבודתכם החשובה תתרום תרומה ניכרת במניעת הנזקים לנחלים ולשמירת ארצנו לדורות הבאים. שאו ברכה,

פרופ' יהודה חדד
נשיא המכללה האקדמית
להנדסה סמי שמעון



ברכת יו"ר רשות הניקוז

רשות ניקוז שקמה בשור יזמה כתיבת והוצאת ספר של אסופת מאמרים בנושא ניקוז ונחלים לאור הצורך הרב בספרות מקצועית עדכנית בנושא. רשות הניקוז שקמה בשור הינה מהרשויות החלוציות שמובילות את התפיסה האינטגרטיבית של ניהול נחלים, והראשונה שהוסיפה סמכויות נוספות של רשות הנחל לטיפול בנושא הסביבה, וסמכויות של רשות שימור קרקע. ספר זה מהווה דוגמא נוספת להיותה של הרשות מובילה בישראל.

פיני בדש
יו"ר רשות ניקוז
שקמה בשור

מבוא

אריה בן-צבי¹; אורי צדקה²; נחמיה שחף³

¹ פרופסור, מורה מן החוץ, המחלקה להנדסת בניין, המכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון; לשעבר מנהל השירות ההידרולוגי;

² ד"ר, דיקן המחלקה להנדסת בניין, המכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון;

³ מנכ"ל רשות ניקוז שקמה-בשור.

ונעשה מעורב יותר בנושאי שימור קרקע, מסלולי תעבורה, בינוי ערים, מתקנים ביטחוניים, שמירת טבע ותרבות הפנאי. גם תפקידי רשויות הניקוז מתרחבים, ובהדרגה הופכות רשויות הניקוז לכעין רשויות פיתוח ושמירה על שטחים פתוחים לרווחת הציבור. על כן, כדי לתפקד כראוי, זקוקות רשויות הניקוז לעובדים המתמחים במגוון הנושאים האלה. מאחר שהפעילות ההנדסית נמצאת במוקד הפעילות של רשות הניקוז, אמורים עובדיה, והגורמים החיצוניים הקשורים עמה, להתמצא בשיקולים ההנדסיים הכרוכים בפעילותה. שיפור ההבנה בין הגורמים השונים הוא יעד חשוב של הספר הזה.

2. מבנה הספר

הספר מורכב ממאמרים, מאת מחברים שונים, שכל אחד מהם עוסק בנושא משלו ועומד בפני עצמו. בשל המגוון הרחב של המחברים, אין אחדות מלאה במידת ההתעמקות של המאמרים בנושאים אליהם הם מתייחסים. פה ושם נמצאת בהם כפילות ופה ושם נשמט ביניהם חומר חשוב. עם זאת, נראה למכיני הספר כי הוא כולל חומר רב ערך ומלא במידה ראויה. המאמרים מסודרים לפי תוכנם, בהדרגה כללית מהבסיסי ליישומי, תוך כדי הפניות זה אל זה.

כל אחד מהמאמרים נכתב ברמה מקצועית מתאימה למהנדסים, ובלשון מספקת להבנתם של אנשים שאין השכלתם כזו. הוא עבר ביקורת מקצועית, עריכת לשון ועריכה צורנית וגרפית. לשון המאמרים טכנית ומבנם כעין מדעי. אלה מבין הקוראים שירצו להתעמק יותר, מוזמנים לעיין במאמרים ובספרים המצוינים במראי המקומות של המאמרים ובמקורות ידע אחרים.

1. מטרת הספר ויעדיו

ספר זה מאסף מאמרים על תהליכים בנחלים, הנדסה ותכן הקשורים לניקוז נגר על-קרקעי בשטחים פתוחים. מטרתו להציג בתמצית את הידע הנדרש לעבודתם של מהנדסי ניקוז ולסייע בביצוע נאות של מטלותיהם. עם זאת, אין הוא אמור להעמיק בנושאים המוצגים בה או לספק נוסחאות חישוב וערכים מספריים של המקדמים המתאימים ביותר לכל מקרה המגיע לשולחנם של המהנדסים, אלה ניתנים להשגה בספרות המקצועית. כוונתו לספק רקע מסודר ולהפנות את תשומת הלב למגוון השיקולים המקצועיים הכרוכים בעיסוק בכל אחד מהמקרים האלה. כדי לשמור על היקף סביר, אין הספר דן בניקוז תת-קרקעי ובניקוז שטחים עירוניים.

בימינו, אין העיסוק בניקוז מתרכז כבעבר רק בסילוק יעיל של מים עודפים ובייבוש ביצות, אלא מעורב גם בנושאים של שימור הסביבה, שיקום נזקים באפיקים ובשכנותם עקב פעולות אנוש ויצירת אפשרויות לקיט ונופש. הצטופפות האוכלוסייה, העלייה ברמת החיים והתעצמות החשיבות הכלכלית של פשטי ההפצה, מחייבים התחשבות בצרכים רבים ומגוונים מבעבר. תהליכי קבלת ההחלטות נעשים מורכבים יותר ומערבים גורמים רבים יותר. כדי לנווט את התהליכים למטרות הרצויות, חייבים מהנדסי הניקוז לדעת כיצד להציג את שיקוליהם והמלצותיהם לפני רבדים חברתיים ומנהליים שונים. בו בזמן הם חייבים להבין לרחשי לבם של הגורמים החיצוניים ולדעת כיצד להתחשב בדרישותיהם. התוצאות אמורות להיראות הן ברמה הכללית והן בפרטי התכנון, הביצוע והתחזוקה.

בעקבות ההתפתחויות האלה, הולך הניקוז

3. אופן ההכנה

הספר ניוזם ומומן על ידי רשות הניקוז שקמה-בשור, בסיוע האגף הבכיר לשימור קרקע וניקוז במשרד החקלאות. הוא הוכן על ידי המחלקה להנדסת בניין של המכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון. סיוע מקצועי הוגש על ידי ועדת היגוי שמונתה על ידי רשות הניקוז והמכללה.

חברי הוועדה:

נחמיה שחף, מנכ"ל רשות הניקוז שקמה-בשור - יו"ר;

ד"ר אבי אוסטפלד, הטכניון;

פרופ' אריה בן-צבי, המכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון ולשעבר מנהל השירות ההידרולוגי;

עזרא הנקין, לשעבר מנהל האגף לשימור קרקע וניקוז (הצטרף במהלך העבודה);

פרופ' יונתן לרון, אוניברסיטת בן גוריון בנגב;

יצחק משה, הקרן הקיימת לישראל;

פרופ' רונית נתיב ז"ל, האוניברסיטה העברית (נפטרה במהלך העבודה);

פרופ' אמריטוס משה ענבר, אוניברסיטת חיפה;

ד"ר אורי צדקה, המכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון;

צבי רבהון, מנהל האגף לשימור קרקע וניקוז; שמואל רזניק, לשעבר מנהל האגף לניקוז, מע"צ;

ניר שטרית, מהנדס רשות הניקוז שקמה-בשור.

הוועדה התכנסה פעמיים בראשית שנת 2006, החליטה על תוכן העניינים והמליצה על כותבים אפשריים של המאמרים. המשך פעילותה היה

בהתכתבות. היא עסקה בעיקר בביקורת מקצועית של המאמרים שהוגשו. עורך הספר ניהל את הכתיבה, הביקורת המקצועית, העריכה הלשונית, הגרפית והצורנית וההוצאה לאור. צוות מצומצם, בהרכב נחמיה שחף, אורי צדקה, ניר שטרית ואריה בן-צבי, התכנס פעמים אחדות וטיפל בהיבטים המנהליים הכרוכים בהכנת הספר.

4. תודות

המאמרים נכתבו ובוקרו בהתנדבות, ועל כך רב תודות למחברים ולמבקרים. שמות המחברים רשומים בגוף הספר. להלן שמות המבקרים:

ד"ר אבי אוסטפלד;

ד"ר יורם אמיר;

ד"ר אריה בן-צבי;

ד"ר אור גולדפרב;

עזרא הנקין;

פרופ' אריאל כהן;

פרופ' יואב כסלו;

פרופ' יונתן לרון;

ד"ר אהוד סימון;

פרופ' משה ענבר;

צבי רבהון;

צבי שיין;

סלומון שמוקלר;

עו"ד אורה תמיר.

עורכת הלשון יונה אקרמן;

עיצוב ועריכה גרפית: סטודיו רווה-פלג.

מטאורולוגיה

יאיר גולדרייך

פרופסור אמריטוס, המחלקה לגיאוגרפיה וסביבה, אוניברסיטת בר-אילן, רמת-גן

1. הקדמה

מדע המטאורולוגיה הוא ענף של הגיאופיסיקה, העוסק בחקר תופעות אטמוספיריות. מלבד חקר הפיסיקה, הכימיה והדינמיקה של האטמוספירה, הוא עוסק גם בהשפעה ההדדית שבין האטמוספירה לבין הסובב, כמו פני כדור הארץ, האוקיינוסים והביוספירה. הקלימטולוגיה (תורת האקלים) היא ענף של המטאורולוגיה, העוסק בתנאים הממוצעים (ובפיזור סביב הממוצע) בזמן ובמרחב של משתנים אטמוספריים. הקשר בין המדעים הללו עם מערכות הניקוז הוא מורכב ומשולב. לדוגמא, ניתוח אירוע הגורם שיטפון נמצא בתחום המטאורולוגיה, אולם בהסתברות הרב שנתית של האירוע, מטפל הקלימטולוג. מטבע הדברים, התחום המשותף העיקרי בין המטאורולוגיה למערכת הניקוז הוא ההידרוספירה - המשקעים וההתאדות. המשקעים כוללים את הנוזלים: גשם, מטר ורסס, ואת המוצקים: שלג, ברד וגשם קפוא. לא נעסוק כאן במוצקים, מאחר שהקשרם לנושאנו בישראל הוא מזערי. מטבע הדברים, הסעיפים הבאים מתארים בקצרה את הנושאים המטאורולוגיים הקשורים לניקוז בישראל. הרחבה על הנושאים שידונו במאמר זה, ניתן למצוא אצל גולדרייך (1998) ובחיבור מעודכן אצל Goldreich (2003).

2. אזורי אקלים בארץ

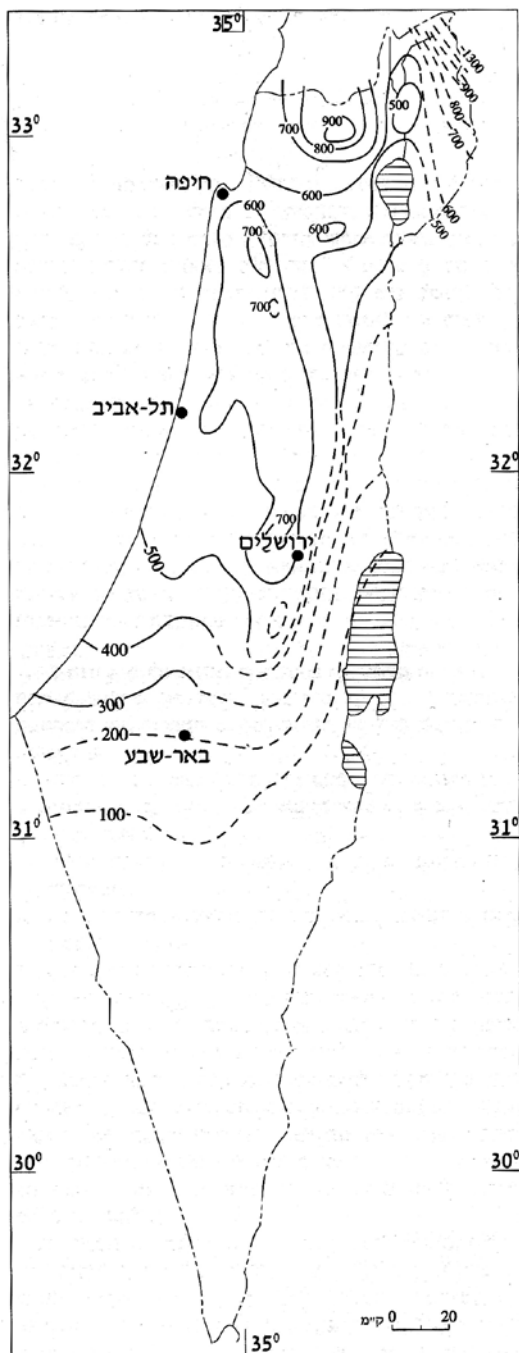
ארץ ישראל שייכת לארצות התת-טרופיות. בצדן המערבי של היבשות מצויים, בדרך כלל, בקווי רוחב תת-טרופיים שלוש אזורי אקלים: הים תיכוני, המדבריות החמים ורצועת מעבר ביניהם - הצחיח למחצה. אם נשתמש בסיווג האקלימי של קפן (Köppen) (אטלס ישראל, 1985), נמצא כי בארץ מצויים שלושת אזורי האקלים הללו: האזור הים תיכוני (Csa), האזור המדברי (הנגב ומדבר יהודה) ורצועת מעבר בעלת האקלים הערבותי (עובי משקעים הוא בערך בין 200 ל- 320 מ"מ

לשנה; ראה תרשים 1). הסיווג האקלימי Csa שבמפת קפן, מתייחס לאזור בעל טמפרטורות נוחות (אזור ממוזג). הטמפרטורה הממוצעת של החודש החם עולה על 18°C וזה של הקר אינה יורדת מ- 3°C (האות C); רוב גשמי השנה יורדים בחורף (s) והטמפרטורה הממוצעת של החודש החם עולה על 22°C (a).

רק כ-5% מן השטחים היבשתיים של כדור הארץ, מסווגים כבעלי אקלים ים תיכוני. כל האזורים הללו מצויים בצדן המערבי של היבשות, וכמעט כולם בין קווי הרוחב 30° ל- 40° בשני חלקי כדור הארץ. המקרה של ישראל (וכן חוף הלבנט) הוא הקיצוני ביותר באזורים הים תיכוניים, כשבשלושה חודשים (יוני-אוגוסט) אין יורדים כלל משקעים.

3. המשקעים

המשקעים הם המשתנה האקלימי החשוב ביותר בישראל. בארץ, השוכנת על גבול המדבר והיא בעלת טמפרטורות גבוהות יחסית, ירידת המשקעים היא עניין קיומי. בעבר (ועדיין כיום בכמה וכמה ארצות מתפתחות), בצורת ממושכת משמעה מוות לאדם, לחי ולצומח. כמעט כל משק המים של ישראל תלוי בירידת משקעים. יוצאים מכלל זה מספר מועט של אתרים בהם מתפלים מים מליחים, ובארות בערבה הניזונות ממים מאובנים (שאריות של מי תהום מתקופות גיאולוגיות קדומות, שאינן קשורות בירידת משקעים עכשווית ואין להן מילוי חוזר). בשנים האחרונות הוחל בהתפלה משמעותית של מי ים, אולם זו מכסה רק חלק קטן מהצרכים. כמעט כל הנגר העילי בנחלים בתוך שטחה של ישראל תלוי במשקעי ישראל, מלבד הירמון שבגבול ישראל-סוריה-ירדן ומקורות הירדן שבגבול ישראל-לבנון-סוריה. הפסוק: "למטר השמים תשתה מים" (דברים י"א, י"א), מיטיב לבטא את התלות הכמעט מוחלטת במשקעים של משק



תרשים 1: מפת המשקעים (במ"מ) הממוצעת (נורמליים תקינים), לשנים 1960-1991 (השירות המטאורולוגי, 1990)

הכללים לתיאור מפת המשקעים (תרשים 1):

1. הדרמה - ככל שמדרימים, ניכרת ירידה במשקעים.
2. התרחקות מן הים - ככל שמתרחקים מן הים,

המים בישראל.

הרושם שעובי המשקעים בארץ נמוך, הינו מוטעה. אם נשווה את הכמות הזאת לכמויות שנתיות ממוצעות בערים שונות באירופה, ניוכח כי הכמות בישראל אינה מבוטלת כלל. ברוב שטחה של אירופה כמות המשקעים השנתית אינה עולה על 600 מ"מ. נזכיר כאן שבערים, כמות המשקעים עולה על זו שבשטחים לא עירוניים. מניין נובעת אפוא ההתרשמות הבלתי נכונה שכמות המשקעים בארץ נמוכה למדי? הטענה שבאירופה חלק נכבד של המשקעים יורד בצורת שלגים ("מטרים שלג!") אינה תשובה נכונה, מאחר ששווה הערך המימי של השלג הטרי הוא רק עשירית מעומקו והוא כלול בכמות השנתית. בלונדון, עיר המטריות, כמות המשקעים דומה לזו של פתח תקווה או כפר סבא. השוואה עם התנאים של לונדון תראה, כי עוצמות המשקעים שם נמוכות יותר¹, המשקעים יורדים במשך כל השנה, מספר ימי הגשם הוא פי שלשה מאשר בארץ וההתאדות השנתית בלונדון נמוכה פי ארבעה מזו שבמישור החוף.

נוכל להסיק מן ההשוואה הזאת, כי כדי להעריך את יעילות המשקעים מן הבחינה החקלאית, לא די לבדוק את כמות המשקעים השנתית הממוצעת, אלא יש לבדוק גם משתנים אחרים. האפשרות לקיים בארץ חקלאות, ואפילו גידולי קיץ, קשורה בנצילות הגבוהה של המשקעים. מכיוון שהמשקעים בישראל יורדים בחורף או ליתר דיוק באמצע החורף, בעת שההתאדות נמוכה יחסית - הנצילות של המשקעים גבוהה ביותר. זאת ועוד, חלק נכבד של המשקעים מתווסף למי התהום, בזכות העובדה שבמת ההר בארץ בנויה רובה מסלעים חדירים למים, כמו הגיר הקשה לסוגיו והדולומיט. במרכז הארץ, במקומות שבהם כמות המשקעים היא בין 400 ל-600 מ"מ, אחוז מי המשקעים המגיע למי התהום הוא כ-25%-35%, עוד כ-60%-70% (!) מתאדים וכ-5% בלבד זורמים לים כנגר עילי.

3.1 ההשתנות המרחבית של המשקעים

חמישה גורמים גיאוגרפיים מסבירים את מרבית ההשתנות המרחבית של המשקעים. להלן חמשת

¹ בלונדון, שכיחה החזית החמה הקשורה בענני רפידה המורידים גשם קל ורסס. בישראל, עיקר המשקעים קשור בחזית קרה המאופיינת בענני ערימה (בעיקר מסוג הקומולוס) ובמטר (או ממטר) שלמשקעיהם עוצמות גבוהות.

היתה יותר מפי שלושה וב- 50% יותר מפי שבעה! רק בארבעה מתוך 21 הימים בני השוואה, הכמויות היו פחות או יותר זהות. לפי שרון (1979), כ- 60% מכמות המשקעים הכללית בתחנה יחידה בערבה הדרומית, הם משקעים בעלי אופי מקומי ולא אזורי. המשקעים המקומיים מופיעים בצורה של ממטרים קצרי מועד (לרוב 5-15 דקות), בעלי עוצמה גבוהה והשתרעותם היא על שטח של מאות קמ"ר בלבד. לעומת זאת, משקעים אזוריים מכסים שטחים של אלפי קמ"ר, הם ממושכים יותר ובעלי עוצמות נמוכות, על פי רוב עד 10 מ"מ לשעה. המשקעים המקומיים אופייניים לתקופות הסתיו והאביב, ואילו המשקעים האזוריים אופייניים לתקופת החורף דצמבר-ינואר.

התופעה של גשם נקודתי, נמצאה גם בצפון הנגב (Kutiel and Sharon, 1981) המהלך היומי של הגשם נבדק בשמונה תחנות. נמצא כי בשעות הלילה המאוחרות ובשעות הבוקר המוקדמות, יש מתאם גבוה בין כמויות הגשם שנמדדו בשמונה התחנות. לעומת זאת, בשעות אחר הצהריים ובשעות הלילה המוקדמות, המתאם בין התחנות היה נמוך הרבה יותר. מתאם גבוה מעיד על רצף מרחבי של המשקעים, ומתאם נמוך על גשמים נקודתיים.

3.2 ההשתנות העתית של המשקעים

קודם שנפנה לדון בהשתנות העתית של עונת הגשם, נדון במהלך הגשם היממי. לעומת הארצות הטרופיות והמונסוניות, בהן יורדים גשמי הקיץ לאחר שיא התחממות האדמה בשעות אחרי הצהריים המוקדמות, במשקעים החוץ-טרופיים שמקורם בחזיתות, קשה למצוא מהלך יומי ברור של כמויות הגשמים ובייחוד קשה הדבר בחורף. כצנלסון (1955), בדק את הנושא ומביא נתונים שעתיים מתחנות גשם רושמות של תל אביב (17 שנים) ורמלה (10 שנים). הכמות המרבית נרשמה בין השעות 04:00-05:00 ו-05:00-06:00 בבוקר בהתאמה, והמזערית בין השעות 20:00-21:00 ו-16:00-17:00 בהתאמה.

"שנת הגשם" בישראל, מתחילה באחד באוגוסט ומסתיימת בשלושים ואחד ביולי בשנה העוקבת. קביעה זאת של שנת הגשם המתחילה בלב עונת הקיץ, נעדרת המשקעים, נוחה מכמה מבחינות: 1. הדבר מבטיח שהמעבר משנת גשם לשנת גשם לא יהיה בעיצומו של פרק גשם, וכך תימנע האפשרות

ניכרת ירידה במשקעים.

3. עלייה בהרים - ככל שעולים בהר, ניכרת עלייה במשקעים.

4. במחסה הרוח (המדרונות המזרחיים של שדירת ההר) - ניכרת ירידה במשקעים.

5. בערים ובמורד הרוח מהן - ניכרת עלייה במשקעים.

ארבעת הגורמים האחרונים הם אוניברסליים כמעט. הגורם הראשון קשור במיקומה של ישראל בפינה הדרומית מזרחית של הים התיכון, וככל שנצפין נתקרב למרכז השקע הברומטרי הנע לאורך הים התיכון ונתקרב לאזור בו אינטנסיבית יותר הפעילות של החזית הקרה, יוצרת המשקעים. השפעת ההדרמה ניכרת היטב בנגב. הנגב הוא החלק המדברי של ישראל ותופס את מחצית שטחה. מרבית התופעות הנזכרות בהמשך, נכונות במידה מסוימת גם לחלקים הצפוניים יותר בשקע הירדן. כך גם התופעות הקשורות בחבל ארץ זה, נכונות גם לאזורים מדבריים אחרים על פני כדור הארץ. את היעדר היציבות של גשמי הנגב, אפשר לבטא בכמה מרכיבים (שרון, 1978):

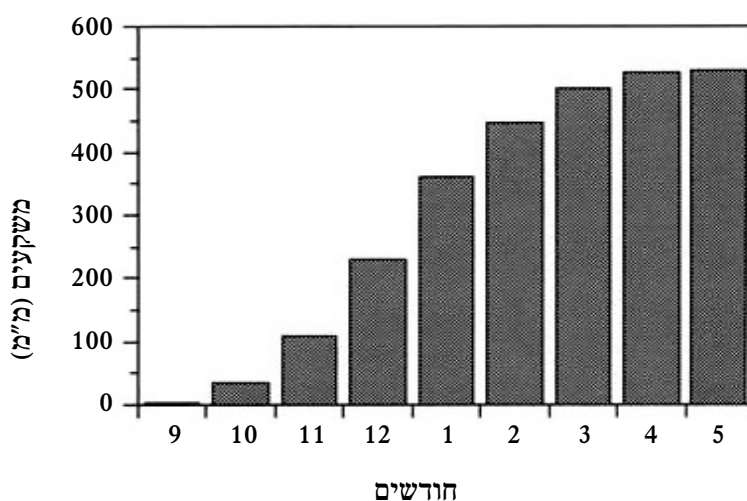
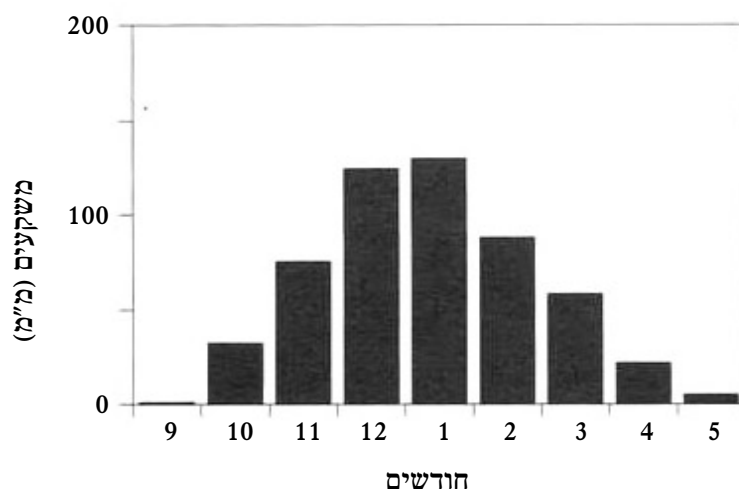
- חלק נכבד ממשקעי הנגב הוא בעל עוצמות גבוהות.
- מיעוט השטח המומטר. בדרך כלל למשקעים אופי נקודתי ביותר, ואין הם משתרעים על שטח נרחב.
- לסופות המשקעים אופי מקומי ועל פי רוב מקורן במתך ענן (cloud burst) או במיקרו-ברסט (micro-burst) קונוקטי ולא במשקעים חזיתיים.
- ממד אי הוודאות גדול. חדירת העננות ממקורות שונים לנגב, היא מקרית למדי. אי הוודאות גדולה בייחוד בעונות המעבר.
- אי סדירות. במילים אחרות, ההשתנות היחסית של כמויות המשקעים השנתיות והחודשיות היא גדולה ביותר.
- את אופיים המיוחד של משקעי הנגב מדגים שרון (1979), בנתונים שנאספו בערבה הדרומית. השוואה בין שלוש תחנות גשם: אילת והתחנות הירדניות עקבה ויתם שהמרחקים ביניהן אינם עולים על 15 ק"מ, מראה כי כ- 70% מימי הגשם (במשך שלוש שנים), הכמות באחת התחנות היתה גדולה פי שניים או יותר מאשר בשתי התחנות האחרות. כ- 60% מן הימים, הכמות באחת התחנות

טבלה 1: ממוצעים אקלימיים תקינים של כמות גשם (מ"מ) לתקופה 1961-1990
(השירות המטאורולוגי, 1990)

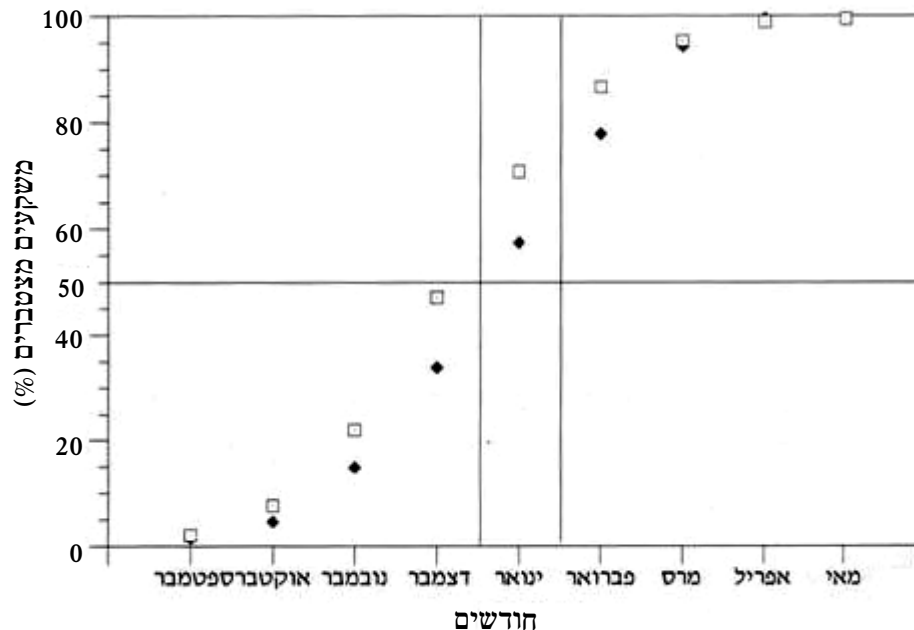
התחנה	גובה (מ')	נקודת ציון	ספט'	אוק'	נוב'	דצמ'	ינו'	פבר'	מרס'	אפר'	מאי'	שנתי
מישור החוף												
ראש-הנקרה	30	160 276	0.8	37	89	142	143	100	65	30	3.4	609
נהריה	5	159 267	1.2	35	90	146	155	107	67	34	4.7	640
חיפה (נמל)	5	150 247	0.9	31	69	146	133	86	48	22	4.4	540
ניר-עציון	210	149 234	1.3	34	83	164	155	97	66	25	6.3	631
גן-שמואל	30	145 206	0.6	32	80	163	146	93	59	25	4.1	603
נתניה	35	136 193	0.8	28	90	150	139	86	54	18	2.8	569
גן-חיים	40	139 179	0.3	30	84	162	147	98	70	21	3.9	617
שדה-דב (ת"א)	3	129 168	0.8	34	78	133	125	80	51	19	3.0	524
בארות יצחק	55	141 160	0.0	27	74	137	147	95	64	24	3.2	571
מקווה-ישראל	20	129 159	0.1	26	77	133	137	86	50	17	3.4	529
לוד, נתב"ג	40	155 140	0.2	24	74	138	149	97	62	24	3.1	571
נצר-סירני	75	133 148	0.4	25	70	139	147	91	60	22	2.3	557
עקרון	56	133 137	0.1	27	73	130	133	91	60	16	3.1	533
חפץ-חיים	80	131 133	0.4	31	75	123	130	87	57	21	3.7	528
באר-טוביה	55	124 127	0.9	26	73	122	140	91	54	20	2.1	529
נגבה	85	119 118	2.3	22	61	110	123	86	52	20	1.8	478
תקומה	130	110 95	0.2	17	53	66	97	68	39	17	0.4	358
מגן	135	95 79	0.2	9	33	53	61	42	29	14	0.7	241
ההר והעמקים												
אילון	310	171 274	1.3	39	104	179	183	142	92	46	6.6	793
מעליא	500	174 269	2.1	35	101	169	193	152	105	51	8.2	816
מירון	680	191 265	0.4	31	94	192	230	182	134	57	11.2	932
חוקוק	1	196 253	0.5	17	60	105	121	86	68	31	3.0	492
רמת-דוד	80	169 231	0.9	23	64	133	127	89	68	28	4.9	538
מרחביה	60	179 223	0.2	18	53	106	110	75	60	23	6.6	452
מסילות	-120	194 211	0.4	13	41	81	88	62	52	21	7.0	365
חולדה	125	138 137	0.2	26	69	121	129	92	65	21	2.6	525
קריית-ענבים	700	161 135	0.6	26	76	143	173	140	111	34	3.4	707
ירושלים, מרכז	810	171 132	0.3	18	59	107	134	112	91	29	3.3	553
בית-ג'ימל	360	147 125	0.8	20	58	102	132	101	74	26	2.0	516
נתיב-הל"ה	280	148 121	1.4	19	56	97	122	90	67	24	1.9	478
דורות	110	116 101	0.3	15	47	70	97	72	40	18	1.1	360
באר-שבע	265	131 72	0.4	7	20	44	52	37	27	14	1.6	204
דרום												
רביבים	290	123 50	0.1	5	11	24	28	17	16	8	0.8	111
עברת (חוה)	540	128 23	0.0	3	7	20	20	16	14	7	0.9	88
שקע הירדן												
דפנה	150	210 293	0.3	25	76	129	143	115	89	42	8.4	627
כפר-בלום	75	207 286	0.4	22	64	107	122	95	74	31	8.1	524
איילת-השחר	175	204 269	0.6	20	53	102	119	91	64	29	7.9	487
דגניה א'	-200	204 235	0.6	17	50	87	93	69	56	30	5.2	407
טירת-צבי	-220	199 203	0.2	12	35	60	62	45	39	15	5.7	274
אילת	12	145 884	0.0	3	4	6	5	5	4	3	1.4	32

אקלימיים, מבוססים על פי רוב על נתונים חודשיים. הבסיס החודשי נוח ביותר, מאחר שכך גם מאורגנים הנתונים (טבלה 1). המהלך השנתי של המשקעים על בסיס זה הוא פשוט: הכמות החודשית גדלה והולכת עד אמצע עונת הגשם, בחודש ינואר, ולאחר מכן היא פוחתת והולכת. על לב עונת הגשם נמנים שלושת החודשים: דצמבר, ינואר ופברואר, בהם יורדים כשני שלישים מן הכמות השנתית (תרשים 2). ללב העונה יש שני שוליים השווים, פחות או יותר, במשקלם; ראשית העונה, אוקטובר-נובמבר (סתיו) עם כ-15%

שבכמה תחנות גשם הכמות העיקרית תהיה שייכת לשנה אחת ובתחנות אחרות - לשנה העוקבת. 2. הדבר נוח עד מאוד גם לגבי איסוף הנתונים של אוגרי הגשם בנגב, המתבצע אחת לשנה. איסוף זה אינו חייב להיעשות בדיוק ביום המעבר, אלא יכול להידחות בימים אחדים. 3. הדבר מקל על אפיון עונת הגשמים. 4. הדבר מקל על הקישור להידרולוגיה, היות שבגלל ההתייבשות הקיצית, רטיבות הקרקע בראשית כל שנה הידרולוגית היא מזערית ולכן תנאי ההתחלה זהים בכל השנים. המחקרים על השתנותם של פרמטרים



תרשים 2: התפלגות המשקעים החודשית (עליון) והמצטבר (תחתון) בחפץ חיים, לשנים 1961-1990 (נתוני השירות המטאורולוגי, 1990)



תרשים 3: התפלגות המשקעים החודשית המצטברת לתל אביב (שדה דב [ריבועים]) וירושלים (מרכז [מעוינים]), לשנים 1961-1990 (נתוני השירות המטאורולוגי, 1990)

מחזוריים שבהם פרק החורב קודם לפרק הגשם, התקבל שמחזור הגשם השכיח הוא של 4 ימים בתל אביב ובירושלים (כצנלסון, 1956). פרק הגשם השכיח הוא יום אחד ובממוצע אורכו 2.5 ימים. פרקי הגשם קצרים בשולי העונה וארוכים במרכזה, על פי מהירות התנועה של השקעים הברומטריים ואפיקי הרום החולפים מעל לישראל. פרקי גשם ארוכים מעשרה ימים הם נדירים. פרק הגשם הארוך ביותר, בן 16 יום, נרשם בתל אביב ובענבתה שבשומרון (21 בדצמבר 1941 - 5 בינואר 1941). השיא הזה "נשבר" רק לאחר 50 שנה - 17 יום, בתחנת הגשם של אוניברסיטת חיפה (28 בינואר-13 בפברואר 1992; בטבעון נרשמו באותו אירוע 16 ימי גשם רצופים [קותיאל, 1993, דברים בעל-פה]).

עוד פרמטר חשוב, הוא מספרם של פרקי הגשם במשך השנה. כבר בסוף המאה התשע-עשרה נמצא, כי בעונת הגשם ישנם בממוצע 23 פרקי גשם בירושלים ורק לעתים נדירות עולה אורכו של פרק הגשם על שמונה ימים (Chaplin, 1883). בדיקה מחודשת של נתוני צ'פלין (Striem and Rosenan, 1973) הראתה, כי מספרם הממוצע של פרקי הגשם בשנה הוא 25.2, מספר הדומה מאוד לנתוני תל אביב - 25.5 פרקי גשם (Neumann, 1955). מסתבר כי ההבדל בין שנה גשומה לבין שנה

מגשמי השנה, ואחוז דומה בסוף העונה, בחודשים מרס-אפריל (אביב). לעומת ההשתנות המרחבית של אורך העונה, להשתנות המרחבית של המהלך השנתי של הגשם יש חשיבות ניכרת. תרשים 3 מציג את המהלך החודשי המצטבר של המשקעים, ומורה על פער של כ-20 יום בין תאריך אמצע עונת הגשם בתל אביב לזה של ירושלים. ההשתנות המרחבית של פרמטר זה אינה בכיוון צפון-דרום, אלא על פי המרחק מן הים.

ניתוח ההתפלגות של פרקי הגשם והחורב, הוא כלי יישומי חשוב. פרק גשם מוגדר בארץ, כרצף של ימים שבכולם ירדה כמות יומית של לפחות 0.1 מ"מ גשם. עם סיומו של פרק הגשם, שיכול להימשך גם יום אחד, מתחיל פרק חורב - רצף של היעדר גשם, שגם הוא יכול להימשך יום אחד. פרק גשם ואחריו פרק חורב, מוגדרים כמחזור גשם. קודם שנערכו סטטיסטיקות לפרמטרים האלה, העריך אשבל (1950), כי אורכו של מחזור גשם הוא כשבוע. העניין נבדק לגבי 27 שנות גשם בתל אביב (Neuman, 1955), ונמצא כי מחזור הגשם השכיח נמשך 5 ימים והממוצע הוא מחזור של שבוע. כן נמצא שמחזור גשם הוא בעל התפלגות גיאומטרית (Gabriel and Neumann, 1957) והתפלגות ימי הגשם מתאימה למודל הסתברות של שרשרת מרקוב (Gabriel and Neumann, 1962). כאשר נבדקו

הטוען כי ההתפלגות הנורמלית עדיפה על פירסון III, לוג-נורמל ולוג-פירסון III. התפלגות גשמי ירושלים, שעודכנו לתקופה של 100 שנה, מראה כי העובי השנתי השכיח (mode) הוא 480, החציון 544, הממוצע 560 מ"מ וסטיית התקן 142 מ"מ (Rosenan, 1955). ניתן לבטא את ההשתנות היחסית הרב-שנתית, באמצעות מקדם ההשתנות (סטיית התקן/ממוצע - באחוזים). ברוב הארץ ערכי מקדם ההשתנות הם בין 20% ל-40% וככל שנדרים ונתרחק מן הים, כן יגדל מקדם ההשתנות. לכן לא ייפלא שבנגב הערכים הם הגבוהים ביותר, כמו זה של אילת (84% ל-20 שנה).

את התלות שבין כמות הגשם השנתית ובין טמפרטורת עונת הגשם, בדק שטרים (Striem, 1974). הוא הראה לגבי נתוני ירושלים, כי ככל שהחורף קר יותר, כן משקעיו מרובים יותר (עלייה של 108 מ"מ בממוצע לכל ירידה של 1°). מקדם מתאם שלילי גבוה, נמצא גם כאשר חושבו קווי רגרסיה לשתי תת-תקופות של נתוני הגשם של ירושלים. יש לנקוט זהירות בתרגומו של מתאם זה, שמשמעותו הוא שחורף חם יהיה יבש וחורף קר יהיה גשום, כלומר, שכמות המשקעים תלויה בטמפרטורה ולא להפך. יש לציין, כי בישראל הטמפרטורה והמשקעים תלויים בגורם שלישי: שכיחות החדירה של אוויר קוטבי קר למזרח הים התיכון. חדירתו של האוויר הקוטבי גורמת לשקעים הנעים לאורך הים התיכון לנוע במסלול דרומי יותר. שקעים

יבשה אינו במספר פרקי הגשם השנתי הכללי דווקא, אלא בפרקים בעלי כמויות גשם גדולות (Neumann, 1955). מספר פרקי הגשם שיכולם קטן מ-50 מ"מ, הוא כמעט אחיד בכל 20 השנים - 14 פרקים (וסטיית תקן של 12 פרקי גשם) ותנובתם כ-187 מ"מ לשנה. לעומת זאת, בפרקי גשם שיכולם גדול מ-50 מ"מ, יש הבדל ניכר בין שנה גשומה לבין שנה יבשה: 5-6 פרקי גשם בשנה ברוכת משקעים, לעומת פרק אחד בממוצע לחמש השנים היבשות. פרקי גשם שיכולם גדול מ-50 מ"מ, נמשכים בדרך כלל יותר מ-48 שעות, ואפשר למייןם לשתי קבוצות:

- א. בעלי יכול עד 100 מ"מ, שהשכיח שלהם הוא 70 מ"מ, והמשך הממוצע 63 שעות.
- ב. בעלי יכול של יותר מ-100 מ"מ, הם נמשכים כולם יותר משלושה ימים, והמשך השכיח הוא 6-5 ימים.

חשיבותה של ההשתנות הבין-שנתית למשק המים בישראל, היא כבדת משקל. הבנתה הכרחית לתכנון חקלאי וענפים כלכליים אחרים, התלויים במזג האוויר וביכולי המשקעים. סעיף זה על חלקיו לא יעסוק בהשתנות הרב-שנתית ארוכת הטווח. התפלגות הגשם הרב-שנתי, ולא רק בארץ, אינה נורמלית (בעלת צורת הפעמון ה'גאוסית'), אלא יש לה אסימטריות חיובית (right skewed). בן-צבי (דברים בעל-פה) מצא, כי לעובי המשקעים השנתי פירוס לוג-נורמלי ובכך הוא סותר את רוזנברג,

טבלה 2: ערכים מרביים של כמויות הגשם החודשי (בעיקר לפי כצנלסון, 1956, וסיכום שנתי של עונת הגשם תשנ"ב 1991/2 של גף שירותי אקלים של השירות המטאורולוגי)

חודש	שנה	תחנה	כמות (מ"מ)
ספטמבר	1959	שער-העמקים	79
אוקטובר	1942	לוד	199
נובמבר	1938	רמת-גן	432
דצמבר	1991	חבצלת	628
ינואר	1969	מגדל-שמש ²	846
פברואר	1857	ירושלים	463
מרס	1953	קרית-ענבים	329
אפריל	1949	משגב-עם	263
מאי	1946	בית-ג'ן	133
יוני	1992	בית-ג'מל	48
יולי	1995	נהריה	31
אוגוסט	1990	עכו	17

² ברמת הגולן לרגלי החרמון. במירון ירדו באותו חודש 744 מ"מ.

יובש. ככל שנתקרב לשולי עונת המשקעים, השכיחות של חודש יבש תגדל ותלך.

נתוני המקסימום החודשיים מרשימים אולי יותר. טבלה 2, מביאה נתונים של החודשים המרביים (לפי כצנלסון, 1956, למעט הנתונים לחודשים דצמבר, ינואר ויוני). מן הנתונים הללו נמצא, שישנם חודשים בהם ירדה כמות גשם שעלתה על הכמות השנתית הממוצעת לאותה תחנה. לעתים נדירות יהיו דווקא החודשים אוקטובר ומאי, החודשים הגשומים ביותר לאותה שנה. לדוגמה, בסדום ירדו באוקטובר 1943 57 מ"מ ובמצפה שעל יד טבריה ירדו בחודש מאי 1923 109 מ"מ. ראוי לציין, ששני אירועים אלו אירעו בשקע הירדן, ובשולי העונה עשויים לרדת שם משקעים שמקורם באפיק ים סוף. הנתונים שבטבלה 2 ממחישים המחשה נוספת, כיצד במישור החוף עיקרם של המשקעים הוא בראשית העונה (עד דצמבר) ורק בהמשכה השיאים עוברים לאזור ההר. השיא של חודש יוני 1992 התווסף לזה של חודש דצמבר 1991 של אותה שנת גשם, שהיתה גם שנת שיא במרבית התחנות בארץ (חוץ מצפון רמת הגולן והחרמון) עם שיא שנתי כללי לישראל - 1,607 מ"מ במטולה ושיא למרכז הארץ - 1,537 מ"מ בחבצלת שעל יד רחובות. השיא הארצי המיוחד של חבצלת, הוא באחוז עובי המשקעים השנתי לעומת הממוצע הרב-השנתי, כ-280%!

אלו מביאים משקעים ומורידים את הטמפרטורות. בשל האוויר הקר שבא בעקבותיהם ובשל ההפחתה בקרינת השמש הנחסמת על ידי העננות, נגרמת הירידה בטמפרטורות. ערכי הטמפרטורות נשארים נמוכים, ככל שפרק הגשם מתארך. פרק גשם ארוך מאופיין, כאמור, בכמויות ובעוצמות גשם גבוהות. בשנה יבשה, כאשר אין מגיעים גושי אוויר קרים לאזורנו, הטמפרטורות נשארות גבוהות מן הממוצע. לכן בעת פרק גשם - הטמפרטורה נמוכה, ובעת פרק חורב - הטמפרטורה בדרך כלל גבוהה. הדבר מנוגד ניגוד גמור לרוב אזורי כדור הארץ, שכן בהם הגשם תלוי בטמפרטורה. המשקעים הקונוקטיים היורדים שם מקורם בתנאים של אי יציבות, הנגרמת בעיקר על ידי התחממות האוויר על ידי הקרקע. לכן באזורים אלו המשקעים יורדים בשעות החמות ביותר ביום.

ההשתנות הרב-שנתית של המשקעים החודשיים, גדולה מזו של הכמות השנתית. נביא תחילה מידע על ערכים קיצוניים של הגשם החודשי. בנתונים ארציים, בכל אחד מחודשי השנה, חוץ מינואר, נרשמה כמות חודשית של 0 מ"מ, (כצנלסון, 1956). ואשר לתחנות בודדות, כבר אירע שבתחנות מע'ר, תמרה, נצרת ומגדל (כולן בגליל התחתון, מלבד מגדל שבבקעת כנרת), לא ירדו משקעים בינואר 1955. בדצמבר ובפברואר אירועי יובש מוחלט נדירים. לעומת זאת, בחודשים האחרים נרשמו כמה וכמה אירועי

טבלה 3: ממוצעים חודשיים של כמות הגשם, מספר ימי הגשם וכמויות יומיות ממוצעות מעל לספים שונים ב-25 שנות גשם בתל אביב (מספר הימים מעל לסף היומי מתייחס ל-15 שנות גשם בתל אביב) (לפי כצנלסון, 1955)

חודש	כמות הגשם החודשית	מספר ימי הגשם	הכמות היומית הממוצעת	מספר ימים מעל לסף יומי	
				25 מ"מ	50 מ"מ
ספטמבר	1.6	0.8	2.0	-	-
אוקטובר	21.1	3.3	6.4	0.2	0.2
נובמבר	95.3	7.3	13.1	0.9	0.4
דצמבר	157.9	12.3	12.8	2.1	0.6
ינואר	141.5	14.4	9.8	1.3	0.2
פברואר	100.8	11.8	8.5	0.5	0.1
מרס	43.7	8.0	5.5	0.3	0.0
אפריל	13.9	3.7	3.8	0.1	0.0
מאי	3.2	1.4	2.3	0.0	0.0
שנתי	579	63	9.2	5.4	1.4

3.3 עוצמות המשקעים

אירועי שיטפונות מושפעים מכמה פרמטרים. מבחינים בשתי קבוצות פרמטרים - קבוצה אחת הכוללת גורמים גיאוגרפיים הנוגעים לפני השטח, כגון: גודלו של אגן הניקוז, סוג הסלע והקרקע (מידת החדירות למים), השיפוע, הכיסוי הצמחי ומצב פני השטח עם תחילת פרק הגשם (מידת הרוויה). הקבוצה האחרת כוללת את מאפייני הגשם, כגון: אורך פרק הגשם ועוצמת הגשם. עוצמת הגשם מוגדרת כעובי הגשם ליחידת זמן. שיטפונות רבים מושפעים מעוצמת הגשם, ויש אפוא חשיבות לידיעת ההתפלגויות הסטטיסטיות של משתנה זה. השיטפונות קשורים עם שימור הקרקע החקלאית, תכנון גשרים ורשתות ניקוז עירוניות ואחרות והם עלולים לגרום להצפת מערכות יישוביות ולהריסת תשתית תחבורתית, העשויות לקפד חיי אדם. נעסוק כאן תחילה בכמויות משקעים יומיות, ולאחר מכן בעוצמות המשקעים - עובי המשקעים ליחידת זמן וביחסי עוצמות-משך.

יחידת הזמן בת היממה נוחה ביותר לדיון, מאחר שזו יחידת הזמן התקנית למדידת כמות המשקעים בתחנות בעלות התקן הנמוך ביותר. מדובר אפוא בעובי משקעים שירדו ביממה תקנית ולא באירוע שהתרחש בתוך עשרים וארבע שעות רצופות. היממה התקנית בישראל מתחילה ומסתיימת בשעה 08:00, שעון ישראל.

נבחן תחילה, מהי הכמות היומית הממוצעת. אם נחלק את כמות המשקעים השנתית במספר ימי הגשם בתחנות השונות, נקבל כמות את הכמויות היומיות הממוצעות. במרכז הארץ ובצפונה (חוץ מאזורים שבמחסי הרוח) הכמות היומית הממוצעת היא כ-10 מ"מ ליממה. מדרום לקו הגשם השנתי 400 מ"מ ועד לקו 100 מ"מ, הכמות היומית פוחתת והולכת. התפלגות השכיחות (F) של הכמויות רחוקה מלהיות נורמלית. את הנתונים היומיים של התחנה הוותיקה בתל אביב, שפעלה ברחוב נחמני עשרים וחמש שנה (1925-1950), התאים כצנלסון (1955) למשוואה:

$$F(X) = 1870 \cdot 1.05^{-X} \cdot X^{-0.73} \quad (1)$$

X הוא עובי הגשם היומי (מ"מ). צורת ההתפלגות היא היפרבולית, כלומר ככל שהכמות היומית גדלה, כן קטנה השכיחות. לעומת האחידות היחסית של הכמות היומית

הממוצעת למשך השנה, הכמויות היומיות לכל חודש אינן מתפלגות באופן כה אחיד. טבלה 3 מציגה את הכמויות היומיות (בממוצעים החודשיים) של נתוני תל אביב. נראה כי לכמות הגשם ולמספר ימי הגשם, יש מהלך שנתי דומה: שיא הכמות היא בדצמבר ומספר ימי הגשם המרבי הוא בינואר. לעומת זאת, כמויות הגשם היומיות המרביות הן בנובמבר. חודש נובמבר ידוע כחודש העוצמות החזקות כפי שניזכר בהמשך. הדבר נובע מאי יציבות האוויר המגיע לישראל בראשית עונת הגשם מאירופה, בשעה שהיבשה עדיין חמה למדי.

לפי טבלה 4, בכ-12% מימי הגשם עולות הכמויות היומיות על 20 מ"מ. נדון עתה בכמויות יומיות גבוהות מסף זה. לפי נתוני תל אביב, בממוצע מופיעים 1.4 ימים לשנה בהם כמות הגשם היא לפחות 50 מ"מ ליממה (טבלה 3). אירוע כזה שכיח בדצמבר (החודש הגשום ביותר בתל אביב) יותר מאשר בנובמבר, שהוא החודש בעל כמויות המשקעים היומיות הממוצעות הגבוהות ביותר. מכאן יש להסיק, כי כמויות גבוהות יומיות קשורות במשקעים ממושכים דווקא, ולא בעוצמות גבוהות קצרות משך. לגבי הסף של 50 מ"מ ליממה, מביא כצנלסון (1955), את הכלל הפרדוקסלי שמצא רוזנן על פי נתונים שהתקבלו מתחנות גשם רבות, כי אף על פי שמספר הימים מעל לסף זה באזור ההר מרובים יותר מאשר במישור החוף, כמויות המשקעים היורדים בימים אלו במישור גבוהות יותר מאשר בהר. עובדה זאת מתיישבת היטב עם הממצא של רוזנפלד (1980), כי תאי עננים מעל מישור החוף המורידים משקעים בעלי אופי נקודתי יותר, הולכים ומאבדים את עוצמתם באזור ההר ומקטינים את מדד אי האחידות שלהם. רוזנפלד (1980) מציע הסבר לתופעה, כפי שהיא

טבלה 4: התפלגות השכיחות של כמויות הגשם היומיות (%) ל-25 שנות גשם בתל אביב (כצנלסון, 1955)

מרווח הגשם מ"מ	שכיחות %	מצטברת %
<4.9	55	55
5 - 9.9	17	72
10 - 14.9	10	82
15 - 19.9	6	88

שבין ה-8-9 בנובמבר 1955. באותו לילה ירדו 255 מ"מ בכפר-קאסם (מזרחית לראש העין). בגבעת השלושה, שעל יד פתח תקווה, ירדו באותו לילה 239 מ"מ ובגבעתיים 209 מ"מ. השיטפון בעל הספיקה המרבית בירקון לתקופת המדידות ההידרולוגיות (מאז 1939), אירע עקב גשם זה. באותו עניין, נציין כי מספר ימי הגשם בנובמבר 1955 היה הגבוה ביותר במאה העשרים - 17 יום, ופחות רק ביום אחד מן ה"שיא הישראלי" שנרשם בנצרת בנובמבר 1894 - 18 יום.

מאז שנות התשעים של המאה העשרים, נרשמו מספר אירועים של עוצמות גבוהות. אין בהם אמנם שיאים חדשים, אולם ייתכן כי ריבוי האירועים הללו תומך בהנחה, כי ההתחממות הגלובלית מקצינה את עובי המשקעים. מן הראוי לציין, כי מרבית האירועים דלהלן אירעו באזור הכרמל ובמישור הכרמל.

- ביום 9/12/91 ירדו גשמים בכרמל עם כמויות יממיות של 120-170 מ"מ. בכרם מהר"ל ירדו באותו יום 70 מ"מ תוך שעותיים.
- ביום 31/12/98 ירדו בכרם מהר"ל 226 מ"מ, בעופר 136 מ"מ, בעין כרמל 143 מ"מ, בעתלית 114 מ"מ ובהבונים 198 מ"מ. הגשם החל לפנות בוקר בשעות השייכות ליממת ה-30/12/98.
- ביום 24/10/00 ירדו בבית ים 160 מ"מ, חלק גדול מהם (למעלה מ-100 מ"מ) ירדו ב-25/10/00 לפנות בוקר.
- בימים 3-4/12/01 ירדו כמויות דו-יממיות גבוהות. בתחנה האוטומטית של זיכרון יעקב נרשמו 98 מ"מ ביממת ה-3/12 ו-150 מ"מ ביממת ה-4/12, בסך הכול 248 מ"מ בשתי היממות. רוב הגשם, 230 מ"מ, ירד ב-4/12 משעה 4:00 עד 17:00. בזיכרון יעקב (מד-גשם רגיל) ירדו 98 מ"מ ב-3/12 ו-188 מ"מ ב-4/12. במעין צבי ירדו 117 מ"מ ב-3/12 ו-174 מ"מ ב-4/12. בעמיקם ירדו 88 מ"מ ב-3/12 ו-116 מ"מ ב-4/12. בכרם מהר"ל ירדו 61 מ"מ ב-3/12 ו-88 מ"מ ב-4/12.
- ביום 31/12/01, ולמעשה במשך 8 שעות, ירדו בכרם מהר"ל 220 מ"מ.
- ביום 21/1/03 ירדו בשדה דב שבתל אביב, 80 מ"מ תוך 4 שעות, מהם 72 מ"מ תוך שעותיים.
- ביום 29/10/04 ירדו בנה אור 97-105 מ"מ (תוך שעותיים וחצי-שלוש. מרחק של 5 ק"מ בין

מתיישבת עם הדוגמאות המתקבלות על מכ"ם הגשם. בעת העלייה של האוויר הקר ליבשה, אי היציבות המותנית משתחררת בקווי התכנסות צרים ומרוחקים זה מזה, שבהם מרוכזות תנועות אנכיות. לעומת זאת, בעלייה בהר, אי היציבות המותנית הופכת לאי יציבות עם קווי התכנסות קרובים זה לזה, המתחרים על אספקת הלחות. מסיבה זאת אין הכמויות היומיות באזור ההר מגיעות לכמויות המשקעים שבמישור החוף, ולכן גשמי ההרים אחידים יותר ונרחבים עם הירידה בכמויות.

בסף יומי של 100 מ"מ, למשל, השכיחות באזור ההר קטנה עד לאירוע יחיד בשנים עשרה שנה. לעומת זאת, אפשר לצפות לאירוע כזה בתל אביב אחת לארבע שנים (כצנלסון, 1968). ראוי לציין, כי בשקע הירדן שבו שכיחים שיטפונות, כמו בטבריה, לא נרשם אף מקרה של כמות כזאת. מקרה בודד וחריג נרשם במצפה' ב-11 במאי 1923, בה ירדו 109 מ"מ (בתוך 90 דקות בלבד!). כאן כדאי להעיר, כי מבין 50 התחנות שרוזנברג (1990) בדק את התפלגותן והתאימן להתפלגויות תיאורטיות שונות, זו התחנה היחידה שהתפלגות הרב-שנתית שלה לא התאימה לאף אחת מהן. אירוע יוצא דופן של 105 מ"מ ליממה, היה בתל אביב ב-20-21 בדצמבר 1951 בה ירד גשם 20 שעות ברציפות (כצנלסון, 1955), שהוא משך-שעתי הארוך ביותר הידוע בארץ. ראוי לציין, כי הממוצע השעתי לא היה יוצא דופן - כ-5 מ"מ לשעה, וזהו לממוצע לשעת גשם בתל אביב.

אירועים של משקעים של יותר מ-150 מ"מ ליממה הם יחידים, וכצנלסון (1955) מפרט את כולם עד לשנת הפרסום. נזכיר כאן את ה-6 בנובמבר 1938 שבו נמדדו 170 מ"מ בלוד (ב-24 שעות שאינן מתחילות דווקא ב-08:00 - באמצעות מד-גשם רושם - נרשמו באותו תאריך ובאותו מקום 191 מ"מ). באותו יום נמדדו בעשר תחנות כמות העולה על 150 מ"מ וביפו נמדדו 202 מ"מ. ה"שיא הישראלי" של כמות המשקעים היומית, נמדד בטכניון בחיפה ב-9 בדצמבר 1921 והוא 272.5 מ"מ. יש יסוד לקבל את המקסימום היומי המוחלט הזה, מאחר שבתחנות קרובות באותו יום נרשמו ערכי גשם שאינם נופלים בהרבה משיא זה (כמו בכרמל - 245 מ"מ). המקסימום היומי הקרוב ביותר לזה של הטכניון, התקבל בלילה

השעתית הרגעית היא עובי גשם שירד ביחידת זמן כלשהי, שתוקנה ליניארית לזמן של שעה. אם לדוגמה ירדה כמות של 5 מ"מ במשך עשר דקות, העוצמה הממוצעת לאותן 10 דקות היא 30 מ"מ לשעה, ואילו העוצמה השעתית הממוצעת היא 5 מ"מ לשעה. עיקר השימוש בעוצמה השעתית הרגעית הוא לצרכים קלימטולוגיים, ומנותחות כל העוצמות (ובכלל זה עוצמות נמוכות), אולם רק לפרקי הזמן שבהם ירד הגשם בפועל. לכן על פי רוב, מטפלים בעוצמת גשם קבועה ופרק הזמן משתנה (ראה בהמשך על העבודות של קותיאל ושרון). בדרך ניתוח מסוג זה אפשר ללמוד, למשל, על המשתנים המטאורולוגיים שגרמו לגשם. מאחר שהיווצרות הנגר תלויה בהפרש בין עוצמת הגשם לכושר החידור של הקרקע, מהלך העוצמות הרגעיות חשוב כדי להעריך אם נוצר נגר וכמה נגר נוצר. לצרכים הידרולוגיים-הנדסיים הקשורים בתחומי התנקזות קטנים (כגון, תכנון מעביר מים שיהיה מסוגל להעביר עוצמות שיא), מטפלים בפרק זמן שנקבע לפי הנתונים ההידרולוגיים, והעוצמות הממוצעות לפרק זמן זה אשר צפויות להופיע לתקופות חזרה רצויות. למטרות הידרולוגיות-הנדסיות,

שתי הנקודות), בירדנה 47.2 מ"מ, בגשר 34.1 מ"מ ובמעוז חיים 29.0 מ"מ. באותו יום ירדו בסדום 74 מ"מ.

● ביום 17/12/05 נמדדו בתחנה האוטומטית של זיכרון יעקב 108 מ"מ, מהם 94 מ"מ תוך 4 שעות. בזיכרון יעקב (מד-גשם רגיל) ירדו 135 מ"מ, בעמיקם 79 מ"מ, בכרם מהר"ל 68 מ"מ ובבנימינה 26 מ"מ.

● ביום 2/4/06 ירדו 114 מ"מ באום אל פחם, מרביתם תוך שעותיים. בעין השופט ירדו באותו יום 119 מ"מ בתוך הקיבוץ, אבל רק 78 מ"מ בתחנה האוטומטית שנמצאת בנקודה אחרת. ברמות מנשה ירדו 75 מ"מ וברמת השופט 42 מ"מ. בתחנה האוטומטית של עין השופט נמדדו 78 מ"מ תוך כ-4 שעות.

3.3.1 עוצמות שעתיות

דיון בעוצמות שעתיות או בעוצמות לפרקי זמן קצרים מהן, מחייב התבססות רק על תחנות גשם המצוידות במד-גשם רושם. יש לתת את הדעת כי לעומת הכמות היומית, לעוצמה השעתית יש שתי משמעויות: עוצמה שעתית רגעית (instantaneous intensity) ועוצמה שעתית ממוצעת. העוצמה

טבלה 5: התפלגות הגשם (%) החודשי הקונוקטי (30 > מ"מ/שעה) בתחנות שונות (קותיאל, 1978) (השיא בכל תחנה מסומן בקו תחת וּשְׁתֵּי התחנות בעלי השיאים החודשיים מודגשים)

תחנה	ספט'	אוק'	נוב'	דצמ'	ינואר	פבר'	מרס	אפריל	מאי
נהריה	0.0	33.9	35.4	19.7	9.1	14.4	14.1	13.3	16.2
הר כנען	0.0	20.3	11.2	3.8	0.2	0.6	1.9	2.4	4.2
דגניה א'	43.5	42.8	21.7	6.6	5.0	7.9	11.9	22.1	34.6
מעוז-חיים	-	2.8	34.5	1.9	4.8	2.9	1.0	13.1	22.2
עין-החורש	0.0	44.4	22.6	19.3	14.2	20.9	17.3	22.5	12.0
ע'ור-פרעה	-	0.0	9.1	0.4	2.9	3.8	18.6	4.4	0.0
ת"א (רדינג)	0.0	45.7	31.5	24.1	17.3	21.7	19.6	23.0	0.0
ירושלים	0.0	12.5	9.6	1.3	0.9	2.3	2.1	0.4	9.4
דורות	-	33.8	22.0	9.8	5.3	3.8	15.0	25.7	0.0
בארי	-	38.9	27.0	12.3	5.6	6.1	8.9	23.2	-
להב	0.0	29.4	15.1	4.0	5.0	5.8	4.2	17.3	0.0
באר-שבע	-	43.9	14.3	4.9	2.2	7.3	9.5	5.1	12.3
ערד	-	26.7	5.7	0.7	1.3	1.1	2.4	5.8	0.0
סדום	-	0.0	25.3	12.0	4.8	3.2	5.4	48.3	25.9
מצפה-רמון	-	2.8	40.2	2.4	4.6	1.6	3.1	8.9	72.6
אילת	-	76.0	53.6	18.2	5.5	13.8	0.0	15.3	10.3

3.3.2 יחסי עובי-משך

החשיבות שיש לעוצמות גשם למטרות יישומיות, ממריצה קלימטולוגים והידרולוגים רבים לחקור את השתנות העוצמות במשכים שונים. מקובל כיום לקשור את עובי הגשם המרבי שנמדד בתחנה בכל תקופת התצפיות בה, X (במ"מ), למשך הגשם, D (בשעות), בעזרת הנוסחה הכללית הזו:

$$X = K D^n \quad (2)$$

כאשר K מקדם ו- n מעריך. ערכו של המעריך הוא בדרך כלל עד 0.5, מאחר שעוצמות גבוהות אינן נמשכות זמן רב. ישימותה של משוואה (2) מוגבלת לשעתיים וחצי. בבדיקה מעמיקה יותר נמצא, כי המשוואה תקפה ל-9 שעות במישור החוף המרכזי, לשעתיים בכרמל ורק לשעה בעמק הירדן (שיין ובורס, 1970).

למרות ההתאמה הטובה של ערכי המקסימום בתחנות שונות, אין משוואה (2) יכולה לענות תמיד על דרישות המתכנן. בגישה יישומית נקטו שיין ובורס (1970; Schien and Buras, 1973), בכך שניתחו את יחסי עובי-משך-הסתברות. פרמטר זה משמש ככלי בסיסי בכל תכנון הדורש התייחסות לעוצמות גשם. הם השתמשו ביחידת זמן קבועה (15 דקות). ניתוח ההסתברויות נעשה בעזרת שתי התפלגויות: לוג-נורמל וגמבל, ובאמצעות הורכבו עקומי עובי-משך עבור הסתברויות השגה של 1%, 5%, 20%, 50% ו-80% (המתאימות לתקופות חזרה של 2, 5, 20, 50 ו-125 שנים, בהתאמה). דלינסקי (1977), הכין טבלה המסכמת את הסתברויות ההשגה למשכים שונים, לתחנות הגשם ולסדרות הנתונים של שיין ובורס (1970). הוא מראה, שאפשר לחשב משך רצוי לתקופת חזרה דרושה, באמצעות פונקציה חסרת ממדים ותלויה בפרמטר אחד - המעריך n . מסקנה זו מתבססת על הממצא שלו, כי עובי הגשם תלוי במשכו וכמעט אינו תלוי בתקופת החזרה. פירוט שיטותיהם של שיין ובורס (1970) ושל דלינסקי (1977), ממצאיהם ומפות לאזורים השונים בארץ, ניתן למצוא אצל גולדרייך (1998) ו-Goldreich (2003).

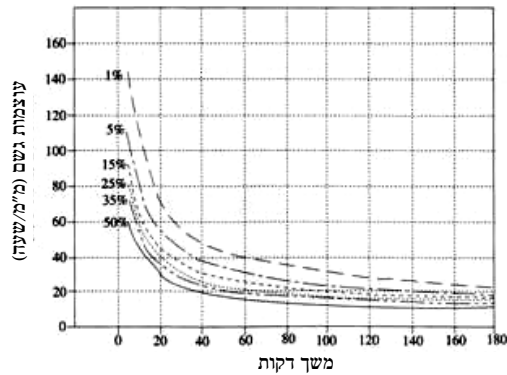
העבודות של שיין ובורס (1970) ושל דלינסקי (1977), מתבססות על עיבוד נתונים ידני מתוך רישומי גשם. בשל החשיבות הרבה שיש לנתונים הללו ולרמת דיוקם, נערך מבצע מקיף של פענוח ספרתי (עם דיוק עד חמש דקות) של הרישומים הללו,

בהן נחוץ להעריך את מהלך זרימת הנגר בתחומי התנקזות בינוניים וגדולים, משתמשים בעוצמות השעתיות הממוצעות.

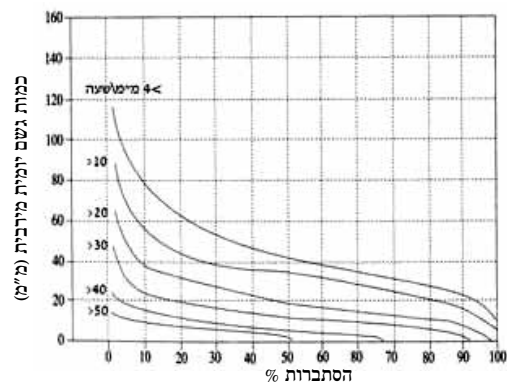
נחשבתחילה את העוצמות השעתיות הממוצעות. אם נחלק את הכמות השנתית הממוצעת של תל אביב (579 מ"מ, טבלה 3) ומספר ימי הגשם (63) ב-120 שעות הגשם השנתיות, נקבל כי בממוצע יורדים כ-5 מ"מ לשעת גשם, וביום גשם יש בממוצע כשתי שעות גשם.

ניתוח ההשתנות המרחבית והעתית של עוצמות גשם רגעיות של יותר מ-20 מ"מ לשעה (קוטיאל 1978; Sharon and Kutiel, 1986), נעשה ב-16 תחנות. טבלה 5 מראה את התפלגות החודשית של אחוז עוצמות הגשם מעל 30 מ"מ לשעה. סף עוצמה זה, נחשב לגבול של משקעים היורדים בתנאים קונוקטיים. משקעים אלו מכונים ממטרים מקומיים בעלי משך זמן קצר ועוצמה גבוהה. הגדרה זאת אינה משקפת נאמנה את המשקעים היורדים בחלקים הצפוניים של ישראל, ומקורם בעיקר מחזיתות קרות ומגוש האוויר הקר שבה בעקבותיהן, ולהם אופי רציף ועוצמות נמוכות. לפי השיא החודשי בכל תחנה (המצוין בקו תחתית) שבטבלה 5, נוכל להבחין, כי בראשית העונה ובעיקר בחודש אוקטובר, אחוז הגשם הקונוקטי גבוה יותר מאשר בהמשך העונה. עובדה זאת אינה סותרת את נתוני טבלה 3, המראים כי הכמות היומית הגבוהה יורדת בחודש נובמבר. שתי התחנות בהן האחוז גבוה מזה שבתחנות האחרות בכל חודש, הודגשו בטבלה 5. כמה מסקנות אפשר להסיק מטבלה זו, וכולן תומכות בעובדות שהגענו אליהן גם בדרכים אחרות:

- אחוז המשקעים הקונוקטיים גבוה בתחנות המדבריות, עובדה העומדת בניגוד לכמויות היומיות.
- אחוז המשקעים הקונוקטיים גבוה במישור יותר מאשר בהר. במישור החוף כ-20% אחוז מן המשקעים הם קונוקטיים, לעומת 3% בהרים. קביעה זאת אינה עומדת בסתירה לעובדה, שהכמות השנתית גבוהה בהר מאשר במישור.
- אחוז המשקעים הקונוקטיים במישור החוף, גבוה במיוחד בתל אביב. השוואה עם נהריה מראה, כי חוץ מחודש נובמבר, תל אביב "מובילה". כאן כנראה משפיעה העיר המגבירה את אי היציבות.



תרשים 4: הסתברות של עוצמות גשם מרביות לזמן נתון בנגבה, לשנים 1989-1950, (מורין וח' 1998)



תרשים 5: הסתברות של כמויות מרביות של גשם יומי (מ"מ) מעל לעוצמה נתונה בנגבה, לשנים 1989-1950, (מורין וח' 1998)

ליד מישור האידוי ומחליפה אותו באוויר יבש יותר. נוסף כאן שני גורמים משניים המגבירים את ההתאדות: מצב לחץ אוויר נמוך מגביר יותר ממצב של לחץ אוויר גבוה, ומים מתוקים מתאדים בשיעור רב יותר מזה של מים מליחים.

ההתאדות הריאלית בקיץ ובין אירועי הגשם בחורף, מייבשת את הקרקע ובכך משפיעה על היווצרות הנגר ועל היחס בין גשם לנגר. גולדשמידט (לא פורסם) מצא, כי בנחלי הגליל מתחילות הגאוויות רק לאחר שיורדים שם 250 מ"מ. בן-צבי (1988) מצא, כי הגאוויות בנחל חצור מתחילות לאחר שירדו שם 230 מ"מ (ממוצע לתחנות הר כנען ואילת השחר) ולחידוש הגאוויות נחוצים 2 מ"מ גשם לכל יממה של פרק החורב. נתון זה דומה מאוד להתאדות גיגית בחודשים ינואר-פברואר (לסט, 1978).

אין כיום דרך ישירה למדוד את ההתאדות מפני השטח היבשתיים (בלי ועם כיסוי צמחי - אידוי-דיות [evapotranspiration] או הימיים.

לעשרות תחנות גשם המייצגות את מרבית אזורי הארץ (מורין וח' 1998). החומר הרב מרוכז בסרטים מגנטיים ובתקליטונים במחלקת האקלים של השירות המטאורולוגי ומעובד באופנים שונים (תרשימים וטבלאות). מידע זה מאפשר לימוד על התפלגות כלל עוצמות הגשם, התפלגות מעל לסיפים נבחרים ובהסתברויות שונות. תרשימים 4 ו-5 הם דוגמאות מתוך העיבוד הספרתי לתחנת נגבה (לשנים 1989/90-1950/51). תרשים 4 מאפשר לקבוע את ההסתברות של עוצמת גשם מרבית ממוצעת למשך זמן נתון, בעונת המשקעים כולה ובתתי עונה. לדוגמה, עבור כל העונה, העובי המרבי ל-20 דקות בהסתברות השגה של 5% (תקופת חזרה של 20 שנה) בנגבה, הוא 55 מ"מ לשעה. יש תרשימים דומים גם לקבוצות החודשים: אוקטובר-דצמבר, ינואר-פברואר ומרס-אפריל. ראוי לציין, כי מאחר שבעונת הסתיו מרוכזים מרב האירועים של העוצמות הגבוהות, ערכי העוצמות לחודשים אוקטובר-דצמבר קרובים מאוד לערכי העוצמות השנתיים (תרשים 4). תרשים 5 מטפל בהסתברות של כמויות גשם יומיות מעל לסף ולעוצמה נתונים בכל עונת הגשם. מאחר שרק בחלק קטן ממשך הגשם העוצמה גבוהה, ככל שסף עוצמת הגשם גבוה יותר, כן תהיה הכמות היומית המרבית נמוכה יותר. גם בפרמטר זה רב הדמיון בין הנתונים השנתיים לאלו של עונת הסתיו (אוקטובר-דצמבר).

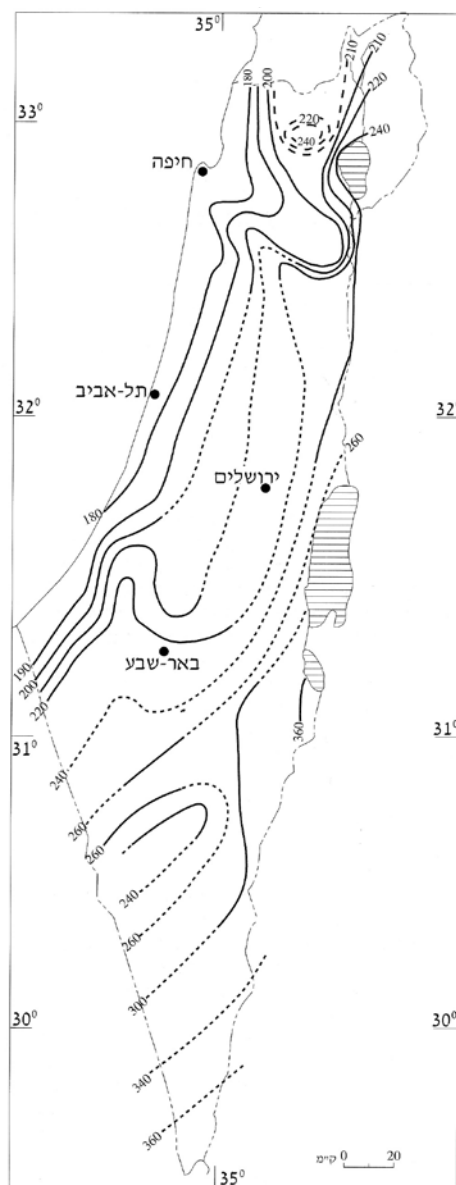
4. ההתאדות

פרמטר ההתאדות, אינו נכלל בפרמטרים הדרושים לחיזוי מזג האוויר. לכן מדידות ההתאדות מעניינות בעיקר את אנשי המטאורולוגיה החקלאית, ההידרולוגיה, ההשקיה והניקוז. ההתאדות תלויה בזמינות של מים ואנרגיה ובאפשרות הקליטה באוויר של אדי המים. היא מתקיימת כאשר מועברת אנרגיה למישור אידוי וכאשר האוויר אינו במצב של רוויה. לכן טמפרטורה גבוהה של האוויר וקרינה ישירה, מגבירים את ההתאדות. ההתאדות תגבר ככל שהאוויר יהיה יבש יותר. גורם נוסף המגביר את ההתאדות, הוא מהירות הרוח: ככל שהרוח חזקה יותר (עד לסף של 4 מ' לשנייה [8 קשר] - מעל לסף זה שיעור ההתאדות נשאר קבוע) - ההתאדות חזקה יותר. הרוח תורמת להתאדות בכך, שהיא מסירה את האוויר הלח שהצטבר

התחליפים, שאינם מוצלחים ביותר, שיוזכרו בהמשך, אינם מבטאים את מידת ההתאדות האקטואלית המדויקת, אלא את ההתאדות הפוטנציאלית. נוסחת פנמן היא המקובלת ביותר בעולם להערכת ההתאדות הפוטנציאלית. יישומה מתבסס על נתונים מדודים של קרינה, לחות האוויר ומהירות הרוח. עד לשנות השישים מדדו בארץ את ההתאדות בעזרת צינור פיטש, שהוצב בתוך הסוכה המטאורולוגית. מפות ההתאדות של אשבל (1950, 1957), מבוססות על נתוני צינור פיטש, וכדי להתאים נתונים אלו למידת ההתאדות של שטחי מים גלויים ומתוקים, הם הוכפלו ב-0.5. כיום מודדים בארץ את ההתאדות מגיגית (סוג א') המוגנת ברשת, בייחוד כדי למנוע מבעלי חיים לשתות את המים. כדי להפוך את נתוני ההתאדות מן הגיגית להתאדות משטח מים פתוח, יש להכפילם ב"מקדם הגיגית" - 0.7 (Stanhill, 1970).

הקשר שבין ההתאדות מגיגית לאידוי-דיות משדה חקלאי, מורכב ביותר. ערכי ההתאדות מגיגית קרובים יחסית לאידוי-דיות הפוטנציאלי, הרחוק מלהיות המצב האופייני של הגידול החקלאי. תנאי רטיבות הקרקע של הגידול החקלאי בדרך כלל, פחותים מיכולת הקיבול של השדה. היחס שבין ההתאדות מגיגית לאידוי-דיות תלוי בגורמים האלה: סוג הגידול והזן, גילו, שיטת ההשקיה, סוג הקרקע ועוד. יש לציין כי היחס (גיגית\אידוי-דיות), שערכו הוא חצי בקירוב בפרדסי הדרים, משתנה גם עם עונות השנה.

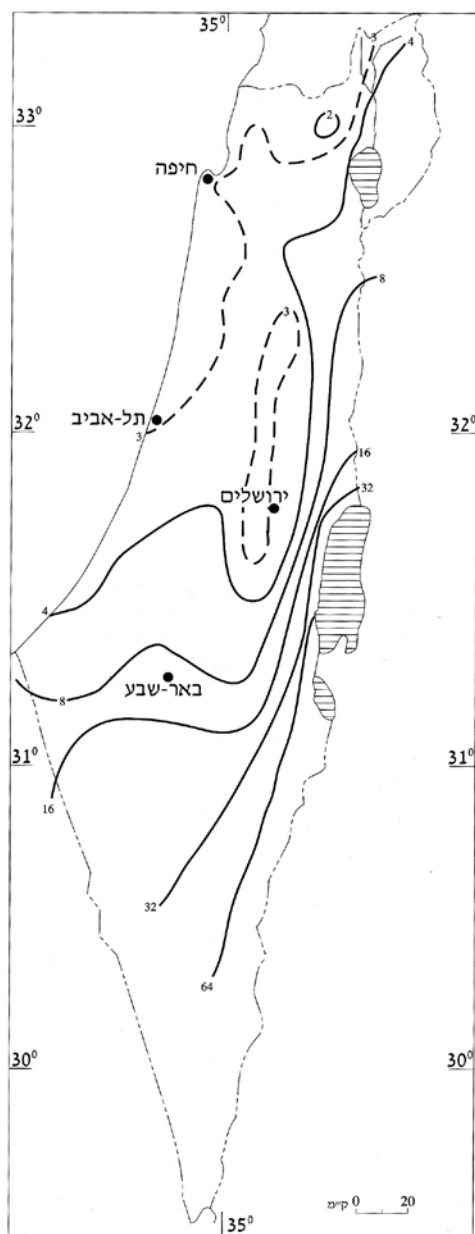
תרשים 6 מציג את ממוצעי התאדות הגיגית השנתית לתקופה 1955 - 1973 על פי 88 תחנות (לסט, 1978). מפה זו, אינה דומה למפה של אשבל



תרשים 6: מפת ההתאדות השנתית (ס"מ) מגיגית (לסט, 1978), class A

טבלה 6: ההתאדות החודשית (מ"מ) והשנתית (ס"מ) מגיגית סוג א' לתקופה 1969-1974 (גת, 1982)

תחנה	ינו'	פבר'	מרס	אפריל	מאי	יוני	יולי	אוג'	ספט'	אוק'	נוב'	דצמ'	שנתי
נהריה	62	69	105	134	161	179	192	185	157	115	79	62	150
בית-דגן	56	68	108	149	192	210	217	206	174	133	82	57	165
סער	68	75	123	155	203	216	221	210	177	141	93	71	175
באר-שבע	74	93	143	198	255	282	289	265	215	172	112	75	217
דפנה	64	75	112	134	201	243	264	243	210	157	94	64	186
טירת-צבי	62	75	117	176	263	302	323	302	243	173	105	65	221
יריחו	75	95	152	204	289	315	327	300	235	178	104	67	234
סדום	136	156	245	303	398	426	457	421	353	281	190	139	351
אילת	130	155	232	295	389	431	446	421	350	265	182	136	343



תרשים 7: מפת היחס בין ההתאדות השנתית לכמות המשקעים השנתית (התאדות\משקעים) במרווח גיאומטרי, (לפי צ'צ'יק, 1987)

שבחורף (1.53 באוגוסט לעומת 1.37 בינואר). הפרש יחסים זה מתאים להבדלי הטמפרטורה שבין

(1950) המבוססת, כאמור, על צינור פיטש, ואף שונה ממפת ההתאדות שבאטלס ישראל (1985). ההבדל בין המפות נובע מכך, שבאטלס הותאמו נתוני הגיגית להתאדות ממקור מים נרחב (אגם מים מתוקים), והלחות מעליו גבוהה יותר מזו שמעל לגיגית, ולכן ההתאדות מן האגם יותר נמוכה. לפי נתוני תרשים 6, ההתאדות גדלה והולכת ככל שמתרחקים מן הים. יתר על כן, במרומי הגליל העליון הקר, ככל שעולים בגובה - כן גדלה ההתאדות.

לסט (1978), מפרטת את נתוני כל התחנות ואת שיטת התקנון לזמן אחיד - באמצעות נתוני ההתאדות של קבוצת יבנה. השוואה בין נתוני תחנת נהריה לאלו של סאסא וטירת-יעל שבמרומי הגליל העליון, מראה כי נתוני התחנות ההרריות גבוהים מאלו של נהריה. המיקום המדויק והתנאים המיקרו-אקלימיים של התחנות, משפיעים לא פחות מן הגובה והקרבה לים. לסט מציינת, כי גיגית ההתאדות של נהריה חסומה לרוח ממרבית הכיוונים. בסאסא התחנה היתה פתוחה רק לצד דרום בתחילה, ולאחר מכן חופשית לכל הצדדים. בטירת-יעל ההצבה היא חופשית, וניכר יתרון לריבוי ההתאדות בזכות מיקום התחנה על מדרון דרומי. הדעת נותנת, כי נתוני נהריה בהצבה חופשית ונתוני טירת-יעל שלא על מדרון דרומי, יהיו קרובים יותר זה לזה. מכל מקום, נראה כי השפעתם של הפרמטרים המטאורולוגיים בהגברת ההתאדות בהרי הגליל (הקרינה הגבוהה, היובש, הרוחות החזקות ולחץ האוויר הנמוך), עולה על השפעתה של הירידה בטמפרטורה עם הגובה בהפחתת ההתאדות. הסבר זה אינו עונה על השאלה, מדוע לפי תרשים 6 יש עלייה בהתאדות עם הגובה בגליל, ואילו בהר הנגב יש ירידה עם הגובה? ייתכן כי ההבדל בין הרי הגליל לנגב שבתרשים 6, נובע מן ההבדל במהירות הרוח הממוצעת הגבוהה יותר בגליל.

לפי נתוני לסט (1978), יחס ערכי ההתאדות בין מישור הגליל לבין הרי הגליל, גדול בקיץ מזה

טבלה 7: ממוצעים ארציים של ההתאדות החודשית יחסית (איזומרים) והסטייה היחסית הממוצעת (דלינסקי, 1971)

פרמטר	ינו'	פבר'	מרס	אפר'	מאי	יוני	יולי	אוג'	ספט'	אוק'	נוב'	דצמ'	שנתי
ממוצע	3.7	4.3	6.1	8.2	11.0	13.1	13.2	12.2	10.4	8.0	5.7	4.1	100
סטייה	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.7	0.6	0.6	0.5	0.3	0.5	0.5	-

השנתית של הגשם, ההשתנות של הטמפרטורה וההשתנות של הקרינה. פאזת הזווית של ההתאדות (ששיאה ביולי), מאחרת בחצי חודש אחרי זו של הקרינה (שיא ביוני-יולי) ומקדימה, כאמור, בחודש את שיא הטמפרטורה. נוכל להסיק, כי גם לקרינה יש חלק בכך ששיא ההתאדות החודשית אינו נרשם באותו זמן בו נרשם שיא הטמפרטורה.

הדבר הבולט ביותר בתרשים 6 ובטבלה 6, הוא הפער שבין ערכי ההתאדות בסדום ובאילת לעומת מישור החוף. ההתאדות השנתית במישור החוף גדולה פי ארבעה מאשר בלונדון, אולם היא שווה רק למחצית ההתאדות השנתית באילת. לפי טבלה 6, בקיץ ההפרש גדול יותר מאשר בחורף. היחס המרשים שבין ההתאדות בחלקי הארץ השונים, מתגמד לנוכח המנות של ההתאדות למשקעים. תרשים 7 מציג את מפת המנות הללו. בגליל העליון ההתאדות מגיגית גבוהה פי שניים מכמות המשקעים. ככל שמדרימים ומתרחקים מן הים, כן פוחתת כמות הגשם ועולה כמות ההתאדות. בערבה גדולה ההתאדות השנתית יותר מפי 64 (באילת פי 137!) מכמות המשקעים השנתית (צ'צ'יק, 1987).

5. סיכום

מאזן המים תלוי בעובי הגשם ובהתאדות. העובדה שעובי ההתאדות עולה פי כמה על עובי המשקעים, אינה מקטינה את בעיות הניקוז, מאחר שהמשקעים מרוכזים בעיקר בשלושה חודשים ועוצמות הגשמים גבוהות יחסית. המסלע המחלחל ואגני הניקוז הקטנים יחסית בישראל, ממתנים את עוצמות השיטפונות באזורים הים תיכוניים. לא כן הדבר בנגב; עובי של 5 מ"מ גשם בתנאי אחוז נגר עילי גבוה, עשוי לגרום לשיטפונות באגני הניקוז הגדולים שם. ההערכות בישראל לתוצאות של ההתחממות הגלובלית מצביעה, לפי מספר תרחישים, על האפשרות של התגברות עוצמות הגשם ובעקבותיה הגברת של פוטנציאל השיטפונות. תרחישים אלו מוסיפים על האתגר העומד בפני הגופים העוסקים בניקוז ובשיטפונות.

מראי מקומות

אטלס ישראל (1985). אגף המדידות, משרד הבינוי והשיכון (מהדורה שלישית).
אשבל, ד' (1950). אטלס ביו-אקלימי לארץ-

המישור ובין ההר, הגדולים יותר בחורף מאשר בקיץ. בהרי יהודה אין ניכרת השפעת הגובה, וכמו בכל הארץ, הגורם המרחבי המגביר את ההתאדות הוא ההתרחקות מן הים. עמק יזרעאל בולט בתרשים 6, בהתאדות הנמוכה יותר מן ההרים שמסביבו. אפשר שההשקיה והאידוי-דיות המגבירים את הלחות וכן מי הגשמים, שניקוזם בעמקים נופל מזה שבהרים שמסביבם, מקטינים את ההתאדות מן הגיגית.

טבלה 6, מביאה את נתוני ההתאדות החודשית והשנתית למבחר תחנות. הנתונים השנתיים של טבלה זו שונים מאלו של תרשים 6. במישור החוף נתוני המפה גבוהים ב-10%-15% ובפחות מ-10% בשאר חלקי הארץ. על הקושי בהשוואתם של נתונים רב-שנתיים של ההתאדות, הצביעה צ'צ'יק (1979). לסט (1978) מציינת, כי החל בשנת המדידות 1963/4, חלה ירידה של ממש בנתוני ההתאדות של קבוצת יבנה ומגמה זאת ניכרת גם בתחנות אחרות. סטנהיל (1982; 1992) דברים בעל-פה, בדק את סדרות ההתאדות, וטוען כי בתחנות התאדות רבות בארץ מסתמנת מגמת ירידה כעבור שנתיים או שלוש שנים. הוא מסביר זאת, בשינוי הסובב על יד התחנה. בעת הקמת התחנה והצבת הגיגית, התנאים הסביבתיים הם אופטימליים. אולם במשך הזמן, איכות ההצבה יורדת והגיגית נחסמת בפני הרוחות על ידי צמחייה, מבנים ומטלטלים. פעמים רבות נהיה השטח הפתוח שעל יד התחנה המטאורולוגית למגרש גרוטאות. במקרה כזה נפגעים נתוני ההתאדות יותר מפרמטרים אחרים הנצפים באותה תחנה. נראה שעם הגידול במספר תחנות ההתאדות ובמספר שנות המדידה ושיפור איכות הנתונים, יצטמצמו את ההבדלים בין התחנות.

ההתאדות המרבית נרשמה בחודש יולי בכל התחנות, אף על פי שחודש אוגוסט חם מילוי. היום הארוך יותר והרוחות החזקות יותר ביולי מאלו של אוגוסט והלחות באזורי ההר ושקע הירדן הגבוהה יותר באוגוסט, חוברים יחדיו ומשפיעים יותר מהפרש הטמפרטורות שבין שני החודשים. דלינסקי (1971), חישוב איזומרים של התאדות חודשית ל-47 תחנות וכן איזומרים עבור כלל התחנות הללו (טבלה 7). המהלך השנתי של "ההתאדות הארצית", חופף כמעט בשלמות לגל סינוס (הרמוניה ראשונה), בדומה להשתנות

- רוזנברג, מ' (1990). השפעת זריעת העננים על הגשם הטבעי ועל הנגר העילי בישראל (שלב 1). נציבות המים, משרד החקלאות והחוג לגיאופיסיקה, אוניברסיטת תל אביב.
- רוזנפלד, ד' (1980). אפיון מערכות ענני גשם בישראל באמצעות ראדאר ותמונות לוויינים. עבודת מוסמך, החוג למדעי האטמוספירה, האוניברסיטה העברית.
- שיין, צ'; בורס, נ' (1970). ניתוח עוצמות גשם בישראל. פרסום 92, הפקולטה להנדסה חקלאית, הטכניון, חיפה.
- שרון, ד' (1978). ממד אי הוודאות בגשמי הנגב. **טבע וארץ**, כ: 153-155.
- שרון, ד' (1979). גשמים מקומיים בערבה. בתוך: שמואלי, א'; גרדוס י' (ע'), **ארץ הנגב**. משרד הביטחון, תל אביב: 117-124.
- Ben-Zvi, A. (1988). Enhancement of runoff from a small watershed by cloud seeding. **J. Hydrol.**, **101**: 291-303.
- Chaplin, T. (1883). Observations on the climate of Jerusalem. **Pal. Explor. F. & Quart. Statement**: 8-40.
- Gabriel, K.R.; Neumann, J. (1957). On a distribution of weather cycles by length. **Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.**, **83**: 375-380.
- Gabriel, K.R.; Neumann, J. (1962). A Markov chain model for daily rainfall occurrence at Tel-Aviv. **Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.**, **88**: 90-95.
- Goldreich, Y. (2003). **The Climate of Israel, Observation, Research and Application**. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, NY.
- Kutiel, H.; Sharon, D. (1981). Diurnal variation in the spatial structure of rainfall in the Northern Negev Desert Israel. **Arch. Meteorol. Geophys. Biokl.**, **29B**: 239-243.
- Neumann, J. (1955). On the frequency distribution of dry and wet spells at Tel-Aviv. **Bull. Res. Counc. Isr.** **5A**: 31-32.
- Rosenan, N. (1955). One hundred years of rainfall in Jerusalem, a homotopic series of annual amounts. **Isr. Explor. J.**, **5**: 137-153.
- Schien, Z.; Buras, N. (1973). Rainfall intensities in Israel. **Isr. J. Earth Sci.**, **22**: 15-30.
- Sharon, D.; Kutiel, H. (1986). The distribution of rainfall intensity in Israel, its regional and
- ישראל ולארצות המזרח הקרוב. המחלקה המטאורולוגית, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- אשבל, ד' (1957). האקלים. **האנציקלופדיה העברית**, כרך ו' ארץ-ישראל (מהדורה ראשונה).
- גולדרייך, י' (1998). האקלים בישראל, תצפיות חקר וישום. הוצאת בר-אילן ומגנס, רמת-גן.
- גת, צ' (1982). משטר ההתאדות בישראל. השדה, סב: 1298-1294.
- דלינסקי, י' (1971). הפונקציה הסינוסואידלית של ההתאדות החודשית היחסית הממוצעת בישראל. **מטאורולוגיה בישראל**, 8: 29-43.
- דלינסקי, י' (1977). תיאור יחסי עובי-משך-תקופת חזרה של גשמים באמצעות פונקציה לא-ממדית חד-פרמטרית. **מטאורולוגיה בישראל**, 13(1): 12-26.
- השירות המטאורולוגי (1990). **ממוצעים אקלימיים תקינים של כמות הגשם 1961-1990** (סיכום הקדמי). חטיבת שירותי אקלים, בית דגן.
- כזנלסון, י' (1955). **עוצמות הגשם בארץ-ישראל**. השירות המטאורולוגי, סדרה ה, מס' 3.
- כזנלסון, י' (1956). **חלוקת הגשמים בארץ-ישראל לפי השטח והזמן**. השירות המטאורולוגי, סדרה ה, מס' 5.
- כזנלסון, י' (1968). **גשמי ארץ-ישראל כגורם-יסוד במשק המים של הארץ**. השירות המטאורולוגי בית דגן, סדרה א, מס' 24, והחוג לגיאוגרפיה, אוניברסיטת תל אביב.
- לסט, י' (1978). **התאדות מגיגיות "CLASS A" בישראל**. תה"ל, פרסום מס' 01/78/79, תל אביב.
- מורין, י'; שרון, ד'; רובין, ש' (1998). **עוצמות גשם בישראל**. דו"ח מחקר 1/94 מתוקן, השירות המטאורולוגי, בית דגן.
- סטנהיל, ג' (1982). **השפעת הסביבה על ההתאדות מגיגית**. השדה, סב: 1999-1998.
- צ'צ'יק, פ' (1979). **משטר ההתאדות בישראל**. השדה, נט: 2149-2145.
- צ'צ'יק, פ' (1987). **ההתאדות השנתית והשוואתה לגשם**. **מטאורולוגיה בישראל**, 4/87: 15-6.
- קוטיאל, ח' (1978). **הפרוס הסטטיסטי והמרחבי של עוצמות הגשם בישראל**. עבודת מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

- seasonal variations and its climatological evaluation. **J. Climatol.**, **6**: 277-291.
- Stanhill, G. (1970). The heat and water balance of a fish pond in the Upper Galilee of Israel. **Isr. J. Agric. Res.**, **20**: 21-39.
- Striem, H.L. (1974). The mutual independence of climatological seasons, as reflected by temperatures at Jerusalem 1861-1960. **Isr. J. Earth Sci.**, **23**: 55-62.
- Striem, H.L.; Rosenan, N. (1973). Rainspells, as a climatological parameter, used in the analysis of rainfall in Jerusalem. **Arch. Meteorol.**

הידרוליקה

אריה בן-צבי¹, ליאוניד גריניס²

¹פרופסור, מורה מן החוץ, המחלקה להנדסת בניין, המכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון; לשעבר מנהל השרות ההידרולוגי;
²ד"ר, המחלקה להנדסת בניין, המכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון.

1. מבוא

הידרוליקה היא חלק ממכניקת הזורמים, העוסק בתהליכי הזרימה לאורך קווים (כגון אפיקים, תעלות, צינורות) ובתהליכי זרימה בסביבת עצמים מבודדים (כגון עמודי גשרים וסכרים). המונח זורמים, מתייחס לנוזלים וגזים, השונים ממוצקים באופן תגובתם לכוח גזירה (זוג כוחות שווי גודל והפוכי כיוון, שמסלוליהם אינם מתנגשים זה בזה). כוח גזירה קטן וממושך שפועל על גוף זורם, גורם לעיוות מתגבר של צורתו; לעומת זאת, כוח כזה הפועל על גוף מוצק, גורם לעיוות קבוע של צורתו. מכניקת הזורמים, עוסקת במצב הזורמים ובתנועתם: לחץ, טמפרטורה, מהירות, כוחות שפועלים בין הזורם לסביבתו, השפעת הסביבה על מצב הזורם וזרימתו, מדידת מאפייני הזרימה, התמרת ערכים כמותיים ממקרה זרימה אחד לאחר וכדומה.

העיסוק הכמותי בניקוז בכלל ובזרימה אפיקים בפרט, מחייב התבססות על התהליכים ההידרוליים שעקרונותיהם מוצגים במאמר זה. תיאורים מעמיקים יותר ומפורטים יותר נמצאים בספרות המקצועית, מהם נזכיר כאן רק את Chow (1959).

2. הגדרות

לחץ, הוא כוח שמפעיל זורם על יחידת שטח של דופן מוצקה, שנוגעת בזורם או על דופן דמיונית שנמצאת בתוך הזורם. הלחצים על שני צדי דופן דמיונית כזו, שווים בגודלם והפוכים בכיווניהם. כוח הלחץ ניצב לדופן וכיוונו כלפיה, לכן השפעתו בדחיסה בלבד.

צפיפות היא היחס בין מסת הזורם לנפחו. מאחר

שהיא מוגדרת כיחס בין המסה הנמצאת בתוך נפח בקרה קטן לבין גודלו של נפח הבקרה, נהוג לתאר מתמטית את המתרחש בנפח הבקרה כאילו נמצא בתוכו חומר אחיד ורציף. אפשרות תיאור זה נקראת השערת הרציף. הצפיפות היחסית של זורם נתון, היא היחס בין הצפיפות שלו לצפיפות של זורם ייחוס. נוזל ייחוס מקובל הוא מים בטמפרטורה של 20°C ובלחץ של אטמוספירה אחת שצפיפותו 998.2 kg/m^3 . המשקל הסגולי של זורם, הוא מכפלת צפיפותו בתאוצת הכבידה, $(9.8066 \text{ m/s}^2 \text{ g})$.

צמיגות (או צמיגות דינמית), היא היחס בין מאמץ הגזירה לבין שיעור העיוות של גוף זורם. הביטוי המתמטי שלה:

$$\tau = \mu \, du/dy \quad (1)$$

כאשר τ ($\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$) מאמץ הגזירה (כוח הגזירה ליחידת שטח נגזר), μ ($\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$) צמיגות הזורם, u (LT^{-1}) מהירות התנועה בכיוון הכוח הגזור, y (L) מרחק בכיוון ניצב לכיוון הכוח הגזור. צמיגות קינמטית, היא היחס בין הצמיגות לצפיפות:

$$\nu = \mu/\rho \quad (2)$$

כאשר ν (L^2T^{-1}) הצמיגות הקינמטית, ρ (ML^{-3}) הצפיפות. ככל שהזורם צמיג יותר, יתעוות בשיעור מתון יותר עקב מאמץ גזירה נתון; ולחילופין יידרש מאמץ גזירה גדול יותר, כדי להשיג שיעור עיוות נתון. צמיגות מרבית הנוזלים יורדת עם עליית הטמפרטורה ולעומתה צמיגות מרבית הגזים עולה עם עליית הטמפרטורה.

היחס בין השינוי בצפיפות לבין הלחץ, נקרא דחיסות. דחיסות המים נמוכה מאוד ובמרבית המקרים אפשר להתעלם ממנה ולהתייחס למים כאל נוזל בעל צפיפות קבועה.

ערכים מתמטיים, אולם אין הוא מתמצה בהם, אלא מחייב גם ערך מילולי שמתאר את מהות הערכים וגודלם היחסי. כדי למנוע בלבול, מוסכם מאז ראשית התרבות לקבוע יחידות בסיסיות, שביחס אליהן נמדדים כל המשתנים הכמותיים. נמצאו ונמצאות בשימוש יחידות רבות ושונות. שיטת היחידות המקובלת היום במדע נקראת SI (International System), והיא קרובה מאוד לשיטת היחידות המשמשת בישראל למטרות מעשיות.

שיטת היחידות SI כוללת ערכים מילוליים פשוטים, כגון מטר, שנייה, גרם, מעלת צלסיוס וכדומה; אך גם ערכים מורכבים, כגון מטר לשנייה, מטר לשנייה לכדומה. שני האגפים של משוואה אשר מתארת תהליך כמותי, חייבים להיות שווים זה לזה הן בערכיהן המתמטיים והן בערכיהן המילוליים. למשל, ניוטון מצא כי הכוח f , הנדרש כדי לגרום לגוף בעל מסה m תאוצה שגודלה a , נמצא ביחס ישר למכפלת המסה בתאוצה:

$$f = ma \quad (3)$$

מהשוויון בין שני אגפי המשוואה הזו, מתקבל כי יחידת הכוח היא מכפלה של יחידת המסה ביחידת התאוצה, וביחידותינו: ק"ג מטר שנייה⁻². עם זאת, נהוג להשתמש עבור משתנים פיסיקליים מסוימים גם ביחידות פשוטות, כגון ניוטון כיחידת כוח, פסקל כיחידת לחץ ועוד.

$$Pa = N/m^2 = (kg \cdot m \cdot s^{-2})/m^2 = kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} \quad (4)$$

כאשר Pa ($ML^{-1}T^{-2}$) (פסקל) יחידת לחץ, N (MLT^{-2}) (ניוטון) יחידת כוח, m (L) (מטר) יחידת אורך, kg (M) (קילוגרם) יחידת מסה, s (T) (שנייה) יחידת זמן. מאחר שכל אחד מהערכים המילוליים יכול להופיע ביחידות שונות (למשל שנייה או שעה; מטר, ק"מ או מיל), נהוג לסמן את מהותם באופן כוללני: L ליחידת אורך, M ליחידת מסה, T ליחידת זמן ועוד. סימנים אלה נקראים ממדים. במשוואות שונות נמצאים, לבר מהמשתנים הפיסיקליים, גם מקדמים בעלי ערך כמותי. כאשר לכל אברי המשוואה אותן יחידות,

מהירות התקדמות גלי הלחץ בזורם, נקראת מהירות הקול, c . מהירות הקול במי ים עמוקים כ- 1500 ms^{-1} . מהירותו במים רדודים נמוכה מאוד ותלויה בעומק המים.

כל חלל שנמצא במגע עם נוזל, מכיל אדים של הנוזל הזה. כאשר החלל רווי באדי הנוזל, הלחץ השורר בו הוא לחץ אדי הנוזל ברוויה או בקיצור, לחץ האדים של הנוזל. לחץ האדים של הנוזלים גדל עם הטמפרטורה. לחץ האדים של מים בטמפרטורה של $100^\circ C$, הוא 101.3 kPa . כאשר הלחץ בנוזל שווה ללחץ האדים ברוויה או גדול ממנו, נוצרות בנוזל בועות אדים. מצב זה נקרא רתיחה. אם במהלך זרימת נוזל יורד בו הלחץ עד מתחת ללחץ האדים, נוצרות בועות אדים באזורי הלחץ הנמוך. תופעה זו נקראת קוויטציה.

משטח המגע של נוזל עם גז נקרא פנים, והמשטח בין שני נוזלים שונים נקרא פן ביני. בגלל כוחות משיכה שמתקיימים בין המולקולות של נוזל, ואינם מתקיימים בגזים, פני נוזל מול גז נמצאים במתיחה. כוח המתיחה ליחידת אורך, נקרא מתח פנים. בגלל מתח הפנים מקבלות טיפות נוזל קטנות צורה כדורית, כי לצורה זו שטח הפנים הקטן ביותר ביחס לנפח. בטיפות גדולות מעוות כוח הכבידה את הצורה הכדורית.

מוצק יכול להירטב, אם קיימת משיכה בין המולקולות שלו לבין אלה של הנוזל. כאשר קיימת משיכה כזו, נוצרת זווית חדה במגע בין הנוזל למוצק; וכאשר אין משיכה, נוצרת זווית קהה (תרשים 1).

כאשר ישנה משיכה, יכולה שפופרת דקה של מוצק לינוק לתוכה נוזל, וכשאינ משיכה, לא תינוק. יניקה זו נקראת קפילריות. בגללה גבוהים פני הנוזל בקרבת הדפנות מהפנים במרכז. לעומת זאת, כאשר אין משיכה, הם נמוכים יחסית.

3. יחידות וממדים

יחידות וממדים הם אבני יסוד של הגישה הכמותית במדע. תיאור כמותי של תופעות חייב לכלול



אין משיכה, זווית קהה



יש משיכה, זווית חדה

תרשים 1: מגע בין נוזל למוצק

במספר פרוד גדול מיחידה, נקראת זרימה על-קריטית, וזרימה במספר פרוד קטן מיחידה נקראת זרימה תת-קריטית.

בעת יישום תצפיות ממקרה זרימה אחד למקרה אחר, למשל ממעבדה או ממודל מתמטי לשדה, יש לבדוק אם הביטויים הבלתי ממדיים שמתארים את שני המקרים זהים אלה לאלה. כאשר הביטויים זהים והגיאומטריות דומות, שני המקרים דומים זה לזה והיישום פשוט. מידת הדמיון בין המקרים, נקראת דמיות. במקרים רבים קשה או בלתי אפשרי, ליצור דמיות מושלמת בין מקרים, ואז יש לקבוע סדרי קדימויות ליישום הביטויים הבלתי ממדיים.

4. זורמים במנוחה

זורם נמצא במנוחה כאשר אין תנועות יחסיות בין חלקים שונים שלו. במקרה כזה אין כוחות גזירה בתוכו, אולם עדיין יכולים להימצא כוחות, כגון כוח הכבידה, שפועלים על כולו כגוף אחד. כל נפח בקרה בתוך זורם, נושא על גבו את משקלם של הזורמים שנמצאים מעליו; והוא מעיק בגחונו על מה שנמצא תחתיו. לפי החוק השלישי של ניוטון, נפח הבקרה נלחץ מתחתיו במשוב של לחצו כלפי מטה. נבחר נפח בקרה בצורת יתד (תרשים 2) שעוביו δy (L), יש לו פאה אופקית שאורכה δx (L), פאה אנכית שגובהה δz (L) ופאה אלכסונית שאורכה δl (L). הזווית בין הפאה האלכסונית לבין הפאה האופקית היא α (1). מתוך הגיאומטריה:

$$\delta_l = \delta_x / \cos(\alpha) = \delta_z / \sin(\alpha) \quad (7)$$

נבחן את הכוחות הפועלים על פאות נפח הבקרה. מאחר שנפח הבקרה קטן מספיק, מותר

המקדמים הם חסרי ממד.

מותר לכפול ולחלק משתנים בעלי ממדים שונים, אך אין לחברם ולחסרם. מותר לחבר ולחסר גדלים שווי ממד אך שונים ביחידותיהם; אולם תוך כדי הפעולה יש להמיר את כל הגדלים לאותה יחידה. משוואה בעלת ממדים אחידים לכל איבריה, נכונה לכל מערכת יחידות. כאשר היחידות אינן אחידות, יש להוסיף למשוואה את מקדמי ההמרה בין היחידות.

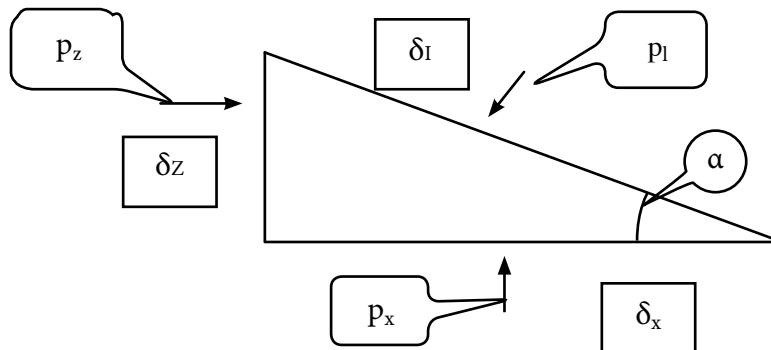
כדי להשוות בין ערכים כמותיים של תופעות שונות, נהוג להשתמש בביטויים בלתי ממדיים. מביניהם נזכיר כאן את מספר ריינולדס, Re , ואת מספר פרוד, Fr . הראשון מתאר את היחס בין כוח ההתמדה לכוח החיכוך, והשני את היחס בין כוח ההתמדה לכוח הכובד. נוסחאותיהם:

$$Re = Vd/\nu \quad (5)$$

$$Fr = V/(gh)^{1/2} \quad (6)$$

כאשר V (LT^{-1}) המהירות הממוצעת של הזרימה, d (L) אורך אופייני בכיוון ניצב לכיוון הזרימה, ν (L^2T^{-1}) הצמיגות הקינמטית של הזורם, g (LT^{-2}) תאוצת הכבידה, h (L) העומק הממוצע של הנוזל (מספר פרוד אינו ישים לגזים).

כאשר מספר ריינולדס קטן, קובע החיכוך את אופי הזרימה, והיא נקראת למינרית (שכבתית); וכשהמספר גדול קובעת ההתמדה, והזרימה נקראת טורבולנטית (סוערת). במקרה זרימה בעלת מספר ריינולדס גדול, השפעת כוח החיכוך משמעותית רק בשכבת הזורם הקרובה לגבולו עם גוף אחר. שכבה זו נקראת שכבת הגבול. כאשר מספר פרוד קטן, מושפע אופי הזרימה בעיקר על ידי הכבידה; וכשהמספר גדול, גבוהה השפעת ההתמדה. זרימה



תרשים 2: נפח בקרה והלחצים עליו

ייחוס, וציר Z נמדד מלמעלה למטה. הכוח הפועל על הבסיס העליון $p_z \delta A$, והכוח הפועל על הבסיס התחתון $p_{z+\delta z} \delta A$. משקל הזורם שנמצא בתוך נפח הבקרה $\rho g \delta A \delta z$. משוואת הכוחות:

$$p_z \delta A + \rho g \delta A \delta z = p_{z+\delta z} \delta A \quad (14)$$

נצמצם ונעביר אגף:

$$\rho g \delta z = p_{z+\delta z} - p_z \quad (15)$$

ומכאן המשוואה ההידרוסטטית:

$$dp/dz = \rho g \quad (16)$$

במרבית הבעיות המעשיות, מותר להניח כי לתאוצת הכבידה ערך מספרי קבוע בכל אזור העבודה. במקרים רבים, מותר להניח כי לזורם צפיפות קבועה. באינטגרציה של המשוואה ההידרוסטטית, אשר מתבססת על שתי ההנחות האלה, מתקבל:

$$p(z) = p(0) + \rho g z \quad (17)$$

כאשר $p(z)$ הלחץ ברום z , $p(0)$ הלחץ ברום 0, ρ צפיפות הזורם, g תאוצת הכבידה. לגבי נוזלים, מקובל לקבוע את רום הייחוס (ראשית הצירים) בפני הנוזל, ואם הנוזל חשוף לאטמוספירה $p(0)$ הוא הלחץ הברומטרי (לחץ האוויר באותו מקום). הצירוף $p(z) - \rho g z$ נקרא הלחץ הפיזומטרי. הצירוף $p(0) - p(z)$ נקרא הלחץ המנומטרי, כי הוא המשתנה שנמדד באמצעות מנומטר (מכשיר למדידת לחץ).

נטבול בגוף נוזל פתוח לאטמוספירה שפופרת אנכית דקה ופתוחה בשני קצותיה. לשם פשטות נבחר שפופרת גלילית שקוטרה $(L) D$. מתח הפנים, σ (MT^{-2}), וזווית המגע של הנוזל בחומר השפופרת θ (1), עשויים להעלות או להוריד את רום פני הנוזל בשפופרת ביחס לפני גוף הנוזל. הכוח בין המוצק לנוזל, $F = \pi D \sigma \cos(\theta)$ (MLT^{-2}). משקל הנוזל שהתרומם או ירד. במצב של שיווי משקל, שני כוחות אלה שווים זה לזה:

$$\rho g h \pi D^2 / 4 = \pi D \sigma \cos(\theta) \quad (18)$$

ומכאן:

$$h = 4 \sigma \cos(\theta) / (\rho g D) \quad (19)$$

עלייה זו נקראת עלייה קפילרית. לדוגמה, מים יעלו כדי 29.7 מ"מ בתוך שפופרת זכוכית שקוטרה 1 מ"מ, ואילו כספית תרד בה כדי 9.1 מ"מ.

הדין בפרק זה הוקדש לזורמים נחים. אולם, מאחר שהמשוואות שפותחו התבססו על מאזני כוחות, הן מתאימות גם לזורמים שנמצאים בתנועה קצובה ללא תאוצות, ובלבד שאין בהם

להניח כי הלחצים פרוסים באורח אחיד על כל אחת מפאותיו וגודלם p_x ($ML^{-1}T^{-2}$) על הפאה האופקית, p_z על הפאה האנכית ו- p_1 על הפאה האלכסונית. לפי ההגדרה, כוחות הלחץ ניצבים לפאות. היעדר התאוצות מחייב שוויון כוחות בכל כיוון. כוח הלחץ האופקי שפועל על הפאה האנכית הוא $\delta_y \delta_z p_z$ (MLT^{-2}). הרכיב האופקי שפועל על הפאה האלכסונית הוא $\delta_y \delta_1 p_1 \sin(\alpha)$. בהצבת הגיאומטריה (משוואה 7) נקבל כי רכיב זה גודלו $\delta_y \delta_z p_1$. נשווה את שני הכוחות:

$$\delta_y \delta_z p_z = \delta_y \delta_z p_1 \quad (8)$$

ומכאן:

$$p_z = p_1 \quad (9)$$

הכוחות האנכיים הם כוח הלחץ על הפאה האופקית, הרכיב האנכי של כוח הלחץ על הפאה האלכסונית, ומשקל הזורם שנמצא בתוך נפח הבקרה. גודלם, בהתאמה, $\delta_y \delta_x p_x$, $\delta_y \delta_1 p_1 \cos(\alpha)$ ו- $\rho g \delta_y \delta_z \delta_x$. נציב בכוח השני את הגיאומטריה (7), נצמצם ונקבל כי הוא שווה ל- $\delta_y \delta_x p_1$. נשווה את הכוחות האנכיים:

$$\delta_y \delta_x p_x = \delta_y \delta_x p_1 + \rho g \delta_y \delta_z \delta_x \quad (10)$$

נצמצם:

$$p_x = p_1 + \rho g \delta_z \quad (11)$$

ככל שיקטן נפח הבקרה, יתקרבו זה לזה p_x ו- p_1 . עד כי ישתוו זה לזה, כאשר δ_z יהיה אפסי. מכאן:

$$p_x = p_1 = p_z = p \quad (12)$$

כלומר, מתקיים לחץ שווה על כל דופנותיו של נפח בקרה קטן מאוד. בניסוח אחר, הלחץ בנקודה כלשהי בתוך זורם נח, שווה בכל הכיוונים סביבה. זהו חוק פסקל.

נבחר נפח בקרה שצורתו מנסרה אופקית, אורכה δx ושטח החתך הרוחבי שלה δA . צורת החתך אינה משנה. על בסיס אחד פועל הלחץ p_x ועל הבסיס האחר $p_{x+\delta x}$. הכוחות שפועלים על שני הבסיסים הם $p_x \delta A$ ו- $p_{x+\delta x} \delta A$, בהתאמה. מאחר שאין תנועות ותאוצות, אלה שני הכוחות האופקיים היחידים שפועלים על נפח הבקרה ועליהם להיות שווים זה לזה. בצמצום δA :

$$p_x = p_{x+\delta x} \quad (13)$$

מכאן מתברר, שהלחצים בכל הנקודות של חתך אופקי בזורם נח שווים זה לזה.

נבחר נפח בקרה שצורתו מנסרה אנכית בעלת בסיסים אופקיים, גובהה δz ושטח החתך הרוחבי δA . בסיסה העליון נמצא ברום z ביחס למישור

5. כוחות על מוצקים

זורמים מפעילים כוחות על גופים מוצקים הנוגעים בהם. נעייין בגוף מוצק טבול בתוך זורם בעל צפיפות אחידה ρ , שאינו נע ביחס לזורם ואינו נוגע במוצק אחר (תרשים 3). היעדר התנועה מעיד כי כל הכוחות הפועלים על הגוף המוצק, בכל כיוון שהוא, שקולים אלה כנגד אלה. נסמן בתוך הגוף המוצק מנסרה אנכית דמיונית דקה בעלת חתך לרוחב ששטחו δA . הקצוות העליון והתחתון של המנסרה חוצים את פני הגוף המוצק, והלחצים עליהם p_u ו- p_d , בהתאמה. הרכיבים האנכיים של כוחות הלחץ העליון והתחתון $\delta F_u = p_u \delta A$ ו- $\delta F_d = p_d \delta A$, בהתאמה. לבד משני כוחות הלחץ, פועל בכיוון האנכי משקל המוצק התחום על ידי המנסרה δW וכוחות הגזירה בינה לבין סביבתה המוצקה δF_s . כוחות הגזירה עשויים להיות חיוביים (כלפי מטה) או שליליים (כלפי מעלה).

משוואת הכוחות הפועלים על המנסרה בכיוון האנכי:

$$p_u \delta A + \delta W + \delta F_s = p_d \delta A \quad (25)$$

מתוך המשוואה ההידרוסטטית:

$$p_d = p_u + \rho g(z_d - z_u) \quad (26)$$

כאשר z_u ו- z_d הם הרומים בהם חוצה המנסרה את פני הגוף המוצק, z מדוד כלפי מטה. נציב:

$$dW + dF_s = \rho g \delta A (z_d - z_u) \quad (27)$$

נסמן כך מנסרות רבות כאלה עד שתמלאנה את כל נפח הגוף המוצק. נסכם את המשוואות העוסקות בכל אחת מן המנסרות. סכום כל δW

מאמצי גזירה. שונה המצב כאשר גוף הזורם מואץ כולו במידה שווה, ללא תנועות פנימיות ומאמצי גזירה בתוכו. כמקובל במכניקה, ניתן להפריד את התאוצה a , לרכיביה האופקי a_h , והאנכי a_v , כשהוא מכוון כלפי מעלה. את הרכיב האנכי ניתן לחסר מתאוצת הכבידה g , ובכל מקום שמופיע במשוואות הסימן g יש להחליפו בסימן $(g - a_v)$. במקרה הקיצוני, של זורם בנפילה חופשית בה $g = a_v$, כל כובד משקלו מושקע בהאצה כלפי מטה ואינו גורם לבניית לחץ. המשוואה ההידרוסטטית לגוף מואץ אנכית:

$$\partial p / \partial z = \rho(g - a_v) \quad (20)$$

כדי לעמוד על השפעת הרכיב האופקי של התאוצה, נגדיר נפח בקרה בצורת מנסרה אופקית בעלת חתך δA ואורך δx . נבנה לה מאזן כוחות אופקיים:

$$p \delta A - (p + \delta p) \delta A = \rho \delta A \delta x a_h \quad (21)$$

ומכאן:

$$\partial p / \partial x = -\rho a_h \quad (22)$$

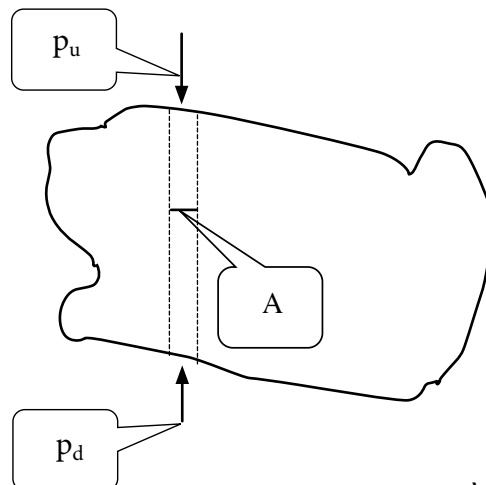
מתקבל שכיוון עליית הלחץ הפוך לכיוון התאוצה.

נגדיר את הלחץ בראשית הצירים כ- p_0 , ונקבל לאחר אינטגרציה את המשוואה ההידרוסטטית לגוף מואץ:

$$(p - p_0) / \rho = gz - a_v z - a_h x \quad (23)$$

פרוס הלחצים בזורם נראה כמישורים נטויים. זווית הנטייה α , היא:

$$\tan(\alpha) = a_h / (g - a_v) \quad (24)$$



תרשים 3: סכימה של גוף מוצק טבול בזורם

הרכיב האנכי של הכוח הזה:

(29)

$\delta F_v = \delta F \cos \theta = (\rho g h + p_a) \delta A = \rho g h \delta A + p_a \delta A$
האיבר הראשון באגף ימין הוא משקל הנוזל שנמצא במנסרה, והאיבר השני כוח הלחץ הברומטרי על הבסיס העליון של המנסרה. נמלא במנסרות אנכיות את כל גוף הנוזל הנוגע בדופן המוצקה ונסכם. נקבל, שהכוח האנכי אשר מפעיל הנוזל על הדופן, שווה למשקל הנוזל שנמצא מעל הדופן ועוד כוח הלחץ הברומטרי על פני גוף הנוזל הזה. הרכיב האופקי של כוח הלחץ במגע של בסיס המנסרה הנ"ל עם הדופן:

$$\delta F_h = \delta F \sin \theta = (\rho g h + p_a) \tan \theta \delta A = \rho g h \delta A \tan \theta + p_a \delta A \tan \theta \quad (30)$$

נמלא במנסרות אנכיות את כל גוף הנוזל הנוגע בדופן המוצקה ונסכם. התוצאה שנקבל: הכוח האופקי אשר מפעיל הנוזל על הדופן המוצקה, שווה למכפלת הכוח האנכי בטנגנס זווית הנטייה של הדופן. כאשר הדופן האופקית אינה מישורית, אפשר לסכם את הרכיבים האופקיים של הכוחות בשני כיוונים ניצבים זה לזה, כי הם נמצאים ביחס ישר להטלים של הדופן בכיוונים המתאימים ולטנגנס זווית הנטייה.

נחשב את הכוח ההידרוסטטי שמפעיל נוזל בעל צפיפות אחידה ρ , על דופן מוצקה אנכית בה הוא נוגע (תרשים 5). נסמן בנוזל מנסרה אופקית דמיונית דקה שנמצאת בעומק h מתחת פני הנוזל ושטח חתכה האנכי δA . הלחץ בשטח המגע של הנוזל בדופן: $p = \rho g h + p_a$. כוח הלחץ האופקי הניצב למישור הדופן:

$$\delta F = p \delta A = (\rho g h + p_a) \delta A \quad (31)$$

נמלא במנסרות אופקיות את כל גוף הנוזל הנוגע בדופן המוצקה ונסכם:

$$F = \int_A \delta F = \rho g \int_A h \delta A + p_a \int_A \delta A \quad (32)$$

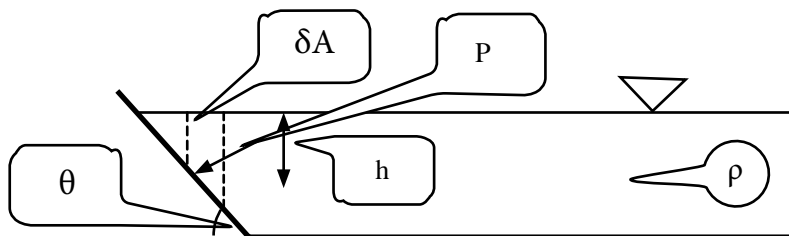
תוצאת האינטגרל באיבר השני, היא שטח הדופן.

הוא משקל המוצק W . סכום כל δF הוא 0, כי כל כוח שמנסרה מפעילה על שכנתה שווה בגודלו והפוך בכיוונו לכוח שהשכנה מפעילה עליה. סכום כל $\rho g \delta A (z_d - z_u)$ הוא משקל הזורם שהגוף המוצק דחק מפניו W_f . התוצאה שקיבלנו: משקל גוף מוצק שמרחף חופשי בתוך זורם, שווה למשקל הזורם שהוא דוחה מפניו. הכוח שגודלו W_f וכיוונו כלפי מעלה, נקרא כוח הציפה של הגוף המוצק בתוך הזורם.

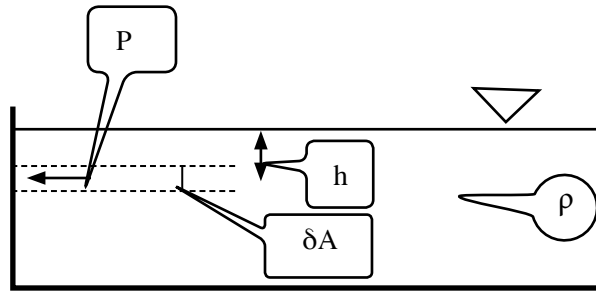
כאשר משקל הגוף המוצק גדול מכוח הציפה שלו, הוא שוקע עד שמגיע לזורם צפוף יותר בו כוח הציפה מאזן את משקל הגוף המוצק או עד שמגיע לגוף מוצק אחר שנושא, לפחות חלקית, את משקלו. לעומת זאת, כאשר משקל הגוף המוצק קטן מכוח הציפה שלו, הוא מתרומם עד שמגיע לזורם דליל יותר, שכוח הציפה בתוכו מאזן את משקל הגוף המוצק או עד שנתקל בגוף מוצק אחר שכולם אותו. אם הזורם הוא נוזל, עשוי המוצק לצוף על פניו והאזיון מושג כאשר חלק מהגוף המוצק נמצא בתוך הנוזל וחלק מעליו. גם במצב הזה, משקל הנוזל שנדחה על ידי הגוף המוצק שווה למשקל הגוף המוצק. זהו חוק ארכימדס. ראוי לציין כאן כי גופים מוצקים קטנים מאוד יכולים לצוף על פני נוזל, כאשר משקלם מאוזן על ידי כוחות מתח הפנים של הנוזל.

נחשב את הכוח ההידרוסטטי שמפעיל נוזל בעל צפיפות אחידה ρ , על דופן מוצקה בה הוא נוגע. לשם פשטות נתחיל בדופן מישורית נטויה בזווית θ ביחס לאופק (תרשים 4). נסמן בנוזל מנסרה אנכית דמיונית דקה ששטח חתכה האופקי δA . הבסיס התחתון של המנסרה נוגע בדופן בעומק h מתחת פני הנוזל. שטח המגע של בסיס המנסרה בדופן $\delta A / \cos \theta$. הלחץ בשטח המגע $p = \rho g h + p_a$. כוח הלחץ הניצב למישור הדופן:

$$\delta F = p \delta A / \cos \theta = (\rho g h + p_a) \delta A / \cos \theta \quad (28)$$



תרשים 4: כוחות בין נוזל לבין דופן נטויה



תרשים 5: כוחות בין נוזל לבין דופן אנכית

השכיח, שני המרכזים האלה אינם נמצאים באותו קו אנכי וזוג כוחות פועל על הגוף הצף. ככל שמרכז הכובד נמוך ממרכז הציפה, ארוכה יותר זרוע המנוף המחזיר את הגוף הצף לתנועתו הקודמת, והיציבות מושגת בנקל יותר. גוף מוצק יכול לצוף במצב יציב, גם במקרה שמרכז הכובד שלו נמצא מעל מרכז הציפה, אך לא נדון בזה כאן.

6. קינמטיקה

הקינמטיקה עוסקת בתנועות של גופים, מבלי להתייחס לכוחות הפועלים עליהם ולמאמצים השוררים בתוכם. שתי גישות נהוגות לתיאור תנועת זורמים: גישת אוילר, לפיה מעיינים בתנועת כל הגוף הזורם ברגע נתון; וגישת לגרנג', לפיה מעיינים בתנועת נפח בקרה נתון לאורך הזמן. בגישת אוילר מתוארת התנועה באמצעות קווי זרם, ובגישת לגרנג' באמצעות קווי מסלול. קו זרם הוא קו רצוף שמשיק בכל נקודותיו לכיוון התנועה של הזורם ברגע נתון. קו מסלול, הוא קו רצוף שמתאר את מיקומו במרחב של נפח בקרה נתון בזמנים שונים. בזרימה תמידית, כאשר בכל נקודה במרחב אין המהירות משתנה עם הזמן, מתלכדים קווי הזרם עם קווי המסלול. מבנה קווי הזרם יכול להשתנות בזמן, אך בכל רגע נתון אין שני קווי זרם יכולים לחצות זה את זה, היות שתוצרונה אז בנקודת החצייה שתי מהירויות שונות זו מזו.

כיוון הזרימה במשטח המגע של זורם במוצק חייב להיות משיק למוצק, וזאת מאחר שאין למהירות הזרימה רכיב שחודר לתוך המוצק או יוצא מתוכו. כאשר ישנה דחייה בין המוצק לזורם, מחליקות המולקולות הסמוכות למוצק על פניו. כאשר ישנה משיכה בין הזורם לבין המוצק, המולקולות שנוגעות במוצק אינן נעות ביחס אליו. מהירות התנועה של המולקולות הסמוכות למוצק

תוצאת האינטגרל באיבר הראשון, היא מכפלת שטח הדופן בעומק מרכז הכובד שלה. נציב אותן במשוואה הקודמת:

$$F = \rho g h_c A + p_a A = A(\rho g h_c + p_a) \quad (33)$$

משמע, כוח הלחץ שמפעיל נוזל בעל צפיפות אחידה על דופן אנכית, שווה למכפלת שטח המגע של הנוזל בדופן בלחץ השורר בנוזל מול מרכז הכובד של השטח הזה.

כאשר המוצק והנוזל מואצים יחד, אך ללא תנועות יחסיות ביניהם ובתוך הנוזל, אפשר לסובב את מערכת הצירים באופן שציר Z יהיה בכיוון התאוצה השקולה ולחשב כמו במקרה של זורם במנוחה, אלא שבמקום g יכתב גורל התאוצה השקולה.

נבחר גוף מוצק שמרחף בזורם ללא תנועה יחסית. פועלים עליו שני כוחות שווים בגודלם והפוכים בכיוונם: משקלו וכוח הציפה. אפשר להתייחס למשקל הגוף כיוצא ממרכז הכובד של הגוף וכיוונו כלפי מטה ולכוח הציפה כיוצא ממרכז הנפח של הגוף (מרכז הציפה) וכיוונו כלפי מעלה. כאשר מרכז הכובד ומרכז הציפה נמצאים זה מעל זה, הגוף המרחף נמצא במצב של שיווי משקל. כאשר אין הם פועלים בדיוק זה כנגד זה, ייסוב הגוף המוצק עד אשר יגיע למצב של שיווי משקל. שיווי המשקל הוא יציב, כאשר מרכז הכובד נמצא מתחת למרכז הציפה, ורופף, כאשר מרכז הכובד נמצא מעל מרכז הציפה.

שיווי משקל של גוף מוצק שצף על פני נוזל, מורכב יותר מזה של גוף מרחף. מרכז הציפה נמצא במרכז הכובד של הנוזל שנדחה מפני הגוף הצף. כאשר מטים את הגוף המוצק, חלק ממנו עולה מתוך הנוזל וחלק אחר נטבל. שני חלקים אלה שווים בנפחם, אך שונים במקומם. לכן משנה מרכז הציפה את מקומו בתוך הגוף המוצק. במקרה

של גידול המסה ועוד עורפי היציאות על הכניסות יהיה אפס. נציב במשוואה (34) את הביטויים הרשומים לעיל, נצמצם בנפח הבקרה ובפרק הזמן ונקבל את משפט הרציפות:

$$\partial \rho / \partial t + \rho \partial V_x / \partial x + \rho \partial V_y / \partial y + \rho \partial V_z / \partial z = 0 \quad (35)$$

כאשר לזורם צפיפות אחידה או בזרימה תמידית, בה מתבטל האיבר הראשון של משוואה (35), אפשר לצמצם את הצפיפות ולקבל את משפט הרציפות במושגי נפח:

$$\partial V_x / \partial x + \partial V_y / \partial y + \partial V_z / \partial z = 0 \quad (36)$$

7. דינמיקה

הדינמיקה עוסקת בתנועות של גופים ובכוחות המשפיעים עליהן. כמקרה ראשון נעיין בשפופרת זרם דקה מאוד (תרשים 7) (שפופרת זרם היא נפח בקרה ארוך, שדופנותיו בנויות מקווי זרם). כיוון הזרימה במקביל לקווי הזרם נקרא S (L) (לאו דווקא ישר). במקום מסוים לאורך השפופרת, החתך A , הלחץ p וכיוון הזרימה בזווית θ מן האנך. כעבור מרחק קצר בכיוון הזרימה, Δs , שטח החתך $A + (dA/ds)\Delta s$ והלחץ $p + (dp/ds)\Delta s$. משקל הזרם שנמצא בין שני החתכים, $(A + (\frac{1}{2}dA/ds)\Delta s)\Delta s \rho$, רכיבו בכיוון הזרימה $(A + (\frac{1}{2}dA/ds)\Delta s)\Delta s \rho \cos \theta$. כוח הלחץ בעורף הקטע pA , והכוח בחזיתו $(A + (dA/ds)\Delta s) * (p + (dp/ds)\Delta s)$. הרכיב של כוח הלחץ על הדופנות אשר פועל בכיוון הזרימה, $(dA/ds)\Delta s * (p + (\frac{1}{2}dp/ds)\Delta s)$.

נניח שמהירות הזרימה סביב השפופרת זהה למהירות שבתוכה, ולכן אין כוחות גזירה בין תוך השפופרת לסביבתה. הכוח השקול בכיוון הזרימה, F :

שאינן נעות או מחליקות, תלויה במרחקן מהמוצק ובצמיגות הזורם. בכך משפיעה נוכחות המוצק על התנועה של שכבת הזורם הסמוכה אליו. ההשפעה המעשית מורגשת עד למרחק מסוים מן המוצק. אזור ההשפעה נקרא שכבת הגבול. במקרים רבים מותר להזניח את השפעת צמיגות הזורם על תופעות הזרימה שמחוץ לשכבת הגבול.

נבחר נפח בקרה כלשהו בתוך זורם ונפעיל עליו את חוק שימור המסה. לשם פשטות, לנפח הבקרה צורת תיבה (תרשים 6). נקבע פרק זמן קצר מאוד, Δt , ונתבונן במסת הזורם שנמצאת בנפח הבקרה, יוצאת ממנו או נכנסת אליו.

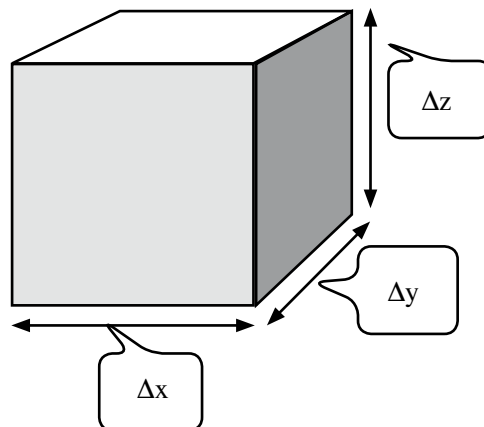
אורכי צלעות התיבה הם: $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ ונפחה $\Delta x \Delta y \Delta z$. צפיפות הזורם שנמצא בתיבה בתחילת פרק הזמן ρ , ובסופו, $\rho + \partial \rho / \partial t \Delta t$. במשך פרק הזמן הנבחר גדלה מסת הזורם שנמצא בתיבה בכמות של $\Delta x \Delta y \Delta z (\partial \rho / \partial t) \Delta t$. מסת הזורם שנכנסת לתיבה בכיוון X דרך הפאה הניצבת לכיוון זה $\Delta y \Delta z \rho V_x \Delta t$, המסה היוצאת דרך הפאה הנגדית $\Delta y \Delta z \rho (V_x + \partial V_x / \partial x \Delta x) \Delta t$ וההפרש בין היציאה לכניסה בכיוון X הוא $\Delta y \Delta z \rho (\partial V_x / \partial x \Delta x) \Delta t$. בדומה לזה, ההפרשים בשני הכיוונים האחרים:

$$\Delta y \Delta x \rho (\partial V_z / \partial z \Delta z) \Delta t \text{ ו- } \Delta x \Delta z \rho (\partial V_y / \partial y \Delta y) \Delta t$$

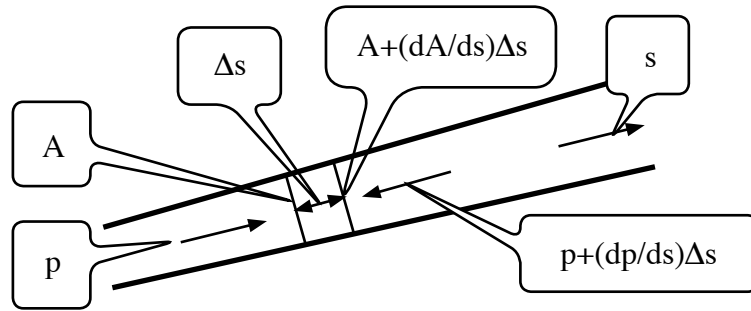
חוק שימור המסה מחייב שהגידול במסה הנמצאת בתוך נפח הבקרה, יהיה שווה לסכום עורפי הכניסות על היציאות:

$$\Delta m = (\sum Q_i - \sum Q_o) \Delta t \quad (34)$$

כאשר m (M) היא מסה, Q (MT^{-1}) שטף (מסה ליחידת זמן), הסימן התחתני i מציין כניסה והסימן o יציאה. נעביר הכול לאגף אחד ונקבל שהסכום



תרשים 6: נפח בקרה בצורת תיבה



תרשים 7: שפופרת זרם ונפח בקרה בתוכה

v , נציב את מסת הזורם $\rho v = m$, ונקבל נוסח נוסף של משוואת ברנולי ביחידות של אנרגיה:

$$\frac{1}{2}mV^2 + mp/\rho + mgz = \text{const.} \quad (46)$$

למשוואת ברנולי יישומים מעשיים רבים. אחד מהם למדידת ספיקות של זורמים נמוכי צמיגות. כדוגמה, נבחר את מד הזרם על שם ונטורי (תרשים 8). הוא בנוי על העיקרון של הצרת צינור עגול בקטע קצר, כדי להגביר שם את מהירות הזרימה על חשבון הלחץ. ידיעת קוטרי הצינור, אופן הצבתו וצפיפות הזורם בתוספת מדידת הפרש הלחצים בין הקטע המוצר (צוואר המכשיר) לבין הקטע במעלה ההיצרות, מאפשרות את החישוב באמצעות משוואת ברנולי ומשוואת הרציפות:

$$(p_1 - p_2) + \rho g(z_1 - z_2) + \rho(V_1^2 - V_2^2)/2 = 0 \quad (47)$$

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (48)$$

כאשר $A = \pi D^2/4$ שטח החתך של הצינור. נציב במשוואת ברנולי:

$$V_1^2 = (\Delta p + \rho g \Delta z) / (\rho(D_1^4/D_2^4 - 1)/2) \quad (49)$$

$$Q = \rho V_1 A_1 = \quad (50)$$

$$(\rho \pi D_1^2/4) * ((\Delta p + \rho g \Delta z) / (\rho(D_1^4/D_2^4 - 1)/2))$$

מאחר שההנחות עליהן מבוססת משוואת ברנולי (אי דחיסות ואי צמיגות) אינן מדויקות, הספיקה שזורמת למעשה אינה זהה לספיקה המחושבת. אי דיוקים בייצור ובהצבה של המכשיר ובמדידת צפיפות הזורם, עשויים אף הם להשפיע על תוצאת המדידה. כדי להתגבר על אי הדיוקים בהנחות ובייצור, מצויד כל מכשיר ונטורי בתוצאות כיול, בו מתואר היחס בין הספיקה הנכונה Q_a , כנגד הספיקה המחושבת Q_c . מקדם הכיול הוא: $C_d = Q_a/Q_c$. הכיול נעשה כנגד מדידות ספיקה מדויקות יותר שנעשות במכשירים אחרים. התוצאות מוצגות כפונקציה של מספר ריינולדס.

$$F = -(A + \frac{1}{2}(dA/ds)\Delta s)(dp/ds)\Delta s - \quad (37)$$

$$A + (\frac{1}{2}dA/ds)\Delta s) \Delta s \rho g \cos \theta$$

נחלק במסת הזורם ונציב $\cos \theta = dz/ds$:

$$F/m = -(1/\rho)dp/ds - g dz/ds \quad (38)$$

לפי החוק השני של ניוטון, מנת הכוח במסה היא תאוצה, a . נציב ונקבל:

$$a + (1/\rho)dp/ds + g dz/ds = 0 \quad (39)$$

לפי הגדרת התאוצה $a = dV/dt$, ובזרימה תמידית לאורך שפופרת זרם $V = ds/dt$. נציב ונקבל:

$$a = dV/dt = (dV/ds)(ds/dt) = V dV/ds \quad (40)$$

נציב במשוואה (39) ונקבל את משוואת אוילר:

$$\rho V dV/ds + dp/ds + \rho g dz/ds = 0 \quad (41)$$

אינטגרציה של משוואת אוילר לאורך S , למקרה של זורם בלתי דחיס:

$$\rho(V^2 - V_0^2)/2 + (p - p_0) + \rho g(z - z_0) = 0 \quad (42)$$

כאשר הסימן התחתון 0 מציין את המצב בראשית הקטע, והיעדרו מציין את המצב בנקודה נבחרת כלשהי לאורך הקטע. נעביר מאגף לאגף ונקבל את משוואת ברנולי:

$$\rho V^2 + p + \rho g z = \frac{1}{2} \rho V_0^2 + p_0 + \rho g z_0 \quad (43)$$

או

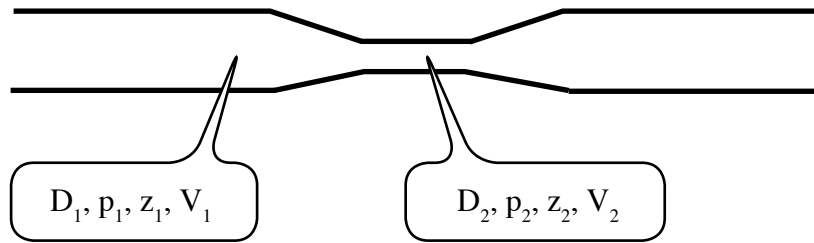
$$\rho V^2 + p + \rho g z = \text{const.} \quad (44)$$

משמעותה, כי לאורך קו זרם קבוע הסכום של איבריה. מגבלותיה:

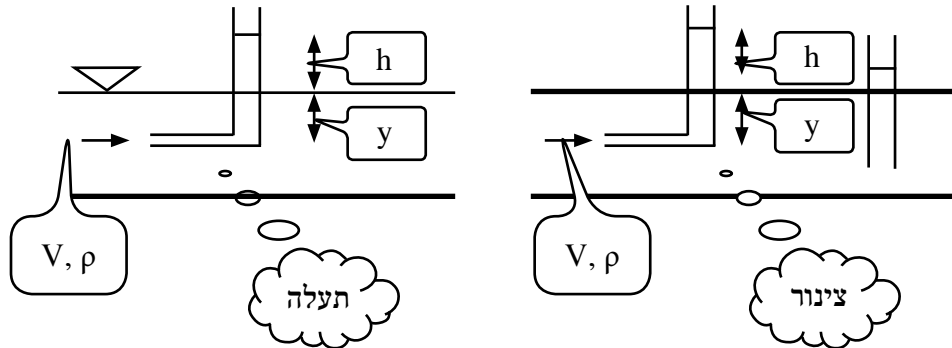
1. מתאימה למצב תמידי בלבד.
 2. לזורם צפיפות קבועה.
 3. לזורם אין צמיגות או השפעת הצמיגות וניחה (מתקיימת למעשה מעבר לשכבת הגבול).
- נחלק את משוואה (44) בצפיפות ובתאוצת הכבידה, והתוצאה שנקבל - משוואת ברנולי ביחידות של עומד:

$$V^2/2g + p/\rho g + z = \text{const} \quad (45)$$

נכפול את משוואת ברנולי בגודלו של נפח הבקרה



תרשים 8: מד-זרם ונטורי



תרשים 9: שפופרת פיטו

שהלחץ הברומטרי בפני הנוזל שווה ללחץ מול החור p_a . מאחר שהנוזל קולח בנפילה חופשית, אין בו לחץ הידרוסטטי בעת יציאתו דרך החור. נחשב את ספיקת הקליחה באמצעות משוואת ברנולי, אותה נעביר לאורך קו זרם מפני הנוזל עד לגוף הקולח היוצא מן החור (לפני שמספיק לאבד גובה).

הלחץ הכולל בפני הנוזל וביחס לחור:
 $C = p_a + \rho gh$ כאשר ρ צפיפות הנוזל.
 הלחץ הכולל בצדו החיצוני של החור:
 $C = p_a + \rho V^2/2$ כאשר V מהירות הזרימה של הנוזל ביציאה דרך החור. נשווה ביניהם ונצמצם:
 $V^2/2 = gh$ (53)

מכאן הספיקה הנפחית:

$$Q = A_h V = A_h (2gh)^{1/2} \quad (54)$$

בגלל הפסדי אנרגיה, אין המצב כה אידאלי, ויש לכפול את הספיקה המחושבת במקדם $C_d < 1$, כדי לקבל את הספיקה המעשית. לכן:

$$Q = C_d A_h (2gh)^{1/2} \quad (55)$$

מתוך משוואת הרציפות: $Q = -dS/dt$, כאשר S אוגר הנוזל במכל, t זמן. מאחר שהדופנות אנכיות, האוגר מעל החור הוא: $S = A_s h$. נציב ונקבל:

$$Q = -A_s dh/dt \quad (56)$$

נשווה את שני הביטויים לספיקה:

שימוש נפוץ במשוואת ברנולי למדידת מהירות זרימה בתעלות ובריאות, נעשה באמצעות שפופרת פיטו (תרשים 9). נתונה תעלה אופקית בה זורם נוזל שצפיפותו ρ ורוצים למדוד את מהירות הזרימה V_y בעומק y מתחת פני המים. מציבים בתעלה צינור זקוף עם שלוחה אופקית פתוחה כנגד הזרם. פני הנוזל יעלו בצינור עד לרום h מעל פני הנוזל בתעלה. הלחץ במנוחה בשפופרת זרם שמובילה אל מול פתח השלוחה הוא $p_a + \rho V_y^2/2$, כאשר p_a הוא הלחץ הברומטרי. הלחץ במנוחה בפתח עצמו הוא $p_a + \rho gh$. נשווה ביניהם:

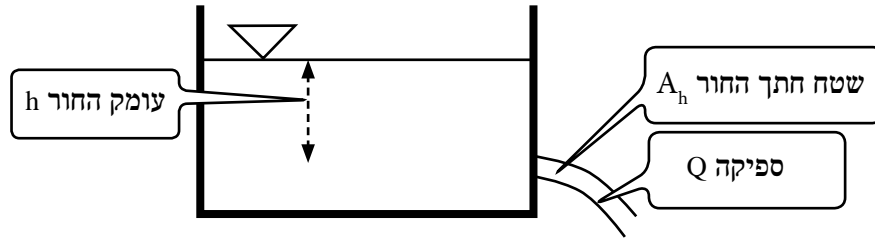
$$\rho V_y^2/2 = \rho gh \quad (51)$$

ומכאן:

$$V_y = (2gh)^{1/2} \quad (52)$$

כדי להשתמש בשפופרת פיטו למדידה של מהירות זרימה של נוזל בצינור, מחדירים לצינור עוד שפופרת זקופה בעלת פתח אנכי שנמצא באותו רום בו נמצא הפתח האופקי של שפופרת פיטו. גם כאן תקפה משוואה (52), כאשר h הוא ההפרש בין רומי הנוזל בשתי השפופרות.

נעיין בנוזל שנמצא בתוך מכל רחב (תרשים 10). קירות המכל אנכיים ושטח פני הנוזל A_s . בעומק h מתחת פני הנוזל קדוח בדופן המכל חור קטן ששטחו A_h , דרכו קולח הנוזל בספיקה Q . נניח



תרשים 10: קליחה

לריבוע המהירות הממוצעת של הזורם:

$$\tau = \frac{1}{2} f \rho V^2 \quad (65)$$

כאשר f הוא מקדם החיכוך שתלוי בתכונות הזורם והמוצק. נציב אותו במשוואה (64):

$$\frac{1}{2} V^2 / g + p / (\rho g) + z + \frac{1}{2} f V^2 S / (gR) = \text{const.} \quad (66)$$

כאשר $V^2 f S / Rg$ הוא הפסד העומד עקב חיכוך. נמצא בניסוי מעבדה כי מקדם החיכוך קשור למספר ריינולדס Re , של הזרימה שהגדרתו לצינורות:

$$Re = VD / \nu \quad (67)$$

כאשר V המהירות הממוצעת של הזרימה בצינור, D קוטר הצינור, ν הצמיגות הקינמטית של הזורם. במקרים בהם $Re < 2000$, הזרימה למינרית ומקדם החיכוך:

$$f = 16 / Re \quad (68)$$

במקרים בהם $Re > 2000$, הזרימה טורבולנטית ומקדם החיכוך תלוי גם בגובה חלקיקי החספוס. לצינורות חלקים:

$$1/\sqrt{f} = 1.74 \ln(Re\sqrt{f}) - 0.4 \quad (69)$$

לצינורות מחוספסים, בהם e הוא גובה חלקיקי החספוס:

$$1/\sqrt{f} = -1.74 \ln(1/(Re\sqrt{f}) + 0.338e/D) - 0.4 \quad (70)$$

או

$$1/\sqrt{f} = -1.74 \ln(1.25/(Re\sqrt{f}) + 0.27e/D) \quad (71)$$

פתרון גראפי למשוואות האלה הוכן על ידי מורי ונמצא בספרות המקצועית.

בתחום $100,000 > Re > 2000$, אפשר להשתמש בקירוב של בלזיוס:

$$f = 0.079 Re^{-1/4} \quad (72)$$

ערכים טיפוסיים של e (מ"מ): לצינור פלדה חדש $0.02 - 0.1$; לצינור פלדה חלוד $1 - 3$; לצינור בטון חלק מאוד $0.025 - 0.18$; לצינור בטון מחוספס $0.8 - 2.5$; לצינור זכוכית או פלסטי $0.0015 - 0.01$. בתכנון קווי צינורות, נהוג לשרטט חתך אנכי

$$C_d A_h (2gh)^{1/2} = -A_s dh/dt \quad (57)$$

ופתרונה:

$$h = (h_0^{1/2} - (A_h/A_s) C_d (2g)^{1/2} t)^2 \quad (58)$$

כאשר h_0 הוא רום פני המים מעל החור ברגע $t = 0$.

8. זרימה בצינורות

נחזור לפיתוח שהוביל למשוואות אוילר וברנולי, אך נשנה שני גורמים: לשפופרת הזרם ישנן דופנות מוצקות ולזורם יש צמיגות (תרשים 11). לכוחות הקודמים, שפורטו בפרק דינמיקה, נוסף כוח החיכוך, $F_f = P \Delta s t$, כאשר P ההיקף המורטב הממוצע לאורך הקטע Δs , τ מאמץ הגזירה במגע הזורם עם הדופן המוצקה. כיוון כוח החיכוך כנגד כיוון הזרימה. נוסיף אותו למשוואה (37):

$$F = -(A + \frac{1}{2} (dA/ds) \Delta s) (dp/ds) \Delta s - \quad (59)$$

$$(A + (\frac{1}{2} dA/ds) \Delta s) \Delta s \rho g \cos \theta - P \Delta s t$$

נחלק במסת הזורם ונציב $\cos \theta = dz/ds$:

$$F/m = -(1/\rho) dp/ds - g dz/ds - \tau/\rho R \quad (60)$$

כאשר $R = A/P$ הוא הרדיוס ההידרולי. נרחיב בהתאם את משוואת אוילר:

$$\rho V dV/ds + dp/ds + \rho g dz/ds + \tau/R = 0 \quad (61)$$

אינטגרציה של המשוואה המורחבת עבור זורם בלתי דחיס לאורך S , החל בנקודה S_0 ועד לנקודה רצונית כלשהי:

$$\rho(V^2 - V_0^2) + (p - p_0) + \rho g(z - z_0) + \int (\tau/R) ds = 0 \quad (62)$$

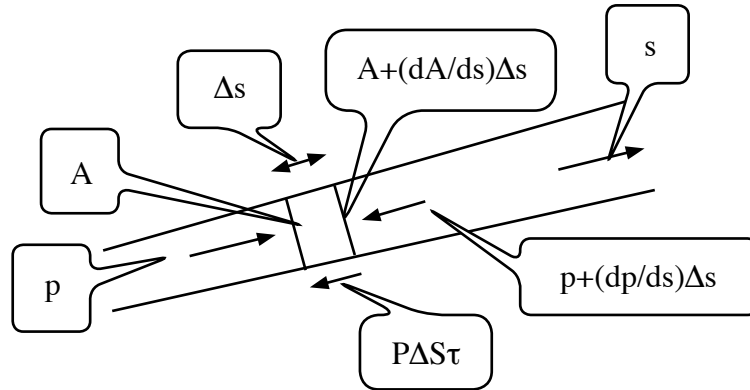
האיבר האחרון אינו ניתן לאינטגרציה פשוטה, היות שהביטוי τ/R אינו בהכרח קבוע לאורך מסלול הזרימה. לקטע אחיד, וביחידות של עומד מתקבל:

$$\frac{1}{2} (V^2 - V_0^2) / g + (p - p_0) / (\rho g) + (z - z_0) + \tau S / (\rho g R) = 0 \quad (63)$$

האיבר האחרון במשוואה זו, הוא הפסד העומד לאורך הדרך. נעביר לאגף ימין את הביטויים הקשורים לתחילת הקטע ונקבל:

$$\frac{1}{2} V^2 / g + p / (\rho g) + z + \tau S / (\rho g R) = \text{const.} \quad (64)$$

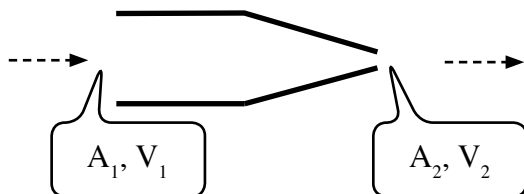
נמצא בניסוי מעבדה, כי מאמץ הגזירה קשור



תרשים 11: זרימה בתוך שפופרת מוצקה

בהתנעה ודימום של משאבות. זורם מפעיל כוחות על הדופנות המוצקות של צינור שמכיל אותו. לבד מכוחות הלחץ הניצבים למשטח המגע של הזורם במוצק, מופיעים גם כוחות אורכיים. מאמץ הגזירה שפועל על הזורם פועל גם על המוצק. לפי החוק השלישי של ניוטון, כוח החיכוך שמעכב את תנועת הזורם פועל גם על הצינור, וכיוונו מקביל לכיוון הזרימה. כדי למנוע תזוזה של הצינור, יש לעגן אותו כלפי עצמים אחרים. העיגון צריך להיות חזק מספיק כדי לעמוד בפני הכוחות שמופיעים בזרימה תמידית, וגם בפני אלה שמופיעים בזרימה לא-תמידית. במיוחד חשוב העיגון בנקודות מפנה בכיוון הזרימה. רכיבי כוחות לחץ בלתי מאוזנים מופיעים בנקודות בהן משנה הצינור את שטחו או את צורתו.

כדוגמה, נעייין בנחיר (תרשים 12). נתון צינור אופקי רחב ששטח חתכו A_1 ומתכנס לנחיר צר ששטח חתכו A_2 . מתקיימת בו זרימה תמידית של זורם שצפיפותו ρ וספיקתו הנפחית Q . מהירות הזרימה לפני ההתכנסות V_1 וביציאה מהנחיר V_2 . נניח שצפיפות הזורם אינה משתנה בעת התכנסותו לנחיר. נפעיל את משוואת ברנולי בין הצינור לבין פתח הנחיר.



תרשים 12: זרימה דרך נחיר

של הרום הטופוגרפי לאורך מסלול כל צינור ושל קו העומד שלו. בדרך כלל, נמצא קו העומד מעל הרום הטופוגרפי. במקומות בהם נמצא קו העומד מתחת לרום הטופוגרפי, קיים בזורם לחץ נמוך מהלחץ הברומטרי (תת-לחץ) ועלולה להתפתח קוויטציה. כל אביזר שמורכב בצינור (מד זרם, מגוף, פנייה, מחבר וכדומה), גורם להפסד עומד מקומי גדול יותר מזה של צינור, שאורכו שווה לאורך מסלול הזרימה באביזר. מהלך קו העומד חייב להציג גם את ההפסדים המקומיים.

המשוואות שפותחו עד כה בפרק זה, עוסקות בזרימה תמידית. זרימה כזו מתאפיינת בכך שבכל נקודה בשדה הזרימה אין רכיבי העומד הכולל משתנים עם הזמן, אם כי הם יכולים להשתנות מנקודה לנקודה. לא כן הדבר בזרימה לא-תמידית. במקרים בהם השינויים עם הזמן קטנים והדרגתיים, עדיין אפשר להשתמש במשוואות הקודמות תוך התאמות קלות. אולם כאשר השינויים עם הזמן גדולים ופתאומיים, עלולות להופיע בזורם תופעות חולפות מסוכנות. לדוגמה, כאשר נסגר לפתע מגוף, העומד המהירותי של הנוזל שנבלם מכה בחוזקה במגוף ויוצר גל לחץ שנהדף לאחור. בדרכו אחורה הוא עלול לפגוש מכשולים ולהדהד הלוך וחזור. גלי לחץ אלה, שנקראים הלם מים, עלולים לפוצץ את הצינור ואת אביזריו. גם בנוזל שבמורד המגוף, מופיעה בעיה. לפתע נעלם הלחץ הדוחף אותו מאחור, אך עדיין קיים הלחץ הכולל מלפנים. כתוצאה מהיעלמות הלחץ הדוחף, מקבל הנוזל תאוצה פתאומית לאחור. גם כאן עלולים להיווצר גלי לחץ וקוויטציה. תופעות דומות מתחוללות גם בעת פתיחה פתאומית של מגוף או

הידרוליקה

$$h_f = f(V^2/2g)(S/D) \quad (77)$$

זו משוואת דרסי-ויסבך.

הגרדינט ההידרולי מוגדר כ- $J = h_f/S$, ומשוואת דרסי-ויסבך מוסבת:

$$J = f(V^2/2g)/D \quad (78)$$

פתרונה מחייב שימוש באחת המשוואות (69) - (72) או בדיאגרמת מודי. לשם הקלה, ניסחו מהנדסים משוואות חליפיות. המפורסמת בהן היא על שם הייזן-וויליאמס, שנתקבלה על סמך ניסויי מעבדה:

$$J = 1.526 \cdot 10^{-7} \cdot (Q/C)^{1.852} / D^{4.87} \quad (79)$$

כאשר J הגרדינט ההידרולי (%), Q הספיקה (מ"ק לשעה), C מקדם (1), D קוטר הצינור (ס"מ). נוסחה זו מתאימה לזרימת מים בצינורות שקוטרם מעל 5 ס"מ ובמהירות נמוכה מ- 3 מטר לשנייה. להלן ערכים אחדים של המקדם C : צינור חלק מאוד 130; צינור פלדה חדש 110; צינור פלדה ישן 100.

9. מאפייני הזרימה באפיקים

אפיק הוא שקע אורכי בפני הקרקע או הסלע, בו יכולים לזרום נוזלים. הזרימה באפיקים הטבעיים אינה קצובה, בדרך כלל, היות שהגיאומוטריה של חתכיהם הרוחביים אינה אחידה ומסלוליהם מתפתלים. זרימת גיאומטריות אינה תמידית, בדרך כלל. מצויות כיום בשוק תוכנות מדף המאפשרות עיסוק קל יחסית בזרימות שאינן קצובות ותמידיות, אולם לשם פשטות נתרכז כאן בזרימה קצובה ותמידית. כמו כן נגביל עיסוקנו בזרימה חד-ממדית, בה קווי הזרם מקבילים זה לזה.

נגדיר את מספר ריינולדס, Re , לאפיקים:

$$Re = VR/v \quad (80)$$

כאשר V מהירות הזרימה הממוצעת בחתך לרוחב, $R = A/P$ הרדיוס ההידרולי, v הצמיגות הקינמטית של הנוזל, A שטח החתך לרוחב, P ההיקף המורטב. כל עוד מספר ריינולדס קטן מ- 500, הזרימה באפיק למינרית (שכבתית) וכשהוא גדול מכ- 20,000, הזרימה טורבולנטית (סוערת). בין שני הערכים האלה משתרע אזור מעבר. באפיקים טבעיים זרימת המים טורבולנטית, בדרך כלל.

נוסחת דרסי-ויסבך לחישוב הפסדי העומד באפיקים:

$$h_f = f(L/4R)(V^2/2g) \quad (81)$$

כאשר f היא פונקציה קשורה למספר ריינולדס,

$$\rho V_1^2 + p_1 = \frac{1}{2} \rho V_2^2 + p_2 \quad (73)$$

נציב $V = Q/A$

$$p_2 = (2p_1/(\rho Q^2))/(1/A_2^2 - 1/A_1^2) \quad (74)$$

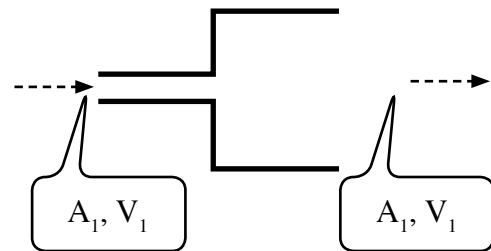
זה הלחץ השורר בזורם ביציאתו מן הנחיר. אם לחץ זה גבוה מהלחץ הברומטרי, הוא ידחוף לאחור את הנחיר ואת הצינור הקשור אליו. רעיון זה מיושם במטוסי סילון ובטילים.

הכוח שמפעיל זורם על ההיצרות, ובכיוון זרימתו:

$$F = (p_1 - p_2)(A_1 - A_2) = \quad (75)$$

$$(\rho Q^2(1/A_2^2 - 1/A_1^2))(A_1 - A_2)$$

מאותם שיקולים אפשר לבחון את המצב, במקום בו מתרחב הצינור באורח פתאומי (תרשים 13).



תרשים 13: התרחבות פתאומית של צינור

זורם בצינור אופקי שספיקתו Q , עובר בבת אחת מחתך ששטחו A_1 לחתך ששטחו $A_2 > A_1$. נניח שהזורם בלתי דחיס ונזניה את השפעת הצמיגות. לפי ברנולי, מתקבלת גם במקרה זה משוואה (75), אולם מאחר ש- $A_2 > A_1$, נוצר $p_2 < 0$, כלומר תת-לחץ באזור ההתרחבות. אם תת הלחץ אינו גדול, הוא יכול להתקיים. אולם אם הוא גדול, ישנה הזרם את תכונותיו (במיוחד הצפיפות) ומשוואת ברנולי, עליה התבססנו, לא תתאים לתיאור המקרה. נוסף לכך, ייווצר שם הפסד אנרגיה. כדי לרסן את ההפסד ולמנוע קוויטציה, נהוג להרחיב צינורות באורח הדרגתי מאוד.

צינורות מתוכננים, בדרך כלל, לזרימה קצובה ותמידית. המשוואות המשמשות לכך נגזרות ממשוואת ברנולי המורחבת. משתנה חשוב בה הוא הפסד העומד, שיסומן כאן על ידי h_f . מתוך משוואה (66):

$$h_f = f(V^2/2g)(S/R) \quad (76)$$

נציב את קוטר הצינור במקום הרדיוס ההידרולי, תוך שינוי ערכו של f פי 4:

שונה העומד המהירותי בנקודות השונות. מאחר שעומד זה נמצא ביחס ישר לריבוע המהירות, סכמו על פני כל החתך גדול מהעומד המהירותי, המחושב על פי המהירות הממוצעת. היחס בין שני ערכים אלה נקרא מקדם האנרגיה ומסומן באות α .

$$\alpha = \int_A (v^2 dA) / (V^2 A) \quad (86)$$

כאשר v היא המהירות באלמנט השטח dA , V המהירות הממוצעת בחתך A . לתעלות מנסרותיות $1.03 < \alpha < 1.36$. בדרך כלל, α קטן באפיקים גדולים וגדול בקטנים.

תופעה דומה מתקבלת גם בעת חישוב התנע של הנוזל. היחס בין סכום התנע על פני כל החתך לבין התנע המחושב על סמך המהירות הממוצעת, נקרא מקדם התנע ומסומן באות β .

$$\beta = \int_A (v^3 dA) / (V^3 A) \quad (87)$$

לתעלות מנסרותיות $1.01 < \beta < 1.12$. בחתכים מיוחדים, כגון בקרבת מפלים או בפיתול חזק, עשויים מקדמי האנרגיה והתנע להגיע לערכים גדולים במידה רבה מאלה הרשומים כאן.

בהתחשב במקדם α ובשיפוע האפיק, נכון יותר לכתוב את משוואת העומד הכולל בחתך כלהלן:

$$z + h \cos(\theta) + \alpha V^2 / 2g = h_i - h_f \quad (88)$$

כאשר z הרום הטופוגרפי של הנקודה הנמוכה ביותר בקרקעית, h העומק המרבי של המים בניצב לקרקעית, θ זווית השיפוע של הקרקעית ביחס לאופק, V המהירות הממוצעת בחתך, h_i העומד הכולל בראש מסלול הזרימה, h_f הפסד העומד עד החתך הנדון.

נגדיר את העומד הסגולי, H , כעומד ביחס לנקודה הנמוכה ביותר בחתך:

$$h \cos(\theta) + \alpha V^2 / 2g = H \quad (89)$$

שני המשתנים באגף שמאל קשורים זה לזה, באמצעות הספיקה וצורת החתך. בספיקה נתונה, יכולים להימצא צירופים שונים של עומק ומהירות, המובילים לעומדים סגוליים שונים. הצירוף שמוביל לעומד המזערי בספיקה נתונה נמצא כאשר:

$$V = \sqrt{(gA \cos(\theta) / (\alpha B))} \quad (90)$$

שמשמעותו $Fr = 1$, זרימה קריטית (A שטח החתך, B רוחב פני המים). מכאן מתקבל אפיון נוסף של הזרימה הקריטית.

11. מעבר בין עומקים

לאותה כמות אנרגיה יכולה להתקיים זרימה בשני

L אורך האפיק. נגדיר את הגרדינט ההידרולי, J , ונציב אותו במשוואה (81):

$$J = h_f / L \quad (82)$$

$$V = \sqrt{(8gRJ/f)} \quad (83)$$

את f ניתן למצוא מתוך תרשימים שקושרים אותו למספר ריינולדס של הזרימה ולצורת החתך.

אפיון חשוב מאד של הזרימה, הוא לפי מספר פרוד Fr :

$$Fr = V / \sqrt{(gy)} \quad (84)$$

כאשר $y = A/B$ העומק הממוצע של חתך הזרימה, A שטח החתך המורטב, B רוחב פני הנוזל.

נמצא שמהירות ההתפשטות של גלי לחץ במים רדודים c , היא:

$$c = \sqrt{(gy)} \quad (85)$$

לפיכך, זרימה תת-קריטית היא זרימה תת-קולית, וזרימה על-קריטית היא זרימה על-קולית. בזרימה על-קריטית אין מתפשטים גלי לחץ למעלה הזרם מנקודת היווצרותם. על כן הפרעות לזרימה על-קריטית, כגון פגיעות בעצמים מוצקים, אינן מורגשות במעלה הזרם מהן.

10. פרוס המהירות בחתך והשפעתו

בגלל החיכוך בדופנות המוצקות ובאוויר, פרוס המהירות בחתך המורטב אינו אחיד. בקרבת הדופנות נמוכה מהירות הזרימה ובמרכז החתך המהירות גבוהה יחסית. בזרימה למינרית, המהירות בכל נקודה נמצאת ביחס ישר למרחק הנקודה מהדופנות, ואילו בזרימה טורבולנטית, המהירות נמצאת ביחס ישר ללוגריתם המרחק מהדופנות. למעשה, ישנה השפעה גם לחיכוך באוויר ולכן המהירות המרבית מושגת בעומק קטן מתחת פני הנוזל. בנסיונות מעבדה, נמצא שהמהירות המרבית בחתך עשויה להיות כפולה או אפילו גבוהה פי 2.5 מהמהירות הממוצעת.

בזרימה בנחלים, המהירות המרבית של פני המים גבוהה לערך פי 1.5 מהמהירות הממוצעת בחתך (ממצא זה משמש לאומדן המהירות הממוצעת, באמצעות מדידת מהירות התנועה של חומרים צפים על פני המים).

בזרימה טורבולנטית, ועל אחת כמה בזרימה למינרית, נשמר בדרך כלל הפרוס ההידרוסטטי של הלחץ בחתך המורטב. לכן, סכום האיברים $z + p/\rho g$ במשוואת העומד, שווה לכל אחת מהנקודות בחתך. אולם בגלל השוני במהירויות,

הזרימה וגם מספר פרוד אינו משתנה. לספיקה נתונה ולחתך נתון, עומק המים בזרימה קצובה ותמידית נקרא העומק הנורמלי.

נבחר אפיק בעל חתך לרוחב כלשהו, ששטחו A ושפועו האורכי J , ונערוך משוואת כוחות לזרימה קצובה ותמידית של נוזל שצפיפותו ρ , לאורך Δx . מסת הנוזל שם $\rho A \Delta x$ והכוח המניע $J \rho g A \Delta x$. כוח זה שווה לכוח החיכוך שכולם את הזרימה. כוח החיכוך פרוס על פני שטח המגע $\Delta x P$, כאשר P ההיקף המורטב. מאמץ הגזירה הממוצע על פני שטח המגע, τ_a :

$$\tau_a = J \rho g A \Delta x / (\Delta x P) = \rho g R J \quad (94)$$

כאשר R הרדיוס ההידרולי.

בדרך כלל אין מאמץ הגזירה פרוס באורח אחיד על פני ההיקף המורטב, ישנן גזרות בהן הוא גדול יחסית וגזרות בהן הוא קטן יחסית. אפשר לחשב את גודלו בכל מקום מתוך מדידות, באמצעות שפופרת פיתו, של מהירות הזרימה בנקודות סמוכות לדופנות. פרוס המהירויות בשכבת הגבול בהקשר למרחק מהדופן, בצירוף נתונים על צמיגות הנוזל, מאפשרים חישוב מאמץ הגזירה על הדופן. כוח הכבידה, שמניע את הנוזל במורד האפיק, נמצא בקשר עולה עם צפיפות הנוזל ρ , שטח החתך המורטב A , והגרדינט ההידרולי J . כוח החיכוך, שכולם את הזרימה, נמצא בקשר עולה עם מהירות הזרימה V , ההיקף המורטב P , וגודל החספוס של הדופנות ε . בגלל האיזון ביניהם:

$$f_1(\rho, A, J) = f_2(V, P, \varepsilon) \quad (95)$$

כאשר f הוא סימן לפונקציה. מכאן יוצא:

$$V = f(A/P, 1/\varepsilon, \rho, J) \quad (96)$$

נמצא בניסויים, שההתנגדות לזרימה נמצאת ביחס ישר לריבוע המהירות. לכן עדיף לכתוב:

$$V^2 = f(A/P, 1/\varepsilon, \rho, J) \quad (97)$$

מכאן קצרה הדרך לנוסחת שזי:

$$V = C \sqrt{\rho g R J} \quad (98)$$

כאשר C מקדם שקשור לצפיפות הנוזל, לתאוצת הכבידה ולגודל החספוס.

בניסויים מתקדמים יותר, נמצא המקדם C קשור גם לרדיוס ההידרולי. לכן מקובלת בדורות האחרונים נוסחת מנינג:

$$V = n^{-1} R^{2/3} J^{1/2} \quad (99)$$

כאשר n מקדם ההתנגדות לזרימה, שקשור לחספוס האפיק, לתאוצת הכבידה ולצפיפות הנוזל. נוסחה זו מתאימה לשימוש ביחידות מטטריות (SI), ואילו

מצבים: תת-קריטי ועל-קריטי. כאשר הגרדינט ההידרולי מתון, הזרימה תת-קריטית וכשהוא תלול, הזרימה על-קריטית. הגרדינט תלוי בשיפוע הקרקעית, בתנאי הזרימה במעלה ובמורד החתך הנדון ובתאוצות. בקטע בו משנה האפיק את שיפועו ממתון לתלול, עוברת הזרימה ממצב תת-קריטי למצב על-קריטי, מהירות הזרימה מתגברת והעומק קטן. מעבר כזה נקרא מפל הידרולי (Hydraulic drop). בקטע המעבר, אין הזרימה קצובה ונמצא בו חתך בעל זרימה קריטית. מקרה קיצוני של מעבר כזה מתרחש במעלה מפל גיאומטרי, שבמורדו הנוזל נופל חופשי. בגלל היעדר לחץ הידרוסטטי בחתך המפל, מומר כל עומד הלחץ לעומד מהירותי והזרימה במעלה המפל על-קריטית. אם הזרימה המתקרבת למפל היא תת-קריטית, נמצא החתך בו הזרימה קריטית במרחק גדול פי 3 - 4 מהעומק הקריטי. בקטע בו משנה האפיק את שיפועו מתלול למתון, עוברת הזרימה ממצב על-קריטי למצב תת-קריטי, העומק גדל והמהירות קטנה. מעבר כזה נקרא זנק הידרולי (Hydraulic jump). הזרימה בקטע המעבר עשויה להיות סוערת מאוד. ככל שההבדל בין עומקי המים גדול יותר, המעבר סוער יותר, כי הפרש המהירויות מחייב בלימה חזקה יותר.

לתעלה מלבנית, הקשר בין עומקי המים במעלה ובמורד הזנק, בהתעלם מהפסדי העומד בזנק, הוא:

$$(h_2 - h_1) / (1 - (h_1/h_2)^2) = V_1^2 / (2g) \quad (91)$$

$$2h_2^2 / (h_1(h_1 + h_2)) = Fr_1^2 \quad (92)$$

כאשר h עומק המים, V המהירות הממוצעת בחתך, Fr מספר פרוד, הסימן התחתני 1 מציין את המשתנים במעלה הזנק והסימן 2 במורדו. במציאות, כרוך הזנק בהפסד עומד שגודלו Δh :

$$\Delta h = \rho g q (h_2 - h_1)^3 / (4h_1 h_2) \quad (93)$$

כאשר ρ צפיפות הנוזל, g תאוצת הכבידה, q ספיקת הנוזל ליחידת רוחב של האפיק.

12. נוסחאות לזרימה קצובה ותמידית באפיקים

זרימה קצובה ותמידית מופיעה, בדרך כלל, בתעלות מלאכותיות ובקירוב גם בזרימת בסיס בקטעי נחלים. בזרימה כזו, מאזנים זה את זה כוחות הכבידה והחיכוך ואין תאוצות במרחב ובזמן; שטח החתך המורטב לרוחב האפיק אינו משתנה לאורך

בעת שימוש ביחידות בריטיות, יש לכתוב:

$$V = 1.49n^{-1}R^{2/3}J^{1/2} \quad (100)$$

אף כי n ממדי ($sm^{-1/3}$), יש לו אותם ערכים מספריים בשתי מערכות היחידות.

ערכים מייצגים של n נמצאים בספרות המקצועית, ואפשר לקבל אותם גם מתוך מדידות ספיקה וגיאומטריה. עם זאת, ישנם הטוענים שהוא קטן עם גידול הרדיוס ההידרולי. כמו כן הוא יכול להשתנות בזמן עקב שינויים במצב הצמחייה באפיק, כמות הסחופת המוסעת, ושינויים בגיאומטריה. ערכים מקובלים של n : לתעלות בטון חלקות 0.013, לאפיקים טבעיים חלקים למדי 0.030, לאפיקים טבעיים עם אבנים גדולות 0.050.

נכפול את נוסחת מנינג בשטח החתך:

$$Q = n^{-1}AR^{2/3}J^{1/2} \quad (101)$$

נעביר מאגף לאגף, ונותר מימין את המשתנים המקומיים:

$$Q/J^{1/2} = n^{-1}AR^{2/3} \quad (102)$$

אגף ימין נקרא תולכת החתך. כלומר, אם ידועים מראש נתוני החתך המורטב, אפשר לדעת איזה צירוף של ספיקה וגרדינט ימלאו אותם. או לחלופין, אם ידועים מראש הספיקה והגרדינט, אפשר לקבוע את החתך הנחוץ.

כללית, חישוב זרימה באפיקים מחייב שימוש בשתי משוואות: משוואת הרציפות ומשוואת התנועה. בחישובים של זרימה קצובה ותמידית, משמשת, בדרך כלל, נוסחת מנינג כמשוואת התנועה. יש המשתמשים בנוסחת שזי, דרסי-ויסבך או אחרת.

במובלים פתוחים, גדל תמיד הרדיוס ההידרולי עם העומק. לא כן הדבר במובלים סגורים, שכאשר הם מלאים בכל חתכם, נוספת התקרה אל ההיקף המורטב. בצינור עגול, למשל, כאשר העומק עולה על 82% של הקוטר, יכולה פונקציית החתך לקבל שני ערכים שווים זה לזה בשני עומקים שונים זה מזה. הערך המרבי שלה מושג, כאשר העומק הוא 94% של הקוטר. אם נביא בחשבון שבמובלים גדולים קטן n עם העומק, מתקבלים מהירות וספיקה מרביים כאשר הצינור מלא עד 94%-97% מקוטרו, בהתאמה. כאשר ממלא הנוזל את כל החתך של מובל סגור, נוצרת זרימה בלחץ ופועלים אז חוקי הזרימה בצינורות. כאשר החספוס אינו אחיד בגודלו על פני ההיקף

המורטב, יש לקבוע ערך ממוצע משוקלל של מקדם ההתנגדות. השקלול נעשה לפי התרומה היחסית של כל קטע להיקף המורטב. נבנו לכך נוסחאות שקלול אחדות, שנשמכות על הנחות עבודה שונות אלה מאלה. כדוגמה מוצגת כאן נוסחת פבלובסקי, שנשמכת על שקלול כוחות החיכוך בקטעי ההיקף המורטב:

$$n = (\sum_{i=1}^N (P_i n_i^2))^{1/2} / P^{1/2} \quad (103)$$

כאשר n הוא מקדם ההתנגדות הממוצע המשוקלל, i מספר סידורי, N מספר הקטעים להם חולק ההיקף המורטב, P_i אורך הקטע מס' i של ההיקף המורטב, n_i מקדם ההתנגדות של הקטע הזה, P אורך כל ההיקף המורטב.

במקרי זרימה על פני משטחים רחבים ואחידים באופיים (תרשים 14), אפשר לפשט את החישובים ולהתייחס ליחידת רוחב. נבחר קטע קטן של הזרימה, שרוחבו b ועומקו h ; השטח המורטב $A = bh$, ההיקף המורטב $P = b$, והרדיוס ההידרולי $R = A/P = h$. מאחר שלאורך הדופנות האנכיות משיק נפח הבקרה שבחרנו בגופי מים בעלי אותה זרימה, אין כוחות גזירה ביניהם.

נוסחת מנינג למקרה זה:

$$V = n^{-1}h^{2/3}J^{1/2} \quad (104)$$

כאשר V היא המהירות הממוצעת. הספיקה Q :

$$Q = VA = n^{-1}bh^{5/3}J^{1/2} \quad (105)$$

13. זרימה למינרית על פני משטח רחב

כאשר מספר ריינולדס קטן מ-500, הזרימה למינרית. נתייחס לזרימה כזו שחתך לאורך שלה מתואר בתרשים 15. עומק הנוזל h (בניצב לקרקעית, ששיפועה J ביחס לאופק). נציב מישור מקביל לקרקעית במרחק y ממנה. נתייחס לנפח בקרה שתחתיתו במישור הזה, ראשו בפני הנוזל, רוחבו b ואורכו Δx . הכוח המניע אותו, F_1 :

$$F_1 = \rho gb \Delta x (h-y) J \quad (106)$$

כאשר ρ צפיפות הנוזל, g תאוצת הכבידה. הכוח המעכב, F_2 :

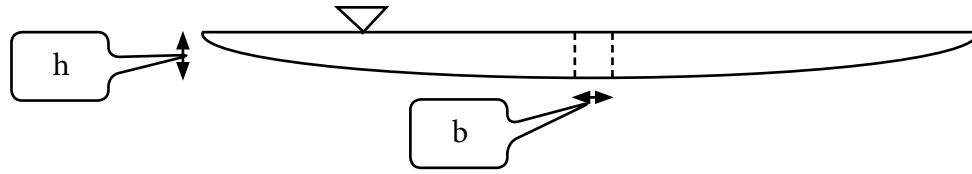
$$F_2 = \tau b \Delta x \quad (107)$$

כאשר τ מאמץ הגזירה על פני תחתית נפח הבקרה. מאחר שהזרימה קצובה ותמידית, שווים שני כוחות אלה זה לזה. לכן:

$$\tau = \rho g (h-y) J \quad (108)$$

מאחר שהזרימה למינרית:

$$\tau = \mu dV/dy \quad (109)$$



תרשים 14: חתך לרוחב של זרימה על פני משטח רחב

פרבולי בהקשר למרחק מפני המוצק. כפי שראינו בפרק קודם:

$$V(y) = c(\delta y - \frac{1}{2}y^2) \quad (116)$$

כאשר δ עובי תת השכבה הלמינרית. תת השכבה הזו יכולה להימשך במרחב ולהסתיים במשטח רציף, כל עוד גובה החספוס k , קטן מספיק:

$$k < (5C/\sqrt{g}) * (v/V_a) \quad (117)$$

כאשר C מקדם ההתנגדות לשוי, g תאוצת הכבידה, v הצמיגות הקינמטית של הזורם, V_a המהירות הממוצעת שלו. פני מוצק בעלי חספוס נמוך, נקראים חלקים. במקרה שהחספוס גבוה, פני המוצק נקראים מחוספסים, ותת השכבה הלמינרית אינה מסתיימת במשטח רציף.

מעבר לתת השכבה הלמינרית, נמצאת תת השכבה הטורבולנטית. פרום המהירויות בתוכה שונה מזה שבתת השכבה הלמינרית. על פי פרנדטל, הקשר בין מאמץ הגזירה τ , לגרדינט המהירות dV/dy , בתת השכבה הטורבולנטית:

$$\tau = \rho l^2 (dV/dy)^2 \quad (118)$$

כאשר ρ צפיפות הזורם, l אורך הערבוב. נניח $l = ky$, כאשר k מקדם בלתי ממדי. נציב אותו בנוסחה הקודמת, נוציא שורש ונעביר מאגף לאגף:

$$dV = \sqrt{(\tau/\rho)} k^{-1} dy/y \quad (119)$$

נניח, בעקבות פרנדטל, כי מאמץ הגזירה בתוך תת השכבה הטורבולנטית, שווה למאמץ הגזירה הממוצע על פני המגע במוצק:

$$\tau = \rho g R J \quad (120)$$

נציב אותו:

$$dV = \sqrt{(g R J)} k^{-1} dy/y \quad (121)$$

אינטגרציה מעומק ייחוס y_0 , בו אין מהירות טורבולנטית, עד לעומק y :

$$V(y) = \sqrt{(g R J)} k^{-1} \ln(y/y_0) \quad (122)$$

כאשר $V(y)$ מהירות הזרימה במרחק y מהמוצק. נתקבל פרום מהירויות לוגריתמי. לפי פון-קרמן,

כאשר V מהירות הזרימה במרחק y מן הקרקעית. נציב:

$$\mu dV/dy = \rho g(h-y)J \quad (110)$$

ומכאן:

$$dv/dy = g(h-y)J/v \quad (111)$$

כאשר v הצמיגות הקינמטית של הנוזל. אינטגרציה:

$$V = (gJ/v) * (hy - \frac{1}{2}y^2) \quad (112)$$

זו משוואה ריבועית שמתארת פרום פרבולי של המהירות לפי העומק. המהירות המרבית, V_{max} , מתקבלת בפני הנוזל, שם $y = h$:

$$V_{max} = (gJ/v) * (h^2 - \frac{1}{2}h^2) = (gJ/v) * \frac{1}{2}h^2 \quad (113)$$

הספיקה, Q , לרוחב b :

$$Q = b \int_{y=0}^h (V dy) = b(gJ/v) * \int_{y=0}^h (hy - \frac{1}{2}y^2) dy \quad (114)$$

$$= b(gJ/v) * (\frac{1}{2}hy^2 - \frac{1}{6}y^3)_0^h = \frac{1}{3}b(gJ/v)h^3$$

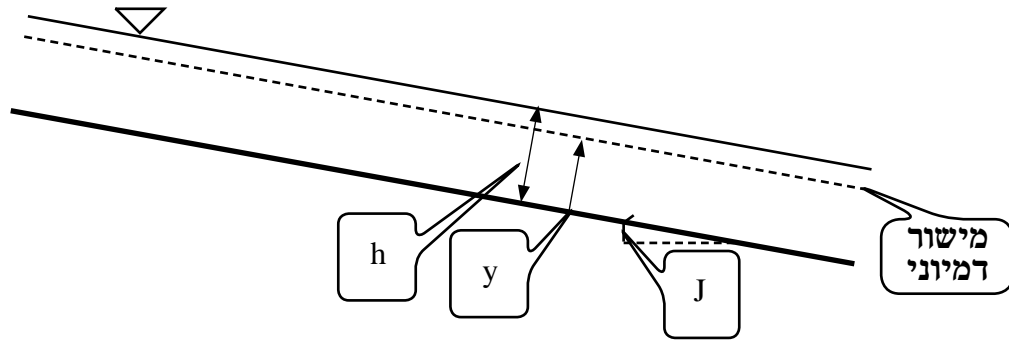
והמהירות הממוצעת:

$$V_a = Q/A = \frac{1}{3}b(gJ/v)h^3/(bh) = \frac{1}{3}(gJ/v)h^2 \quad (115)$$

14. זרימה טורבולנטית

זרימה טורבולנטית היא זרימה ערבולית. מרכז הכובד של כל נפח בקרה קטן נע באורח עקלקל, ובממוצע מתקדם לאורך מסלול כלשהו. המסלול הממוצע של כל נפחי הבקרה, מציין את הכיוון הכללי של הזרימה. הערבוליות נבלמת במגע של הזורם במוצק. המולקולות שנוגעות במוצק אינן נעות ביחס אליו, כאשר ישנה משיכה בין הזורם למוצק; או מחליקות על פניו, כאשר ישנה דחייה ביניהם. המולקולות המרוחקות מעט מהמוצק, נעות לאט. ככל שמתרחקים מן המוצק, גוברת המהירות ומוגבלת פחות על ידי נוכחות המוצק. האזור בו מוגבלת הזרימה על ידי נוכחות המוצק, נקרא שכבת הגבול של הזרימה.

לשכבת הגבול שני תתי שכבה: למינרית וטורבולנטית. תת השכבה הלמינרית, נמצאת סמוך לפני המוצק. מתקיים בה פרום מהירויות



תרשים 15: חתך לאורך של זרימה למינרית על פני משטח רחב

$k = 0.4$, ולכן:

$$V(y) = 2.5 \sqrt{(gRJ)} \ln(y/y_0) = 5.75 \sqrt{(gRJ)} \log(y/y_0) \quad (123)$$

יש מגדירים את $\sqrt{(gRJ)}$ כמהירות החיכוך V_f או כמהירות הגזירה, ומכאן:

$$V(y) = 5.75 V_f \log(y/y_0) \quad (124)$$

במקרה שפני המוצק חלקים, עומק הייחוס y_0 קשור למהירות החיכוך ולצמיגות הקינמטית:

$$y_0 = v/9V_f \quad (125)$$

נציב ונקבל:

$$V(y) = 5.75 V_f \log(9yV_f/v) \quad (126)$$

ובמקרה שפני מוצק מחוספסים, $y_0 = k/30$, כאשר k גובה החספוס. נציב ונקבל:

$$V(y) = 5.75 V_f \log(30y/k) \quad (127)$$

נניח עוד, בעקבות קיליגן, כי פרוס המהירויות הלוגריתמית שנמצא לתת שכבת הגבול הטורבולנטית ממשיך לתוך גוף הנוזל העיקרי. לאחר פעולות מתמטיות, ובהזנחת הספיקה בתת השכבה הלמינרית, נקבל כי המהירות הממוצעת V , בחתך בעל פנים חלקים:

$$V = V_f(A_0 + 5.75 \log(V_f R/v)) \quad (128)$$

ובחתך בעל פנים מחוספסים:

$$V = V_f(A_0 + 5.75 \log(R/k)) \quad (129)$$

כאשר A_0 מקדם שתלוי במספר פרוד של הזרימה ובאופי פני המוצק. תמצית ערכיו רשומים בטבלה 1. הנוסחאות המקובלות לזרימה קצובה ותמיידית הן: שזי, דרסי-ויסבך ומנינג. ניסוחיהן, בהתאמה:

$$V = C\sqrt{(RJ)} \quad (130)$$

$$V = \sqrt{(8gRJ/f)} \quad (131)$$

$$V = n^{-1} R^{2/3} J^{1/2} \quad (132)$$

מקדמי הנוסחאות האלה קשורים זה לזה כלהלן:

$$C = \sqrt{(8g/f)} = R^{1/6}/n \quad (133)$$

לפי ההגדרה:

$$V_f = \sqrt{(gRJ)} = V\sqrt{(g)/C} \quad (134)$$

נציב אותה בנוסחה לזרימה בקרבת פני מוצק חלקים:

$$V = V\sqrt{(g)/C(A_0 + 5.75 \log((V\sqrt{(g)/C})R/v))} \quad (135)$$

נציב עתה את מספר ריינולדס ונצמצם ב- V :

$$1 = (\sqrt{(g)/C})(A_0 + 5.75 \log(Re\sqrt{(g)/C})) \quad (136)$$

ומתקבלת נוסחה הקושרת בין מספרי ריינולדס ופרוד של הזרימה הטורבולנטית באפיק חלק.

במקרה שפני המוצק מחוספסים:

$$1 = (\sqrt{(g)/C})(A_0 + 5.75 \log(R/k)) \quad (137)$$

הנוסחה כאן אינה מתייחסת למספר ריינולדס, כי השפעת הצמיגות זניחה.

נציב את מקדם ההתנגדות למנינג במקום המקדם לשזי, ונמצא שהמקדם למנינג קשור למספר פרוד ולרדיוס ההידרולי:

$$n = R^{1/6}/(\sqrt{(g)(A_0 + 5.75 \log(R/k))}) \quad (138)$$

מרבית הנוסחאות הרשומות כאן פותחו לזרימה קצובה ותמידית, בה נמצא הפסד העומד ביחס ישר לאורך קטע הזרימה. מצב זה אינו מתקיים בזרימות אחרות. עוד חשוב לציין כאן את הפסדי העומד המקומיים שמתקיימים בזרימה דרך מעבירי מים, במפלס, עקב שינויים בכיוון הזרימה וכדומה. הערכות על גודלם, מוצגות במאמר מבנים הידרוליים (גרינס ובן-צבי, 2008).

15. יציבות הזרימה

המשוואות שפותחו עד כה, לא הוגבלו במספר פרוד. מתברר שכאשר מספר פרוד גבוה מאוד, עלולים להיווצר בנוזל גלים סוערים. המצב בו עלולה להופיע אי יציבות כזו, מאופיין על ידי מספר ורדניקוב, Ve :

טבלה 1: ערכי A_0

Fr	פני המוצק חלקים		פני המוצק מחוספסים	
	טווח ערכים	ערך מרכזי	טווח ערכים	ערך מרכזי
$1 >$	17 - 6	7.5	7 - 1	4
2 - 1		6.5		3
3		4.8		1.5
> 3			1 - 0	

המקרים, נקבע הקשר מתוך ניסויי מעבדה. להלן שני קשרים. קשר אברהם (142), שתקף כל עוד $Re_p < 2000$; וקשר טרטון-לוונשפיל (143) שתקף כל עוד $Re_p < 500,000$:

$$C_D = 0.28(1 + 9.06/Re_p)^2 \quad (142)$$

$$C_D = (24/Re_p)^*(1 + 0.173Re_p^{0.657}) + 0.413/(1 + 16,300Re_p^{-1.09}) \quad (143)$$

17. מהירות הנפילה

חלקיק שנמצא בתוך זורם, נע בהשפעת כוח הגרר שהזורם מפעיל עליו ובהשפעת כוח הכבידה. הרכיב האופקי של תנועת הזורם גורר את המוצק אתו, אם כי מהירות התנועה של המוצק אינה זהה בהכרח לזו של הזורם. הרכיב האנכי של הזרימה, שמכוון כלפי מעלה, גורר גם הוא את המוצק. הרכיב האנכי של מהירות המוצק ביחס לזורם, מושפע משקול כוח הגרר וכוח הכבידה. כל עוד מכוון השקול כלפי מטה, מואצת נפילת החלקיק. עם גידול מהירות הנפילה, גדל כוח הגרר שכיוונו הפוך לכיוון הנפילה. כאשר משתווה כוח הגרר לכוח המשיכה, נופל המוצק במהירות קצובה, הנקראת מהירות הנפילה הסופית. שוויון הכוחות מחייב:

$$V_p(\rho_s - \rho_f)g = C_D^* \rho_f A_c V_t^2 / 2 \quad (144)$$

כאשר V_p נפח המוצק, ρ_s צפיפות המוצק, ρ_f צפיפות הזורם, g תאוצת הכבידה, C_D^* מקדם הגרר הסופי, A_c שטח צללית המוצק, V_t מהירות הנפילה הסופית. לאחר פעולות אריתמטיות:

$$V_t = \sqrt{(2g(V_p/A_c)((\rho_s - \rho_f)/\rho_f)/C_D^*)} \quad (145)$$

הפתרון המקובל של המשוואה הוא נומרי, תוך ניסוי וטעייה.

במקרה של חלקיק מוצק כדורי שקוטרו D :

$$V_t = \sqrt{(2g(\frac{\pi}{6}D)((\rho_s - \rho_f)/\rho_f)/C_D^*)} \quad (146)$$

אולם גם אז אי אפשר לפתור את המשוואה

$$Ve = xFr(1 - RdP/dA) \quad (139)$$

כאשר x מעריך החזקה של הרדיוס ההידרולי בנוסחת הזרימה (2) לזרימה למינרית, $\frac{1}{2}$ בנוסחאות שזי ודרסי ויסבך, $\frac{3}{8}$ בנוסחת מנינג. כל עוד $Ve < 1$, מדוכא כל גל שנוצר מהפרעה לזרימה. אולם כאשר $Ve > 1$, מתבדרת עוצמת הגלים.

16. כוחות גרר

כאשר מוצק נע בתוך זורם או כאשר גוש מוצק נח נמצא בתוך זורם נע, מפעיל הזורם על המוצק כוח גרר בכיוון הזרימה. לכוח זה שני רכיבים: כוח החיכוך (נקרא גם כוח גרר צמיג), וכוח הלחץ (כוח גרר צורה). כוח החיכוך, נוצר על ידי מאמצי הגזירה בין הזורם למוצק. כוח הלחץ, נוצר בגלל הפרעת המוצק לזרימת הזורם אשר מגיע מול המוצק, מתבדר ומתכנס חזרה בעורף המוצק. ההסטה והחזרה, גורמות לעליית הלחץ בחזית המוצק ובירידת הלחץ בעורפו. גודל כוח הלחץ, שווה למכפלת הפרש הלחצים האלה בשטח צללית המוצק.

שני רכיבי כוח הגרר, נמצאים בקשר עולה עם ריבוע מהירות הזרימה של הזורם ביחס למוצק ועם צפיפות הזורם. מכאן:

$$F_D = C_D A_c \rho V^2 / 2 \quad (140)$$

כאשר F_D כוח הגרר, C_D מקדם הגרר, A_c שטח צללית המוצק, ρ צפיפות הזורם, V מהירות הזורם ביחס למוצק. מקדם הגרר קשור למספר ריינולדס של החלקיק המוצק, Re_p :

$$Re_p = D_p V / \nu \quad (141)$$

כאשר D_p גודל אופייני של החלקיק, ν הצמיגות הקינמטית של הזורם.

לקשר בין מקדם הגרר למספר ריינולדס של החלקיק, יש ניסוח אנליטי רק למקרים שהחלקיק כדורי ומספר ריינולדס קטן מאוד. לכל שאר

הוא:

$$\tau_a = \rho g R J \quad (150)$$

כאשר ρ צפיפות הנוזל, g תאוצת הכבידה, R הרדיוס ההידרולי של האפיק, J הגרדינט ההידרולי. בזרימה קצובה ותמידית, כוח הגריפה ליחידת אורך אפיק F_l הוא:

$$F_l = \tau_a P \Delta x / \Delta x = \rho g A J \quad (151)$$

כאשר P ההיקף המורטב, Δx יחידת אורך, A החתך המורטב, J הגרדינט ההידרולי.

מאמץ הגזירה גדול יחסית בגזרות בהן גבוהה המהירות בקרבת הדופן, ונמוך יחסית בגזרות בהן נמוכה המהירות בקרבת הדופן. עקירת המוצק והסעתו דורשות אנרגיה שמופקת מהאנרגיה הקינטית של הזורם, וזו מתחדשת מתוך האנרגיה הפוטנציאלית שמשתחררת במהלך הזרימה במורד הטופוגרפיה. כאשר התחדשות האנרגיה הקינטית קטנה, בעקבות התמתנות שיפוע האפיק, הגעה למכשולים שמעכבים את הזרימה או בצד הפנימי של נפתול, קטן כושר ההסעה של הזורם וחלק מהסחופת שוקע. ראשונים שוקעים המוצקים דורשי האנרגיה הרבה להסעתם, כלומר הגדולים והמחוספסים, והאחרונים הם המוצקים דורשי האנרגיה המעטה להסעתם, כלומר הדקים והחלקים. זאת רואים גם בנוסחאות של מהירות השקוע, לפיהן ככל שקוטר המוצק גדול יותר - מהירות שקיעתו גדולה יותר. לעומת זאת, לאחר מכשול, כשהשיפוע מתלל, בצד החיצוני של נפתול וכדומה, גדלה אנרגיית הזורם ואתה כושר ההסעה. בדרך זו נוצרת חתירה במורד סכרים או מכשולים אחרים, במעלה מפלים (בשל התגברות המהירות עקב הקטנת הלחץ המעכב), במורד מפלים (בשל האנרגיה הקינטית הנרכשת בעת הנפילה), בצד החיצוני של נפתולים וכדומה. כתוצאה מתהליכים אלה, נסוגים לאחור מיקומי מפלים ומתארכות קשתות נפתולים. קשיות חומר האפיק קובעת את קצב התרחשות השינויים האלה, אך לא את עצם קיומם.

תיאור מפורט יותר ומעמיק יותר של תהליכי הסעת הסחופת, נמצא אצל לקח וח' (2008). קישורה לנושאים הידרולוגיים נמצא במאמר הידרולוגיה (בן-צבי, 2008).

19. הלוך גאות באפיק

הלוך גאות, הוא חישוב שבאמצעותו מתארים

במישרין, כי מקדם הגרר הסופי תלוי במספר ריינולדס של החלקיק וזה תלוי במהירות הנפילה הסופית שהיא הנעלם. מהירות הנפילה הסופית, נמצאת בקשר עולה עם קוטר החלקיק. קשר עולה כזה מתקבל גם עבור חלקיקים בעלי צורות אחרות. כאשר מהירות הנפילה הסופית נמוכה מאוד, כוח הגרר כמעט כולו צמיג ופתרון המשוואה:

$$F_D = 3\pi\mu DV_t \quad (147)$$

כאשר F_D כוח הגרר הצמיג, μ הצמיגות הדינמית של הזורם, D גודל החלקיק, V_t מהירות הנפילה הסופית. מקדם הגרר הסופי:

$$C_D^* = 24/Re_p \quad (148)$$

לאחר הצבה ופעולות מתמטיות:

$$V_t = (D^2/18)g(\rho_s - \rho_f)/\mu_f \quad (149)$$

כאשר μ_f הצמיגות הדינמית של הזורם, זה חוק סטוקס. הוא תקף כל עוד $Re_p < 0.01$.

18. הסעת סחופת

סחופת היא החומר המוצק המוסע על ידי המים הזורמים. הגדרה זו אינה כוללת את המומסים שנחשבים כחלק מן הנוזל ואת החומרים המוסעים במצב גזי. הסחופת נחלקת לשלושה רכיבים: גרופת - המוצקים שנגררים, מתגלגלים או מקפצים על קרקעית האפיק; רחופת - המוצקים שמרחפים בתוך הגוף הזורם; צופת - המוצקים הצפים על פני המים.

תהליך הסעת הסחופת מורכב משלושה שלבים: חתירה (או הנעה), הובלה ושיקוע. כדי להניע מוצק שנמצא במצב מנוחה, יש להתגבר על כוחות החיכוך והתאחיזה שבינו לבין סביבתו ועל התמדתו במצב מנוחה; וכדי להמשיך להניעו, יש לספק אנרגיה שתמנע ממנו לשקוע ושתוביל אותו בכיוון הזרימה, למרות התנגשויותיו במוסעים אחרים ובמוצקים נייחים. העקירה מן המקום התחילי ומתן תנע, דורשים השקעת כוחות גדולים יותר מאשר המשך ההנעה במורד הזורם. הכוחות מושגים ממכת טיפות הגשם, מהתנע (או מהאנרגיה) של הזורם ומכוח הכבידה (או האנרגיה הפוטנציאלית) של המוסע ושל המסיע.

ההנעה מן האפיק תלויה במהירות הזרימה. הכוח שמפעיל הנוזל על מוצק בו הוא מתחכך או העומד בדרכו, נמצא ביחס ישר לריבוע המהירות (או לאנרגיה הקינטית) ולצללית המוצק. כאמור, מאמץ הגזירה הממוצע על דופנות האפיק, τ_a

ההידרוסטטי למים חסרי הלחץ, נקרא פני תהום. לנוכח רשת הזרימה הענפה והרצופה של מי התהום, אנו יכולים להתייחס לתופעות הזרימה בתוכו כמתרחשות ברצף אחיד. גישת רצף זו נכונה כל עוד איננו יורדים לרמת פירוט גדולה של הזרימה.

מאחר שהשריג המוצק ממלא את עיקר נפח האקווה, והמים יכולים להימצא ולזרום רק בחללים המפותלים שהמוצק מותיר בתוכו, קשה להתייחס, בדרך כלל, למהירות הזרימה. במקום זה נוח להתייחס לספיקה הסגולית, q :

$$q = nV \quad (157)$$

כאשר n נקוביות המסלע (היחס בין נפח החללים שנמצאים בנפח בקרה לבין גודלו של נפח הבקרה), V המהירות הממוצעת.

בגלל מהירות הזרימה הנמוכה, מתקיים באקווה, בדרך כלל, חוק זרימה ליניארי שנוסח על ידי דרסי:

$$Q = -KAdh/dx \quad (158)$$

כאשר Q ספיקת המים, K המוליכות ההידרולית של האקווה, A שטח החתך לרוחב של האקווה, h עומד המים, x מרחק בכיוון הזרימה. הסימן מינוס, מציין כי כיוון הזרימה נמצא בכיוון פחיתת העומד ההידרולי. זרימת מי תהום מתוארת היטב בספרות המקצועית. בגלל חשיבותה המעטה לניקוז על-קרקעי, לא נרחיב כאן את העיון בה.

מראי מקומות

בן-צבי, א' (2008). הידרולוגיה. בתוך נחלים וניקוז – תהליכים, הנדסה ותכנון (ע' א' בן-צבי), רשות ניקוז שקמה-בשור והמכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון, עומר: 49-70.

גרינס, ל'; בן-צבי, א' (2008). מבנים הידרוליים. בתוך נחלים וניקוז – תהליכים, הנדסה ותכנון (ע' א' בן-צבי), רשות ניקוז שקמה-בשור והמכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון, עומר: 199-217.

לקח, י'; אלכסנדרוב, י'; לרון, י' (2008). הסחף הנחלי. בתוך נחלים וניקוז – תהליכים, הנדסה ותכנון (ע' א' בן-צבי), רשות ניקוז שקמה-בשור והמכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון, עומר: 99-130.

Chow, V.T. (1959). **Open-Channel Hydraulics**. McGraw-Hill, New York.

כמותית כיצד זורמים המים מאתר לאתר לאורך האפיק. מתוך שיקולים קינמטיים, אפשר לקבל את הנוסחה למהירות ההתקדמות של גל גאות, U :

$$U = dQ/dA \quad (152)$$

כאשר Q ספיקת המים הזורמים, A שטח החתך המורטב. בספיקות גבוהות, אין המהירות הממוצעת רגישה לשטח החתך ואז מהירות ההתקדמות הגל קרובה למהירות המים. החישובים המודרניים להלוך גאות, מיישמים משוואות דיפרנציאליות שמתבססות על שימור המסה (משפט הרציפות) ועל שימור התנע:

$$\partial A/\partial t + \partial Q/\partial x - q = 0 \quad (153)$$

$$\partial V/\partial t + V\partial V/\partial x + g\partial y/\partial x + qV/A = g(S_0 - S_f) \quad (154)$$

כאשר t זמן, x מרחק בכיוון הזרימה, q ספיקה צדית (מתווספת) ליחידת אורך, V מהירות הזרימה הממוצעת בחתך, g תאוצת הכבידה, y עומק המים, S_0 שיפוע הקרקעית בכיוון הזרימה, S_f הגרדינט ההידרולי. לפי ההגדרה:

$$S_f = \partial (z + y + V^2/2g) / \partial x \quad (155)$$

אולם נהוג לעתים קרובות לפי מנינג:

$$S_f = (nQA^{-1}R^{-2/3})^2 \quad (156)$$

הניסוח המוצג כאן הוא דינמי, חד-ממדי ומתאים לזרימה באפיק מוגדר. ניסוחים דו-ממדיים מאפשרים התחשבות בהתפשטות המים מעבר לגדות האפיק, זרימה בדלתאות ובמניפות, התחשבות בזרימה בתוך יובלים וכדומה. הניסוח הדינמי קשה לפתרון ומחייב כמות נתונים רבה יחסית. נוסח קל וזול יותר מזניח את אגף שמאל של משוואת התנע (154), היות שבמקרים רבים שני האיברים באגף ימין גדולים מאוד ביחס לאיברי אגף שמאל. נוסח מקוצר זה של שימור התנע ומשפט הרציפות, יוצרים מודל קינמטי להלוך גאות באפיק. פיתוח המשוואות הדינמיות, נמצא בספרות המקצועית, ובקיצור גם בספר זו (בן-צבי, 2008).

20. זרימת מי תהום

שכבה תת קרקעית שנושאת מים בעלי לחץ הידרוסטטי, נקראת אקווה (אקוויפר בלעז) והמים האלה נקראים מי תהום. השכבות המוליכות שנמצאות מעל האקווה, נקראות האזור הבלתי רווי. אזור זה עשוי להכיל מים בני תנועה, אך חסרי לחץ הידרוסטטי. המשטח המפריד בין המים בעלי הלחץ

הידרולוגיה

אריה בן-צבי

פרופסור, מורה מן החוץ, המחלקה להנדסת בניין, המכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון; לשעבר מנהל השירות ההידרולוגי.

1. מהות

הידרולוגיה היא המדע העוסק במי כדור הארץ, הופעתו, תנועתו, פרוסם, תכונותיהם הכימיות והפיזיות וקשריהם עם הסביבה. העבודה ההידרולוגית מתרכזת בתהליכי הזרימה על פני היבשות ובתוכן, בהתמלאות ובהתרוקנות מאגרי המים, בקביעת מסלולי הזרימה, בהסעת חומרים מוצקים ומומסים ובקשרי הגומלין של כל אלה עם הסביבה. הכרת התהליכים וקביעת ערכים כמותיים שלהם, מועילות לניהול ובקרה של פעילויות אנושיות רבות.

תיאורים טובים של מהות ההידרולוגיה ודרכי העיסוק בה מצויים בספרים רבים, מהם נציין כאן את: Chow (1964), Linsley et al (1982), Maidment (1993), Shaw (1994).

2. המחזור ההידרולוגי

מרבית מסת המים של כדור הארץ נקווית בימים, מיעוטה על פני היבשות ובתוכן ומעט מאוד ממנה באטמוספירה. מגע פני המים שנמצאים במצב נוזל או מוצק עם האטמוספירה, מאפשר התאדות של מקצת מהם למצב גזי. אדי המים מהווים חלק מן האוויר כל עוד מצב הטמפרטורה, הלחץ והצפיפות מאפשרים את הימצאותם שם בכמות הקיימת. כאשר חדל מצב האוויר מלאפשר זאת, מתעבה עודף אדי המים לחלקיקים נוזלים או מוצקים. מצבור חלקיקים כאלה הוא ענן. החלקיקים הנוזלים והמוצקים צפופים יחסית ובגלל כובדם נוטים לשקוע כלפי מטה, אך החיכוך גורר אותם בכיוון תנועת האוויר. יחס הכוחות קובע אם ירדו כמשקעים או יינשאו עם הרוח. ככל שהחלקיקים גדולים יותר, גדל היחס בין הכוח המשקע לכוח הגורר.

המשקעים יורדים כנוזלים (גשם), כמוצקים (שלג וברד) או כגזים (שמתעבים לטללים ולכפור). חלק מן המשקעים המוצקים נמס תוך זמן לא רב והופך לנוזלים, חלק מתאדה וחלק נשאר במצב מוצק למשך זמן רב. בתנאי ארץ ישראל, ההמסה מתרחשת תוך שעות עד חודשים אחדים. המשקעים היורדים כנוזלים מרטיבים את פני השטח, לרבות הצמחייה, או נקווים. הטללים מרטיבים את פני השטח ומטפטפים על הקרקע. כאשר תכונות פני השטח מאפשרות, חודרים מים אל תוך הקרקע. לעתים המים נאחזים בגופים על קרקעיים, בעיקר כלכידה בצמחים. המים הלכודים עשויים להתאדות בתהליכי אידוי ונידוף או להמשיך בקצב מואט לקרקע כנטף או זרימה גבעולית (Ward and Elliot, 2004).

בהמשך מסלולם בתת הקרקע, מגיעים המים החודרים אל שכבות בלתי מוליכות או בעלות מוליכות קטנה, ונקווים מעליהן. ההיקוות יוצרת לחץ הידרוסטטי בתוך גוף המים. שכבה נושאת מים בעלי לחץ הידרוסטטי, נקראת אקווה (אקוויפר בלעז) והמים האלה, נקראים מי תהום. השכבות המוליכות שנמצאות מעל האזור בו נמצאים המים בלחץ הידרוסטטי, מכונות האזור הבלתי רווי. אזור זה עשוי להכיל מים בני תנועה, אך חסרי לחץ הידרוסטטי. זרימת המים האלה נקראת זרימת ביניים, והיא מתרחשת לאורך מסלולים מועדפים שנמשכים, בדרך כלל, בכיוון שכבות קרקע או כלפי מטה. אקווה שפני המים בה פתוחים ללחץ האטמוספרי, נקראת חופשית (פריאטית). כאשר מגיעים המים אל שכבות מוליכות המכוסות בגבולות מוליך, הם עשויים להילחץ אל הגג. אקווה שהמים בה לחוצים כנגד גגה, נקראת כלואה (כונפינד). מי התהום נעים

יחסית: אנו נהנים ממשקעים בנפח ממוצע של כ- 10 ק"מ מעוקבים לשנה ($1\text{km}^3 = 10^9\text{m}^3$) ויבול המים הממוצע הוא כ- 2 ק"מ מעוקבים לשנה בלבד. משמע, כ- 80% של נפח מי המשקעים היורדים כאן, מתאדים.

3. משקעים והתאדות

התהליכים הכרוכים בירידת משקעים ובתכונות המשקעים היורדים בישראל, מתוארות במאמר מטאורולוגיה (גולדרייך, 2008). כאן נציין כי הממד הבסיסי של משקעים הוא עוביים, כלומר נפח מי המשקעים היורדים על פני יחידת שטח אופקית. המשתנה הבא בחשיבותו להידרולוגיה הוא עוצמת הגשם, דהיינו עובי הגשם היורד ביחידת זמן, למשל מ"מ לשעה. משתנים חשובים אחרים הם משך הגשם, פרוס עוצמת הגשם במרחב ובזמן וכדומה.

במאמר מטאורולוגיה (גולדרייך, 2008), מתוארים גם תהליכי ההתאדות והגורמים המשפיעים עליה, לרבות הערכות ההתאדות בארץ ישראל. בעת עיסוק בנושא זה, יש להבחין בין ההתאדות הריאלית, שמתרחשת למעשה, לבין ההתאדות הפוטנציאלית. ההתאדות הפוטנציאלית היא ההתאדות שעשויה להתרחש במצב המטאורולוגי השורר בשטח, אלמלא מתקיימת שם מגבלה על זמינות המים. השיטות להערכת ההתאדות מופיעות במאמר מטאורולוגיה.

4. חידור

חידור הוא כניסת מים מפני הקרקע לתוכה. כשיורד גשם או כשנמסים על פני הקרקע משקעים מוצקים, חודרים מימיהם אל תוך החללים שבקרקע. כיוון החידור אנכי ככיוון כוח הכבידה, אך בהמשך המסלול עשוי כיוון הזרימה להשתנות בהתאם לאפשרות התנועה. שיעור החידור נקבע על ידי זמינות המים, תכונות הקרקע ורטיבותה. תכונות הקרקע הן הרכבה (סוג הגרגירים וגודלם), הנקבוביות, סוג כיסוי הקרקע, הטמפרטורה ועוד. כושר החידור של קרקע גרגרית גדול, בדרך כלל, מזה של קרקע חרסיתית. כושר החידור של קרקע רוויה קטן מזה של קרקע שאינה רוויה, אולם בקרקעות מסוימות כושר החידור במצב יבש לחלוטין, קטן מזה הקיים במצב לח. כושר החידור של קרקע סדוקה עשוי להיות גדול מאוד, ולעומתו

ככיוון הגרדינט של פחיתת האנרגיה האצורה בהם, ולא דווקא ככיוון כוח הכבידה האנכי או ככיוון שיפוע בסיס האקווה. בסופו של מסלול הזרימה, יוצאים מי התהום במעיינות ביבשה או בים.

המים שאינם יכולים לחדור אל תוך הקרקע, בגלל מגבלת כושר החידור של הקרקע או המשטח עליו מצויים, נקווים בשוליות על פניה. השוליות מקבלות מי גשם ומשמשות כמקור לחידור אל תוך הקרקע וכמאגר מים זמינים להתאדות. השוליות גדלות כל עוד יורד גשם עודף בעוצמתו מעל כושר החידור. כאשר עומד המים בהן גבוה מספיק, מתחילה זרימה על פני הקרקע. המים זורמים, בדרך כלל, לפי שיפועי הקרקע או מוסטים לכיוונים אחרים בגלל מגבלות הזרימה. הם מתרכזים בהדרגה באפיקים ובנחלים וזורמים לקראת בסיס הניקוז, שהוא ים, אגם או שקע מקומי. המים הזורמים יכולים להוות מקור לחידור דרך קרקעית האפיק או גדותיו. לאורך מסלול הזרימה יכולים המים הזורמים להתרבות, עקב הצטרפות יובלים, ירידת משקעים על פניהם, בצבוצ של מי תהום וזרימת ביניים ושפיעת מעיינות; או להתמעט עקב הצפות לסביבה וחידור דרך מעטפת האפיק (איבודי תמסורת). בגלל איבודי תמסורת, לא כל הגיאויית המופיעות בנחלים מדבריים מגיעות לבסיס הניקוז שלהם.

הזרימה העל-קרקעית בעקבות ירידת גשמים, נקראת נגר גשמים והזרימה בעקבות המסת שלגים, נקראת נגר שלגים. הזרימה המתקיימת בנחל כתוצאה משפיעת מעיינות, נקראת זרימה תקינה או זרימת בסיס. נחל שמוליך מים כל ימות השנה, נקרא נחל איתן (נהר, בלשון המקרא) נחל שמוליך מים בעקבות גשמים בלבד, נקרא נחל אכזב (ואדי, בערבית). מלבדם ישנם גם נחלים שמוליכים זרימה עונתית של נגר ושפיעת מעיינות.

לא כל המים היבשתיים זורמים ומגיעים אל הים. חלקם מתאדה מאגמים, מאגרים ונחלים או מתוך הקרקע ובאמצעות צמחים. חלק חשוב ממי המשקעים שיוורדים על היבשה מקורו בהתאדות מצמחייה, בעיקר באזורים הטרופיים. במאזן הכולל של היבשות, ההתאדות צורכת כ- 60% של נפח מי המשקעים היורדים עליהן, והזרימה למקווי המים כוללת רק 40% של נפח מי המשקעים האלה. בארץ ישראל, השוכנת באזור שחון, המצב חמור

הפרש העומד בין פני המים על הקרקע לבין אלה שנמצאים בחזית הזרימה (שם העומד הוא כושר היניקה של הקרקע). לכן, כשמתקיים חידור, גדלים בהדרגה אורך מסלול הזרימה וההתנגדות לה, וקטן כושר החידור.

גריין ואמפט (Green and Ampt, 1911) ניסחו את תהליך הקטנת כושר החידור:

$$f(t) = K (1 + (\Phi - \Theta_i) S_f / F(t)) \quad (1)$$

כאשר $f(t)$ כושר החידור ברגע t , $[L/T]$, K המוליכות ההידרולית של הקרקע $[L/T]$, Φ נקבוביות הקרקע $[1]$, Θ_i תכולת הרטיבות התחילית של הקרקע $[1]$, S_f כושר היניקה של הקרקע בחזית ההרטבה $[L]$, $F(t)$ עובי מצטבר של המים שחדרו עד רגע t $[L]$.

הורטון (Horton, 1940, 1939), ניסח את התהליך כדעיכה אקספוננציאלית עם הזמן t :

$$f(t) = f_r + (f_i - f_r) e^{-\beta t} \quad (2)$$

כאשר f_r $[L/T]$ כושר חידור סופי, f_i $[L/T]$ כושר חידור תחילי, β $[T^{-1}]$ מקדם ושלושם תלויים בתכונות הקרקע.

מורין ובנימיני (Morin and Benyamini, 1977) שינו את נוסחת הורטון:

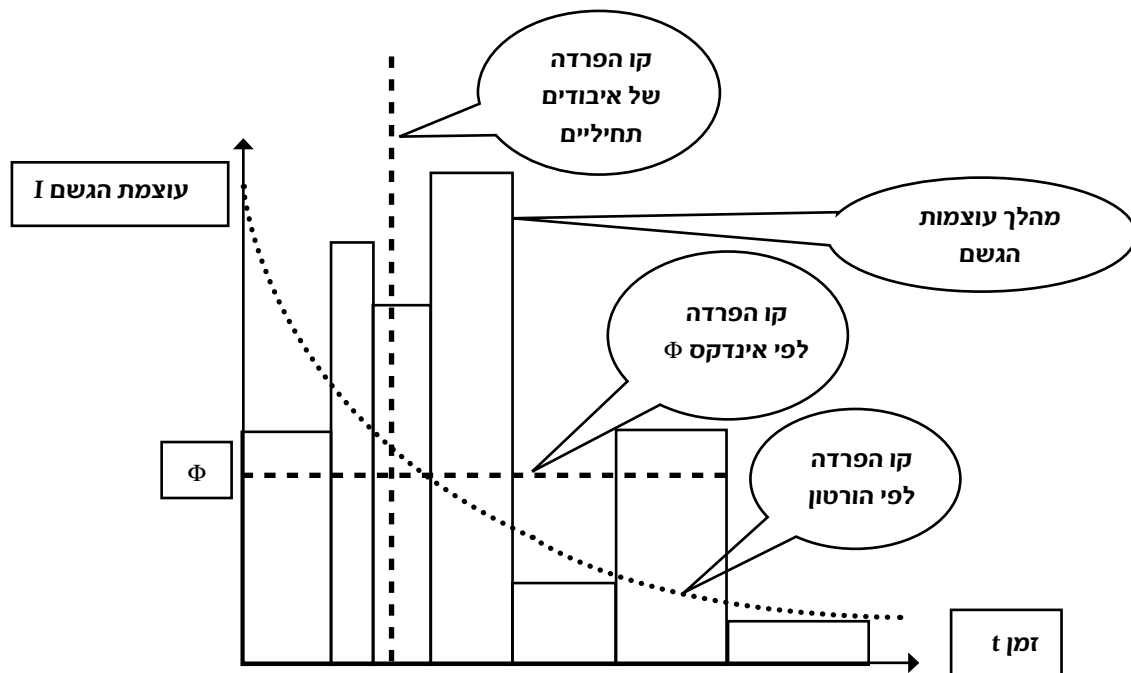
$$f(t) = f_r + (f_i - f_r) e^{-\gamma d} \quad (3)$$

כאשר γ $[L^{-1}]$ מקדם תלוי בתכונות הקרקע, d $[L]$

כושר החידור של קרקע קפואה קטן מאוד. שורשי צמחייה עשויים להגדיל את כושר החידור. שיטת העיבוד החקלאי עשויה להשפיע על כושר החידור. ישנן קרקעות, בישראל הן נמצאות בעיקר בנגב, שמכת טיפות הגשם יוצרת על פניהן קרום דק בלתי חדיר. קרומי קרקע ביוגניים שעשויים להיווצר באזורים חוליים בנגב, מקטינים אף הם את החידור באופן ניכר (Kidron, 1999). לכידה של גשם בצמחייה, מגבירה, בדרך כלל, את החידור, בגלל שבירת האנרגיה של הטיפות הנופלות והקטנת העוצמה המגיעה לקרקע.

כאשר עוצמת הגשם קטנה מכושר החידור - חודרים כל מי הגשם לקרקע ושיעור החידור בפועל שווה לעוצמת הגשם. כאשר עוצמת הגשם גדולה מכושר החידור, עודף המים נשאר על פני הקרקע ויוצר שלוליות. השלוליות יכולות לשמש מקור חליפי למי חידור, כאשר עוצמת הגשם קטנה. לכן כל עוד קיימת שלולית, שיעור החידור שווה לכושר החידור, גם כאשר עוצמת הגשם קטנה מכושר החידור.

כאשר יורד גשם על פני קרקע יבשה או לחה, חודרים מי גשם אל תוכה ומרוויים אותה. עומק השכבה הרוויה גדל והולך, כל עוד ישנה אספקת מים מלמעלה. הכוח המניע את הזרימה, הוא



תרשים 1: הפרדת האיבודים מהגשם המועיל

קבועה. באקוואה כלואה, עומד המים גבוה מן הגג. אקוואה כלואה שעומד המים בה גבוה מפני הקרקע, נקראת ארטזית.

זרימת מי תהום מונעת לפי חוק דרסי:

$$Q = -KAdh/dx \quad (4)$$

כאשר Q ספיקה $[L^3/T]$, K מוליכות הידרולית $[L/T]$, A שטח חתך הזרימה בניצב לכיוון הזרימה $[L^2]$, d סימן להפרש, h עומד $[L]$, x אורך בכיוון הזרימה $[L]$. הסימן מינוס מציין כי כיוון הזרימה הפוך לכיוון גידול העומד. לעתים נהוג להתייחס לספיקה הסגולית: $q = Q/A$ $[L/T]$. המהירות הממוצעת של זרימת המים באקוואה V $[L/T]$, גבוהה מהספיקה הסגולית: $V = q/n$, כאשר n היא נקבוביות המסלע ומוגדרת כיחס בין נפח החללים לבין הנפח הכולל. לנוכח החשיבות המעטה של מי התהום לניקוז על-קרקעי, נמעיט כאן בדיון בהם ובזרימתם.

6. מעיינות

מעיינות הינם מוצאים של מי תהום. חלקם מופיעים ביבשה וחלקם בתחתית הים. כללית, מעיינות מופיעים כאשר מתגלה החוצה בסיס האקוואה המזינה אותם או כאשר העומד שלהם והמוליכות ההידרולית מאפשרים זרימה החוצה. אקוואה יכולה להתנקז באמצעות מעיינות אחדים, אשר שפיעותיהם נחלקות בהתאם לתולכות, מרחקי הזרימה והעומדים האפשריים בסביבת מוצאיהם.

אופנים אחדים מקובלים לסיווג מעיינות. לפי מנגנון השפיעה - מעיינות שכבה מופיעים כשבסיס אקוותם נגלה החוצה בגלל טופוגרפיה, פעולות אנוש וכדומה; בצבוצים ונביעות מאקוואה חופשית מופיעים במקומות בהם פני המים נגלים החוצה בגלל טופוגרפיה וכדומה; נביעה מאקוואה כלואה מופיעה כאשר העומד בתוכה גבוה מפני הקרקע והמוליכות ההידרולית של גג האקוואה מאפשרת זרימה עד פני הקרקע, במיוחד במקומות בהם הגג סדוק. ישנם מעיינות פועמים, שאקוותם במסלע קרסטי בעל חללים גדולים ומסלוליהם עולים ויורדים כמו גשתה (סיפון). לפי הטמפרטורה - מעיין נחשב קר, אם טמפרטורת מימיו נמוכה מטמפרטורת הסביבה. מעיין נחשב חם, אם טמפרטורת מימיו גבוהה מ- 36° . נפח השפיעה ויציבותה משמשים גם כן כלים

עובי הגשם שירד עד רגע t .

הידרולוגים מעשיים מפשטים את התהליך לחלוטין. לפיהם, עד רגע מסוים אובד כל הגשם ומאותו רגע מתייצב שיעור האיבודים על ערך קבוע שנקרא אינדקס $\Phi [L/T]$. האיבודים כוללים את מי החידור ואת המים שמרטיבים את הצמחים ושאר העצמים על הקרקע או נותרים בשלוליות. חלק הגשם שאינו אובד, אלא הופך לנגר על-קרקעי, נקרא גשם מועיל. הערכתו נעשית באמצעות הפרדת האיבודים מכלל הגשם. שני אופני ההפרדה מתוארים סכימטית בתרשים 1.

הגיויני ונוח לקשור את כושר החידור ואת המוליכות ההידרולית אל תכונות הקרקע. בספרות המקצועית מצויים טבלאות ותרשימים, הקושרים את המשתנים האלה אל סוג הקרקע ורטיבותה. לרוע המזל, אין אחידות בהגדרות סוגי הקרקע שננקטים על ידי הגורמים השונים. לכן אסור להתייחס להגדרה מילולית כשלעצמה, אלא חובה לוודא כיצד מוגדרת הקרקע ולקבוע את מוליכותה ההידרולית ואת כושר החידור שלה לפי לוח מתאים.

5. מי תהום

מי התהום הם המים בני התנועה שנמצאים בתוך השריג המוצק של תת הקרקע ומתקיים בתוכם לחץ הידרוסטטי. החללים נושאי המים פזורים, כללית, בשני אופנים. במסלע גרגירי, כגון חול, אבן חול, אבן חול גירית, חלוקים וכדומה, סדורים המרווחים באורח סטטיסטי. לעומת זאת, במסלע סדוק שבנוי גושים גדולים של חומר אטום וביניהם חללים צרים או רחבים, אין החללים סדורים סטטיסטיים. זרימת המים עשויה להרחיב את הסדקים על ידי המסה כימית של הסלע או הסעת חלקיקים דקים, וליצור בהדרגה מחילות. מסלע בעל מחילות, נקרא קרסטי. לנוכח רשת הזרימה הענפה והרצופה בשני סוגי המסלע, אנו יכולים להתייחס לתופעות הזרימה של מי התהום כמתרחשות ברצף אחיד. גישה זו נכונה, כל עוד איננו יורדים לרמת פירוט קרובה לגודלם של החללים. עם זאת, בעיקר בעיון בהסעת מזהמים, יש להביא בחשבון כי הזרימה אינה אחידה במרחב אלא בעלת מסלולים מועדפים. באקוואה חופשית, עומד המים זהה לרום פני המים, אלא אם העומד המהירותי בר משמעות או צפיפות המים אינה

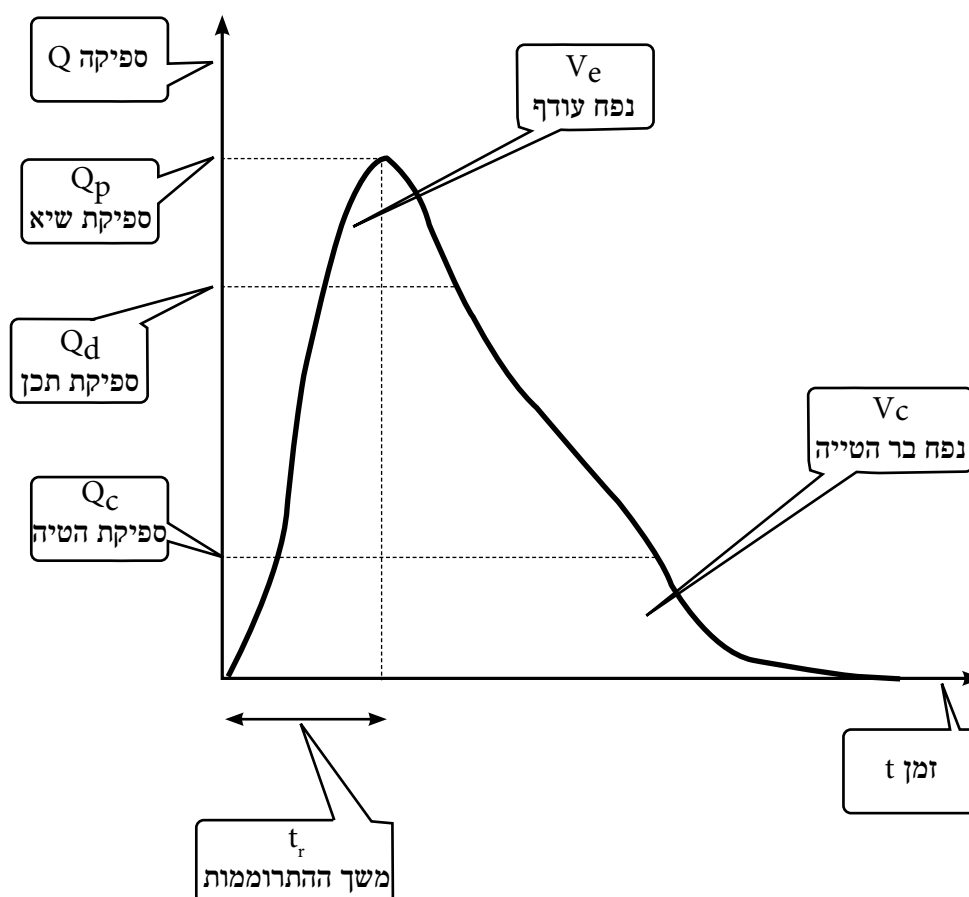
נגר, זרימת בסיס וזרימה אחרת. נגר, היא זרימה שמופיעה עקב אירוע מטאורולוגי - ירידת גשמים או המסת שלגים. נגר ישיר ניתן לשינוך ברור אל האירוע המטאורולוגי שגרם להיווצרותו, ואילו נגר עקיף משוייך לקבוצת אירועים מטאורולוגיים. נגר עקיף עשוי להופיע בכל מקום, אך בעיקר הוא מאפיין את ההידרולוגיה של אזורים מיוערים, של אזורי ביצות ועוד. זרימת בסיס, אינה ניתנת לשינוך ישיר אל האירועים המטאורולוגיים שגרמו להיווצרותה. הזרימה האחרת, היא מי פריצות ודליפות או מים שמוזרמים במכוון אל האפיק.

הנגר נוצר על פני תחום ההתנקזות, כאשר עוצמת הגשם גבוהה מכושר החידור (Horton, 1945). בדרך כלל אין כושר החידור אחיד על פני תחום ההתנקזות, ולכן במרבית אירועי הגשם נתרם הנגר מאזורים מועדפים בלבד. באקלימים לחים, נמצאים אזורים אלה ברומים הטופוגרפיים הנמוכים והלחים תמידית. לעומתם, במדבריות או בשטחים עירוניים, עשוי הנגר להתהוות בו-זמנית על פני כל תחום ההתנקזות. נהוג להפריד את הזרימות

חשובים לסיווג מעיינות. מעיין נחשב יציב, כאשר ההפרש בין הספיקה בעונה המרבית לספיקה בעונה המזערית אינו עולה על 25% של הספיקה הממוצעת. מעיין נחשב בלתי יציב, כאשר ההפרש הזה עולה על 100% של הספיקה הממוצעת. ישנם מעיינות אכזבים, שמתייבשים עונתית, ולעומתם ישנם מעיינות איתנים שזורמים כל השנה. בתקופת היובש דועכת שפיעת המעיינות. מקובל לתאר את תהליך הדעיכה באמצעות משוואה אקספוננציאלית שממקדמיה ניתן ללמוד על גודל האקוות ותכונותיהן ההידרוליות (גבירצמן, 2002).

7. זרימה בנחלים

מים זורמים בנחלים בכוח הכבידה. הם מגיעים לאפיקי הנחלים משפיעת מעיינות, ניקוז האזור הבלתי רווי, נגר גשמים, נגר שלגים, הפשרת קרחונים, ניקוז חקלאי, שפכים וקולחים, דליפות ופריצות ממתקנים מעשי אנוש ועוד. מבחינת אופי הזרימה, נהוג להתייחס לשלושה סוגים:



תרשים 2: הידרוגרף ומבנהו

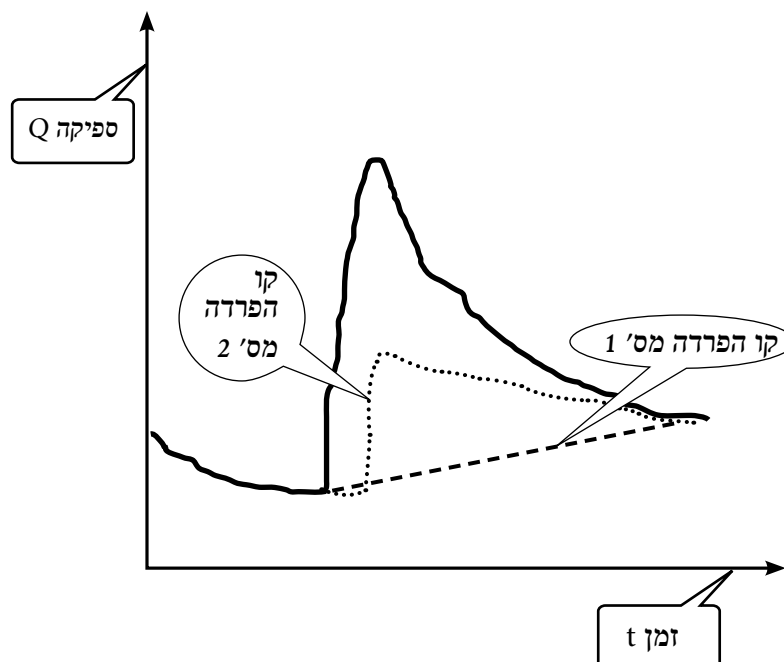
הנפח העודף במעלה מכשול, כאשר ידוע כושר ההולכה של האפיק באתר המכשול (ספיקת התכן). בתרשים 2 מתוארים סכמתית ההידרוגרף ואחדים משימושיו.

ההידרוגרף, בנוי מזרימת נגר זרימת בסיס. זרימת הבסיס עשויה להתקיים לפני הופעת הנגר, בעת הופעתו ולאחר שחדל. בעת הופעת הנגר מתערבים בו מי זרימת הבסיס, ואין אפשרות להפריד ביניהם פיסית. ההפרדה המחשבתית נדרשת כאשר עוסקים ברכיבי הזרימה. מקובלות מספר דרכי הפרדה. בדרך כלל קל לזהות את מועד תחילת הנגר, כיוון שההידרוגרף מתחיל להתרומם אז במהירות. זיהוי נקודת הסיום קשה יותר, כיוון שצריך להבחין בין דעיכת הנגר, התלולה יחסית, לדעיכת זרימת הבסיס, המתונה. כאשר מניחים שאין לגשם או להמסת השלג השפעה מידית על זרימת הבסיס, מאריכים את עקום הדעיכה שלה ממועד הופעת הנגר עד שייפגש עם ההידרוגרף המדוד. הספיקה תחת עקום הדעיכה היא זרימת הבסיס, והספיקה מעליו היא הנגר הישיר. כאשר מניחים שיש לאירוע המטאורולוגי השפעה על זרימת הבסיס, קו ההפרדה צריך לעלות במשך זרימת הנגר. יש שמעלים אותו עד לשיא ולאחר מכן מדעיכים אותו, באופן שיגיע ברציפות לקו ההמשך של זרימת הבסיס לאחר תום הנגר, ויש

בטבע בין זרימה משטחית במדרונות לבין זרימה נחלית באפיקים מוגדרים. הזרימה באפיקים מגיעה מהמדרונות, מגשם ישיר ומבצבוץ בתוכו.

מהלך הזרימה בנחל מתואר, בדרך כלל, כפונקציה של הספיקה כנגד הזמן (הידרוגרף). ספיקה, היא נפח המים העובר דרך חתך אפיק ביחידת זמן. הספיקה קשורה לעומק המים, למבנה האפיק וחשפוס דפנותיו ולשיפוע קו העומד. העומק נמדד במישרין, בדרך כלל, אך אנו מעדיפים לעסוק בספיקה, היות והעומק תלוי יותר בגורמים מקומיים ואילו הספיקה ניתנת קל יותר להעתקה מאתר לאתר.

מי הנגר מופיעים, בדרך כלל, בספיקות משתנות בזמן. רום פני המים וגודל הספיקה עולים במהירות, שוהים זמן קצר או ארוך בקרבת ערך שיא, ודועכים בהדרגה. השיעור היחסי של הדעיכה עשוי להתמתן בהדרגה. הרומים והספיקות הקשורים לשאר סוגי המים משתנים, בדרך כלל, במתינות, ורובם מגלים אופי של דעיכה אקספוננציאלית. עיון בהידרוגרף מלמד על מהלך הזרימה. ניתן להבחין בנקל בגודל ספיקת השיא (הספיקה הרגעית המרבית של ההידרוגרף) ומועדה, במשך ההתרוממות ובמשכים אחרים. אפשר לחשב מתוכו את הנפח שניתן להטות באמצעות תעלה גרוויטציונית או בשאיבה בספיקה נתונה (נפח בר-הטיה) ואת



תרשים 3: הפרדת זרימת הבסיס

פני תחום ההתנקזות. בשיטה זו, מתייחסים לגשם המועיל בלבד ומתעלמים מהמים האובדים במקום רדתם על הקרקע או במהלך זרימתם.

לכל טיפת גשם מועיל יש מסלול זרימה על-קרקעי, ממקום רדתה על הקרקע ועד למוצא תחום ההתנקזות (האתר שביחס אליו מוגדר תחום ההתנקזות). משך הזרימה לאורך המסלול, תלוי באורך המסלול ובמהירות שהמים יכולים לפתח בו. בדרך כלל, טיפה שיורדת קרוב למוצא, מגיעה אליו תוך זמן קצר וטיפה שיורדת רחוק מהמוצא, מגיעה אליו לאחר זמן ארוך. אם נניח שלמים הזורמים בכל נקודה ונקודה של תחום ההתנקזות יש מהירות אופיינית קבועה (לאו דווקא שווה למהירות בנקודות אחרות) הן בגודל והן בכיוון, יהיו כל מסלולי הזרימה על פני תחום ההתנקזות קבועים במקומותיהם ובמשכי הזרימה לאורכם. לפיכך, כל טיפת גשם מועיל שיורדת על פני הקרקע, תגיע למוצא כעבור משך זמן אופייני לנקודה שעליה ירדה.

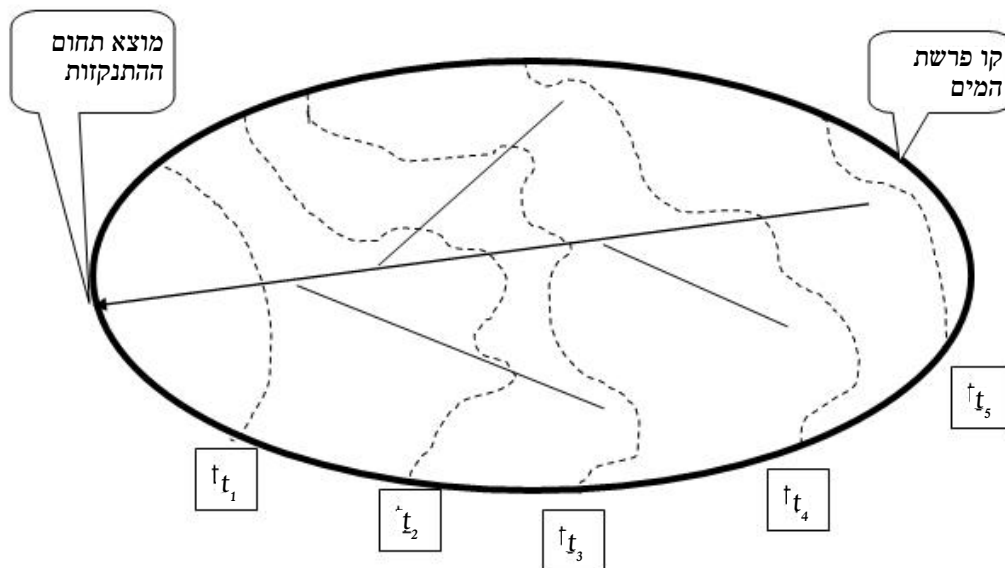
משכי זמן הזרימה מהנקודות השונות, ניתנים למיפוי על פי הטופוגרפיה של תחום ההתנקזות ומבנה רשת האפיקים ומתוך הערכה של מהירויות הזרימה בנקודות השונות. את המיפוי מסכמים באמצעות קווים שווי משך זרימה אל המוצא (איזוכרונות) ומודדים את השטחים המשתרעים בין הקווים. הפרש הזמן שנקבע בין הקווים, נקרא יחידת הזמן של תחום ההתנקזות. מהלך השטחים

שמעלים אותו ברציפות. תהליך הפרדת זרימת הבסיס מתואר סכמטית בתרשים 3.

הנגר נוצר על פני תחום התנקזות, כאשר עוצמת הגשם גבוהה מכושר החידור (Horton, 1945). משיקולים הנדסיים, מוגדרים שני משתנים שמתארים את הפיגור הזה. אחד נקרא משך הפיגור, והוא משך הזמן העובר בין מועד מרכז הכובד של הגשם המועיל ועד למועד הופעת ספיקת השיא של הנגר הישיר. האחר נקרא פיגור מרכז הכובד, והוא משך הזמן העובר בין מועד מרכז הכובד של הגשם המועיל ועד למועד מרכז הכובד של הנגר הישיר. משך הפיגור חשוב לתחזית שיטפונות ואילו פיגור מרכז הכובד, הוא משך הזרימה הממוצע על פני תחום ההתנקזות.

8. יצירת הידרוגרפים על פי גשם

ההיכרות עם הידרוגרף הנגר נחוצה למטרות הנדסיות רבות. במקומות ובמקרים שהזרימה נמדדת, אפשר להשתמש במישרין בהידרוגרף המדוד. בשאר המקרים, יש ליצור הידרוגרף מלאכותי. אפשרות נפוצה ליצירת הידרוגרף של הנגר הישיר, מסתמכת על הגשם שגרם להופעתו או על הגשם שעשוי לרדת, על פני תחום ההתנקזות של האתר הנדון. תחום התנקזות, הוא האזור ממנו מגיעים מי נגר בזרימה חופשית אל האתר הנדון. השיטה הוותיקה ביותר לקישור בין הגשם המועיל לנגר הישיר, מביאה בחשבון את משכי הזרימה על



תרשים 4: מיפוי תחום התנקזות לפי משכי הזרימה לאורכו

$$Q_i = \sum_{j=1}^i u_j d_{i-j+1}$$

כאשר: Q_i [L³/T] הספיקה בסוף פרק הזמן i , u_j [L²/T] הספיקה הסגולית בסוף פרק הזמן j , d_k [L] עובי הגשם המועיל בפרק הזמן k , $k = i-j+1$. יישום הפוך של המשוואה מאפשר הפקתה של הידרוגרם היחידה, כאשר נתונים מהלך הגשם המועיל והידרוגרף הנגר הישיר.

כאשר נתון הידרוגרם יחידה ליחידת זמן כלשהי, עוצמת הגשם המועיל שיצר אותו שווה ליחידת עובי מחולקת ביחידת הזמן הזו. נפעיל את הידרוגרם היחידה על גשם מועיל ממושך מאוד, שעוצמתו קבועה ושווה לעוצמה זו. להידרוגרף שנוצר צורת S והוא למעשה עקום סכומי של הידרוגרם היחידה בעל העוצמה הנתונה. העקום הסכומי מאפשר להפיק הידרוגרם יחידה לכל יחידת זמן נבחרת. זאת נעשה בשלושה צעדים. בצעד הראשון, נכפול את הספיקות הסגוליות של העקום הסכומי הקיים ביחס בין יחידת הזמן המקורית לבין יחידת הזמן הנבחרת. בצעד השני, נרשום עוד עקום סכומי, וזהה לזה שחושב בצעד הראשון, ונציב אותו בפיגור של יחידת הזמן הנבחרת אחר העקום הקודם. בצעד השלישי, נחסר את הספיקות הסגוליות של העקום השני מאלה של העקום הראשון, ונקבל את הידרוגרם היחידה המבוקש.

אם נבחר יחידת זמן זעירה, נקבל הידרוגרם יחידה שנוצר מגשם בעל עוצמה גבוהה מאוד (כי עובי הגשם המועיל נשאר יחידה אחת - מ"מ), שנקרא הידרוגרם היחידה המידי. הידרוגרם היחידה המידי, הינו הנגזרת בזמן של העקום הסכומי. מאחר שהידרוגרם היחידה המידי אינו תלוי במשך הגשם המועיל ובעוצמתו, הוא מבטא את תכונות תחום ההתנקזות בלבד ומאפשר השוואה נוחה בין תכונות תחומי התנקזות שונים. מהותית הוא דומה לעקום שטח משך הריכוז.

הדמיון בין הידרוגרם היחידה המידי לבין עקום שטח משך הריכוז, נותן יתרונות הנדסיים. הידרוגרם היחידה מופק מזוגות אירועים של גשם ונגר. עקום שטח משך הריכוז מופק ממפות טופוגרפיות, מפות שימושי קרקע והערכות הידרוליות. כאשר ישנם שניהם, מאפשר הדמיון ביניהם לכייל את ההערכות ההידרוליות וליצור עקומים נכונים יותר לתחומי התנקזות לא מדודים.

האלה, נקרא עקום שטח משך הריכוז. בתרשים 4 מתואר סכמטית מיפוי הקווים שווי משך הזרימה בתחום התנקזות.

לשם יישום עקום שטח משך הריכוז, יש לחלק את הגשם המועיל לפרקי זמן שאורכם זהה למשך יחידת הזמן שנבחרה לתחום ההתנקזות ולחשב את העוצמה הממוצעת שלו בכל יחידת זמן. הספיקה בסוף יחידת הזמן i תהיה:

$$Q_i = \sum_{j=1}^i A_j I_{i-j+1} \quad (5)$$

כאשר: Q_i [L³/T] הספיקה בסוף פרק הזמן i , A_j [L²] גודל השטח המתנקז במשך יחידת הזמן j לאחר ירידת הגשם, I_k [L/T] עוצמת הגשם המועיל ביחידת הזמן k , $k = i-j+1$.

באופן זה, מאפשר עקום שטח משך הריכוז, ליצור הידרוגרף של הזרימה בעקבות כל גשם מועיל. גשם זה יכול להיות גשם שירד למעשה או גשם שעשוי לרדת במצבים נבחרים. כדי להכין את העקום נחוצות מפה טופוגרפית, מפת שימושי קרקע, הערכה של מהירויות זרימה אופייניות, קביעה של מסלולי הזרימה והשקעת עבודה. ישנן היום תוכנות המאפשרות יישום זול יחסית. העקום מוכן פעם אחת ומתאים לשימוש, כל עוד אין שינוי משמעותי במצב תחום ההתנקזות. אם צפוי שינוי כזה (למשל עיור), אפשר להכין מראש את עקום שטח משך הריכוז שיתקיים במצב הצפוי ולהעריך באמצעותו את הספיקות שעשויות להופיע אז.

שיטה לינארית אחרת ליצירת הידרוגרפים, נקראת הידרוגרם היחידה. זה הידרוגרף שמתאר את מהלך הנגר הישיר במוצא תחום ההתנקזות, בעקבות ירידה של גשם מועיל שעוביו יחידה אחת ומשכו יחידה אחת. יחידת העובי המקובלת במערכת המטרית היא מ"מ. יחידת הזמן נקבעת במיוחד לכל תחום התנקזות. השימוש בהידרוגרם היחידה מושתת על הנחות לינאריות: (1) ספיקת הנגר הישיר שנוצר בעקבות גשם מועיל שמשכו יחידה, נמצאת ביחס ישר לעובי הגשם הזה; (2) ספיקות הנגר הישיר שנוצרות מגשמים מועילים שיוורדים ביחידות זמן שונות, ניתנות לסיכום אריתמטי אלה עם אלה. על כן, כאשר ידוע ההידרוגרף שנוצר עקב גשם מועיל שעוביו יחידה ומשכו יחידה, אפשר לחשב את ההידרוגרף שייצור כל גשם מועיל אחר. להלן נוסחת החישוב:

(6)

כאשר מופיעה בו גיאיות בעלת ספיקה גבוהה נתונה. ההלוכים המודרניים מיישמים משוואות דיפרנציאליות, אך עדיין נהוגים יישומים מיושנים פשוטים יותר, אותם לא נציג כאן. המשוואות מתבססות על חוק שימור המסה (משפט הרציפות) ועל חוק שימור התנע.

נעיין תחילה בהתקדמות גל גיאיות לאורך קטע אפיק קצר (תרשים 5). מהירות התקדמות הגל U $[L/T]$. מהירות הזרימה בראש הקטע V_1 $[L/T]$ ושטח החתך המורטב שם A_1 $[L^2]$. מהירות הזרימה בסוף הקטע V_2 ושטח החתך המורטב שם A_2 . במשך הזמן dt $[T]$ משתנה אוגר המים בקטע בנפח של $Udt(A_1 - A_2)$. לפי משפט הרציפות:

$$Udt(A_1 - A_2) = A_1 V_1 dt - A_2 V_2 dt \quad (7)$$

ומכאן:

$U = (A_2 V_2 - A_1 V_1) / (A_2 - A_1) = dQ/dA = V + AdV/dA$ (8)
כאשר V $[L/T]$ מהירות הזרימה הממוצעת בחתך. מסקנה: מהירות התקדמות הגל אינה זהה למהירות הזרימה, אלא תלויה גם בקשר בינה לבין שטח החתך. בספיקות גבוהות, אין המהירות הממוצעת רגישה לשטח החתך ואז מהירות התקדמות הגל קרובה למהירות המים.

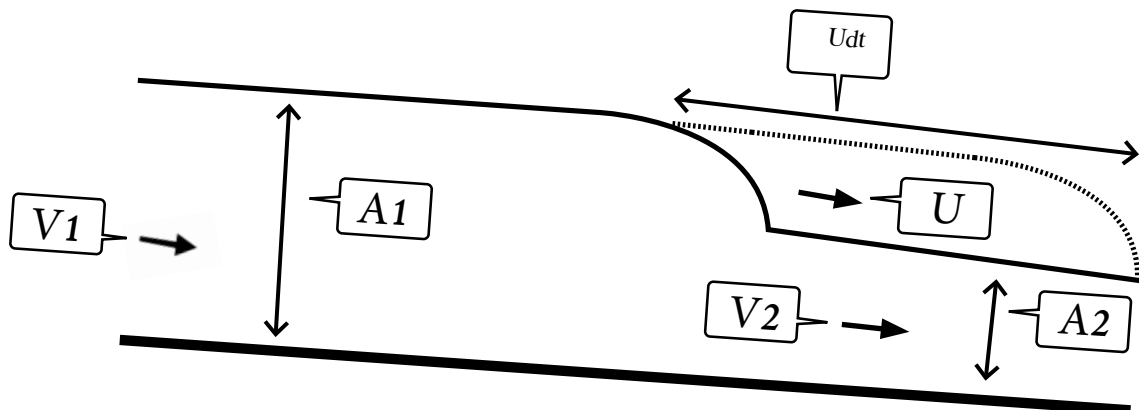
נעבור לעיון מפורט יותר (תרשים 6). נתון קטע אפיק קצר שאורכו dx $[L]$, ושיפועו θ $[1]$, כאשר $S_0 = \sin \theta$ $[1]$, שיפוע קרקעית האפיק. שטח החתך הממוצע לאורך הקטע A $[L^2]$, האוגר בקטע $S = Adx$ $[L^3]$ ומסת המים שם $m = \rho Adx$ $[M]$. עומק המים במעלה y ובמורד $y + (\partial y / \partial x) dx$ $[L]$. במעלה הקטע נכנסת ספיקה Q $[L^3/T]$, לאורך הקטע נכנסת זרימה צדית בכיוון ניצב לכיוון הזרימה ובספיקה q $[L^2/T]$ ליחידת

הידרוגרם היחידה מבטא את מצב תחום ההתנקזות בעת שהתרחשו אירועי הגשם והנגר לפיהם נוצר. הדמיון בין הידרוגרם היחידה המידי לבין עקום שטח משך הריכוז, מאפשר יצירה של הידרוגרמי יחידה למצבים אחרים של שימושי הקרקע, למשל בעקבות עיור מתוכנן, תוך שינוי מתאים של ההערכות ההידרוליות ושל מסלולי הזרימה.

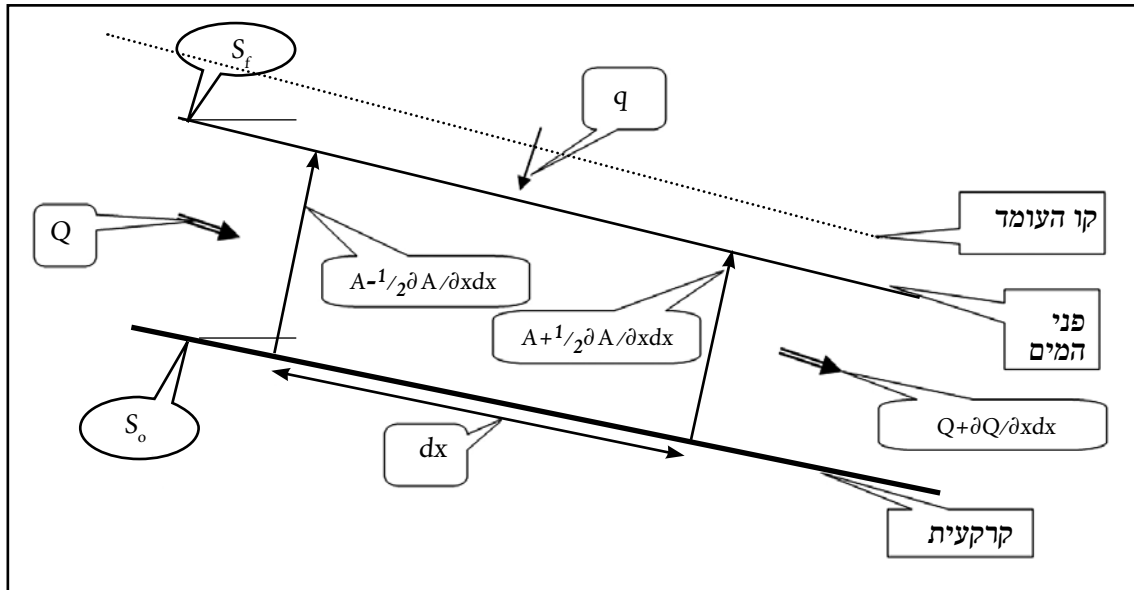
גורם נפוץ לתקלות בהכנה ויישום הידרוגרם היחידה, נעוץ בהנחות הלינאריות בהקשר לעובי הגשם ולמשכו. הנחות אלה אינן מתאימות לידוע מהידרוליקה, לפיה מהירות הזרימה גדלה עם עומק המים. אולם מאחר שההתנגדות לזרימה גדלה ביחס ישר לריבוע המהירות, מגיעה מהירות הזרימה לערך מרבי סופי, כאשר עומק המים עולה מעל ערך מסוים. כאשר המהירויות מתייצבות, מתייצבים גם משכי הזרימה ומתקיימת הנחת הלינאריות בין גשם מועיל לנגר ישיר, עליה מבוססים עקום שטח משך הריכוז והידרוגרם היחידה. לכן מודלי חישוב אלה מתאימים טוב יותר לאירועים גבוהים. על כן יש להגביל את יישום השיטות הלינאריות לאירועים בעלי ספיקות גבוהות בלבד.

9. הילוך גיאיות

הילוך גיאיות הוא חישוב, שבאמצעותו מתארים כמותית כיצד זורמים המים מאתר לאתר לאורך אפיק. הוא נחוץ כדי ליצור הידרוגרפים בנקודות חשובות של אפיקים, על סמך הידרוגרפים מדודים או מיוצרים בנקודות שנמצאות במעלה הזרם מהן. מקרה קלאסי הוא חיזוי ההתקדמות של אירוע שיטפוני. שימוש שכיח נעשה לשם חישוב ציר הידרולי: מהלך קו העומד לאורך אפיק,



תרשים 5: התקדמות גל גיאיות לאורך אפיק



תרשים 6: הילוך גיאות באפיק

בתפקודו לריסון גיאוויות, אפשר להכליל ולהתייחס אליו כאל יחידה שלמה. מהירות התקדמות הגל בתוך מאגר נמוכה מאוד, כי המים המגיעים אליו מתפשטים לרוחב על חשבון התנועה קדימה. לכן אפשר להזניח את משוואת התנועה ולהסתפק במשוואת הרציפות:

$$dS/dt = I(t) - Q(t) \quad (13)$$

כאשר S $[L^3]$ אוגר, t $[T]$ זמן, I $[L^3/T]$ ספיקת
כניסה, Q $[L^3/T]$ ספיקת יציאה.

מתוך הגיאומטריה וההידרוליקה, ידועים לנו הקשרים בין האוגר לרום $[L] h$ ובין ספיקת היציאה לרום. בהצבת קשרים אלה מתקבל קשר בין שינוי הרום לפי הזמן לבין ספיקת הכניסה והרום הקיים:

$$(dS(h)/dh)(dh/dt) = I(t) - Q(h(t)) \quad (14)$$

בדרך כלל ידוע הידרוגרף הגיאות המגיעה אל המאגר, בין שהוא מדוד ובין שהוא מיוצר. ולכן נותר רק הרום כנעלם במשוואה ואפשר לפתור אותה. לשם נכונות הפתרון, יש למדוד היטב את הטופוגרפיה של המאגר לאחר בנייתו ולעדכנה לעתים מזומנות בעקבות הצטברות סחף.

הפתרונות המקובלים הם נומריים. כדי לפתור את המשוואה, יש לקבוע את צעד הזמן Δt , להגדיר את המצב התחילי של הספיקות והאוגר, ולדעת את הידרוגרף הכניסה. נוסחת הפתרון מניחה שהמצב ברגע j ידוע וצריך למצוא את המצב ברגע $j+1$:

$$(I_i + I_{i+1})/2 - (Q_i + Q_{i+1})/2 = (S_{i+1} - S_i)/\Delta t \quad (15)$$

אורך (בסך הכול qdx), ובמורד יוצאת ספיקה $Q+(\partial Q/\partial x)dx$. המהירות הממוצעת של הזרימה בקטע זה $V [L/T]$. לקו העומד שפוע $S_f [1]$.

הניסוחים הדיפרנציאליים של משוואת הרציפות
וחוק שימור התנע, בהתאמה:

$$\partial A / \partial t + \partial Q / \partial x - q = 0 \quad (9)$$

$$\partial V/\partial t + V\partial V/\partial x + g\partial y/\partial x + qV/A = gS_0 - gS_f \quad (10)$$

לפי ההגדרה:

$$S_f = \partial (z+y+V^2/2g)/\partial x \quad (11)$$

אולם במקרים רבים משתמשים בנוסחת מנינג:

$$S_c = (nQA^{-1}R^{-2/3})^2 \quad (12)$$

הניסוח הדינמי הרשום כאן, קשה לפתרון ומחייב כמות נתונים רבה יחסית. הניסוח המקובל ביותר נקרא קינמטי, והוא מבוסס על העובדה שבמקרים רבים שני האיברים באגף ימין של משוואה (10), גדולים מאוד ביחס לאיברי אגף שמאל. לכן אפשר להזניח את אגף שמאל, ונותר $S_0 - S_f = 0$. הניסוח החד-ממדי הרשום כאן מתאים לזרימה באפיק מוגדר. ניסוחים דו-ממדיים מאפשרים התחשבות בהתפשטות המים מעבר לגדות האפיק, זרימה בדלתאות ובמניפות, התחשבות בזרימה מיובלים ובזרימה חוזרת לתוכם, וכדומה. מצויות בשוק תוכנות מדף לזרימה חד ממדית, מרביתן קינמטיות, ויישומן אינו מסובך.

אם נתאר מאגר כהתעבות של האפיק, נוכל ליישם עבורו את המשוואות הקודמות. אולם כאשר איננו מתעניינים במתרחש בתוך המאגר אלא רק

במישורי ההצפה של נחלים, וההתגוננות שעשויה למנוע כל נזק אינה כלכלית בדרך כלל.

משתנים אחדים משמשים לאפיון הכמותי של שיטפונות. החשובים שבהם: ספיקת השיא, נפח המים, משך השיטפון ומשך הזמן בו מופיעות ספיקות גבוהות (מעל ערך סף נבחר). אם כושר ההולכה של אתר או של קטע אפיק גבוה מספיק השיא של גיאיות המגיעה אליו, כל השיטפון יכול לעבור דרכו. לכן חשובה ספיקת השיא. אפשר להשוותה לכושר ההולכה של האפיק והמכשולים המצויים בו (כגון גשרים), ואפשר לקשור אותה לרום פני המים. הנפח חשוב, כדי להשוותו לקיבול מאגרים וכדי להעריך כמה מים אפשר לנצל. משך הזרימה חשוב, כדי לדעת כמה זמן נמשכת ההפרעה לאורח החיים התקין. עוד משתנה חשוב הוא נפח ההצפה, כלומר נפח המים שגולשים אל מחוץ לאפיק.

השיטפונות עשויים להגיע לממדים ענקיים, אולם בכל זאת יש גבול לגודלם. השיטפון המרבי הסביר, הוא השיטפון שעלול להיווצר כתוצאה מצירוף קיצוני ביותר של הערכים המרביים של כל אחד מהמשתנים המטאורולוגיים וההידרולוגיים הקשורים ביצירת שיטפונות באזור הנתון. על פי ההגדרה, לא יכול להיווצר בתחום התנקזות נתון שיטפון בעל ממדים גדולים יותר מאשר השיטפון המרבי הסביר. אפשר להעריך את גודלו של השיטפון המרבי הסביר, אם כי זו פעולה קשה, ועל פיו לקבוע את היקף ההצפות שהוא עשוי לגרום. הרצון להמנע מכל נזק מחמת שיטפונות, מחייב הימנעות מכל פעילות באזור שעלול להיות מוצף על ידי השיטפון המרבי הסביר. בדרך כלל אין מסקנה זו כלכלית. הגיוני יותר לקיים פעילות אנושית בעמקי הנחלים, לסבול נזקים מסוימים ולבצע פעולות התגוננות מוגבלות. משמעות הדבר היא, שבדרך כלל אנו לוקחים על עצמנו סיכון מסוים של הינזקות משיטפונות. סיכון מחושב, משמעו הכרת ההסתברות של הופעת שיטפונות שממדיהם גדולים מאלה שכנגדם מספיקים אמצעי הגנה שננקטו (הערכת הסיכון), הערכת הנזק שעלול להיגרם במקרי הופעת שיטפונות כאלה (הערכת הסכנה), וקביעה מראש של דרכי פעולה למזעור נזקים כאשר מופיעים שיטפונות (תכנון פעילות). כל עוד אין מתקיימים שלושת התנאים האלה, לא נכון לומר שהסיכון מחושב.

כאשר הסימן התחתני מציין את המועד. למשוואה זו שיטות פתרון נומריות אחדות, מקצתן נוקטות בניסוי וטעיה, ולפחות אחת מהן ישירה, גרפית למחצה או ספרתית.

כאשר ספיקת הכניסה גבוהה מספיקת היציאה, גדל האוגר, פני המים במאגר עולים ולכן גדלה ספיקת היציאה. לעומת זאת, כאשר ספיקת הכניסה קטנה מספיקת היציאה, יורדים פני המים במאגר וספיקת היציאה קטנה. בתחילת גיאיות, כל עוד לא נצבר די אוגר, קטנה ספיקת היציאה מספיקת הכניסה ולכן היא גדלה. בסוף הגיאיות, קטנה ספיקת הכניסה מספיקת היציאה ולכן ספיקת היציאה קטנה. ספיקת השיא של היציאה מתקבלת, כאשר ספיקת היציאה שווה לספיקת הכניסה וההידרוגרפים שלהן חותכים זה את זה.

מאגרים לריסון שיטפונות, אינם חייבים לחסום את האפיק באמצעות סכר. אפשר גם לעבות פיסית את האפיק או להקים בצד האפיק מאגר שאליו מוליכה תעלת הטיה ויוצאת ממנו תעלת עורפים. מדידת מפלס המים במאגר צריכה להיעשות באזור הנמוך שלו, אך לא בקרבת המברץ, כיוון ששם עשויים המים לזרום במהירות גבוהה ופניהם לא יהיו אופקיים. אפשר לבנות למאגר פתח ריקון ולהשתמש בו בין אירועי הגיאיות, כדי להקטין את האוגר התחילי לקראת הגיאיות הבאה. במאגרים המשמשים גם לניצול מים, לא רצוי להשאיר אוגר נמוך, פן יחסרו מים לניצול, אולם אפשר לרוקנם במידה ראויה כאשר חזויה הופעה של גיאיות גדולה.

10. שיטפונות

המושג שיטפון אינו מוגדר היטב מבחינה מדעית. משמעותו המעשית היא מצב בו המים גואים מעבר לערוץ זרימתם הרגיל למקום ולעונה. שיטפונות מופיעים בעקבות ירידת גשמים, הפשרת שלגים, התמוטטות סכרים או פריצות מים אחרות. השיטפונות מהווים גורם חשוב בעיצוב הנוף ועלולים לגרום נזקים לאדם ולרכושו. הנזקים נגרמים בארבעה אופנים: הרטבה (של ניירות, מזונות, חיבורי חשמל וכדומה), הצפה (של דרכים, מבנים, חניקת צמחים וכדומה), הפעלת כוח (הרס מתקנים, עקירת צמחים וכדומה), והסעת סחופת (חתיכה או שיקוע). אין אפשרות למנוע נזקים אלה, היות ובני האדם אינם יכולים לוותר על פעילותם

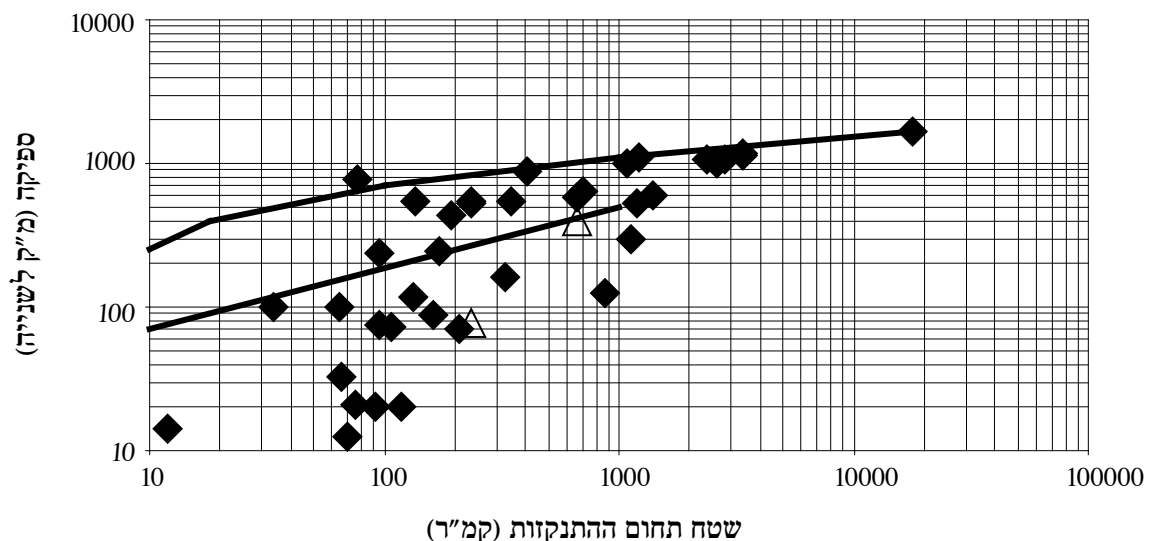
רגישים, שאיבה ממקומות נמוכים, ביטוח, הקמת מערכות אתרעה ואזעקה, פינוי אנשים ורכוש, טיפול בנפגעים, שיקום, וכדומה. אמצעים אלה אינם משפיעים הרבה על זרימת המים בעת השיטפון, אלא מכוונים להקטנת הנזקים לכל אחד מן הנפגעים בפני עצמו. נכון לקבוע את היקף וגודל אמצעי ההתגוננות מפני שיטפונות, באופן שממזער את סכום עלויות ההתגוננות ותוחלת הנזקים הנותרים. זאת עושים תוך שימוש בהערכה כלכלית. בדרך כלל אין מכינים הערכה כזו, אלא פועלים לפי תקנות או כללים מקובלים.

הערכת גודל השיטפון, נעשית בשיטות דטרמיניסטיות וסטטיסטיות. הארגון המטאורולוגי העולמי פרסם שיטות דטרמיניסטיות להערכת המשקעים המרביים הסבירים (נמצאת ביניהן גם שיטה סטטיסטית, לשימוש במקרה שאין נתונים מספיקים ליישום השיטות הדטרמיניסטיות). על משקעים אלה אפשר להפעיל באורח מתאים מודל הידרומטאורולוגי ולקבל הידרוגרף של השיטפון המרבי הסביר.

שיטה דטרמיניסטית אחרת, עוסקת בספיקות המרביות שנצפו באזור. להלן, אופן הכנתה ויישומה. סורקים באזור נתון את כל האתרים בהם נמדדו אי פעם ספיקות של גיאוויות, בין אם הם תחנות הידרומטריות סדירות ובין אם הם אתרים בהם בוצעה מדידה אחת בלבד. לכל אתר ואתר

חובה להתגונן מפני השיטפון המרבי הסביר, במקרים הכרוכים בסכנת אסון גדול. מקרים אופייניים כאלה הם רכיבים של מערכת קירור לכור גרעיני שבנויים בנהר ובקרבתו, סכר בנוי במעלה עיר גדולה וכדומה. במקרים אלה, כמו גם במקרים אחרים בהם ננקטים אמצעים שכיחים לריסון שיטפונות, חובה להקפיד לא רק על תכנון וביצוע נכונים, אלא גם על שגרות תפעול ותחזוקה מתאימות, כדי שהאמצעים הננקטים יעבדו גם בעת הופעות נדירות של שיטפונות גדולים.

מגוון רחב של אמצעי התגוננות נקוטים בעולם, חלקם פיסיים וחלקם רעיוניים. נהוג לסווגם לשתי קבוצות - מבניים ובלתי מבניים. האמצעים המבניים, מיוחסים לנחל והבלתי מבניים, מיוחסים לגורמים העלולים להיפגע. על הקבוצה הראשונה נמנים הסדרת האפיק (קיצור פיתולים, שינוי תוואי, הרחבת חתך, הקטנת חספוס, ייצוב דפנות, וכדומה), סכירה, בניית סוללות מקבילות (כולל התקנת אמצעי ניקוז לשטח שמעבר לסוללות), חפירת אפיקים חדשים או מנהרות לניקוז שקעים טבעיים וכדומה. אמצעים אלה אינם מונעים שיטפונות, אלא מעבירים את סכנת ההצפות ממקום למקום. על הקבוצה השנייה נמנים, איטום מבנים שסביבתם עלולה להיות מוצפת, הגבהת רצפות או דרכים, הגבהת סחורות וחפצים רגישים, בניית סוללות מגן או הטיה סביב עצמים



תרשים 7: קווי מעטפת לספיקות שיא בנגב (בעקבות מאירוביץ' וחו', 1998)
מקרא: הקו העליון והמעיינים לכל הנגב וסיני, הקו התחתון והמשולשים לתחום נחל גרר בלבד

שאינם שיטפוניים. זאת מותר לעשות, היות והגדרת השיטפון אינה מוחלטת אלא יחסית. אם אין סיבה להעריך ששיטפונות העתיד יהיו שונים משיטפונות העבר, אפשר לערוך את הסטטיסטיקה על נתוני העבר ולהניח לצורכי תכנון שזו תהיה גם הסטטיסטיקה של השיטפונות העתידים להופיע. כאשר מתאימים פונקציה סטטיסטית לגיאומטריות העבר, אפשר להמשיך אותה גם לתקופות חזרה ארוכות מתקופת התצפיות.

באופן טבעי, ובהתאמה להגדרה של תקופת החזרה, אפשר להכין סטטיסטיקה של שיאי כל הגיאומטריות שהופיעו בתקופת התצפיות בתחנה. אולם זו כרוכה בשתי בעיות – כמות עבודה ותלות בין הנתונים. מרבית הגיאומטריות קטנות ורחוקות בממדיהן מהשיטפונות בהם אנו מתעניינים. נוסף לכך, עלולה להתקיים השפעה פסיקלית בין הופעתן וגודלן של גיאומטריות סמוכות זמן. השיטות הסטטיסטיות הנקוטות בידינו בדרך כלל, בנויות על ההנחה כי הנתונים בלתי תלויים זה בזה, לכן השימוש בכל הנתונים לא התאים. כיום, כאשר הנתונים ממוכנים והסטטיסטיקה התפתחה, קטנה חשיבותן של הבעיות האלה, אולם היא לא בטלה אלא קיבלה גוון אחר. בשיטות ההתאמה הממוכנות, מתקבל משקל גדול לגיאומטריות הקטנות והמרובות, שאינן חשובות לעניין שיטפונות, והדבר עלול להטות את הפונקציה אליהן, תוך כדי פגימה בטיב ההתאמה לספיקות הגבוהות שהוא עיקר ענייננו. ההתחשבות בתלות הפסיקלית, מסבכת את אופן ההתאמה של הפונקציה. על כן, מוצדק גם היום דילול סדרת הנתונים.

שני אופני דילול מקובלים בעולם, אחד לפי הזמן ואחד לפי הגודל. בדילול לפי הזמן, המקובל יותר, נבחרות ספיקות השיא הרגעיות הגבוהות ביותר שהופיעו בכל אחת משנות התצפית בתחנה (שנים הידרולוגיות). הסדרה המתקבלת, נקראת סדרת שיאים שנתיים. יתרונה, פשטות ההכנה ואי תלות בין הנתונים הנבחרים. חסרונותיה, אי התאמה להגדרה של תקופת החזרה, התעלמות מגיאומטריות גבוהות שלא היו הגבוהות ביותר בשנות הופעתן ולעומתה התחשבות בספיקות נמוכות שהיו הגבוהות ביותר בשנות הופעתן. באקלים שלנו, במקצת מן השנים, אין מופיעות גיאומטריות בנחלים ולספיקת השיא בשנה כזו ערך מספרי 0. בדילול לפי הגודל, נבחרות לעבודה ספיקות

רושמים את הספיקה המרבית שנמדדה בו אי פעם ומודדים במפה טופוגרפית את שטח תחום ההתנקזות שלו. משרטטים את הספיקות האלה כנגד שטח תחום ההתנקזות ומעבירים קו עוטף. קו זה מתאר את הספיקות המרביות שנצפו באזור העבודה. לעתים אפשר למצוא בתוך האזור תחומי התנקזות בעלי תכונה משותפת, שניתן להעביר לספיקותיהם המרביות קו עוטף נמוך יותר, ואז הקו הנמוך משמש לתחומי ההתנקזות בעלי תכונה זו והקו הכללי מיוחס לשאר תחומי ההתנקזות (ראה לדוגמא תרשים 7). מאחר שהמעטפת שנתקבלה אינה סטטיסטית, אין היא יכולה לשמש לשם הערכת מידת הסיכון, אולם היא משמשת לשלוש מטרות: (1) כדי לעמוד על תכונות תחום ההתנקזות שמשפיעות על גודל השיטפונות; (2) כבקרה על השיטות הסטטיסטיות; (3) בארצות אחדות חובה להשתמש בה לצרכים רשמיים במקביל לשימוש בשיטות הסטטיסטיות.

ההערכות המקובלות בעולם להערכת גודל שיטפונות צפויים, נוקטות בשיטות סטטיסטיות שמסתמכות על ההופעות בעבר. הבחינה הנפוצה ביותר נעשית על ספיקות השיא והיא מתרכזת בשאלה בעלת שתי תשובות אפשריות – חיובית ושלילית. השאלה, האם השיטפון יכול לעבור ללא הפרעה באתר הנדון (כגון בקטע אפיק נחל או דרך מפתח גשר)? אם ספיקת השיא יכולה לעבור, כל השיטפון יכול לעבור. לכן בוחנים את ספיקת השיא. הסטטיסטיקה נעשית על שכיחות התשובות השליליות, בלי להתחשב במידת ההפרש בין גודל ספיקת השיא לבין כושר ההולכה של האתר. לצרכים הנדסיים מוגדרת, בדרך כלל, התשובה במונח הפוך לשכיחות, והוא נקרא תקופת חזרה. תקופת חזרה של ספיקת שיא היא משך הזמן העובר בממוצע בין הופעות של גיאומטריות ששיאיהן גבוהים לפחות כמו הספיקה הנתונה. תקופות חזרה מקובלות לתכנון: גשרי רכבת – 100 שנה, גשרי כבישים ראשיים – 50 שנה, כביש לאורך נחל – 100 שנה, שדות חקלאיים – 10 - 20 שנה, ניקוז מקומי של אזורי מגורים עירוניים – 5 שנים, אזורי מגורים בקרבת נחלים – 100 שנה, ועוד.

מאחר שלהכנת סטטיסטיקה טובה נחוצים נתונים רבים, ואילו על פי הגדרה השיטפונות נדירים בהופעתם ולכן מספר הנתונים המדודים קטן, מרחיבים את העיון וכוללים בו גם אירועים

נייר גמבל. אפשר להשתמש גם בנייר לוגריתמי למחצה או לינארי, אלא ששם העבודה נוחה פחות, בדרך כלל.

לכל תרשים המציג התאמת פונקציה סטטיסטית לנתונים, שני צירים ניצבים זה לזה, אחד לתיאור גודל הספיקה ואחד להסתברות השגתה. הסתברות ההשגה של ספיקה נתונה, היא ההסתברות להופעת ספיקה גדולה לפחות כמות. בשרטוט מסומנת כל ספיקה על ידי סמל נקודתי, שמקומו נקבע לפי קני המידה והטווח של השרטוט. לצורך השרטוט מסדרים את הספיקות בסדר יורד, שאינו קשור לסדר הופעתן, ונותנים להן מספרים סידוריים. הספיקה הגדולה ביותר בסדרה מקבלת את המספר הראשון, השנייה בגודלה את השני, וכן הלאה עד האחרונה שבהן. אם מופיעות שתיים, או יותר, ספיקות שוות גודל, כל אחת מהן תופסת מספר סידורי משלה כאילו היו שונות בגודלן. הסתברות ההשגה של הספיקה מחושבת מתוך מספרה הסידורי. משיקולים תיאורטיים, אין משרטטים את הספיקה שמספרה הסידורי i מול הסתברות ההשגה $F_i = i/n$, כאשר n מספר הנתונים בסדרה, אלא הסתברות אחרת. דבר זה נועד, בין השאר, כדי למנוע מצב בו תתקבל הסתברות השגה של 1 לספיקה הנמוכה ביותר בסדרה; כלומר חישוב סטטיסטי, ללא כל שיקול פסיקלי, עלול להוביל למסקנה כי לא תיתכן ספיקה נמוכה יותר מהספיקה הנמוכה ביותר שנמצאת בסדרה הנתונה. לכן נהוגות נוסחאות אחרות לשרטוט זה (ראה למשל, Chow 1964). הוותיקה שבהן הוצעה על ידי הייז: $F_i = (i-0.5)/n$. לנוסחה זו יש יתרון תיאורטי מסוים, ומספר גופים משתמשים בה באורח מסורתי. לפני עשורים אחדים שלטה בכיפה נוסחת וויבול, גם לה יתרונות מסוימים, ורבים המשתמשים בה עדיין. לפיה $F_i = i/(n+1)$. בשנות השבעים הוצעה נוסחת כונן, שזכתה לפופולריות: $F_i = (i-0.4)/(n+0.2)$. נוסחה זו מתאימה בממוצע לרוב הפונקציות המקובלות. לאחרונה מוצעת נוסחת מטלס: $F_i = (i-0.35)/n$, שמתאימה לאופן חדש של התאמת הפונקציה לנתונים (PWM).

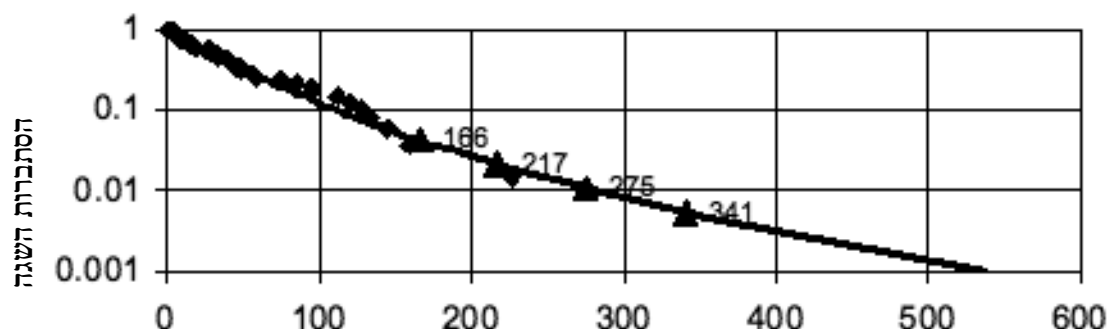
לאחר שרטוט הנתונים, יש להתאים להם פונקציה ולשרטט גם אותה על גבי הדף (ראה לדוגמא תרשים 8). מספר שיטות מקובלות להתאמה. אפשר להעביר קו ישר או עקום בהתאמת עין, באופן שיעבור באורח מיטבי בין הנתונים.

השיא של כל הגיאומטריות ורק הגיאומטריות שערך גבוה מערך סף נבחר. הסדרה המתקבלת, נקראת סדרה חלקית. יתרונותיה, התאמה להגדרה והתחשבות בכל הגיאומטריות הגבוהות ורק בהן. חסרונותיה, תלות אפשרית בין הנתונים, הצורך בהפרדה בין גיאומטריות סמוכות זמן, העדר כללים מקובלים לבחירת ערך הסף והכבדה מסוימת בעיבוד הסטטיסטי (הכבדה כזו נחוצה גם במקרים בהם מופיעים אפסים בסדרה השנתית, אך רבים שוגים ומתעלמים ממנה). באזורים מדבריים, שם הגיאומטריות מעטות ואינן תלויות זו בזו, רצוי לבחור את הסדרה המלאה של שיאי כל הגיאומטריות. העבודה בסדרה כזו זהה לעבודה בסדרה החלקית.

לכשנבחרה סדרת הנתונים, יש להתאים לה פונקציה הסתברות. זאת נעשה על מנת להחליק תנודות אקראיות בנתונים המדודים וכדי לאפשר אקסטרפולציה אובייקטיבית אל מעבר לטווח הנתונים שנמדדו למעשה. לצערנו, לא הוכח עדיין איזו היא הפונקציה הסטטיסטית הנכונה או לפחות המתאימה ביותר באורח כללי, לתיאור ספיקות שיא של גיאומטריות. מצויות בשימוש פונקציות אחדות: נורמלית, לוג-נורמלית, גמבל, פרטו המוכללת, לוגיסטית, לוג-לוגיסטית, פירסון III, לוג-פירסון III, גמה, ועוד. השימוש בפונקציות שונות מוביל לתוצאות שונות, לכן יש להיזהר מאוד בבחירת הפונקציה. מדינות אחדות הנהיגו כללים מחייבים לצרכים רשמיים. בארה"ב הונהגה לוג-פירסון III, בברית המועצות (לשעבר) הונהגה גמה, בבריטניה יש עדיפות לפרטו המוכללת. משיקולים תיאורטיים ובבדיקה אמפירית, נמצא (Ben-Zvi and Azmon, 1997), כי פונקצית פרטו המוכללת היא המתאימה ביותר לתיאור ספיקות שיא בארץ ישראל, אם כי מתגלים קשיים בהתאמתה לנתוני תחנות אחדות. במקרים מעשיים, מומלץ לנסות להתאים פונקציות אחדות ולבחור מביניהן את המתאימה ביותר לאזור העבודה.

ישנן שיטות אחדות להתאמת הפונקציה לנתונים, מקצתן גרפיות ומקצתן חישוביות. עדיף לנקוט בשני הסוגים גם יחד, כדי לאפשר התאמה טובה וביקורת ברורה. לפונקציות אחדות ישנם ניירות שרטוט מותאמים במיוחד להן. נייר הסתברות רגיל (או לוגריתמי) הוכן, כדי שהפונקציה הנורמלית (או הלוג-נורמלית, בהתאמה) תיצור עליו קו ישר. פונקצית גמבל יוצרת קו ישר על גבי

ספיקות שיא שנתיות נחל חדרה (PWM)



ספיקה (מ"ק לשניה)

תרשים 8: הסתברות ספיקות שיא שנתיות בנחל חדרה

מקרא: המעיינים מציינים ספיקות מדורות משורטטות בשיטת מטלס, הקו מציג את פונקציית פרטו המוכללת שהותאמה לנתונים, והמשולשים עם התוויות הם הספיקות הצפויות להופיע לתקופות חזרה של 25, 50, 100 ו-200 שנה.

להתאים את הפונקציה לערכים החיוביים בלבד, אך יש לשרטט את כל הנתונים אם הפונקציה מאפשרת זאת. את ערכי הפונקציה משרטטים מול הסתברויות השגה מתוקנות ביחס של הנתונים החיוביים לכלל הנתונים: $F_m = F_p n_p / n$, כאשר F_m [1] הסתברות ההשגה המתוקנת, F_p [1] הסתברות ההשגה המחושבת על סמך הערכים החיוביים, n_p [1] מספר הנתונים החיוביים (לא אפסים), n [1] מספר הנתונים הכולל בסדרה.

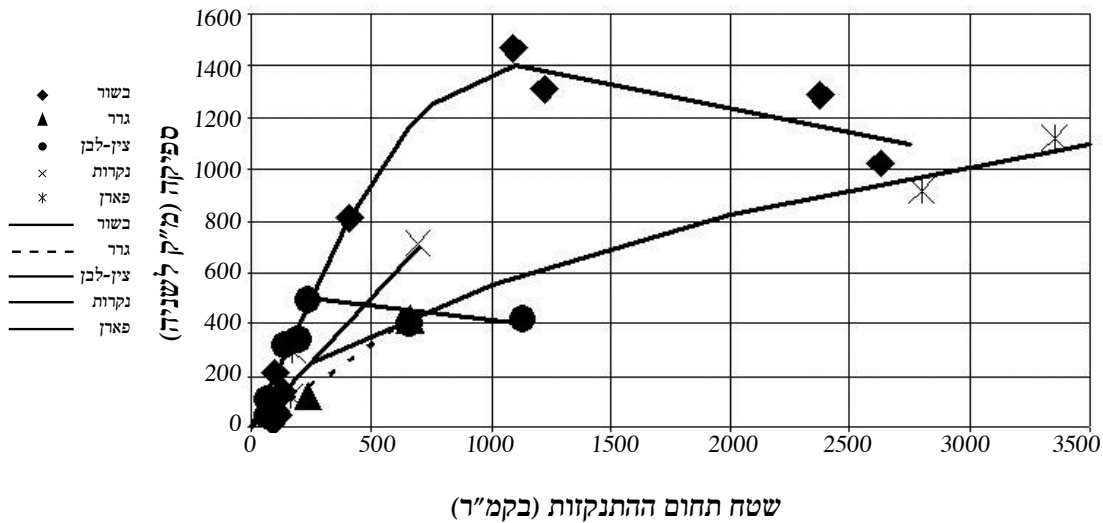
הקישור המתואר לעיל בין ספיקה לתקופת חזרה, מאפשר הכנה של פונקציות הסתברות לאתרים בהם מצויות תחנות הידרומטריות. מחמת מגבלות אמצעים וחזון, אין בנמצא סדרות נתונים ארוכות מספיק עבור מרבית האתרים להם נדרשת ההערכה ההידרולוגית. שיטה מקובלת להכנת הערכות עבור אתרים בלתי מדודים, מתבססת על מודל אזורי. משרטטים כנקודות ספיקות מוערכות לתקופת חזרה נתונה, מול שטחי תחומי ההתנקזות של אתרי המדידה. קו קשר שמועבר בין הנקודות, מתאים לשמש כמודל אזורי, להערכת ספיקות בעלות אותה תקופת חזרה באתרים בלתי מדודים באזור תחנות המדידה. אם הפיזור גדול ואפשר להבחין בקבוצות של תחומי התנקזות בעלי תכונות משותפות (כגון אופי הקרקע או המסלע),

אין להעביר את הקו כמצולע פתוח דרך הנתונים, כי אז נעלמים היתרונות שבבחירת פונקציה. זו פונקציה אמפירית שמנוסחת באורח סובייקטיבי. התאמות אובייקטיביות נשענות על המומנטים הסטטיסטיים של הנתונים, על המומנטים המשוקללים הסתברותיים (PWM), נראות מרבית ועוד. ההתאמות, משמען קביעת ערכי הפרמטרים של הפונקציה מתוך מידע המופק מן הנתונים. השוואת עין של קו הפונקציה עם נקודות הנתונים, מצביעה על טיב ההתאמה. רצוי להשתמש במבחן סטטיסטי לחישוב טיב ההתאמה. מבחן רב עוצמה למטרה זו, נוסח על ידי אנדרסון ודרלינג.

הקישור בין ספיקת השיא לתקופת חזרה, נעשה מתוך קו הפונקציה או מנוסחתה. נוסחת הקשר בין הסתברות ההשגה, שהיא המשתנה המופיע בפונקציה, לבין תקופת החזרה:

$$T(Q) = N_y / (nF(Q)) \quad (16)$$

כאשר $T(Q)$ [T] תקופת החזרה של הספיקה Q , N_y [T] מספר שנות התצפית, n [1] מספר הנתונים בסדרה, $F(Q)$ [1] הסתברות ההשגה של Q . בסדרה שנתית שווה, בדרך כלל, מספר הנתונים למספר שנות התצפית ולכן יש המתעלמים מההבדל בין הממדים של שני המשתנים האלה ופוגמים בנכונות הנוסחה. בסדרה שנתית שכוללת אפסים, יש



תרשים 9: מודל אזורי לספיקות שיא בנגב
ספיקות שיא לתקופת חזרה של 100 שנה (בעקבות מאירוביץ וחור, 1998)

ביותר במסלולי הזרימה שבתחום ההתנקזות (באזורים בנויים רצוי לא להתייחס לשטחים חדירים). הוא אמור להיות מחושב על סמך התוויה של מסלולי זרימה והערכת מהירויות זרימה לאורכם. לחילופין, מצויות נוסחאות וטבלאות שהוכנו בדרכים אחרות (ראה בהמשך את הנוסחה שיובאה לישראל). תקופת החזרה של עוצמת הגשם, נקבעת מתוך ניתוח של נתונים רשומים. בוחרים משכי גשם שונים ומכינים, באמצעות סריקה, סדרות של עוצמות גשם מרביות ממוצעות, על פני כל אחד מן המשכים הנבחרים בכל אחד מאירועי הגשם שנרשמו. מתוך הסדרות האלה, בוחרים סדרות שנתיות או חלקיות של עוצמות מרביות ומכינים לכל משך סטטיסטיקה של עוצמות גשם, כמו אלה שמוכנות לספיקות השיא של גיאוויות. את התוצאות משרטטים באורח תלת-ממדי: עוצמה-משך-הסתברות השגה (כלומר תרשים דומה לתרשים 8, בו מופיעים קווים אחדים כל אחד עבור משך גשם משלו). היישום המקובל של הנוסחה, אינו מאפשר הערכה של הספיקה המתקבלת מגשם שמשכו קצר או ארוך יותר ממשך הריכוז. במחקרים שמתפרסמים בשנים האחרונות, מסתמנת הצעה לבחור משך גשם שיגרום לספיקה המרבית.

יישום הנוסחה הרציונאלית פשוט מאוד. מזמין העבודה מחליט על תקופת החזרה, בדרך כלל על פי תקנים או נהלים מקובלים. המהנדס המתכנן מסמן את קו פרשת המים של כל נקודת

אפשר להעביר קו מיוחד לכל קבוצה. בדרך זו ניתן להכין משפחה של תרשימים בהקשר לתקופות חזרה אחדות ולקבל מודל אזורי כולל יותר עבור אזור העבודה (תרשים 9, לדוגמא).

11. הנוסחה הרציונאלית

הנוסחה הרציונאלית (הגיונית, בעברית), פותחה בסוף המאה התשע עשרה לתכנון תיעול עירוני, והורחבה בראשית המאה העשרים לתכנון תחומי התנקזות פתוחים קטנים. היא משמשת עד היום בכל העולם הן באורח ישיר, והן כבסיס לנוסחאות אחרות וכחלק פנימי של מודלים לתחומי התנקזות גדולים. במשך השנים פותחו חלופות אחדות של הנוסחה הרציונאלית, לשם תכנון הידרולוגי של שטחים קטנים, אך אלה נבדלות באופן היישום של הנוסחה ולא במהותה. ניסוחה:

$$Q = CIA \quad (17)$$

כאשר Q [L³/T] ספיקת התכן, C [1] מקדם, I [L/T] עוצמת הגשם, A [L²] שטח תחום ההתנקזות.

באזורים בנויים, ערכו של המקדם שווה לחלק היחסי של השטחים האטומים ומחוברים למוצא. לשטחים פתוחים, ערכו של המקדם אמפירי. מצויות בספרים טבלאות שונות להערכת המקדם, בחלקם מוצעות גם דרכים לחישוב ערך ממוצע משוקלל שלו.

עוצמת הגשם המוצבת בנוסחה, תלויה במשך הריכוז של תחום ההתנקזות ובתקופת החזרה של הגשם. משך הריכוז, מוגדר כמשך הזרימה הארוך

ניצול האנרגיה של המים, יצירת עומק מתאים לשיט, מיהול במים נחותים שמגיעים ממקורות אחרים, שימור ערכי טבע או שיפור אפשרויות קיט ונופש. מאגרים רבים, במיוחד הגדולים שבהם, מוקמים למטרות אחדות.

התכנון ההנדסי של מאגרים, מתואר במאמר אחר בספר זה (צוברצקי, 2008). כאן מוצג התכנון ההידרולוגי בלבד. הוא נעשה, בדרך כלל, באורח אמפירי תוך שימוש במאזני מים. המשתנים הדרושים לכך כוללים הידרוגרפים של הכניסה הצפויה ואילוצי המפלס, הצריכה והשחרור. לצורך החישוב יש לקבוע את צעד הזמן ולהכין עקומי רום נפח מתוכננים, עקום כיוול של המברץ, הנחיות לתפעול מברץ נשלט, ותכנית הצריכה והשחרור. כמו כן יש להניח אוגר תחילי. נוסחת המאזן:

$$\Delta S / \Delta t = \Sigma I - \Sigma Q \quad (20)$$

כאשר ΔS [L³] שינוי אוגר, Δt [T] צעד הזמן, ΣI [L³/T] סכום הספיקות הנכנסות, ΣQ [L³/T] סכום הספיקות היוצאות. למעשה מעבירים את Δt לאגף ימין ועובדים בנפחים, פרט לחישובים הקשורים בריסון שיטפונות שם פועלים כמתואר בפרק הילוך גאות.

כשמסתיים החישוב, רושמים את תוצאותיו: סטטיסטיקה של נפחי האספקה, הפגיעה באילוצים ומידת מילוי הביקוש למים. בדרך כלל אין חישוב זה מוביל לתוצאה אופטימלית. לכן משנים את מבנה המאגר, קיבולו או אופן שחרור המים, מחשבים שנית ורושמים את התוצאות. חוזרים על פעולות אלה פעמים אחדות, עד שמתמלא טווח השינויים הסבירים. רצוי לשנות גם את ההידרוגרפים של הכניסות ולחזור על כל החישובים. בדרך כלל, מתחילים בסדרת כניסות קרובה ככל האפשר לנתונים מדודים בעבר. אולם רצוי להשתמש גם בהידרוגרפים מיוצרים כתוצאה של סדרות משקעים שעלולים להופיע, שהם גבוהים או נמוכים במידה ניכרת מאלה שהופיעו בעבר. רצוי מאוד להשתמש גם בסדרות מיוצרות סטטיסטית, היות שהתוצאות מושפעות גם מסדר הופעת ערכי הכניסה. בסופו של דבר מתקבלת משפחה של תוצאות, אותה מסכמים באופן סטטיסטי.

תוצאות החישובים מלמדות, כי ערכי הספיקות היוצאות קשורים זה לזה במידה רבה יותר מאשר אלה הנכנסות. דבר זה קורה עקב תהליך האגירה

תכנון ומודד את שטח תחום התנקזותה. אחר כך הוא מעריך את המקדם C ואת משך הריכוז לכל אחד מתחומי ההתנקזות האלה. בוחר משך גשם שווה למשך הריכוז, ומוצא בתרשים את עוצמת הגשם המתאימה למשך הריכוז ולתקופת החזרה המתאימים. מציב את המקדם, השטח והעוצמה בנוסחה, ומקבל את ספיקת התכן לכל אחת מנקודות התכנון.

למרות פשטות הנוסחה הרציונאלית, נבדלים משרדי התכנון זה מזה בבחירת ערכם של המקדם C ובהערכת משך הריכוז. גופים שונים הכינו טבלאות שונות זו מזו של ערכי המקדם ונוסחאות שונות זו מזו להערכת משך הריכוז. הנוסחה המקובלת בישראל בעשורים האחרונים, יובאה מארה"ב על ידי התחנה לחקר הסחה:

$$t_c = 5.4(L/S)^{0.75} \quad (18)$$

כאשר t_c משך הריכוז (דקות), L אורך האפיק הראשי (ק"מ), S שיפוע ממוצע של האפיק הראשי (1). S מחושב באמצעות הנוסחה:

$$S = (H_2 - H_1) / (0.75L) \quad (19)$$

בה H_2 (מ') הרום הטופוגרפי של הנקודה שמרוחקת מנקודת הריכוז 0.85L לאורך האפיק, H_1 (מ') הרום הטופוגרפי של הנקודה שמרוחקת מנקודת הריכוז 0.1L לאורך האפיק, L אורך האפיק הראשי (מ').

נתוני הגשם המופיעים בתרשימי עוצמה-משך-הסתברות השגה הם נקודתיים, וכוחם יפה לתחומי התנקזות קטנים בלבד (עד קמ"ר אחדים). כאשר מרחיבים את יישום הנוסחה הרציונאלית לתחומי התנקזות גדולים יותר, יש להוסיף מקדם תיקון לעוצמה כפונקציה של שטח תחום ההתנקזות. תרשימים של מקדמי התיקון נמצאים בספרים רבים. בגלל מגבלות הנוסחה הרציונאלית (הידרוליקה פשטנית מאוד, אחדות במרחב ובזמן של עוצמת הגשם, שוויון בין תקופות החזרה של עוצמת הגשם ושל ספיקת השיא, ועוד), אין להשתמש בנוסחה הרציונאלית לחישוב ספיקות שיא מתחומי התנקזות בינוניים וגדולים.

12. מאגרים

מאגרים נבנים כדי לווסת את הזרימה, אם על מנת לרסן שיטפונות ואם על מנת לאגור מים לשימוש בעת מחסור. שחרור או הטיה של מים ממאגרים נעשה כדי לפנות מקום לריסון שיטפונות עתידיים, לשם צריכה של המים למטרות חקלאיות ועירוניות,

מהאנרגיה) של הזורם, ומכוח הכבידה (או האנרגיה הפוטנציאלית) של המוסע ושל המסיע. תיאור מפורט יותר של מאפייני הסעת הסחופת, נמצא במאמר אחר בספר זה (לקח וחור, 2008).

14. איכות מים

העיון ההידרולוגי באיכות המים, כרוך בשתי מטרות: שיפור ההיכרות עם התהליכים ההידרולוגיים וקביעת מידת ההתאמה של המים ליעדי השימוש בהם. על פי איכות המים, אפשר להעריך את תכונות התווכים בהם עברו ומתוכנן לזהות את מסלולי הזרימה ואת מקורות המים הזורמים. על סמך מידת ההתאמה ליעדים, אפשר לבחור את מקור המים. העיסוק באיכות המים רחב היקף, אך כאן נציג בקצרה רק את החישובים ההידרולוגיים הקשורים בה.

נבחר כדוגמה של עירוב שני גופי מים בעלי איכויות שונות. לגוף מים אחד ספיקה Q_1 [L³/T] וריכוז חומר מומס או מרחף C_1 [M/L³]. לגוף האחר ספיקה Q_2 וריכוז חומר מומס או מרחף C_2 . עירוב מוחלט שלהם, כאשר אין בתהליך העירוב ריאקציות כימיות או פיסיקליות, ייצור גוף בעל ספיקה, Q , וריכוז חומר מומס או מרחף, C , כלהלן:

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (21)$$

$$C = (C_1 Q_1 + C_2 Q_2) / Q \quad (22)$$

התוצאות האלה מתקבלות מתוך הפעלת חוק שימור המסה של המים ושל המרחף או המומס. בעיסוק במומסים אחדים, אפשר להוסיף משוואה נפרדת עבור כל מומס ומומס.

המשוואה עבור מומסים ומרחפים שעוברים תהליכים מסובכת יותר, כי צריך להתחשב גם בתהליכים. מורכבים עוד יותר הם תהליכים בהם ריכוז חומר אחד משפיע על מצב חומר אחר או שהמצב הפיסי של הנוזל וסביבתו (כגון טמפרטורה) משפיע על התהליכים ועל הריכוזים המרביים האפשריים. גם מידת הערבוליות של המים עשויה להשפיע. מים סוערים עשויים להמיס או לקלוט בועות אוויר, ומים שקטים עשויים לפלוט אותן. חשוב עוד לעיין באחידות העירוב של החומרים המרחפים או המומסים בתוך המים הזורמים. מקור החומרים עשוי להיות נקודתי או פרוס לאורך מרחק מסוים. ככל שמהירות המים גבוהה יותר וערבוליותם גדולה יותר, קצר המרחק

והשחרור שמשכך תנודות ונקרא התמדה. הוא מופיע גם במוצאי מאגרים טבעיים על-קרקעיים ותת-קרקעיים, אפילו אם הכניסות אליהם אקראיות לחלוטין.

אופן החישוב באמצעות מאזן מים, נוח מאוד לביצוע באמצעים הממוכנים הזמינים היום. לכן קל לחזור עליו תוך שימוש במספר רב של סדרות מיוצרות למצבים מטאורולוגיים וקרקעיים מגוונים. עם זאת, יש לשים לב למספר מגבלות. ככל שצער הזמן ארוך יותר, נדרשים פחות חישובים, אך התוצאה אופטימית יותר. לכן, אפשר להשתמש בצעדים ארוכים לשם קביעת המדיניות או לשם הבחנה בין אפשרויות תכנון רחוקות זו מזו. אולם, יש להקטין בהדרגה את צעדי הזמן ככל שמתקדמים עם התכנון. בעיה אחרת נובעת מאורך סדרת הנתונים המשמשים לחישוב. ככל שהסדרה ארוכה יותר, התוצאה פסימית יותר. כדי לקבל תוצאה סבירה, רצוי לקבוע את אורך סדרת הנתונים כאורך תקופת הקיום של המאגר או כאורך תקופת החישוב של התועלת הכלכלית מן המים.

13. הסעת סחופת

סחופת, היא החומר המוצק המוסע על ידי המים הזורמים. הגדרה זו אינה כוללת את המומסים שנחשבים כחלק מן הנוזל ואת החומרים המוסעים במצב גזי. הסחופת נחלקת לשלושה רכיבים: גרופת - המוצקים שנגררים, מתגלגלים או מקפצים על קרקעית האפיק; רחופת - המוצקים שמרחפים בתוך הגוף הזורם; צופת - המוצקים הצפים על פני המים.

הסחופת המוסעת בחתך כלשהו של הזורם, מגיעה משני מקורות עיקריים - מפני תחום ההתנקזות ומן האפיק. תנועת כל גוף מוצק בתוך הזורם, כרוכה בשני שלבים גוזלי אנרגיה - הנעה והסעה. כדי להניע מוצק שנמצא במצב מנוחה, יש להתגבר על כוחות החיכוך והתאחיזה שבינו לבין סביבתו ועל התמדתו במצב מנוחה; וכדי להמשיך להניעו, יש לספק אנרגיה שתמנע ממנו לשקוע ושתוביל אותו בכיוון הזרימה למרות התנגשויותיו במוסעים אחרים ובמוצקים נייחים. העקירה מן המקום התחילי ומתן תנע, דורשים השקעת כוחות גדולים יותר מאשר המשך ההנעה במורד הזורם. הכוחות מושגים ממכת טיפות הגשם, מהתנע (או

בו נהיה הריכוז אחיד.

כאשר חשופים המים למקור זיהום שאינו קבוע אלא מתפרץ, חשוב להעריך מתי יגיע הזיהום לנקודות נתונות במורד הזרם. החישוב על פי המהירות הממוצעת אינו מתאים, כי לזרם בנחלים ובאקוות ישנם מסלולים מהירים ומסלולים אטיים. חמרי זיהום שנתפשים על ידי טיפות מים הזורמות במסלול מהיר, יגיעו מוקדם יחסית, ואלה הנתפשים על ידי טיפות הזורמות במסלולים אטיים, יגיעו מאוחר. כתוצאה מפרוס המהירויות, אין תוצאת הזיהום מגיעה באורח פתאומי לנקודה נבדקת במורד הזרם, אלא מתחילה בריכוז נמוך שמתגבר והולך עד לשיא ואחר כך יורד עד שנמוג כעבור זמן ארוך.

15. הידרולוגיה וסביבה

המים משפיעים על סביבתם ומושפעים ממנה. המים חיוניים לחי ולצומח וזמינותם ואיכותם קובעים את עצם הימצאות החי והצומח ואת מגוונותם. באקלימנו, כשירור גשם וכל עוד הקרקע לחה, מופיעים צמחים ובעלי חיים שניזונים מן המים. לכשיבשה הקרקע, מוגבלים הצמחים ובעלי החיים על ידי אפשרויות השגת מים. השקיה עשויה למלא את החסר ולאפשר קיום צמחים רצויים, הן צמחים חקלאיים והן צמחי נוי. מאגרי מים, עליים ותחתיים, מעבירים מים זמינים מעונה לעונה ולעתים גם משנה לשנה. הם מייצרים זרימת בסיס בנחלי איתן ומעיינות ונביעות היוצאים בבקעה ובהר.

המים גם מושפעים מן הסביבה. כושר החידור תלוי בתכונות הקרקע ואלה תלויות בשימושי הקרקע. הקטנת כושר החידור על ידי בנייה וסלילה, מקטינה את העשרת מי התהום ואת זמינות המים למעיינות או לשאיבה. משטר עיבוד חקלאי משפיע על ספיקות הנגר ונפחיו, על הסעת הסחופת ועל החידור והעשרת מי תהום. ניקוז טוב מקטין את משך הריכוז ומגדיל את הספיקות. סכירה ובניית גשרים ומכשולים לזרימה, מקטינים את הספיקות השיטפוניות במורד הזרם ואוגמים מים במעלה. ניצול מים והטייתם מהאפיקים בהם הם זורמים, מקטינים את כמויות המים במורד הזרם ובכך משפיעים על החי והצומח ועל עיצוב הסביבה. משמע, הפיתוח לסוגיו עשוי להגדיל או להקטין את הספיקות השיטפוניות ואת זרימת

הבסיס ולשנות את מידת השפעתם.

שאיבת מי תהום משנה את מסלולי הזרימה באקווה, מקטינה את שפיעת המעיינות ועשויה לייבשם. השינויים בזרימה עשויים לגרום לשינויים באיכות המים הנמצאים במקומות שונים באקווה, לעתים עד כדי הוצאתם מהתאמה לשימוש קיים או מתוכנן, וכתוצאה מכך לפגוע בחי ובצומח הניזונים ממעיינות. הפיכת שטחי בור לשטחים חקלאיים, עשויה להגדיל את נפחי ההעשרה של מי התהום ושל הזרימה לאגמים, וגם לפגוע באיכות מימיהם כתוצאת חדירה של מלחים, חומרי דיזון והדברה. החקלאות האינטנסיבית הנה אחד מגורמי הזיהום הגדולים של מאגרי המים. כללית, השקיית שדה חקלאי במי תהום שנשאבים מתחתיו, מעלה בהדרגה מליחות מי ההשקיה, כי מי הגשם היורד על פני השטח מביאים אתם מלחים. מלחים אלה נשטפים לאקווה, נשאבים בתוך מי ההשקיה, אך אינם מתאדים אלא נשארים בשדה ונשטפים שוב לאקווה, וחוזר חלילה. על אחת כמה מחמירה התופעה כאשר נוספים לשדה דשנים, שבחלקם אינם מעוכלים על ידי הצמחים, וכאשר נוספים מי השקיה ממקורות חיצוניים מלוחים יותר (כגון קולחים עירוניים שמקור מימיהם באותה אקווה). האדם מייצר אשפה וביוב, מקים מפעלים פולטי מזהמים, צורך דלקים שחלקם מטפח לקרקע או מנוקז מן הכביש, ועוד. ככל שמתרבה מספר בני האדם, וככל שעולה רמת חייהם, גדלה כמות המזהמים שהם מייצרים ופולטים. מגוון חומרי הזיהום גדל והולך וקשה לטפל בכולם. גם הידע שלנו על סכנות הזיהום ועל דרכי הטיפול הנכונות אינו מושלם. כתוצאת תהליך זה, נפסלות מהתאמה לשימוש כמויות גדולות והולכות של מים במקורות הטבעיים. הפתרון הנכון מחייב התפלה או ניקוי של המים המזהמים, תוך סילוק המזהמים במסלול שלא יחזירם למחזור ההידרולוגי. סילוק מי הרכז ממפעלי התפלה הנו בעיה נוספת. אם אין המים מכילים רעלים, אפשר לשפוך אותם אל הים. במקרה אחר יש לסלקם למקום בו לא יזיקו. קשה במיוחד מציאת אתרים מתאימים לסילוק פסולת גרעינית. אתר מתאים לפסולת גרעינית אסור בדליפת מים ממנו אל המחזור ההידרולוגי במשך אלפי שנים, בכל טווח המשטרים ההידרולוגיים העשויים להופיע בתקופה הזו.

לבד מהטיפול במים המזהמים, רצוי לנקוט גם

16. מודלים הידרולוגיים

מודל הוא כלי שמתאר את המציאות בצורה נוחה להבנה. לפי מטרותיהם, ניתן לחלק את המודלים לשתי קבוצות - מסבירים ותפעוליים. מודלים מסבירים נועדו להעמיק את הבנתנו את התהליכים; מודלים תפעוליים נועדו להעריך קשרים בין פעולות לתוצאות, כדי לסייע בנקיטת פעולות רצויות. בדרך כלל, אין הבדל בין הניסוחים של המודלים בשתי הקבוצות, אלא ברמת הפירוט, בהדגשים ובאופי הנעלמים שבהם.

לפי מבניהם הכלליים ישנם מודלים רעיוניים, פסיקליים ומתמטיים. מודל רעיוני מורכב מתיאורים מילוליים ותרשימים; מודל פסיקלי מחומרים מוצקים, נוזלים וגזים; מודל מתמטי מורכב ממשוואות מתמטיות ומאילוצים מנוסחים באורח מספרי. מודלים פסיקליים ומתמטיים חייבים להתבסס על מודלים רעיוניים. בעשורים האחרונים, עם התפתחות אמצעי החישוב, מתרחב והולך השימוש במודלים מתמטיים. כמעט כל המודלים המתמטיים המצויים הם מודלים נומריים, כלומר נועדו לפתור בעיה מוגדרת אחת בלבד, ורק מיעוטם הקטן הם מודלים אנליטיים, כלומר נועדו לפתור מכלול של בעיות דומות בניסוחן אך שונות בערכיהן הכמותיים. הסיבה למיעוט השימוש במודלים אנליטיים, נעוצה בקושי לפתור באופן כללי את משוואות הזרימה.

כללית ניתן לחלק את המודלים המתמטיים לשתי קבוצות - דטרמיניסטים וסטוכסטיים. במודל דטרמיניסטי הפלט הינו תוצאה חד-משמעית של מבנה המודל והקלט, בעוד שבמודל סטוכסטי לפלט ערכים אפשריים רבים ולכל ערך צמודה הסתברות הופעתו. בשתי הקבוצות מצויות קבוצות משנה פשוטות יחסית. בין הדטרמיניסטים מצויים מודלים פרמטריים ובין הסטוכסטים מצויים מודלים הסתברותיים. דוגמה למודל דטרמיניסטי מלא: הילוך גיאות שמתאר במפורש את התהליך הפסיקלי. דוגמה למודל פרמטרי: הידרוגרם היחידה שמתאר כללית את התהליך. בקבוצת המשנה ההסתברותית אין חשיבות לסדר ההופעה של הערכים (לדוגמה, הסתברות ספיקות היא שנתיות), בעוד שבמודל סטוכסטי מלא יש לו חשיבות (לדוגמה ניצול מאגרים).

אופן מיון אחר עוסק במידת הפירוט של המודל. יש מודל מכונס ויש מודל פרוס. במודל מכונס,

בטיפול מונע. דבר זה כולל בידוד אתרים מזהמים מפני חדירה ויציאה של מים אליהם ומהם, יצירת מחסומים הידרולוגיים סביב כתמים של מי תהום מזהמים וכדומה. כאשר שואבים מי תהום שפירים ואין מורידים את המפלס בכתם מזהם שגובל בהם, מתפשט הכתם, נמהל במים השפירים שבקרבתו וגורם לזיהום מי הגשם החודרים לאזור המיהול. בתהליך זה קטן נפח המילוי החוזר של המים השפירים. כדי למנוע זאת, יש לנקוט באמצעים, כגון שאיבה (ואולי התפלה), מן הכתם המזהם. נכון להקים מפעלי התפלה באופן שהשאיבה אליהם תקטין את הכתמים המזהמים של מי התהום.

פעולות אנוש משפיעות על ההידרולוגיה גם בעקיפין. בירוא יערות והשרפות העונתיות של שרידי צמחייה, מקטינים את הגשם באזורים הטרופיים. זיהום אוויר ממקורות עירוניים, תעשייתיים ותחבורתיים, עשוי גם הוא להקטין את כמות המשקעים. ניצול מים שפירים, מקטין את שטח הפנים של אגמים פנימיים ומגדיל את מליחותם. שחרור גזי גופרית לאטמוספירה, גורם לירידת גשם חומצי. חומציות זו משפיעה על התהליכים הכימיים והביולוגיים במקומות בהם יורד גשם זה, ומהם והלאה במורד הזרם עד לאוקיינוס. האבק המדברי המצוי אצלנו, סותר במידה רבה את חומציות הגשם היורד כאן. פליטה לאטמוספירה של גזי חממה וחלקיקים מוצקים זעירים, גורמות לתנודות אקלימיות ואולי גם לשינויים אקלימיים. התנודה או השינוי הנצפים עתה כרוכים בעליית מפלסי הים, בשינויים של מסלולי זרימת האוויר ושל איכות המים. עליית הטמפרטורה הגלובלית, מחישה את קצב המחזור ההידרולוגי, אם כי הגידול במשקעים אינו אחיד. תוצאות יישום מודלים, צופות אזורים בהם יתגברו המשקעים במידה רבה ולעומתם אזורים בהם יפחתו המשקעים. נראה שבדרום ישראל ישנה בשנים האחרונות עלייה יחסית בכמות המשקעים ובצפון ירידה יחסית. ירידה גדולה נצפתה בשקע הירדן ביחס למישור החוף. ההתאדות בצפון ישראל ובמרכזה פוחתת אף היא, כנראה בגלל הקטנת הקרינה עקב זיהום אוויר. ישנם ממצאים ממקומות רבים בעולם לפיהם הקרינה, ובעקבותיה ההתאדות, קטנת עקב זיהום האוויר.

מראי מקומות

- גולדרייך, י' (2008). מטאורולוגיה. בתוך נחלים וניקוז - תהליכים, הנדסה ותכן (ע' א' בן-צבי). רשות ניקוז שקמה-בשור והמכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון, עומר: 9-26.
- גבירצמן, ח' (2002). משאבי המים בישראל. יד בן צבי, ירושלים.
- לקח, י'; אלכסנדרוב, י'; לרון, י' (2008). הסחף הנחלי. בתוך נחלים וניקוז - תהליכים, הנדסה ותכן (ע' א' בן-צבי). רשות ניקוז שקמה-בשור והמכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון, עומר: 99-130.
- מאירוביץ, ל'; ינוביץ, י'; שנצס, א'; בן-צבי, א' (1998). מודל תדירות וגודל האירועים בנגב - עדכון 1998. דו"ח הידרו 98/3, השירות ההידרולוגי, ירושלים.
- צוברוצקי, מ' (2008). מאגרים. בתוך נחלים וניקוז - תהליכים, הנדסה ותכן (ע' א' בן-צבי). רשות ניקוז שקמה-בשור והמכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון, עומר: 219-229.
- Ben-Zvi, A.; Azmon, B. (1997). Joint use of L-moment diagram and goodness-of-fit test: a case study of diverse series. **J. Hydrol.**, **198**: 245-259.
- Chow, V.T. (ed.) (1964). **Handbook of Applied Hydrology**. McGraw-Hill, New-York.
- Green, W.H.; Ampt, G. (1911). Studies of soil physics, part I - the flow of air and water through soils. **J. Ag. Sci.**, **4**: 1-24.
- Horton, R.E. (1939). Analysis of rainfall-plat experiments with varying infiltration capacity. **Trans. AGU**, **20**: 693-711.
- Horton, R.E. (1940). An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity. **Proc. Soil Sci. Soc. Am.**: 417-599.
- Horton, R.E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bull. Geoll. Soc. Am.**, **56**: 275-370.
- Kidron, G.J. (1999). Differential water distribution over dune slopes as affected by slope position and microbiotic crust, Negev Desert, Israel. **Hydrol. Processes**, **13**: 1665-1682.
- Linsley, R.K.; Kohler, M.A.; Paulhus, J.L.H. (1982). **Hydrology for Engineers**, 3rd ed., McGraw-Hill, New York.
- Maidment, D.R. (ed.) (1993). **Handbook of Hydrology**. McGraw-Hill, New York.
- Morin, J.; Benyamini, Y. (1977). Rainfall infiltration into bare soils. **Water Resour. Res.**,

כל אחד מן הביטויים המתמטים מתייחס לתחום ההתנקזות בכללותו. מודל פרוס, עשוי לכלול מספר מודלים מכונסים, כל אחד לחלק של תחום ההתנקזות, כשהם מחוברים זה לזה באמצעות משוואות הילוך גיאות. השימוש במודל פרוס, מאפשר התחשבות מפורשת בפרוסים המרחביים של סוגי הקרקעות ושימושיהן ושל המשקעים, ובשינויים הצפויים להתרחש בהם. מודל שמתאר את כל התהליך ההידרולוגי, נקרא כוללני. מודלים מכונסים אחדים מצויים בשוק כתוכנות מדף. יש להשתמש בהם תוך תשומת לב להנחות היסוד שלהם (שלא תמיד מתאימות למשטר ההידרולוגי בארץ ישראל) ולזמינות הנתונים הנדרשים להפעלתם. השימוש בתוכנות מדף של מודלים פרוסים, מצריך הכנות רבות יחסית בהתאמתם לתחום ההתנקזות. מודלים פרוסים דו-ממדיים לזרימה על-קרקעית, כבר פורסמו למקרים מיוחדים. הם עוסקים בהתפשטות היקף הצפות של שיטפונות, אפשרויות שיט במפגשי נהרות או בהתפלגותם, בהשפעת גיאות ושפל של הים וכדומה.

מקובל להעריך את נכונות הפלט של המודל, באמצעות השוואה של נתונים מחושבים כנגד נתונים מדודים. בדרך כלל, אין התאמה מושלמת ביניהם. כדי לשפר את ההתאמה, מתקנים את ערכי הפרמטרים ופותרים שוב. מקבלים נתונים מחושבים חדשים, וחוזר חלילה. ישנם היום אלגוריתמים שמכוונים את הפתרונות החוזרים, עד להתכנסות סבירה של ההפרשים בין הערכים המחושבים למדודים. תהליך הפתרון הזה, נקרא כיול. יש מהדרים שמכילים את הפלט כנגד חלק מהנתונים המדודים ומשווים את הפלט המתקבל בעקבות הכיול עם שאר הנתונים המדודים. השוואה זו נקראת אימות, ומטרתה לחזק את הביטחון בנכונות נתונים מחושבים לתקופות או למצבים בהם אין נתונים מדודים.

המודלים של כמויות המים, משמשים בסיס למודלים של איכות המים. לשם כך יש להרחיב את מבניהם ולהוסיף משוואות שימור המסה של החומרים המוסעים במים, ובמקרים מסוימים גם של התהליכים הכימיים והפיסיקלים המשפיעים על מבנה החומרים האלה, שיקועם, נידופם וכדומה. מודלים יישומיים של איכות המים מאפשרים הערכת תוצאות של פעולות שונות ותכנון סביר של היקף הפעולות ואופן יישומן.

13: 813-817.
Shaw, E. (1994). **Hydrology in Practice**. Chapman
& Hall. London.

Ward A.D.; Elliot W.J. (eds.) (2004).
Environmental Hydrology. Lewis Publishers,
New York.

אגן היקוות יחידה הידרו-מורפולוגית

יהודית לקח

ד"ר, המחלקה לגיאוגרפיה, האוניברסיטה העברית בירושלים;
המחלקה לגיאוגרפיה אוניברסיטת בר-אילן.

1. הקדמה והגדרת המושג

במאמר זה באסופה הדנה בניקוז, אתייחס למושג אגן היקוות על תכונותיו ומאפייניו, הן הטבעיים והן אלה שנוצרו בידי האדם. אגן היקוות או אגן ניקוז הם ביטויים מקובלים להגדרה של יחידת שטח המרכזת את נגר הגשמים (או נגר השלגים) הנוצר על פניה, אל נקודה מוגדרת במוצא שנקראת נקודת היקוות. נקודה זו היא גם בסיס הסחיפה של האגן, כי לכיוונה זורמת הסחופת הנישאת עם המים. נקודת ההיקוות הנמוכה ביותר נמצאת בגבול ים-יבשה, כאשר מפלס הים קובע את רום בסיס הסחיפה של האגן. נקודת ההיקוות אינה מחויבת להימצא במוצא הנחל, אפשר להגדירה בכל מקום לאורך רשת הניקוז של אגן גדול ועל פיה לקבוע אגן משנה.

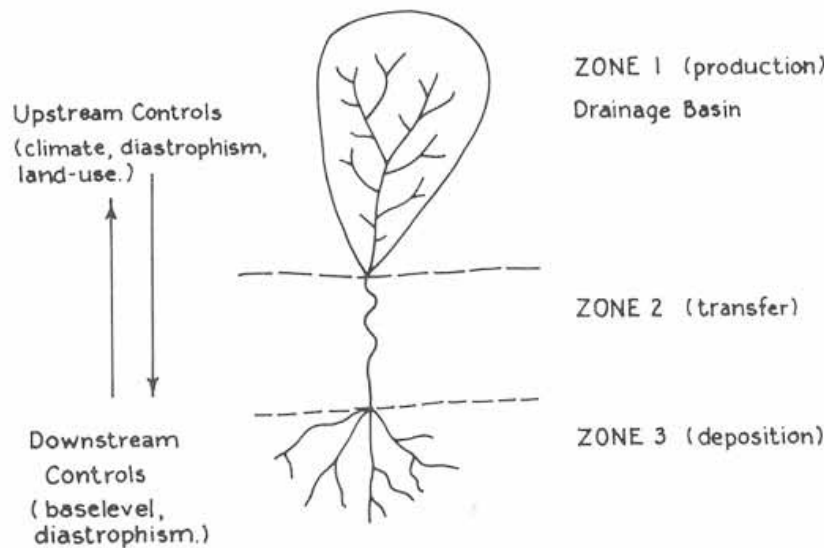
הגבול התוחם אגן היקוות הוא קו פרשת המים, המפריד בין נגר המתנקז לעבר נקודת ההיקוות שלו לבין זה המתנקז לאגנים הסמוכים. רשת הניקוז הטבעית והמלאכותית מוליכה מים וסחף ובאמצעותם גם מזהמים לעבר בסיס הסחיפה. תהליכי היווצרות נגר הגשמים, מתוארים במאמר הידרולוגיה (בן-צבי, 2008). לבד מנגר הגשמים זורמים במערכת גם נגר שלגים, מי מעיינות, מים חוזרים מהשקיה חקלאית ומשימוש עירוני, ועוד. הם נושאים אתם סחופת ומזהמים. תהליכי זרימתם קשורים חזק למאפייני פני השטח והאפיקים ומשתנים עונתית ועם הזמן.

ניצול המשאבים הטבעיים וההכרה כי ניצול זה גורם לשינויים סביבתיים המשפיעים על משאב חשוב ביותר לאדם - המים, מחייבים בפיתוח הבנת התהליכים יוצרי הנגר. עם העלייה המתמדת באוכלוסיית העולם (8.9 מיליארד בני אדם צפויים לשנת 2050 על פי תחזיות האו"ם), גדל בהתמדה

השטח המנוצל על ידי האדם. האזורים המועדפים הם עמקים ופשטי נהרות, אזורי דלתאות ומניפות סחף, מהם ישנה התפשטות לכיוון האזורים ההרריים. התיישבות האדם דורשת מצד אחד אספקה של מים לצרכיו השונים, ומצד שני דורשת הגנה מפני שיטפונות הפוקדים אזורים אלה. ניצול מושכל של משאבי המים ויצירת הגנה אפקטיבית מפני שיטפונות, דורשים הבנה של התהליכים יוצרי הנגר, בהם לתנאי השטח תפקיד חשוב.

Schumm (1977), מתאר את המערכת הנחלית כבנויה משלושה חלקים, כאשר לכל אחד מהם תהליכים דומיננטיים האופייניים לו (תרשים 1). על פי מודל זה, אגן הניקוז הוא החלק העילי של המערכת ובו מתרחשים תהליכי "היצירה" של הנגר העילי הזורם בנחלים ושל הסחף הזמין להסעה. ריכוז המים והסחף מאגן הניקוז, מביא אותם אל חלקה השני של המערכת והוא "אזור ההולכה". בחלק זה של הנהר שלאורכו אין כניסה של יובלים, מתרחשים תהליכי ההולכה של מים וסחף לכיוון בסיס הסחיפה. החלק השלישי הוא "אזור ההשקעה", שם מתרחשים תהליכי ההשקעה של הסחף שנוצר באזור הראשון, הוסע לאורך המערכת דרך האזור השני עד למקום בו אין עוד אנרגיה להמשך ההסעה, מפני שהמערכת הגיעה אל בסיס הניקוז.

מודל Schumm (1977), ממעיט בחשיבותם של תהליכים טבעיים מתרחשים בכל אחד מן האזורים, כגון: התחתרות בקרקעית ובגדות הנהר המספקת סחף המוסע למורד, תהליך ההסעה המלווה גם בהשקעת סחף לא רק במוצא האגן, אבק וסחף רוח, שטחים תורמי נגר לאפיקים הנקבעים על ידי הפרוס המרחבי של סופות הגשם, עוצמתן וכמויות המשקעים היורדות ועוד. נוסף על כך,



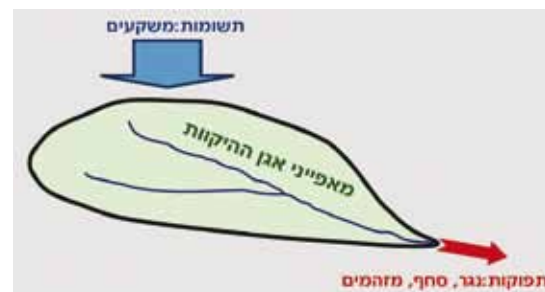
תרשים 1: שלוש היחידות הבונות את המערכת הנחלית (Schumm, 1977)

מודלים, הקושרים את הנגר באגן ההיקוות אל התנאים המשתנים של המשקעים ושל פני השטח. מודלים העוסקים בתחזיות לטווח ארוך, לוקחים בחשבון גם שינויים אקלימיים אפשריים.

מידת הפירוט של תכונות השטח השונות, נגזרת מקנה המידה בו עוסקים. לפיכך, הגדרת קנה המידה הכרחית בכל תיאור של אגן ההיקוות. פני שטח טבעיים הנם הטרוגניים מעצם טבעם. להטרוגניות זו השפעה רבה כאשר עוסקים באגני היקוות קטנים, אולם היא נבלעת כאשר עוברים לאגני היקוות גדולים. הגדרת קנה המידה נגזרת מן המודל אותו מעוניינים לפתח. אם חשוב לבחון את סחיפת הקרקע משדה חקלאי או את תפוקת הנגר ממדרונות, יש צורך בפירוט רב של תכונות אגן הניקוז בעל שטח קטן. אם קיים באגן תבליט חריף, אזי הוא יוצר שינוי בשדה הרוח שכתוצאה ממנו קטנה כמות הגשם היורדת על הפסגות עד 30% לעומת זו היורדת במורד המדרונות ובעמק (Sharon, 1970; Arazi et al., 1997). השלכה של תהליכים, שנבחנו בקנה מידה גדול לקנה מידה קטן, לרוב איננה ליניארית. יש צורך בבחינה של תהליכים נוספים כמו ההולכה לאורך האגן וקיומן של יחידות אוגר היוצרות אי רציפיות בהולכה לאורך האגן.

עם ההתפתחות הטכנולוגית, מתאפשר כיום השימוש במודלים דיגיטליים של פני שטח DEM - Digital Elevation Models - המאפשרים טיפול באגני ניקוז כמעט בכל קנה מידה (תלוי כמובן

מעטים כיום אגני היקוות טבעיים וההתערבות האנושית בשטח משנה את המודל הפשוט של Schumm (1977). שטחים עירוניים הממוקמים באזור "ההולכה", מייצרים כמויות נגר המצטרפות אל האפיק, שאין להתעלם מהן. תהליכי סחיפת קרקע משטחים חקלאיים באזור "ההולכה" או אפילו "ההשקעה", משבשים גם הם את המודל. כיום מקובל לראות את שלושת האזורים כיחידה אחת - מערכת הידרו-מורפו-אקולוגית - היא אגן הניקוז. ראייה מערכתית של אגן ניקוז עוסקת בתשומות למערכת, בתהליכים המתרחשים בתוך המערכת כתוצאה מיחסי הגומלין המורכבים בין התשומות לבין פני השטח הבונים את המערכת ובתפוקות מן המערכת (תרשים 2). ראייה זו של אגן הניקוז, נמצאת בבסיסם של המודלים השונים הנבנים היום לחיזוי תפוקות מים, הן כנגר עילי והן כמי תהום, לטיפול במזהמים ועוד. הדרישות לחישוב פוטנציאל המימוש של משאבי מים ולמניעה של נזקי שיטפונות, מחייבים בנייה של



תרשים 2: מבנה מערכת נחלית

כלי בהבנתם של תהליכים טקטוניים וקצביהם כפי שנעשה, למשל, במתלול ההעתקים של הרי נפתלי (שטובר־זיסו וחור, 2005).

2.1.1 גודל - שטח אגן ההיקוות

הפרמטר הפשוט ביותר לקביעה בכל אגן היקוות, הוא השטח. פרמטר זה כמעט ואינו מושפע מקנה המידה של המפה או ה-DEM ממנו הוא מתקבל (יכולים להיות אי דיוקים קלים כתוצאה משימוש בקני מידה שונים). בדרך כלל, ככל ששטח האגן גדול יותר - כמויות המים המתקבלות ממנו גדולות יותר. בחינה של נהרות העולם והספיקות השנתיות הממוצעות שלהן, מראה כי הקשר בין הספיקה, Q , לשטח האגן, A , הוא קשר מעריכי: $Q = aA^b$ (תרשים 3). זהו קשר תלוי אקלים. הערך של b נע מ-0.5 באזורים המדבריים ועולה ל-0.7 ואף 0.9 באזורים הלחים. ערך זה מבטא, בין השאר, את גודלן של סופות המשקעים היוצרות את הנגר ואת אחידות הכיסוי של שטח האגן. בדרך כלל, רק חלקים מהאגן המדברי תורמים לזרימה המגיעה למוצא. כמו כן, גודל השטח התורם והשתרעותו יכולים להשתנות במהלך סופה, אז תתכן הצטברות של תרומות משטחים שונים לאורך זמן. הבנה של מצבים משתנים אלה והשפעתם על התפוקות מאגן הניקוז, מחייבים בחינה של רשת הנחלים באגן.

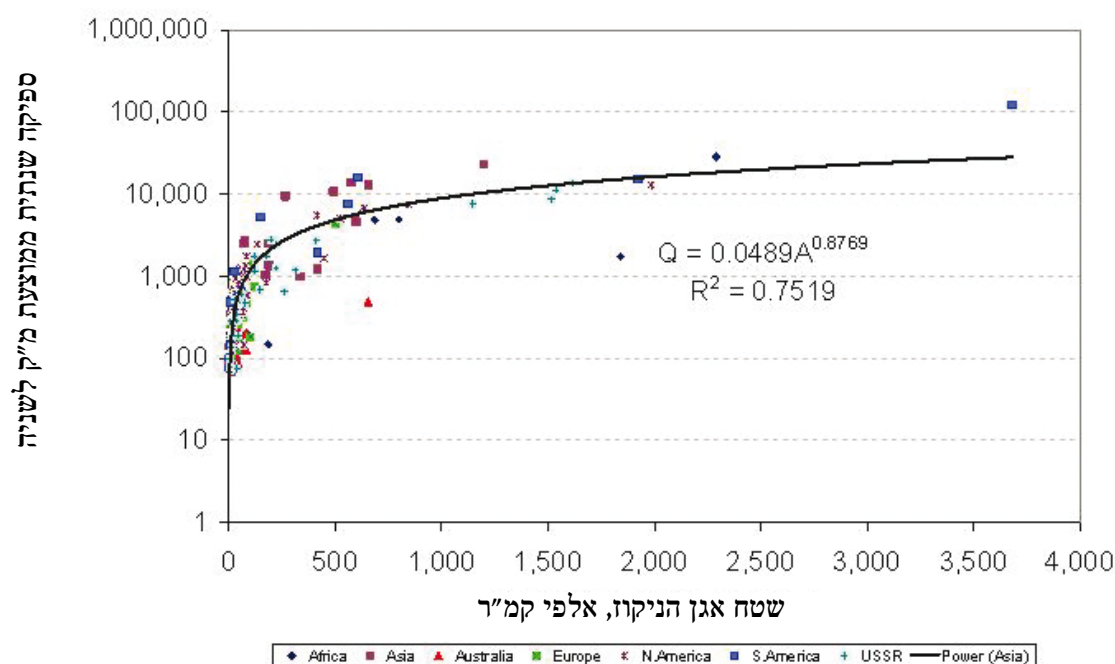
בגודל יחידת הבסיס של ה-DEM). מודלים אלה הם הבסיס לתיאור פני שטח ומהווים חלק בלתי נפרד מכל מודל להבנת הזרימה והתהליכים הקשורים בתנועת מים, סחף ומוזהמים בתוך אגני היקוות.

2. מאפיינים של אגן היקוות

הגישה המערכתית ליחידת השטח "אגן היקוות", בוחנת את כלל המרכיבים המאפיינים יחידה זו. ראשית יש להגדיר את גבולותיו של האגן ולתחום את שטחו על ידי קו פרשת המים. את המאפיינים נחלק לארבעה: החלק הראשון יעסוק בגיאומטריה, בצורה ובמבנה רשת הניקוז של האגן; החלק השני יתאר את התכונות הפיסיות של השטח; החלק השלישי יתאר את היחידות המורפולוגיות המהוות את האגן והחלק הרביעי יבחן את השינויים מעשה ידי אדם, אשר "מולבשים" על פני השטח הטבעיים ומשנים חלק מן המאפיינים הקודמים.

2.1 מאפיינים מורפומטריים

תחת כותרת זו נכנסים מאפיינים של גודל, צורה, תבליט ורשת הניקוז של אגן ההיקוות. ביטוי כמותי של מאפיינים אלה, מספק חלק מן המידע הנחוץ להבנת תהליכי ההולכה של מים וסחף בתוך אגן היקוות נתון וכתפוקה ממנו. כמו כן, הוא משמש



תרשים 3: יחסי הגומלין בין ספיקות ושטחי אגני הניקוז של נהרות העולם

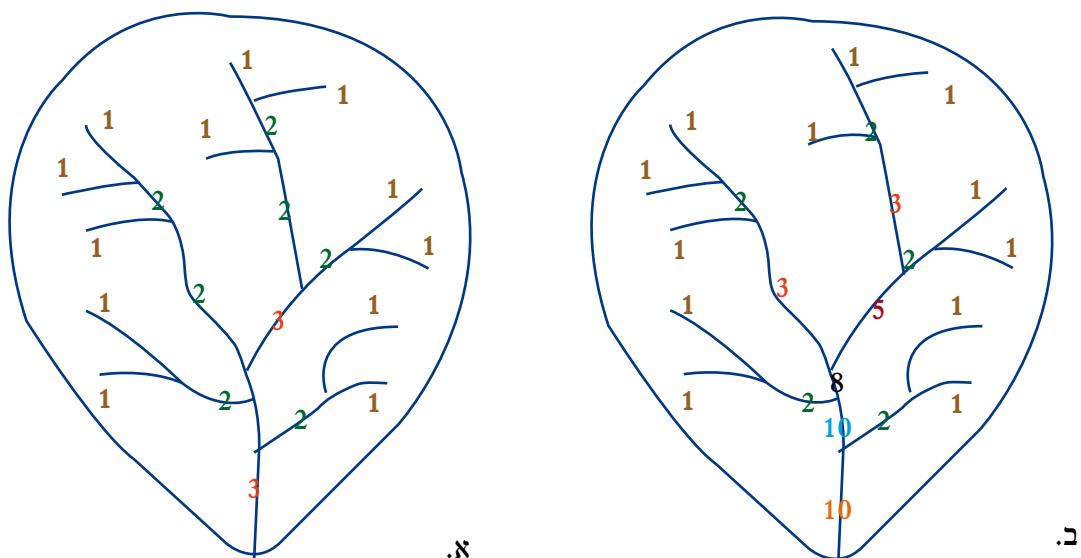
2.1.2 רשת הנחלים - רשת הניקוז של האגן

הדחיפה לביטוי כמותי של מאפייני אגן היקוות, ניתנה לקראת אמצע המאה ה-20 על ידי Horton (1945). שיטתו לסידור ההיררכי של רשת הנחלים, שוכללה לכדי השיטה הידועה כיום כשיטת הורטון-סטרלר לסדר נחלים - stream ordering (Strahler, 1957). השיטה מגדירה פרמטר חסר ממד הנקרא "סדר הנחל". על פי שיטה זו מוגדר נחל מסדר ראשון, כנחל אליו מתנקזים מי נגר עילי ממדרונות בלבד. נחל מסדר שני, הוא תוצאה של חיבור שני נחלים מסדר ראשון. חיבור של שני נחלים מסדר שני יניב נחל מסדר שלישי, וכן הלאה עד לנקודת ההיקוות. סדר הנחלים אינו משתנה אם לנחל מסדר נתון מתחבר נחל מסדר נמוך ממנו. השלב הראשון בניתוח מורפומטרי של אגני היקוות, הוא ספירת היובלים מכל הסדרים וקביעת הסדר של האגן כולו (תרשים 4א). ספירה כזו תלויה בקנה המידה של המפה בה משתמשים, וההגדרה של נחל מסדר ראשון אינה חד-ערכית, כפי שהיא מופיעה אצל Strahler (1957, p. 914): "Assuming that the channel-network map includes all intermittent and permanent flow lines located in clearly defined valleys, the smallest finger-tip tributaries are designated Order 1." סדר הנחלים הוא פונקציה ישירה של קנה המידה

של המפה ממנה מתקבלת רשת הנחלים. כיום, הגודל של תא ברשת ה-DEM הוא התחליף לקנה המידה של המפה, וההגדרות של נחל מסדר ראשון נקבעות באופן חד ערכי מתוך רשת ה-DEM של האגן באמצעות שיטות גרפיות, הבוחנות את יחסי שטח-שיפוע או את ההתפלגות המצטברת של שטחים. (Hancock and Evans, 2006).

עם השלמת הספירה, נבחן האופן בו משתנה מספר היובלים בסדר עם העלייה בסדר, הידוע כ"חוק מספר הנחלים של הורטון", וקביעת פרמטר הנקרא "יחס הסיעוף" (Bifurcation ratio). יחס הסיעוף מוגדר כמספר הנחלים בסדר נתון חלקי מספר הנחלים בסדר הגדול ממנו ב-1. מתברר כי מספרי הנחלים בכל סדר יוצרים סדרה גיאומטרית הפוכה עם הסדר, ומספר הסיעוף הוא קבוע הסדרה. מניתוח של מספר רב של נחלים, מסתבר כי יחס הסיעוף הוא פרמטר קבוע יחסית ואינו יכול לשמש כמדד להבדלים בין אגנים בסובבים שונים, אלא אם קיימים גורמים גיאולוגיים המכתיבים את רשת הניקוז (Strahler, 1957). כהמשך ל"חוק מספר הנחלים", נבחנו גם ההשתנות של אורכי הנחלים בכל סדר, שטחי האגנים ושיפועי הנחלים, ונמצא כי קיימת חוקיות בהשתנות פרמטרים אלה עם הסדר (תרשים 5).

לשיטת הורטון-סטרלר של סדר הנחלים שתי



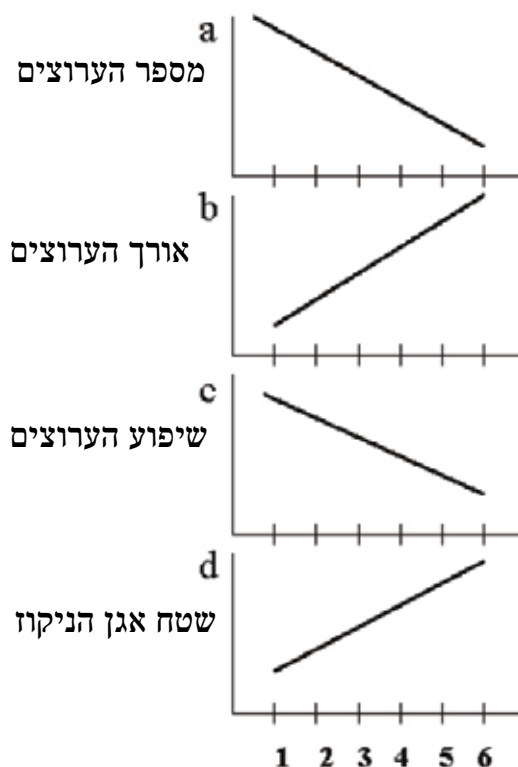
תרשים 4: סדר נחלים: א. על פי Horton-Strahler (1957) ב. על פי Shreve (1966)

עולה, סדרו של הערוץ המחובר הוא סכום הסדרים של הערוצים המתחברים. לכן למספרים של שרב מקובל לקרוא עוצמה או שיעור. ערוץ מסדר שני הוא חיבור של שני ערוצים מסדר ראשון, אולם הערוץ מסדר שני הופך לסדר שלישי כאשר נכנס אליו יובל מסדר ראשון והוא הופך לסדר חמישי כאשר נכנס אליו עוד ערוץ מסדר שני (תרשים 4ב). העוצמה של הסדר על פי שרב, מהווה ביטוי לגודלה האמיתי של רשת הניקוז ולגודלו של האגן. בתוכנת ה- ARC/INFO ניתן לקבל את סדר הנחלים על פי שתי השיטות. במודלים השונים שנבנים היום, תופסת שיטת שרב את מקום שיטת הורטון-סטרלר.

על פי החלוקה של אגן ניקוז לתתי-אגן בעלי סדרים שונים, מתקיים הכלל כי שטח האגן עולה בקשר של חזקה עם הסדר. אולם, בכל אגן היקוות קיימים שטחים המנוקזים ישירות אל האפיק הראשי. אלה הם שטחי מדרונות ללא ערוץ מוגדר עליהם. לכן, סכום שטחי תתי-האגן של הסדרים השונים אינו זהה לשטחו של האגן כולו. לשטחים המנוקזים ישירות לאפיק הראשי, ישנה חשיבות בחישובים של תפוקות הנגר מן האגן. אם אלה מדרונות עם כיסוי קרקע עבה או עם "סינרים" של קולוביום בבסיסם, תפוקות הנגר מהם זניחות בסופות הרגילות, ויש להתחשב בזאת בחישובי השטחים התורמים נגר.

קבלת רשת הניקוז והסדר (Horton-Strahler) או העוצמה (Shreve) של האגן, אפשרה את בחינת החוקיות הקיימת עבור אורכי הנחלים של אגן נתון. אחת הדרכים היא לבחון את האורכים הממוצעים של הנחלים בכל סדר. Schumm (1977) בדק את התפלגות האורכים של הנחלים לפי הסדר ומצא כי היא מוטה לימין. כלומר, אורכי הנחלים עולים עם הסדר. אם מצרפים את האורך הכולל של כל הנחלים מסדר נתון ובודקים את ההשתנות שלהם עם הסדר, מתקבלת מגמה הפוכה שנוסחתה היא $\sum L_R = aR^{-b}$. צירוף אורכי הנחלים מן הסדר הראשון ועד לאחרון לאגן נתון בצירוף השיפוע הממוצע של הנחלים לכל סדר, נותן את פרופיל האורך של אגן הניקוז (תרשים 6). ניתן לקבל גם פרמטר L_R - יחס האורך - length ratio - היחס בין האורך הממוצע של אפיקים בסדר כלשהו לבין האורך הממוצע של האפיקים בסדר הגבוה ממנו ב-1. מדידות אלה והחישובים השונים, ניתנים כיום לביצוע בקלות

מגבלות, כאשר משווים בין אגני ניקוז שונים: א. מסתבר כי יחס הסיעוף איננו פרמטר טוב לאגני היקוות גדולים בעלי סדר גבוה, באגנים אלה יחס הסיעוף עבור הנחלים מסדר ראשון-שני שונה מזה שעבור נחלים מסדר רביעי-חמישי. ב. סדר הנחל אינו מעיד על גודלו, אגני ניקוז בעלי אותו סדר יכולים להיות בעלי גודל שונה. Shreve (1966) פיתח שיטה אחרת לארגון רשת הניקוז - Magnitude. הגדרת ערוץ מסדר ראשון ומספרם זהה לפי שתי השיטות, אולם בעוד שאצל הורטון-סטרלר סדר הערוצים עולה רק כאשר יש חיבור של שני ערוצים מאותו סדר, אצל שרב הסדר הוא סכומי. כלומר, עם כל ערוץ שמתווסף - הסדר



תרשים 5: החוקיות בין מאפייני רשת הניקוז ואגן הניקוז לבין סדר הנחלים.

- עם העלייה בסדר הנחל, יורד מספר הערוצים בסדר. בסדר הגבוה ביותר יש רק ערוץ אחד.
- האורך הממוצע של הערוצים בסדר עולה עם הסדר.
- השיפוע הממוצע של הערוצים בסדר יורד עם הסדר.
- השטח הממוצע של אגנים עולה עם הסדר של האגן, השטח של האגן מן הסדר הגבוה ביותר הוא שטח כל אגן ההיקוות.

2.1.3 יחסי צורה

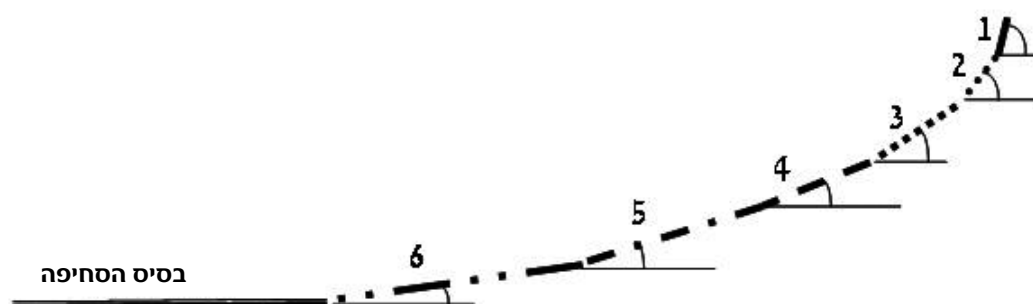
צורת האגן ניתנת לביטוי כמותי באמצעות שלשה פרמטרים: 1. האינדקס הפלנימטרי (Planimetric basin shape), B_s , שהוא היחס בין אורכו המקסימלי של אגן היקוות, B_l , לבין רוחבו המקסימלי, B_w . 2. אינדקס אורכיות האגן (Elongation ratio), Re , היחס בין קוטר עיגול ששטחו זהה לשטח האגן לבין אורכו של מסלול הזרימה הארוך ביותר מקו פרשת המים ועד לנקודת ההיקוות. 3. אינדקס עיגוליות האגן (Circularity ratio), R_c , שטח אגן ההיקוות מחולק בשטח של עיגול שהיקפו כהיקף האגן.

לצורתו של אגן הניקוז, השפעה רבה על צורת ההידרוגרף הנוצר מזרימות על פניו. בתנאים של סופה המכסה את כל האגן, מתקבל מאגן מוארך

רבה באמצעות תוכנות GIS השונות. הפרמטרים של אגני היקוות מתוארים בטבלה 1. המאפיין שקושר בין אורכי הנחלים לבין שטח אגן הניקוז, נקרא צפיפות הניקוז. היא מוגדרת כיחס בין סכום אורכי הנחלים באגן נתון לבין שטח האגן. באגנים טבעיים, צפיפות הניקוז מוכתבת בעיקר על ידי הליתולוגיה, והיא ביטוי למידת הקושי או הקלות בה מתרחשים תהליכי החתירה והסחיפה באגן. באגנים בהם ישנה התערבות האדם, יכולה צפיפות הניקוז להיות ביטוי למידת ההתערבות. למשל שטחים עירוניים המייצרים כמויות גדולות של נגר עילי, מנוקזים באמצעות מערכות להולכת מי נגר רבות יותר מאשר השטח הטבעי שלפני תהליך העיור, וצפיפות הניקוז בהם גדולה יותר (ניר, 1964).

טבלה 1: פרמטרים מורפומטריים של אגן היקוות:

המאפיין	סימן מוסכם	יחידות	הסבר
שטח	A	מ"ר, דונם, קמ"ר	טווח השטחים משתרע בין מ"ר אחדים למאות אלפי קמ"ר.
סדר	Ri	1	דרגה של אגן היקוות על פי סדר היררכי של יובלים באגן היקוות נתון i (על פי Strahler, 1957 או Shreve, 1966).
נחלים	Ni	1	מספר הנחלים בסדר נתון - i
אורך	L	ק"מ	אורך האפיק הראשי מנקודת ההיקוות ועד קו פרשת המים (היות והאפיק עצמו מסתיים לפני פרשת המים ממשיכים אותו עד לקו פרשת המים לאורך המדרון וזהו אורך האגן).
אורך ממוצע	L_R	ק"מ	אורך ממוצע של הנחלים בסדר R.
שיפוע	S	1	שיפועי האפיקים בנחלים של הסדרים השונים. ביחד עם פרמטר האורך יתקבל פרופיל האורך של הנחל.



תרשים 6: פרופיל אורך קעור של אגן היקוות, כצירוף של מאפיינים ממוצעים של הערוצים מסדר ראשון ועד לסדר של הנחל הראשי במפגש עם בסיס הסחיפה: שיפוע קטן והולך, אורך אפיקים וגדל והולך.

בנחל שילה. הספיקה בנחל הירקון המאוחד היתה כ- 700 מ"ק לשנייה.

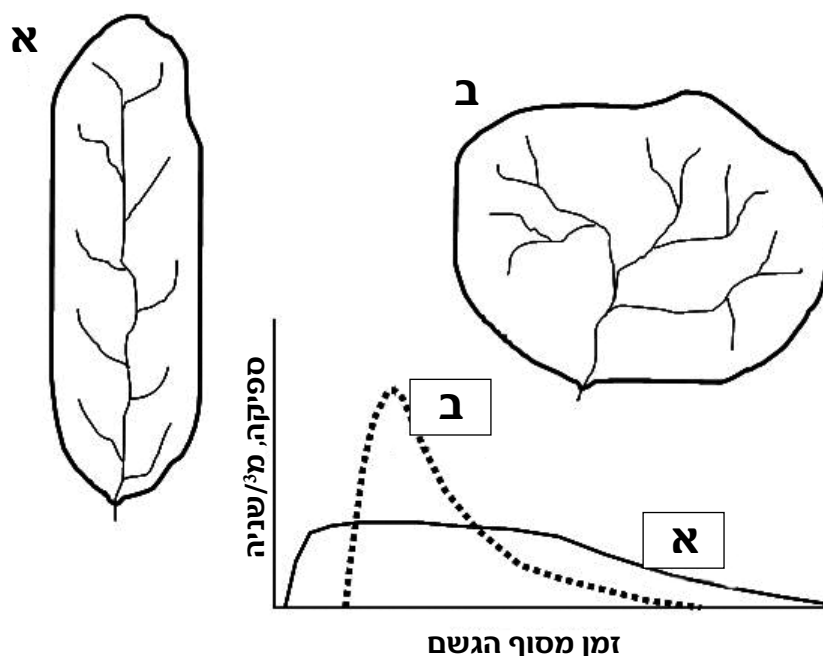
2.2 מאפיינים פיסיים

בכל אטלס פיסיו ובכל מאגר מידע גיאוגרפי, קיימות מפות נושאות לאזורים הכוללים בתוכם מספר רב של אגני היקוות. מפות אלה מספקות מידע על התנאים הפיסיים באגן ההיקוות, ולהם השלכות על התהליכים והתגובות של האגן לתשומות שהן המשקעים.

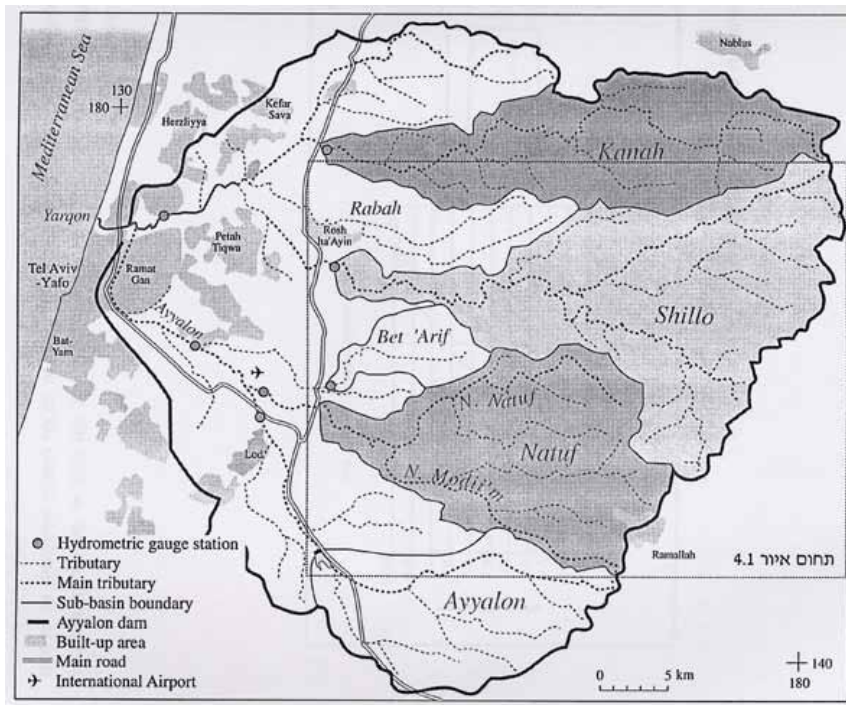
2.2.1 התבליט - העקום והאינטגרל ההיפסומטרי תבליט של אגן ניקוז או הפרשי הגובה בתוך האגן, הוא ביטוי לרמת הסחיפה - זו שהתרחשה לאורך ההיסטוריה הגיאולוגית, זו הנוכחית וכן העתידית, שכן הפרשי הגובה קובעים את רמות האנרגיה של המים הזורמים על פני השטח. ניתן לתאר את תבליט האגן, על ידי הפרש בין הנקודה הגבוהה ביותר בתחומו לבין הנקודה הנמוכה ביותר - המוצא של האגן. אולם ככל שעולה שטח האגן, כן גדלה השונות בתבליט במקומות שונים בתחומי האגן. ניתוח היפסומטרי הבודק את היחסים גובה-שטח לאגן ניקוז נתון, מהווה מדד אמין יותר לתבליט. הן הגובה והן השטח מבוטאים כאחוז מכלל הגובה

הידרוגרף מתון יחסית הנמשך זמן רב. לעומת זאת, אותה סופה על אגן בעל שטח ומאפייני פני שטח זהים, אך בעל צורה מעוגלת, תיצור הידרוגרף בעל שיא גבוה יותר הנמשך פרק זמן קצר (תרשים 7). צורת ההידרוגרף היא ביטוי לאופן בו מרוכזים מי נגר הגשמים מן השטח או במילים אחרות - ביטוי לתגובת האגן לגשם, ויש לה חשיבות בתכנון ובכנייה של מערכות הגנה מפני שיטפונות. באגנים בהם אין מדידות של גשם ונגר, מהווים מאפייני האגן מקור למידע למה ניתן לצפות מגשם כלשהו.

במקרים רבים צורתם העגולה של אגנים גדולים היא תוצאה של חיבור, לעתים די קרוב למוצא האגן, של מספר אגני משנה בעלי צורה מוארכת יותר. זרימות מאגנים אלה המגיעות בתזמון אחיד אל נקודת המפגש, יוצרות באגנים העגולים שיטפונות גדולים. דוגמה לכך ניתן לראות בשיטפון הגדול שהתרחש בנחל הירקון בינואר 1992. האגן בנוי מחמישה אגני משנה מוארכים: קנה, רבה, שילה, איילון שיוכליו הם בית עריף ונטוף. ביחד הם יוצרים אגן אחד בעל עיגוליות גבוהה (תרשים 8). בשיטפון הגדול של ינואר 1992, ספיקות השיא ביוכלים היו בין 102 מ"ק לשנייה בנחל קנה לבין 192 מ"ק לשנייה



תרשים 7: אגנים שווי גודל אך שונים בצורתם, מייצרים במוצא הידרוגרפים שונים כתוצאה מאותה סופת גשם על פניהם



תרשים 8: אגן ניקוז נחל הירקון (מתוך: אטינגר, 1996, איור 1.3)

מפה טופוגרפית היא הבסיס עליו נבנית רשת הניקוז של האגן. הדיוק והפירוט הם פונקציה ישירה של קנה המידה של המפה והרווח האנכי שבין קווי הגובה.

2.2.2.3 גיאולוגיה וקרקע

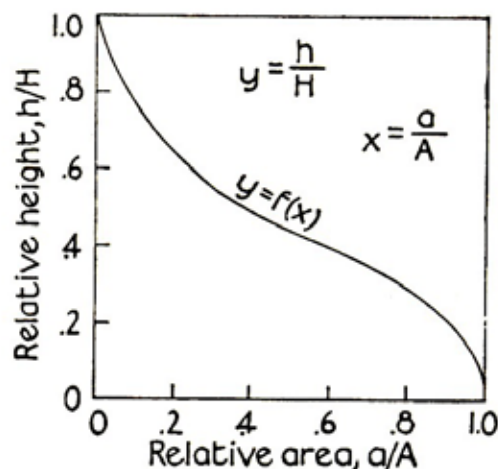
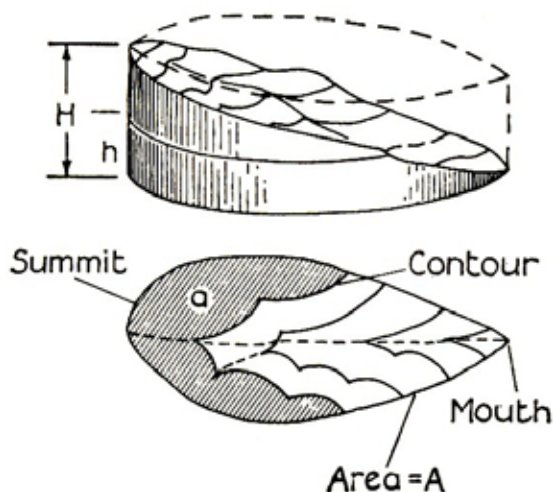
מפות גיאולוגיות מספקות מידע על סוגי המסלע החשוף באגן ועל קווי שבר הקיימים בו. מידת הפירוט תלויה בקנה המידה של המפה ובעיקר ברמת הפירוט של הסקרים הגיאולוגיים שנעשו באזור. למידע על סוגי המסלע באגן, חשיבות מכמה היבטים: 1. יחסי גשם-נגר; 2. תנועות בלית של פני המדרונות; 3. תכנון עירוני ואחר; 4. שטחי מילוי חוזר לאקוויפרים.

מידע שאינו מסופק על ידי מפות גיאולוגיות והוא נחוץ להשלמת התמונה בדיון בכל אחד מן ההיבטים לעיל, הוא מידת הבלייה והסידוק של הסלעים. סלעים בלויים הם יציבים פחות ומספקים חומר לתנועות המדרוניות - מפולות וגלישות. סלעים בלויים וסדוקים מייצרים הרבה פחות נגר עילי, אך גם בהם (ולא רק בקרקעות) יכולה להיות זרימה תת-משטחית (interflow), אשר תרומת המים ממנה לזרימה השיטפנית בנחלים מפגרת אחר זו של הנגר העל-קרקעי. בינוי עירוני

ומכלל השטח של האגן, בהתאמה (תרשים 9). התוצר הוא עקום, המבטא את השתנות הרום עם השטח ברווח אנכי הנקבע על ידי המנתח. השטח מתחת לעקום הוא האינטגרל ההיפסומטרי המסכם בערך מספרי אחד את נושא התבליט באגן ניקוז. על פי Strahler (1957), צורת העקום ההיפסומטרי היא ביטוי לשלב ההתפתחות המורפולוגית של האגן. עקום קמור, פירושו אגן בשלבי התפתחות ראשוניים כאשר חלק ניכר משטח האגן מצוי בגובה רב, כלומר עדיין לא עבר תהליכי סחיפה אלא הוא בעל פוטנציאל סחיפתי ניכר. עקום בעל צורה טיפוסית של S, מראה על בגרות רבה יותר של הנוף, שלב בו תהליכי הסחיפה שנמשכו זמן רב הנמיכו את פני השטח והקטינו את הפרשי הגובה באגן.

2.2.2 טופוגרפיה

בעוד שהעקום והאינטגרל ההיפסומטרי מספקים מידע מוכלל על התבליט של אגן היקוות נתון, מספקות מפות טופוגרפיות מידע מפורט על השתנות השיפועים בתחום האגן כולו. שטח המדרונות מהווה מעל 90% משטח אגן היקוות, ומפות טופוגרפיות מספקות מידע על פנות, אורך, שיפוע ומידת האחידות בשיפוע לאורך המדרונות.



תרשים 9: העקום ההיפסומטרי (על פי Strahler, 1957, כפי שמופיע אצל Leopold et al., 1964)

לקרקע מחוסר אנרגיה וחודר לתוכה בנקל. כמו כן, החידור לקרקע מואץ לאורכם של גזעי העצים והגבעולים של הצמחים החד שנתיים, אולם הגשם הנותר על גבי העלווה של הצמחים מתאדה. על פי גבירצמן (2002, עמוד 21), גם חלק גדול מהגשם החודר לקרקע מתאדה בסופו של דבר בדיות, ולטענתו הדבר נכון לגבי צמחיית יער, חורש ושטחים חקלאיים. באופן כללי ניתן לומר, כי כמות הנגר הנוצרת באזורים מכוסי צמחייה, קטנה מזו הנוצרת בשטחים חשופים. נוכחות הצומח מקטינה את מהירות זרימת הנגר העל־קרקעי ואת הספיקות המרכזות לאפיקים ובכך מקטינה גם את כושר הסחיפה. אולם כאשר מתייחסים לאירועים חריגים בהם עוצמות הגשם ועוביו גדולים, יש לקחת שטחים אלה בחשבון, שכן נגר עילי הגורם לסחיפת קרקע נוצר גם עליהם. בשטחים חקלאיים, בהם עיבוד הקרקע הפר את מרקמה הטבעי, גשמים חריגים יכולים לגרום לנגר וסחיפה רבים, בייחוד כאשר הגידול עדיין קטן ושטחי קרקע רבים חשופים. באזורי אקלים לח, שטחים מכוסי צומח מהווים אזורי אוגר באגן, מהם משתחררת באטיות זרימה תת־משטחית לעבר הנחלים.

ותעשייתי חייב להתחשב במידת החידור של פני השטח, הן עקב הקטנת שטחי המילוי החוזר והן עקב החשש מחדירת מזהמים לתוך האקוויפרים. לדוגמה, בסקר גיאולוגי שנעשה לאזור מודיעין, ניתנו אזהרות לגבי הקטנת המילוי החוזר והגברת הזיהום בשטחים שמסלעם משתייך לחבורת יהודה והוא חשוף או מכוסה בשכבת קרקע דקה (ארקין וכפרי, 1986).

סוגי הקרקעות בתחומי האגן ההיקוות נמצאים בקשר הדוק למסלע והמידע על אודותם חשוב בהיבטים הרשומים לעיל. בנוסף, קיים ההיבט של הצומח הטבעי והגידולים החקלאיים. מידע על אחוזי הכיסוי של שטח בסוגי קרקעות שונים, חיוני להבנת הפרוס המרחבי של חבורות הצומח השונות, לתכנון הגידולים החקלאיים ועוד. מיפוי מפורט של הקרקעות בתחומי אגן היקוות, מאפשר מידע על השטחים החשופים מקרקע או שבהם הכיסוי הקרקעי אינו רציף והיא נמצאת בתוך כיסי סלע. מידע אחר בעל חשיבות ליחסי גשם-נגר, הוא התפלגות עובי הקרקעות על פני מדרונות, נושא שיידון בפרק על היחידות המורפולוגיות באגן ההיקוות.

2.2.4 צומח

הדיון בצומח בתחומי אגן היקוות מתחלק לשניים: הצומח הטבעי והגידול החקלאי. חשיבותו של הצומח בהיותו שכבת המגן בין התשומות האטמוספיריות - המשקעים לבין הקרקע, ככזה הוא מונע את ההשפעה שיש לעוצמת הגשם על תהליכי יצירת הנגר. בנוכחות צומח, הגשם מגיע

2.2.5 מאפייני האקלים - התשומות לאגן ההיקוות המשקעים מהווים את התשומה למערכת אגן ההיקוות, ולכן ישנה חשיבות למידע מדויק ועדכני על הפרוס המרחבי של הגשם ותכונותיו: מיקום סופת הגשם באגן, תנועתה במרחב האגן, פילוג העוצמות, כמויות הגשם. כל אלה חיוניים לקבלת

סוג הקרקע ויחסי חול-סילט-חרסית, עובי הקרקע לאורך המדרון, התפתחות שרשרת הקרקעות, סוג המסלע ומידת הבלייה והסידוק, יחסי סלע קרקע/בלית/קולוביום על פני המדרון, סוג ואחוז הכיסוי הצמחי.

עמקים - הנהר ופשט הנהר

עמקי נהרות הם אזורים רחבים בתוך אגני היקוות בעלי שיפועים מתונים, המכוסים בקרקעות אלוביאליות עבות שהטופוגרפיה הנוחה, הקרקע הפורייה והקרבה למים הביאו את האדם להתיישב בהם. השינויים בשימושי הקרקע ובעיקר כינוי, יצרו אזורים בלתי חדירים ולכן יוצרי נגר לאורך אזור ההולכה של מים וסחף.

מניפות סחף ודלתאות

אלה הן יחידות מורפולוגיות, המצויות במוצא אגני היקוות בעלות שיפועים מתונים מאוד. כשמדובר בדלתאות, לרוב הכוונה לאלה של נהרות גדולים הנבנות לתוך הים במשך עשרות ומאות אלפי שנים על ידי תפוקת הסחף של האגן. שינוי במשטר ההולכה של הסחף לאורך האגן, מביאה לשינוי מצטבר בדלתא או במניפה. הדוגמה הקרובה לנו, היא הדלתא של הנילוס. בנייתה של הדלתא נעצרה מאז הקמתו של סכר אסואן, אשר אוגר את החול המוסע על ידי הנילוס. לעומת השינוי בתחומי אגן ההיקוות במערכת ההולכה של הסחף, התהליכים מכיוון הים, כלומר הגלים, ממשיכים להגיע אל החוף ולכרסם בדלתא. פני השטח של הדלתאות מצויים מעט מעל מפלס מי הים, ולכן אלה אזורים המועדים ביותר לתנודות בגובה הימים. התחזית האקלימית של עלייה בטמפרטורות העולם ובעקבותיה עלייה במפלס הימים, היא סכנה ממשית לאזורים אלה. גם למניפות הסחף מורפולוגיה של מוצא אגן, אולם בשונה מדלתאות הן נוצרות בתחום יבשתי והתנאי להיווצרותן הוא יציאה של הנהר מתוך אזור הררי התוחם את האפיק לשטח פתוח, בו יכולה הזרימה לנדוד לכל כיוון בטווח של 180° . לכן ניתן למצוא מניפות סחף בתוך עמקים רחבים, אליהם נשפכים יובלים המסיעים כמויות סחף גדולות, ולא דווקא בקרבת בסיס הסחיפה הרגינולי. מניפות סחף בשונה מדלתאות, בנויות מחומר סחף בעל טווח גדלים רחב, בלתי מלוכד ופורוזי. לכן פני מניפה

התפוקות מתוך המערכת בהתאם לתכונותיה. נושא המשקעים נידון בפרוט על ידי גולדרייך (2008).

2.3 מאפיינים מורפולוגיים

אגן היקוות הנו יחידה תלת ממדית הבנויה ממספר יחידות מורפולוגיות. רוב שטחו (מעל 90%) בנוי ממדרונות המנוקזים על ידי נחלים, המהווים את רשת הניקוז הטבעית של השטח. השאר הם עמקי הנהרות בהם פשטי נהר פעילים, מפלסים אלוביאליים קדומים הנחתרים על ידי זרימות של האקלים הנוכחי, טרסות נחל ושטחים חסרי ניקוז מוגדר. במוצא האגן נמצא את שטחי הדלתאות או מניפות הסחף. המורפולוגיה של אגן היקוות, כפי שבאה לידי ביטוי בפסיפס היחידות המורפולוגיות הבונות אותו, מכתובה את יצירת הנגר על פניהן ואת הרציפות או אי-הרציפות בהולכת הנגר אל ובתוך האפיקים.

2.3.1 מאפייני היחידות המורפולוגיות בתחומי האגן

מדרונות

המדרונות הם ספקי הנגר והסחף למערכת הנחלים באגן. בתרומת הסחף המדרוני לנחלים, עוסק המאמר על הסחף הנחלי (לקח וחז', 2008). כאן נתרכז בתרומת הנגר המדרוני בלבד. הכמויות נקבעות על פי יחסי הגומלין בין תכונות הגשם לבין תכונות המדרון. לעתים רוב התרומה המדרונית מקורה בזרימה התת-משטחית ולעתים מנגר עילי הנוצר על גבי המדרון. אורך ושיפוע המדרון הם לכאורה שתי תכונות בעלות חשיבות רבה ביצירת נגר מדרוני, אולם מדרונות ארוכים הם גם לרוב מדרונות שבמורדותיהם ישנה הצטברות של חומר בלית שהוסע לאורכו. נגר הנוצר בחלקים העיליים של המדרון, מגיע אל סינרי הבליה או הקולוביום שלמרגלות המדרון ומחלחל בהם ואינו מגיע כלל אל הנחל שלמרגלות המדרון. מצב זה הוא דוגמה לאי הרציפות בתהליכי ההולכה של הנגר. בחישוב השטחים התורמים נגר באגן ההיקוות, יש לפיכך להתחשב במורפולוגיה של המדרונות באגן, ולא לקחת את שטחי המדרונות כתורמים נגר בצורה זהה. הפרמטרים שיש לבדוק לגבי המדרונות של אגן היקוות הם: אורך, שיפוע, מידת האחידות בשיפוע לאורך המדרון, קיומן של טרסות חקלאיות או טבעיות (כתוצאה מחילופי מסלע), סוג הכיסוי:

כפי שמפורט על ידי המאפיינים הפיסיים של האגן.

ד. שטח חקלאי - שטחים מעובדים אשר עוברים שינויים במהלך השנה: חריש וזריעה, צמיחת הגידולים, איסוף תוצרת ושוב חריש. בשטחים אלה קצבי החידור וכן סחיפת הקרקע, משתנים לאורך העונה. שטחים חקלאיים "יציבים" יחסית מבחינת יחסי גשם נגר, הם שטחי מטעים.

2. חלוקה לפי שינויים הנעשים לאורך ובתוך מערכת הנחלים של האגן.

בחלוקה זו ההתייחסות לשטח אותו תופס השינוי היא מזערית, אולם השינוי משנה את קצבי ההולכה לאורך הנחלים. החוקיות הקיימת ברשתות נחלים טבעיות (כפי שפורט לעיל), מאפשרת קבלת מידע כמותי ובלתי תלוי על התנאים הטבעיים של אגן היקוות, מהם נגזרים תהליכי ההולכה של מים וסחף לאורך האגן עד למוצא. שינויים מעשה ידי אדם משנים את החוקיות, ויוצרים פרמטרים השונים (ראה לעיל) לעתים בסדרי גודל מן המצב הטבעי.

את השפעת האדם על רשת הניקוז ניתן לחלק לשלושה חלקים:

א. יצירת שטחי מאגרים וניקוזים - המאגרים נבנים לענות על צרכיו של האדם, לרוב לצרכי השקיה או החדרה למי תהום (כמו הסכר על נחל שיקמה) על ידי תפיסת מי שיטפונות, אך גם כאמצעי להגנה מפני שיטפונות (הסכר על נחל אשלים, שבפתחו נמצאים מפעלי ים המלח). המאגרים יוצרים אזורי אוגר מלאכותיים ומקטינים בכך את כמויות המים הזורמות בנחלים. ההשפעה על רשת הניקוז באה לידי ביטוי בהתחזרות באפיקים שבמורד המאגרים, כתוצאה מכך שמים המשתחררים ממאגר הם נטולי סחף ונקראים לעתים "מים רעבים". הקטנת כמויות המים באפיקים שבמורד המאגרים, מביאה להקטנה בשטח חתך הזרימה וחדירה של צמחיית גדות לתוך האפיק שהיה פעיל בעבר (ראה נחל איילון, במורד מאגר משמר איילון). חשוב לציין, שפריצה של מאגר עלולה לגרום לשיטפון ולנזק גדולים הרבה יותר מאשר במצב של טרום המאגר. ניקוז של שטחים והבאת מים לתוך מערכת הנחלים מעבר לקיבול הטבעי שלה (ראה לקח וחור, 2008), עלול לגרום להצפות.

פעילה אינם שטחים המייצרים נגר, אלא הם אזורי צבירה של התפוקות מאגן ההיקוות.

2.4 מאפיינים אנתרופוגניים

משחר ההיסטוריה האנושית, משנה האדם את פני השטח הטבעיים. בניו, עיבוד חקלאי, יצירת מדרגות חקלאיות בשטחים הרריים, סיכור ואיגום מים ועוד. שינויים אלה גורמים לשינוי של קצבי החידור וכתוצאה מכך לשינוי ביחסי גשם-נגר בשטחים הנדונים, לאי רציפות בתהליכי ההולכה הטבעיים של מים וסחף לאורך האגן. זאת נוסף לאי הרציפויות הקיימות בשטח באופן טבעי. לפיכך, הבנת התהליכים באגן, מחייבת לימוד המאפיינים האנתרופוגניים בשטח הנדון.

נחלק את המאפיינים האנתרופוגניים לשני חלקים:

1. חלוקה לפי סוג הכיסוי של פני השטח, קרי שימושי קרקע. חלוקה זו מאפשרת חישוב של האחוז היחסי שתופס כל סוג כיסוי מתוך כל שטח האגן:

א. שטח מבונה בעל שימושים שונים - אלה הם השטחים העירוניים הכוללים בתים, מדרכות, כבישים ועוד. נושא קנה המידה חשוב גם כאן. בהגדרת תחום עירוני, ניתן לכלול את כל השטח שתופסת העיר, כולל השטחים החדירים שהם השטחים הפתוחים המצויים בה גינות פארקים וכו' ואת השטחים הבנויים הבלתי חדירים. אולם אם מעוניינים בפירוט של העיר עצמה, ולחלקה ליחידות בהתאם לתפוקת הנגר מהם, אזי יש לבנות חלוקה לפי היחידות העירוניות השונות, ואף להפריד את שטחי הכבישים משטחי הבתים. בהקשר זה חשוב לציין את נושא הכבישים הבין-עירוניים, המהווים יחידות שטח אורכיות החוצות אגני היקוות, אך הן מייצרות נגר המנוקז אל תעלות הניקוז של הכבישים ומתחברות אל מערכות הנחלים של אגנים שונים בהתאם לשיפועים.

ב. שטחים בפיתוח - אלה שטחים אשר בהם מתרחשים שינויים מהירים.

ג. שטח טבעי - החלקים בתחומי אגן הניקוז אשר נותרו טבעיים ללא התערבות של האדם. שטחים אלה יכולים לכלול אזורים של סלע חשוף, קרקע מכוסה בצומח טבעי או קרקע חשופה,

3. השימוש ב־GIS בניתוח אגני היקוות

המרכיב של התבליט, הנו אחד המאפיינים החשובים של כל אגן היקוות וקובע במידה רבה את שטף הסחף, המים ואתם לעתים גם המזהמים לאורכו של האגן. ניתוח המבנה הטופוגרפי של אגני היקוות, נעשה כיום באמצעות מודלים טופוגרפיים דיגיטליים. המכון הגיאולוגי, לדוגמה, הכין מודל טופוגרפי דיגיטלי לתחום ההתנקזות של ים המלח, ולכל האגנים הנשפכים לירדן בין הכנרת לבין ים המלח. על סמך מודל זה הוכנו מפות טופוגרפיות, מפות שיפועים, הפרש הגבהים בין קו פרשת המים למוצא, ואורך הנחל הראשי (קלבו ובן-צבי, 2005). השימוש במערכות מידע גיאוגרפיות, הוא היום תחליף למפות של פעם. היתרונות של השיטה ברורים ומאפשרים יצירת שכבות עם כל המידע המורפומטרי על אגן ההיקוות מתוך ה-DEM של האגן. השימוש ברדאר לקבלת מידע על סופות הגשם: מיקומן במרחב האגן, כיווני התקדמותן ופילוג העוצמות בתוך הסופה, מאפשר חישוב מדויק של השטחים התורמים. ביחד עם המידע של תכונות השטח מתקבלת תחזית הקרובה למציאות, ומכאן האפשרות ליצירת תחזיות ברמת אמינות גבוהה.

4. אגן היקוות כמערכת - תשומות ותפוקות

כיצד פועלת המערכת המורכבת שנקראת אגן היקוות או אגן ניקוז? Black (1966) ראה את פעולת המערכת באמצעות חמש פונקציות: שלש מהן פונקציות הידרולוגיות: 1. איסוף, ריכוז המים מגשם, שלג או מיחידות אוגר; 2. אגירה של מים במקומות שונים בתחומי האגן (למשל הזרימה התת-קרקעית - interflow) בכמויות משתנות ולאורך פרקי זמן משתנים; 3. תפוקה של המים כנגר הבאה לידי ביטוי בספיקה. הוא טען כי המונחים לתיאור של אגן הניקוז או ההיקוות באנגלית catchment ו־watershed, מורים על הפונקציה הראשונה (catching) והשלישית (shedding), בהתאמה. אם נבחן את השמות שניתנו בעברית ניתן לראות מצב דומה: אגן היקוות מורה על תהליכים של יצירת נגר או היקוותו משטח נתון, בעוד אגן ניקוז מורה על הולכת הנגר או ניקוזו מן השטח. שתי הפונקציות הנוספות של Black (1996) קשורות לתפקוד האקולוגי של האגן:

ב. הסדרה - עצם השימוש במילה שמקורה "סדר", פירושו שהסדר הטבעי של רשת הניקוז "דורש" שינוי. לרוב הסדרה מלווה ביישור תוואי הנחלים, יצירת חתך זרימה השונה מזה הטבעי, לרוב מלבני או טרפזי עם גדות המוגנות על ידי גביונים או אמצעים אחרים המקבעים אותן, לעתים הופכים את הערוץ הטבעי לתעלת בטון בייחוד כאשר תוואי הנחל עובר בתוך שטח עירוני. לדוגמה אפיקו של נחל געתון בנהריה, או קטע של נחל ענבה בעיר מודיעין, העובר בתוך תעלת ניקוז תת קרקעית עד ליציאתו מתחומי העיר.

ג. ניצול התשתית הנחלית - כריית חומר ואדי - תהליכי המיון של הסחף לאורכם של נחלים (ראה לקח וחור, 2008), גורמים לכך שאפיקים הם מקור טוב לחומר ואדי בגדלים הדרושים. הוצאת חומר מתוך התשתית, משנה את מאזן הולכת הסחף לאורך הנחל וגם את ההולכה של המים לאורך רשת הניקוז. באפיקו של נחל רודד, למשל, מתבצעת שנים כריית חומר ואדי והתוצאה היא בורות, לעתים של עשרות מטרים, בתוך האפיק. אגן הניקוז של נחל רודד אינו מסוגל, במשטר הזרימה של היום, למלא את הבורות הללו.

המאפיינים האנתרופוגניים הם בני שינוי ותלויים במערכות של קבלת החלטות על ידי קובעי מדיניות. למשל, הכרזה על שטח כשמורת טבע, פירושו השארת השטח כפי שהוא ללא תהליכים של בינוי או פיתוח כלשהו. בנייה של עיר חדשה או סלילה של כבישים, משנים את שימושי הקרקע בתחומי אגן הניקוז, ואתם את יחסי גשם-נגר. הבנתם של התהליכים בתוך אגן הניקוז כתוצאה משינויים במאפיינים השונים שלו, הם תנאי הכרחי לתכנון מיטבי בו לא יהיו הצפות בתנאים הקיימים, וכן יאפשרו תחזיות טובות של תגובת האגן לשינויים בכמויות ובעוצמת המשקעים. שימוש בפרמטרים מורפומטריים, כגון היחס בין צפיפות הניקוז הנוצרת בשטחים עירוניים לבין זו שהייתה בשטח לפני העיור, יכול להוות מדד לכמויות המים המופקות ממתחם עירוני מסופה נתונה או חזויה. לפיכך, לקביעה מדויקת של יובלים מסדר ראשון חשיבות רבה, בייחוד כאשר פעילות האדם בשטחים הטבעיים, עלולה להביא ליצירת ערוצים במקום בו לא היו לפני התערבותו (Simon and Rinaldi, 2006).

בתפוקות כמו הגישה המערכתית. התפוקות הן של סחף והן של מים, נידונות באסופה זו במאמרים נפרדים (בן־צבי, 2008; לקח וחור, 2008). במסגרת מאמר זה נידונות התכונות השונות של אגן הניקוז, המכתיבות את התהליכים יוצרי התפוקות מתוכו ואת עוצמתם וכן את רציפות ההולכה של תפוקות אלה לאורכה של המערכת הנחלת ובדרך אליה.

כדוגמא עד כמה משפיעות תכונות אגן הניקוז על יחסי תשומה־תפוקה ועל מידת רציפות ההולכה של המים והסחף לאורכה של מערכת אגן הניקוז, ניתן לראות בתגובתם לגשם של שני שדות חקלאיים שעברו חריש שונה. השדה הראשון נמצא בין העיר מודיעין לבין מכבים, ונחרש בצורת תלמים מוארכים. השקעים בין התלמים הפכו ל"אפיקוני זרימה", המוליכים מים וסחף קרקע אל מחוץ לשדה (תרשים 10א). השדה השני מצוי באזור ביתרונות רוחמה, ונחרש בצורה של גומיות. השקערוריות שנוצרו בקרקע הגדילו את האוגר של השטח, יצרו אי רציפות בזרימה ובכך הגדילו את החידור ומנעו סחיפת קרקע מן השדה (תרשים 10ב). אמנם הדוגמה הזו עוסקת בשדות חקלאיים והשטח הנידון הומוגני וקטן, אך ההתייחסות לאגן ניקוז כאל מערכת שתגובתה לתשומות של משקעים מוכתבת על ידי תכונותיה, נכונה לכל קנה מידה של אגן ניקוז. כמות המידע המתקבלת על תכונותיהם של אגני ניקוז והעיבוד של מידע זה, מתאפשר היום בנקל הודות ליכולות הטכנולוגיות הקיימות, כמו שימוש במערכות מידע גיאוגרפיות וחישה מרחוק. מידע זה מאפשר חיזוי טוב יותר גם בתנאים של מיעוט נתונים מדודים על תפוקות מאגני הניקוז.

מראי מקומות

אטינגר, ח' (1966). ניתוח מרחבי של סופה ושיטפון קיצוניים באגן הניקוז של איילון־ירקון. עבודת גמר לתואר M.Sc., האוניברסיטה העברית בירושלים.
ארקין, י'; כפרי, א' (1986). סקר גיאולוגי וגיאוטכני קדם תכנון - העיר מודיעין ומיפוי הידרוגיאולוגי. דו"ח SI/49/86, המכון הגיאולוגי, ירושלים.
בן־צבי, א' (2008). הידרולוגיה. בתוך: נחלים וניקוז - תהליכים, הנדסה ותכן (ע' א' בן־צבי). רשות ניקוז שקמה-בשור והמכללה

1. האגן מספק אזורים ומסלולים בהם ולאורכם מתרחשות ריאקציות כימיות; 2. האגן מספק אזורי מחייה עבור החי והצומח. במאמר זה נעסוק רק בשלוש הפונקציות ההידרולוגיות: האיסוף, האגירה והתפוקה, ונראה את מקומן במסגרת הגישה המערכתית לאגן הניקוז.

ראשית נבחן כיצד פועלת התשומה למערכת. התשומות: לרוב הכוונה למשקעים אם כי בטיפול מעמיק יותר במערכת האגן, יש צורך לכלול כאן גם את תשומות האבק והמזהמים המגיעים לרוב עם המשקעים. התשומה למערכת אגן הניקוז היא גורם המוכתב על ידי האקלים האזורי, אם כי ישנם שינויים מקומיים בתשומה הנקבעים על ידי תכונות המערכת עצמה. למשל: עיר המייצרת אי חום מעליה או תבליט חריף המשנה את שדה הזרימה של הרוח ואתו את מסלולי טיפות הגשם. האקלים מכתיב את גודלם של תאי הגשם, את כיווני הגעתם ותדירות הופעתם, את מידת הכיסוי המרחבי של האגן וההשתנות בכיסוי לאורך זמן, את סוג המשקעים ואת התכונות האופייניות השכיחות, וכן אירועים חריגים בעוצמתם וכמותם ותקופות החזרה שלהם. האינטראקציה בין התשומות לבין פני השטח בעלי התכונות השונות והרציפות ההידרולוגית המוכתבת על ידי המורפולוגיה, מביאות ליצירה של הנגר העילי וריכוזו באפיקים. Black (1996) מכליל את כל הנאמר כאן, תחת הפונקציה של יצירת הנגר.

פונקציה האגירה קשורה קשר הדוק למאפיינים השונים של פני השטח שפורטו לעיל. חוסר הידע הכמותי לגבי מרכיבים שונים של אוגר באגן, אינו מאפשר לתת ערך מספרי לכמות האגורה בשטח. במקרים רבים אנו לומדים על יחידות האוגר, מתוך ההשוואה בין התשומות לבין התפוקות. איננו יודעים בוודאות כי תהליכי הדיות אכן גורמים להחזר מלא לאטמוספירה של הגשם היורד על פני השטח מכוסה הצמחייה בישראל, אולם ישנם מחקרים המראים על תפישה שונה של גשם על ידי עצים בעלי עלווה שונה. ידוע כי העצים מרכזים מים מענפיהם וזרימה לאורך גזע העץ יוצרת נקודתית ריכוז רב יותר של גשם המחלחל לקרקע. האם כולו נתפס על ידי הצומח ועובר דיות? האם לא ייתכן שחלק ממנו מחלחל לעומק לאורכם של סדקים בסלע? על כך אין תשובה.

פונקציה התפוקה של Black (1996), עוסקת



א. שדה חקלאי בין מודיעין למכבים



ב. שדה קיבוץ רוחמה

תרשים 10: יחסי גשם-נגר בשדות חקלאיים בעיבוד קרקע שונה

- 83: 349–374.
- Black, P.E. (1996). **Watershed Hydrology**. State University of New York, College of Environmental Science and Forestry, Syracuse, N.Y.
- Hancock, G. R.; Evans, K. G. (2006). Channel head location and characteristics using digital elevation models. **Earth Surf. Process. Landforms**, **31**: 809–824.
- Horton, R.E. (1945). Erosional developments of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bull. Geological Society of America**, **56**: 275–370.
- Leopold, L.B.; Wolman, M.G.; Miller, J.P. (1964). **Fluvial Processes in Geomorphology**. Freeman and Company.
- Schumm, S.A. (1977). **The Fluvial System**. Wiley & Sons.
- Sharon, D. (1970). Areal patterns of rainfall in a small watershed as affected by wind and other meteorological conditions. **Intern. Assoc. Hydrol. Sciences, Publ.** **96**: 3–11.
- Shreve, R.L. (1966). Statistical law of stream numbers. **J. Geology**, **74**: 17–37.
- Simon A.; Rinaldi, M. (2006). Disturbance, stream incision, and channel evolution: The roles of excess transport capacity and boundary materials in controlling channel response. **Geomorphology**, **79**: 361–383.
- Strahler, A.N. (1957) Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transactions, American Geophysical Union**, **38**: 913–920.
- האקדמית להנדסה סמי שמעון, עומר: 49–70. גבירצמן, ח' (2002). משאבי המים בישראל, פרקים בהידרולוגיה ובמדעי הסביבה. יד יצחק בן-צבי, ירושלים.
- גולדרייך, י' (2008). מטאורולוגיה. בתוך: נחלים וניקוז – תהליכים, הנדסה ותכנון (ע' א' בן-צבי). רשות ניקוז שקמה-בשור והמכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון, עומר: 9–26.
- לקח, י'; אלכסנדרוב, י'; לרון, י' (2008). הסחף הנחלי. בתוך: נחלים וניקוז – תהליכים, הנדסה ותכנון (ע' א' בן-צבי). רשות ניקוז שקמה-בשור והמכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון, עומר: 99–130.
- ניר, ד' (1964). עיונים במורפולוגיה של נחל שיזפים. ידיעות בחקירת ארץ ישראל ועתיקותיה, 28: 27–44.
- קלבו, ר'; בן-צבי, א' (2005). ניתוח מרחבי של אגן היקוות של הירדן התחתון והערכת נפחי הזרימה העל-קרקעית ממנו אל ים המלח. דו"ח GSI/17/2005, המכון הגיאולוגי, ירושלים.
- שטובר-זיסו, נ'; גרינבאום, נ'; ענבר, מ'; פלכסר, ע' (2005). ניתוח מורפומטרי של חזית רכס הרי נפתלי. אופקים בגיאוגרפיה, 64–65: 132–152.
- Arazi, A.; Sharon, D.; Khain, A.; Mahrer, Y. (1997). The wind field and rainfall distribution induced within a small valley: Field observations and 2–D numerical modeling. **Boundary Layer Meteorology**,

גיאומורפולוגיה נהרית

משה ענבר

פרופסור אמריטוס, החוג לגיאוגרפיה, אוניברסיטת חיפה.

1. הגדרות

גיאומורפולוגיה היא המדע העוסק בפני כדור הארץ, ובהגדרה מדויקת יותר: תיאור של צורות הנוף השונות והתהליכים המשפיעים על התפתחותם. "למרות שגיאומורפולוגיה זה רק אחד הענפים מגוף המדע הרחב, יש לו ערך אינטלקטואלי ומעשי כאחד. גידול האוכלוסייה והגברת הלחץ על משאבי הטבע והתחרות על המים, דלקים, יערות, שטחים פתוחים ואיכות הסביבה, תגרום לדרישה ליותר ידע, מחקר והבנת הגורמים והתהליכים הגיאומורפולוגיים. חשיבותם לחיי היום יום ולמדע יתגברו" (Leopold, 2004).

במדע קיימים מקצועות חופפים לגיאומורפולוגיה, אך ניתן להבחין בשני עקרונות המאפיינים אותה: א. קנה המידה ו- ב. הגישה הבינתחומית (תרשים 1).

הגיאומורפולוגיה מתחלקת למספר תחומי משנה - נהרית או פלוביומורפולוגיה: החוקרת את התהליכים הקשורים למערכת הניקוז, לאפיקים ולהסעת מים בטענות. תהליכים אלה הם הגורם הראשי בעיצוב פני הנוף בכל חלקי הארץ, מהתחום הצחיח ביותר עד לאזורים ההרריים הגשומים. מדרונית: עיצוב המדרונות ותופעות הגלישה בהם; בקניון הירדן ולאורך הבקע יש גלישות פעילות רבות, אך הן קיימות גם באזורים אחרים בארץ. חופית: מפגש ים-יבשה הוא האזור הפעיל ביותר על פני כדור הארץ, אך מצטמצם לאזור הצר של עשרות מטרים של החוף; אזור רגיש ביותר, ובארץ בעל חשיבות בגלל ריכוז האוכלוסייה הגבוה בקרבתו. אאולית: חוקרת את הנופים והתהליכים שבהם הרוח היא הגורם השליט; בארץ הם מופיעים בעיקר בקרבת הים (אזורי דיונות) ובנגב. קארסט: נופים שנוצרו בתהליכי המסה; קיימים אזורי קארסט נרחבים בהרי הגליל, שומרון ויהודה וגם בהר סדום עם הקארסט המיוחד במסלע המלח. קרחונית: הקרח הוא הגורם בעל העוצמה הגדולה

ביותר בטבע ויוצר נופים מיוחדים. לא קיימים נופים קרחוניים בארץ.

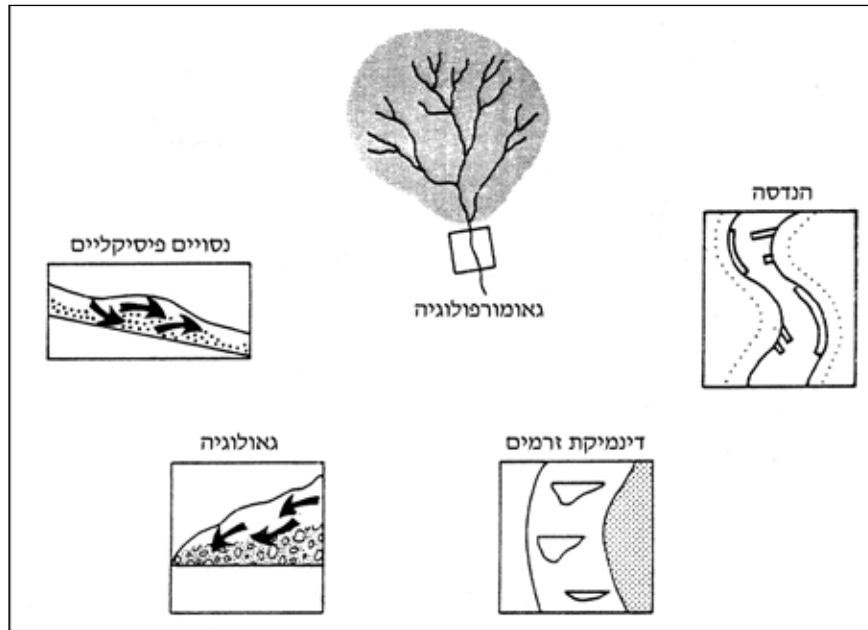
2. גיאומורפולוגיה נהרית

ניתן להתייחס לנחלים כפסלים המעוצבים על ידי עצמם, היות ובמשך הזמן תהליכי הזרימה מכתיבים את המורפולוגיה של האפיק, המתאימה לאירועי הגאות השכיחים הפוקדים אותו. גיאומורפולוגיה נהרית חוקרת את מקורות הטענות (סדימנטים), הסעתם והשקעתם במערכת הנהר בפסקי זמן קצרים, בינוניים או ארוכי טווח (Sear and Newson, 1994).

הנחלים והאזור הצמוד להם מציינים צורות נוף מגוונות. הגיאומורפולוגיה הנהרית מהווה את הענף המדעי המנסה למצוא סדר סיסטמטי בצורות האפיק והנוף השונות ולהבין את התהליכים האחראים לעיצובם ולהתפתחותם. היא מתמקדת באגן ההיקוות ובאפיקי הנחלים, ומכאן נגזר קנה המידה המרחבי והעתיד. היא נבדלת מהגיאולוגיה, העוסקת בתקופות ארוכות יותר וממקצועות הנדסה שונים, בהם מתמקדים בהיבטים מצומצמים יותר. בתרשים 1, מוצגים קני המידה השונים של המקצועות הללו.

3. האפיק - מורפולוגיה ותהליכים

היחידה הגיאומורפית הבסיסית התורמת מים וסדימנטים למערכת הנהרית, היא אגן הניקוז (ראה לקח, 2008). ספיקת המים והטענות של הנהר, הם הגורמים העיקריים המשפיעים על המורפולוגיה או תבנית האפיק. זרימת המים גורמת לפעילות סחיפתית המביאה להתהוות אפיק. האפיקים בדרך כלל צרים במעלה הנחל ורחבים בקרבת שפכו. באזור העליון יש בעיקר הסרה של פני היבשת ובחתונן חלה השקעה של טענות הסחיפה. ממדי האפיק קשורים בעצמת הסחיפה וביכולת הנהר להרחיב ולהעמיק את אפיקו תוך כדי תהליך



תרשים 1: קני המידה של הגיאומורפולוגיה והמקצועות השכנים לה

באפיק. אך צדודית-איזון כזו אינה קיימת למעשה ומעטים הנהרות שצדודיתם מתקרבת למצב זה. כל מכשול בדרכו של הנהר, כגון מפתן של סלע עמיד, הגברה פתאומית של עצמת זרימה על ידי יובלים גואים או גשמי פתע, גידול פתאומי בספיקה עקב כיבוש שטחים נוספים לאגן, שינוי בכמות הטעונת וטיבה כאשר הנהר או יובליו מגיעים לסלע סחיף מאוד, אשדות ומפלי מים הנוצרים עקב סיבות ליתולוגיות או טקטוניות - כל אלה מונעים מנהר להגיע לצדודית איזון. משום כך נפוצה הצדודית בעלת מתאם דינמי (profile of graded river), שמשתנה בהתאם לשינויים החלים בזרימת הנהר. ערכי השיפוע בחלקים העליונים של הנהר עשויים להגיע לעשרות אלפיות (הפרש של עשרות מטרים ברום הטופוגרפי לק"מ אורך אפיק), כך שאפיקים הרריים הם בעלי שיפוע של 20 אלפיות ויותר (לירדן בקטע הקניוני במורד גשר בנות יעקב שיפוע ממוצע של 20 אלפיות או 2%). במורד הנהרות השיפוע הוא אפסי: באמזונס 0.028 אלפיות או 45 מ' לאורך 1600 ק"מ ובירדן התחתון 0.81 אלפיות (180 מ' לאורך 220 ק"מ). בארץ, שיפוע הנחלים הזורמים לים התיכון מתון לעומת שיפוע הנחלים הזורמים מזרחה, כי במזרח המרחק לבסיס הסחיפה בבקע הירדן קצר יותר. בספרות המדעית קיימות מספר משוואות אמפיריות - שהתקבלו מנתוני שדה - על היחסים

הסחיפה. נהר מסוגל לעצב את אפיקו ולקיימו בתקינות כל עוד הוא עשוי להמשיך בזרימתו, כלומר להעביר את מימיו למקום הנמוך ביותר. זרימת הנהר נפסקת בהגיעו למפלס חסר שיפוע המציין את גבולה התחתון של פעולת הסחיפה בנהר ונקרא בסיס הסחיפה. מפלס האוקיינוס או הים מהווה בסיס סחיפה לנהרות הזורמים אליו, אך יש גם נחלים שבסיס סחיפתם הוא מקומי, כדוגמת ים המלח עבור הירדן או מלחת יוטבתה עבור נחלים מכל עבריה. שינויים במפלס הסחיפה, גורמים להתחתרות הנהר או להשקעת יתר.

4. השיפוע וצדודית האורך (profile)

הנהר הוא גורם הסעה של קרקע וסלע. השיפוע תלול במעלה הנהר ומתון במורדו. תלותה של הזרימה בקיום שיפוע וכמות המים ההולכת ורבה במורד הנהר, גורמות ליצירת צדודית קעורה. באזורים צחיחים, בהם פוחתת לעתים הספיקה במורד (עקב איבודי תמסורת ואופי הגשמים), צדודיתם של הנהרות עשויה להיות קמורה ולא קעורה.

באופן תיאורטי עתיד נהר תוך כדי התחתרותו והתפתחותו, להגיע לצדודית איזון שתשקף את כושר התחתרותו המוקנה לו על ידי כמות המים והטעונת, ויגיע לשיפוע שבאמצעותו יעביר את המים והטעונת בצורה היעילה ביותר ללא שינוי

נוסחאות (1) (2) מתייחסות כללית למשתני ספיקת המים וספיקת הטעונת ומצביעות על המשתנים הגדלים או הקטנים איתם. בתרשים 2 הספיקה מתייחסת לפרמטרים מדורים - ספיקה ממוצעת וספיקת שיא שנתית.

משוואות Schumm (תרשים 2) מציינות מנגנון כפול של התאמת המערכת הנהרית לשינויים בספיקה: מנגנון ראשון, על ידי שינוי הערכים של הגיאומטריה ההידראולית - רוחב, עומק ושיפוע, המשפיע כמובן על המהירות. ומנגנון שני, על ידי שינוי המשתנים הפלנימטריים - הנפתוליות או פיצול האפיקים.

הירדן הצפוני לפני השפכו לכנרת, מדגים שינוי פלנימטרי ממורפולוגיה של אפיק יחיד למבנה של פזרות, אפיק נפתולי ולבסוף מבנה של דלתא בכניסה לימה. השינוי בשיפוע מכתוב את אופי הטעונת והמבנה הפלנימטרי של האפיק (תרשים 3). בשיטפונות לא חל שינוי בספיקת המים, אך כמות הטעונת קטנה בעקבות השקעתם של הבולדרים בחלק העליון, ולאחר מכן של חלוקים וחצצים שאינם מגיעים לכנרת. בקטע האחרון נמצא בעיקר חול וחומר מרחף.

5. ההשפעה המורפולוגית של שיטפונות שיא

השיטפון הקטסטרופי או יוצא הדופן קובע בדרך כלל את מצב שיווי המשקל של מערכת הנהר, שפירושו היכולת להעביר את זרימת המים והטעונת ללא שינויים משמעותיים במורפולוגיה של האפיק. המשמעות ההידרולוגית של השיטפונות, נידונים במאמר ההידרולוגיה (בן-צבי, 2009). בגאוויות קטנות חלה לעתים השקעה של חומר, הגורם לצמצום חתך האפיק. חומר זה עשוי להיסחף בגאוויות שיא. לאחר השיטפון נוצר בהדרגה שיווי

בין המשתנים השונים של האפיק לספיקת הנהר. נציין את אלו שפורסמו על ידי Schumm (1969), ומתייחסות לנהרות אלוביאליים הזורמים בקרקעית וגדות המורכבות מהטעונת שלהם. הספיקה השנתית הממוצעת m וספיקת השיא השנתית הממוצעת ma , הם הפרמטרים המאפיינים את המשטר ההידרולוגי של הנהר. פרמטר רוחב הנהר מושפע בעיקרו מהספיקה וסוג הטעונת. העומק מושפע פחות מהספיקה והיחס רוחב/עומק מושפע בעיקרו מסוג הטעונת (תרשים 2).

אפשר לתמצת את היחסים בין ספיקות המים, Q_w , והסדימנטים, Q_s , לבין המשתנים המורפולוגיים של האפיק, באמצעות שתי הנוסחאות הכלליות הבאות:

$$Q_w = \frac{\omega, d, \lambda}{S} \quad (1)$$

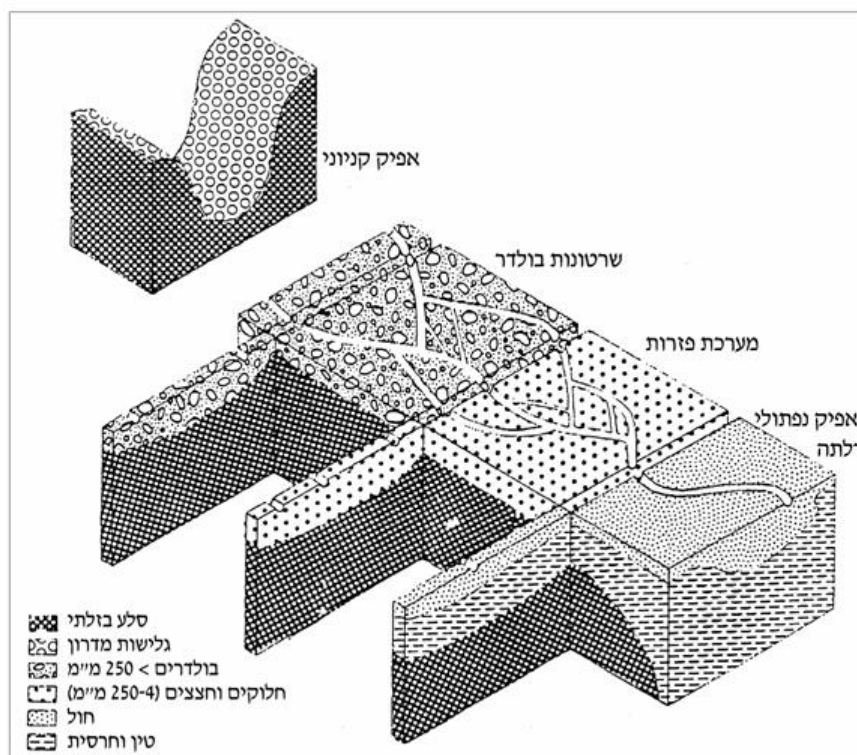
$$Q_s = \frac{w, \lambda, S}{d, P} \quad (2)$$

משתנה האפיק	Schumm (1969)
רוחב (w)	$w = 37Q_m^{0.39} M^{-0.39}$ $w = 2.3Q_{ma}^{0.58} M^{-0.37}$
עומק (d)	$d = 0.6Q_m^{0.29} M^{0.34}$ $d = 0.09Q_{ma}^{0.42} M^{0.35}$
יחס רוחב-עומק	$w/d = 255M^{-1.06}$ $w/d = 56Q_m^{0.10} M^{-0.74}$ $w/d = 21.4Q_{ma}^{0.18} M^{-0.74}$
אורך גל נפתול (λ)	$\lambda = 1890Q_m^{0.34} M^{-0.74}$ $\lambda = 234Q_{ma}^{0.48} M^{-0.74}$
סינואסיטי (P)	$P = 0.94M^{0.25}$
שיפוע האפיק (S)	$S = 60Q_m^{-0.32} M^{-0.38}$

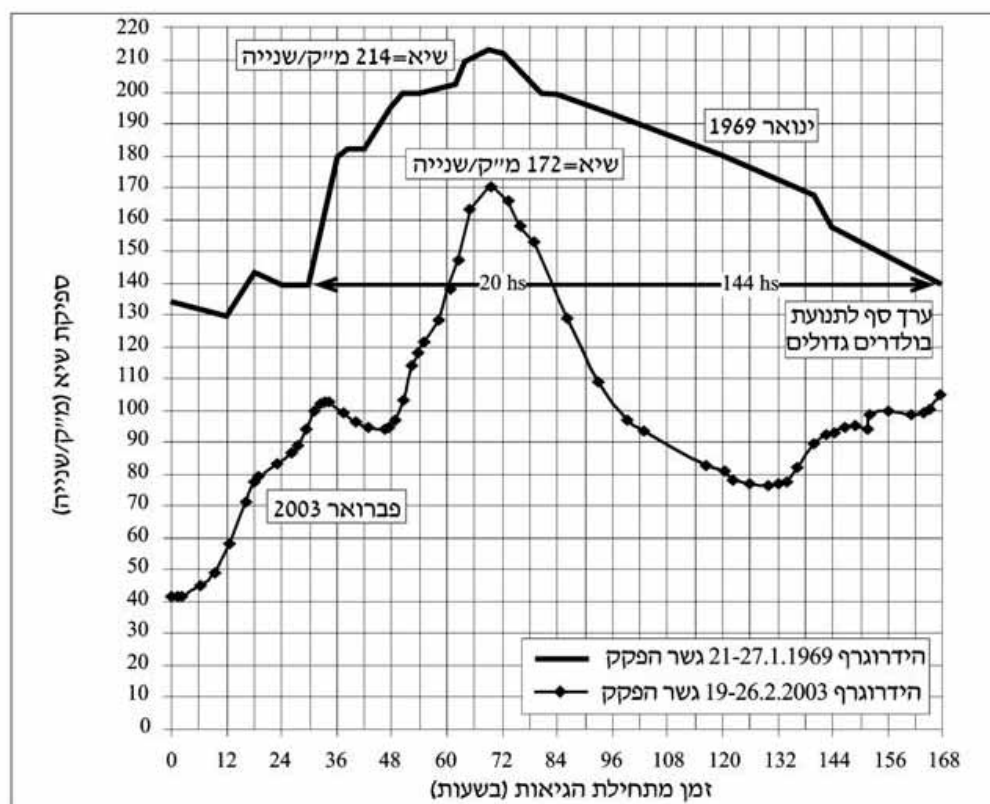
תרשים 2: משוואות קשר בין משתני האפיק לבין ספיקתו

מקרא ויחידות:

ספיקה שנתית ממוצעת	Q_m	(רגל מעוקבת לשנייה)
ספיקת שיא שנתית ממוצעת	Q_{ma}	(רגל מעוקבת לשנייה)
ספיקת גדות מלאות ממוצעת	Q_b	(רגל מעוקבת לשנייה)
יחס טין-חרסית בפרמטר האפיק	M	(אחוזים)
רוחב	w	(רוחב בגדות מלאות, רגל)
עומק ממוצע	d	(רגל)
אורך גל נפתול	λ	(רגל)
סינואסיטי של האפיק	P	(יחס בין אורך האפיק לאורך העמק)
שיפוע האפיק	S	(אחוזים)



תרשים 3 - המבנה הפלנימטרי של הירדן העליון צפונית לכנרת



תרשים 4: השוואה בין הידרוגרפים של שני שיטפונות בירדן

האפיק, הביא לפיתוח מודלים אמפיריים בין תנאי הזרימה לבין המאפיינים הגיאומטריים של האפיק ושל תנאי החספוס של קרקעית האפיק. יחסים אלה באים לידי ביטוי בנוסחאות (ביחסים לוגריתמיים) בעלי מעריכים אקספוננציאליים (power law). הנוסחאות שימושיות בתכנון הנדסי, בשחזור זרימות קדומות או בחיזוי של שינויים גיאומורפיים. הקשרים הבסיסיים של הגיאומטריה ההידראולית הם (תרשים 6):

$$d = cQ^f \text{ (עומק)}$$

$$w = aQ^b \text{ (רוחב)}$$

$$v = kQ^m \text{ (מהירות)}$$

ערכי הרוחב, העומק והמהירות הם ממוצעים. סכום המעריכים $(b+f+m)$ ומכפלת הקבועים (a, c, k) צריכים להיות 1. בעבודות רבות שנערכו בעולם, נקבעו יחסים של הגיאומטריה ההידראולית עבור סובכים פלוביאליים בתנאים גיאולוגיים, פיסיוגרפיים ואקלימיים שונים. ניתן לקבוע את ערכי הגיאומטריה ההידראולית באתר (at a site), בחתך מסוים שבדרך כלל קשור לתחנה הידרומטרית או לכלול את אגן ההיקוות מן המעלה עד למורד, על ידי השוואה בין המשתנים של האפיק לספיקת גדות מלאות (bankfull) כמכנה משותף, ולקבל בהתאם את היחסים של הגיאומטריה ההידראולית לאורך האפיק (downstream).

התוצאות שהתקבלו בגיאומטריה ההידראולית באתר עבור הירדן באזור הפזרות ביציאתו מן הקניון ובמורד נחל משושים בגולן, מראות שהשינוי במהירות הוא הגדול ביותר והגידול ברוחב האפיק הוא הקטן ביותר. הצגת הערכים של הגיאומטריה ההידראולית במורד (טבלה 1), מאפשרת להשוות בין מספר אגנים בישראל, נחל משושים (בגולן) ונחל חדרה, עם אגנים באקלים ים-תיכוני בקטלוגיה שבספרד, במערב אוסטרליה ומערב ארה"ב (Inbar, 2006). באגנים באקלים ים-תיכוני, המשתנה בעל המעריך הגבוה מתקבל עבור רוחב האפיק, המציין תנאי סחיפה ואי יציבות של האפיקים בעלי זרימה לא קבועה.

יחסי w/d (רוחב/עומק) של האפיק, הם בעלי ערכים גבוהים באפיקים הים תיכוניים (קרוב ל-20 בדרך כלל), בגלל החומר הבלתי מלוכד של הגדות. ערך זה מתאים לנחלים בעלי תכולה נמוכה - פחות מ-10% - של טין וחרסית בגדות,

משקל חדש, העשוי להימשך תקופה ארוכה עד להתרחשות אירוע שיטפוני קטסטרופי אחר, והיא תלויה בתנאי השיקום העצמי של המערכת. קיים מגוון רב של ערכי סף לעוצמתם של שיטפונות שיא. למשך הזמן של השיטפון משמעות חשובה - ערכי השיא יכולים להיות קרובים בשני שיטפונות, כפי שמוצג בהשוואת שני שיטפונות השיא של הירדן ב-70 השנים האחרונות (תרשים 4): ב-1969 המורפולוגיה השתנתה לחלוטין בקטע בין קניון הירדן לכנרת, תוך היווצרות דלתא חדשה בכנרת, בעוד שב-2003 חלו שינויי תוואי בלבד (תרשים 5; ענבר, 2005).

במספר נחלים בנגב, נערך מחקר לגבי שיטפונות שיא לאורך תקופות של אלפי שנים, על סמך משקעי סחף בגדות הנחלים. נמצא שבעבר השיא השיטפוני, היה לעתים פי שניים או שלושה בעוצמתו משיטפונות השיא שנמדדו ב-50 השנים האחרונות (Greenbaum et al., 2000).

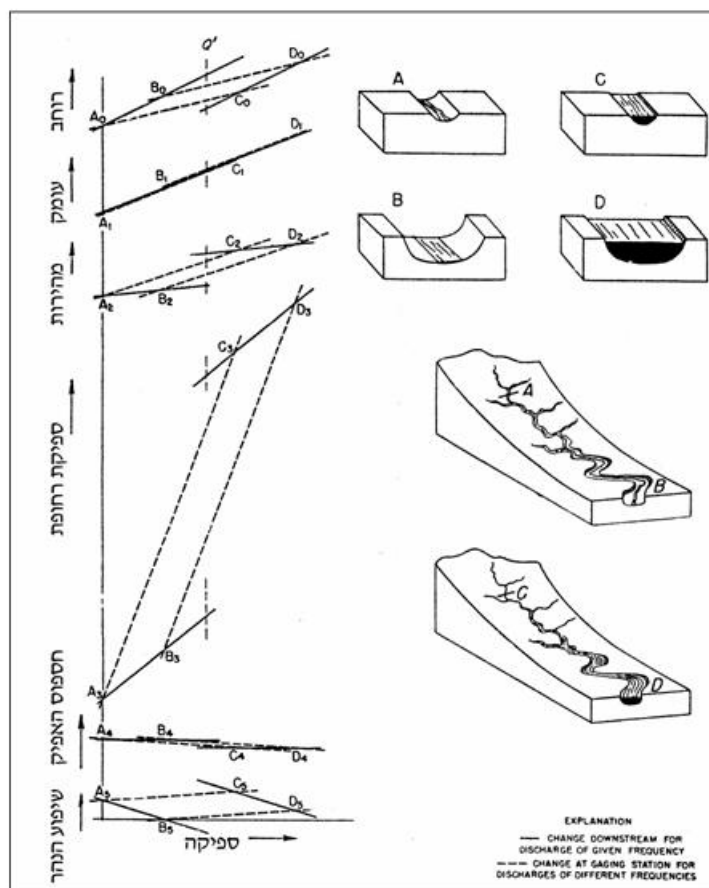
6. גיאומטריה הידרולית

יחסי התגובה של המערכת הנהרית לתהליכים המורכבים המשפיעים עליה, היוו במשך זמן רב אתגר לגיאומורפולוגים, הידרולוגים ומהנדסים. מורכבות זו בין הזרימה לבין הפרמטרים של



תרשים 5 - הדלתא של הירדן בכנרת, שנוצרה ב-

1969



תרשים 6 : הגדרת משתנים של הגיאומטריה ההידרולית

טבלה 1: גיאומטריה הידרולית: ערכים לאגנים באקלים ים תיכוני

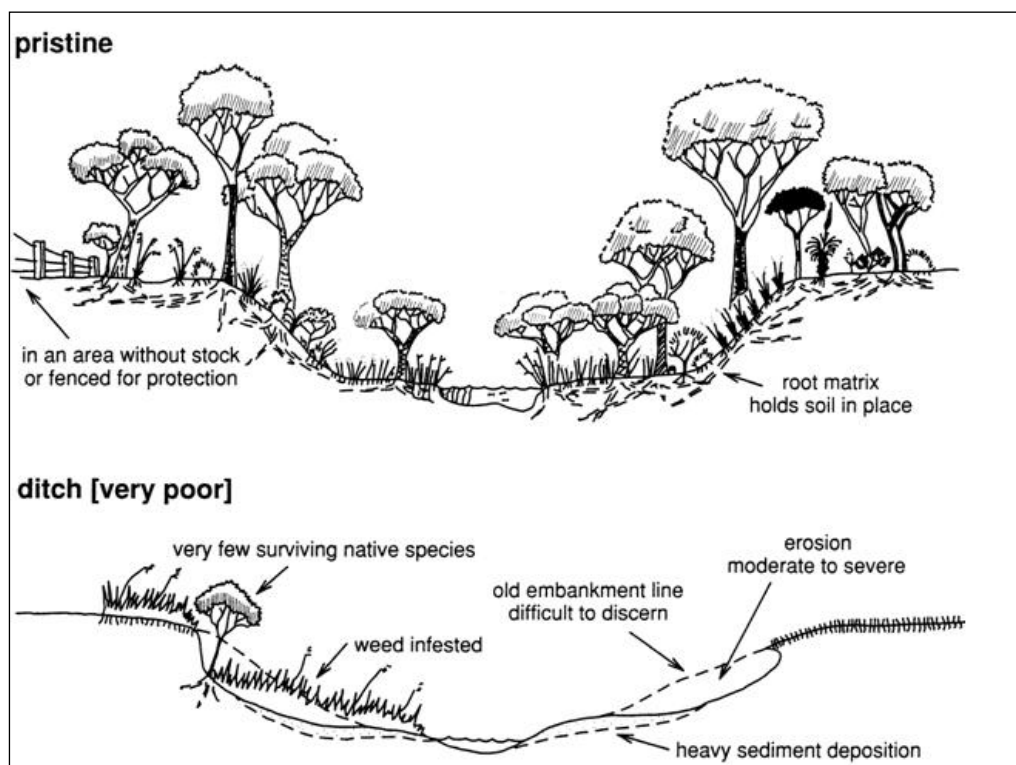
אגן	b (רוחב)	F (עומק)	m (מהירות)	מקור
משושים	0.51	0.39	0.1	ענבר, 1970
חדרה	0.46	0.37	0.17	ענבר וצווער, 1996
ספרד	0.68	0.37	-0.06	Sala et al., 1985
מערב אוסטרליה	0.42	0.39	0.19	Inbar, 2006
מערב ארה"ב	0.5	0.3	0.2	Leopold et al., 1964

אחת ממטרות הגיאומורפולוגיה היא לגלות את הגיאואינדיקטורים (Geoindicators) או סימנים המצביעים על שינויים אלו. אחד הסימנים לשינויים מתבטא במבנים הסדימנטולוגיים שבקרקעית האפיק, הרגשים לשינויים במשטר הזרימה. מקבץ חלוקים (cluster) הוא דוגמה לכך. מקבץ חלוקים הוא יחידה סדימנטולוגית, המורכבת ממספר חלוקים מסודרים בכיוון הזרימה באורך של 10 ס"מ עד 120 ס"מ, עם ממד האורך כפול מממד הרוחב (תרשימים 8, 9) (Wittenberg, 2002). בתרשים 9, כיוון הזרימה מימין לשמאל.

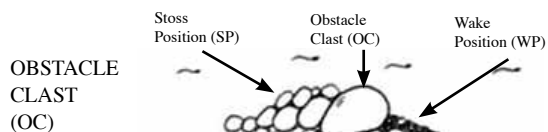
והמשמעות היא שגדות הנחלים נתונות לתהליכי סחיפה. תרשים 7, מראה מצב אפיק ללא הפרעה או התערבות האדם, לעומת אזור שכבר אלפי שנים נתון להתערבות האדם על ידי כריתת העצים ורעיית יתר ונתון לסחיפה של הגדות.

7. מקבצי חלוקים ומבנים סדימנטולוגיים באפיק כאינדיקטורים לשינויים במשטר הידרולוגי

המערכת הנהרית רגישה לשינויים אקלימיים גלובליים וגם לשינויים הנגרמים על ידי האדם.



תרשים 7: מצבי אפיק טבעי ובעקבות התערבות אדם



IMBRICATION (LM)



VEGETATED BAR (VEG-BAR)



MEGA CLUSTER



COMPLEX CLUSTER



תרשים 8: סוגי מקבץ חלוקים

החלוק הגדול הוא ה obstacle ומציין את הדוגמה הראשונה בתרשים 8. המקבץ הטיפוסי מורכב מחלוק ראשי (obstacle) בדרך כלל הגדול ביותר, עם מספר חלוקים מאחוריו במעלה הזרימה (stoss) ועוד קבוצה מתחתיו במורד הזרימה (wake). מקבצים כאלה מאפיינים נחלי אכזב וכמו כן נחלים הרריים ונחלים במשטר האקלימי הים תיכוני; ניתן להבחין בהם בכל נחלי הנגב והנחלים ההרריים בארץ. חשיבותם גדולה בקביעת מקדם החספוס של הנחל. הם מעכבים את תנועת הגרופת ומרחק הסעתה באפיק, ומגדילים את תקופת השהות של החלוקים באפיק. קיימים סוגים שונים של מקבצים בהתאם לכיוון החלוקים, מבנה פתוח או סגור ויציבות המבנה. הם מתהווים בדרך כלל בענף היורד של ההידרוגרף, עם הקטנת מהירות הזרימה והשקעת החלוקים הגדולים (Wittenberg, 2002).

8. הערכת רגישות (Sensitivity Assessment)

הערכה של הרגישות הגיאומורפית של מערכת האפיקים, מהווה כלי להערכת עמידות אתר של נהר בפני שינויים דרסטיים, כפי שמיפוי של



תרשים 9: תצלום של מקבץ חלוקים



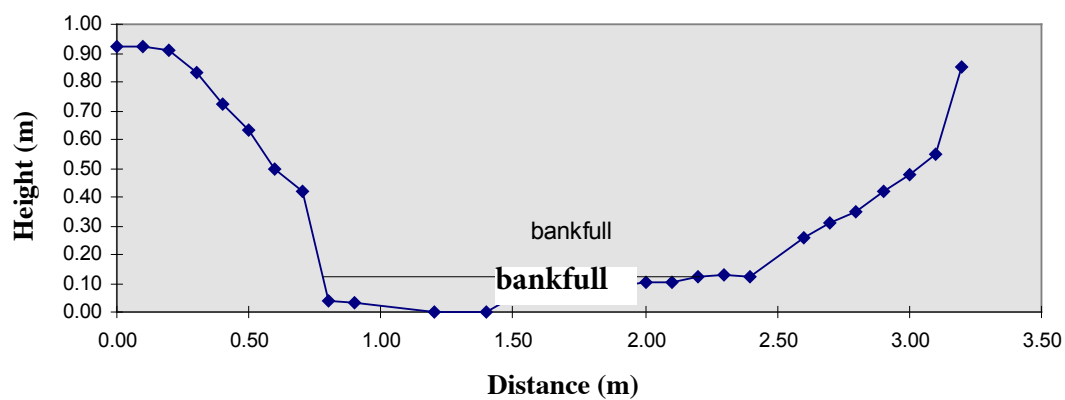
עמק	חתור עם טרסות
מבט על	ישר
חתך	אסימטרי
שיפוע	חזק
חומר גדות	חלוקים
חתך גדות	מתון
חומר קרקעית	חלוקים
צמחייה	שיחים בגדות
שימושי קרקע	מרעה

תרשים 10: רגישות גיאומורפולוגית של אפיק נחל גלים

Deeply incised
first order
Creek.



Poison Hill Creek.



Cross section of Poison Hill Creek.

Geomorphological Sensitivity Assessment.

Valley	Incised
Planform	Straight
Substrate	Coarse s&
Bed stability	Poor
Bank stability	Poor
Vegetation	Grass
Land use	Pasture

תרשים 11: דוגמא להערכת רגישות של קטע נחל באוסטרליה

ענבר, מ'; צוער, ח' (1996). היבטים גיאומורפולוגיים והידרולוגיים של נחל חדרה במערב השומרון. בתוך: מחקרי יהודה ושומרון, קובץ ה' (ע' י' אשל): 279-292.

Greenbaum, N.; Schick, A.P.; Baker, V.R. (2000). The paleoflood record of a hyperarid catchment, Nahal Zin, Negev Desert, Israel.

Earth Surface Processes and Landforms, 25: 951-971.

Inbar, M. (2006). The hydraulic geometry and geomorphic sensitivity of some rivers of Western Australia. **Z. Geomorph. N.F. Suppl.**, 143: 35-53.

Leopold, L. (2004). Geomorphology: a silver off the corpus of Science. **Ann. Rev. Earth Planet Sci.**, 1-12.

Leopold, L.B.; Wolman, G.B.; Miller, P. (1964). **Fluvial Processes in Geomorphology**. Freeman, San Francisco.

Sala, M.; Inbar, M.; Sumsi, C. (1985). Downstream variations in the hydraulic geometry of streams in the Catala Ranges, with emphasis on Man's influence In: **First International Conference on Geomorphology** (Ed. T. Spencer), Manchester, Abstracts Volume, 527.

Schumm, S. (1969). River Metamorphosis. **Proc. Am. Soc. Civil Engrs. J. Hydr. Div.**, 95: 255-273.

Sear, D.A.; Newson, M.D. (1994). Sediment and gravel transportation in rivers: A geomorphological approach to river maintenance. **Research and Development Note 315**, National Rivers Authority, Bristol, UK.

Wittenberg, L. (2002). Structural patterns in coarse gravel river beds: Typology, survey and assessment of the roles of grain size and river regime. **Geografiska Annaler**, 84 A: 25-37.

סיכונים סיסמיים מראה על אזורי רגישות לרעידות אדמה. הקביעה נערכת בשדה תוך היעזרות בצילומי אוויר, בדיקות קרקע, נתונים הידרולוגיים ומבנים העשויים להשפיע על המערכת. תרשים 11, מהווה דוגמה של הערכה שנערכה במערב אוסטרליה, ומראה באפיק של סדר ראשון את חוסר היציבות המתבטאת בסחיפתיות של הקרקעית והגדות וחוסר צמחייה מייצבת. הטבלאות המצורפות בתחתית התרשים, מהוות דוגמה שיש להתאים לכל אתר הנקבע להערכת הרגישות. הערכת הרגישות של אפיק נחל גלים בכרמל (תרשים 10), מראה גם היא על מידת הסחיפות של הגדות הבנויות מחלוקים וחצצים בלתי מלוכדים. בנספח מס' 1, מוצג דף דוגמה להערכת רגישות גיאומורפולוגית של קטע אפיק נהר, הכולל את הפרמטרים העיקריים שיש להגדיר. הערכה זו יכולה לשמש גורמים תכנוניים או מחקרניים ולהוות גם מסד של נתונים לבדיקת שינויים עתידיים.

מראי מקומות

בן-צבי, א' (2008). הידרולוגיה. בתוך: נחלים וניקוז - תהליכים, הנדסה ותכנון (ע' א' בן-צבי). רשות ניקוז שקמה-בשור והמכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון, 49-70.

לקח, י' (2008). אגן היקוות - יחידה מורפ-הידרו-אקולוגית. בתוך: נחלים וניקוז - תהליכים, הנדסה ותכנון (ע' א' בן-צבי). רשות ניקוז שקמה-בשור והמכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון, 71-85.

ענבר, מ' (1970). הפלוביומורפולוגיה של נחל משושים ברמת הגולן. עבודה לתואר שני, האוניברסיטה העברית בירושלים.

ענבר, מ' (2005). אירועים שטפוניים ושינויים במערכת הפלנימטרית של הירדן העליון לאורך 40 שנה. אופקים בגיאוגרפיה, 64-65: 121-131.

נספח 1: טופס הערכת רגישות

הערכת רגישות גיאומורפולוגית

תאריך	סוקר
צילומים	רגישות
נחל	אגן
תיאור	
עמק (שטוח, מדרונות מתונים, חתור עם טרסות)	
מבט על (ישר, מעט נפתולי, נפתולי רב)	
חתך (אסימטרי, U, סימטרי, חתור, מלאכותי)	
שיפוע (חזק, מועט, מתון)	
רוחב	
מפלס מים	
עומק מים	
חתך גדות מלאות	
חומר גדות (חצצים, חלוקים, חול, טין)	
חתך גדות (מלאכותי, מתון, תלול, אחר)	
שרטונות (יציבים, % צמחייה)	
חומר קרקעית (חצצים, חלוקים, חול, טין)	
בריכות-אשדות	
השפעת מבנים מלאכותיים	
צמחייה	
תחזוקה (באפיקים בטיפול רשות ניקוז)	
שימושי קרקע	
ערכי שימור טבע	



שיטפון נחל רביבים פארק גולדה 2010



שיטפון במפגש נחלים באר שבע ונחל חברון 2010



שיטפון נחל עבדת 2009 צלם: רן גלזמן



שיטפון נחל עבדת 2009 צלם: רן גלזמן



קריסת גשר על נחל ניצנה 2010



שיטפון נחל באר שבע גשר תורכי 2000



שיטפון נחל באר שבע 2010



גשר חבלים על נחל הבשור 2010



שיטפון בנחל באר שבע 2010



זיכרונות מהנגב

תיקי באר שבע יודעים לספר על החורף הקשה של 1987. גשם כבד ירד אז, שכונת נווה־נוי הוצפה ותושביה חולצו ובתיהם באמצעות מסוקים. בחוץ זה אמנם עוד לא נראה, אבל החורף האמיתי ממש כאן. אותות ראשונים כבר יבחנו. נקווה שבחורף הזה יירדו גשמים, אבל שנוזקים כאלה לא יחזרו • צילום: הרצל יוסף

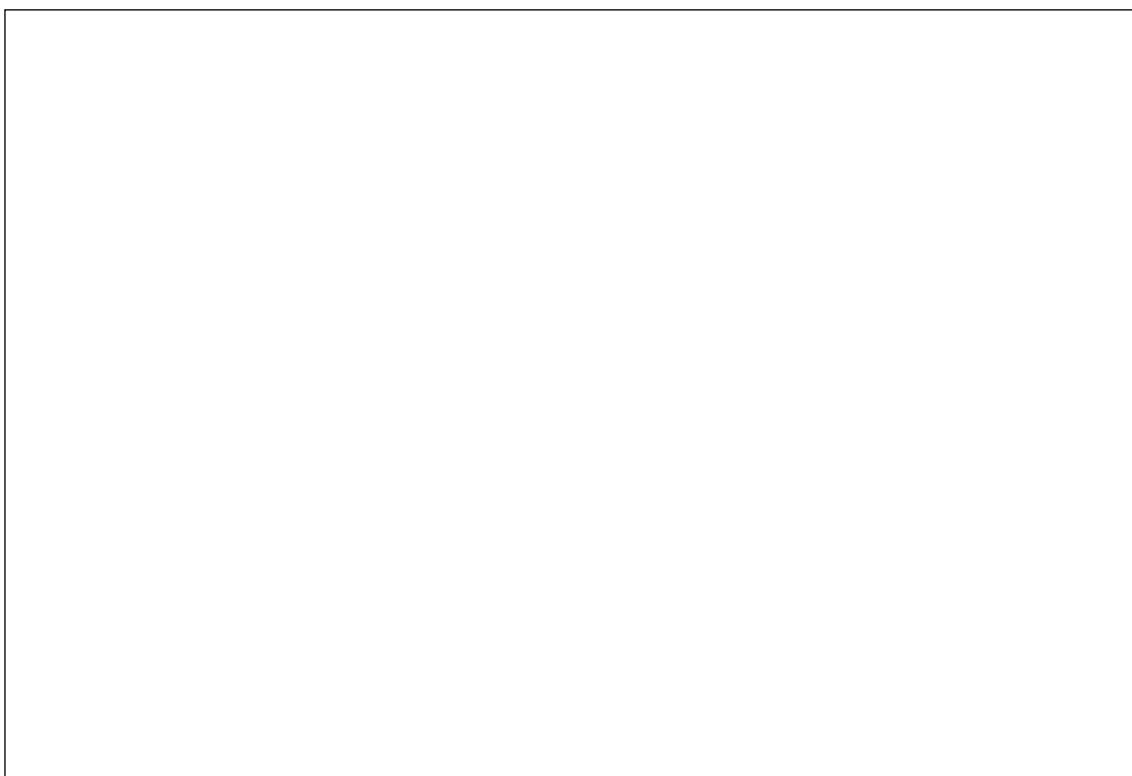
שיטפון נחל באר שבע 1987 צלם: הרצל יוסף



שיטפון נחל באר שבע 2009 לאחר הסדרת הנחל



שיטפון בנחל סכר 2010





נחל חברון - ביוב וגרסאות



בורות כרייה נחל באר שבע



תחזוקה בנחל חברון ניקוי הנחל מפסולת



תחזוקה בנחל חברון ניקוי סחף ממעביר תחת כביש



ביתרונות נחל הבשור



שביל נחל שיקמה



שביל נחל שקמה



נחל פורה



מאגר שקמה



מאגרי הבשור



פריצה במאגר ניר עוז



מאגר סנסנה

הסחף הנחלי

יהודית לקח¹; יוליה אלכסנדרוב²; יונתן לרון³

¹ ד"ר, המחלקה לגיאוגרפיה, האוניברסיטה העברית בירושלים; המחלקה לגיאוגרפיה אוניברסיטת בר-אילן;

² ד"ר, המחלקה לגיאוגרפיה ופיתוח סביבתי, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב;

³ פרופסור, המחלקה לגיאוגרפיה ופיתוח סביבתי, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב.

1. מבוא

באסופה זו בפרק העוסק באגני ניקוז, הודגשה הראייה המערכתית, בה יש לראות את יחידת השטח הנקראת אגן היקוות. המים הזורמים לאורכה של רשת הנחלים, הם אחת התפוקות ממערכת אגן ההיקוות ומשמשים גם כמדיום המסיע תפוקה אחרת - הסחופת הנחלית. הסחופת הנחלית היא כלל החומרים המוסעים על ידי המים הזורמים בנחל. מאמר זה ידון במרכיבי המינרלי המוצק של הסחף בלבד - להלן הסחף הנחלי, ולא יכלול את התמס (חומרים המומסים במים) ולא את הצופת (כלל החומרים הצפים על פני המים, בעיקר ממקור אורגני ואף מינרלי כגון סקוריה מהרי געש, אך גם אנתרופוגני). מקובל לחלק את הסחף הנחלי לשני מרכיבים עיקריים בהתאם לאופן התנועה של החלקיקים: הרחופת, הנעה בתוך גוף המים ללא מגע עם הקרקעית, והגרופת הנעה בצמוד לקרקעית ובמגע עמה בגרירה, בגלגול או בקפיצה. בחלוקה זו מסתתר מרכיב הגודל של החומר הנע. חלקיקים קטנים - גודלי הסילט והחרסית, מוסעים תמיד כרחופת. גודלי החול 0.063 - 2 מ"מ, יכולים לנוע הן כגרופת והן כרחופת בהתאם למהירות הזרימה; לעתים גם גדלים של 4 מ"מ נעים כרחופת, כפי שנמצא במשקעים רפי זרימה (slack water deposits) של שיטפונות עבר גדולים (גרינבאום, 1996). טווח החלקיקים הנעים כגרופת גדול מאוד. הגבול התחתון של גודל החומר הנע כגרופת, הנו 2 מ"מ לנחלים תלולים כמרבית אלה אשר בנגב ובערבה, אך גם בהם הוא יכול לרדת עד 0.1 מ"מ; עדות לכך הנם משקעי החול הפלוביאטילי המסיביים בעולם, שהמפורסם ביותר בהם הוא ה-Old Red Sandstone, UK, כפי שמתבטא בכ- 100 מפרסומיו

של גדול מדעני המשקעים הנחליים החוליים, J.R. Allen. הגבול העליון יכול להיות חלוקים גדולים מאוד שמשקלם עשרות ומאות ק"ג, והוא נקבע על ידי זמינותם של החלוקים ועל ידי עוצמת הזרימות (Inbar and Schick, 1979).

הסעת סחף ברשת הניקוז של האגן איננה רציפה, וזמן השהות שלו במקומות אוגר שונים יכול לנוע בין שעות, ימים ושנים בודדות, לבין מאות ואף אלפי שנים. בישראל הכירו בחשיבות הלימוד של תהליכי הסעת סחף וכימות התופעה, כבר באמצע שנות השישים של המאה ה-20. בינואר 1967, במסגרת "ועדת המחקר המשותפת למוסדות המים", הוקמה "ועדת משנה להכנת תכנית כוללת לחקירת בעיות סחופת בנחלים", אך לא היה המשך לפעילותה. מתחילת שנות ה-90 מתפקדת ועדת המחקרים של האגף לשימור קרקע וניקוז (משרד החקלאות והכפר), בפעילויות הכוללות מימון והכוונה למחקרים בנושאי סחף קרקע, הסעת סחף והשקעתו במאגרים. גם הקרן הקיימת לישראל שותפה למאמץ זה. המחקר והדיון בסחופת הנחלים והבנת התהליכים הקשורים בהסעתה, חשובים כיום יותר מתמיד. השינויים מעשה אדם שעוברים השטחים הטבעיים והפיתוח המואץ, מגדילים את תשומות הסחף לנחלים פי 3-9 ואף יותר (לדוגמה, Ramos-Scharron and MacDonald, 2007). עדויות לכך הם מאגרים רבים הנפרצים כתוצאה ממילויים בסחף (לדוגמה, לקח וגרינבאום, 1997). בארה"ב קיימת היום מגמה של הריסת סכרים רבים, על מנת למנוע תופעות לוואי הרסניות שנגרמו כתוצאה מהפסקת ההולכה הטבעית של הסחף בנחלים (Pohl, 2002). אלה כוללים שיטפונות מפרצת סכרים שגרמו לנזקים רבים בנפש וברכוש, הרס בתי גידול של

2. מאפיינים של חלקיקי הסחף הנחלי

2.1 תכונות החלקיק הבודד

2.1.1 מושג הגודל

מקובל לתאר את גודל החלקיקים הנעים במי הזרימה, באמצעות ציר מייצג. חלקיקי סחף נחלי אינם בהכרח דומים זה לזה בגודלם ובצורתם. כל חלקיק הוא גוף תלת-ממדי הניתן לתיאור באמצעות אורכם של שלשה צירים מאונכים זה לזה כנהוג, למשל, בקריסטלוגרפיה. ציר a הוא הארוך ושני הצירים b (הציר הבינוני) ו-c (הציר הקטן) יוצרים מישור הניצב לו (תרשים a1). גודלו של חלקיק מוגדר כאורכו של ציר b (תרשים b1), והוא הקובע אם חלקיק נתון עובר דרך נפה שבנויה מרשת של ריבועים שגודל הצלע שלהם נתון. הניפוי נעשה דרך סוללת נפות בעלות רשתות ריבועיות בגדלים שונים מונחות זו על גבי זו, כך שגודל ריבועי הנפה קטן כלפי מטה. באפיקי נחלים חלוקיים, טווח הגדלים של הסחף גדול מאוד, אולם ניתן לקבצם לקבוצות בהתאם לגודל ציר b, על פי סקלה גיאומטרית. סקלה זו מבוססת על מספרים שלמים המהווים חזקות של המספר 2, ונקראת על שם הסדימנטולוג שהגה אותה בתחילת המאה ה-20 - סקלת Wentworth. גודל החומר על פי סקלה זו מוגדר באופן הבא:

$$\varphi = -\log_2 D \quad (1)$$

φ - קוטר ביחידות פי D, (phi) - קוטר ב-מ"מ. זוהי סקלה ליניארית של מספרים שלמים, המכתיבה את טווח הגדלים (במ"מ) בכל קבוצת גודל (טבלה מס' 1). על פי סקלת פי, גודלי הגרופת שמעל 1 מ"מ הם מספרים שליליים. כיום, עם העיסוק הרב יותר בגרופת, ישנם המשתמשים בסקלה אחרת ψ , כאשר $\psi = -\varphi$. על פי סקלה זו בנויות הרשתות של הנפות השונות המשמשות

דגיגי הסלמון ועוד. גורם נוסף לחשיבות הסחופת בנחלים, הוא הזיהום המגיע אליהם והופך חלק ממנה בין אם כתוצאה מספיחה אל חלקיקי הסחף דקי הגרגר (Balaban, 2008) ובין אם כמרכיב עצמאי. מדידה, דיגום וכן כימות של הסחף המוסע במים במהלך זרימה, מורכבים ובעייתיים ונובעים מיחסי הגומלין בין מקורות הסחף לבין מאפייני הזרימה. מקורות הסחף משתנים במרחב ובזמן וקובעים במידה רבה את זמינות החומר ואת תכונותיו. לסחף הנחלי שונות יחסית גדולה מזו של גודל הספיקות ותדירותן.

למשטר הזרימה בנחל, השפעה רבה על תהליכי הסעת הסחף. בנחלי אכזב, דוגמת רוב נחלי ישראל, מתרחש תהליך הסעת הסחף ועיצוב תשתיתו בזרימות שיטפונות בלבד. בנחלים בהם קיימת זרימת בסיס, נוצרת בקרקעית מורפולוגיה אופיינית של שריון - armoring. בעומק מים קטן ותנועת סחף מועטה, מתאפשרת הצצה על קרקעית האפיק המשוריינת. למורפולוגיה זו השפעה רבה על תהליכי הסעת הסחף המתרחשים, גם בנחלים אלו, במהלכן של הזרימות הגבוהות (Reid and Laronne, 1995). באזורים צחיחים למחצה וצחיחים אין שריון, ולכן השלכות רבות על פעילות הסעת סחף ועומק ההתחתרות בתשתית הנחל. הזרמת שפכים לנחלים רבים בישראל שינתה בהם את משטר הזרימה, מנחלי אכזב שיטפוניים לנחלים בעלי זרימות בסיס, שהם השפכים בדרגות זיהום משתנות - משפכים גולמיים ועד שפכים המוזרמים ממכונני טיהור (למשל, Negouker-Cohen, 2007). זרימות אלה מהוות אילון על האפיקים מבחינת מתכות כבדות וחומרים אחרים, המוסעים כסחף נחלי ומושקעים בתשתיתו ובגדותיו. זרימת הבסיס המלאכותית וכן המורפולוגיה החדשה שטרם-ההזרמה הייתה תוצר של זרימות שיטפונות בלבד, יוצרת חתך זרימה פעיל המהווה לעתים רק חלק מכלל החתך הקודם ולרוב הוא נעשה צר ועמוק יותר. בחתך החדש מתבסס צומח המייצב את הגדות ובקרקעיתו נוצרת עם הזמן מורפולוגיה האופיינית לנחלי איתן - ערוץ צר עם שרטונות מכוסי צומח ותשתית משוריינת (Hassan and Egozi, 2001). השינויים המורפולוגיים בנחלים אלה נראים לעין, אולם אין כל מידע עד כמה שינוי זה משפיע על תנועת הסחף ותפוקותיו במהלך זרימות שיטפוניות באותם הנחלים.

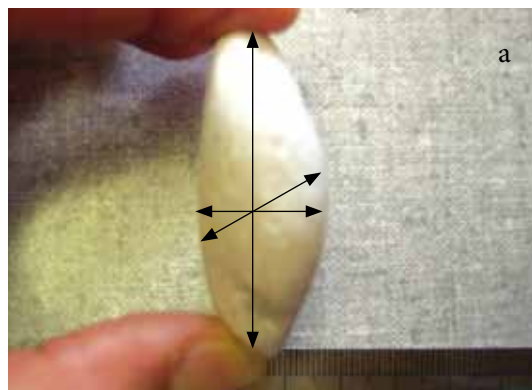
טבלה 1: התפלגות גודלי הגרגר על פי שתי סקלות מדידה

שם	טווח הגדלים ב-מ"מ	טווח הגדלים ביחידות φ (פי)
חרסית	<0.002	>9
סילט	0.002-0.063	9 - 4
חול	0.063-2	4 - (-1)
צרורות	>2	<-1

הסחף הנחלי



תרשים 1: גודל חלוק על סמך ציריו: a. ציר a הציר הארוך ובניצב לו הצירים b-c; b. הציר הבינוני - ציר b הקובע את קבוצת הגודל אליה משתייך חלוק.



ידי היחס בין הקוטר הממוצע של עיגולים המהווים את פינות החלוק לבין קוטרו של העיגול הגדול ביותר התחום על ידי החלוק (תרשים 2ב). בגלל הקושי לבחון בצורה מתמטית את העיגוליות והכדוריות של חלוקים, פותחו תרשימים באמצעותם ניתן לדרגם מ-0 (הדרגה הנמוכה ביותר) ועד 1 (עיגול או כדור), (תרשים 2א). בגלל צורתם השונה של החלוקים, אין בהכרח קשר ישיר בין רמת העיגוליות לבין רמת הכדוריות (תרשים 2ב).

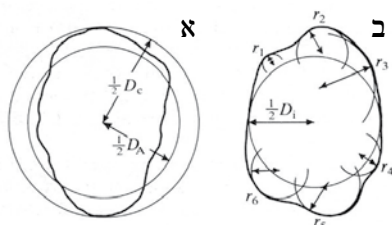
2.2 המינרלוגיה או סוג הסלע

מקור הסחף הנחלי הוא בתוצרי הבלייה של סלעי כדור הארץ. לפיכך, במערכות הנחלים נע סחף שמקורו בסלעים של פני אגן ההיקוות כיום ובעבר. המינרלוגיה או סוג המסלע, קובעים במידה רבה את תוצרי הבלייה וגודלם הראשוני של שברי הסלע ואת קצב התעגלותם, שחיקתם והקטנת גודלם, בתהליך ההסעה ובתהליך הבלייה במקום השקעתם (in situ) בפשט ההצפה, בשרטונות או בעומק התשתית. בחינת סוג המסלע או המינרלוגיה של החלוקים באפיקים, מאפשר

לקביעת התפלגות הגדלים של הסחף. הקטגוריה "צרורות" שבטבלה, כוללת טווח גדלים ארוך מאוד. חלוק שציר b שלו גדול מ-256 מ"מ או מעל 8 ψ , מוגדר כ"כולדר". ישנם המכנים גדלים אלה גרורות. חלוקים שגודלם 64 - 256 מ"מ נקראים צרורות (cobbles), אלה שבטווח 16 - 64 מ"מ נקראים חלוקים (pebbles), ואלה שגודלם 2 - 16 מ"מ הם גרגרים (granules). המונח gravel לרוב משמש לסחף גדול מחול (< 2 מ"מ).

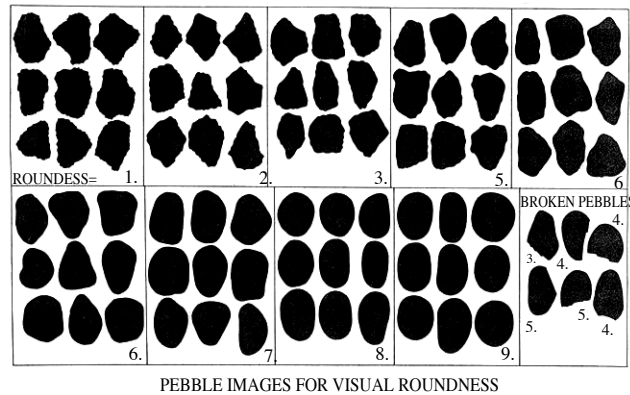
2.1.2 צורה, דרגת העיגוליות (roundness) והכדוריות (sphericity)

צורתם של חלוקי נחל, היא ביטוי ליחסים בין שלושת הצירים המגדירים חלוק (תרשים 1). היא נקבעת על ידי שילובם של שני גורמים: הצורה הראשונית של שברי הסלע הבלוי המגיעים אל הנחלים, ובליותם תוך כדי ההסעה במים. במהלך ההסעה נשברים שברי הסלע, נשחקים ומתעגלים וכללית קוטרם קטן ככל שדרכם ארוכה יותר. פרמטרים המבטאים את צורתם של חלוקים, הם מדר האורכיות (b/a - elongation ratio), ומדר הפחיסות $c/(ab)^2$ או (a+b)/2c - (flatness ratio). כדוריות החלוק היא מדר עד כמה הוא קרוב לצורת כדור, בו שלושת הצירים שווים בגודלם. ישנן מספר הגדרות לכדוריות, אך המעשית ביותר היא היחס בין קוטר העיגול ששטחו שווה לשטח פרוסת החלוק המונח על משטח אופקי במצב היציב ביותר - D_A לבין קוטר העיגול העוטף את החלוק - D_c (תרשים 2א). העיגוליות היא מדר לעקמומיות הפינות של החלוק. היא מוגדרת על



תרשים 2: א. קביעת כדוריות של חלוק; ב. קביעת עיגוליות של חלוק (מתוך Allen, 1985).

א



PEBBLE IMAGES FOR VISUAL ROUNDESS



תרשים 3: א. תרשים לקביעה חזותית של דרגת העיגוליות מ-0.1 עד 0.9. ב. דרגות עיגוליות וכדוריות אינן בהכרח זהות (מעובד מתוך: Powers, 1953).

בתנועה או במקורות של סחף נחלי. בנחלים בהם קיים שריון, התפלגות הגדלים של שכבת השריון מספקת מידע על מהירות הסף שיש לתחילת תנועת סחף בקרקעית האפיק. התפלגות דו-שכיחית (בי-מודלית) של סחף יכולה להיות עדות למקורות סחף שונים, לדוגמה מקור מדרוני - דק גרגר, ומקור אפיקי - גס גרגר (לרחופת בנחל יעל ראה תרשים 5, לקח, 1992). לחישוב מידת הבי-מודליות ראה, למשל, Sambrook Smith, 1996.

3. מקורות הסחף הנחלי

מערכת הנחלים מהווה את הנקוד הטבעי של אגן ההיקוות, ולאורכה מוסע הסחף שמקורו באגן. התפלגות הגדלים וכמויות הסחף הזמינים להסעה, נקבעים על ידי תהליכי הבלייה ויצירת הקרקעות באגן - תהליכים המתרחשים בפרקי זמן ארוכים. אספקת הסחף הזמין למערכת הנחלית, מתרחשת באופן בלתי רציף ותלוי בשני סוגי תהליכים: 1. תהליכים מדרוניים המניעים קרקעות וחומרי בלית בלתי מלוכדים בטווח גדלים רחב במורד המדרון לעבר בסיסו; 2. תהליכי החתירה המתרחשים

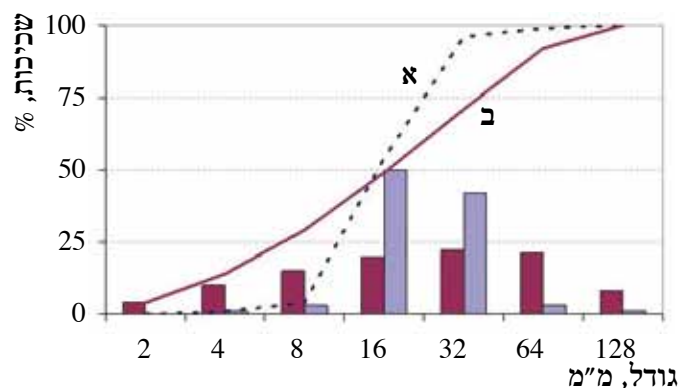
לאחר אזורים בתחומי אגן היקוות המועדים יותר לסחיפה, ואזורים מהם נתרם זיהום. משקלם הסגולי השונה של סלעים קובע את משקל החלוקים, ולכן גם את מקום שקיעתם בסובב הנחלי. המשקל הסגולי חשוב בעיקר בהקשר להשקעה של סחף בעל חשיבות כלכלית. הבולטים הם אורניום וזהב (Buck, 1983).

2.3 תכונות של אוכלוסיית חלקיקים

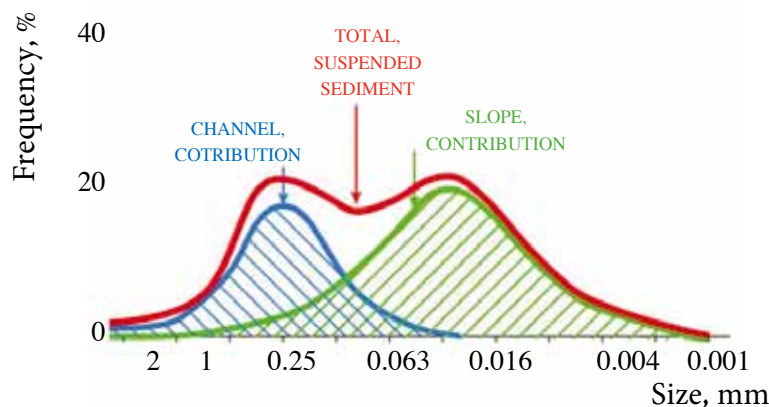
תכונות אוכלוסיית הסחף נקבעות מתוך מדגמים שנלקחים מהמים הזורמים, מהקרקעית או מגדת האפיק. למדגם בונים התפלגות של גודל הגרגרים לפי משקל, כאשר קבוצות הגודל בנויות לפי הסקלה של פי ϕ . מההתפלגות מתקבלים הפרמטרים המקובלים: שכיח (או שכיחים), ממוצע, חציון, סטיית התקן המהווה ביטוי לדרגת המיון של הסחף (תרשים 4) והנטייה (skewness) המהווה ביטוי לאי-סימטריה של ההתפלגות.

פרמטרים שונים של ההתפלגות, משמשים במשוואות לכימות תופעות הקשורות בהסעה של סחף ותפוקותיו. כמו כן, השימוש בהתפלגות גודלי הסחף הוא כלי יעיל בהבנת תהליכים הקשורים

הסחף הנחלי



תרשים 4: התפלגות גודל גרופת מאפיק נחל. ניתן גם להתייחס לשכיחות המצטברת הקטנה מגודל נתון: א. מין טוב ב. מין גרוע.



תרשים 5: התפלגות בי-מודלית של רחופת ממכשיר חיים 7 קרוב למוצא האגן, המעידה על שני מקורות לרחופת: המדרונות - המרכיב העדין והאפיק - המרכיב הגס של ההתפלגות (מתוך: לקח, 1992).

4. הרחופת במערכת הנחלית

4.1 אספקת הסחף

ארוזיה משטחית (interrill or sheet) ומרוכות בערוצונים (rills and gullies), מהוות את המקורות העיקריים של הסחף הנחלי (Parsons and Abrahams, 1992). תרומת הארוזיה המשטחית מסך כל הסחף הנשטף מאגן הניקוז משתנה אזורית, ונטען כי היא אמורה להוות לכל היותר כ-10% ממנה (Poesen et al., 1996). כמות הסחף הנכנס לערוץ בארוזיה משטחית, תלויה בתכונות הגשם והקרע. גורמי הגשם העיקריים הם עובי, עוצמתו והרכב הכימי של מימיו. תכונות הקרע הן הרכבה הכימי והפיסי, כולל היווצרות קרומים, מידת הכיסוי הצמחי, וכן אורך המדרון ושיפועו. מרבית תרומת הרחופת מגיעה מהזרימה המתועלת, בעיקר ממערכת מעורצת (gullied) כמו בצפון

בגדותיו ובקרעיתו של הנהר. עוצמתם ותדירותם של התהליכים המדרוניים, תלויה ביחסי גומלין בין תכונות המשקעים הנגזרים מן האזור האקלימי בו הם מצויים (סוג המשקעים - גשם או שלג) - עובי המשקעים השנתי, ההתפלגות העונתית, עובי גשם סופתי והתפלגות העוצמות במהלך סופה, ההפסקות בין הסופות) לבין תכונות פני השטח (פירוט נמצא אצל לקח, 2008). לא כל פעילות מדרונית תורמת סחף למערכת הנהר, אולם היא מספקת חומר זמין השווה באגן ההיקוות, עד להיווצרותם של התנאים המסייעים אותו אל המערכת הנחלית. לרוב, מספקים המקורות השונים סחף בטווח גדלים רחב. החלוקה לרחופת וגרופת, נעשית בתוך האפיק על ידי הזרימה הנחלית. הדיון בהמשך יחולק לפיכך לשני המרכיבים של הסחף הנחלי: רחופת וגרופת.

בתדירות האירועים הגדולים (Mertes, 1994).
בין הגורמים המשפיעים על כמות הרחפת
המוסעת בנחל ניתן לציין:

1. עונתיות הגשם ואורך התקופה (Walling and Webb, 1987; Sharma, 1996)
באזורים לחים, באזורים ים-תיכוניים ובאזורים
צחיחים, קיימת תופעה של ירידת השיא בריכוז
הרחפת עם קיצור תקופת היובש בין אירועים.
הריכוזים הגבוהים ביותר נרשמים באירוע ראשון
בעונה ההידרולוגית (Alexandrov et al., 2003);
באזורים ים-תיכוניים (Cohen and Laronne, 2005)
וצחיחים ובאירועים עם תקופה יבשה ארוכה
באזורים לחים. תופעה זו חוזרת על עצמה כל עונה
גם בנחל אשתמוע (Alexandrov et al., 2007).

2. עוצמה, תזמון ותפרוסת (כולל תנועה) תא
הגשם באגן הניקוז
מכיוון שבאזורים צחיחים וצחיחים למחצה זרימה
עילית היא בעיקרה זרימה הורטונית, קיימת
חשיבות ניכרת לעוצמות הגשם (Graf, 1988);
עוצמת הגשם משפיעה על
שחרור והסעה של סחף מדרוני לנחל. תפרוסת
הגשם חשובה במיוחד באזורים צחיחים וצחיחים
למחצה, בהקשר לגודל תא הגשם ביחס לגודלו של
אגן הניקוז. ברוב האירועים, נגר נוצר רק בחלק
של אגן הניקוז (Richards, 1982; Graf, 1988);
Sharma, 1996; Goodrich et al., 1995; - ראה
גם כהן, 2005). מיקום ועוצמת הגשם משפיעים
גם על זמן התגובה של המערכת הנחלית וגם על
מקורות הסחף.

3. תנאים פיזיקאליים קודמים באגן הניקוז, כולל
לחות וטמפרטורת הקרקע
אלה משפיעים על קצב החידור ובאופן זה על זמן
ומיקום של היווצרות הנגר (Castillo et al., 2003).
עלייה בלחות של גדות הנחל מעלה את משקל
הקרקע ובכך מגדילה את קצב התמוטטות הגדות
(Wolman, 1959). הקפאת המים בנקובים מורידה
את קוהזיביות הקרקע ומעלה את סחיפתיותו
בהפשרה (Thorne, 1982).

4. התפתחות כיסוי צמחייה השתנותו הבין-עונתית
באזורים צחיחים וצחיחים למחצה, השפעת הכיסוי
הצמחי נוספת להשפעתו של אורך התקופה

הנגב (Nir and Klein, 1974; שוקרון, 2009).
השיטות לחישוב והערכה של סחיפה מדרונית
הן: אמפירית, במודלים, ומדידות בשטח. בין
המודלים האמפיריים, הידועה ביותר היא המשוואה
האוניברסלית לחישוב תפוקת איבודי הקרקע
(Universal Soil Loss Equation (USLE):

$$A = R K L S C P \quad (2)$$

כאשר A תפוקת סחף שנתית ממוצעת, R
גורם הגשם (תלוי בעוצמה, כמות, ומשך), K
גורם סחיפת הקרקע (מדד של רגישות הקרקע
לסחיפה המושפע מטקסטורת הקרקע, מתכולת
החומר האורגני, ממבנה ויציבות הקרקע וממידת
החדירות), LS הגורם הטופוגרפי (שילוב של
השפעת האורך ושיפוע המדרון), C גורם כיסוי
פני השטח (תלוי אם הקרקע חשופה, בעלת
צמחייה או כיסוי אורגני), ו- P גורם שימור
הקרקע (לדוגמה ראה <http://topsoil.nserl.purdue.edu/usle/>).
בין המודלים המבוססים על עקרונות
פיזיקאליים, ניתן לציין את KINEROS, WEPP
(<http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/weppmain>)
(<http://www.tucson.ars.ag.gov/kineros>)

ואחרים. לדיון נוסף בנושא של שימוש במודלים
להערכת סחף ראה, לדוגמה, (Nearing 2006).
שיטה ישירה סטטית למדידה של קצב ארוזיית
הקרקע, משתמשת בעוקבים סביבתיים, כמו
מרכיבים רדיואקטיביים סביבתיים, ¹³⁷Caesium,
²¹⁰Pb ו- ⁷Beryllium. מדידת ריכוזים של
מרכיבים אלו בכתך קרקעי לא-מופרע, בכתך
מופרע על ידי ארוזיה ובכתך מופרע על ידי
השקעה של קרקע, מאפשרת הערכה על קצבי
ארוזיה בסובב נתון (Walling, 2006).

לצד הסחיפה המשטחית, נמצאת הסחיפה
בערוצונים. בסובכים רבים עשויה הסחיפה
בערוצונים להגיע עד 83% מכלל איבודי הקרקע
(Nir and Klein, 1974; Poesen et al., 1996);
(Quine et al., 1999; Poesen et al., 2003).
ערוצונים מתפתחים במיוחד בקרקעות מעובדות
בגידולים עונתיים ובשיפועים תלולים.

לא כל הסחף שנוצר במדרונות מגיע לנחל. חלקו
העיקרי שוקע במורד המדרון בקולוביום, בטרסות
מדרוניות, בלימנים, ובבריכות מלאכותיות. גם
במהלך ההסעה הנחלית שוקע חלק מהסחף בגדות,
ובמהלך זרימות שיטפוניות גבוהות גם בפשט
הנחל. לפיכך, זמן ההשהות של סחף בפשט תלוי

ותשתית הנחל מתרחשות בזמן הגאות, כאשר סחף משתחרר ומוסע במים. מים ראשונים שוטפים את הערוץ וגורמים לעלייה בריכוז הסחף. ארוזיה מסוג אחר מספקת את הסחף מגדות הנחל בעת שפילת המים. בזמן זה יכולות להיווצר גלישות קרקע עקב עלייה בלחות ובמשקל הקרקע ו/או התפתחות של מיחתור (Quine et al., 1999) (piping). תהליך זה חשוב במיוחד באזור צחיח למחצה בסביבה לסית, כאשר מים שוטפים חרסיות מהגדות, מכיוון שחרסיות הן החומר המלכד העיקרי בקרקעות העניות בחומר אורגני, ובלעדיהן הקרקע מאבדת את הקוהזיביות שלה (Thorne, 1982).

4.2 הסעת רחופת במערכת נחלית

לא רק האספקה של הסחף למערכת נחלית משפיעה על תפוקת הסחף מאגן הניקוז. הגורם הנוסף לאספקת סחף הוא הסעתו במים. מחקרים גיאומורפולוגיים בנושא רחופת נחלית החלו בשנות ה-50, בדגש על הקשר בין ריכוז הרחופת לבין ספיקת המים (Webb et al., 1995).

קיימת נטייה לקיומם של ריכוזים גבוהים של רחופת באזורים צחיחים וצחיחים למחצה, עקב כיסוי צמחי דליל ותהליכי בלייה אינטנסיביים. אך גם בסביבות אחרות נמדדו ריכוזי רחופת גבוהים. כך, ב-Chinese Loess Plateau ריכוזים של 800-גרם לליטר נחשבים כריכוז "יציב" של רחופת (Hessel, 2002); ביובלים של ה-Yellow River ריכוזים הגיעו ל-1,700 גרם לליטר (Long and Xiong, 1981); זרימות בוך שמתרחשות באזורים הרריים, מכילות כמויות גבוהות מאוד של סחף (Batalla et al., 1999); כמו גם אירועים שמתרחשים בסביבת סלעים ארוזיביים, כמו חווארים בדרום צרפת, שריכוזי הרחופת שם מגיע ל-500 גרם לליטר (Mathys, 1995 in Hessel, 2002); זרימות בוך אחרי התפרצות של הר געש, מכילות עד 1,000 גרם לליטר סחף (Scott, 1988). זרימות כמו זרימת בוך (ריכוז סחף יותר מ-1,285 גרם לליטר, לפי Costa, 1988, in Hessel, 2002) וזרימת מרוכזת-יתר (hyperconcentrated) עם ריכוז סחף מעל 530 גרם לליטר, אינן זרימות ניוטוניות; אלא Non-Newtonian Bingham Solid.

בטבלה 2 מרוכזים נתונים לגבי תוצאות של מעט המחקרים בסקלת הנחל, שנערכו באזורים צחיחים וצחיחים למחצה. רשומים בה שם הנחל,

היבשה. משך הזמן בין אירועי גשם ונגר בעונת הגשמים הנו קצר; לכן, לחות הקרקע נשארת גבוהה ומתפתח כיסוי צמחי שמגן על הקרקע ומקטין את אחוז הנגר (ראה לדוגמה שכנוביץ, 2006). קיימות עדויות לגבי כמויות שנתיות של הסחף: לדוגמה, באזור צחיח בהודו עם קרקעות לא-מעובדות, כיסוי צמחי של 3% מקטין את תפוקת הסחף השנתית ל-0.3 מ"ק לדונם, ביחס למשטח חולי ללא צמחייה בו הסחיפה הנה 3.6 מ"ק לדונם (Sharma, 1996). תפוקת הסחף תלויה גם בסוג הצמחייה (Cerde, 1998) ובמידת התפתחות השורשים (Gyssels and Poesen, 2003). כך, קצב הסחיפה משדה מרעה (בשיא התפתחות הצמחייה) היה רק 20% מקצב הסחיפה משטח עם שיחים (Parsons et al., 1996).

5. שימושי קרקע

השפעתו של גורם זה ניתנת לאבחנה מעדויות לשינויים בשימושי קרקע יחד עם נתונים הידרולוגיים. כך, באגן הניקוז של נחל הוגה בישראל, הפסקת רעייה הביאה לשיקום הכיסוי הצמחי, הקטנה בנגר העילי ובתפוקת הסחף (Rozin and Schick, 1996). קיימות עדויות נוספות להשפעתם של שימושי קרקע על תפוקת הסחף דרך שינויים בספיקת הנגר (Walling, 1999; Walling and Kleo, 1979). ב-Goodwin Creek, עלייה בשכיחות קרקע בחריש, גרמה לעלייה בכמויות הנגר העילי ובתפוקת הסחף. חקלאות מסורתית באזורים ים-תיכוניים מבוססת על בניית טרסות, שימור קרקע והוספת נגר לגידולים מהרס של טרסות, נסחפת לא רק הקרקע ממנה הייתה הטרסה בנויה (Inbar and Zgaier, 1996), אלא גם קרקע רכה במורדה. ספיקות ומהירויות גבוהות שנוצרות בעקבות ההרס, חורצות ערוצים במורד ומתבטאות בסחיפה מוגברת (Inbar and Llerena, 2000).

6. מקורות הרחופת והשתנותם הבין-אירועית

במקורות הרחופת מברילים בין מדרונות לבין גדות (הפשט או גדות אחרות, כולל לס או סלע) האפיק. מדרונות מספקים סחף למערכת נחלית בו בזמן עם הנגר העילי, ובדרך כלל לא נוצר הפרש ניכר בזמן הגעת גל המים וגל הסחף לערוץ. ארוזיית גדות

טבלה 2. סיכום מחקרים בנושא הסעת רחופת נחל'ית באזורים צחיחים וצחיחים למחצה, בדגש על מחקרים בישראל

Method of sampling	Type of SSC=f(Q) relation	Event duration	Number of events	Maximum concentration	Annual depth of precipitation	Catchment area	River location	Reference
		hours		g/l	mm	km ²		
Manual sampling	Flushing Varied hystereses	4	1	55	300-500	505	Verde River Arizona	Fisher and Minckley, '78
USDH-48	Flushing - clockwise hysteresis	100	4	> 15	308	7	Il Kimere Kenya	Frostick et al., '83
Manual sampling (or USDH-48)	SSC = f(lithology), flushing – clockwise hysteresis	?	26	54 - 453	300-600	34,866	Luni Basin India	Sharma et al., '84, Sharma, '96
Uppsala manual sampler	Flushing – clockwise hysteresis	?	6	87	640	0.3	Katorin River Kenya	Sutherland and Bryan, '90
Manual sampling "Haim" sampler, rising stage only	Flushing	6	2	26 / 39	190	30	Homestead Creek Australia	Dunkerley and Brown, '99
"Haim" sampler, rising stage only	?	?	-	900 (60%), mud flow	20-150	0.06-1.5	Mount Sdom Israel	Gerson, '77
Manual sampling; rising stage only	Flushing Varied hystereses	1 - 7	4	285	31	0.6	Nahal Yael Israel	Lekach and Schick, 1982; Schick and Lekach, '93
Manual sampling;	Flushing Varied hystereses	8 - 60	9	186	220-350	110	Eshtemoa Israel	Alexandrov et.al., '03
Pump sampler	Flushing Varied hystereses	1 - 250	13	250 - 500	390	270	Wadi Wahrane, Algeria	Benkhaled and Remini, '03

ריכוזי הרחופות עם הספיקה. כאשר קצב העלייה של ריכוזי הרחופות שונה מקצב ירידתו, נוצרות היסטרוזות עם או נגד כיוון השעון. באירוע נתון, ייתכן כי ישנן שתי עליות בספיקה הנוצרות בתנאים הידרולוגיים שונים ולכן ההיסטרוזות הנן לכיוונים מנוגדים (Fisher and Minckley, 1978). באזורים צחיחים, ריכוזי הסחף המרחף גדל במורד (Sharma et al., 1984; Sharma, 1996), כתוצאה מאיבודי תמסורת לתשתית הנחל (transmission losses) במהלך הגאות וירידה במהירות ובערבוליות המים (Shentsis et al., 2001a,b). במורד הזרימה משתנה לא רק ריכוזי הרחופות, אלא גם משתנה פיגור שיא הגאות ביחס לשיא הריכוזי המקסימלי של הרחופות. פיגור זה גדל במורד (Richards, 1982), כל עוד אין מקורות נוספים של רחופות. לעומת זאת, כאשר מקור הרחופות הנו בסחיפת גדות הנחל, שיא ריכוזי הרחופות יכול להקדים את שיא הספיקה לאורך כל הנחל.

התפלגות רחופות אינה הומוגנית בעמודת המים, ותלויה בהתפלגות של מהירות המים (מאמץ גזירה), אספקה של רחופות מתשתית הנחל (יחס בין גרופת לבין רחופות) ומידת הערבוליות (טורבולנטיות) בזרימה ראה לדוגמה (Orton and Kineke, 2001). באופן כללי, ניתן לתאר את פילוג הרחופות בזרימה דו-ממדית באמצעות המשוואה של Einstein-Rouse (ראה לדוגמה (Yalin, 1963):

$$\frac{C_z}{C_a} = \left[\frac{a(d-z)}{z(d-a)} \right]^{2.5\omega} \quad (3)$$

כאשר d עומק החתך, a עומק בו ידוע הריכוז (C_a) , z עומק בו יש לחשב את הריכוז (C_z) , מהירות נפילה סופית של החלקיק בגודל הנתון, ω^* מהירות הגזירה של הזרימה. מכאן ניתן ללמוד, שריכוזי רחופות בנקודה בחתך אנכי של מים תלוי בגודל החלקיק ובתכונות המים המשפיעות על צמיגותם, כמו טמפרטורה ומוליכות.

פילוג ריכוזי הרחופות, אינו הומוגני בחתך רחב של הערוץ. גורמים לכך הם התפלגות מהירות המים בחתך הרחוב ואספקה של רחופות מהגדות ומתשתית הנחל (Leopold et al., 1995).

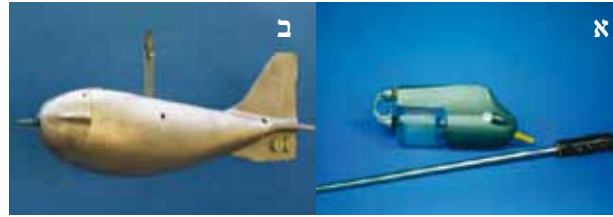
4.3 שיטות מדידה של ריכוזי רחופות

אופן החישוב של שטף הרחופות בנחל, תלוי

האזור בו נמצא אגן הניקוז ושטחו, גשם שנתי (כמו שמופיע במאמר המצוטט) מספר אירועים בו נמדדה הרחופות, משך ממוצע של האירוע הבודד, ריכוזי הרחופות המקסימלי ושיטת הדיגום. רוב המידע נאסף בדגימות נקודתיות באופן ידני או במאמץ טכני מועט. דגימות כאלה אינן מאפשרות ניטור וניתוח מקיף של התנהגות עתית של ריכוזי הרחופות בנחלים. ריכוזים, למעט ריכוזי רחופות בנחלי הר סדום (Gerson, 1977), אינם עולים על 500 גרם לליטר, ולכן זרימת מים באירועי נגר הנה זרימה שניתן להתייחס אליה כניוטונית.

ממחקרים שנעשו באזורים לחים בנחלי איתן, ידוע שהקשר בין ריכוזי הרחופות לבין ספיקת המים מקבל מגוון צורות. סוג הקשר נובע מקצב שונה בהשתנות של הפרמטרים הללו. היסטרוזה עם כיוון השעון, שבדרך כלל מאפיינת את הקשר הזה בנחלים באזורים צחיחים וצחיחים למחצה (טבלה 2), מתפתחת כתוצאה מתהליכי סחיפה, כאשר חומר מרחף מוסע על ידי המים המופיעים בתחילת הגאות וזורמים כזרימה משטחית ובערוץ או כאשר המקור העיקרי של רחופות הנו סחיפת גדות הנחל במשך עליית ההידרוגרף (Fisher and Minckley, 1978). היסטרוזה נגד כיוון השעון (ריכוזי הרחופות המרבי מופיע לאחר ספיקת השיא), מתרחשת כאשר סחף מגיע לערוץ הנחל יחד עם גוף המים העיקרי ומוסע עמו בגאות. עליות מאוחרות בריכוזי הרחופות באות לידי ביטוי, כאשר קיימים מקורות מרוחקים של סחף דק-גרר (מחצבות, חפירות, שדות חקלאיים בחלק עליון של אגן הניקוז); מצב זה יכול להיווצר כאשר מקסימום הרחופות מגיע לערוץ בשפילה (Williams, 1989) או כאשר ישנה תנועה של מערכת הגשם במעלה האגן (אלכסנדרוב, 2005).

מכל האמור, נובע שנוסף לששת הגורמים שפורטו בתת-פרק "אספקת סחף" המגדירים אספקה של סחף לנחל, מופיעים גורמים נוספים המשפיעים בעיקר על אופי ההסעה של רחופות, כמו היחסים בין ההידרוגרף והתקדמותו במורד לבין הסדיגרף, כאשר מקורות הסחף במי גאוויות משתנים בין האירועים. גורם זה מתבטא בצורת הקשר בין ריכוזי הרחופות לבין ספיקת המים (Williams, 1989; Reid and Frostick, 1997). אם שני הפרמטרים משתנים בו בזמן, הקשר הוא ישר או לוגריתמי ושונה רק בקצב עלייה (ירידה) של



תרשים 6: א. דוגם רחופת איזוקינטי ידני (DH48) לשימוש בעומק מים רדוד; ב. דוגם רחופת איזוקינטי לעומקים גדולים (Davis, 2005).

חלקיקים, לקבלת ריכוז וגודל חלקיקי הרחופת. יתרונה העיקרי של השיטה הוא, יכולת מדידה בחתך אנכי והחיסרון הוא, קושי הכיול.

החזרת קרן לייזר - בשיטה זו נמדד זמן החזרת קרן לייזר מגרמים מרחפים. השיטה אינה תלויה בגודלי גרגר, אך היא יקרה מאוד ומבוצעת ליחידת נפח קטנה מאוד בזרם.

שבירת קרן לייזר - בשיטה זו נמדדת זווית השבירה של קרן לייזר על גרגרי הסחף. השיטה דומה לשיטה הקודמת, אך לא נמצאת בשימוש בגלל העלות והקושי בכיול.

שיטות גרעיניות - בשיטות גרעיניות נמדד הפיזור או מידת ההעברה של קרני גמה או של קרני X בסביבה מימית. לעומת השיטות האופטיות, אין הגרעיניות תלויות בצבע המים ובחומר אורגני מרחף. לשיטות הגרעיניות יש רגישות נמוכה, זמן מדידה ארוך יחסית (3-5 דקות), ובנוסף לכך הצורך בשימוש בחומרים רדיואקטיביים מגביל את השימוש בהן.

שיטות אופטיות - בשיטות אופטיות נמדדת מידת הפיזור או ההעברה של קרני אור אינפרא אדום או אור נראה בסביבה מימית. מידת פיזור האור גדלה באופן ליניארי עם העלייה בריכוז הרחופת. התגובה של ירידה בהעברת אור עם עלייה בריכוז מרחפים, בדרך כלל איננה ליניארית. המכשור האופטי פועל באופן עצמאי אחרי התקנה בערוץ, אך דורש כיול מדויק עם החומר המקורי המוסע בנחל, שכן תכונות אופטיות תלויות באפיוני החומר המרחף (גודל וצורת הגרגר, צבע, הרכב מינרלי וכמות החומר האורגני - Gippel, 1995). אי דיוקים בהערכת הריכוז, לרוב נובעים משינוי בתכונות הסחף המוסע. כיום, שיטה זו הנה המקובלת ביותר ברוב המדעים, לרישום רציף של ריכוז הרחופת המדעים, לרישום רציף של ריכוז הרחופת (Lewis, 1996; Gippel, 1995). לקבלת תוצאות

בשיטות למדידת ריכוז הרחופת. קיימות מספר שיטות למדידה של ריכוז הרחופת במים (Wren et al., 2000).

1. שיטות ישירות:

דיגום בבקבוקים - דגימת המים נלקחת בבקבוק באופן איזוקינטי (שמירת מהירות זרימת המים בכניסתם לבקבוק על ידי צורתו המיוחדת של בקבוק הדגימה), ומועברת למעבדה. קיימת אפשרות לקחת דגימות בנקודה וגם לעשות דיגום אינטגרלי לעומק (תרשים 6). שיטה זו הנה המקובלת ביותר ומשמשת כשיטת סטנדרט לכיול שיטות אחרות. חסרונה הבולט של השיטה הוא, שהיא מחייבת נוכחות לביצוע הדגימה.

דיגום בשאיבה - בשיטה זו, דגימת המים הכוללת את הרחופת, נשאבת דרך צינור שפיתחו ממוקם במקום מוגן באפיק. יש אפשרות לתכנת את הדגימה לפי פרקי זמן שאינם בהכרח קבועים או במקרה שהמשאבה מחוברת לחישנים נוספים, לפי עומק, מהירות מים, לפי קצב שינוי בעומק/ספיקה או בהתאם לשינוי בעכירות המים (Lewis, 1996). הדגימה מבוצעת באופן אוטומטי. החיסרון העיקרי של השיטה הוא, שהדיגום נקודתי והוא מוגבל בתדירות בגלל הזמן הדרוש לשאיבה (כ-2 דקות; תלוי במרחק ובהפרש הגובה בין מיקום הדגימה ובין המשאבה). בעיה אחרת של השיטה היא מהירות השאיבה, שצריכה להתאים למהירות הזרימה ולגודל חלקיקי הסחף המרחף. השוני בין מהירות השאיבה לבין מהירות הזרימה, יכול להוביל להתפלגות גודלי סחף נדגם שונה מזה של הסחף המרחף במי הנחל. בדרך כלל הדיגום אמין לרחופת דקת-גרגר, עד 63 מיקרון (Wren et al., 2000).

2. שיטות עקיפות

שיטה אקוסטית - שיטה לפיזור גלי קול על ידי

מקורות הגרופת משתנים, בהתאם למיקום על פני רשת הניקוז של אגן ההיקוות. בחלקים העיליים של האגן - המקור העיקרי לגרופת הם המדרונות, הקרובים לאפיקי הנחלים והתנועות המדרוניות המסיעות את הבליית המדרונית לבסיסו (תרשים 7). אך ישנם אגנים בהם המדרונות קרובים לערוץ לכל אורכו וגם קרובים למוצא כאשר סדר הנחל גבוה. תהליכי הבלייה הפועלים על המסלע ממנו בנויים המדרונות, מכינים על פני המדרון חומרי בליית בפילוג רחב של גדלים, משכרי סלע גדולים הנמדרדים במטרים ועד לחלקיקים בגודל של מיקרונים בודדים.

תפוקת החומר המסופקת לאפיקים ממדרונות, תלויה בשלשה גורמים: מידת הבלייה של סלעי המדרון, הכמות וסוג חומרי הבליית המונח על המדרון וזמינותו לתנועה, ועוצמתם של התהליכים המדרוניים המניעים את חומרי הבליית מהמדרון לבסיסו. תכיפותן של התנועות המדרוניות, מוכתבת בעיקר על ידי עובי המשקעים ועוצמתם, אך גם על ידי גורמים כמו רעידות אדמה, התחתרות בבסיס המדרון וערעור יציבותו. כלומר, ישנם מצבים בהם תפוקת הגרופת ופילוג גדליה, תלויים יותר בגורמים נוספים לזרימה. כמות גדולות של חומר המסופק מן המדרונות לאפיקים ועולות על יכולת ההסעה של הערוץ, יוצרות אזורי אוגר של סחף זמין להסעה. לעתים, תנועות מדרוניות חריגות בעוצמתן יכולות לגרום להצרויות וחסימות באפיקים, הגורמות לשינויים בתוואי הזרימה שנשמרים למשך אלפי שנים (Korup et al., 2006).

המקור השני לגרופת הוא הסביבה המיידית של הנהר, קרי, גדותיו ותשתיתו. כמות החומר הנכנסת לאפיק ממקורות אלה, תלויה בעוצמת הזרימות בו

אמינות יותר, נהוג להשתמש במספר שיטות בו בזמן, למשל דיגום בבקבוקים או בשאיבה יחד עם רישום רציף של חיישן אופטי, כפי שנעשה זה שנים בנחלים רחף ואשתמוע.

5. הגרופת במערכת הנחל

ההכרה בחשיבותו של מידע על הגרופת המוסעת על ידי הנחלים, הביאה לריבוי מחקרים בנושא. היכולות הטכנולוגיות השונות המאפשרות דיגום ומדידה של הגרופת תוך כדי הסעתה (לדוגמה, כהן, 2005), היוו צעד חשוב בלימוד מגוון התהליכים הקשורים בהסעת הגרופת ומקורותיה.

5.1 מקורות הגרופת

לגרופת המוסעת בזרימה ערוצית שלשה מקורות: מדרונות העמק, תשתית האפיק וגדותיו, ויובלים.



תרשים 7: תרומה מדרונית לנהר הדס (באזור הקניוני) היורד מהרי האטלס לכיוון הסהרה, מרוקו.



תרשים 9. באפיקי הנחלים ברמת הגולן הבזלתית, פריטי גרופת רבים הם עמודי בזלת אשר נותקו ממקומם.



תרשים 8: תרומה שונה של חומר ממדרון המהווה גדה שמאלית ומספק שברי סלע והגדה הימנית שהתחתרות בה מספקת חומר דק-גרגר. הזרימה לכיוון המסתכל. נהר ורזאזט, מרוקו.

רינולדס המקובלים לזרימה בתעלות, מתקיים קשר ישיר בין קוטר החלקיק (D) לבין מאמץ הגזירה הקריטי הדרוש לתחילת תנועתו (τ_c):

$$\tau_c = n \frac{\pi}{6} D^3 \rho' g \tan \phi = \eta \frac{\pi}{6} D \rho' g \tan \phi \quad (4)$$

כאשר ρ' הצפיפות הטבולה של חלקיקי הגרופת ושווה להפרש בין צפיפות החלקיים לבין צפיפות המים ($\rho' = \rho_s - \rho_w$), ϕ זווית הגזירה הפנימית, η משתנה חסר ממדים ($nD^2 \equiv$) המגדיר אריזה ו- n הינו מספר החלקיקים ליחידת שטח. כלומר, יוצא שהמאמץ הקריטי פרופורציוני לקוטר הסחף. מכאן יוצא ש-

$$\tau_c / \rho' g D = \eta \tan \phi = \text{const} \quad (5)$$

בתשתית ערוץ בו האריזה של חלקיקי התשתית (bedmaterial) אינה דחוסה או פתוחה במיוחד, הקבוע במשוואה 5 הנו 0.056. מכאן יוצא שניתן לחשב את מאמץ הגזירה הדרוש לתחילת תנועה של גרופת, על ידי חישוב מאמץ הגזירה הממוצע הקריטי המתאים לעומק מים נתון:

$$\tau_c = \gamma R_c S \quad (6)$$

כאשר R_c הוא הרדיוס ההידרולי הקריטי בו חלה תנועה של חלקיק שקוטרו D. יש להדגיש כי מאמץ הגזירה במשוואה 6 הנו ממוצע לחתך והוא למעשה משתנה בחתך בהתאם לטופוגרפיה ולגודל הגרגר בתשתית הערוץ (Habersack and Laronne, 2001). יתר על כן, מסתבר כי תחילת התנועה של חלקיקי נחל תלויה במידה ניכרת באריזה של החלקיקים (Laronne and Carson, 1976). אלה במיוחד מושפעים מהמידה בה ישנם מקבצי חלקיקים (Wittenberg et al., 2007). סיכום מקיף יחסית על תחילת תנועה, פורסם לפני כעשור (Buffington and Montgomery, 1997). הבעייתיות בקביעה מדויקת של תחילת תנועה, נובעת גם מאסופה של תהליכים: הרעדה של חלקיקים, תנועתם הסיבובית במסתורי חלקיקים, התפרצויות ערבולים באזורים אלה ולבסוף תנועה בין אזורים מוגנים פעילים לאחרים (Garcia et al., 2007). תחילת התנועה של גרופת גבוהה במידה ניכרת בערוץ שתשתיתו משוריינת (מרבית ערוצי הנחלים בגליל ובכלל אלה עם זרימת בסיס מודגשת), לעומת ערוץ שתשתיתו איננה משוריינת (מרבית הערוצים בדרום הארץ, בעמק הירדן התחתון ובערבה).

ומידת העמידות של הגדות והקרקעית לסחיפה. מקורות אלה מאפיינים את כלל האפיקים, אך בולטים יותר בערוצים גדולים בעמק רחב יחסית בעל פשט מפותח. גודל החומר הנתרם, תלוי במאפייני התשתית בה זורם הנהר (תרשים 8).

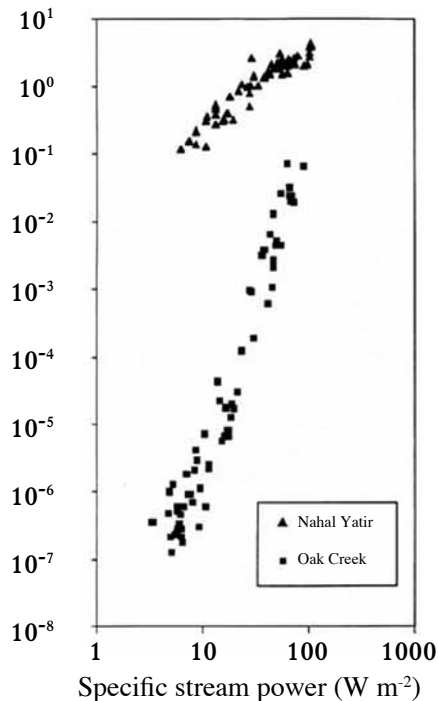
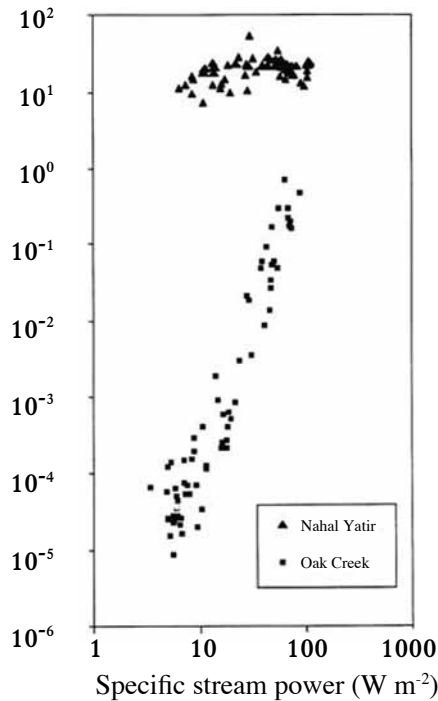
כאשר לנהר תשתית סלעית, ישנה חשיבות לקשיות הסלע, לרמת הסידוק ולמידת הבלייה שלו. גורמים אלה קובעים את גודל החומר המנותק מן הקרקעית והנע כגרופת. באפיקי הנחלים ברמת הגולן הבולתית, פריטי גרופת רבים הם עמודי בזלת אשר נותקו ממקומם (גרודק, 1994) (תרשים 9). בתשתית אלוביאלית התמונה מורכבת יותר, ותלויה במבנה ובהרכב התשתית.

המקור השלישי לגרופת, הם יובלים. תרומת היובלים ניתנת לתיאור על פי שני תרחישים: (1) היובלים הם מקור של גרופת גסה, מזוותת ובלתי ממוינת, הנכנסת לאפיק שלאורכו התרחשו תהליכי מיון והתעגלות החלקיקים. במקרה זה, העיגוליות והתפלגות גודל הסחף במורד המפגש עם היובל, יראו בברור על קיומן של שתי אוכלוסיות סחף: האחת שעברה דרך קצרה ביובל, והשנייה שעברה דרך ארוכה לאורך האפיק הראשי. אפשרות אחרת היא במפגש יובלים מאותו הסדר. במקרה כזה, תכונות הסחף המסופק למפגש היובלים, תלויות במאפייני אגני ההיקוות התורמים סחף לנקודת המפגש. (2) הבדלים ניכרים בשיפועים בין היובל לבין האפיק הראשי, עלולים לגרום להשקעה של גרופת מהיובל באזור החיבור על הפשט או באפיק הראשי, ולייצור אזור של אוגר, שקצב שחרורו תלוי בעוצמת הזרימות באפיק הראשי. דוגמה למצב זה הוא שיטפון גדול ומקומי, שאירע ב-1971 בנחל מכימין - יובל קטן של נחל ותיר במזרח סיני. השיטפון יצר מניפת סחף בתוך אפיק הותיר, אשר ללא זרימה מקבילה באפיק הראשי, חסמה את מי המעיינות שהיוו זרימת בסיס נמוכה מאוד בותיר (תרשים 10). במעלה החסימה נוצר אגם שהתקיים כשנה, עד לשיטפון גדול בנחל ותיר שפינה את המניפה (Schick and Lekach, 1987).

5.2 תחילת תנועה של גרופת

תחילת התנועה של גרופת נבחנה במחקרים רבים, שהידוע ביותר הנו היסטורי אך עדיין בתוקף. זהו המחקר המקורי של שילדס (Shields, 1936): עיקר התובנה מניסיונות המזרם שלו הנה, שבמספרי

הסחף הנחלי



תרשים 11: שטף הגרופות משתנה עם הספק הנחל, אך הוא גדול פי מיליון בנחל אכזב בצפון הנגב (נחל יתיר) לעומת נחל איתן באורגון ארה"ב (דומה לנחל דן) בהספקים נמוכים (א). ההפרש בין הנחלים קטן, ככל שהספק הנחל גדל. היעילות הגבוהה להסעת גרופות של נחל יתיר, לעומת היעילות הנמוכה (אך הגדלה מהר מאוד) להסעת גרופות בנחל הדומה לנחל דן (ב). ראה (Laronne and Reid, 1993).



תרשים 10: מניפת סחף מאירוע ינואר 1971 בוואדי מיכמיין (מזרח סיני) (תחומה בקו אדום) שחסמה את מי המעיינות שהיו זרימת בסיס נמוכה מאוד באפיק הוותיר. כיוון הזרימה בוואדי מיכמיין מסומן במשולש כחול וכיוון הזרימה בוואדי ותיר בחץ כחול.

5.3 משוואות שטף גרופות

משוואות שטף גרופות (bedload discharge formulae) קיימות בשפע, ובכל שנה מתפרסמים משוואות ופיתוחים חדשים. מרבית המשוואות הן חד-ממדיות ואמפיריות במידה ניכרת. הן פותחו על סמך קשרים שנבחנו בתנאי מעבדה (מזרם), ועל כן, אין הן מתאימות לכל הערוצים. פיתוחים של משוואות היסטוריות, כוללים הכללת ההשפעות של גודלי גרגר ובעיקר שריון, של בליטות ונחבאות, של צורת החלקיקים והסידור המרחבי שלהם ופרמטרים נוספים.

נוסחאות רבות לספיקת גרופות הן מטיפוס:

$$q_b = k (\tau - \tau_c) \quad (7)$$

כאשר k מקדם, שעיקר הקושי הנו בהבנת הפרמטרים המשפיעים עליו. זו גם המשוואה ש-Shields הציע. נעבור על כמה משוואות מקובלות ונבדוק את התאמתן לערוצי נחלים בישראל.

גישתו של Bagnold (1980) לנחל, הנה שהוא כמו מכונה, בעל הספק ליחידת אורך (Ω) ויעילות גרופת (e_b). מכפלתם היא העבודה הנעשית להסיע גרופת. נסמן: ρ צפיפות, g תאוצת הכבידה, $\gamma = \rho g$ משקל סגולי, S_c הגרדינט ההידרולי,

$$\epsilon / \rho' g D = \eta \tan \frac{\pi}{6}$$

למשל Anon, 2008. המשוואה הנה:

$$\frac{\left[\frac{q_b}{\rho_s} \right]}{D\omega} = a \left[\frac{\tau_o}{\rho'gD} \right]^b \quad (13)$$

Φ פונקציית הגרופת	$1/\Psi$ פונקציית הזרם
------------------------------	------------------------------

כאשר q_b הנה שטף גרופת (מסה לזמן). במשוואה של איינשטיין מקובל להשתמש בנחלים חוליים. אחת ממשוואות הגרופת הנפוצה ביותר, היא משוואת Meyer Peter and Müller (1948), שפותחה במזרם עם גודלי גרגר שונים. המשוואה הנה

$$\frac{R_h(k/k')^{3/2}S}{d_m} - 0.047(\tau_o -) = 0.25\rho^{1/3} \frac{(q_s')^{2/3}}{d_m} \quad (14)$$

כאן R_h רדיוס הידרולי, k מקדם הקשור לשיפוע S , k' מקדם חספוס כתוצאה מהפסד אנרגיה 'S' בגלל חספוס גרגרי, d_m קוטר גרגר ממוצע, ו- q_s' שטף הגרופת ביחידות של מסה טבולה ליחידת רוחב ליחידת זמן. מסתבר, שמשוואה זו מתאימה במיוחד לנחלים בדרום הארץ (Reid et al., 1996). משוואה חשובה פותחה במיוחד לנחלים משוריינים (Parker, 1990). כאן הוצע רעיון מהפכני, שבנחלי איתן, שם חלקיקי הסחף הדקים מנופים מפני השטח שבתשתית האפיק (winnowing) ויוצרים מגן, פילוג גודלי הגרגר בפני השטח זהים לאלה בתת-פני השטח, פרט לכך שבאחרון חסרות הפרקציות הדקות - אלה שנופו. בעת הסעת גרופת, הוצע שמתקיים תהליך של ניפוי אנכי, בו ממשיכה להתקיים שכבת המגן, כל עוד לא מוסעים כל חלקיקי הסחף הגסים ביותר. המשוואה הנה:

$$q_s = W_i^* (yS)^{1.5} g^{0.5} \rho_s / (s-1) \quad (15)$$

$$W_i^* = 0.00218G(\omega_0 \phi_{sg0} g_0(\delta_i))$$

$$\phi_{sg0} = \frac{\tau_{sg}^*}{\tau_{sg0}^*}; \tau_{sg}^* = \frac{\tau}{\tau(s-I)gd_{sg}}; \tau_{sg0}^* = 0.0386; \delta_i = \frac{d_i}{d_{sg}}$$

$$g_0(\delta_i) = \delta_i^{-\beta}; \beta = 0.0951$$

$$5474(1 - \frac{0.853}{\phi})^{4.5} \quad \text{מוגדר על ידי } \phi > 1.59$$

$$\exp[14.2(\phi-1)-9.28(\phi-1)^2] \quad 1 \leq \phi \leq 1.59$$

$$\phi^{M_0} \quad \phi < 1$$

$S_b = S$ שיפוע אורכי של קרקעית האפיק, Q ספיקת מים נפחית, d עומק מים, u מהירות מים, W רוחב פני המים, $\omega = \Omega/W$ הספק ליחידת רוחב.

ניתן לראות שהספק הנחל נקבע ע"י משקל המים, שיפוע האנרגיה שלהם ומרחק ההסעה ליחידת זמן. ולכן במצב תמידי, הספק הנחל ליחידת אורך הנו:

$$\Omega = \rho g Q S_c \approx \gamma Q S \quad (9)$$

וההספק ליחידת אורך וליחידת רוחב הנו:

$$\Omega / W = \omega = \gamma W d u S / W \approx \gamma R S u = \tau u \quad (10)$$

כלומר, ההספק האפקטיבי ליחידת רוחב הנו, מכפלה של מאמץ הגזירה הממוצע, המהירות הממוצעת של המים ויעילות הנחל להסעת גרופת:

$$\omega = \tau u e_b \quad (11)$$

למעשה שטף הגרופת מוגדר על ידי

$$q_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} q_{sr} \left[\frac{\omega - \omega_c}{(\omega - \omega_c)_r} \right]^{3/2} \left(\frac{y}{y_r} \right)^{-2/3} \left(\frac{d}{d_r} \right)^{-1/2} \quad (12)$$

כאשר $\omega = \rho g y S u_m$

$$\omega_c = 5.75 [(\gamma_s - \gamma) \rho 0.04]^{3/2} (g/\rho)^{1/2} d^{3/2} \log(12 y/d)$$

$$d_r = 0.0011; y_r = 0.1; (\omega - \omega_c)_r = 0.5; q_{sr} = 0.01$$

כאשר ω_c הוא ההספק הקריטי (לתחילת תנועה)

ליחידת רוחב ערוץ, ואילו $y_r, d_r, q_{sr}, (\omega - \omega_c)_r$

הם ערכי יחוס לפרמטרים.

החוקיות שבתלות שטף גרופת בהספק ליחידת אורך, מודגמת בנחל יתיר שבצפון הנגב לעומת נחל איתן באורגון, ארה"ב - נחל הדומה בתכונותיו לנחל דן (תרשים 11). מסתבר, כי דווקא נחלי אכזב פעילים הרבה יותר בהסעת גרופת מאשר נחלי איתן. עובדה זו מוסברת על ידי מחסור בשריון בתשתית של נחלי אכזב (Larone et al., 1994a).

משוואת גרופת שונה פותחה על ידי הנס איינשטיין, בנו של אלברט איינשטיין, כחלק מעבודת הדוקטורט שלו בגרמניה ואשר פורסמה לראשונה ב- 1942, ומאוחר יותר לקבוצות גודל גרגר שונות (Einstein, 1950). המשוואה איננה דטרמיניסטית כמו זו של Bagnold ומבוססת על גישת הסתברות. הרעיון המרכזי בה הנו, כי ההסתברות להרמת גרגר להסעה בהקפצה, תלויה מצד אחד בגודלו ולכן במהירות נפילתו, ומצד שני בכוח העילוי הפועל עליו. כוח זה גדל ככל שמהירות הזרם גדלה. למתעניינים בפיתוחה, ראו

זרימת בסיס. כניסה של מרכיבים דקים ממקורות כמו מדרונות, בהם מתרחשת סחיפת קרקע אינטנסיבית כתוצאה מבירוא יערות או שחרור סדימנטים ממאגרים (תהליך מקובל למניעת סתימתם בסחף), עלולה לגרום לנזקים לדגיגי הסלמון ולאוכלוסיות של צומח הגדלות על מים צלולים (לדוגמה, Rathburn and Wohl, 2003). למידע על אזורי אוגר אפשריים לאורך אפיקים ועל זמני שהות של גודלי גרופת שונים, חשיבות רבה גם בהקשר הסביבתי-זיהומי. השלכת פסולת לאפיקי נחלים היא נושא כאוב: פסולת בנין מושלכת אל "החצר האחורית" שהיא הנחל הקרוב, שפכים ממכרות, ממחצבות ועוד זורמים בערוצים (ראה, לדוגמה, שאולקר, 2006).

5.5 מיליון וחתייה (scour and fill) בנחלים אלוביאליים תהליכי ההולכה של הגרופת, מתרחשים בשני ממדים של מרחב - לאורך הערוץ ולעומקו. השכבה המעורבת בתהליכי ההסעה, היא השכבה הפעילה באפיקים אלוביאליים, בה מתרחשים תהליכי המילוי והחתייה באפיקים. עובי השכבה הפעילה משתנה בין האירועים בהתאם לעוצמת הזרימה. אולם, בתנאי משטר זרימה, נתון בו קיים שיווי משקל בין תפוקת הסחף מאגן היקוות לבין התרומה האגנית אל מערכת הנהר, היא בעלת עובי אופייני.

החישוב של עובי שכבת הסחף המשתתף בתהליכי ההסעה, מתקבל בדרך כלל באמצעות שרשרות חתייה (Larone et al., 1994a). אמצעי זה מקובל לשימוש בעיקר באזורים בהם אין זרימת בסיס, והגישה אל התשתית שלאחר הזרימה אפשרית. השרשראות, העשויות מלולאות מתכת, מוכנסות בצורה אנכית לתשתית הערוץ, לרוב במספר חתכי רוחב ומספר שרשרות בכל חתך (שלומי, 2007). לאחר זרימה המסיעה סחף, נחפרות השרשרות ונבדק מספר הלולאות השוכבות עם כיוון הזרימה על פני השטח או הקבורות בתוך התשתית (תרשים 12). ההשוואה של חתכי הרוחב לפני ואחרי האירוע ומדידת ההתחתרות והמילוי מעל לשרשרת השוכבת, מאפשרים מידע על עובייה של השכבה הפעילה.

חסרונה של שיטה זו הוא, היותה עתירת עבודה ונותנת מידע נקודתי בלבד, בעוד שידוע כי תהליכי ההתחתרות והמילוי הם בעלי שונות גבוהה לאורך

כאשר W_i^* הנו שטף גרופת חסר ממדים, מתייחס לקבוצת גרגר, $M_0 = 14.2$ ואילו ϕ הוא משתנה המתאים את המשוואה (dummy variable). מסתבר, שגם המשוואה של Parker משנת 1990 מתאימה לנחלי אכזב, אם כי יישומה של משוואת Meyer Peter and Müller קל יותר (Reid et al., 1996).

5.4 אזורי האוגר (storage areas) וזמן השהות (residence time)

תרומת סחף הזמין להסעה לסביבה הנחלית, עדיין אינה מבטיחה את המשך הסעתו המיידית. זמן השהות של פריטי גרופת במערכת נחלית משתנה לאורכו, ובין אזורי אקלים שונים. גם אם מהירות הזרימה מספיקה לניתוק חלקי גרופת ממקומם ולהסיעם, ישנם פריטי גרופת הנקברים בתשתית האלוביאלית במהלך תהליכי חתייה ומילוי (scour and fill). אין הכוונה לתהליכי מילוי או התחתרות מתמשכים (aggradation and degradation), היכולים להיות עדות לשינויים במשטר הזרימה, אלא למצב של שיווי משקל דינמי במערכת הנהר - מצב בו שטף הגרופת הנכנס שווה לשטף היוצא. חלקיקי גרופת יכולים להישאר קבורים במקומם במשך מספר שנים (לקח, 1992) ואף עשרות ואלפי שנים. חישוב זמן השהות הממוצע של סחף במערכת הנחלית, נעשה על ידי חלוקה של נפח הסחף האגור בקצב הסעתו. בשיטה כלולה הנחה של לינאריות בקצבי ההולכה, המשתנים במרחב הערוץ ובזמן, הבאה לביטוי בתדירותם של אירועים בעלי עוצמות שונות. חלוקים גדולים הבונים את המדרגות של מבני בריכות-המדרגה (step-pools) ביובלים מסדר ראשון-שני או החלוקים במצבורי חלוקים - clusters, נותרים במקומם עד לזרימה המפרקת ומסיעה אותם (Wittenberg et al., 2007). שימוש בשיטות תיארוך מתקדמות דוגמת OSL מאפשר הצצה אל ממד הזמן (Thompson et al., 2007). סחף יכול להישאר במקומו מספר שנים בודדות באפיק הפעיל; ועל פני הפשט המוצף לעתים רחוקות וזמן רב יותר (Phillips et al., 2007; Rovira et al., 2005).

לאוגר ולזמן השהות של סדימנטים דקי-גרגר, יש חשיבות רבה בחלקים העיליים של האגן, שם המורפולוגיה של בריכות-מדרגה מהווה מקום התפתחותם של דגי הסלמון באזורים לחים עם

פריטי גרופת מסומנים החל כבר בשנות השלושים של המאה ה-20, בניסויי מעבדה שערך איינשטיין. ההמשך היה במחקרי שדה, במסגרתם נערך מעקב מתמשך אחר פריטי גרופת צבועים שהונחו על קרקעית האפיק (Schick, 1977; Leopold et al., 1966; לקח, 1992). החיסרון במעקב אחרי חלוקים צבועים, נובע משחיקת הצבע תוך כדי התנועה ומקבירה של החלוקים בתשתית האלוביאלית. כתוצאה מכך, אחוז החלוקים שניתן לזהותם לאחר תנועה-הנו קטן. אולם, מעקב רציף ומומשך, מביא לחשיפתם של חלוקים שנקברו ומאפשר הבנה של הדינמיקה שבתנועת החומר בשכבה הפעילה (Lekach and Schick, 1995). פתרון להיעלמות העוקבים הצבועים, הינו מיגנוט החלוקים או שתילה של מגנטים ומשדרים בתוכם (Hassan et al., 1984; Ergenzinger et al., 1989). איתור חלוקים שנקברו, מעלה את אחוז הגילוי שלהם ל-90% ואף למעלה מזה (חסן, 1988). שתילת משדרים בתוך חלוקים, אפשרה מעקב במהלך תנועתם ובחינת משכי הזמן בהם חלוק נע ונח (Emmett, 1980). חסרון בשיטת העוקבים הנו,

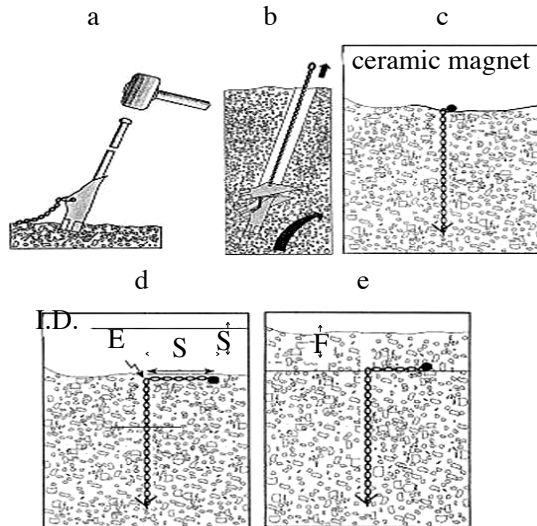
האפיק ולרוחבו (Hassan, 1990; Hassan et al., 1991; Powell et al., 2005). ממחקר שנערך בנחל יעל שליד אילת ובנחלי הנגב, התבררה קיומה של שכבה בעלת מאפיינים פלוביו-פרוגניים המפרידה בין האלוביום הפעיל לבין הנייח באפיקים (Lekach et al., 1998) (תרשים 13). רציפותה של השכבה לרוחבם ולאורכם של האפיקים, מספקת מידע חשוב על עובי השכבה הפעילה במשטר הזרימה הקיים. מציאותה גם בטרוסות אלוביאליות, מאפשרת חישוב של תנאי אקלים העבר.

5.6 מדידת תנועה וניטור שטף גרופת

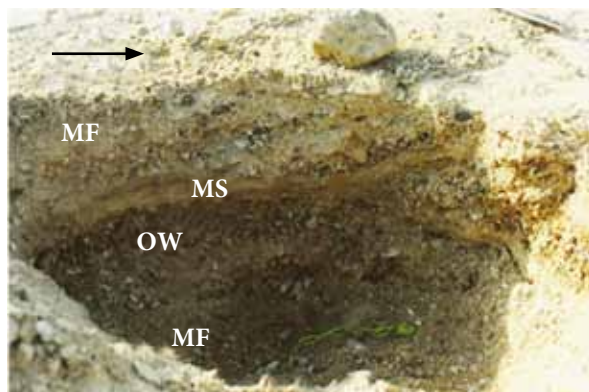
טווח הגדלים הרחב, התנועה בצמוד לקרקעית האפיק, מאפייני התשתית והתנאים ההידרוליים בהם מתקיימת תנועת הגרופת, יוצרים קושי רב במדידתה הישירה. קיימות שתי גישות לנושא חקר הגרופת ומהן נגזרות דרכי המדידה. האחת, מבוססת על התפיסה שתנועת גרופת היא תנועה אקראית הבנויה לסירוגין מתנועות ועצירות של חלוקים בודדים הנעים לאורך האפיק, ולכן היא בודקת את תנועתו של החלוק הבודד. מעקב אחרי



תרשים 13: הגבול בין האלוביום הנייח (היחידה הפלוביו פרוגנית) בעל הגוון האדמדם לבין השכבה הפעילה בעלת הגוון האפור בנחל יעל.



תרשים 12: שיטת ההחדרה והקיבוע של שרשרת סחיפה מדגם Duckbill. החדרת השרשרת לקרקע, a; מתיחה וקיבוע עוגן שרשרת, b; הוספת מגנט קרמי - הנקודה השחורה, והשרשרת מוכנה לאירוע זרימה, c; מצב לאחר שיטפון בו התרחשה חתירה בעומק S מפני השטח (I.D.) זהה למרחק מברך השרשרת e למגנט הקרמי, d; אירוע זרימה בו התרחשה חתירה S ולאחריה השקעה של סחף חדש בעובי F (Larone et al., 1994b).



תרשים 14: השקעה באירוע זרימה אחד של ארבע שכבות מעל מרפק (e) של שרשרת חתירה שבקצה מגנט (m), המאפשר לגלות בעומק: שכבה תחתונה MF - matrix fill, מעליה OW - openwork ממיונת היטב בשכבת-ת-אופקי. שכבה שלישית דקה MS - matrix supported ומעליה שכבת MF, שתיהן בשכבות נטוי במעלה הזרימה. כיוון הזרימה מסומן בחץ. ברך השרשרת-e, המגנט בקצה השרשרת-m (מתוך שלומי, 2007).



תרשים 15: דוגם Helley-Smith גדול (פתח 150 מ"מ) של אוניברסיטת בן-גוריון בנגב, בסדרת דגימות גרופת בנהר אלפיני (Drau) באוסטריה. שים לב שהפתח הקדמי צר יותר מאשר חלקו האחורי.

את כמות הגרופת המוסעת באירוע זרימה (למשל, בגאות נתונה). השיטה מבוססת על חוק הרציפות של מסת הגרופת, שהיא מכפלה של השטח הפעיל בתשתית הנחל (שטח החתך של שכבת החתירה באירוע נתון: מכפלת הרוחב הפעיל של תשתית הערוץ, w_b , ועומק החתירה הממוצע, d_b), הממוצע הגיאומטרי של מרחק התנועה של עוקבים, L_b , במשך הגאות והחלק היחסי של המוצקים, $(1-p)$:

$$V_b = (d_b w_b L_b) (1-p) \quad (16)$$

כאשר p היא הנקבוביות (הערה: משטחו של החתך הפעיל בתשתית הערוץ, יש להוריד את חללי הנקבוביות בין חלקיקי הסחף). עומק החתירה הממוצע d_b שווה לממוצע החשבוני של ממוצע החתירה (d) וממוצע ההשקעה (a) האירועים: $d_b = (d+a)/2$. השיטה מדויקת, כל עוד נעשה שימוש במספר מספיק של שרשראות ועוקבים

שגודל החלוקים שניתן לעקוב אחריהם אינו רב והם לא בהכרח מייצגים את כלל הגרופת. כמו כן, רק עם ריבוי המחקרים על תנועת החלוק הבוודר החלה להתברר מורכבותה של תנועת הגרופת, כולל ההשפעה ההדדית שבין גודלי הגרופת השונים על כלל התנועה (Wilcock, 1992), וחוסר הקשר בין גודל החלוק לבין מרחק התנועה שלו באירוע זרימה נתון (Schick, 1977). יחד עם זאת, ממחקרים בהם מספר החלוקים הצבועים הנו רב מאוד, מסתבר כצפוי, שמרחק התנועה קטן, ככל שהגודל הממוצע של החלוקים גדל (Laronne and Carson, 1976).

השימוש בעוקבים ובנוסף גם בשרשראות חתירה, מאפשר לא רק ללמוד על האופי של משקעי סחף אירועי (Laronne and Shlomi, 2007) - ראה תרשים 14, אלא שזו שיטה יישומית להעריך

(סחף גס-גרגר הנע כגרופת).

נעשה שימוש בשיטה זו בסוככים רבים, כולל נחלי פזרות רחבים בניו זילנד (Laronne et al., 1986), ערוצים תלולים באזורים הרריים (Liébault and Laronne, 2008), בנחלים גדולים במזרח אוסטרליה (Laronne et al., 1992) ועוד. חסרונותיה של השיטה הם (1) שהיא דורשת עבודת כפיים מרובה וכן (2) שהיא מאפשרת חישוב תפוקת גרופת לאירועי זרימה שלמים ולא לערכים הידרוליים, כגון מאמץ גזירה ממוצע או הספק ליחידת רוחב. על כן היא אמפירית לנחל נתון.

גישה יישומית בה משתמשים מרבית חוקרי הגרופת, ושאל תוצאותיה משווים את ההתאמה של משוואות גרופת, מתבססת על נתוני שטף וטקסטורת גרופת. דרוש מכשור המאפשר דיגום או ניטור. טווח הגדלים של הגרופת מכתוב את גודלה של הדגימה: ככל שהחלוקים גדולים יותר, דרוש משקל גדול יותר של דגימה מייצגת. קיימות ארבע שיטות לדיגום וניטור שטף גרופת.

דיגום נקודתי נעשה על ידי מגוון דוגמים כגון Helley Smith, המבוסס על הפרשי לחצים: הוא מתרחב בחלקו המורדי וכתוצאה מכך הלחץ בחלקו הקדמי נמוך יותר מאשר באחורי, אך מהירות המים בכניסה גבוהה יותר, שוני המאפשר יעילות הידרולית מעל יחידה ויעילות דגימה של כמעט יחידה, כל עוד הסחף יחסית דק-גרגר (תרשים 15). בארץ ישנם שני דוגמים (פתח קטן וגדול) כאלה באוניברסיטת בן-גוריון בנגב. דוגמי גרופת קטנים ניתנים להחזקה ידנית ואילו הגדולים יותר מופעלים מגשר.

דיגום פיזי רציף של כלל הגרופת הנעה לכל רוחב האפיק, יכול להתבצע בדוגם חריץ אוטומטי. יתרונותיו של דוגם חריץ הנו, שהוא לחלוטין שקוף לזרימה - אינו מפריע לזרימה ולכן איננו משפיע על תנועת הגרופת. כל דוגמי החריץ מאופיינים בעיקרון, שהגרופת נופלת לתוכם. הראשון שהוצע הנו ה- Vortex tube - חצי צינור בחתך המונח לרוחב האפיק ב-45° לכיוון הזרימה. זו מנקזת את כלל הגרופת מחוץ לאפיק, כתוצאה מערבול לולייני הנוצר בחצי הצינור. הגרופת מנוקזת לצד הערוץ, שם היא נשקלת וממוינת. דוגם חריץ על עיקרון שונה לחלוטין הנו ה- Conveyor belt ב-Pinedale, Wyoming, המאפשר מדידה רציפה במהלך אירועים

שלמים (Leopold and Emmett, 1976).

דוגם החריץ היחיד שהצליח לחדור לכל מערכות המחקר והכיל של שטף גרופת, הנו ה- formerly known as the Reid bedload sampler (Birkbeck sampler) - ראה Reid et al. (1980); Laronne et al. (2003). מדובר בדוגם חריץ המבוסס על שקילה אוטומטית ומתמשכת של הגרופת הנופלת לתוכו. דוגם חריץ זה מהווה כיום את כלי הכיול הנפוץ ביותר לבדיקת התאמתן של משוואות גרופת, של דוגמי גרופת מטיפוס נייד, של חיישנים לניטור עקיף של גרופת וללימוד השינוי במרחב ובזמן של גרופת, כולל שטפי גרופת גבוהים במיוחד. לאחרונה הוא שוכלל בארץ (תרשים 16) בכמה היבטים (Bergman et al., 2007). מפני שלכל דוגם חריץ ישנו נפח סופי, לדוגמי חריץ ישנה מגבלה בנחלים רחבים ותלולים באזורים צחיחים, בהם שטפי הגרופת הנם הגבוהים ביותר שנמדדו, כמו נחל רחף בסמוך לים המלח (Cohen and Laronne, 2005). יחד עם זאת, כאשר צריך לכייל חיישני גרופת בתנאים קיצוניים שכאלה, ניתן לבנות מערכת דוגם חריץ שנפחה גדול במיוחד: 1 מ"ק באוסטריה (Habersack et al., 2001) ועד 6 מ"ק ביפן (Mizuyama et al., 2008), ראה תרשים 17.

שיטות הדיגום המשוכללות, אפשרו הצצה למורכבות הרבה שבתנועת הגרופת הנחלית. אחד הממצאים החשובים הנו, שתנועת הגרופת כוללת טווח נרחב של גודלי גרגר, והתנועה איננה אחידה לכל רוחב האפיק. התנועה של הגרופת היא בגלים (יצחק, 1994), ולשינויים במהירות לאורך ולרוחב האפיק השפעה רבה על השקעה והסעה של גרופת. בהקשר לנחלי הארץ, התגלית החשובה ביותר שנלמדה מדגימה ומחקר גרופת בשני העשורים האחרונים הנה, כי בערוצים חסרי זרימת בסיס ובעיקר באזורים צחיחים וצחיחים-למחצה, אין שכבת מיגון בערוצים. מחסור זה בשכבת המיגון, מסביר את יעילות הסעת הגרופת (bedload efficiency a-la Bagnold, 1966) הגבוהה בערוצים אלה (Laronne and Reid, 1993; Reid and Laronne, 1995).

ניטור עקיף של גרופת כולל סוגים רבים של חיישנים: מגנטיים, רדאר וכן אקוסטיים אקטיביים ופסיביים (Gray et al., 2008). בעשור האחרון חלה התקדמות מהירה בניטור עקיף של גרופת, ניטור

(לקח, 1992), נחל חיון ונחל נקרות (Laronne and Wilhelm, 2001).

6. תפוקת סחף נחלי

בנחלי אכזב דוגמת רוב נחלי ישראל, הסעת הסחף במערכת הנחלית היא פונקציה של זמינות החומר ושל תדירות אירועי הזרימה. באזורים מדבריים קיימת זמינות כמעט בלתי מוגבלת של סחף מכל הגדלים, ולכן לרוב ההולכה היא פונקציה של עוצמת הזרימות השיטפוניות. נפרד בין השיטפונות הקטנים שאינם מגיעים אל מוצא האגן לבין השיטפונות הגדולים העוברים את כל אורכה של מערכת הנחל עד למוצא, ובנוסף להנעה של סחף בין יחידות האוגר השונות,

אשר אמור להתגבר על הבעיות בשינויים הניכרים בזמן ובמרחב בשטף הגרופת (תרשים 17). לעומת ההתקדמות הניכרת בניטור עקיף של שטף גרופת, הזיהוי של גודל הגרופת באמצעי חישה מרחוק אומנם אפשרי וכמה חוקרים מצאו פתרונות מבטיחים, אך יש לצפות כי יעבור לפחות מחצית העשור, לפני שניתר יהיה להעריך את הטקסטורה של גרופת באמצעים אלה.

תפוקת גרופת ממשקעי מאגר. את תפוקת הגרופת ניתן לחשב, בבדיקה קפדנית של המבנה התלת ממדי של משקעי מאגר ודגימתם. בהנחה שכל החלוקים ומרבית החול הוסעו כגרופת, ניתן לחשב את התפוקה של הגרופת ואף את חלקה מסך כל התפוקה של סחף, כפי שנעשה עבור נחל יעל



תרשים 16. מבט במעלה נחל אשתמוע, בתחנה לניטור סחף ומים. בצינור הימני מתבצעת דגימת מים אוטומטית ובשמאלי ישנם חיישני עכירות וחיישן מוליכות חשמלית. הצינורות מיוצבים בתשתית בטון מזוין, למנוע התחתרות במורד מלכודות הגרופת. ישנן 5 מלכודות הפועלות באופן אוטומטי ונפרד לדגימת גרופת. את רוחב החרץ ניתן לשנות ואף לסגור. לאורך הנחל בסמוך ובמעלה המלכודות, מתבצע ניטור רציף של עומק ושיפוע פני המים בין 11 עמודי ניטור.



תרשים 17. מראה במעלה Uonogawa River, האלפים הצפון מערביים באי הונשו, יפאן. דוגם חריץ אוטומטי מטיפוס Reid bedload sampler בעל נפח 6 מ³ ורוחב חריץ 500 מ"מ, משמש לכיול חיישן אקוסטי (geophone) - הצינור שבמעלה הדוגם.

אירועים עוקבים, מתאפשרת הפרדה בין השכבות של האירועים השונים. כל אירוע זרימה יוצר בתוך משקעי המאגר שתי יחידות (couplets).

שיטות אחרות לחישוב תפוקת סחף אירועי, תלויות במספר הדגימות שנלקחו במהלך הזרימה. באופן כללי קיימות שתי גישות מקובלות לחישוב תפוקת הסחף מתוך דגימות. גישה ראשונה, היא אינטרפולציה של הנתונים ומבוססת על ההנחה, שריכוזי הרחופת או כמות הגרופת שנמדדו ביחידת זמן כלשהי מייצגים גם את הריכוזים בין זמני המדידה. גישה שנייה, אקסטרפולציה, דורשת בניית קו קשר (rating curves) בין ריכוזי הרחופת וכמות הגרופת ליחידת זמן לבין ספיקת המים, ומניחה, כי קשר זה מבטא את כל טווח ערכי הספיקה (Phillips et al., 1999). ישנן 13 שיטות לחישוב תפוקת רחופת, המבוססות על גישה של אקסטרפולציה, ו-9 שיטות המבוססות על גישה של אינטרפולציה (Phillips et al., 1999). בחירת השיטה תלויה בסוג, באיכות ובתדירות הנתונים.

6.1 שיטת אקסטרפולציה

בדומה לאזורים לחים, ריכוזי הרחופת (SSC) בזמן הגאות באזורים צחיחים, עולה עם העלייה בספיקת המים (Q). נשמר גם הקשר המקובל בין המשתנים:

$$SSC = aQ^b \quad (17)$$

אלא שבאזורים היבשים, המקדם a גדול פי 6 עד פי 4,500 מזה שבאזורים הלחים. החזקה b קטנה מ-1 באזורים צחיחים וגדולה מ-1 באזורים לחים (Graf, 1988; Reid and Frostick, 1997).

קשרים היסטוריים (אלה שאינם חד-חד ערכיים), לא ניתנים להגדרה ברגרסיה פשוטה. עקב מורכבותם של קשרים אלו, יש להשתמש ברגרסיות לשפילה ולחוד לעלייה של ההידרוגרף (Walling, 1974, in Webb et al., 1995). קיימים גם הבדלים משמעותיים בין אירועים ובין עונות (Negev, 1969, 1972). בעבודתו, נגב פיתח נוסחאות על הקשר בין ריכוזי רחופת לבין ספיקת מים ועל מסת הרחופת כנגד נפח מים, עבור מספר נחלים של הניקוז המערבי במרכז הארץ. הבעיה המרכזית שהתגלתה במהלך העבודה, הנה שאפילו באותם נחלים מעטים, ההבדלים בין הקשרים גדולים, ואי אפשר להכין נוסחאות אזוריות. קיימים תיאורים לקשר זה ברגרסיה רב-משתנית כדי להגדיר תפוקת

משקיעים את תפוקת הסחף האגנית בבסיס הניקוז. היחסים בין גרופת לבין רחופת בתפוקת הסחופת הכוללת, הם גבוהים באזורים הצחיחים והצחיחים למחצה, אם כי גם באקלים ים תיכוני ניתן למצוא באופן יוצא דופן יחסים גבוהים, כמו בצפון מזרח ספרד, שם מעל 75% מכלל הסחופת היא הגרופת (Rovira et al., 2005).

קיימות מספר שיטות לחשב תפוקת סחף אגנית. המדויקת ביותר היא מדידת כלל הסחף האירועי השוקע במאגר. רוב המידע על תפוקת סחף באזורים צחיחים וצחיחים למחצה, מתבסס על שקיעת סחף במאגרים (לרון, 1991; לרון וכהן, 1999; Langbein and Schumm, 1958; Laronne, 1990; Laronne and Wilhelm, 2001). מאגר הוא מלכודת בה לרוב שוקע 100% של הסחף המגיע למאגר. במקרי גלישה מן המאגר, המדידה אינה מייצגת את כל הרחופת. הדיוק הגבוה יחסית במדידת תפוקת סחף אירועית במאגרים, מקורו באופן ההסעה השונה של שני הרכיבים - גרופת ורחופת. הגרופת שוקעת עם הירידה במהירות בכניסה למאגר, אם כי הימצאותו של זרם סילון מאפשר הסעה של גרופת למרחק ניכר בציר המאגר. הרחופת מצויה בתוך גוף המים הממלא את המאגר. היא שוקעת על פי חוק סטוקס (שקיעה בהתאם לגודל החלקיקים) ויוצרת שכבה של סדימנטים המתדקקים מעלה, והמצפים את הגרופת השוקעת קודם לכן. בחלקו המעלי של מאגר, ישנה חדירה של גרופת המהווה את בסיס המשקע האירועי, ואילו לחלקים מרוחקים ועמוקים יותר של מאגר, מוסעת רק רחופת. בכל מקרה של מאגר מתרוקן תמידית (כמו מרבית המאגרים בארץ), ההשקעה הנה של זוג שכבות: תחתונה גסה-גרגר יחסית, בה אין שינוי בגודל הגרגר מתחתיתה לגגה, ומעליה שוקעת שכבה שמקורה בהשקעת רחופת בלבד ובה גודל הגרגר קטן כלפי מעלה (normal grading). במאגר נחל יעל, יחידת החול המתדקק כלפי מעלה, אפשרה את ההפרדה בין החול המרחף לבין החול הנע כגרופת (לקח, 1992). המעבר מהחול הנו אל סילט ובהדרגה לחרסית. בניגוד לשינויים האטיים בתוך שכבת אירוע, השינוי בין שכבת אירוע אחת המסתיימת בחרסית לבין זו שאחריה גסה יותר, הנו חד וקל לזיהוי. מיפוי קרקעית המאגר בין אירועים עוקבים, מאפשר קבלת נפח הסחף שהתווסף באירוע נתון. אולם גם ללא מיפוי בין

קצר יותר והספיקות גבוהות יותר. בגאוויות בעלות אותו נפח מים בחורף, ריכוזי רחופת נמוכים עד בינוניים, משך זרימה ארוך יחסית ותפוקות הסחף נמוכות יותר. לפיכך, מומלץ להשתמש בקשרים נפרדים בעונות הידרולוגיות שונות. כך, לנחל אשתמוע, נמצא שקשר בין תפוקת רחופת (SSY) (ביחידת טון) ובין נפח מים (V) ב- 1000 מ"ק אירועי בחורף הנה, (אלכסנדרוב, 2005):

$$SSYield = 4.4 V^{1.30} \quad (19)$$

ובעונות מעבר המקדם והחזקה משתנים:

$$SSYield = 31.2 V^{1.22} \quad (20)$$

באזורים צחיחים למחצה, תפוקת הגרופת הנה כ- 10% מכלל הסחף. לכן המשוואות (19 ו-20) מבטאות במידה רבה גם את כלל הסחף. יש לקחת בחשבון שמשוואה כזו איננה מתייחסת לגרופת, שתפוקתה בעלת חשיבות כמשאב במעלה מאגרי מים (בדלתא), אך לא בחישוב סך כל תפוקת סחף, דבר לא מובן מאליו בחלקי הארץ הלחים יותר.

שתי גישות אלה טובות לחישוב תפוקות הרחופת משיטפונות, אולם אין לאמצן לחישוב תפוקות הגרופת. הסיבה היא אופן התנועה של הגרופת - בגלים או בעונות, שלא תמיד מאפשרת קיומו של קשר חד-ערכי בין ספיקת הגרופת לבין ספיקת המים (לקח, 1992).

6.3 תפוקת סחף נחלי בישראל - מבט רגיונלי

באזורים צחיחים וצחיחים למחצה עובי המשקעים השנתי קטן, סופות הגשם נדירות והנחלים יבשים ברוב ימות השנה. אולם, סופות גשם בעוצמה גבוהה יחסית יוצרות שיטפונות שמאופיינים בכושר אירוזיבי מוגבר והסעה ניכרת של סחף. מיעוט הצומח, הקרקעות הרדודות ושכיחות גבוהה יחסית של משטחי סלע חשופים, מעודדים זרימות חזקות וסחיפה מואצת. כל אלה מתורגמים לתפוקות סחף אגניות גבוהות.

במחקר שנערך בארה"ב, שבמסגרתו נותח בסיס נתונים רחב של סחיפה לפי השקעה במאגרים, הובהר כי שיאי תפוקות הסחף מתקבלים באזורים צחיחים למחצה (עובי גשם שנתי ממוצע 250 - 400 מ"מ), בהם הצומח דליל והגשמים מועטים יחסית, אך העוצמות מספיקות ליצירת זרימות המסיעות סחף רב (Langbein and Schumm, 1958). מנגד, באזורים צחיחים, התקבלו ערכים נמוכים יותר של תפוקת סחף, עובדה שהוסברה

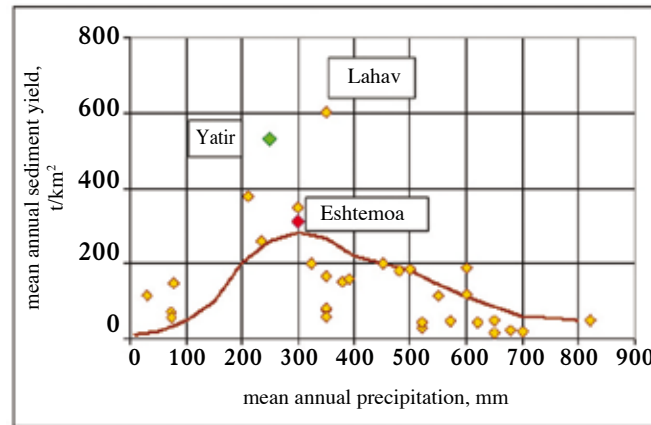
סחף, ריכוזי רחופת מקסימליים וממוצעים בגאות וכן ריכוזים רגועים. נעשה שימוש במשתנים רבים ואלה הם: עובי משקעים באירוע, עוצמת מקסימלית של גשם בפרקי זמן מוגדרים ועוצמה ממוצעת לפרקי זמן שונים, אורך התקופה היבשה, רטיבות הקרקע, אחוז הכיסוי הצמחי, ספיקה מקסימלית בגאות או בהתאמה לריכוז מקסימלי של הרחופת, ספיקה ממוצעת בגאות, נפח המים בגאות, תפוקת המים מאגן הניקוז, משך הגאות, מספר השיאים בגאות, והפרשי זמן (פיגור או הקדמה) בין ספיקה מקסימלית לבין ריכוז הרחופת המקסימלי. כדי להגדיר את הקשרים האמינים ביותר בין ריכוז הרחופת לבין ספיקת המים, יש צורך במדידה של ריכוז הרחופת באופן רציף ולהעזר בפרמטר עקיף (Lewis, 1996; Walling and Collins, 2000).

6.2 שיטת אינטרפולציה

הנוסחה לחישוב תפוקת הסחף המרחף SSYield (Suspended Sediment Yield) היא:

$$SSYield = K \sum_{i=1}^{ns} (C_i Q_i) \quad (18)$$

כאשר K הפרש הזמן השווה ל- 30 שניות, ns מספר מדידות, C ריכוז רחופת מדוד או מחושב, Q ספיקת מים מדודה. טיב התוצאה תלוי בפרק זמן בין המדידות - ככל שפרק הזמן ארוך יותר, דיוק השיטה יורד. לכן שיטה זו אפקטיבית ביותר, כאשר יש רישום רציף של השתנות ספיקת המים וריכוז הרחופת (רישום של מד עכירות, לדוגמה). תפוקת הרחופת המחושבת בשתי שיטות אלה, תלויה בשני משתנים: ספיקת המים וריכוז הרחופת. נתונים מפורטים לגבי שני משתנים אלה, לא תמיד נמצאים ברשותנו. יתר על כן, לצרכים הנדסיים יש צורך לחשב את תפוקת הרחופת לאירועים קיצוניים, בעלי תקופת של חזרה 10 - 100 שנים. לצורך כך, קיימת אפשרות להשתמש בקשר בין תפוקת רחופת בגאות לבין נפח הגאות. קשרים אלה נבנו ונבחנו בארץ בשני אגני ניקוז באזור צחיח למחצה, אחד בעל שטח 0.66 קמ"ר (תת אגן של נחל ביכרה באזור יתיר) והשני 110 קמ"ר (נחל אשתמוע). לנחל אשתמוע נמצא לנכון לחלק את אירועי הזרימה לפי עונת ההתרחשות, ולכן גם לפי סוג המשקעים שגרמו לאירוע הזרימה (Laronne and Shentsis, 2007). בגאוויות של הסתיו, ריכוז הרחופת גבוה יותר, משך הזרימה



תרשים 18. סיכום נתוני תפוקת סחף לאזורים צחיח, צחיח למחצה וים-תיכוני בישראל (הנתונים מ-Negev, 1972; Inbar, 1992 ומטבלה 3, המסכמת מחקרים נוספים. הנקודה האדומה באיור מייצגת את נחל אשתמוע והנקודה הירוקה את נחל יתיר הסמוך. התמונה המתקבלת אינה אחידה, אך מצטברים נתונים המאשרים את המגמות שמראה העקומה של Langbein and Schumm (קו חום על הגרף), בה תפוקות הסחף המקסימליות באזורים צחיחים למחצה וירידה בתפוקות ככל שהאזור צחיח יותר (ראה גם כהן, 2005).

מסתבר כי תפוקת הסחף באזורים צחיחים (עובי גשם שנתי פחות מ-100 מ"מ) גבוהה יותר מהקו, והתפוקה המקסימלית הנה באזורים עם עובי משקעים שנתי 200 - 400 מ"מ. באותם האזורים פיזור הנקודות הוא מקסימלי, ומעיד על חשיבותם של תנאים מקומיים לתפוקת הסחף. לדוגמה, השפעתם של שימושי קרקע על הסחף הכללי נבדקה באזור נחל הוגה, רוחמה (Rozin and Schick, 1996; Seydell, 1998). תפוקת הסחף השנתית בהתבסס על משקעי אירוע במאגר רוחמה, היתה 153 טון לקמ"ר בשנים של רעייה בלתי מבוקרת באגן, ומאוחר יותר בשנים של שימור קרקע כמחצית, 77 טון לקמ"ר (Seydell, 1998). דוגמה נוספת הנה ההבדל הניכר בתפוקת סחף בנחלים יתיר ואשתמוע. גורם שיכול להקטין את תפוקת הסחף באגן נחל אשתמוע ביחס לאגן נחל יתיר, הוא היחס בין הסחף הנוצר לבין זה המוסע מהמערכת (Sediment Delivery Ratio). ככל ששטח אגן הניקוז גדול, שוקע יותר סחף על הפשט. הוזכר, שלאגני ניקוז בגודל 100 קמ"ר ומעלה אופיינית התנהגות של מערכת המסיעה ולא משקיעה סחף, אך ייתכן שוני, בהשוואת תפוקת סחף רב-שנתית. גם הליתולוגיה של אגן הניקוז, משפיעה על תפוקת הסחף. לדוגמה, אגן הניקוז של נחל יתיר בעיקר לסי עם מעט סלעים, ואגן נחל אשתמוע ברובו שייך ליחידה ההררית של דרום הרי חברון, ורק שטחו התחתון, הקטן

על ידי מיעוט בולט של אירועי זרימה, ובאזורים לחים הקרקע והכיסוי הצמחי מפותחים יותר ומגנים על פני השטח מסחיפה. ייתכן, ששיאי תפוקת הסחף מתקבלים באזורים גשומים יותר (Wilson, 1971 ב Graf, 1988). מחקרים אחרים אישרו את המגמות שהשיאים מתקבלים באזורים צחיחים, עובי גשם שנתי ממוצע 100 - 150 מ"מ (Yair and Enzel, 1987). ניתן להסיק שלא ניתן לקבוע תחום אוניברסלי מדויק לתפוקות שיא לפי עובי גשם שנתי ממוצע, אך צפויה ירידה בתפוקת סחף בעקבות גידול בכיסוי הצומח (Graf, 1988; Parsons et al., 1996; Sharma, 1996). מעניין להשוות את הנתונים שהתקבלו מאגן נחל אשתמוע עם מחקרים אחרים שבוצעו בישראל באזור צחיח וצחיח למחצה, כולל תרומה יחסית של רחופת וגרופת לתפוקת הסחף הכוללת. בטבלה 3 מרוכזים נתונים ממחקרים שנערכו לאחרונה באזורים צחיחים וצחיחים למחצה, כולל אזורים ים-תיכוניים בישראל. רוב העבודות נעשו במאגרים, ורק מעט בדיגום ישיר במים זורמים. בנחל יעל, נחל רחף ונחל יתיר (Laronne et al., 2003) התקבלו נתונים משילוב של שתי שיטות אלה.

בתרשים 18 מופיעות תפוקות הסחף של נחלים בישראל. הגרף כולל כ-30 נתונים המבוססים על עבודות של Negev (1972) ו-Inbar (1992) ואת קו המגמה המקובל (Langbein and Schumm, 1992).

טבלה 3: נתונים ממחקרים שנערכו לאחרונה באזורים צחיחים וצחיחים למחצה, כולל אזורים ים-תיכוניים בישראל

Reference	River basin	Drainage area, (km ²)	Annual depth of precipitation, (mm)	Annual sediment yield, (t/km ²)	bedload fraction, (%)	Notes
Schick, 1977; Schick and Lekach, 1993	Nahal Yael		31	100 - 130	60 - 83	from 1967 including 5 drought years data from reservoirs
Laronne and Wilhelm, 2001	N.Neqarot N.Hiyun	1256 984	50 - 100	72 57	17-63 16-31	
לריון 1989	South Liman North	0.23 2.94	210 235	377 259		
Fischhendler, et al., 2003	N.Ayyalon N.Nahshon	160	500-600	114	0.6	urban land use sand fraction
לקח וגריינבאום 1997	Lahav Reserv. N.Kelah, (N.Shiq'ma)	17	350 – aver, 200 - 500	570 - 620		bulk density 1.6 ton/m ³ (Laronne, 1990)
לריון 1989	Liman Arad	1.35				19 events in1 winter SS/DS ranges 0.7 - 31
Seydell, 1998	Ruhama	4.2	380 350	153 77		grazing contour plowing
לריון 1991	Nahal Yatir	13	249	530	5-8	
נבו 1979	Nahal Shiq'ma	785	350	80		bulk density - 1.6 ton/m ³ data for 18 years
לריון 1995	Nahal Shiq'ma	785	350	60		bulk density - 1.6 t/m ³ data for 35 years
Cohen and Laronne, 2005	Nahal Rahaf	80	80	150		stream measurements
רובינסון 2003	N.Alexander N.Qishon	520 1100	520 520 downstream	28 45		stream measurements

יותר, מאפיין את העמק הלסי של באר-שבע. מכאן ההבדל בין תפוקות הסחף שלהם.

6.4 גורמים מעשה ידי אדם המביאים לשינויים ברציפות ההולכה של סחף במערכת הנחלית, ותוצאותיהם

ישנן סיבות רבות להגברת הסחיפה כתוצאה ממעשי ידי אדם. אלה כוללות פעילות חקלאית שאיננה משמרת קרקע או שינוי בכיוון ואורך ערוצי נחל (לרון וחוב, 2005). כאן נסקור חלק מהפעילויות שבמיוחד רלוונטיות לישראל.

בנייתם של מאגרי גיא: הקמתם של מאגרים על הנחלים, נעשית ברחבי העולם והן בישראל על מנת לענות על מספר צרכים: יצירת אנרגיה הידרואלקטרית (התחנה על הירדן ההררי); הגנה מפני שיטפונות, בעיקר בחלקים העיליים של אגני ההיקוות, לדוגמה המאגרים על יובלי נחל חצרה בתוך המכתש הקטן, אשר נפרצו, אך גם קרוב למוצא, לדוגמה המאגר על נחל אשלים המגן על מפעלי ים המלח (אשר נפרץ בשנת 1994 והוסב לסכר הטיה); ניצול מי שיטפונות להשקיה - בעיקר לשימוש ישובים הממוקמים ליד מאגר (המאגרים ברמת הגולן); מאגרים לניצול מי השיטפונות על ידי החדרתם למי התהום (מאגרי משמר אילון ונחל שיקמה); מאגרים לצורכי נופש וקייט (המאגר על נחל לבן אשר נפרץ ב-2006).

מאגרי גיא יוצרים אי רציפות בהסעת הסחף לאורך הנחל. נפריד בין שני מצבים: הראשון, כאשר המאגר מוקם בחלקים העיליים של אגן ההיקוות, קרוב למקורות הסחף; והשני, כאשר המאגר

מוקם קרוב יותר אל מוצא אגן ההיקוות. במקרה הראשון, המאגר מהווה מלכודת של 100% לכלל הגרופת המוסעת בנהר עד אליו ולחלק ניכר מן הרחופת המגיעה מחלקו של שטח האגן עד למאגר (לקח, 1992; Vericat and Battalla, 2006). להשקעה מוכתבת זו של הסחף במאגר, השפעה על המורפולוגיה של האפיק במורד. באזורים בהם קיימת זרימת בסיס, ישנה הזרמה קבועה של מים במורד המאגר. מים אלה נטולי סחף, נקראים גם "מים רעבים" (Kondolf, 1997), גורמים להתחתרות במורד והסחף המוסע במורד המאגר, מקורו בקרקעית וגדות האפיק. בנוסף, מאגרים, בהיותם וסתים של הזרימות למורד, גורמים לכך שכמויות הסחף המסופקות לנחל מיובלים הנשפכים במורד המאגר, הנן גבוהות מדי ליכולתו של הנחל להסיען ומתקבלת תופעה הפוכה של מילוי הקרקעית בסחף. מתרחש גם שינוי במורפולוגיה האפיק שבמורד ויצירת תשתית נחל משוריינת, שיש לה השפעה על תפוקת הסחף באירועי הזרימה השונים בעוצמתם (Vericat et al., 2006).

עיו: ניקוז בשטח בנוי, גם אם איננו עיר גדולה, אמור להביא לתופעות הדומות לאלה בעיר: הגדלת שיא ונפח גאות והקטנה של הזמן לשיא ושל משך הגאות. אלה אמורים לגרום להתחתרות ערוצים במורד יישובים. אך כאשר הישובים קטנים, התופעה איננה בולטת. מה עוד, אם ממילא האזור הנו צחיח למחצה ומיצר נגר רב, מסתבר כי התחתרות של ערוצים במורד נחלים איננה ניכרת (שאולקר, 2006) ולכן השפעתם על יצירת סחף איננה בולטת אלא בשלבי בנייה.



תרשים 19. מבט במעלה נחל אשתמוע אל גדר ההפרדה. גדר קשיחה ובנוסף תיל מלוכף מצויים מתחת למעבר, ובכך גורמים להערמת מים בגאות ולשקיעת רחופת וגל הגרופת במעלה. פברואר 2007.

חומר מינרלי הדרוש בין היתר בים התיכון לדגה ולמערכת הימית. יש לקוות כי בהקדם תשונה מערכת מעברי הערוצים בגדר ההפרדה.

מראי מקומות

אלכסנדרוב, י' (2005). דינמיקה של רחופת במי גאוויות באזור צחיח למחצה, בהדגמת נחל אשתמוע. חיבור לתואר דוקטור, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב, באר שבע.

גרוסק, ת' (1994). ברכות מדרגה - מורפולוגיה ותהליכים באפיק סלע נחל משושים עליון, רמת הגולן. עבודת גמר לתואר מוסמך, האוניברסיטה העברית בירושלים.

גרינבאום, נ' (1996). שיטפונות עבר (paleofloods) בנחלים הגדולים של הנגב המרכזי. חיבור לתואר דוקטור, האוניברסיטה העברית בירושלים.

וכטמן, ד' (2003). הסעת רחופת על ידי נחלי החוף אל מדף היבשתי של ישראל - נחל קישון ונחל אלכסנדר. חיבור לתואר מוסמך, אוניברסיטת חיפה.

ונר-פרמק, א' (2006). השפעת ייעור ופעילות לשימור קרקע על נגר עלי וסחף באזור צחיח למחצה. חיבור לתואר מוסמך, אוניברסיטת בן גוריון בנגב, באר שבע.

חסן, מ' (1988). תנועת פריטי גרופת בנחל עם אפיק חלוקי ויחסה למנגנון ההסעה של שכבת הגריפה. חיבור לתואר דוקטור, האוניברסיטה העברית בירושלים.

יצחק, י' (1994). שינויים עתיים ומרחביים בטקסטורת גרופת. חיבור לתואר מוסמך, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב, באר שבע.

כהן, ח' (2005). הסעת סחף בשיטפונות באזור צחיח קיצון נחל רחף, דרום מדבר יהודה. חיבור לתואר דוקטור, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב, באר שבע.

לקח, י' (1992). תנועת גרופת באגן הררי קטן בסובב צחיח קיצון. חיבור לתואר דוקטור, האוניברסיטה העברית בירושלים.

לקח, י'; גרינבאום, נ' (1997). הערכה פוטנציאל המים וקצב מילוי הסחף במאגר להב-נחל שקמה. דו"ח סופי מוגש לחברת מקורות בע"מ - מרחב דרום, הקבוצה לחקר שיטפונות, המחלקה לגיאוגרפיה, האוניברסיטה העברית בירושלים.

לרון, י' (1989). סחף קרקע בבקעות הנגב הצפוני מנתוני השקעה במאגרים (לימנים). דו"ח שנתי

רעיית יתר: קיים קשר חזק בין סחיפת קרקעות מרעה לבין היווצרות נגר לרעייה (לדוגמה: Asner et al., 2004). במחקר שנערך לאורך גרדיאנט אקלימי ים תיכוני במספר מיקומים באגן הים התיכון, נמצא כי הקשר בין המשטר ההידרולוגי-גיאומורפולוגי לבין שימושי הקרקע, ובעיקרם רעייה, הוא הדוק יותר מאשר זה שבין התהליכים הגיאומורפולוגיים לבין המשטר האקלימי (Cerdea, 1998). רעייה גורמת להיווצרות נגר ועלייה בסחיפתיות של הקרקע במספר אופנים, כגון (1) הסרת צומח, (2) חשיפת תלכיד הקרקע למכות טיפות הגשם, (3) השפעה על תכונותיה ההידרוליות של הקרקע, (4) הפחתה בתכולת החומר האורגני בקרקע (Savadogo et al., 2007) ובעקבותיה החלשת תלכיד הקרקע (Chenu et al., 2000), (6) הלחץ שמפעילה פרסת הבהמה, הנו מנגנון נוסף התורם לירידה במוליכות ההידרולית של פני הקרקע, המעודד יצירה של נגר עילי וסחיפה (Savadogo et al., 2007) (6) דריכה של בהמות הרעייה מקטינה את חספוס התבליט, ובכך מעלה את מהירות הנגר ומאמץ גזירה (Nash et al., 2003). ייעור הינו אמצעי יעיל להקטנת נגר וסחיפה כתוצאה מרעיית יתר (ונר-פרמק, 2006).
גדר הפרדה: בשנים האחרונות נבנית גדר הפרדה לאורך הקו הירוק. אומנם הגדר אמורה למנוע תנועה של אנשים, אך מערכת ניקוז איננה יודעת גבולות פוליטיים (Asaf et al., 2006). על כן, מערכת הביטחון של מדינת ישראל הייתה אמורה לתכנן את הגדר יחד עם אנשי המקצוע של התחנה לחקר הסחף וחוקרי סחף אחרים, כדי לאפשר לא רק למים לעבור את הגדר, אלא גם לסחף. לדאבוננו התכנון הנו לקוי ביותר. מעברי הנחלים בגדר ההפרדה אינם לוקחים בחשבון את אופייה של תנועת סחף. המעברים תוכננו כך שמים יכולים לעבור, אך מרבית הסחף הדק-גרגר (הרחופת) וכל הגרופות מושקעים במעלה הגדר. ההשקעה נובעת כתוצאה מכך שהגדר נשארת סגורה או נסתמת בצופת בעת אירוע שיטפון. תופעה זו (backwater effect) גורמת להשקעת סחף המוצא ממערכת הנחל אחרי כל שיטפון ואיננו ממשיך במורדו (תרשים 19). התוצאה של ליקוי זה הנה, שהערוצים רעבים לסחף ויחלו בתהליך של התחתרות לעומק, קריסת גדות ויגרמו גם לקריסה של גשרים. הסחף שנגרע מהמערכת במורד, הנו

- Allen, J.R.L. (1985). **Principles of Physical Sedimentology**. George Allen & Unwin, London.
- Anon (2009). **Sedimentation Engineering**. Am. Soc. of Civil Engineers.
- Asaf, L.; Tal, A.; Laronne, J.B.; Negaoker, N.; Nassar, A.; Khateeb, N.A. (2006). Trans-boundary Stream Monitoring and Management in Israel and the Palestinian Authority- Hebron /Besor Stream as Case Studies. **III International Symposium on Transboundary Waters Management**. Ciudad Real - Spain, ISBN: 84-689-8604-6.
- Asner, G.P.; Elmore, A.J.; Olander, L.P.; Martin, R.E.; Harris, A.T. (2004). Grazing systems, ecosystem responses, and global change. **Annu. Rev. Environ. Resour.** 29: 99-261.
- Bagnold, R.A. (1980). An empirical correlation of bedload transport rates in flumes and natural rivers. **Proc. R. Soc. London, Ser. A.**, 372: 453-473.
- Balaban, N. (2009). **Adsorbed Elements and SVOC Compounds in Flood Water and Channel Banks of Wadi Secher Draining the Industrial Hovav Complex, Northern Negev Desert, Israel**. MSc thesis, Ben Gurion Univ. of the Negev.
- Batalla, R.J.; De Jong C.; Ergenzinger P.; Sala M. (1999). Field observations on hyperconcentrated flows in mountain torrents. **Earth Surface Processes and Landforms**, 24: 247-253.
- Benkhalel, A.; Remini, B. (2003). Temporal variability of sediment concentration and hysteresis phenomena in the Wadi Wahrane Basin, Algeria. **Hydrological Sci. J.**, 48(2): 243- 255.
- Bergman, N.; Laronne, J.B.; Reid, I. (2007). Benefits of design modifications for the Birkbeck bedload sampler illustrated by floods in an ephemeral gravel-bed channel. **Earth Surface Processes and Landforms**, 32: 317-328, doi: 10.1002/esp.1453.
- Buck, S.G. (1983). The Saaiplaas quartzite member: a braided system of gold and uranium bearing channel placers within the מוגש לנציבות המים (88-0110-857), המחלקה לגיאוגרפיה ופיתוח סביבתי, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב.
- לרון, י' (1991). סדימנטולוגיה של משקעי מאגר והשימוש בה לקביעת התפלגות תפוקות סחף. דו"ח למשרד האנרגיה והתשתית ES-47-91.
- לרון, י' (1995). תכנון הכרייה במאגר שקמה. דו"ח לחברת מקורות, המחלקה לגיאוגרפיה ופיתוח סביבתי אוניברסיטת בן-גוריון בנגב, באר שבע.
- לרון, י'; כהן, ח' (1999). אופטימיזציה של כריית סחף לאורך החוף המערבי של ים המלח. דו"ח סופי למפעלי ים המלח.
- לרון, י'; טייג, מ'; שאולקר, ע' (2005). פתרונות לסתימה בחול של ערוצים נבחרים באזור אשקלון. דו"ח לרשות ניקוז שקמה-בשור.
- נבו, נ' (1979). מפעל ניצול מי גאווית שקמה - בדיקת הכדאיות הכלכלית של קיבול המאגר. סיכום פרויקט 1401 לחברת מקורות, תה"ל.
- שאולקר, ע' (2006). השפעת ההתיישבות בצפון וצפון מערב הנגב על מערכת הניקוז הנחלית. חיבור לתואר מוסמך, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב.
- שוקרון, מ' (2009). השפעת העירוי (gullyng) על נגר וסחף באגנים קטנים באזור צחיח למחצה. בהדגמת אגן נחל בכרה. חיבור לתואר מוסמך, אוניברסיטת בן גוריון בנגב, באר שבע.
- שכנוביץ, י' (2006). השפעת הייעור על מאזן המים באזור צחיח. חיבור לתואר דוקטור, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב, באר שבע.
- שלומי, י' (2007). דינמיקה של השקעה בנחלי פורות בערבה ובדרום ים המלח. חיבור לתואר מוסמך, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב, באר שבע.
- Alexandrov, Y.; Laronne, J.B.; Reid, I. (2003). Suspended sediment concentration and its variation with water discharge in a dryland ephemeral channel, northern Negev, Israel. **J. Arid Environments**, 53: 73-84.
- Alexandrov, Y.; Laronne, J.B.; Reid, I. (2007). Intra-event and inter-seasonal behaviour of suspended sediment in flash floods of the semi-arid northern Negev, Israel. **Geomorphology**, 85: 85-97. doi:10.1016/j.geomorph.2006.03.013.

- Proterozoic Witwatersrand. In: Collinson, J.D. and Lewin, J. (eds.), **Modern and Ancient Fluvial Systems**, Oxford, Blackwell Sci. 6: 549-562.
- Buffington, J.; Montgomery, D. (1997). A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers. **Water Resour. Res.**, **33**(8): 1993-2029.
- Castillo, V.M.; Gomez-Plaza, A.; Martinez-Mena, M. (2003). The role of antecedent soil water content on the runoff response of semiarid catchments: a simulation approach. **J. Hydrology**, **284**:114-130.
- Cerda, A. (1998). The influence of geomorphological position and vegetation cover on the erosional and hydrological processes on Mediterranean hillslopes. **Hydrological Processes**, **12**: 661-671.
- Chenu, C.; Le Bissonnais, Y.; Arrouays, D. (2000). Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, **64**(4): 1479-1486.
- Cohen, H.; Laronne, J.B. (2005). High rates of sediment transport by flashfloods in the Southern Judean Desert, Israel. **Hydrological Processes**, **19**: 1687-1702.
- Davis, B.E. (2005). **A guide for the proper selection and use of federally approved sediment and water quality samplers**. Federal InterAgency Sedimentation Project. <http://fisp.wes.army.mil/Report%20QQ-Users%20Guide.pdf>.
- Dunkerley, D.; Brown, K. (1999). Flow behaviour, suspended sediment transport and transmission losses in a small (sub-bank-full) flow event in an Australian desert stream. **Hydrological Processes**, **13**: 1577-1588.
- Einstein, H. A. (1950). **The bed-load function for sediment transportation in open channel flows**. USDA, Soil Conservation Service, Tech. Bull. 1026.
- Emmett, W.W. (1980). **A field calibration of the sediment-trapping characteristics of the Helley-Smith bedload samplers**. USGS Prof. Paper 1139.
- Ergenzinger, P.; Schmidt, K.-H.; Busskamp, R. (1989). The pebble transmitter system (PETS): first results of a technique for studying coarse material erosion, transport and deposition. **Zeitschrift fur Geomorphologie N.F.**, **33**: 503-508.
- Fisher, S.G.; Minckley, W.L. (1978). Chemical characteristics of a desert stream in flash flood. **J. Arid Environments**, **1**: 25-33.
- Fischhendler, I.; Enzel, Y.; Gvirtzman, H. (2003). Estimation of sedimentation rates under Mediterranean conditions deduced from the Mishmar Ayalon Reservoir, Israel. **Israel J. Earth Sciences**, **52**: 21-29.
- Frostick, L.E.; Reid, I.; Layman, J.T. (1983). Changing size distribution of suspended sediment in arid-zone flash floods. **Spec. Publ. Int'l. Assoc. Sediment.**, **6**: 97-106.
- Garcia, C.; Cohen, H.; Reid, I.; Rovira, A.; Ubeda, X.; Laronne, J.B. (2007). Processes of initiation of motion leading to bedload transport in gravel-bed rivers. **Geophysical Research Letters**, **34**, L06403, doi:10.1029/2006GLO28865.
- Gerson, R. (1977). Sediment transport of desert watersheds in erodible materials. **Earth Surface Processes**, **2**: 346-361.
- Gippel, C.J. (1995). Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams. **Hydrological Processes**, **9**: 83-97.
- Goodrich, D.C.; Faures, J.M.; Woolhiser, D.A.; Lane, L.J.; Sorooshian, S. (1995). Measurements and analysis of small-scale convective storm rainfall variability. **J. Hydrology**, **173**: 283-308.
- Graf, W.H. (1988). **Fluvial Processes in Dryland Rivers**. Springer-Verlag.
- Gray, J.G.; Laronne, J.B.; Marr, J.D. (eds.) (2008). **Bedload Surrogates Monitoring**. U.S. Geol. Survey Special Report. in press.
- Gyssels, G.; Poesen, J. (2003). The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates. **Earth Surface Processes and Landforms**, **28**: 371-384.
- Habersack, H.M.; Laronne, J.B. (2001). Bedload texture in an alpine, gravel bed river. **Water**

- Resour. Res.**, **37**(12): 3359-3370.
- Habersack, H.M.; Nachtnebel, P.N.; Laronne, J.B. (2001). The continuous measurement of bedload discharge in a large alpine gravel bed river with a slot sampler. **J. Hydraulic Research**, **39**: 125-133.
- Hassan, M.A. (1990). Scour, fill and burial depth of coarse material in gravel bed streams. **Earth Surface Processes and Landforms**, **15**: 341-356.
- Hassan, M.A.; Church, M.; Schick, A.P. (1991). Distance of movement of coarse particles in gravel bed streams. **Water Resour. Res.**, **27**: 503-511.
- Hassan, M.A.; Egozi, R. (2001). Impact of wastewater discharge on channel morphology of ephemeral streams. **Earth Surface Processes and Landforms**, **26**: 1285-1302.
- Hassan, M.A.; Schick, A.P.; Laronne, J.B. (1984). The recovery of flood-dispersed coarse sediment particles - a three-dimensional magnetic tracing method. **Catena, Suppl. Bd. 5**: 153-162.
- Hessel, R. (2002). **Modelling of soil erosion in small catchment in the Chinese Loess Plateau. Applying LISEM to extreme conditions**. PhD thesis, Nederlandse Geografische Studies 307, Utrecht University.
- Inbar, M. (1992). Rates of fluvial erosion in basin with a Mediterranean type climate. **Catena**, **19**: 393- 409.
- Inbar, M.; Llerena, C.A. (2000). Erosion processes in high mountain agricultural terraces in Peru. **Mountain Research and Development**, **20**(1): 72-79.
- Inbar, M.; Schick, A.P. (1979). Bedload transport associated with high stream power, Jordan River, Israel. **Proc. Natl. Acad. Sci. USA**, **76**: 2515-2517.
- Inbar, M.; Zgaier, A. (1996). Soil erosion in Mediterranean agricultural terraces. **Int'l. Conf. on Mediterranean Desertification, Crete**. European Commission.
- Kondolf, G.M. (1997). Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. **Environmental Management**, **21**: 533-551.
- Korup, O.; Strom, A.L.; Weidinger, J.T. (2006). Fluvial response to large rock-slope failures: Examples from the Himalayas, the Tien Shan, and the Southern Alps in New Zealand. **Geomorphology**, **78**: 3-21.
- Langbein, W.B.; Schumm, S.A. (1958). Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. **Trans. Am. Geoph. Union**, **39**: 1076-1084.
- Laronne, J.B. (1990). Probability distribution of event sediment yields in the northern Negev, Israel. In: Boardman, J., Foster, D.L. and Dearing, J.A. (eds.) **Soil Erosion on Agricultural Land**. Chichester, England, Wiley: 481- 492.
- Laronne, J.B.; Alexandrov, Y.; Bergman, N.; Cohen, H.; Garcia, C.; Habersack, H.; Powell, M.D.; Reid, I., (2003). The continuous monitoring of bedload flux in various fluvial environments. **Proc. Erosion and Sediment Transport Measurement: Technological and Methodological Advances**. Oslo, Int'l Assoc. Hydrol. Sci. Publ. 283: 134-145.
- Laronne, J.B.; Carson, M.A. (1976). Interrelationships between bed morphology and bed material transport for a small gravel bed channel. **Sedimentology**, **23**: 67-85.
- Laronne, J.B.; Duncan, M.J.; Rodley, P.A. (1986). Bar dynamics in the North Branch Ashburton River. In: Smart, S.M. and Thompson, S.M. (eds.): **Ideas on the Control of Gravel Bed Rivers**. Ministry of Works and Development Hydrology Center Publication 9, Christchurch, New Zealand: 230-239.
- Laronne, J.B.; Outhet, D.N.; Carling, P.A.; McCabe, T.J. (1994a). Scour chain employment in gravel bed streams. **Catena**, **22**: 299-366.
- Laronne, J.B.; Outhet, D.N.; Duckham, J.L.; McCabe, T.J. (1992). Determining event bedload volumes for evaluation of potential degradation sites due to gravel extraction, N.S.W., Australia. **Int'l Assoc. Hydrological Sciences, Publ.**, **210**: 87-94.
- Laronne, J.B.; Reid, I. (1993). Very high rates of bedload sediment transport by ephemeral desert rivers. **Nature**, **36**: 148-150 ,113.

- Laronne, J.B.; Reid, I.; Yitshak, Y.; Frostick, L.E. (1994b). The non-layering of gravel streambeds under ephemeral flood regimes. **J. Hydrology**, **159**: 353-363.
- Laronne, J.B.; Shlomi, Y. (2007). Depositional character and preservation potential of coarse grained sediments deposited by flood events in hyper-arid braided channels in the Rift Valley, Arava, Israel. **Sedimentary Geology**, **195**(1-2): 21-37. doi: 10.1016/j.sedgeo.07.008.
- Laronne, J. B.; Wilhelm, R. (2001). Shifting stage - volume curves: predicting event sedimentation rate based on reservoir stratigraphy. In: Anthony, D., Ethridge, F., Harvey, M., Laronne, J. B. and Mosley, M. P. (eds.), **Applying Geomorphology to Environmental Management**. Water Resources Publ., Littleton, CO, USA.
- Lavee, H.; Poesen, J.; Yair, A. (1997). Evidence of high efficiency water-harvesting by ancient farmers in the Negev desert, Israel. **J. Arid Environments**, **35**: 341-348.
- Lekach, J.; Amit, R.; Grodek, T.; Schick, A.P. (1998). Fluvio-pedogenic processes in an ephemeral stream channel, Nahal Yael, Southern Negev, Israel: **Geomorphology**, **23**: 353-369.
- Lekach, J.; Schick, A.P. (1982). Suspended sediments in desert floods in small catchments. **Israel J. Earth Sciences**, **31**: 144-156.
- Lekach, J.; Schick, A.P. (1995). Trajectories of bed load particles within the active layer of an ephemeral stream. **Application of Tracers in Arid Zone Hydrology**, IAHS Publ. 232: 443-452.
- Leopold, L.B.; Emmett, W.W. (1976). Bedload Measurements, East Fork River, Wyoming. **National Academy of Science Proceedings**, **73**: 1000-1004.
- Leopold, L.B.; Emmett, W.W.; Myrick, R.M. (1966). **Channel and hillslope processes in semiarid area, New Mexico**. USGS Prof. Paper 352-G.
- Leopold, L.B.; Wolman, M.G.; Miller, J.P. (1995). **Fluvial Processes in Geomorphology**. Dover Publications.
- Lewis, J. (1996). Turbidity - controlled sediment sampling for runoff - event load estimation. **Water Resour. Res.**, **32** (7): 2299.
- Liébault, F.; Laronne, J.B. (2008). Factors affecting the evaluation of bedload transport in gravel-bed rivers using scour chains and painted tracers: the case of the Esconavette Torrent. **Geodinamika Acta** in press.
- Long Y.; Xiong G. (1981). Sediment measurement in the Yellow River. **IAHS Publ 133**: 275-285.
- Mertes, L.A.K. (1994). Rates of flood-plain sedimentation on the central Amazon River. **Geology**, **22**(2): 171 -174.
- Meyer-Peter, E.; Müller, R. (1948). Formulas for bed-load transport. **Int'l. Assoc. Hydr. Res., 2nd mtg., Stockholm**: 39-64.
- Mizuyama, T.; Laronne, J.B.; Nonaka, M.; Sawada, T.; Satofuka, Y.; Matsuoka, M.; Yamashita, S.; Sako, Y.; Tamaki, S.; Watari, M.; Yamaguchi, S.; Tsuruta, K. (2008). Calibration of a passive acoustic bedload monitoring system in Japanese mountain rivers. In: Gray, J.G., Laronne, J.B. and Marr, J.D. (eds), **Bedload Surrogates Monitoring**. USGS Special Report. in press.
- Nash, M.S.; Jackson, E.; Whitford, W.G. (2003). Soil microtopography on grazing gradients in Chihuahuan desert grasslands. **J. Arid Environments**, **55**(1): 181-192.
- Nearing, M.A. (2006). Can soil erosion be predicted? In: Owens, P.N. and Colloins, A.J. (eds.), **Soil Erosion and Sediment Redistribution in River Catchment**, Cabi International: 145 – 152.
- Negouker-Cohen, N. (2007). **Hydrological and chemical characterization of base flow and small flow events along the trans-boundary Besor Basin**. MSc thesis, Ben Gurion Univ. of the Negev, Be'er Sheva.
- Negev, M. (1969). Analysis of data on suspended sediment discharge in several streams in Israel. **Hydrological Paper 12**, Israel Hydrological Service, Water Commission, Jerusalem.
- Negev, M. (1972). Suspended sediment discharge in western watersheds of Israel. **Hydrological Paper 14**, Israel Hydrological Service, Water Commission, Jerusalem.

- Nir, D.; Klein, M. (1974). Gully erosion induced by changes in land use in a semiarid terrain (Nahal Shiqma, Israel). **Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband 21**: 191-201.
- Orton, P.M.; Kineke, G.C. (2001). Comparing calculated and observed vertical suspended-sediment distributions from a Hudson River Estuary turbidity maximum. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, **52**(3): 401-410.
- Parker, G. (1990). Surface-based bedload transport relation for gravel rivers. **J. Hydr. Res.** **28**(4): 417-543.
- Parker, G.; Klingeman, P.C. (1982). On why gravel bed streams are paved. **Water Resour. Res.**, **18**(5): 1409-1423.
- Parsons, A.J.; Abrahams, A.D. (1992). Field investigations of sediment removal in interrill overland flow. In: Parsons, A.J. and Abrahams, A.D. (eds.), **Overland Flow, Hydraulics and Erosion Mechanics**. UCL Press: 307 – 334.
- Parsons, A.J.; Wainwright, J.; Abrahams, A.D. (1996). Runoff and erosion on semiarid hillslopes. In: Anderson, M.G and Brooks, S.M. (eds.), **Advances in Hillslope Processes**. Wiley: 1061 – 1078.
- Phillips, J.D.; Marden, M.; Gomez, B. (2007). Residence time of alluvium in an aggrading system. **Earth Surface Processes**, **32**: 307-316.
- Phillips, J.M.; Webb, B.W.; Walling, D.E.; Leeks, G.J.L. (1999). Estimating the suspended sediment loads of rivers in the LOIS study area using infrequent samples. **Hydrological Processes**, **13**: 1035-1050.
- Poesen, J.W.A.; Nachtergaele, J.; Verstraeten, G.; Valentin, C. (2003). Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **Catena**, **50**: 91-133.
- Poesen, J.W.A.; Vandaele, K.; Wesemael, B.V. (1996). Contribution of gully erosion to sediment production on cultivated lands and rangelands. In: Walling, D.E. and Webb, B. (eds.), **Erosion and sediment yield: global and regional perspectives**. IAHS Publ. 236: 251 – 266.
- Pohl, M.M. (2002). Bringing down our dams: trends in American dam removal rationalities. **J. Am. Water Resources Association**, **38** (6): 1511–1519.
- Powell, D.N.; Brazier, R.; Wainright, J.; Parsons, A.; Kadiuk, J. (2005). Streambed scour and fill in low-order dryland channels. **Water Resour. Res.**, **41**, W050189, doi: 10.1029/2004WR00362.
- Powers, M.C. (1953). A new roundness scale for sedimentary particles. **Sedimentary Petrology**, **23**: 117-119.
- Quine, P.E.; Walling, D.E.; Zhang, X. (1999). Slope and gully response to agricultural activity in the Rolling Loess Plateau, China. In: Brown, A.G. and Quine, I.A. (eds.), **Fluvial Processes and Environmental Change**. Wiley: 71–90.
- Ramos-Scharron, C.E.; MacDonald, L.H. (2007). Development and application of a GIS-based sediment budget model, **J. Environmental Management**, **84**: 157-172.
- Rathuburn, S.; Wohl, E. (2003). Predicting fine sediment dynamics along a pool-riffle mountain channel. **Geomorphology**, **55**: 111-124.
- Reid, I.; Frostick, L.E. (1997). Channel form, flows and sediments in deserts. In: David, S.G. (ed), **Arid Zone Geomorphology**: Wiley, Chichester, England: 205-229.
- Reid I.; Frostick L.E.; Layman, J.T. (1980). The continuous measurement of bedload discharge. **J. Hydraulic Research** **18**: 243-249.
- Reid, I.; Laronne, J.B. (1995). Bed load sediment transport in an ephemeral stream and a comparison with seasonal and perennial counterparts. **Water Resour. Res.**, **31**: 773-781.
- Reid, I.; Powell, D.M.; Laronne, J.B. (1996). Prediction of bedload transport by desert flash-floods. **J. Hydraulic Engineering Am. Soc. Civ. Engrs.**, **122**: 170-173.
- Richards, K.S. (1982). **Rivers: Form and Processes in Alluvial Channels**. Methuen.
- Rovira, A.; Batalla, R.J.; Sala, M. (2005). Fluvial sediment budget of a Mediterranean

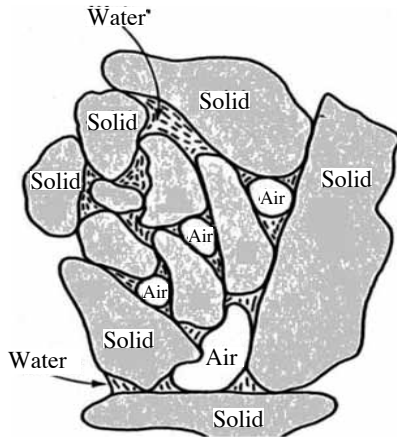
- river: the lower Tordera (Catalan Coastal Ranges, NE Spain). **Catena**, **60**: 19-42.
- Rozin, U.; Schick, A.P. (1996). Land use change, conservation measures and stream channel response in the Mediterranean/semiarid transition zone: Nahal Hoga, southern Coastal Plain, Israel. In: **Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives**. IAHS Publ. 236: 427 – 444.
- Sambrook Smith, G.H. (1996). Bimodal fluvial sediments: origin, spatial extent and processes. **Progress in Physical Geography**, **20**: 402-417.
- Savadogo, P.; Sawadogo, L.; Tiveau, D. (2007). Effects of grazing intensity and prescribed fire on soil physical and hydrological properties and pasture yield in the savanna woodlands of Burkina Faso. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, **118**(1-4): 80-92.
- Seydell, I. (1998). **Effects of land use on soil erosion, Ruhama Basin, Israel**. Vertieferarbeit (M.Sc) thesis, Technical University of Darmstadt.
- Schick, A. P. (1977). A tentative sediment budget for an extremely arid watershed in the southern Negev. In: Doehring, O.D. (ed.) **Geomorphology in Arid Regions**, Binghamton, NY: 139-163.
- Schick, A.P.; Lekack, J. (1987). A high magnitude flood in the Sinai Desert. In: Mayer, L. and Nash, D. (eds.), **Catastrophic Flooding**. Allen and Unwin, Boston, 381–410.
- Schick, A.P.; Lekach, J. (1993). An evaluation of two ten-year sediment budgets, Nahal Yael, Israel. **Physical Geography**, **14**(3), 225 – 238.
- Sharma, K.D. (1996). A conceptual sediment transport model for arid regions. **J. Arid Environments**, **33**: 281 – 290.
- Sharma, K.D.; Vangani, N.S.; Choudhari, J.S. (1984). Sediment transport characteristics of desert streams in India. **J. Hydrology**, **67**: 261 – 272.
- Shentsis, I.; Meirovich, L.; Ben-Zvi, A.; Rosenthal, E. (2001a). Assessment of transmission losses and groundwater recharge from runoff events in a reach of Nahal Paran, Israel. **Israel J. Earth Sciences**, **50**: 187-199.
- Shentsis, I.; Meirovich, L.; Ben-Zvi, A.; Rosenthal, E. (2001b). Assessment of transmission losses and groundwater recharge from runoff events in watercourses of the Neqarot watershed, Israel. **Israel J. Earth Sciences**, **50**: 201-215.
- Shields, A. (1936). Anwendung der Ähnlichkeit-mechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebepbewegung. (Application of similarity mechanics of turbulence research for bedload transport), **Mitt. der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau**, **26**, Berlin.
- Sutherland, R.A.; Bryan, R.B. (1990). Runoff and erosion from a small semiarid catchment, Baringo District, Kenya. **Applied Geography**, **10**, 91–109.
- Thorne, C.R. (1982). Processes and mechanisms of river bank erosion. In: Hey, R.D., Bathurst, J.C. and Thorne, C.R. (eds.), **Gravel-bed Rivers**. Wiley: 227-271.
- Thompson, C.; Rhodes, E.; Croke, J. (2007). The storage of bed material in mountain stream channels as assessed using Optically Stimulated Luminescence dating. **Geomorphology**, **83**: 307-321.
- Vericat, D.; Batalla, R.J. (2006). Sediment transport in a large river: The lower Ebro, NE Iberian Peninsula. **Geomorphology**, **79**: 72-92.
- Vericat, D.; Batalla, R.J.; Garcia, C. (2006). Breakup and reestablishment of the armor layer in a large gravel-bed river below dams: The lower Ebro. **Geomorphology**, **76**, 122-136.
- Walling, D. E. (1999). Linking land use, erosion and sediment yields in river basins. **Hydrobiologia**, **410**: 223-240.
- Walling, D.E. (2006). Tracing versus monitoring: New challenges and opportunities in erosion and sediment delivery research. In: Owens, P.N. and Collins, A.J. (eds.), **Soil Erosion and Sediment Redistribution in River Catchment**. Cabi International, 13 – 27.

- Walling, D.E.; Collins, A.L. (2000). **Integrated assessment of catchment sediment budgets: a technical manual**. Department for International Development: University of Exeter.
- Walling, D.E.; Kleo, A.H.A. (1979). Sediment yield of rivers in areas of low precipitation: a global view. In: **The Hydrology of Areas of Low Precipitation**. IAHS Publ. **128**: 479–493.
- Walling, D. E.; Webb, B.W. (1987). Suspended load in gravel-bed rivers: UK experience. In: Thorne, C.R., Bathurst, J.C. and Hey, R.D. (eds.), **Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers**. Wiley: 691–732.
- Webb, B.W.; Foster I.D.I.; Gurnell, A.M. (1995). Hydrology, water quality and sediment behavior. In: Foster I.D.I, Gurnell, A.M. and Webb, B.W. (eds.), **Sediment and Water Quality in River Catchments**. Willey: 1–30.
- Wilcock, P.R. (1992). Experimental investigation of the effect of mixture properties on transport dynamics, In: Billi, P., Hey, R.D., Thorne, C.R., and Tacconi, P. (eds.), **Dynamics of Gravel-bed Rivers**, Wiley, 6: 109-139.
- Williams, G.P. (1989). Sediment concentration versus water discharge during single hydrological events in rivers. **J. Hydrology**, **111**: 89 – 106.
- Wittenberg, L.; Laronne, J.B.; Newson, M.J. (2007). Bed clusters in humid perennial and Mediterranean ephemeral gravel-bed streams: the effect of cluster size and bed material sorting. **J. Hydrology**, **334**: 312-318.
- Wolman, M.G. (1959). Factors influencing erosion of a cohesive river bank. **Am. J. Science**, **257**: 204–216.
- Wren, D.G.; Barkdoll, B.D.; Kuhnle, R.A.; Derrow., R.W. (2000). Field techniques for suspended-sediment measurement. **J. Hydraul. Engrg, Am. Soc. Civ. Engrg.**, **126** (2): 97-104.
- Yair, A.; Enzel, Y. (1987). The relationship between annual rainfall and sediment yield in arid and semi arid areas. The case of northern Negev. **Catena Supplement**, **10**: 121-135.
- Yalin, M.S. (1963). An expression for bed load transportation. **J. Hydrul. Div., Am. Soc. Civ. Engrs.**, **89**(HY3): 221-250.

מכניקת קרקע

אורי צדקה¹; איליה ויינשטיין²

¹ד"ר, דיקן המחלקה להנדסת בניין, המכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון;
²המחלקה לגיאולוגיה ומדעי הסביבה, אוניברסיטת בן גוריון בנגב.



תרשים 1: תמונה סכמטית של מבנה הקרקע

2. הגדרות

על מנת להקל על תיאור היחסים בין שלוש הפאזות מהן מורכבת הקרקע - מוצקה נוזלית וגזית, נהוג להשתמש במושג "קוביית העפר האלמנטארית" או במושג "דיאגראמת הפאזות" (תרשים 2).



תרשים 2. דיאגראמת פאזות של מדגם עפר כאשר:

משקל כולל - W	נפח כולל - V
משקל המוצקים - W_S	נפח המוצקים - V_S
משקל האוויר - W_A	נפח האוויר - V_A
משקל המים - W_W	נפח המים - V_W

1. מבוא

מכניקת קרקע הוא מדע העוסק בתכונות המכניות של הקרקעות לסוגיהן, כבסיס לפתרון בעיות הנדסיות הקשורות בקרקע, כגון ביסוס מבנים, סלילת דרכים, איגום, תיעול, ניקוז וכו'. מאמר זה יביא לידיעת מהנדס הניקוז את הנושאים ממכניקת הקרקע, הרלוונטיים לעיסוקו. מפאת ההגבלה על אורכו של המאמר, לא יוצגו בו פיתוחים מתמטיים של נוסחאות. המתעניינים מופנים בזאת לספרות המקצועית הרחבה בנושא.

המים והקרקע הם מרכיבים בסיסיים בהנדסת ניקוז. המים כמרכיב אותו יש לנקז, והקרקע שעל פניה או דרכה המים מתנקזים. הניקוז מתבצע בזרימה חופשית במובלים פתוחים או סגורים, כולל תעלות טבעיות (נחלים, ואדיות), תעלות מלאכותיות וצינורות או בחלחול אנכי של מים לתוך הקרקע וזרימתם בתוך הקרקע. בתהליך זרימת המים עלול להיגרם נזק לקרקע, ובמאגרים לא מדופנים עלולה להתרחש התרוקנות עקב חלחול או מחתור. הקרקע היא הבסיס לכל מבנה. התנהגות הקרקע מבחינת תסבולת לכוחות, ושינויי נפח של התכונות או תפיחה כתוצאה מעומס, מהרטבה או מייבוש, חשובה לתכן היסודות והאפיקים.

הקרקע מורכבת מגרגרי עפר מוצקים, היוצרים את הנפח הכולל שלה. הגרגרים אינם ממלאים את כל הנפח ויש ביניהם חללים. חללים אלה יכולים להיות תפוסים על ידי אוויר, מים או על ידי אוויר ומים, כפי שמוצג סכמטית בתרשים 1. באמצעות הידוק ניתן להקטין את נפח החללים, אך לא ניתן להגיע למצב שבו נפח החללים הוא אפס.

במצב בו אין בקרקע מים, היא נקראת יבשה. במקרה שכל החללים מלאים במים (ללא אוויר), הקרקע נקראת רוויה. תכונות הקרקע תלויות בגודל גרגרי העפר, בצורתם, בהרכב המינרלי שלהם, בצפיפות, ברטיבות ובשינויי הרטיבות.

$$\gamma = \gamma_d (1 + \omega) \quad [11] \text{ משקל מרחבי}$$

$$\gamma_{SAT} = \frac{G_s + e}{1 + e} \gamma_w \quad [12] \text{ משקל מרחבי רווי}$$

המשקל המרחבי הרווי מציין את המשקל המרחבי של עפר במצב רווי, היינו כאשר $S_R = 1$ (submerged unit) משקל מרחבי מטובע

$$\gamma_{SUB} = \gamma_{SAT} - \gamma_w = \frac{G_s - 1}{1 + e} \gamma_w \quad (\text{weight})$$

במצב מטובע, העפר מוצף במים ולכן פועל על העפר הרווי כוח עילוי, ומכאן משקלו המרחבי הרווי קטן במשקל הסגולי של המים.

3. הידוק וצפיפות

3.1 הידוק

בניגוד לחלקי מבנה שונים שניתן לתכננם מבעוד מועד ולהזמין לפי דרישות המתכנן, הקרקע מהווה גורם נתון, אשר במצבה הטבעי לעתים רחוקות מתאימה לצרכים הנדסיים. הדבר בולט במיוחד במקרים בהם הקרקע עצמה משמשת כמבנה הנדסי: סוללות עפר, סוללות כבישים, סכרי עפר וכו'. קרקע תחוחה חלשה וחדירה יחסית ומקטינה את נפחה בהשפעת עומס חיצוני, דבר הגורם נזק למבנים או דרכים המבוססים עליה. על מנת לחזק את הקרקע ולהקטין את מידת התכווצותה, יש לדחוס אותה, היינו להקטין את נפח החללים שבין הגרגרים. זאת מבצעים באתר באמצעות מכשירים המפעילים על הקרקע כוחות סטטיים או דינמיים תוך כדי הרטבה. ההרטבה מקטינה את החיכוך בין הגרגרים ומקילה על תנועתם היחסית, תוך כדי הדחיסה. הכוחות המופעלים על ידי המכשירים גורמים לגרגרי הקרקע לנוע ולהקטין את נפח החללים שביניהם, תוך סילוק האוויר מהקרקע. בכך מקבלים קרקע שתסכולתה לפעולת עומס גדולה יותר, חדירותה קטנה יותר, ושינויי הנפח הצפויים עקב פעולת העומס קטנים יותר.

במפרטים מגדירים את ההידוק היחסי הנדרש R.C. (relative compaction) או במילים אחרות, את רמת ההידוק הנדרש כ- % מסוים (למשל 95%) מהמשקל המרחבי היבש המקסימלי האפשרי לאותה קרקע, באותם אמצעי הידוק. הערך של

$$V_v = V_A + V_w \quad \text{נפח החללים}$$

מכאן מגדירים את מאפייני הקרקע הבאים:

$$n = \frac{V_v}{V_s} \quad [1] \text{ נקבוביות (porosity)}$$

הנקבוביות מציינת את נפח החללים ביחס לנפח הכולל

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad [2] \text{ מנת חללים (void ratio)}$$

מנת החללים מציינת את היחס בין נפח החללים לבין נפח המוצקים

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \quad [3] \text{ תכולת הרטיבות (water content)}$$

תכולת הרטיבות מציינת את היחס בין משקל המים לבין משקל המוצקים. ישנן דיסציפלינות שונות, בהן נהוג להשתמש בתכולת הרטיבות הנפחית, קרי היחס בין נפח המים לבין נפח המוצקים.

$$S_R = \frac{V_w}{V_v} \quad [4] \text{ דרגת רוויה (degree of saturation)}$$

דרגת הרוויה מציינת את החלק היחסי של החללים המלאים מים.

כאשר $S_R = 1$ העפר נקרא רווי.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad [5] \text{ משקל מרחבי יבש (dry unit weight)}$$

משקל מרחבי יבש מציין את המשקל המרחבי של העפר כשהוא יבש (החללים ריקים ממים).

$$\gamma = \frac{W_s + W_w}{V} \quad [6] \text{ משקל מרחבי (של הקרקע) (unit weight)}$$

$$\gamma = \frac{W_s + W_w}{V}$$

משקל מרחבי הכולל את משקל כל המרכיבים (עפר, מים) חלקי נפח כל המרכיבים (עפר, מים ואוויר).

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} \quad [7] \text{ משקל יחסי (specific gravity)}$$

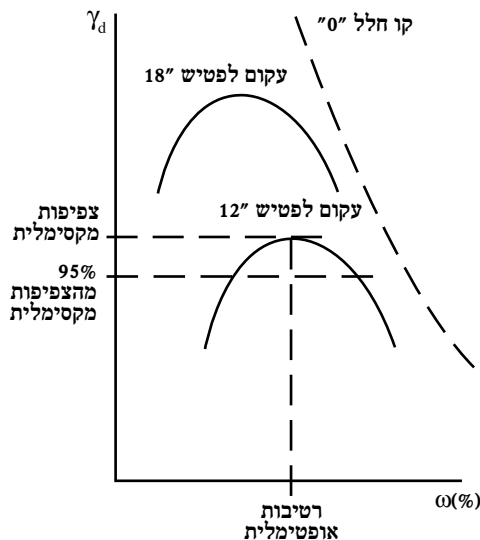
כאשר: γ_w - משקל סגולי של מים. המשקל היחסי מציין את המשקל הסגולי היחסי של גרגר עפר ביחס למשקל מים שנפחם כנפח הגרגר. בהסתמך על הגדרות אלו מתקבלים הקשרים הבאים:

$$n = \frac{e}{e + 1} \quad [8] \text{ נקבוביות}$$

$$S_R = \frac{\omega G_s}{e} \quad [9] \text{ דרגת רוויה}$$

$$\gamma_d = \frac{G_s}{e + 1} \gamma_w \quad [10] \text{ משקל מרחבי יבש}$$

לגליל המתכת. לאחר מכן מהדקים כל שכבה ב-25 הקשות פטיש, כאשר ההידוק מתבצע בגליל בקוטר 4"; או ב-56 הקשות פטיש כאשר ההידוק מתבצע בגליל בקוטר 6". מורידים את החלק העליון של הגליל (הצווארון) חותכים ומיישרים את שכבת העפר העליונה לפי פני הגליל. משקל הגליל לפני ואחרי הכנסת המדגם, כמו גם נפח המדגם (שווה לנפח הגליל) ידועים, ומכאן ניתן לחשב במישרין את המשקל המרחבי γ של העפר בתוך גליל הבדיקה. במקביל שוקלים חלק מן המדגם, מייבשים ושוקלים שנית לאחר הייבוש. לפי הפרש המשקלים מחשבים את תכולת הרטיבות ω ומכאן ניתן לחשב גם את המשקל המרחבי היבש γ_d . מבצעים את הניסוי עם כמויות מים שונות ואז משרטטים עקום הנקרא עקום צפיפות-רטיבות, כמתואר בתרשים 4.



תרשים 4: עקום צפיפות-רטיבות

מהעקום מתקבלת הצפיפות המקסימלית $\gamma_{d MAX}$ ותכולת הרטיבות המתאימה לה, הנקראת רטיבות אופטימלית ω_{opt} . מכפלת הצפיפות המקסימלית המתקבלת בניסוי בדרגת ההידוק המוגדרת במפרט, היא המשקל המרחבי המינימלי אליו צריך להגיע בתהליך ההידוק באתר. תכולת הרטיבות האופטימלית משמשת כנתון בסיסי לקביעת היקף ההרטבה של הקרקע שתאפשר להגיע לדרגת ההידוק הנדרשת.

בתרשים 4 מתואר קו חלל "0", המציין את המשקל המרחבי התיאורטי ברוויה בכל תכולת רטיבות. כמובן שלא ניתן להגיע למשקל מרחבי

משקל מרחבי יבש זה (צפיפות מקסימלית), נקבע בניסוי מעבדה הנקרא בדיקת פרוקטור משופרת (Modified Proctor).

3.2 ניסוי פרוקטור

ניסוי פרוקטור נקרא על שמו של מהנדס אמריקאי, R.R. Proctor, אשר לראשונה בשנת 1933 פיתח עקרונות בסיסיים להידוק קרקעות. באופן כללי, הניסוי הזה מתאים הן לקרקעות והן לתערובות אגרגטים, בהן לפחות 40% מהאגרגרים הם בגודל שאינו עולה על 19 מ"מ (עובר נפה 3/4" - כאמור להלן בסעיף 4). הבדיקה שמבוצעת תוך שימוש בפטיש שמשקלו 2.5 ק"ג וגובה הנפילה שלו 305 מ"מ (12"), נקראת בדיקת פרוקטור סטנדרטית (Standard Proctor) וזו שמבוצעת בפטיש שמשקלו 4.5 ק"ג וגובה הנפילה שלו 457 מ"מ (18"), נקראת בדיקת פרוקטור משופרת (Modified Proctor).

ההידוק מתבצע בגליל מתכת בקוטר 101.6 מ"מ (4") על חלק מן המדגם שגודל האגרגרים שבו אינו עולה על 4.75 מ"מ (עובר נפה #4), בתנאי שהחלק הזה מהווה לפחות 80% מהמדגם הכולל. בכל שאר המקרים, ההידוק מתבצע בגליל מתכת בקוטר 152.4 מ"מ (6") על חלק מן המדגם שגודל האגרגרים שבו אינו עולה על 19 מ"מ (עובר נפה 3/4"). התוצאות שמתקבלות בבדיקה המעבדתית המפורטת להלן, עוברות תיקון עבור המקטע הגס שלא נכלל בבדיקה (כמפורט לדוגמה בנוהל בדיקה 13.300, טכניון-מע"צ-מת"י, 1995). תרשים 3 מציג את הציוד לבדיקת פרוקטור.

אופן הבדיקה: תחילה, מערבבים את מדגם הקרקע עם כמות מים מדודה עד לקבלת תערובת אחידה, מכניסים אותה ב-3 שכבות (Standard Proctor) או ב-5 שכבות (Modified Proctor)



תרשים 3: ציוד לבדיקת פרוקטור



תרשים 5: ציוד בדיקת קונוס חול

בתחום החור, אוספים את כל העפר החפור, שוקלים אותו ובודקים את תכולת רטיבותו. מניחים את הבקבוק עם הקונוס על המגש, כאשר פני הקונוס כלפי מטה והוא מכסה את החור. פותחים את הברז עד שהחול ממלא את הקונוס. סוגרים את הברז ושוקלים את הבקבוק. בשלב השני מניחים את החול. ממלאים שוב את הבקבוק ושוקלים אותו. מניחים את הבקבוק עם הקונוס על מיכל הכיול, כאשר פני הקונוס כלפי מטה. פותחים את הברז עד שהקונוס מתמלא חול, וסוגרים את הברז. שוקלים שוב את הבקבוק עם החול שנותר בתוכו. על בסיס הפרשי המשקל בשלב השני, והנפחים הידועים של הקונוס ומיכל הכיול, מחשבים את המשקל המרחבי של החול. מתוך הפרשי המשקל שנמצאו בשלב הראשון, והמשקל המרחבי של החול, מחשבים את נפח החול שהוזרם בשלב הראשון. הפחתה של נפח הקונוס מנפח החול שהוזרם, תיתן את נפח העפר שנחפר. נפח זה, משקל העפר שנחפר ותכולת רטיבותו, מאפשרים לחשב את המשקל המרחבי היבש של הקרקע באתר. בשיטה "ללא הרס", משתמשים במד צפיפות גרעיני (תרשים 6), אשר מסוגל למדוד הן את הצפיפות והן את תכולת הרטיבות של הקרקע. עקרונות השיטה מבוססים על כך שחלקיקי עפר מפזרים את קרינת גמא המוקרנת לתוך הקרקע ומידת הפיזור פרופורציונית לצפיפות הקרקע.

זה בתהליך ההידוק. קו זה יכול לשמש כמדד טוב לתקינות הבדיקה. משוואת קו חלל "0" היא:

$$\gamma_{d \text{ "zero air voids" line}} = \frac{G_s}{1 + G_s \omega} \cdot \gamma_w \quad [14]$$

3.3 צפיפות יחסית

דרך אחרת להגדיר את רמת ההידוק של הקרקע, אשר מקובלת מאוד גם לאפיון קרקעות גראנולריות, כדוגמת חול, במצבן הטבעי, היא באמצעות מנת החללים e הקיימת בקרקע. אם לקרקע מנת החללים במצב התחוח ביותר היא e_{MAX} , ומנת החללים במצב הצפוף ביותר היא e_{MIN} , הצפיפות היחסית (D_r relative density) היא:

$$D_r = \frac{e_{MAX} - e}{e_{MAX} - e_{MIN}} \quad [15]$$

משמעותה מפורטת להלן:

טבלה 1: משמעות הצפיפות היחסית

משמעות לגבי העפר	צפיפות יחסית (%)
תחוח מאוד	15-0
תחוח	35-15
בינוני	65-35
צפוף	85-65
צפוף מאוד	100-85

קיים אף קשר אמפירי בין ההידוק היחסי הנדרש לבין הצפיפות היחסית והוא:

$$R.C. = 80 + 0.2D_r \quad [16]$$

נוסף להגדרת "מצב הצפיפות" של קרקע ביחס למצבי הקצה "תחוח" ו-"צפוף", מקובל מאוד להשתמש בצפיפות היחסית כמדד לחוזק קרקעות גראנולריות.

3.4 צפיפות שדה

לשם בקרת רמת ההידוק של מילוי או לקביעת המשקל המרחבי היבש של הקרקע באתר, מבצעים בו ניסוי "צפיפות שדה". ניסוי זה ניתן לבצע עם או ללא ההרס של התווך הנבדק. שיטת ה"הרס" המקובלת נקראת "קונוס חול" (תרשים 5). מערכת הניסוי כוללת בקבוק חול עם קונוס וברז, מיכל כיול, מגש עם חור במרכזו וחול יבש. נפח הקונוס ונפח מיכל הכיול ידועים. לניסוי שני שלבים. בשלב הראשון ממלאים את הבקבוק בחול ושוקלים אותו. מיישרים ומחליקים את הקרקע באתר ומניחים עליה את המגש. חופרים בקרקע

יש לציין כי החלק המופרד של המדגם שעבר דרך נפה 4.75 מ"מ, לפני הניפוי שתואר לעיל, עובר תחילה שטיפה במים, כאשר הוא מונח על נפה #200 וזאת במטרה להפריד בין מה שמשתייר ולבין מה שעובר דרך נפה זו. החומר שנשאר על נפה #200 לאחר השטיפה עובר ייבוש, שקילה ולאחר מכן ניפוי דרך הנפות הרשומות בטבלה 2 (תחתונה).

מסווגים את הדירוג לפי חלוקת המדגם לפרקציות השונות (המקטעים השונים). הפרקציה מוגדרת כתחום מסוים של גודל הגרגר, בדרך כלל בין שתי נפות סמוכות. זאת אומרת שהפרקציה מבטאת גודל גרגר, בין ערך מקסימלי שהוא גודל העינית בנפה שאותה הגרגר עובר לבין ערך מינימלי שהוא גודל העינית בנפה הסמוכה שעליה הגרגר משתייר.

מקובל לסווג את הדירוג כדלקמן:

דירוג טוב - חלוקת החומר רצופה בין הפרקציות השונות. לעקום הדירוג שיפוע מתון ללא "מדרגות", גרף (1) בתרשים 7.

דירוג אחיד - רוב החומר מتركז בפרקציה אחת. לעקום הדירוג שיפוע תלול, גרף (2) בתרשים 7. דירוג גרוע - חלוקה בלתי שווה של פרקציות, כאשר באחת יש עודף ובאחרת חוסר בולט. עקום הדירוג מתבטא בקווים אופקיים ו/או בקווים אנכיים, גרף (3) בתרשים 7.

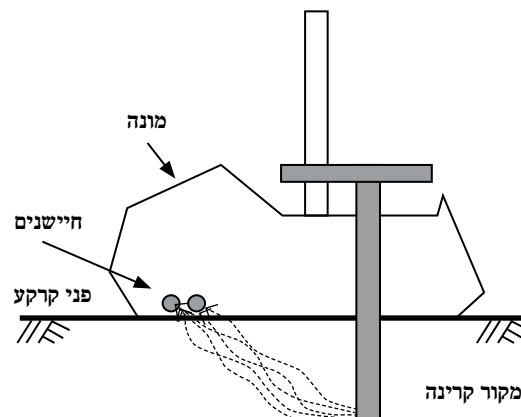
בתרשים 8 מוצגת הדגמה גרפית מופשטת לכל סוגי הדירוג.

5. גבולות סומך ואקטיביות של

קרקעות דקות גרגר

5.1 מבוא והגדרות

בעוד קרקעות גסות גרגר קלות לאפיון באמצעות הדירוג, לא כך הדבר לגבי קרקעות דקות גרגר. נהוג



תרשים 6: מד צפיפות גרעיני

4. דירוג קרקעות

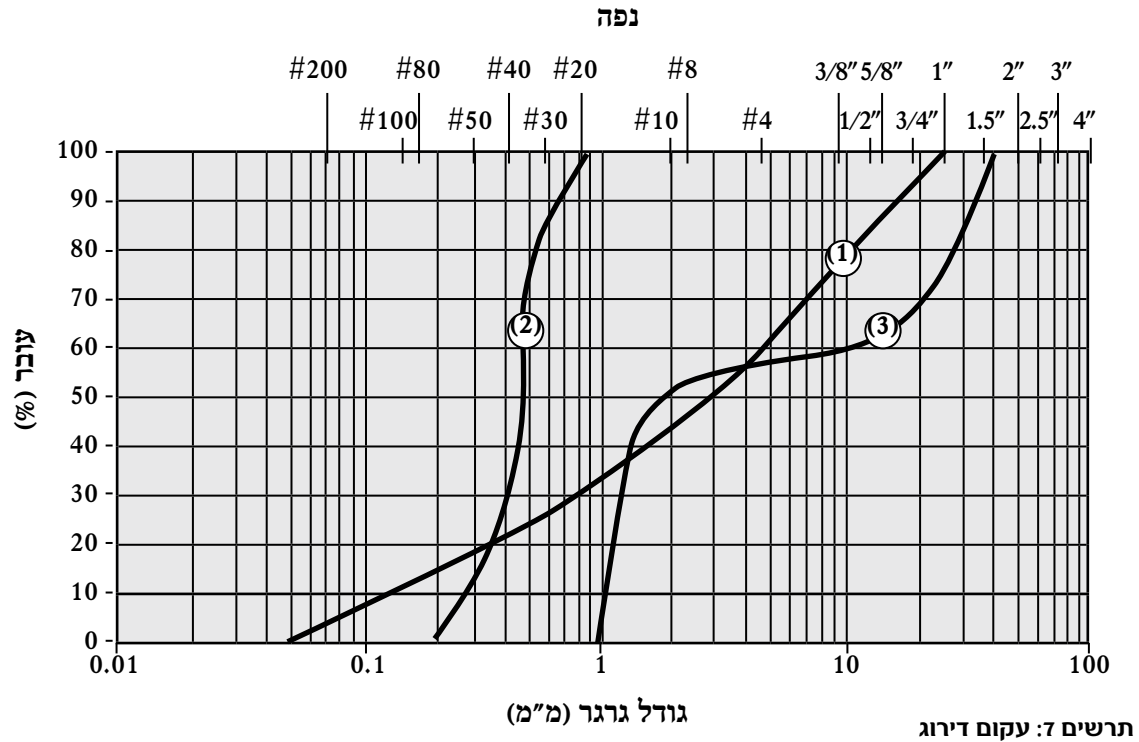
כאמור, הקרקע מורכבת ממוצקים הנקראים גרגרים. גודל גרגרי הקרקע אינו אחיד אפילו באותו מיקום. את גודל גרגרי הקרקע ואת התפלגותו, בודקים בתהליך ניפוי מכני באמצעות נפות תקניות, כמפורט בטבלה 2 לפי ת"י 253.

מדרגים את הקרקע דירוג ראשוני לפי גודל הגרגר, לקרקע גסת גרגר שגודל הגרגרים שבה גדול מ-0.075 מ"מ (משתייר על נפה #200), ולקרקע דקת גרגר שגודל הגרגרים שבה קטן מ-0.075 מ"מ (עובר נפה #200). תחילה מופרד המדגם על נפה 4.75 מ"מ (#4) לשני חלקים: מקטע משתייר על נפה 4.75 מ"מ ומקטע עובר. לאחר ייבוש מנפים כל מקטע דרך מערכת נפות מתאימה (טבלה 2), החל מהנפה בעלת ה"עין" העבה ביותר ועד לנפה בעלת ה"עין" הדקה ביותר. שוקלים את העפר המשתייר על כל נפה, מחשבים את % העפר העובר דרך כל נפה, ומתווים גרף על נייר לוגריתמי למחצה, דוגמת תרשים 7, הנקרא עקום דירוג.

טבלה 2. נתוני נפות תקניות

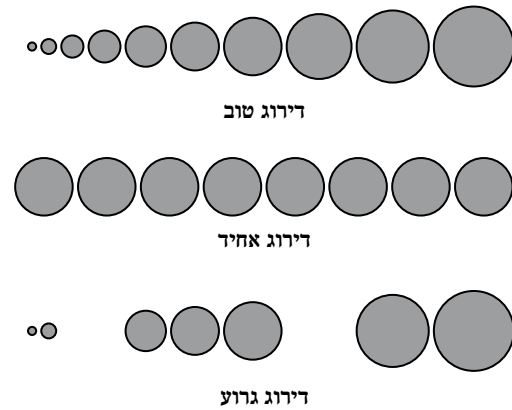
כינוי הנפה	3/8"	1/2"	5/8"	3/4"	1"	1.5"	2"	2.5"	3"	4"
עין הנפה (מ"מ)	9.5	12.5	14	19	25	37.5	50	63.5	75	100

כינוי הנפה	#200	#100	#80	#50	#40	#30	#20	#10	#8	#4
עין הנפה (מ"מ)	0.075	0.150	0.180	0.30	0.425	0.06	0.85	2.0	2.36	4.75

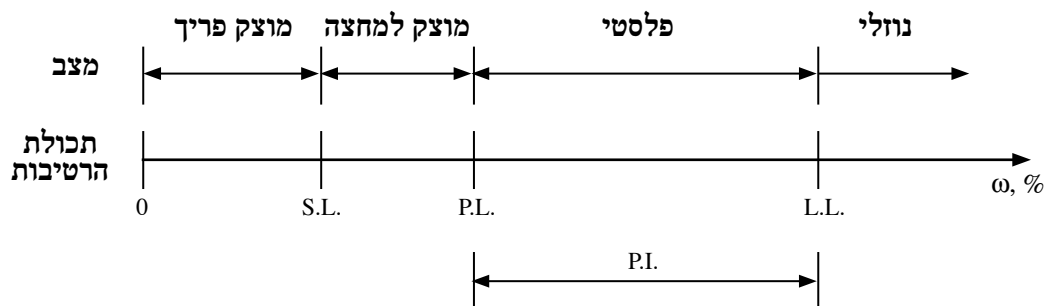


לאפיין קרקעות אלו באמצעות תכונות פלסטיות שלהן, אשר נובעות מכושר ההידבקות של גרגרי הקרקע זה לזה. קרקע זו מתגבשת לרגבים קשים בייבוש, ניתנת ללישה (פלסטית) בתחום מסוים של תכולת רטיבות, ומאבדת את כושר ההידבקות בין הגרגרים (נזילה) בתכולת רטיבות גבוהה מערך מסוים. בהתאם, מוגדרים גבולות תכולת הרטיבות המפרידים בין התחומים, כגבולות סומך או גבולות אטרברג, כמפורט להלן:

גבול הנזילות (ω_L או $L.L.$) - תכולת רטיבות שבה העפר עובר ממצב פלסטי למצב נזילה.
 גבול הפלסטיות (ω_p או $P.L.$) - תכולת הרטיבות שבה העפר מתחיל להיות פלסטי והופך מחומר שאינו נילוש לחומר נילוש.



תרשים 8: הדגמה גרפית של סוגי דירוג שונים

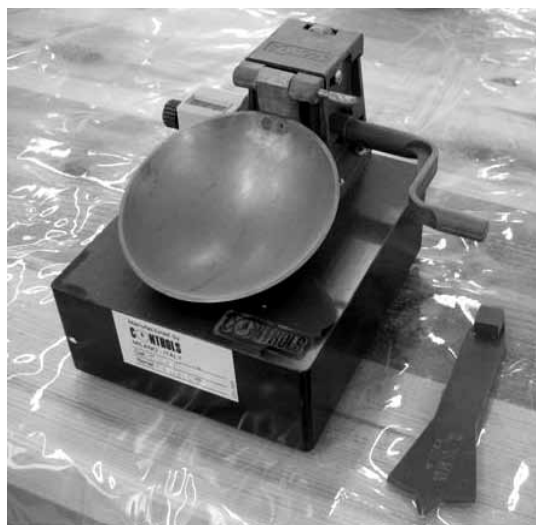


תרשים 9: הצגה סכמאטית של גבולות סומך

טבלה 3. גבולות סומך של מינרלים חרסיתיים שונים

מינרל	$L.L.$, %	$P.L.$, %	$S.L.$, %
מונטמורילוניט	900-100	100-50	15-8.5
נונטרוניט	72-37	27-19	
איליט	120-60	60-35	17-15
קאוליניט	110-30	40-25	29-25
הידרט		60-47	
האללויסיט	70-50		
דהידרט		45-30	
האללויסיט	55-35		
אטאפולגיט	230-160	120-100	
כלורית	47-44	40-36	
אלופאן (לא מיובש)	250-200	140-130	

את הניסוי למספר תכולות רטיבות, כך שתוצאות מספר ההקשות תהיינה מפורזות בכל התחום שבין 15 ל- 35 הקשות. מתארים גרף (כקו ישר) של תכולת הרטיבות כפונקציה של לוגריתם מספר ההקשות, כמתואר בתרשים 11. גבול הנזילות הוא תכולת הרטיבות המתאימה ל- 25 הקשות.



תרשים 10: מכשיר קסגרנדה לקביעת גבול נזילות וכלי חריצה

5.3 גבול הפלסטיות

גבול הפלסטיות נקבע בניסוי, שבו מגלגלים עפר על גבי לוח זכוכית לצורת חוטים. גבול הפלסטיות מוגדר כתכולת הרטיבות בה החוטים בהגעתם לעובי של כ- 3 מ"מ מתחילים להתפורר. ישנם מקרים בהם לא ניתן להגדיר את גבול הפלסטיות, כיוון שלא ניתן לגלגל חוטים כלל או שהם מתפוררים לפני הגעתם לעובי הדרוש. במקרה

גבול ההתכווצות ($S.L.$ או ω_s) - תכולת הרטיבות (בערך הגבוה ביותר) שבה ייבוש נוסף לא יגרום להתכווצות נוספת.

אינדקס הפלסטיות ($P.I.$ או I_p) - תחום תכולת הרטיבות בין גבול הנזילות לבין גבול הפלסטיות, היינו:

$$P.I. = L.L. - P.L. \quad [17]$$

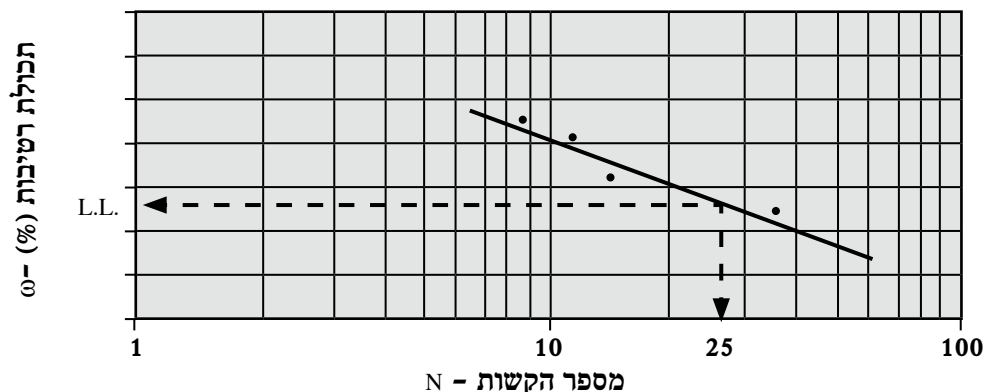
אינדקס הפלסטיות הוא מדד לפלסטיות הקרקע. גורם זה נותן ביטוי לשינויי הנפח (התכווצות או תפיחה) הצפויים בקרקעות דקות גרגר בתהליכי הרטבה וייבוש.

תרשים 9 מתאר בצורה סכמטית את גבולות הסומך של העפר ושינויי מצב שהוא עובר בין גבולות אלה. טבלה 3 מפרטת את גבולות הסומך עבור מינרלים חרסיתיים שונים לפי Mitchell (1993). גבולות הסומך השונים נקבעים בניסויים, כמפורט בסעיפי המשנה הבאים.

5.2 גבול הנזילות

גבול הנזילות נקבע בניסוי מעבדה בעזרת מכשיר קסגרנדה. המכשיר כולל צלחת, ידית עם מנגנון אקסצנטרי וחורץ תקניים (תרשים 10). הבדיקה נעשית רק על חלק מן המדגם שגודל גרגריו קטן מ- 0.425 מ"מ (עובר נפה #40).

סיבוב הידית, מעלה את הצלחת במידה תקנית מסוימת ומפיל אותה חזרה. כל הפלה נקראת הקשה. מדגם העפר ברטיבות נתונה מוכנס לצלחת. את המדגם חורצים באמצעות החורץ. מסובבים את הידית וסופרים את מספר ההקשות N עד לסגירת החריץ לאורך של כ- 13 מ"מ. מבצעים



תרשים 11: תוצאות ניסוי גבול נזילות

קרקע דקת גרגר לפי McCarthy (1998).

טבלה 4. אקטיביות של קרקעות דקות גרגר

סוג הקרקע	אקטיביות
לא פעילה	קטנה מ- 0.75
נורמלית	1.25 - 0.75
פעילה	גדולה מ- 1.25

5.6 פוטנציאל שינוי הנפח

פוטנציאל שינוי הנפח, הוא פונקציה של אינדקס הפלסטיות וה- % המשקלי של גרגרי העפר הקטנים מ- 2 מיקרון, כמתואר בתרשים 12, לפי McCarthy (1998). משמעות הפוטנציאל מבחינת שינוי הנפח, מפורט בטבלה 5 לפי McCarthy (1998).

טבלה 5. פוטנציאל שינוי הנפח

קטגוריה	שינוי הנפח הצפוי (%)
פוטנציאל נמוך	קטן מ- 2
פוטנציאל בינוני	5 - 2
פוטנציאל גבוה	10 - 5
פוטנציאל גבוה מאוד	גדול מ- 10

6. מיון קרקעות

על מנת להבדיל בין הקרקעות השונות, נקבעו להם שמות וכינויים מוסכמים באמצעות אותיות לועזיות. כיוון שקרקע באתר מורכבת בדרך כלל ממספר סוגי עפר, יש צורך לעתים להשתמש במספר כינויים כדי להגדירה. ת"י 253 דן במיון

זה, הקרקע מוגדרת כלא פלסטית (N.P.) ואינדקס הפלסטיות שלה שווה ל- 0.

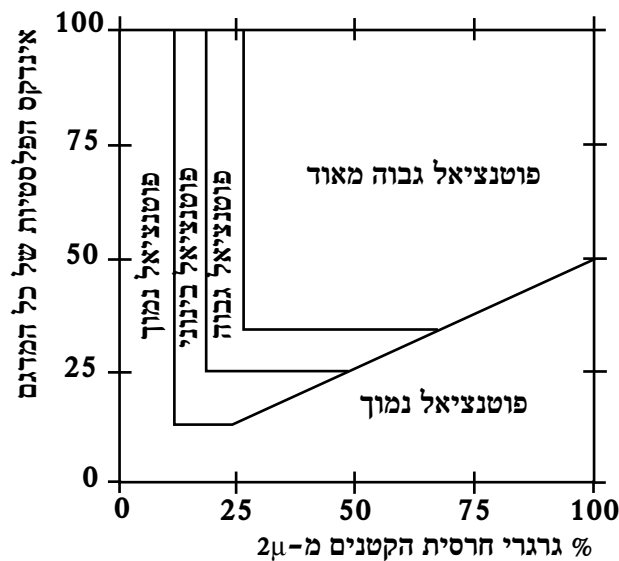
5.4 גבול ההתכווצות

קרקע פלסטית סופחת מים ותופחת (מגדילה את נפחה). ייבוש קרקע בעלת תכונות פלסטיות גורם להתכווצותה. גבול ההתכווצות הוא תכולת הרטיבות שבה תיעצר ההתכווצות גם אם יימשך הייבוש. זאת אומרת, מדובר על תכולת הרטיבות ברוויה, בנפח המינימלי של הקרקע, שהוא הנפח במצב יבש.

גבול ההתכווצות נקבע בניסוי שבו מייבשים מדגם קרקע ושוקלים אותו. מכניסים למיכל מלא כספית עד שפתו ולוחצים את מדגם הקרקע לתוך המיכל. את הכספית הנפלטת מהמיכל אוספים ושוקלים. לפי המשקל הסגולי של הכספית ניתן לחשב את נפח הכספית שנפלטה מהמיכל, וזה גם נפח מדגם הקרקע. לפי המשקל והמשקל היחסי של הקרקע, ניתן לחשב את נפח המוצקים. נפח החללים הוא נפח הכספית שנפלטה פחות נפח המוצקים. בהתאם, ניתן לחשב את נפח החללים ואת תכולת הרטיבות ברוויה, שהיא גבול ההתכווצות.

5.5 אקטיביות

האקטיביות היא מדד לשינוי הנפח הצפוי בקרקעות דקות גרגר, עקב הרטבה מעבר לגבול ההתכווצות. היא מוגדרת כיחס בין אינדקס הפלסטיות ב- %, חלקי ה- % המשקלי של גרגרי העפר הקטנים מ- 2 מיקרון (0.002 מ"מ). האקטיביות היא מספר חסר מימד שערכיו התיאורטיים הם בין אפס לאינסוף. להלן בטבלה 4 מספר נתונים לאקטיביות של



תרשים 12: פוטנציאל שינוי נפח

מקדם האחידות C_U :

$$G_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad [18]$$

ומקדם העקמומיות C_C :

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60}D_{10}} \quad [19]$$

כאשר D_{10}, D_{30}, D_{60} - הם גודלי הגרגרים המתאימים לאחוז עובר של 10, 30, 60 בהתאמה. דוגמה להגדרת גדלים אלה עבור עקום דירוג (1) ניתן לראות בתרשים 13.

עבור קרקע חול (S), דירוג מלא (W) מוגדר כאשר מתקיימים שני התנאים יחד: $C_U \geq 6$ ו- $1 < C_C < 3$, בכל שאר המקרים, הדירוג יהיה דירוג חסר (P). תנאים עבור דירוג מלא של צרורות (G) שונים במקצת והם: $C_U \geq 3$ ו- $1 < C_C < 3$. המיון המשני של קרקעות דקות גרגר (עובר נפה #200), מתייחס למידת פלסטיות או למידת האורגניות שלה:

שמנה (H) - גבול נזילות מעל 50%.

רזה (L) - גבול פלסטיות נמוך מ-50%.

הקרקע תמוין כטיין שמן או רזה או כחרסית שמנה או רזה או כאורגנית, לפי המיקום של גבול הנזילות ואינדקס הפלסטיות כמתואר בתרשים 14.

כאשר המדגם הוא תערובת של מספר סוגי קרקע, יידרש מיון כפול. הכללים למיון במצב זה מפורטים בת"י 253, (טבלאות 3-6 שם), ובתרשים הזרימה שבנספח ב' בתקן. התקן קובע גם הנחיות

קרקעות. המיון הראשי של הקרקעות לפי תקן זה הוא בדרך כלל לפי גודל הגרגר וכמפורט להלן: אבן - שבירי סלע המשתירים על נפה 3".

צרורות (G) - גרגרים העוברים נפה 3" ומשתירים על נפה #4.

חול (S) - גרגרים העוברים נפה #4 ומשתירים על נפה #200.

טיין (M) - גרגרים העוברים נפה #200, פלסטיות נמוכה או לא פלסטית, חוזק נמוך לאחר ייבוש באוויר.

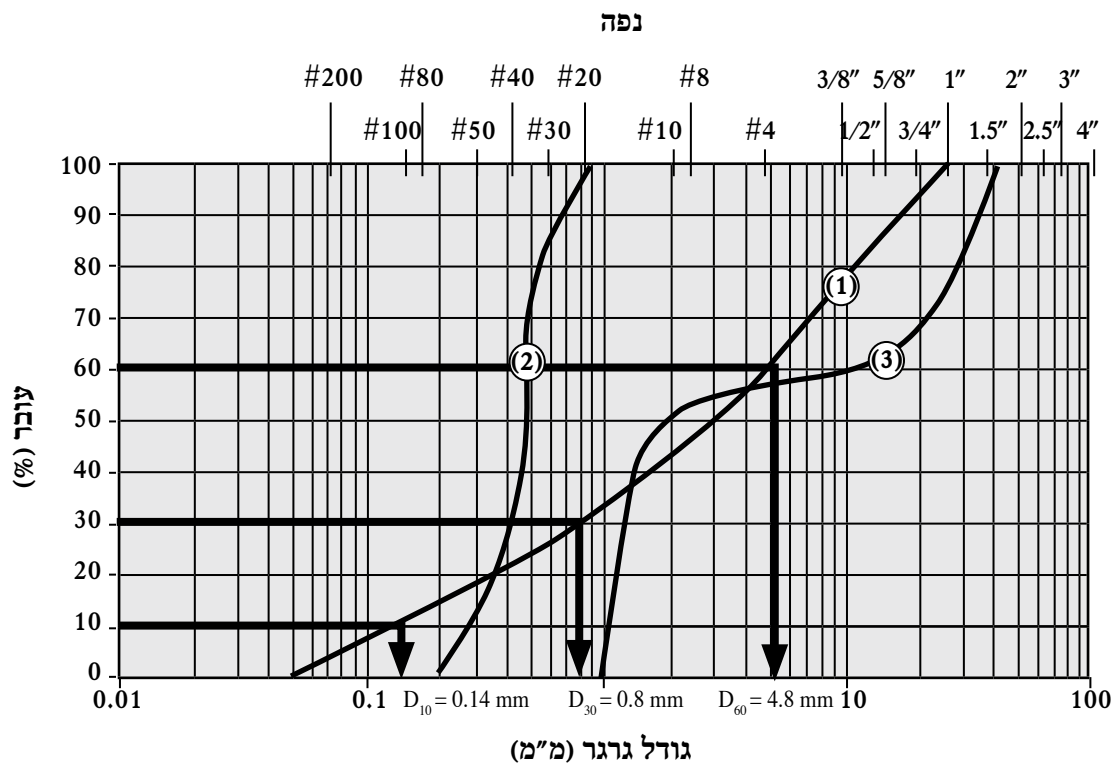
חרסית (C) - גרגרים העוברים נפה #200, פלסטיות גבוהה, חוזק גבוה לאחר ייבוש באוויר.

קרקע אורגנית (O) - בעלת ריח וצבע האופייניים לחומרים אורגניים. הקרקע תוגדר אורגנית אם גבול הנזילות המתקבל לאחר ייבוש בתנור ב- $110^\circ\text{C} \pm 5^\circ$ יהיה קטן מ-0.75 של גבול הנזילות לאחר ייבוש באוויר.

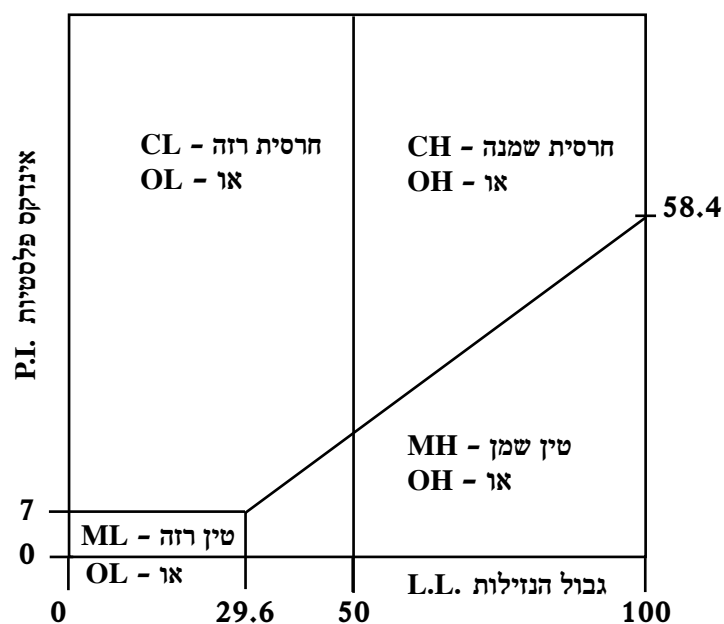
כבול (Pt) - מרכיביה העיקריים הם שרידי צמחייה בשלבי התפרקות שונים.

המיון המשני שונה לקרקעות גסות גרגר ולקרקעות דקות גרגר. המיון המשני לקרקעות גסות גרגר (משתייר על נפה #200) הוא כדלקמן: דירוג מלא (W) - דירוג טוב לפי ההגדרה בסעיף 4. דירוג חסר (P) - דירוג גרוע או אחיד לפי ההגדרה בסעיף 4.

לקביעת המיון (מלא או חסר) יש לחשב שני מקדמים:



תרשים 13: דוגמה להגדרת ערכי D_{10} , D_{30} , D_{60} עבור עקום דירוג



תרשים 14: מיון משני לקרקעות דקות גרגר

לביצוע מיון חזותי באתר.

7. המים בקרקע

7.1 כללי

למים בקרקע שתי צורות אופייניות:

א. מים שנמצאים דרך קבע, ונקראים מי תהום.

ב. מים שנמצאים זמנית.

המים זורמים בקרקע בעקבות הפרשי עומד. מפלס מי התהום משתנה בדרך כלל לפי עונות השנה, הוא עולה בחורף בעקבות הגשמים ויורד בקיץ עקב זרימה ושאובה. המים הזמניים הם מי הגשמים המחלחלים לקרקע, מים המנוקזים דרך הקרקע, מים העולים מתוך הקרקע לתוך חפירה, מים הזורמים דרך סוללה של מאגר מים, מים אגורים הזורמים דרך הקרקע שמתחת לסכר וכדומה. מים הזורמים או עומדים בתוך הקרקע, עלולים לגרום נזק למבנה שתחתיו הם זורמים או להקטנה משמעותית של תסכולת הקרקע לעומס, עקב כוחות העילוי שהם מפעילים על גרגרי הקרקע. נוסף לכך, הם עלולים לסחוף אתם מהחומר הדק של הקרקע ובכך לשנות את הרכבה ואפילו ליצור מחילות בתוכה.

7.2 מקדם החלחול

אחד הגורמים המשפיעים על זרימת המים דרך הקרקע, הוא מקדם החלחול (או מקדם החדירות) המבטא את המוליכות ההידרולית של הקרקע ברוויה. מקדם זה תלוי בעיקר בגודל גרגרי הקרקע. ככל שגרגרי הקרקע גסים יותר, כך מקדם החלחול גדול יותר. בטבלה 6, מפורטים מקדמי חלחול של סוגי קרקע שונים לפי Terzaghi, Peck and Mesri (1995). קרקע נחשבת כבעלת כושר חלחול טוב, כאשר מקדם החלחול גדול מ- 10^{-6} מ' לשנייה, כבעלת חלחול גרוע, כאשר מקדם החלחול קטן מ- 10^{-6} מ' לשנייה וגדול מ- 10^{-8} מ' לשנייה, וכלא מחלחלת (אטומה), כאשר מקדם החלחול קטן מ-

10^{-8} מ' לשנייה.

הגורם השני המשפיע על זרימת המים בקרקע, הוא הגרדיינט ההידראולי i (ראו בן-צבי וגריניס, 2008), המוגדר כהפרש העומד h ליחידת אורך של מסלול הזרימה l , היינו:

$$i = \frac{h}{l} \quad [20]$$

לפי חוק דרסי, הספיקה הסגולית:

$$v = Ki \quad [21]$$

מהירות הזרימה הממוצעת היא:

$$v_{avg} = \frac{v}{n} \quad [22]$$

כאשר n - מנת החללים.

ספיקת המים שעוברת דרך שטח החתך A תהיה:

$$Q = vA = K \cdot i \cdot A = K \cdot \frac{h}{l} \cdot A \quad [23]$$

בזרימה דרך שכבות מקבילות שונות של קרקע,

ניתן לקבוע מקדם חלחול אפקטיבי K_{EF} . לזרימה

מקבילה לשכבות יתקבל:

$$K_{EF} = \frac{1}{H} \sum (K_j H_j) \quad [24]$$

ובזרימה בניצב לשכבות יתקבל:

$$K_{EF} = \frac{H}{\sum \left(\frac{H_j}{K_j} \right)} \quad [25]$$

כאשר:

H - עובי כולל של השכבות, בין שתי הנקודות

שהספיקה מחושבת עבורן,

H_j - עובי השכבה ה- j

K_j - מקדם חלחול של השכבה ה- j .

ערכו של מקדם החלחול נקבע בניסויים.

מקובלים ניסוי בעומד קבוע וניסוי בעומד משתנה.

כמו כן, לצורך הערכה גסה ראשונית של מקדם

החלחול עבור קרקעות חוליות, ניתן להיעזר בקשר

האמפירי הבא:

$$K = 0.01 \cdot CD_{50}^2 \quad [26]$$

כאשר:

K - מקדם החלחול, מ' לשנייה

C - קבוע שערכו נע בין 0.4 לבין 1.2 והערך

טבלה 6. מקדמי חלחול לקרקעות שונות

סוג הקרקע	מקדם החלחול (K) מ' לשנייה
צורות נקיים	$10^{-2} - 1$
צורות + חול נקיים	$10^{-5} - 10^{-2}$
חול דק נקי, שכבות טין אורגני או אי אורגני, תערובת של חול חרסית וטיין	$10^{-9} - 10^{-5}$
קרקע אטומה באמצעות צמחייה	$10^{-9} - 10^{-4}$
קרקע אטומה כגון חרסית, בעומק שאינו מושפע מתנאי אקלים	קטן מ- 10^{-9}

המקובל הוא 1.0

D_{10} - גודל גרגר, המתאים לאחוז עובר של 10%, ס"מ.

7.3 ניסוי חלחול בעומד קבוע

ניסוי חלחול בעומד קבוע, מתאים לקרקעות בעלות כושר חלחול טוב. במתקן הניסוי נמצא מיכל קרקע שאורכו l , ושטח חתכו A , צינור עולה ממיכל הקרקע אל מיכל מים פתוח, שבו שומרים על מפלס קבוע של פני המים, וצינור יורד ממיכל הקרקע לכלי מדירה, כפי שמתואר בתרשים 15. הפרש המפלסים בין שני מיכלי המים הוא h . מודדים את נפח המים V הזורמים מהמיכל העליון לתוך כלי מדירה במשך זמן t . הביטוי למקדם החלחול של הקרקע שמיכל הוא:

$$K = \frac{VI}{Ath} \quad [27]$$

7.4 ניסוי חלחול בעומד משתנה

ניסוי חלחול בעומד משתנה, מתאים לקרקעות בעלות כושר חלחול גרוע או לקרקעות אטומות. המתקן דומה למתקן החלחול בעומד קבוע, אלא שכאן לא קיים מכל מים עליון אלא רק צינור מים עליון, שבו בתחילת הניסוי קיימים מים במפלס

מסוים ועם הזרימה מפלס המים יורד ואין מוסיפים מים למערכת (תרשים 16).

הפרש העומד אינו קבוע, אלא קטן והולך במשך הניסוי. אם הפרש העומד ההתחלתי הוא h_1 , הפרש העומד הסופי h_2 , שטח חתך הצינור העליון הוא A_0 ומשך הניסוי הוא t , אז הביטוי למקדם החלחול של הקרקע שבמכל הוא:

$$K = \frac{A_0 l}{At} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad [28]$$

7.5 רתיחה - חול נוזלי

כאשר מים זורמים בקרקע כלפי מעלה, הם עלולים לפרוץ מפני הקרקע ולהניף עמם גרגרי עפר. תופעה זו נקראת "רתיחה", "התנזלות" או "חול נוזלי". הגרדיינט המינימלי שבו התופעה מתגלה הוא:

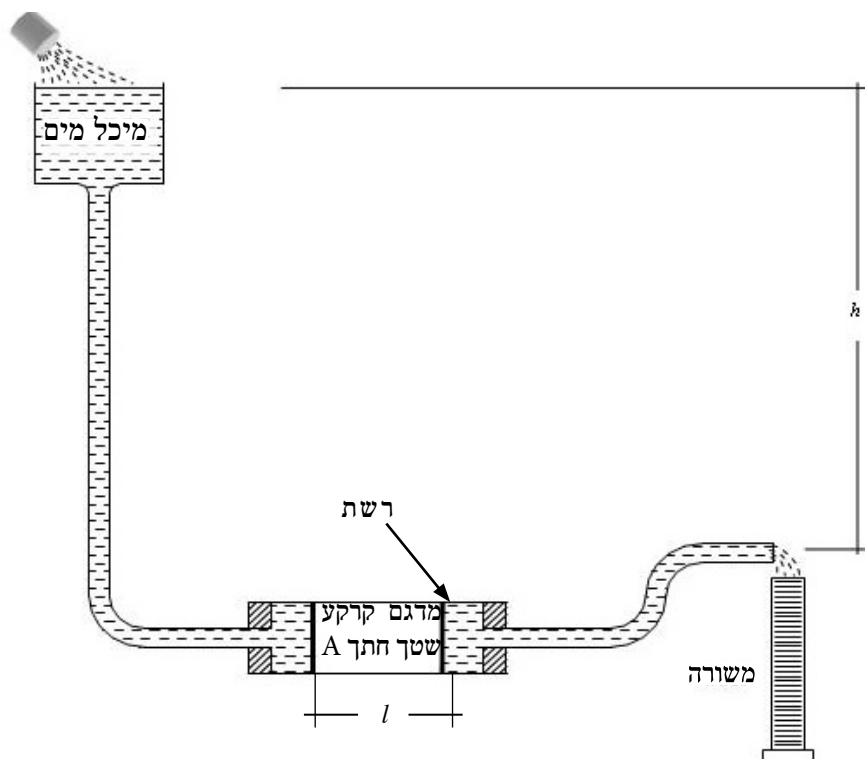
$$i_{cr} = \frac{h}{l} = \frac{\gamma_{SAT} - \gamma_w}{\gamma_w} + \frac{W_L}{\gamma_w l} \quad [29]$$

כאשר:

W_L - העומס הנוסף על פני הקרקע ליחידת שטח.

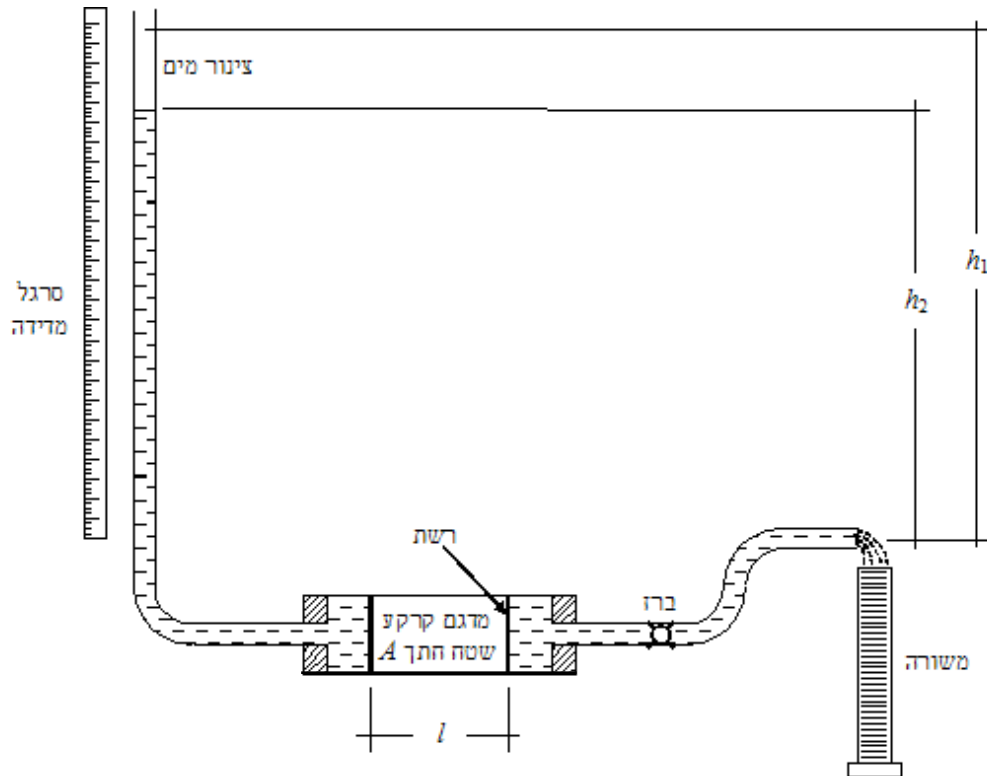
7.6 זרימה שלא בקווים ישרים

כאשר קיים הפרש עומד והזרימה אינה יכולה להתבצע בקווים ישרים, למשל בזרימה מתחת לקיר שיגומים כמתואר בתרשים 17, לחישוב

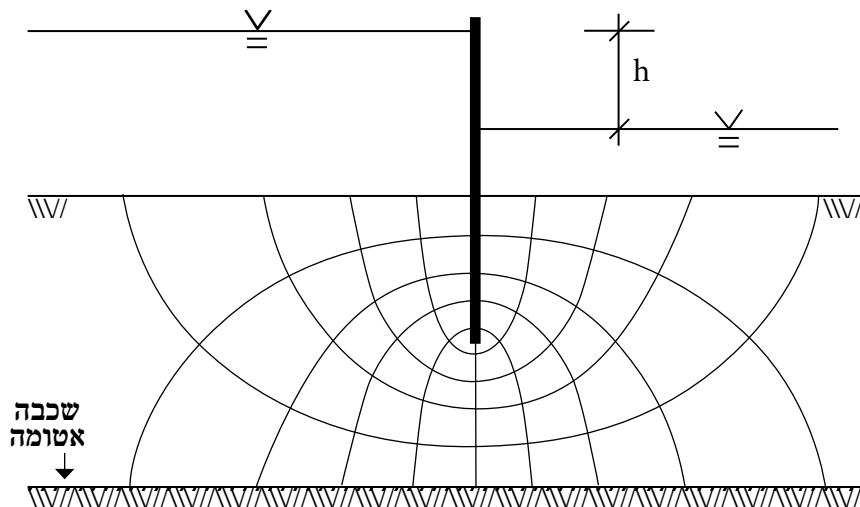


תרשים 15: ניסוי חלחול בעומד קבוע

מכניקת קרקע



תרשים 16: ניסוי חלחול בעומד משתנה



תרשים 17: רשת זרימה מתחת לקיר שיגומים

הקיר. הקווים האקוויפוטנציאליים ניצבים לקווי הזרם. את קווי הרשת יש לצופף, כדי שהמשבצות המתקבלות תיראנה ריבועיות בקירוב. הביטוי לספיקה יהיה:

$$q = Kh \bar{m}_f^2 \quad [30]$$

כאשר:

n_f - מספר המשבצות לאורך שפופרת זרם
 n_d - מספר שפופרות הזרם.

הספיקה יהיה צורך לתאר רשת זרימה באמצעות קווי זרם וקווים אקוויפוטנציאליים.

קווי הזרם מבטאים שפופרות זרם. הקווים האקוויפוטנציאליים הם קווים שבכל נקודתיהם העומד זהה (משמע, מפלס המים בפיזומטר המוצב בכל נקודה על הקו יהיה אחיד), כאשר הקווים האקוויפוטנציאליים הראשון והאחרון מתלכדים בהתאמה עם פני השטח מצד שמאל ומצד ימין של

8. המאמץ בקרקע

לעתים קרובות, טיפול בבעיות הנדסיות שונות הקשורות לקרקע, כרוך בניתוח מאמצים אשר פועלים בעומק מסוים. באופן כללי, אנחנו מבחינים בשני מרכיבי מאמץ עיקריים בקרקע והם:

- מאמץ בין-גרגרי: מאמץ הנובע מכוחות המגע בין גרגרי הקרקע. מאמץ זה נקרא "המאמץ האפקטיבי" וסימונו המקובל הוא σ_{eff} או σ' .
- לחץ מי הנקבים: לחץ אשר נובע מכוחות הידרוסטאטיים של המים וסימונו המקובל הוא u . סכום שני מרכיבי המאמץ נקרא "המאמץ הטוטלי" וסימונו המקובל הוא σ_T או σ .

$$\sigma = \sigma' + u \quad [31]$$

כיוון שמאמץ טוטלי בנקודה כלשהי בעומק נובע מהמשקל הכולל של שכבות הקרקע מעל לנקודה, קל מאוד לחשבו. עבור תווך משוכב נקבל את הביטוי הבא:

$$\sigma = \Sigma(\gamma_j H_j) \quad [32]$$

כאשר:

σ - מאמץ טוטלי אנכי בנקודה
 γ_j - משקל מרחבי כולל של השכבה ה-J מעל לנקודה. עבור שכבות שמתחת למפלס מי תהום משתמשים במשקל מרחבי רווי γ_{SAT}
 H_j - עובי השכבה ה-J מעל לנקודה.
 לחץ מי הנקבים הוא למעשה לחץ הידרוסטטי, אשר ניתן לחשבו כ:

$$u = \gamma_w h_p \quad [33]$$

כאשר:

γ_w - משקל מרחבי של מים
 h_p - עומד מים כולל.
 בהערכת עומד מים כולל בנקודה כלשהי בעומק, יש להתייחס למצב ניידותם של מים אלה. במי תהום נייחים, עומד המים הכולל הוא המרחק בין הנקודה ובין מפלס מי התהום. במקרה שקיימת זרימה אנכית של מי תהום, ניתן להעריך את עומד המים הכולל באמצעות פיזומטר (מד עומד) המוחדר עד לנקודה. כאשר ידועה ספיקת מים אשר עוברת דרך החתך המשוכב והעומד בנקודה כלשהי בתווך או לחילופין ידוע העומד בשתי נקודות כלשהן בתווך הרווי, ניתן להעריך עומד בכל שאר הנקודות בתווך זה באמצעות משוואות [23] ו-[24] או [25].

לחץ אפקטיבי אנכי, הוא הפרמטר היחיד שעל מנת לחשבו צריך להעריך קודם את המאמץ

הטוטלי האנכי ואת לחץ מי הנקבים בעומק הנתון. לפיכך לחץ אפקטיבי אנכי שווה ל:

$$\sigma' = \sigma - u \quad [34]$$

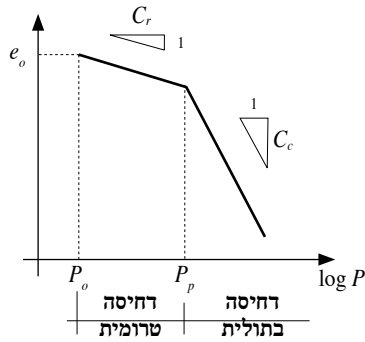
כאשר אין מי תהום בקרקע, הלחץ האפקטיבי האנכי שווה ללחץ הטוטלי האנכי. מאידך, יכול להיווצר מצב בו לחץ מי הנקבים שווה או גדול מהלחץ הטוטלי, דבר הגורם לאיפוסו של הלחץ האפקטיבי או במילים אחרות לניתוק מגע בין גרגרי הקרקע. קרקע במצב זה אינה יכולה לשאת עומסים ו"מתנזלת". תופעה זו הוזכרה כבר בפרק 7.5 וניתן לפתח את משוואה [29] במונחים של מאמץ נורמלי, מאמץ אפקטיבי ולחץ מי הנקבים. תופעה זו יכולה להיות קריטית, לדוגמה, בזרימת מים מתחת לסכרים, כיוון שהקרקע מתחת לסכר עלולה לאבד את תסכולתה ולגרום לאובדן יציבות הסכר.

9. דחיסת חרסית רוויה - תהליך הקונסולידציה

9.1 כללי

קרקע אשר נתונה לעומס חיצוני, מקטינה את נפחה (נפח החללים קטן). הקטנת נפח של קרקע באתר, משמעותה שקיעת הקרקע והיסודות המבוססים בה. בקרקע שאיננה רוויה, הקטנת הנפח מסתיימת תוך זמן קצר לאחר הפעלת העומס והיא קשורה בעיקר לצמצום של פאזה גזית (אוויר) בחללי עפר. תופעה זו נקראת קומפקציה (או שקיעה אלסטית מידית).

בקרקע רוויה, הפעלת מאמץ לחיצה יוצרת כוחות דחייה על המים שבחללים בין הגרגרים והם מתנקזים החוצה מהשכבה הנדחסת, וכתוצאה מכך הנפח הכולל קטן. תופעה זו נקראת קונסולידציה. ניתן להבין כי משך התופעה תלוי במקדם החלחול. לדוגמה, בקרקעות חוליות, בעלות מקדם חלחול גבוה יחסית, הקונסולידציה מסתיימת תוך זמן קצר מרגע הפעלת העומס. לעומת זאת, בקרקעות חרסיתיות בעלות מקדם חלחול נמוך יחסית, ניקוז המים שבין החללים איטי מאוד, ועל כן תהליך הקונסולידציה והשקיעה עלול להימשך שנים. עוצמת השקיעה תלויה בעיקר בכושר ספיחת המים של גרגרי העפר. כידוע, לקרקע חרסית כושר ספיחת מים טוב והוא נובע מצורתם השטוחה והדקה של גרגרי החרסית שעוביים פחות



תרשים 18: השתנות של מנת החללים, כתלות בלחץ המופעל בתהליך קונסולידציה

פרמטר נוסף שיש צורך להגדירו בדרך להערכת Δe , הוא יחס טרום דחיסה OCR, אשר שווה ל:

$$OCR = \frac{P_p}{P_o} \quad [36]$$

קרקע חרסיתית יכולה להימצא באחד משלושת המצבים האפשריים הבאים בהתאם לערכי OCR:

- קרקע דחוסה נורמאלית $OCR=1$.
- קרקע טרום דחוסה $OCR>1$.
- קרקע שטרם הגיעה לשיווי משקל תחת העומסים שפועלים עליה $OCR<1$.

עבור קרקעות דחוסות נורמלית, ההשתנות של מנת החללים, Δe , שווה ל:

$$\Delta e = C_c \log \left[\frac{P_f}{P_p} \right] \quad [37]$$

עבור קרקעות טרום דחוסות, נבחין בין שני מקרים:

$$P_f < P_p \quad [38]$$

$$\Delta e = C_r \log \left[\frac{P_f}{P_o} \right]$$

$$P_f > P_p$$

$$\Delta e = C_r \log \left[\frac{P_p}{P_o} \right] + C_c \log \left[\frac{P_f}{P_p} \right] \quad [39]$$

ניתן לפתח את הנוסחאות [37], [38] ו-[39] מתוך תרשים 18 ואף לשרטטו בקנה מידה מתאים לצורכי פתרון גרפי למציאת הערך של Δe . כזכור, הצבת ערך זה לתוך נוסחה [35] תיתן את ערך השקיעה בסוף תהליך הקונסולידציה.

9.3 הערכת זמן השקיעה

גודל השקיעה הצפויה כתוצאה מקונסולידציה, אינו הפרמטר היחיד שיש לקחתו בחשבון בעת התכנון. כזכור, תהליך זה תלוי בעיקר במקדם

מ-2 מיקרון. עוצמת הקונסולידציה ומשכה הארוך בקרקעות חרסיתיות, הם הגורמים העיקריים שבגללם נהוג יותר לקשור תופעה זו לקרקעות אלה. תיאורית הקונסולידציה המקובלת ביותר במכניקת קרקע, היא חד-ממדית ופותחה על ידי Terzaghi בשנות העשרים של המאה הקודמת.

9.2 הערכת השקיעה הצפויה

ניתן להניח שקרקע חרסית הרוויה לאורך שנים כבר עברה את תהליך הקונסולידציה, כך שבמצבה כיום, מנת החללים שבה e_o מתאימה בדיוק ללחץ האפקטיבי הפועל עליה P_o (כאן נהוג לסמן לחץ אפקטיבי באות P ולא ב- σ' כפי שצוין בפרק 8). בהגדלה או הקטנה של הלחץ האפקטיבי (על ידי תוספת עומס ΔP או הקטנתו), יחולו שינויים במנת החללים ויתחיל תהליך קונסולידציה (בהגדלת לחץ אפקטיבי) או תהליך תפיחה (בהקטנת לחץ אפקטיבי). בסוף התהליך תתייצב מנת החללים על ערך חדש e_f , אשר שווה ל- $e_o - \Delta e$, ותתאים ללחץ אפקטיבי חדש P_f , אשר שווה ל- $P_o + \Delta P$. שקיעת שכבת החרסית הרוויה בעלת עובי H בסוף התהליך תהיה שווה ל:

$$S = \frac{\Delta e \cdot H}{1 + e_o} \quad [35]$$

ומכאן, אם נוכל להעריך בכמה תשתנה מנת החללים, נוכל לחשב את השקיעה. על מנת להעריך את Δe , יש צורך להכיר מושג חדש הנקרא לחץ טרום - P_p . ניתן להגיד כי לחרסית רוויה שעברה תהליכי תפיחה ו\או קונסולידציה, ישנו "זיכרון היסטורי" והיא "זוכרת" את הלחץ האפקטיבי הגדול ביותר שפעל עליה אי פעם בעבר. לחץ זה נקרא לחץ טרום. השתנות מנת החללים תלויה במיקומם של P_o ו- P_f יחסית ל- P_p . כל עוד הלחצים שמופעלים על החרסית קטנים מלחץ הטרם, התנהגותה מוגדרת כ"טרם דחוסה". כאשר הלחצים עוברים את הערך של P_p , החרסית עוברת ל"דחיסה בתולית". תרשים 18 מציג את ההשתנות של מנת החללים, כתלות בלחץ המופעל.

התנהגות החרסית בשלב של דחיסה טרומית, מאופיינת על ידי מקדם דחיסה חוזרת C_r , ובשלב של דחיסה בתולית על ידי מקדם דחיסה C_c , כפי שמוצג בתרשים 18. קביעת המקדמים האלה, כמו גם הלחץ הטרם, מתבצע בניסוי קונסולידציה (פרק 9.3).

השכבה, ובערך השני, עבור חישובי התקדמות השקיעה של כל השכבה עם הזמן.

על מנת להעריך את אחוז הקונסולידציה U בזמן t אחרי תחילת התהליך, יש צורך לקבוע תחילה את הפרמטר הנקרא גורם הזמן T :

$$T = C_v \frac{t}{H_{dr}^2} \quad [42]$$

כאשר:

t - זמן מתחילת תהליך הקונסולידציה.

C_v - מקדם קונסולידציה. אשר נקבע בדרך כלל בניסוי קונסולידציה (פרק 9.3).

H_{dr} - אורך מסלול הניקוז. במקרה שבשני צדי החרסית נמצאות שכבות בעלות מקדם חלחול גבוה (שכבות מנקזות), H_{dr} שווה למחצית עובי שכבת החרסית והניקוז נקרא "ניקוז כפול" (תרשים 19). במקרה שהשכבה המנקזת נמצאת רק מצד אחד, H_{dr} שווה לעובי שכבת החרסית והניקוז נקרא "ניקוז בודד" (תרשים 19).

לאחר קבלת גורם הזמן T לפי משוואה [42], ניתן להעריך את אחוז הקונסולידציה הממוצע U_{avg} , לפי תרשים 20.

מהתלות המתמטית המדויקת בין U_{avg} לבין T (כמפורט למשל אצל Bowles, 1996), הוגדרו נוסחאות אמפיריות ממושטות, כמפורט להלן:

$$U_{avg} \leq 50\% \quad U = \sqrt{\frac{4T}{\pi}} \quad [43]$$

$$U_{avg} > 50\%$$

$$U = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\left(\frac{\pi^2 T}{4}\right)} \quad [44]$$

בטבלה 7, ערכים מספריים המחושבים לפי נוסחאות אלו, לשכבת חרסית מנקזת אנכית בפן העליון והתחתון שלה, כאשר לחץ מי הנקבובים אחיד בתוך השכבה.

בהינתן גורם הזמן T לפי משוואה [42], ניתן להעריך גם את אחוז הקונסולידציה U_z עבור

החלחול ולכן יכול להימשך שנים רבות. כך יכולה להתקדם השקיעה עד להגעתה לערך הסופי (נוסחה [35]). פרמטר המגדיר את התקדמות השקיעה בזמן, נקרא יחס קונסולידציה או % קונסולידציה U . הוא מוגדר כ:

$$U = \frac{S}{S_{(t \rightarrow \infty)}} 100\% \quad [40]$$

כאשר:

S - שקיעה בזמן t .

$S_{(t \rightarrow \infty)}$ - שקיעה בסוף תהליך הקונסולידציה.

כמו כן, % קונסולידציה מוגדר כ:

$$U = \left[1 - \frac{\Delta u}{\Delta u_i} \right] 100\% \quad [41]$$

כאשר:

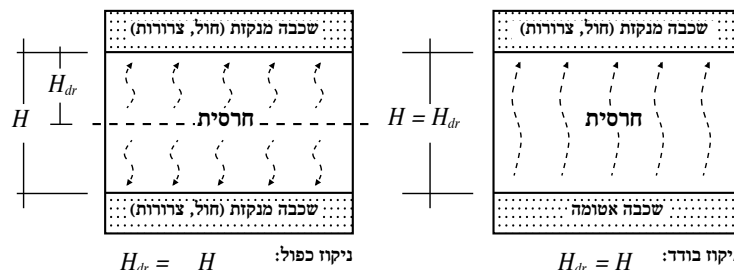
Δu_i - לחץ מים עודף בזמן t .

Δu - לחץ מים עודף בתחילת תהליך הקונסולידציה.

לחץ זה שווה לתוספת העומס ΔP (פרק 9.2).

עם הפעלת הלחץ ΔP על שכבת חרסית רוויה עקב חוסר ניקוז מהיר, כל עודף הלחץ עובר תחילה למים ולכן הוא נקרא לחץ המים העודף. עודף לחץ זה יתווסף ללחץ מי הנקבים, שהיה קיים טרם תחילת הקונסולידציה (נוסחה [33]). הלחץ העודף יועבר אט אט לשלד הגרגרי עם ההתקדמות בניקוז המים, וכך הלחץ האפקטיבי בחרסית ילך ויגדל. יש לשים לב, שבתחילת תהליך הקונסולידציה (הפעלת העומס החיצוני), הלחץ האפקטיבי בשכבת החרסית נשאר ללא שינוי.

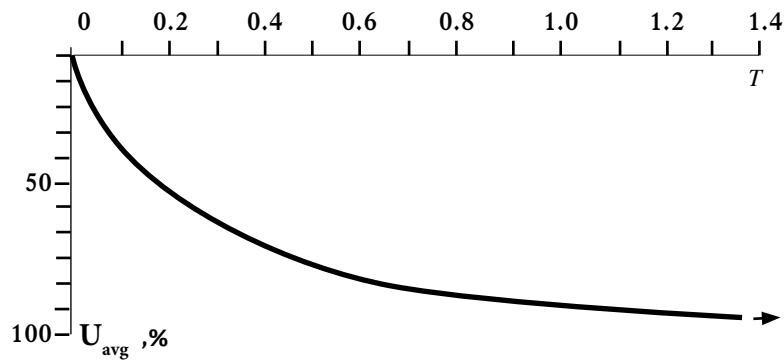
תהליך הקונסולידציה אינו מתנהל בצורה אחידה בתוך שכבת החרסית, כיוון שבקרבת הגבול עם השכבה המנקזת החרסית מתנקזת מהר יותר מאשר בשאר השכבה. לכן מקובל להגדיר אחוז קונסולידציה U_z עבור מיקום ספציפי z בשכבה ובמקביל גם ערך ממוצע U_{avg} עבור השכבה כולה. בערך הראשון, נהוג להשתמש יותר עבור חישובי לחץ המים העודף במקומות נתונים בתוך



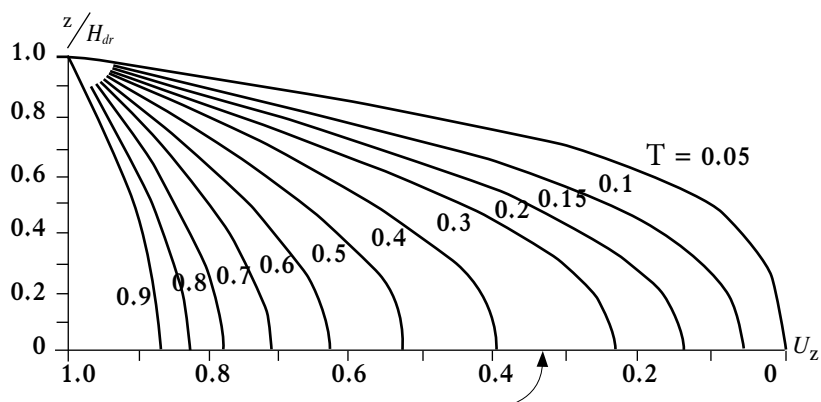
תרשים 19. הדגמת המושגים "ניקוז בודד" ו-"ניקוז כפול" בתהליך הקונסולידציה

טבלה 7. אחוז הקונסולידציה הממוצע U_{avg} , כנגד גורם הזמן T

100 %	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%	U_{avg}
∞	0.848	0.567	0.403	0.287	0.197	0.126	0.071	0.031	0.008	0	T

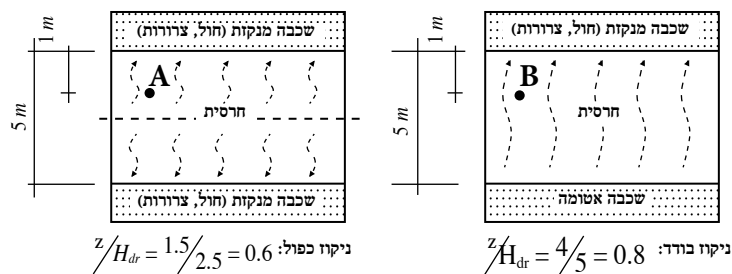


תרשים 20: הערכת אחוז הקונסולידציה הממוצע U_{avg} , לפי גורם הזמן T



אמצע שכבה ב"ניקוז כפול" או גבול עם שכבה אטומה במקרה של "ניקוז בודד"

תרשים 21: הערכת אחוז הקונסולידציה U_z עבור המיקום הספציפי z בתוך השכבה, לפי גורם הזמן T



תרשים 22. דוגמה למציאת אחוז הקונסולידציה U_z , עבור מיקום ספציפי בשכבה

(תרשים 24).

קטע B-A בתרשים 24 מתאר את העמסת הדרגם וקטע C-B את פריקת העומס. לכל לחץ שהופעל מתארים גרף של קריאת שעון השקיעה כפונקציה של לוגריתם הזמן (תרשים 26). בתרשים 24 מתואר גרף אופייני של מנת החללים e כפונקציה של לוגריתם הלחץ $\log P$. מהגרף רואים שככל שהלחץ P גדל, התנהגות החרסית עוברת ממצב של "טרם דחיסה" למצב של "דחיסה בתולית", בדומה לתרשים 18. שני מאפייני הקונסולידציה הנקבעים על פי גרף זה הם: הלחץ הטרם P_p ומקדם הדחיסה החוזרת C_r (שהוא השיפוע של עקום פריקת העומס - קטע C-B). קיימות מספר טכניקות לקביעת ערך P_p . הטכניקה הקלסית, היא שיטת קסגרנדה, שלפיה מאתרים על הגרף את הנקודה בה רדיוס העקמומיות מינימלי. מעבירים בנקודה זו משיק לגרף, קו אופקי, וחוצה זווית בין המשיק לבין הקו האופקי. ממשיכים את הקטע הליניארי של הקו שבגרף $e - \log P$. נקודת החיתוך בין המשך הקטע הליניארי לבין חוצה הזווית מגדירה את הלחץ הטרם P_p . להגדרת מקדם הדחיסה C_c יש צורך לבנות עקום קונסולידציה מתוקן לתנאי שדה (תרשים 25), אשר מתאר את ההתנהגות האמיתית של החרסית בשדה. עקום מתוקן לתנאי שדה, משרטטים על בסיס העקום המעבדתי באופן הבא (תרשים 25):

- סימון נקודה a , אשר מבטאת את מצבה הטבעי של החרסית בשדה, קרי, P_o, e_o .
- מתיחת קו בעל שיפוע C_r מנקודה a עד למפגש עם הלחץ הטרם P_p (נקודה b).
- מכאן הקו ממשיך עד לנקודה c , אשר נמצאת בחיתוך בין המשך הקטע הליניארי של העקום המעבדתי לבין קו אופקי, היוצא מ- $0.4e_o$. שיפוע הקטע $c-b$ הינו מקדם הדחיסה C_c .
- קביעת מקדם הקונסולידציה C_v בפעולת לחץ p מסוים על שכבת החרסית, נעשית מתוך גרף השקיעה כפונקציה של לוגריתם הזמן עבור אותו לחץ. מתקבל עקום כמתואר בתרשים 26.
- העקום מתחיל בקריאת δ_o של שעון השקיעה, והוא נהיה בהמשך אסימפטוטי לציר הזמן t הקטע האמצעי בגרף זה הוא בקירוב ליניארי. כיוון שלא ניתן לקבוע את קריאת השעון בזמן אינסוף, מקובל לקבוע את הקריאה המבטאת בקירוב 100% קונסולידציה כ- δ_{100} כנקודת



תרשים 23: מכשיר קונסולידומטר

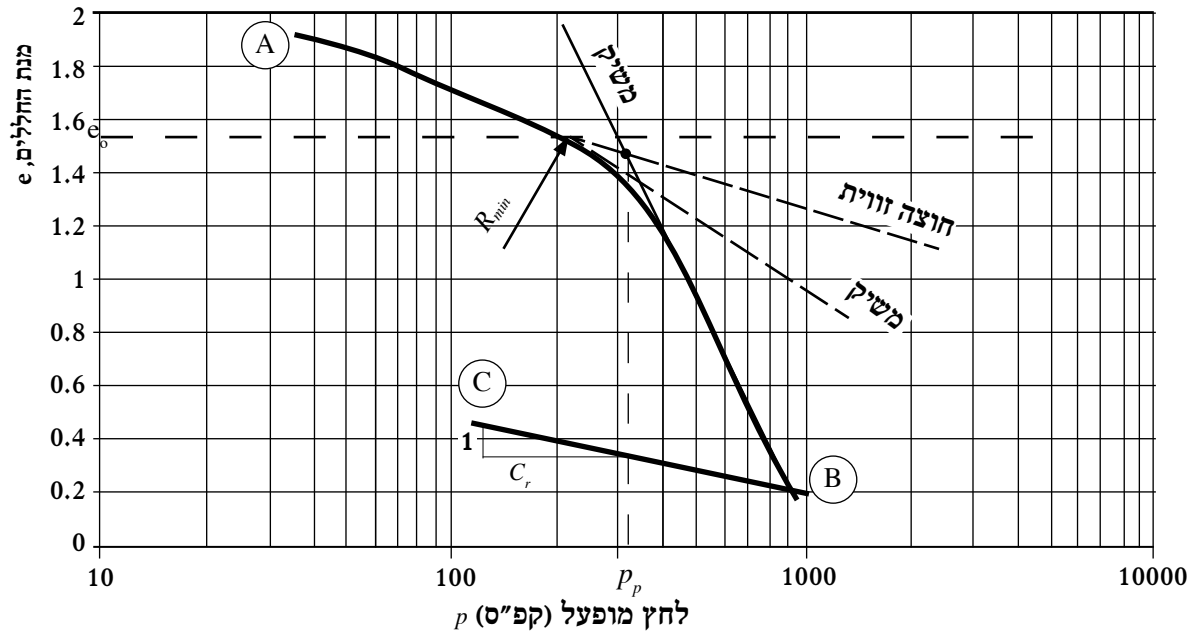
המיקום הספציפי z בתוך השכבה, לפי תרשים 21. לדוגמה, עבור המקרה המתואר בתרשים 22, אחוז הקונסולידציה בנקודות A ו-B עבור $T=0.05$ יהיה שווה ל- $U_A \approx 17\%$ ו- $U_B \approx 45\%$.

9.4 ניסוי קונסולידציה

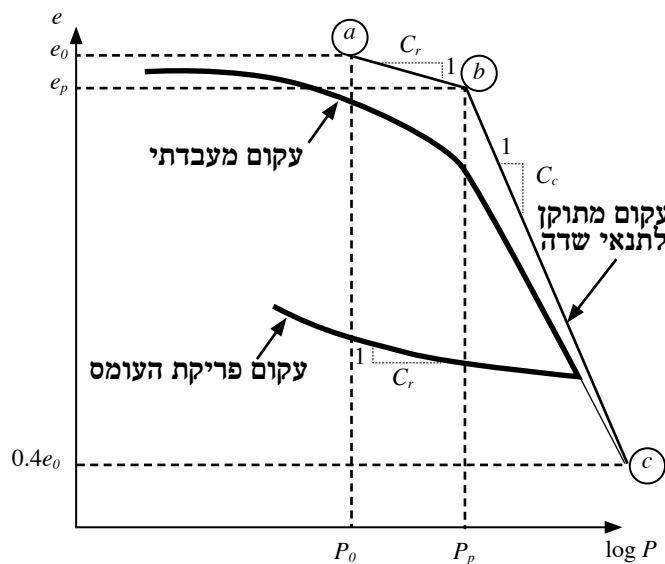
ניסוי קונסולידציה מתבצע במכשיר הנקרא קונסולידומטר. הוא מורכב מתא בדיקה, מסגרת העמסה ומד תזוזה בעל דיוק של לפחות 0.0025 מ"מ. בתרשים 23 ניתן לראות מכשיר קונסולידומטר חשמלי.

תא הבדיקה, כולל בתוכו טבעת גלילית שקוטרה המקובל 65 מ"מ וגובהה המקובל 20 מ"מ, אבנים נקבוביות ואביזרי חיבור. מדגם חרסית רוויה (לא מופר) מוכנס לתוך הטבעת ובשני צדי הטבעת מניחים אבן נקבובית. מקבעים את תא הבדיקה בתוך המכשיר ובאמצעות מסגרת ההעמסה מפעילים על המדגם לחצים. מתחילים בלחץ של 25 קילו-פסקל, וכל 24 שעות מכפילים את הלחץ עד ל- 3,200 קילו-פסקל. בכל לחץ מופעל קוראים את גובה הדרגם (או הדפורמציה) בדרך כלל לאחר 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60 דקות מתחילת הפעלת הלחץ ובהמשך לאחר 2, 4, 24 שעות. בנוסף לשלבי ההעמסה, המדגם עובר גם שלבי פריקת העומס. בתום הניסוי מייבשים את המדגם ושוקלים אותו.

משקל המדגם והמשקל היחסי מאפשרים לקבוע את נפח המוצקים. כיוון שבכל שלב ידוע גם נפח המדגם שבטבעת, ניתן לחשב את נפח המים ומכאן את מנת החללים. לכל לחץ שהופעל, מחשבים את מנת החללים לאחר 24 שעות, ומתארים גרפית את מנת החללים כפונקציה של לוגריתם הלחץ



תרשים 24: עקום קונסולידציה



תרשים 25: עקום קונסולידציה מעבדתי ומתוקן לתנאי שדה

10. תפיחת חרסיות

10.1 כללי

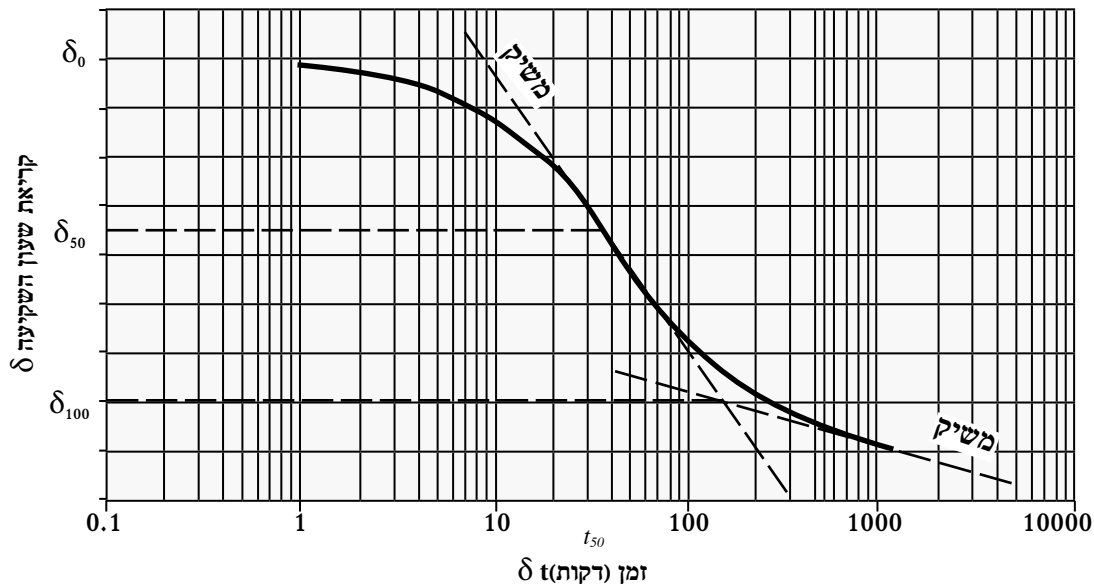
כאמור חרסיות רוויות מגדילות את נפחן (תופחות), כאשר מקטינים את הלחץ האפקטיבי הפועל עליהן. גם חרסיות לא רוויות תופחות, כאשר הן עוברות ממצב לא רווי למצב רווי. ניתן למנוע תפיחה זו בהפעלת לחץ מתאים. להבנת הפרמטרים המשפיעים על התופעה - מגדירים % תפיחה, לחץ תפיחה ופוטנציאל התפיחה.

המפגש של שני משיקים כמתואר בתרשים 26. מגדירים קריאת שעון ב- 50% קונסולידציה כ-

$$\delta_{50} = \frac{\delta_0 + \delta_{100}}{2} \quad [45]$$

כקריאה המתאימה לזמן t_{50} כמתואר בתרשים. מכאן ניתן לחשב את מקדם הקונסולידציה לשכבת חרסית בעובי H ,

$$C_v = 0.197 \frac{H_{dr}^2}{t_{50}} \quad [46]$$



תרשים 26: עקום שקיעה-זמן

בשלב הראשון של הניסוי, מכניסים מדגם של קרקע טבעית (רווי או לא, מופר או לא), לתוך מתקן קונסולידציה מטובע. מעמיסים בהדרגה תוך שמירה על נפח המדגם (קריאת שעות הדפורמציה נשמרת קבועה). משרטטים גרף של הלחץ המופעל p כפונקציה של לוגריתם הזמן t , כמתואר בתרשים 27 א'. הלחץ שהופעל בתום שלב זה (לאחר 24 שעות) הוא לחץ התפיחה p_s . רושמים את הנפח שנשמר כ- V_o .

בשלב השני, משחררים בהדרגה את הלחץ המופעל מ- p_s ל- o ועוצרים את השחרור בערכים נבחרים של הלחץ p . לכל ערך נבחר של p משאירים את הלחץ המופעל קבוע, עד שקריאת שעות הדפורמציה מתייצבת ורושמים את הקריאה. לפי הקריאה ניתן לקבוע את שינוי הנפח ΔV . מתארים עקום של $\Delta V/V_o$ כפונקציה של הלחץ p , דוגמת תרשים 27 ב'. בגרף זה, p_s הוא לחץ התפיחה. מתוך נתוני הניסוי ניתן לקבוע את מנת החללים e המתאימה לכל לחץ p . בהנחה שבתחום מסוים של לחצים יש קשר ליניארי בין מנת החללים ללוגריתם הלחץ, ניתן להגדיר את אינדקס התפיחה C_s כ-:

$$C_s = \frac{e_2 - e_1}{\log p_1 - \log p_2} \quad [48]$$

כאשר האינדקסים 1 ו-2 מציינים שני ערכים קיצוניים מתאימים של לחץ ומנת חללים. ומכאן:

$$e_2 = e_1 + C_s \log \frac{p_1}{p_2} \quad [49]$$

10.2 תפיחה חופשית של קרקע במשורה - התפיחה

תפיחה חופשית, מוגדרת כשינוי נפח של מדגם הקרקע במים ללא כל עומס עליו, ביחס לנפח של אותו מדגם בצורת אבקה תחוחה ויבשה. מייבשים עפר בתנור. מפוררים 15 גרם לגרגרים העוברים נפה 40 (קטנים מ- 0.425 מ"מ). לוקחים 10 סמ"ק של עפר מפורר ($V_o = 10 \text{ cm}^3$), ומכניסים למשורה שבה מים. ממתינים עד שקיעת הגרגרים המוחלטת (בדרך כלל כחצי שעה עד שעה) ומודדים את נפח החרסית V השקוע במשורה. % התפיחה מוגדר כ:

$$\% \text{ תפיחה} = \frac{V - V_o}{V_o} \quad [47]$$

בדיקה זו משמשת כמדד לפוטנציאל התפיחה של אותה קרקע בתנאי שדה, כאשר קרקעות בעלות תפיחה חופשית עד 50% אינן מפגינות נטייה לתפיחה בשדה, ולקרקעות בעלות אחוז תפיחה מעל ל- 100% ישנה נטייה ברורה לתפיחה.

10.3 לחץ התפיחה ופוטנציאל התפיחה

לחץ התפיחה p_s מוגדר כעומס הדרוש למנוע את שינוי הנפח של מדגם הנמצא בתהליך תפיחה, במנת חללים רגעית מסוימת. פוטנציאל התפיחה c_s , הוא מקדם שבאמצעותו ניתן לחשב את מנת החללים (ומכאן את הנפח) בהפעלת לחץ תפיחה מסוים. הערכים של לחץ התפיחה ופוטנציאל התפיחה, נקבעים בניסוי בעל שני שלבים.

ובמונחים של ערכים אפקטיביים, כ-

$$\tau_u' = c' + \sigma' \cdot \tan \phi' \quad [51]$$

כאשר הגרש מציין ערך אפקטיבי בקרקע מטובעת. קריטריון לחוזק גבולי זה נקרא קריטריון הכשל מוהר - קולון (Mohr-Coulomb). בתרשים 28 מתוארים גרפים אופייניים של החוזק לגזירה. כך לדוגמה, בחרסית רוויה, בגזירה מהירה ללא ניקוז, זווית החיכוך היא 0 (קו 1). בקרקע גראנולרית טהורה, הקוהזיה היא 0 (קו 2), וקו (3) מייצג התנהגות של קרקע מעורבת.

הקרקע תהיה יציבה אם מאמץ הגזירה המופעל יהיה קטן מהחוזק לגזירה, τ_u ; תיכשל, אם מאמץ הגזירה המופעל יהיה גדול מהחוזק לגזירה; ותימצא בגבול הכשל אם מאמץ הגזירה המופעל יהיה שווה לחוזק לגזירה.

11.3 החוזק לגזירה במונחים של מאמצים ראשיים

במקום לבטא את החוזק לגזירה על מישורי ההחלקה, ניתן לקבוע את גבול הכשל של העפר על בסיס המאמצים הראשיים σ_1 ו- σ_3 , הפועלים על קוביית חומר (תרשים 29). בתרשים זה (חלק ימני), מתוארים קו הכשל ומעגל מוהר למאמצים הראשיים, המשיק לקו החוזק לגזירה בנקודה B. עבור זווית חיכוך פנימי ϕ , מתקבל שהזווית בין המישור שעליו פועל המאמץ הראשי σ_1 (כאשר, $\sigma_3 < \sigma_1$) לבין מישור הכשל המוגדר באמצעות הנקודה B, היא $\alpha = 45 + \phi/2$, כמתואר בתרשים 29 (צד שמאל).

מפיתוח מתמטי של הקשרים הגיאומטריים בין הפרמטרים מתקבל, שגבול הכשל עבור $\sigma_3 < \sigma_1$ יהיה:

בטבלה 8, מפורטים ערכים של לחצי תפיחה ואינדקס התפיחה של מינרלים שונים של חרסית, לפי Terzaghi, Peck and Mesri (1995).

11. החוזק לגזירה

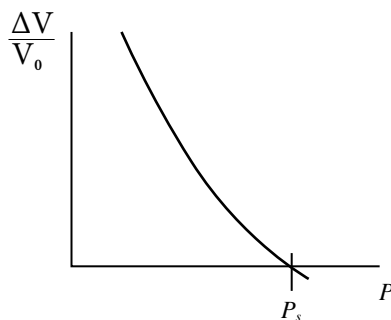
11.1 פרמטרי החוזק

הכשל האופייני של קרקע תחת עומס, מתבטא בתנועה יחסית של גושי קרקע לאורך מישורי כישלון. חוזק הקרקע הוא התנגדותה לתנועה זו. מאפייני ההתנגדות לתנועה, שונים בין קרקעות חרסיתיות לבין קרקעות לא חרסיתיות. בקרקעות חרסיתיות, הגורם הדומיננטי התורם לחוזק הוא ההידבקות (קוהזיה) בין הגרגרים הנובעת מצורתם המישורית. קרקעות לא חרסיתיות מתאפיינות בגרגרים בעלי מידות זהות בקירוב בכיוונים השונים ואין ביניהם הידבקות, והגורם הדומיננטי התורם לחוזקם הוא חיכוך בין הגרגרים. בהתאם, מגדירים קרקעות בהן קיימת הידבקות בין הגרגרים כקרקעות קוהזיביות, וקרקעות בהן אין הדבקות בין הגרגרים כקרקעות גרנולריות. הקוהזיה, c , וזווית החיכוך הפנימי, ϕ , נקראות פרמטרי החוזק. יש לציין כי לקצב העמסה ולרטיבות, ישנה השפעה רבה על התנהגותן של קרקעות קוהזיביות ובהתאם לכך גם על פרמטרי החוזק.

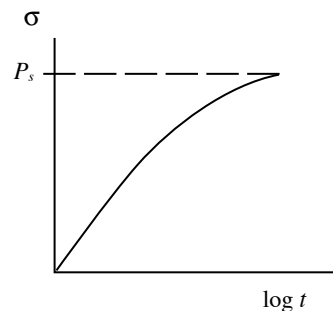
11.2 החוזק לגזירה במונחים פיסיקליים

החלקה בין מישורים מושפעת פיסיקלית מהידבקות (קוהזיה), c , בין הגרגרים, מזווית החיכוך הפנימי, ϕ , ומהלחץ הנורמלי הניצב למישור ההחלקה, σ . בהתאם, ניתן לבטא את החוזק הגבולי של הקרקע לגזירה, τ_u , במונחים של לחץ כולל, כ-

$$\tau_u = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad [50]$$



ב. שלב ב



א. שלב א

תרשים 27: לחץ תפיחה ופוטנציאל תפיחה

טבלה 8: ערכי לחץ תפיחה ואינדקס התפיחה למינרלים של חרסית (EC מציין מוליכות אלקטרוליטית)

מינרל	p_s עבור $e = 1.5$ KPa	p_s עבור $e = 1.0$ KPa	c_s בתחום של e מ-1.0 עד 1.5
סודיום מונטמורילוניט (EC נמוך)	3500	1050	0.956
סודיום מונטמורילוניט (EC גבוה)	3500	850	0.814
קלציום מונטמורילוניט (EC נמוך)	1500	115	0.448
סודיום איליט (EC נמוך)	350	60	0.653
סודיום איליט (EC גבוה)	350	33	0.488
קלציום איליט (EC נמוך)	275	12	0.368
קאולין	29	0.3	0.250

הניסוי מתבצע על גליל קרקע טבעית שקוטרו כ- 5 ס"מ. הגליל מוכנס למתקן המפעיל עליו מאמץ לחיצה אורכי σ_1 (תרשים 30).

לגליל העפר בניסוי, אין שום תמיכה צדית ובבדיקה לא מופעל עליו לחץ צדי, σ_3 . במקרה זה, חוזק הלחיצה החד צירי, σ_c , הוא המאמץ σ_1 בגבול הכשל. בניסוי זה, זווית מישור הכשל ביחס למישור הפעלת הלחץ היא 45° . בקרקעות חרסיתיות רוויות, בגזירה מהירה ללא ניקוז, זווית החיכוך הפנימי שווה ל-0, וחוזק הגזירה, לפי תרשים 31, הוא:

$$\tau_u = c = \frac{\sigma_c}{2} \quad [54]$$

ניסוי לחץ בלא כלוא, אינו ישים בקרקעות לא קוהזיביות בהן לא ניתן לחלץ גליל של קרקע טבעית (שאינו מתפורר), ולא בקרקעות בהן זווית החיכוך הפנימי גדולה מ-0, שכן בניסוי זה מתקבלת קריאה אחת בלבד, וממנה ניתן להסיק לגבי ערכו של פרמטר אחד מבין שני פרמטרי החוזק.

$$\sigma_1 = 2c \cdot \tan \left[45 + \frac{\phi}{2} \right] + \sigma_3 \cdot \tan^2 \left[45 + \frac{\phi}{2} \right] \quad [52]$$

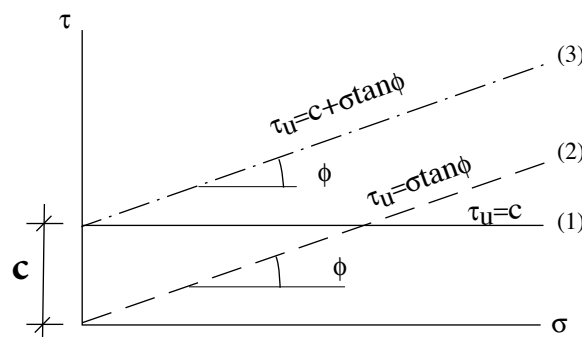
$$\sigma_3 = -2c \cdot \tan \left[45 - \frac{\phi}{2} \right] + \sigma_1 \cdot \tan^2 \left[45 + \frac{\phi}{2} \right] \quad [53]$$

הקרקע תהיה יציבה, אם σ_1 יהיה קטן מהערך המחושב לפי נוסחה [52] או ש- σ_3 יהיה גדול מהערך המחושב לפי נוסחה [53]. הקרקע תימצא בגבול הכשל, אם הערכים של σ_1 ו- σ_3 מקיימים את המשוואות [52] ו- [53] לעיל. הקרקע תיכשל, אם σ_1 יהיה גדול מהערך המחושב לפי נוסחה [52] או ש- σ_3 יהיה קטן מהערך המחושב לפי נוסחה [53].

חוזק הקרקע לגזירה נקבע בניסויים. מקובלים שלושה סוגי ניסויים: בדיקת לחיצה חד צירית, גזירה ישירה וגזירה מרחבית.

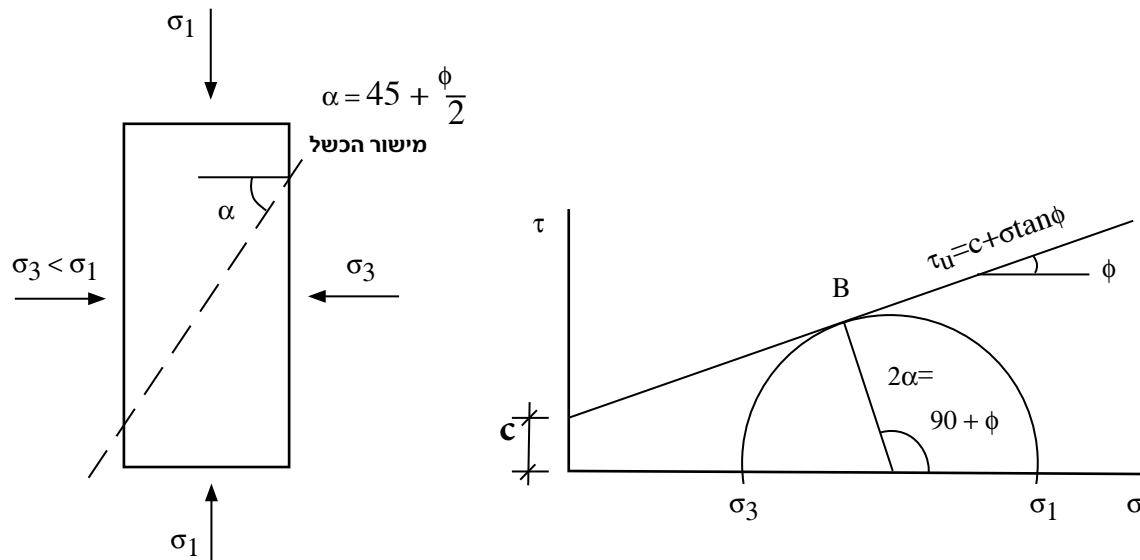
11.4 בדיקת לחיצה חד צירית

ניסוי זה, אשר נקרא לעתים ניסוי לחץ בלא כלוא (או לחץ תלוש), מתאים רק לקרקעות קוהזיביות.



תרשים 28: חוזק לגזירה

מכניקת קרקע



תרשים 29: חוזק לגזירה לפי מאמצים ראשיים

זאת אומרת, הפעלת לחץ על המדגם למשך זמן מתאים שיבטיח את ניקוזו. בניסוי גזירה ישירה, לא ניתן למדוד את לחץ מי הנקבובים ולקבל את פרמטרי החוזק גם במונחים של לחצים אפקטיביים. החיסרון העיקרי של הבדיקה, הוא הכתבת מישור הכשל, שהינו מישור המגע בין חלקי הקופסה.

11.6 ניסוי גזירה מרחבית

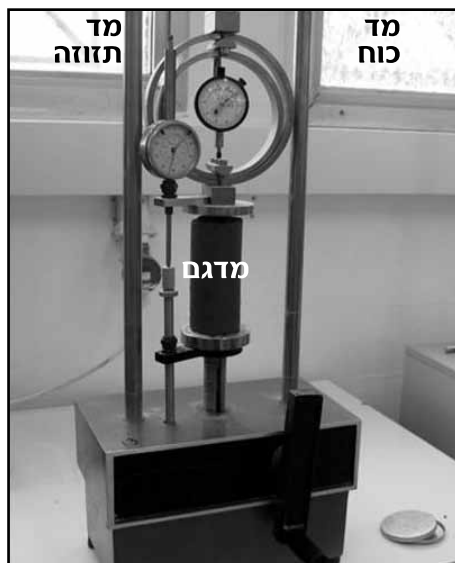
ניסוי זה מתאים לכל סוגי הקרקעות. מתקן הניסוי כולל מכל, בו ניתן למלא מים בלחץ ומכש אנכי (תרשים 35).

מדגם גילי של קרקע במעטפת גומי מוכנס למכל. ממלאים את המכל במים ומפעילים עליו

11.5 ניסוי גזירה ישירה

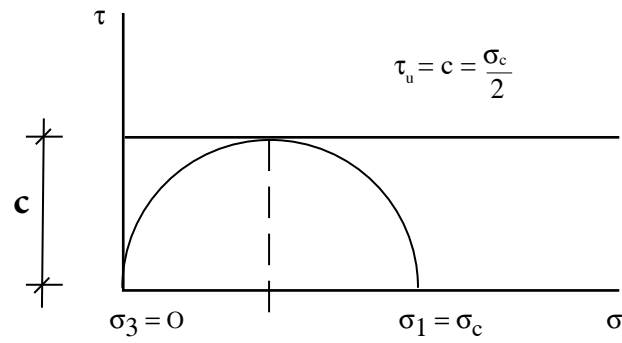
ניסוי זה מתאים לכל סוגי הקרקע. מתקן הניסוי (תרשים 32) כולל קופסה בעלת שני חלקים, עליון ותחתון, היכולים לנוע בתנועה יחסית אופקית, מסגרת העמסה מפעילה כוח אנכי N (באמצעות משקולות) ובוכנת גזירה המפעילה כוח אופקי T (תרשים 33). לקופסה תחתית ומכסה מאבן נקבובית.

מדגם הקרקע מוכנס לקופסה שבמתקן. מפעילים עליו כוח אנכי שנשמר קבוע במהלך הבדיקה ומשמעותו מאמץ נורמלי, σ . על חלק הקופסה העליון מפעילים כוח אופקי, כאשר החלק התחתון מקובע למתקן. כוח זה יוצר מאמץ גזירה τ על המדגם. עבור ערכים שונים של המאמץ הנורמלי, מגדילים בהדרגה את מאמץ הגזירה, ורושמים כנגדו את מידת התזוזה של חלק הקופסה העליון. ערכי המאמץ הנורמלי ומאמץ הגזירה המרבי הנרשם, הם הערכים בגבול הכשל. תיאור גרפי של ערכי מאמצים נורמליים ומאמצי הגזירה המתאימים להם, מאפשר לתאר את קו החוזק לגזירה, כמתואר בתרשים 34, ואת פרמטרי החוזק c ו- ϕ .



תרשים 30: מתקן לחץ בלא כלוא

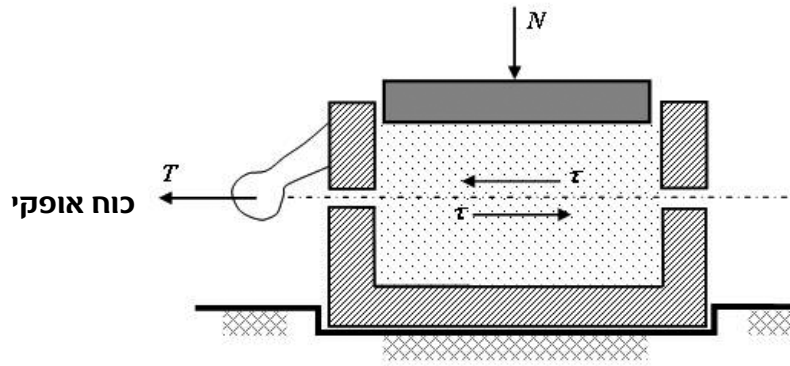
הניסוי הוא מהיר. בקרקע גראנולרית בה הניקוז מהיר, המים מספיקים להתנקז תוך כדי הניסוי, ומתקבלים פרמטרי החוזק במצב מנוקז. בקרקע קוהזיבית בה הניקוז אינו מספיק להתנקז ומתקבל חוזק במצב לא מנוקז. על מנת לקבל בקרקע קוהזיבית פרמטרי חוזק במצב מנוקז, יש לבצע לפני ניסוי הגזירה הישירה קונסולידציה,



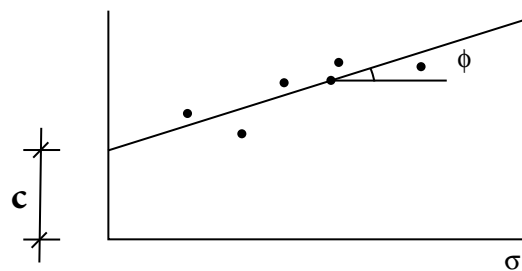
תרשים 31. תוצאות גרפיות של ניסוי לחיצה חד צירית, עבור חרסית רוויה ללא ניקוז



תרשים 32: מתקן גזירה ישירה



תרשים 33: תיאור סכמטי של ניסוי גזירה ישירה



תרשים 34: תוצאות ניסוי גזירה ישירה

זווית חיכוך ודווקא הקוהזיה שווה לאפס. לדבר זה ישנה חשיבות מעשית, לדוגמה, בביסוס מבנים על חרסית רוויה, יש להתחשב בחוזק לגזירה בשני המצבים יחד: בלתי מנוקז (לטווח הקצר בגלל קצב ניקוז אטי) ומנוקז (לטווח הארוך בהתאם להתקדמות הניקוז).

12. בדיקות בשדה In-situ

חקירת קרקע בקרקע בשדה, לפני הקמת פרויקט הנדסי, אינה מוגבלת רק לקידוחים ולהוצאת דוגמאות לצורכי זיהוי הקרקע והגדרת תכונותיה. ניתן ואף מומלץ לשלב עם הקידוחים בדיקות בשדה, in-situ, אשר מספקות מידע רב על תת הקרקע, לפעמים אף ללא צורך בביצוע בדיקות מעבדה מורכבות ויקרות. פרק זה יסקור בקצרה את ארבע הבדיקות הנפוצות עם האינפורמציה ההנדסית שכל אחת מהן מספקת. הבדיקות הן: בדיקת החדרה תקנית (SPT), בדיקת החדרת קונוס (CPT), פרסיומטר (PMT) ומכנף גזירה (Vane Test).

12.1 בדיקת החדרה תקנית (SPT)

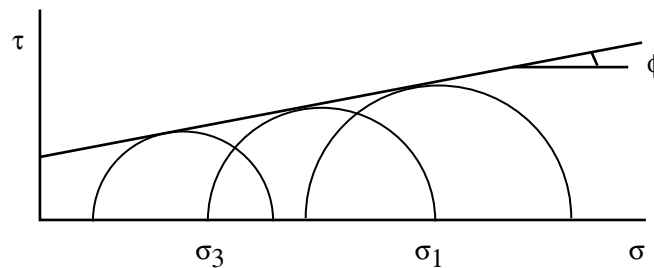
הבדיקה פותחה בארצות הברית בשנת 1925

בכל הכיוונים לחץ σ_3 מסוים. באמצעות הבוכנה מפעילים לחץ אנכי נוסף, כך שהלחץ האנכי הכולל על המדגם הוא σ_1 . מגדילים את הלחץ האנכי עד לכשל ורושמים את הלחצים בשלב הכשל. מבצעים את הניסוי לערכים שונים של σ_3 , ומקבלים ערכים מתאימים של σ_1 . מתארים את מעגלי מוהר למגוון התוצאות, ומעבירים משיק משותף לכל המעגלים, כמתואר בתרשים 36.

הקו המשיק לכל מעגלי מוהר, הוא גרף החוזק לגזירה, ממנו ניתן לקבוע את פרמטרי החוזק c ו- ϕ . ניסוי זה ניתן לבצע על מדגם לא מנוקז ולקבל את ערכי פרמטרי החוזק למצב לא מנוקז. קריטריון הכשל המתקבל במקרה זה, הוא קו אופקי כמתואר בתרשים 31. מתקן הניסוי מאפשר למדוד את לחץ מי הנקבובים ולחשב לפיהם את פרמטרי החוזק, במונחים של לחצים אפקטיביים. כן ניתן לבצע את הניסוי על מדגם שעבר קודם קונסולידציה, ולקבל את פרמטרי החוזק במצב מנוקז. יש לשים לב, כי פרמטרי החוזק של החרסיתות במצב מנוקז ובלתי מנוקז, יכולים להיות שונים עד מאוד אלה מאלה. כך, לדוגמה, בחרסית רוויה בגזירה מהירה ללא ניקוז ϕ שווה לאפס, לעומת זאת לחרסית דחוסה נורמלית ($OCR=1$) במצב המנוקז, קיימת



תרשים 35: מתקן גזירה מרחבית



תרשים 36: תוצאות ניסוי גזירה מרחבית



תרשים 37: הציוד לבדיקת החדרה תקנית

בשלב הראשון של הבדיקה, קודחים עד לעומק הרצוי. קוטר הקידוח משתנה מ-60 עד ל-200 מ"מ. מרכיבים מוטות הארכה על כף הדגימה ומורידים אותה לתחתית הקידוח, כאשר מוט ההארכה העליון בולט מעט מעל פני הקרקע. על המוט העליון מרכיבים סדן ומתחילים בהחדרת הכף לתוך הקרקע על ידי הרמת הפטיש והפלתו

ומיועדת בעיקר לקרקעות חוליות. הבדיקה זולה יחסית ואינה מסובכת לביצוע. יתרון נוסף שלה הוא שניתן לקבל בתוך כף הדגימה מדגמי קרקע לצורך בדיקות מעבדה. ערכי SPT משמשים גם כמדד יעיל להערכת פוטנציאל ההתנזלות של הקרקעות. ציוד הבדיקה כולל כף דגימה סטנדרטית, פטיש במשקל 63.5 ק"ג עם סדן (תרשים 37) ומוטות הארכה.

עבור קרקעות חוליות צפיפות יחסית, D_r , זווית החיכוך, ϕ , ולחץ אופקי אפקטיבי של השכבות. עבור קרקעות חרסיות ניתן לקבל חוזק לגזירה, C_u , ולחץ טרום, P_p .

12.3 בדיקת פרסיומטר (PMT)

מכשיר הפרסיומטר פותח על ידי Mennard בשנת 1956 בצרפת, ונמצא בשימוש רחב. בדיקה זו מתאימה לכל סוגי הקרקעות והיא מתבצעת בכורות שנקדחו מראש. מכשיר המדידה הינו צינור מחורץ ובתוכו שלושה תאי גומי: עליון, אמצעי ותחתון (תרשים 40).

המכשיר מוכנס לתוך הקידוח ומתפשט כנגד הקרקע. צינור מחורץ מגן על התאים. התא העליון והתא התחתון הנם תאי עזר והתפשטותם מונעת את השפעת תנאי קצה על דיוק המדידה של התא האמצעי. ההתפשטות של תא המדידה (התא האמצעי) נגרמת על ידי מים המוזרמים בלחץ גז. במהלך הניסוי מודדים את גידול נפח תא המדידה. מתוך השתנות נפח תא המדידה כנגד לחץ המים המופעל, ניתן לחשב את מודול הגזירה, G , של הקרקע, בהתבסס על פיתוחים מתורת האלסטיות. נהוג להציג את תוצאות הבדיקה באמצעות מודול האלסטיות, E , אשר מחושב מתוך מודול הגזירה, G , ובהנחת מקדם פואסון, ν (בדרך כלל 0.33). ישנם גם קשרים אמפיריים בין תוצאות בדיקה זו לבין פרמטרי החוזק של קרקעות חרסיות, אך הם אינם בשימוש נפוץ.

12.4 מכנף גזירה (Vane Test)

בדיקה זו מיועדת בעיקר לקרקעות חרסיות רוויות ומאפשרת לקבוע את חוזקן לגזירה מהירה ללא ניקוז. מכנף הגזירה בנוי ממוט פלדה, שקוטרו המקובל 12.7 מ"מ, עם כנפיים ניצבות בקצהו התחתון (תרשים 41), מוטות הארכה ומד-מומנט המורכב על קצהו העליון. מידות הכנפיים המקובלות הן: $H=130$ mm ו- $D=65$ mm. מפסיקים את הקידוח כ- 30 ס"מ לפני העומק הרצוי, מרכיבים מוטות הארכה על המכנף ומחדירים אותו לעומק הבדיקה. לאחר מכן, מרכיבים את מד-המומנט על חלקו העליון של המכנף ומתחילים בסיבוב אטי של המכנף (כ- 6° לדקה). במהלך הבדיקה נמדדים שני מומנטים: M_{max} - מומנט מקסימלי רגע לפני התרחשות

מגובה 76 ס"מ. רושמים את מספר ההקשות הנדרשות לכל 15 ס"מ של החדרה, עד להחדרה כוללת של 45 ס"מ. מספר ההקשות, N , הנדרש להחדרת הכף ב- 30 ס"מ האחרונים, הוא תוצאת הבדיקה. נהוג גם לנרמל את N בהתאם לגורמים שונים וביניהם יעילות הפטיש, עומק ביצוע הבדיקה והלחץ האפקטיבי של השכבות.

קיים בסיס רחב של קורלציות בין תוצאות הבדיקה לבין התכונות הגיאומכניות של הקרקע וביניהן הקשרים לצפיפות יחסית [55], לזווית החיכוך של חולות [56] ולחוזק לגזירה של חרסית רוויה ללא ניקוז [57]:

לפי (1957) Gibbs and Holtz:

$$D_r, \% = 100 \cdot \sqrt{\frac{N}{1.71 \cdot (10 + \sigma)}} \quad [55]$$

כאשר σ' - לחץ אנכי אפקטיבי של שכבות הקרקע בעומק הבדיקה, ביחידות (1psi \approx 6.895kPa). לפי (2000) Frydman, עבור חולות בארץ:

$$\phi = 27 + 0.18 D_r (\%) \text{ for } D_r > 20\% \quad [56]$$

לפי (1974) Stroud:

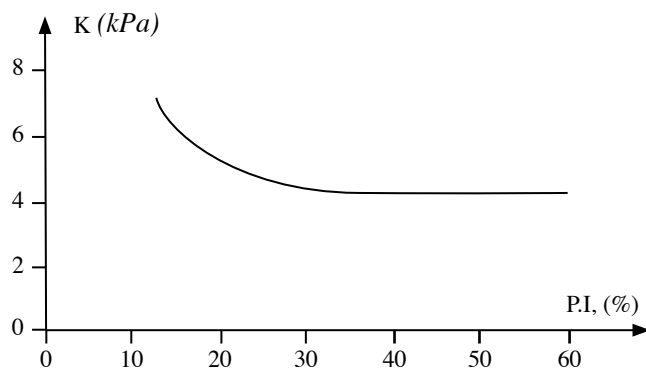
$$C_u (kPa) = K \cdot N \quad [57]$$

כאשר K - קבוע המשתנה בהתאם למדר הפלסטיות (תרשים 38).

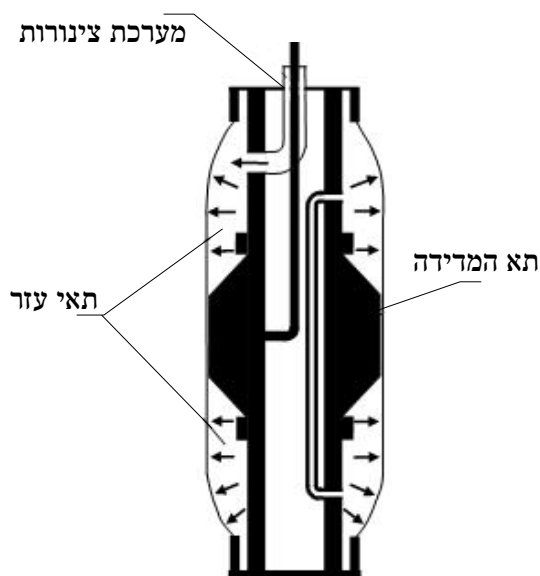
12.2 בדיקת החדרת קונוס (CPT)

בדיקת שדה זו יכולה לספק שלל אינפורמציה לגבי תת-הקרקע ויתרונה הגדול הוא ברציפותה, קרי קבלת רישום נתונים רצוף לאורך כל החתך, ולא רישום נקודתי, אשר מתאפיינים בו שאר בדיקות השדה. השיטה פותחה לראשונה ב-1932 ומאז עברה שכלולים רבים. קוטרו המקובל של קונוס החדרה סטנדרטי הוא 35.7 מ"מ וקצהו התחתון מחודד בזווית של 60° . שטחו האופקי המושלך של הקצה המחודד הוא 10 סמ"ר (תרשים 39).

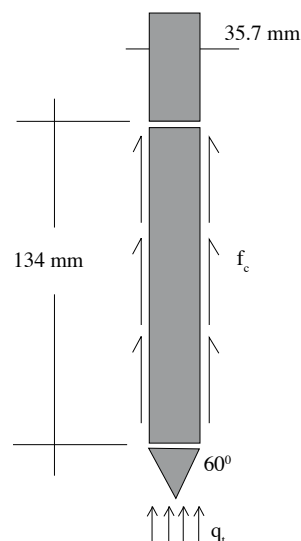
הקונוס מוחדר לתוך הקרקע באמצעות מערכת הידרולית בקצב קבוע של כ- 20 מ"מ לשנייה. במהלך הבדיקה מתקבלות קריאות של לחץ ההחדרה המתקבל בקצה הקונוס, q_t , מאמץ החיכוך בין מעטפת הקונוס לקרקע שמסביב, f_c , ולחץ מי הנקבים במהלך ההחדרה בתווך הרווי. על סמך ניתוח תוצאות הבדיקה, ניתן לבנות פרופיל מדויק של תת הקרקע וזה כולל סוגי הקרקע והמעברים בין השכבות. מאותו ניתוח ניתן לקבל



תרשים 38: תלות בין הקבוע K למדד הפלסטיות



תרשים 40: מכשיר מדידה פרסיומטר



תרשים 39: קונוס החדרה תקני

קרובה לגבול הנזילות ואף גדולה יותר, זאת אומרת, חרסיות בעלות חוזק גזירה נמוך מאוד עד אפסי.

מראי מקומות

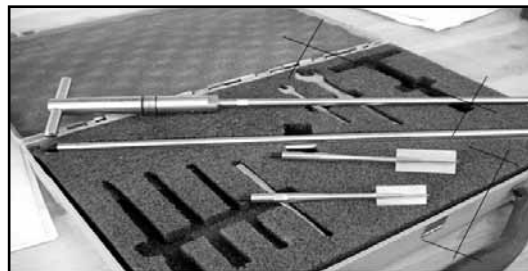
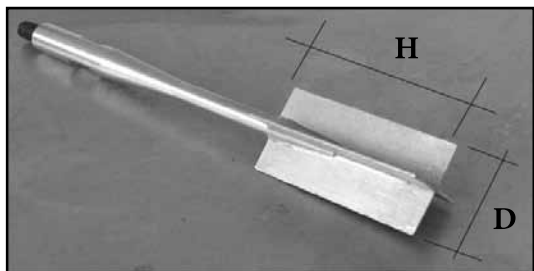
בן צבי, א'; גריניס, ל' (2008). הידרוליקה. בתוך: נחלים וניקוז - תהליכים, הנדסה ותכן (ע' א' בן-צבי). רשות ניקוז שקמה-בשור והמכללה האקדמית סמי שמעון, עומר: 27-47.
נוהל בדיקה 13.300. בדיקת יחסי צפיפות-רטיבות לקרקע ולאגרגטים. טכניון-מע"צ-מת"י, 1995.
ת"י 253. מיון קרקעות למטרות הנדסה אזרחית - מיון במעבדה ומיון חזותי, ספטמבר 1994.
Bowles, J.E. (1996). *Foundation Analysis and*

הגזירה ו- M_{res} - מומנט מקסימלי שיימדד במהלך סיבוב שלם נוסף של המכנף, לאחר התרחשות הגזירה הראשונית.

חוזק הגזירה של חרסית רוויה ללא ניקוז, עבור גיאומטריית כנפיים של $H = 2D$ שווה

$$c_u = \frac{6M_{max}}{7\pi D^3} = 0.273 \frac{6M_{max}}{D^3} \quad [58]$$

מקובל להוציא מבדיקה זו מדד נוסף - רגישות (sensitivity) החרסית, S_t , שהוא היחס בין M_{max} לבין M_{res} . פרמטר זה מהווה מדד לחוזק החרסית במצבה הטבעי, אשר עולה יחד עם S_t . הערך המינימלי של רגישות הוא 1, אשר מתאים, לדוגמה, לחרסיות הנמצאות בתכולת רטיבות



תרשים 41: מכונן גזירה

Mitchell, J.K. (1993). **Fundamentals of Soil Behavior**, 2nd edition. John Wiley & Sons, New York.

Stroud, M.A. (1974). The standard penetration test in insensitive clays and soft rocks. **Proc. European Seminar on Penetration Testing**, Stockholm.

Terzaghi, K.; Peck, R.B.; Mesri, G. (1995). **Soil Mechanics in Engineering Practice**. John Wiley & Sons, New York.

Design. McGraw-Hill, New York.

Frydman, S. (2000). Shear Strength of Israeli Soils. **Israel Journal of Earth Sciences**, 49 (2): 55-64.

Gibbs, H.J.; Holtz, W.G. (1957). Research on determining the density of sands by spoon penetration testing. **PROC. 4th ICSMFE**, 1: 35-39.

McCarthy, D.F. (1998). **Essentials in Soil Mechanics and Foundation**. Prentice Hall, New Jersey.

הנדסת מבנים

אורי צדקה¹; לאוניד גריניס²

¹ד"ר, דיקן המחלקה להנדסת בניין, המכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון;
²ד"ר, המחלקה להנדסת בניין, המכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון.

1. מבוא

מבנים בעלי עניין להנדסת ניקוז הם: צינורות, תעלות פתוחות, מעבירי מים, נציבים פנימיים ונציבי קצה (ירכות) של גשרים, קירות תומכים, קירות שיגומים ועוד. בביצוע מבנים אלה משתמשים באלמנטים חרושתיים המורכבים באתר או בשיטת ביצוע מלא באתר. החומרים העומדים לרשות מהנדס הניקוז הם החומרים המקובלים כקונסטרוקטיביים, כגון: בטון, פלדה, עץ, וחומרים טבעיים מקומיים כמו עפר ואבן.

במאמר זה, יוצגו התכונות המכאניות של חומרי המבנה, העומסים האופייניים הפועלים על סוגי המבנה השונים ועקרונות התכנון כולל יציבות ותסכולת. נושאים אלה יוצגו באופן תמציתי, תוך הפנייה ככל האפשר למקורות ספרותיים זמינים וזאת בשל ההגבלה על אורך המאמר, כאחד מיני רבים בקובץ זה.

מבנים שונים ומגוונים משמשים בהנדסת ניקוז. מדובר במובלים להזרמת מים, בגישור על מכשולי מים ובדיפון לגישור על הפרשים במפלסי קרקע. מאמר זה סוקר את הסוגים העיקריים של האלמנטים הקונסטרוקטיביים שבשימוש בהנדסת ניקוז על תכונותיהם המכאניות העיקריות, העומסים הקבועים השימושיים הניידים והאחרים הפועלים עליהם, ועקרונות היציבות והתכנון שלהם.

2. חומרים

2.1 פלדה

פלדת הקונסטרוקציה היא חומר חרושתי המשווק בצורת פרופילים, צינורות, לוחות שטוחים, לוחות צורתיים ומוטות בחתכים שונים. ברמת המקור, הפלדה היא חומר הומוגני ואיזוטרופי. ת"י 1225, מסווג את פלדת המבנים ל-3 קבוצות והן: Fe360, Fe430, Fe510. הערך המספרי מציין את חוזק המתיחה הגבולי בניסוי מתיחה ביחידות

מגפ"ס. גבול הכניעה של הפלדה במתיחה הוא 60%-70% מהחוזק הגבולי. התארכות השבר המינימלית 20%, ומודול האלסטיות 205,000 מגפ"ס. המשקל המרחבי של הפלדה 78.5 ק"נ למ"ק. על בסיס גבול הכניעה, נקבע חוזק התכנון של הפלדה. חוזק התכנון למתיחה נקבע כגבול הכניעה מחולק למקדם ביטחון לחוזק (1.08), וחוזק התכנון לגזירה נקבע ל-60% מחוזק התכנון למתיחה. חוזק התכנון ללחיצה ולכפיפה נקבע לפי סיווג החתך (פלסטי, קומפקטי, קומפקטי למחצה, תמיר), לפי אופן הייצור (מעורגל או מרוחק), לפי תמירות האלמנט, והאם הוא מוחזק צדית או לא.

2.2 עץ

עץ הוא חומר טבעי, לא הומוגני ולא איזוטרופי, שתכונותיו משתנות בהתאם לסוגו, מקור גידולו, גילו, כיווניות הסיבים, דרגת הלחות וכדומה. בהתאם, הפיזור בתכונותיו הוא גדול. העץ המשמש בעבודות הנדסה אזרחית מופיע בצורת גזעים, לוחות מלבניים ולבידים. להבדיל מפלדה ובטון להם פורסמו תקני תכנון, לא קיים ת"י לתכנון עץ. קיימים שני תקנים בהם יש התייחסות מסוימת לתכונות העץ והם ת"י 904 (טפסות לבטון) ות"י 1556 (גגות קלים עם סיכוך רעפים). ההגדרות בשני תקנים אלה שונות. ת"י 904 ממיין את העץ ל-4 סוגים בהתאם לארץ מוצאו. הסוגים נקראים 1,2,3,4, כאשר לסוג 1 ישנן התכונות המכאניות והחוזק הגבוהות ביותר, ולסוג 4 הנמוכות ביותר. לדוגמא, החוזק לכפיפה משתנה מ-15 עד 30 מגפ"ס ומודול האלסטיות לכפיפה משתנה מ-8,000 עד 12,500 מגפ"ס, בהתאם לסוג העץ. ת"י 1556 מבדיל בין עצי מחט (המוגדרים - עץ רך) ומסומנים באות C, ובין עצי עלים (המוגדרים עץ קשה) ומסומנים באות D. לאותיות אלה מתלווה מספר בין שתי ספרות, המבטא את חוזק העץ בכפיפה במגפ"ס. החוזק לכפיפה של עץ רך

2.4 בטון מזוין

חוזק התכן של הבטון למתיחה נמוך מאוד (כ-10%) מחוזק התכן ללחיצה. כמו כן, בתהליך ההתקשרות וההתקשות, הבטון מתכווץ, דבר היוצר בו מאמצי מתיחה. גם שינויי טמפרטורה יוצרים בבטון מאמצי מתיחה (מאמצים תרמיים). להבטחת התסבולת של אלמנטי בטון הנדרשים לשאת גם מאמצי מתיחה, משתמשים במוטות פלדה עגולים (מוטות זיון) באזורים המתוחים, כך שהבטון נושא את מאמצי הלחיצה והפלדה את מאמצי המתיחה, ובטון זה נקרא, בטון מזוין.

קיימים בשימוש שלושה סוגים של מוטות זיון: מוטות זיון חלקים בקטרים מ-6 מ"מ, חוזק אופייני 240 מגפ"ס וחוזק תכן 200 מגפ"ס. מוטות זיון מצולעים בקטרים מ-8 מ"מ, חוזק אופייני 400 מגפ"ס וחוזק תכן 350 מגפ"ס. רשתות פלדה מרותכות מפלדה חלקה או מצולעת משוכות בקר, בקטרים מ-5 עד 12 מ"מ בהפרשים של חצי מ"מ, חוזק אופייני 500 מגפ"ס וחוזק תכן 435 מגפ"ס.

2.5 בטון דבש

בטון דבש הוא גוף בטון (בדרך כלל לא מזוין) בנפח גדול, שלצורכי חיסכון בבטון, משתמשים באבן למלא חלק מהנפח. בדרך כלל משתמשים בחלוקי נחל בגודל 20-40 ס"מ. לפי המפרט הכללי הבין-משרדי מס' 40, נפח האבן לא יעלה על 1/3 מנפח הגוף.

2.6 אבן

ממיינים את סוגי האבן ל-3 סוגים עיקריים: אבן מחצבה - היא אבן חצובה באופן מלאכותי מגושי סלע; אבן לקט - היא חלק סלע שנותק מגוש סלע, באופן טבעי, כתוצאה מבליית מים או רוח; חלוק נחל - היא אבן טבעית אשר עברה ממקום למקום על ידי כוחות כובד, מים ורוח, ותוך כדי כך נשחקה והתעגלה. ככל מוצר טבעי, הפיזור בתכונות האבן גדול. בטבלה 1 רשומות תכונות מספר של אבני בנייה.

3. כוחות ועומסים**3.1 כללי**

העומסים האופייניים הפועלים על מבנים ואלמנטי

משתנה מ-14 עד 40 מגפ"ס. החוזק לכפיפה של עץ קשה משתנה מ-30 עד 70 מגפ"ס. המשקל המרחבי של עץ רך משתנה מ-3.5 עד 5 ק"נ למ"ק. המשקל המרחבי של עץ קשה משתנה מ-6.4 עד 10.0 ק"נ למ"ק. מודול האלסטיות הממוצע במקביל לסיבים לעץ רך, משתנה מ-7,000 עד 14,000 מגפ"ס, ולעץ קשה, מ-10,000 עד 20,000 מגפ"ס. החוזק האופייני במתיחה במקביל לסיבים, הוא כ-60% מהחוזק האופייני לכפיפה. החוזק האופייני ללחיצה במקביל לסיבים הוא 100%-50% מהחוזק האופייני לכפיפה. החוזק האופייני לגזירה במקביל לסיבים הוא 5%-12% מהחוזק האופייני לכפיפה. חוזק התכן מחושב על בסיס חלוקת החוזק האופייני במקדם ביטחון והכפלתו במקדם לחות העץ ומקדם משך ההעמסה. מקדם הביטחון לחומר לפי ת"י 904 הוא 1.5. ת"י 1556, מורה לבצע תכן לפי התקן האירופאי EN 11-1995 או לפי תקנים זרים אחרים.

2.3 בטון

הבטון הוא "אבן מלאכותית" המיוצרת מצמנט, מים, אגרגטים ומוספים כימיים. ערבוב המרכיבים מהווה עיסה (בטון טרי) הניתנת ליציקה בתבניות. הצמנט מתקשר כימית עם המים, מתקשה, מדביק את האגרגטים זה לזה ויוצר גוף נפחי (בטון קשוי) בצורה ובמידות של התבנית. הבטון הוא חומר הטרוגני, שלצורכי תכן, ברמת המקרו, נחשב לאיזוטרופי. ת"י 466 (חוקת הבטון) מסווג את הבטון לפי חוזקו ללחיצה, באמצעות האות ב' ומספר בן שתי ספרות המבטא את החוזק האופייני של הבטון ללחיצה במגפ"ס. סוגי הבטון המוגדרים בתקן הם: ב-15, ב-20, ב-25, ב-30, ב-40, ב-50, ב-60. בטון ב-15 מותר לשימוש רק ברכיבים מבטון לא מזוין. מודול האלסטיות של הבטון תלוי בסוג הבטון וסוג האגרגט, וגודלו משתנה מ-22,500 עד 35,200 מגפ"ס. חוזק התכן של הבטון ללחיצה צירית למצב גבולי של הרס, מהווה כ-40% מהחוזק האופייני של הבטון בלחיצה. חוזק התכן של הבטון למתיחה צירית במצב גבולי של שירות, מהווה כ-5% מחוזקו האופייני ללחיצה, וחוזק התכן הבסיסי בגזירה במצב גבולי של הרס, הוא כ-0.8% מחוזקו האופייני בלחיצה. המשקל המרחבי כ-24 ק"נ למ"ק.

טבלה 1. משקל וחוזק אבני בנייה

סוג האבן	משקל מרחבי (ק"נ למ"ק)	חוזק לחיצה (מגפ"ס)
גרניט	27-25.4	280-70
בזלת	29.7-22	350-41
קירטון	20-10	3-2
גיר	27-22	עד 55
דולומיט	28-19	110-7

מבנים הם: משקל חומרי המבנה (ת"י 109), עומסים שימושיים (ת"י 412), עומס רוח (ת"י 414), עומס רעידות אדמה (ת"י 413), עומס עפר על מבנים תומכים (ת"י 940 והצעת ת"י 1926), שינויי טמפרטורה עונתיים, פילוג טמפרטורה באלמנט, הצטמקות, זחילה, שקיעה דיפרנציאלית של סמכים, עומסים ניידים (כגון כלי רכב) כולל הולם דינמי, בלימה, הנעה וכוחות צנטריפוגליים (ת"י 1227). בכל הנושאים הללו, מופנה הקורא לתקנים המתאימים. במסגרת מאמר זה, יוצגו עומסים שלרוב אינם מוגדרים בתקנים.

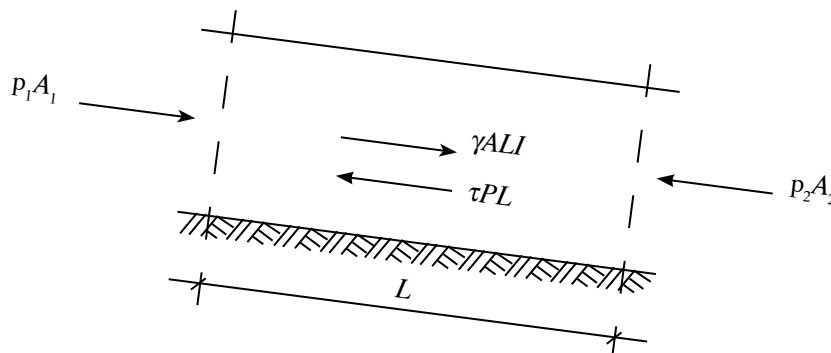
3.2 כוחות עקב זרימת נוזל

3.2.1 כללי

בזרימת מים במובלים (תעלות, צינורות), מופעלים על המעטפת (דפנות ורצפה) לחצים הידרוסטטיים במאונך למשטח, וכוחות גזירה במקביל למשטח. כמו כן, פועלים כוחות גרירה על חלקיקים שונים הנמצאים במים, כגון חול וגרגרים אחרים. על דופן מובל סגור בו נמצא נוזל בלחץ, פועל גם לחץ השווה ללחץ הנוזל בכל חתך. בעת זרימה, פועלים בנוסף לכוחות ההידרוסטטיים גם כוחות הידרודינמיים.

3.2.2 לחצים הידרוסטטיים

בכל נקודה על דפנות צינור או תעלה, פועל לחץ



תרשים 1: כוחות מקבילים לציר המובל

הידרוסטטי p , במאונך לשטח וערכו:

$$p = \gamma H \quad (1)$$

כאשר: γ - המשקל הסגולי של הנוזל.

H - עומק הנקודה מתחת לקו העומד הסטטי של הנוזל. בתעלה פתוחה ובאפיק נמצא קו העומד הסטטי בפני הנוזל באותו חתך, בזרימה בלחץ בתוך צינור, קו העומד הסטטי גבוה יותר.

3.2.3 כוחות גזירה

בכל נקודה על הרצפה ודפנות תעלה או צינור, פועל כוח גזירה עקב זרימת הנוזל. כוח זה פועל במקביל לשטח ובכיוון הזרימה. הכוח תלוי בסוג הזרימה - קצובה, תמידית או לא. זרימה תמידית, היא זרימה שבה אין שינוי בפרמטרי הזרימה עם הזמן. זרימה קצובה, היא זרימה שבה אין שינוי בפרמטרי הזרימה לאורך התעלה/הצינור. במצב זרימה קצובה, פועלים הכוחות המתוארים בתרשים 1.

מאמץ הגזירה τ יהיה:

$$\tau = \gamma \frac{AL}{P} \quad (2)$$

ובמצב של זרימה לא תמידית ולא קצובה:

$$\tau = \frac{p_1 A_1 - p_2 A_2 + \gamma A L}{PL} \quad (3)$$

כאשר: A - שטח חתך התעלה/הצינור, בחתך בו

$$F_y = \rho Q_0 v_0 \sin \alpha \quad (6)$$

כוחות אלה פועלים במאונך לשטח הדופן.

3.2.5 כוחות על נציבי גשרים בזרם

א. כוח גרר פועל בכיוון הזרימה, כמתואר בתרשים 4, וערכו ליחידת גובה נציב לפי Novak כרשום במשוואה (7).

$$F_D = 0.5 C_D \rho v^2 D \quad (7)$$

כאשר: C_D - מקדם התלוי בחתך הגיאומטרי של הנציב, מהירות הזרימה, מספר ריינולדס, מספר Keulegan Carpenter ובחשפוס פני השטח.

D - רוחב הנציב, בניצב לכיוון הזרימה.

v - מהירות הזרימה.

ב. כוח גלי מים בכיוון הזרימה, הפועל בתחום

גובה הגל H_B :

$$F_B = C_B \rho g D H_B^2 \quad (8)$$

כאשר: C_B - מקדם בתחום $1.2 \div 3.0$ התלוי במספר ריינולדס, ובמספר Keulegan Carpenter.

g - תאוצת הכבידה.

ג. כוח עקב ערבולים מתפתח במאונך לכיוון

הזרימה. הכוח ליחיד גובה לניצב גלילי יהיה:

$$F_w = \frac{1}{2} C_w \rho v^2 D \quad (9)$$

כאשר: F_w - הכוח ליחידת גובה.

C_w - מקדם התלוי בחתך הגיאומטרי,

מספר ריינולדס, מהירות הזרימה וכו'.

3.2.6 כוח על רצפת מפל

הכוח המופעל על רצפת מפל, ניתן לחישוב בקירוב מתוך אנלוגיה להתפלצות תעלה כמתואר בתרשימים 2 ו-5, ולפי נוסחה (4):

מחושב מאמץ הגזירה, או הממוצע לשני החתכים במעלה ובמורד.

I - שיפוע קו העומד.

L - אורך קטע התעלה/הצינור.

P - ההיקף המורטב בחתך בו מחושב מאמץ

הגזירה או הממוצע לשני החתכים במעלה ובמורד.

A_1, A_2 - שטח חתך התעלה במעלה ובמורד

הקטע L , בהתאמה.

p_1, p_2 - הלחץ במעלה ובמורד הקטע L ,

בהתאמה.

γ - המשקל הסגולי של הנוזל.

3.2.4 כוחות לחיצה הידרודינמיים על דופן תעלה

כוחות לחיצה הידרודינמיים המאונכים לדופן התעלה, מתפתחים כאשר כיוון הזרימה אינו מקביל לדופן, למשל בהתפלצות של תעלה ששטח חתכה A_0 והספיקה בה היא Q_0 , המתפלצת לשתי תעלות בזווית α כמתואר בתרשים 2.

הכוח הכולל F הפועל על שטח הדופן שנמצא

מול התעלה הראשית $A_0 / \cos \alpha$:

$$F = \rho Q_0 v_0 \sin \alpha \quad (4)$$

כאשר: ρ - צפיפות הזורם.

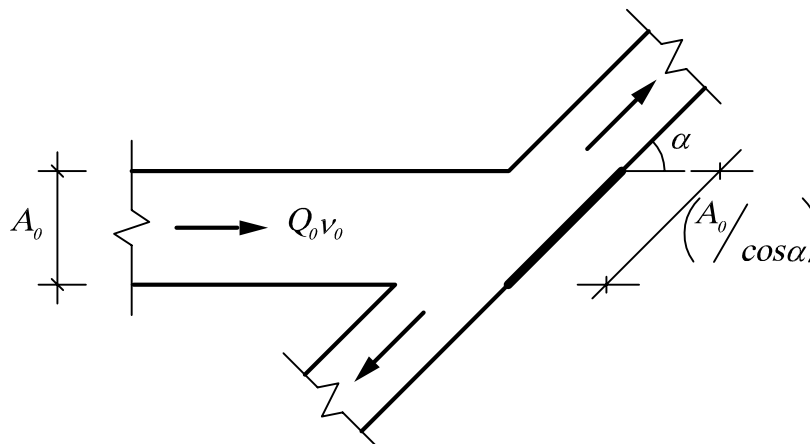
v_0 - מהירות הזרימה בתעלה הראשית.

כוחות הידרודינמיים מתפתחים גם על דפנות

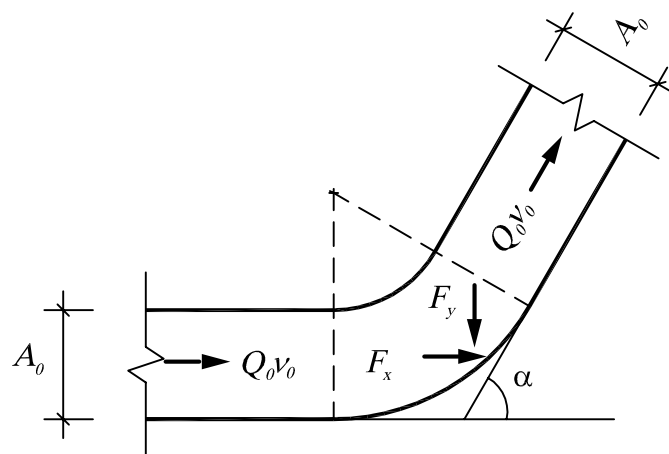
של קטע מעוקל בתעלה כמתואר בתרשים 3.

רכיבי שקול הכוח F_x, F_y הפועלים על שטח הדופן מתחילת העיקול ועד סופו הם:

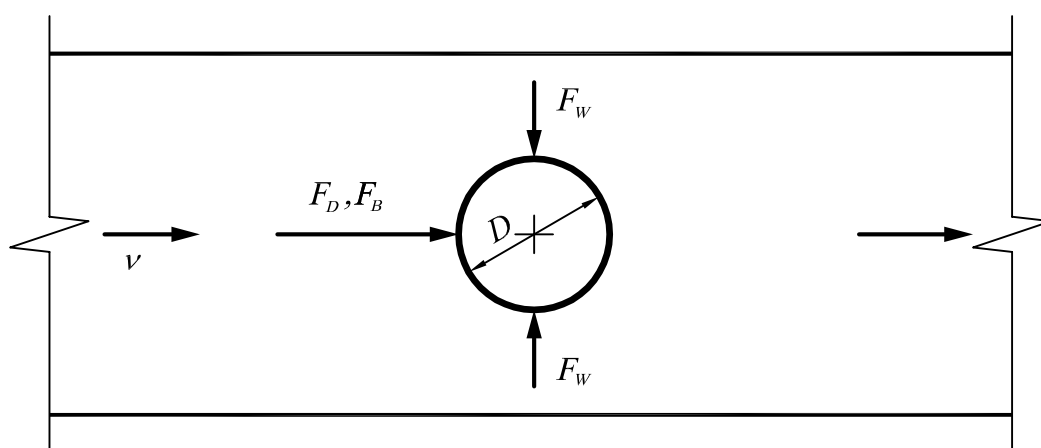
$$F_x = \rho Q_0 v_0 (1 - \cos \alpha) \quad (5)$$



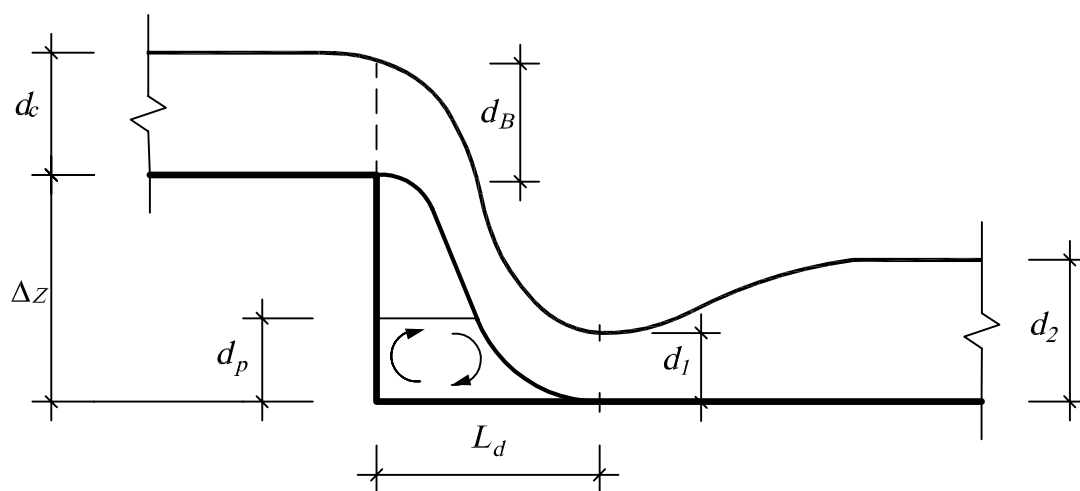
תרשים 2: כוח הידרודינמי בהתפלצות של מובל



תרשים 3: כוחות הידרודינמיים בעיקול של מובל



תרשים 4: כוחות הידרודינמיים על ניצב



תרשים 5: פרמטרי זרימה במפל

כאשר: ΔP - השינוי בלחץ (ניוטון למ"ר).
 a - מהירות גל הלחץ (מטר לשנייה).
 v_0 - מהירות המים הנעצרים (מטר לשנייה).
 ρ - צפיפות הנוזל (ק"ג למ"ק).

$$a = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho}{E_L} + \frac{\rho d}{eE_p}}} \quad (16)$$

כאשר: d - הקוטר הפנימי של הצינור (מטר).
 e - עובי דופן של הצינור (מטר).
 E_p - מודול האלסטיות של חומר הצינור (ניוטון למ"ר).
 E_L - מודול האלסטיות של חומר הנוזל (ניוטון למ"ר).
הלם לא ישיר: שינוי במהירות זרימה מקסימלית v_0 עד ערך כלשהו v_l .

$$\Delta P = \rho(v_0 - v_l)a \quad (17)$$

עליית הלחץ כאשר הזרימה נעצרת, אינה קשורה ללחץ העבודה של המערכת. הלחץ המקסימלי בכל קו צינורות מופיע, כאשר הספיקה כולה נעצרת בתקופת זמן השווה לזמן הדרוש לגל הלחץ הנוצר לעבור מנקודת הסגירה של המגוף לאורך הצינור L . זמן זה הנו:

$$t \geq \frac{2L}{a} \quad (18)$$

כאשר: t - הזמן הדרוש לגל הלחץ לעבור את אורך הצינור ובחזרה (שנייה).
 L - אורך הצינור (מטר).

הלחצים הנגרמים כתוצאה מהלם מים, ניתנים להקטנה על ידי הגדלת זמן הסגירה של המגופים לערך גדול מ- $\frac{2L}{a}$.

3.3 עומס כלי רכב (לא רכבת)

3.3.1 עומסים אנכיים

עומסי כלי רכב על מיסעות של גשרים וגשרונים, מפורט בת"י 1227. העומס ושטח המגע של גלגל כפונקציה של המשקל הכולל של הרכב, מפורט בת"י 412. בטבלה 2 מספר נתונים לעומס מקסימלי של גלגל רכב.

3.3.2 עומסים אופקיים

עומס אופקי של כלי רכב בחניונים, מוגדר בת"י 412. בחניונים למכוניות נוסעים, יש להתחשב בכוח אופקי של 5.0 ק"ג בגובה 0.5 מטר ובחניונים

$$F = \rho Q(2g\Delta z)^{1/2} \quad (10)$$

פרמטרי הזרימה במפל מתוארים בתרשים 5, ובנוסחאות 11-14, כפונקציה של היחס בין העומק הקריטי, d_c , לבין ההפרש ברומי הקרקעית משני צידי המפל, Δz .

$$\frac{L_d}{\Delta z} = 4.3 \left[\frac{d_c}{\Delta z} \right]^{0.81} \quad (11)$$

$$\frac{dp}{\Delta z} = \left[\frac{dc}{\Delta z} \right]^{0.66} \quad (12)$$

$$\frac{d_1}{\Delta z} = 0.54 \left[\frac{dc}{\Delta z} \right]^{1.275} \quad (13)$$

$$\frac{d_2}{\Delta z} = 1.66 \left[\frac{dc}{\Delta z} \right]^{0.81} \quad (14)$$

3.2.7 הלם מים

הלם מים הוא סדרה של פעימות לחץ בעלות גודל משתנה, מעל ומתחת ללחץ הרגיל של הנוזל בתוך הצינור, הנגרמות על ידי המרת האנרגיה הקינטית של המים לאנרגיה פוטנציאלית. האמפליטודה ותקופת החזרה, תלויות במהירות הנוזל וכן בקוטר, באורך ובחומר ממנו עשוי הצינור. הלם מים הוא תופעה הרסנית ויכול לגרום לפיצוץ הקווים, התמוטטות מבנים של המערכת, שבר אביזרים וכדומה.

שינוי פתאומי של הזרימה נגרם מהסיבות הבאות:

- סגירה פתאומית של מגוף.
 - פתיחה פתאומית של מגוף.
 - הפעלה או הפסקת פתאומית של משאבה הסונקת מים לתוך מיכל.
 - שינוי פתאומי בגודל הספיקה המועברת בצינור.
 - סגירת שסתום אוויר.
 - סגירה מהירה של פורק לחץ.
 - סגירה מהירה של שסתום אל-חוזר.
 - מבנה טופוגרפי של הקו ושינוי כיוון פתאומי.
- הלם ישיר: שינוי במהירות זרימה ממקסימום עד אפס.

הלחץ המרבי הנגרם על ידי הלם מים, נקבע בהתאם לנוסחה:

$$\Delta P = \rho v_0 \alpha \quad (15)$$

טבלה 2. עומס מקסימלי של גלגל רכב

משקל כולל של הרכב (ק"נ)	עומס גלגל אחורי (ק"נ)	שטח מגע (ס"מ/ס"מ)
60	20	20/20
160	50	20/40
600-300	55x2	20/40x2

γ_w - המשקל הסגולי של המים.

3.4.3 לחץ עפר אופקי

הלחץ האופקי σ_3 המתפתח בעומק כלשהו בקרקע, הוא פונקציה של הלחץ האפקטיבי האנכי σ_1 של הקרקע, ופרמטרי החוזק של הקרקע (זווית חיכוך פנימית ϕ וקוהזיה c) באותו עומק. מתוך עקרונות החוזק לגזירה של הקרקע נקבעים הגבולות של σ_3 , מותנה במידת הכליאה האופקית של העפר. הנוסחה הבאה (נוסחת רנקין - Rankine) מגדירה את הגבולות המקסימלי והמינימלי של σ_3 , המבטיחים את יציבות העפר:

$$-2c\sqrt{K_a + \sigma_1 K_a} \leq \sigma_3 \leq 2c\sqrt{K_p + \sigma_1 K_p} \quad (21)$$

כאשר: $K_a = \tan^2(45 - \frac{\phi}{2})$ הוא מקדם הלחץ האפקטיבי.

$K_p = \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$ הוא מקדם הלחץ הפסיבי.

הערך המינימלי יתקיים, כאשר לקרקע יש תמיכה אופקית המאפשרת תזוזה אופקית מסוימת, אך עדיין מבטיחה את יציבות גוש העפר באותו עומק. הערך המקסימלי מתפתח, כאשר מישור אנכי חיצוני נלחץ אל הקרקע ועדיין אינו גורם לכישלון של גוש העפר. ערך ביניים מתקיים, כאשר יש תמיכה אופקית שאינה מאפשרת תזוזה אופקית, אך גם אינה נדחפת אל הקרקע. ערך ביניים זה בקרקע לא קוהזיבית הוא:

$$\sigma_3 = \sigma_1 K_0 \quad (22)$$

כאשר: $K_0 = 1 - \sin \phi$ הוא מקדם לחץ עפר במנוחה.

3.5 עומס על צינורות ניקוז

3.5.1 כללי

צינורות ניקוז מונחים על פני הקרקע על גבי תומכות או מתחת לפני הקרקע (בדרך כלל בתעלות). לפי צורת ההנחה פועלים על הצינורות: עומס הזורם, עומס קרקע, עומסים ניידים כגון

למשאיות, יש להתחשב בכוח הולם אופקי של 20.0 ק"נ בגובה 1.0 מטר.

עומס אופקי של כלי רכב על נציבי גשרים, מוגדר בת"י 1227, כאשר מתאפשרת תנועת כלי רכב בקרבת הנציבים, כמפורט להלן: כוח מקביל לציר הדרך, 50.0 ק"נ בגובה 0.75 מטר או כוח של 100.0 ק"נ בגובה המסוכן ביותר לניצב שבין 1 ל-3 מטר. כוח אופקי מאונך לציר הדרך, 150 ק"נ בגובה 0.75 מטר או כוח של 100.0 ק"נ בגובה המסוכן ביותר לניצב שבין 1 ל-3 מטר.

3.4 עומס עפר

3.4.1 כללי

סעיף זה מתייחס ללחצים עקב המשקל העצמי של קרקע אחידה או שכבתית, כאשר פני הקרקע ושכבותיה אופקיים. מצבים אחרים של עומס עפר יפורטו בסעיף 5.6.

3.4.2 לחץ אפקטיבי אנכי

הלחץ האנכי σ_1 של קרקע שכבתית, בנקודה מסוימת, הוא סכום לחצי השכבות, היינו:

$$\sigma_1 = \sum \gamma_i h_i \quad (19)$$

כאשר: γ_i - המשקל המרחבי של הקרקע בשכבה i, מעל לנקודה.

h_i - עובי השכבה ה-i של הקרקע, מעל לנקודה.

המשקל המרחבי של הקרקע כולל את רטיבותה. משקל זה משתנה בהתאם לתכולת הרטיבות. במצב של מפלס מי תהום גבוהים או כאשר הקרקע מוצפת, השפעת השכבות המטובעות על הלחץ האפקטיבי ייקבע לפי המשקל המרחבי המטובע שלהן: γ_{sub}

$$\gamma_{sub} = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (20)$$

כאשר: γ_{sat} - הוא המשקל המרחבי הרווי של הקרקע.

גלגלי כלי רכב, עומס רוח ועומס רעידות אדמה.

3.5.2 עומס הזורם

מספר קטגוריות לעומסי הזורם:

- לחץ פנימי אחיד של הזורם (בהיקף מורטב מלא), הפועל באופן אחיד על המעטפת בחתך מסוים, במאונך לשטח המעטפת.
- לחץ הידרוסטטי, הפועל על המעטפת לפי העומק מפני הזורם בכל חתך, במאונך לשטח המעטפת, כאמור בסעיף 3.2.2.
- כוח גרר של הזורם לאורך הצינור, במקביל לציר האורך של הצינור, כאמור בסעיף 3.2.3.
- כוח הולם של הזורם בהתפצלות קווי צינורות, כאמור בסעיף 3.2.4.
- כוח הולם של הזורם בכל סטייה של הצינור מהקו הישר (בכל בוך), כאמור בסעיף 3.2.4.
- משקל הזורם, ככוח אנכי על הצינור, כאשר הצינור מונח על תומכות ומתפקד ביניהן כקורה.

3.5.3 עומסים אחרים

יש להתחשב במשקל העצמי, בעומס רוח ובעומס רעידות אדמה, לפי העניין (לצינור על קרקעי עם תומכות, ולצינור תת קרקעי).

3.5.4 השפעת עומס עפר על צינור (מובל) תת קרקעי
עומס מילוי העפר על צינור תת קרקעי מותנה באופן ההנחה, באחת משלוש האפשרויות הבאות (תרשים 6):

- הצינור מונח בתוך תעלה חפורה בקרקע טבעית. התעלה ממולאת בעפר עד פני הקרקע הטבעית (תעלה שלמה).
- הצינור מונח בתוך תעלה חפורה בקרקע טבעית. מילוי העפר גבוה ממפלס הקרקע הטבעי (תעלה

חלקית).

ג. הצינור מונח על פני קרקע טבעית, ועליו מילוי עפר (ללא תעלה).

עומס העפר על המובל מוגדר כעומס קווי (כוח ליחידת אורך מובל) והוא תלוי באופן ההנחה. להלן נמוגרות (תרשימים 7-8) ונוסחאות (לפי Seelye, 1956) המאפשרות לחשב את עומס עפר המילוי על המובל, P_v , למטר אורך צינור. העומס יחושב לפי הנוסחה:

$$P_v = C\gamma B^2 \quad (23)$$

כאשר: B - קוטר הצינור כמוגדר בתרשים 6.
 C - מקדם (חסר ממד) לפי הנומוגרמה שבתרשים 7.

γ - משקל מרחבי של עפר המילוי.

p - מקדם כמוגדר בתרשים 6.

השימוש בתרשים 7 הוא כדלקמן: לפי H/B המתאים, מעבירים קו אופקי. בנקודת החיתוך שלו עם הגרף המתאים לשיטת ההנחה ולערך של p , מעבירים קו אנכי המצביע על המקדם C .

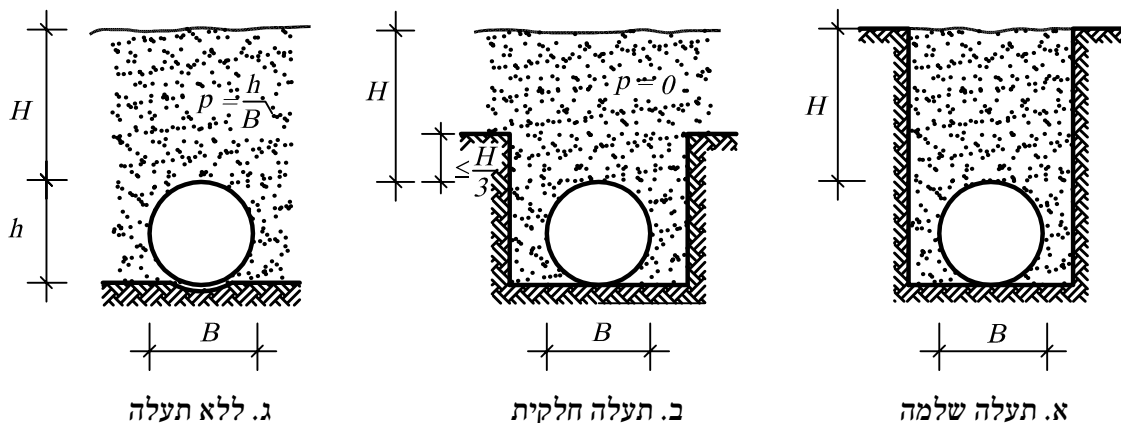
3.5.5 השפעת עומס נייד על צינור (מובל) תת קרקעי
תרשים 8 מציג נומוגרמה לקביעת המקדם של נוסחת Seelye לחישוב העומס על צינור תת קרקעי, כתוצאה מפעולת כוח מרוכז (כגון גלגל רכב) על פני המילוי. הכוח, כפי שמוגדר לפי Seelye (נוסחה 24 להלן), פועל על קטע צינור שאורכו 3 ft:

$$P_v = \eta CW \quad (24)$$

כאשר: C - מקדם לפי הנומוגרמה שבתרשים 8.

W - ערך העומס המרוכז.

η - מקדם דינמי (1.0 לכוח מרוכז במנוחה, 1.5 לכוח בתנועה).



תרשים 6: שיטות הנחת מובל תת קרקעי

4. עקרונות התכן והיציבות

העיקרון הבסיסי בתכן מערכת מבנה הוא יציבות המערכת, היינו שהמערכת אינה מהווה מכאניזם. לצורך זה, לכל אלמנט במערכת, ולמערכת בכללותה, צריכה להיות מוגדרת השענה שתבטיח את יציבותם, זאת בהנחה של אי כישלון של כל רכיב במערכת הכללית. מעבר לזה הולכת ומתחזקת הדרישה למניעת התמוטטות שרשרת, במקרה של כישלון אחד האלמנטים (ת"י 466 חלק א'). גם יציבות המערכת בשלמותה צריכה להיות מובטחת, למשל, מבחינת היפוך, הזזה ו/או התנתקות מהקרקע, כאשר הקרקע היא הסמך הסופי של כל מערכת מבנה. לאחר שהובטחה יציבות מערכת המבנה ויציבות כל אלמנט שבה, יש להבטיח את

השימוש בנומוגרמה הוא כדלקמן: לפי גובה המילוי H (במטר), על הציר האופקי, מעבירים קו אנכי. בנקודת המפגש עם קוטר הצינור (באינץ'), מעבירים קו אופקי, המצביע על המקדם C .

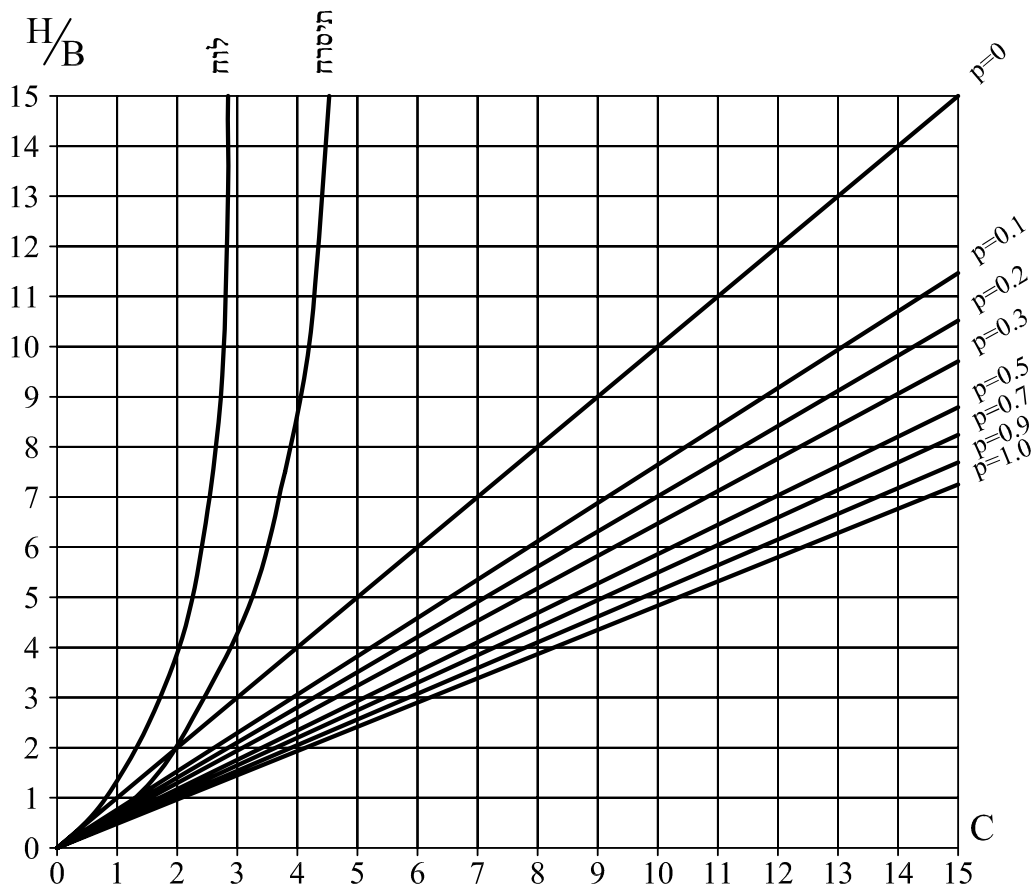
3.5.6 השפעת עומס רצוף אחיד על צינור (מובל) תת קרקעי

העומס למטר אורך צינור, יחושב לפי העומס הרצוף האחיד q (ל-מ"ר) הפועל על פני הקרקע, וערכו (לפי Seelye) תלוי ביחס המידות H/B ובסוג הקרקע, לפי הנוסחה:

$$P_v = CB \quad (25)$$

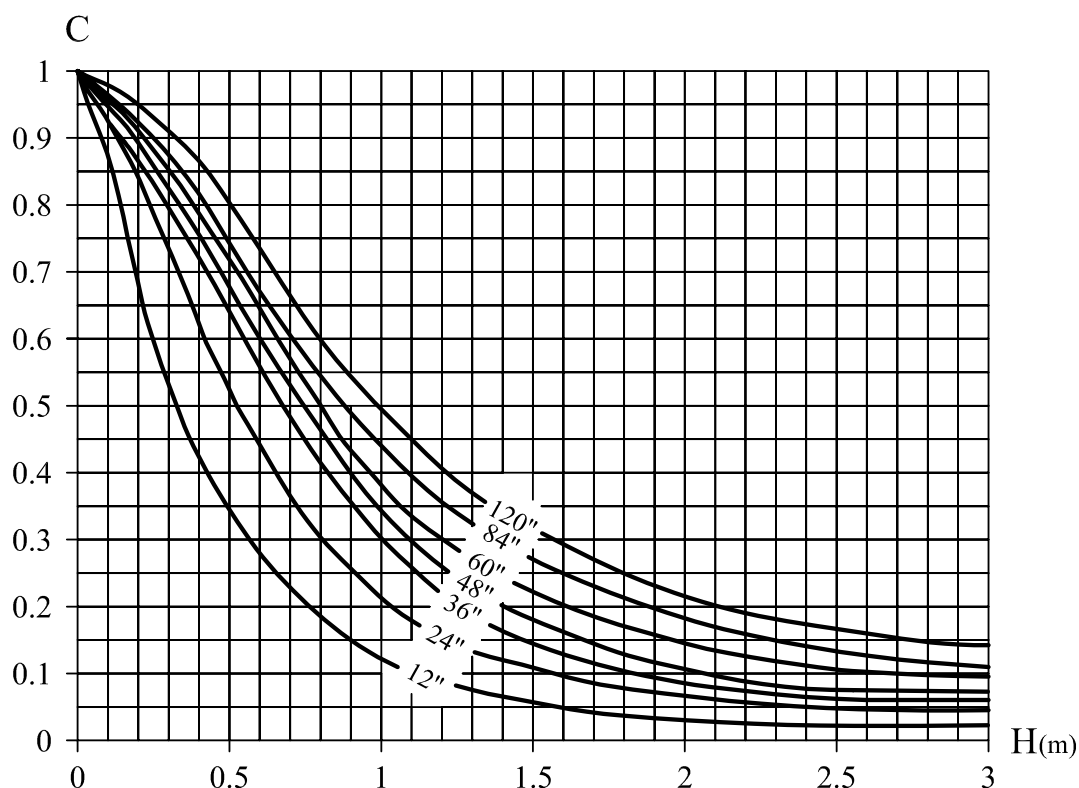
כאשר: B - קוטר הצינור כמוגדר בתרשים 6 (מטר).

C - מקדם לפי טבלה 3.



תרשים 7: נומוגרמה לחישוב עומס מילוי עפר על מובל תת קרקעי

הערות: קו "חול", קו "חרסית" והתחום שביניהם, מיועדים לשימוש במצב שמובל מונח ב"תעלה שלמה"; קו $p = 0.00$ מיועד לשימוש במצב שמובל מונח ב"תעלה חלקית"; הקווים $0.10 \leq p \leq 1.00$ מיועדים לשימוש במצב שבו מובל מונח על קרקע טבעית ללא תעלה.



תרשים 8: נומוגרמה לחישוב עומס גלגל על מובל תת קרקעי

טבלה 3. ערכי מקדמים להצבה בנוסחה 25

10.0	8.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.0	H/B
0.04	0.07	0.14	0.19	0.27	0.37	0.44	0.52	0.61	0.72	0.85	1.00	חול/קרקע לחה
0.05	0.09	0.17	0.23	0.31	0.41	0.48	0.55	0.64	0.75	0.86	1.00	קרקע רוויה
0.07	0.12	0.20	0.27	0.35	0.45	0.52	0.59	0.67	0.77	0.88	1.00	חרסית לחה
0.11	0.17	0.26	0.33	0.41	0.51	0.57	0.64	0.72	0.80	0.89	1.00	חרסית רוויה

דפורמציות ותזוזות ומוודאים שהם קטנים מהמותר, מחשבים כוחות פנימיים ותסכולת החתך ומוודאים שהתסכולת גדולה מהכוחות הפנימיים. גם כאן ה"יריעה" רחבה מאורכו המוקצב של מאמר זה, והקורא מופנה לתקני התכן הרלוונטיים.

5. קירות תומכים

5.1 כללי

קיר תומך הוא אלמנט קונסטרוקטיבי שמטרתו לקיים הפרש מפלסים בקרקע, במצב יציב. הקיר מהווה מסה, שמשקלה ומידותיה מבטיחים את

התנהגותם במצב גבולי של שירות, ואת עמידותם במצב גבולי של הרס. מצב גבולי של שירות מציין את גבול הדפורמציות והתזוזות (כמוגדר בתקנים הרלוונטיים), שעדיין מאפשרים את תפקודו של המבנה בהתאם לייעודו. מצב גבולי של הרס, מציין את גבול התסכולת של חתכי האלמנטים, לכוחות הפנימיים הפועלים בהם. לביצוע הבדיקות למצבים הגבוליים, כופלים את העומסים במקדמי הביטחון החלקיים (בהתאם לשילובי העומסים המוגדרים בתקנים לכל מצב גבולי), מפעילים את העומסים על הסכימה הסטטית, מחשבים

ההופך) של הכוח השואף להפוך את הקיר (P_a).

5.3 סוגי קירות תומכים

בתרשים 10, מתוארים סוגים שונים של קירות תומכים:

א. קיר המורכב מקוביות בטון טרום, המונחות זו על גבי זו.

ב. קיר גביונים עשוי קוביות, המורכבות ממעטפת של רשתות פלדה הממולאות אבן, ומונחות זו על גבי זו. בכך ניתן לנצל אבן מקומית ליצירת הגביונים.

ג. קיר חביות, עשוי חביות פח הממולאות עפר או בטון ומונחות זו על גבי זו. גם כאן ניתן להשתמש בעפר מקומי למילוי החביות ולהשגת המסה הנדרשת להבטחת היציבות.

ד. אלמנטים טרומיים מבטון, המשתלבים זה בזה, ויוצרים כעין מעטפות של ארגזים, כשבנפח הפנימי שלהם ממלאים עפר. לפי אותו עקרון ניתן לייצר באתר מעטפות ארגזים מגזעים או מלוחות עץ.

ה. טרסה - קיר אבן בבנייה יבשה, העשוי שבירי אבן המונחים זה על גבי זה.

ו. קיר בטון דבש, מבוצע באתר מבטון ממולא אבן.

ז. קיר בטון מזוין העשוי בסיס ("רגל") וקיר. משקלו של קיר זה נמוך. המשקל הנדרש להשגת היציבות מושג באמצעות נפח העפר המונח על ה"רגל". מלבד היציבות להיפוך והזזה, יש כמובן להבטיח את חוזק אלמנטי הקיר עצמו.

ח. קיר בטון מזוין (כמו בסעיף ז'), אך עם "שן" ביסוד, להגדלת ההתנגדות להזזה.

ט. קיר בטון מזוין (כמו בסעיף ז'), אך עם צלעות חיזוק, להקטנת עובי הבטון בקיר וביסוד.

י. קיר נטוי אל המדרון. הנטייה מקטינה את הכוח האקטיבי הפועל על הקיר, ובהתאם את מידותיו.

יא. קיר שבסיסו אינו אופקי, ההתנגדות להזזה גדלה, ובהתאם ניתן לחסוך במידות הקיר.

5.4 עקרונות התכן

בתכן קיר תומך יש לבדוק:

א. שווי משקל כללי של הקיר להיפוך והזזה. לפי זה נקבעות המידות החיצוניות של הקיר.

ב. תסבולת חתכי הקיר לכוחות הפנימיים, לפי זה נקבעות מידות החתך והזיון.

ג. יציבות המדרון.

יציבות הקיר להיפוך ולהזזה, ובכך מאפשרים לקיים את מפלסי הקרקע, במקדם ביטחון מתאים. כיוון שהיציבות מתבססת על משקלו של הקיר, נקרא קיר מסוג זה - קיר כובד.

5.2 הסכימה הסטטית

הסכימה הסטטית הבסיסית של קיר כובד מתוארת בתרשים 9, בו:

P_a - כוח אקטיבי הפועל על הקיר, כתוצאה מלחץ העפר במפלס הגבוה.

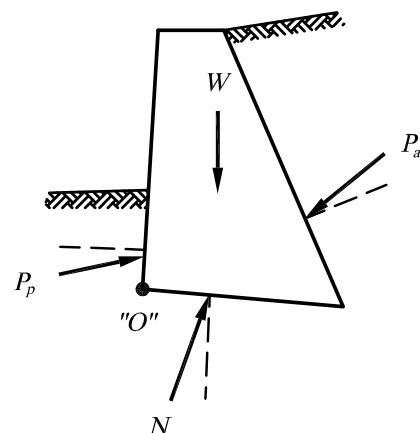
P_p - כוח פסיבי הפועל על הקיר, כתגובת הקרקע במפלס הנמוך.

W - משקל הקיר.

N - תגובת הקרקע על בסיס הקיר.

מערכת כוחות זו צריכה להימצא במצב שיווי משקל, כאשר הכוח הפסיבי הקיים למעשה יהיה קטן מהכוח הפסיבי האפשרי, ותגובת הקרקע בפועל על בסיס הקיר תהיה קטנה מתסבולת הקרקע. מצב זה מושג באמצעות משקל ומידות מתאימים לקיר, המבטיחים יציבות הקיר להזזה ולהיפוך במקדם ביטחון מסוים. מקדם הביטחון הנדרש להיפוך ומקדם הביטחון הנדרש להזזה הם 1.5 אם לא מתחשבים בלחץ הפסיבי, ו-2.0 אם מתחשבים בלחץ הפסיבי (הצעת ת"י 1926).

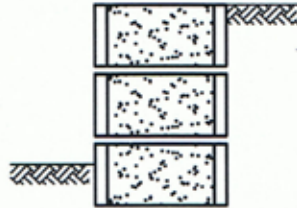
מקדם הביטחון להזזה, הוא היחס בין סכום הכוחות המתנגדים להזזה (הרכיבים במקביל לבסיס, של N ושל P_p) לכוח הגורם להזזה (הרכיב המקביל לבסיס, של P_a). מקדם הביטחון להיפוך, הוא היחס בין סכום המומנטים ביחס לנקודה "O" (המומנט המייצב) של הכוחות המתנגדים להיפוך (W ו- P_p) למומנט ביחס לנקודה "O" (המומנט



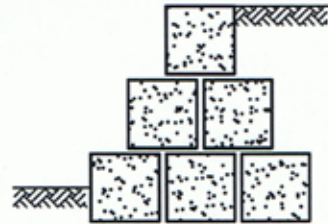
תרשים 9: סכימת כוחות טיפוסית לקיר תומך



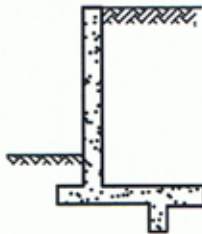
ה. טרסה



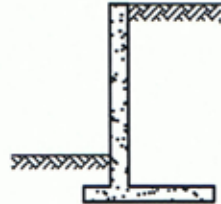
ד. אלמנטים טרומיים
ממולאים עפר



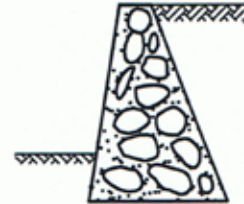
א. קיר קוביות בטון
ב. קיר גביונים
ג. קיר חביות ממולאות



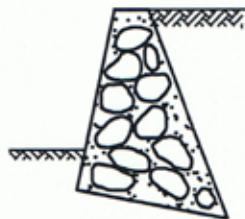
ח. קיר רגל + שן
מבטון מזוין



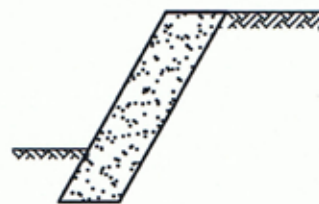
ז. קיר רגל מבטון מזוין



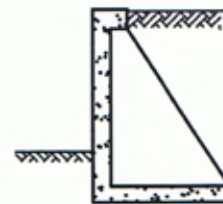
ו. קיר בטון יבש



יא. קיר עם יסוד נטוי



י. קיר נטוי למדרון



ט. קיר בטון מזוין
עם צלעות

תרשים 10: חתכים טיפוסיים של קירות תומכים

5.5 המצבים הגבוליים

לפי הצעת ת"י 1926, יש לתכנן קיר תומך למצבים הגבוליים הבאים:

מצב גבולי של שירות - המתבטא בתזוזות גדולות ו/או סדיקה. לא מפורטים ערכים מותרים של תזוזות. מצב גבולי של הרס - המתבטא בכשל המדרון, החלקה של הקיר, היפוך של הקיר, כשל קרקע הביסוס וכשל רכיבי הקיר.

5.6 לחצי עפר

לחצי העפר על הקיר מוגדרים כ:

תכן חתכי בטון מזוין יש לבצע לפי ת"י 466 למצבים הגבוליים. ת"י 940 הדין גם בנושא קירות תומכים, אינו מתייחס למצבים הגבוליים. נושא קירות תומכים תוך התייחסות למצבים הגבוליים, כלול בהצעת ת"י 1926 (משנת 1999). יציבות המדרון לא מוצאת ביטוי בתקנים הישראליים, לבד מת"י 940 שבו המלצות לשיפועי סוללות והגדרת מקדם הבטחון הנדרש ליציבות מדרון - כ-1.5. מכאן שאת בדיקת יציבות המדרון יש לבצע לפי הספרות המקצועית המתאימה, כגון (Terzaghi, Peck and Mersi, 1995).

$$K_p = \frac{\sin^2(\alpha - \phi)}{\sin^2 \alpha \sin(\alpha + \delta) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi + \beta)}{\sin(\alpha + \delta) \sin(\phi + \alpha)}} \right]^2} \quad (29)$$

וכאשר:

δ - זווית החיכוך בין הקרקע לקיר וכל יתר הפרמטרים כמוגדר בתרשים 12.

עבור פני קרקע אופקיים וגב קיר אנכי וחלק $(\alpha = 90^\circ, \beta = 0^\circ, \delta = 0^\circ)$ יתקבל,

$$K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \operatorname{tg}^2(45 - \frac{\phi}{2}) \quad (30)$$

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} = \operatorname{tg}^2(45 + \frac{\phi}{2}) \quad (31)$$

ב. קרקע אופקית קוהזיבית (לא תופחת)
הפתרון של רנקין שבסעיף 3.4.3 מתייחס למצב של גב קיר אנכי וחלק, עבורו בכל נקודה בעומק z בשכבת העפר, מתקיימים אותם לחצים אפקטיביים אנכיים σ_1 ואופקיים σ_3 לפי נוסחה (21). הלחץ האפקטיבי יהיה הערך המינימלי, והלחץ הפסיבי יהיה הערך המקסימלי לפי נוסחה זו, היינו:

$$p_a = -2c \cdot \operatorname{tg}(45 - \frac{\phi}{2}) + \gamma z \cdot \operatorname{tg}^2(45 - \frac{\phi}{2}) = \quad (32)$$

$$-2c \sqrt{K_p} + \gamma z K_a$$

$$p_p = +2c \cdot \operatorname{tg}(45 + \frac{\phi}{2}) + \gamma z \cdot \operatorname{tg}^2(45 + \frac{\phi}{2}) = \quad (33)$$

הנוסחאות הללו מקובלות (כקירוב מספיק) לשימוש גם לקירות תומכים שבהם גב הקיר לא אנכי ולא חלק, כאשר מדמיינים (לפי תרשים 13) שגוש הקרקע I, מגב הקיר ועד למישור האנכי העובר בקצה עקב הקיר, מתפקד כחלק מהקיר ויוצר גב קיר אנכי. כאן נהוג להזניח את החיכוך בין עפר לעפר בגב קיר דמיוני זה, והזנחה זו היא "על צד הביטחון".

לפי נוסחה (32), לקרקע קוהזיבית לא תופחת, מתקבל תחום של לחצים אפקטיביים שליליים בעומק $\frac{2c}{\gamma} K_a$ מראש הקיר, כמתואר בתרשים 14.

אין כמוכן להתחשב בלחץ אפקטיבי שלילי, שמשמעותו היא שהקרקע "נמתחת" ומושכת את הקיר אליה. לסיכום העומס האפקטיבי הפועל על הקיר מוצעות שתי אפשרויות:

א. להתייחס לעומס בתחום "מתיחת הקרקע" כאל אפס.

לחץ עפר אקטיבי - לחץ העפר שבמפלס הגבוה של הקרקע, השואף לגלוש למפלס הנמוך. לחץ זה עלול לגרום להזזת הקיר או להיפוכו, והוא מתקיים בקירות בהם יש אפשרות תזוזה אופקית של ראש הקיר ("מתיחת קרקע") בכיוון הרכיב האופקי של הכוח האקטיבי.

לחץ עפר במנוחה - כנ"ל, אך כאשר לראש הקיר אין "חופש" תזוזה אופקית.

לחץ עפר פסיבי - לחץ העפר שבמפלס הנמוך, המתנגד לתזוזת הקיר בפעולת הלחץ האקטיבי או בפעולת הלחץ במנוחה.

בהתייחס לתרשים 11, הכוח האקטיבי P_a על הקיר, נוצר מכישלון בגזירה של הקרקע W_1 בגב הקיר (במפלס הגבוה), לפי מישור כישלון מסוים, והכוח הפסיבי P_p על הקיר, הנוצר מכישלון בגזירה של הקרקע W_2 במפלס הנמוך.

בתרשים 11 מתוארים גם הכוחות על יתדות העפר W_1 ו- W_2 . הכוחות במישורים השונים מלווים בכוחות חיכוך, בהתאם לזווית החיכוך בין החומרים השונים ו/או בקוהזיה.

מישורי הכישלון לא ידועים, ויש לבצע בדיקה של כישלון לכל מישור אפשרי, בדיקות לאיתור מישור הכישלון שבו הכוח האקטיבי הוא מקסימלי, ומישור הכישלון שבו הכוח הפסיבי הוא מינימלי. כאשר פני הקרקע מגובבים או בפעולת עומסים קווים מקבילים לאורך הקיר, יש הכרח לבצע בדיקה כנ"ל. לצורך זה ניתן להשתמש, למשל, בשיטה הגרפית של קולמן (Bowles, 1968). בספרות המקצועית קיימות נוסחאות לחישוב הכוחות האקטיביים שכוחות מרוכזים מפעילים על קירות. למצבים פרטיים מסוימים, פותחו ביטויים לכוח האקטיבי ולכוח הפסיבי ליחידת אורך הקיר, כפי שיפורט להלן:

א. קרקע גרנולרית בשיפוע אחיד

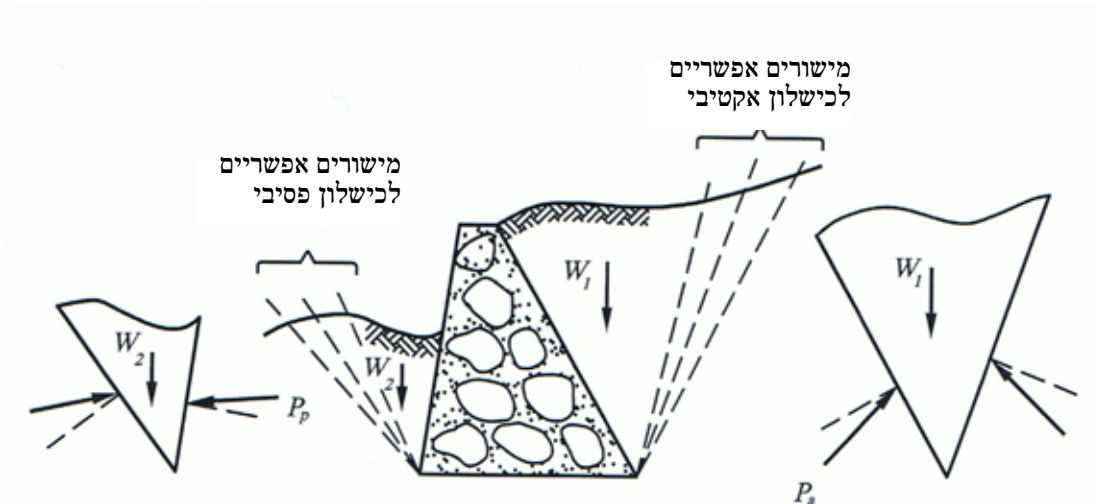
הפתרון של קולון (Coulomb) עבור קרקע לא קוהזיבית ($c=0$),

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \quad (26)$$

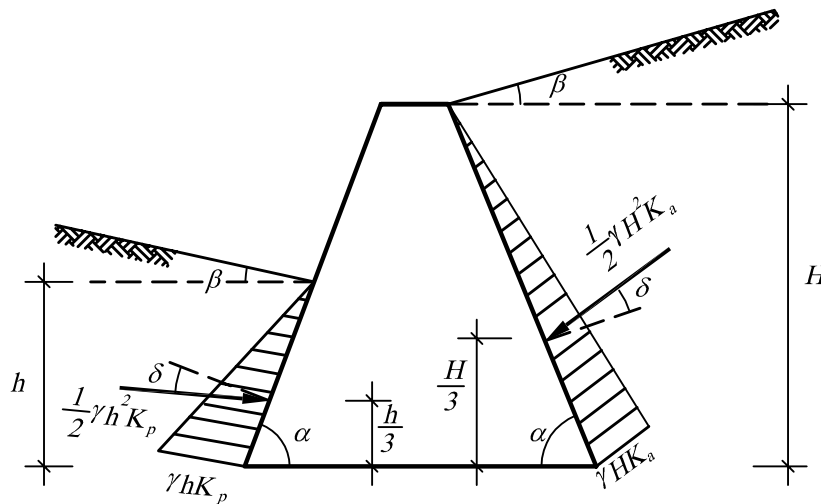
$$P_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2 \quad (27)$$

כאשר:

$$K_a = \frac{\sin^2(\alpha + \phi)}{\sin^2 \alpha \sin(\alpha - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi + \beta)}{\sin(\alpha - \delta) \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (28)$$



תרשים 11: מישורי כישלון ויתדות עפר משני צדי קיר תומך



תרשים 12: תרשים כוחות על קיר תומך לפי קולון

$$P_0 = \frac{1}{2} \gamma H (1 - \sin \phi) = \frac{1}{2} \gamma k_0 H \quad (34)$$

את זווית הסיבוב של הקיר, δ_0 , ניתן לחשב לפי הנוסחה (Bowles, 1968):

$$\tan \delta_0 = \frac{16M_0 (1 - \mu^2)}{\pi B^2 L E_s} \quad (35)$$

כאשר: M_0 - המומנט ביחס לציר יסוד הקיר, לקטע קיר באורך L .

μ - מקדם פואסון של קרקע הביסוס.

E_s - מודול האלסטיות של קרקע הביסוס.

B - רוחב בסיס הקיר.

$L \leq 4B$ - אורך קטע הקיר.

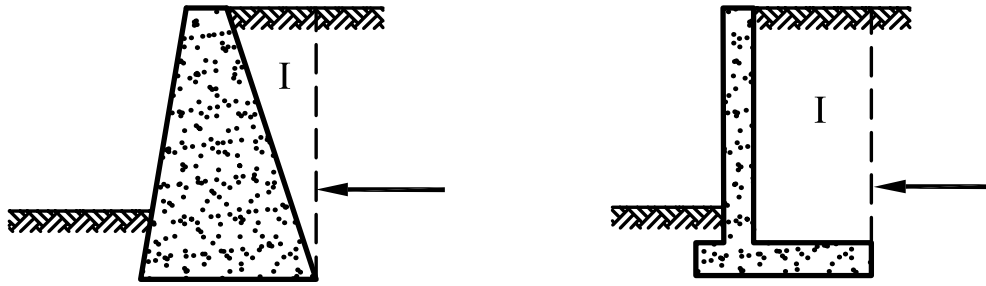
ערכים למקדם פואסון ולמודול האלסטיות של הקרקע, ניתן למצוא ב-Bowles (1996).

ב. לתקן את הדיאגרמה לפי הקו המרוסק שבתרשים 14.

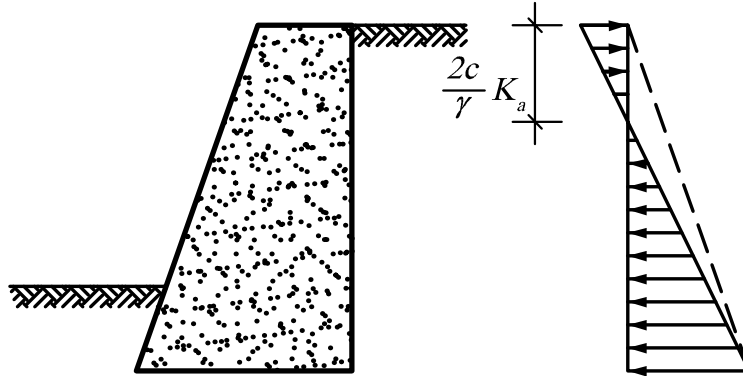
בכל מקרה יש להתחשב בכך שבתחום ה"מתיחה" האמור לעיל, ייווצר סדק בין הקיר לקרקע. סדק זה עלול להתמלא מים וליצור בתחום זה לחץ הידרוסטטי על הקיר.

ג. לחץ עפר במנוחה

הלחץ האקטיבי והלחץ הפסיבי האמורים לעיל בסעיפים א' ו-ב', מתקיימים אם לראש הקיר יש אפשרות לסיבוב סביר, כמפורט בת"י 940 או בטבלה 1 שבהצעת ת"י 1926. אם התנאים לא מתקיימים, מתפתח לחץ עפר במנוחה, שביטוי לקרקע גרנולרית הוא:



תרשים 13: העפר בגב הקיר מהווה חלק מהקיר ויוצר גב קיר אנכי



תרשים 14: "מתיחת קרקע" בקרקע קוהזיבית

נוספים על הקרקע הנתמכת (כגון: כוחות מרוכזים, יסודות של מבנים סמוכים וכדומה), יש לחשב לפי השיטות המפורטות בספרות המקצועית ובתקנים המתאימים.

5.8 עומס רעידת אדמה

לפי ת"י 413, מקדמי הלחץ האקטיבי והפסיבי יהיו כרשום בנוסחאות 36 ו-37 בהתאמה.

כאשר:

$$\theta = \arctg k_h \quad (38)$$

ו- k_h הוא מקדם הלחץ הסיסמי האופקי, שערכו עבור לחץ אקטיבי:

$$\frac{k_h}{z} = 0.86 \left[\frac{z}{d} \right]^{0.25} \leq 1.5 \quad (39)$$

ועבור לחץ פסיבי ולחץ במנוחה:

ד. לחץ מים

לקרקע מטובעת ומים עומדים, יש להתחשב במשקל מרחבי מטובע של הקרקע לפי נוסחה (20), ולהוסיף לחץ הידרוסטטי של מים לפי נוסחה (1). למים בזרימה תת קרקעית (למשל ממפלס הקרקע הגבוה למפלס הקרקע הנמוך דרך בסיס הקיר), יש להתחשב בלחץ המים לפי רשת הזרימה.

5.7 עומסים נוספים

לפי הצעת ת"י 1926, יש להתחשב בעומס מפורס נוסף על פני מפלס הקרקע הנתמכת ששיעורו 10.0 ק"נ למ"ר, ובאזורים בהם אפשרית תנועת רכב בעומס מפורס נוסף של 20.0 ק"נ למ"ר. עומסים אלה אפשר להמיר בשכבת עפר בעובי שקיל. את הכוחות הפועלים על הקיר בהשפעת עומסים

$$K_{AF} = \frac{\sin^2(\alpha - \phi + \theta)}{\cos \theta \sin^2(\alpha - \delta - \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi + \beta - \theta)}{\sin(\alpha - \delta - \theta) \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (36)$$

$$K_{PE} = \frac{\sin^2(\alpha - \phi + \theta)}{\cos^2 \theta \sin^2 \alpha \sin(\alpha + \delta + \theta) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi + \beta - \theta)}{\sin(\alpha + \delta + \theta) \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (37)$$

הכולל. בהמשך, יש לבדוק את מאמצי המגע של בסיס הקיר עם קרקע הביסוס. בסיס הקיר מעביר לקרקע כוח צירי ומומנט. את תסכולת קרקע הביסוס לכוח צירי ומומנט, ניתן לקבוע לפי מאירהוף (Bowles 1996), והנחיות ת"י 940.

במצב גבולי של שירות (מקדמי הביטחון לעומס 1.0 או 0.0), נדרש ששקול הכוח בבסיס הקיר יהיה בתחום ה"גרעין", היינו האקסצנטריות המותרת היא עד שישיית רוחב היסוד. במצב גבולי של הרס (מקדמי הביטחון לעומס הם - 1.6, 1.4, 0.0), נדרש ששקול הכוח בבסיס הקיר יהיה במחצית האמצעית של הבסיס, היינו האקסצנטריות המותרת היא עד רבע מרוחב היסוד.

בקביעת עומק הביסוס של קיר תומך, יש להתחשב בסכנת המחתור. עומק הביסוס הנדרש במקום של חציית זרם מים, יהיה מתחת לעומק החתירה הצפוי, ולפי הצעת ת"י 1926, לפחות 1.5 מטר.

5.10 דרישות נוספות

לבד מהיציבות הכללית של הקיר ותסכולת הקרקע, יש להבטיח את הקיר עצמו למצב גבולי של הרס, לכוח צירי, לכוח גזירה ולמומנט כפיפה. לקירות מבנייה יבשה, קירות מבטון דבש וקירות מבטון לא מזוין, יש להבטיח שקול בגרעין בכל חתך של הקיר. לפי הצעת ת"י 1926, גובה קירות מבנייה יבשה מוגבל ל- 2.0 מטר מתחתית היסוד. כן ניתן לתכנן קירות "כובד חסר", שבהם הכוח השקול אינו בגרעין, ולדאוג לקיום פלדה באזור המתיחה של החתך. חתך הבטון בקיר ייבדק לפי סטדיום I, ומאמצי המתיחה מוגבלים ל- 1.2 מגפ"ס לבטון ב- 20, ול- 1.6 מגפ"ס לבטון ב- 30. הזיון המינימלי יהיה:

$$A_s = 2.5 \frac{N_u}{f_{sd}} \quad (43)$$

כאשר: N_u - כוח המתיחה השקול באזור מאמצי המתיחה.

f_{sd} - חוזק התכן של פלדת הזיון. המוטות האנכיים יהיו לפחות בקוטר 12 מ"מ, והאופקיים לפחות בקוטר 8 מ"מ. המרחקים בין המוטות לא יעלו על 20 ס"מ.

חתכי קירות בטון מזוין יתוכננו לפי ת"י 466. העובי המינימלי של חתכי הקיר הוא 20 ס"מ. בקירות "כובד חסר" ובקירות בטון מזוין, יש

$$k_h = 1.5z \quad (40)$$

כאשר: z - מקדם תאוצת קרקע חזויה (תאוצת הקרקע החזויה, חלקי תאוצת הכבידה).

d - תזוזה מותרת (בס"מ) של ראש הקיר (2) ס"מ אם יש יסוד מבנה אחר בקרבת הקיר).

בקרבת מי תהום, יש להתחשב כאמור במשקל המרחבי המטובע של הקרקע ולהוסיף לחץ מים:

$$E_{we} = \frac{7}{12} \gamma_w H^2 k_h \quad (41)$$

כאשר: γ_w - המשקל הסגולי של המים.

כן יש לבדוק שמשקל הקיר לצורך יציבות להזזה יהיה לפחות:

$$W_w = 1.1 \left[\frac{\sin(\alpha - \delta) - \cos(\alpha - \delta) \operatorname{tg} \phi_b P}{\operatorname{tg} \phi_b - \operatorname{tg} \phi} \right]_{\alpha(\max)} \quad (42)$$

כאשר: 1.1 - מקדם בטחון כנגד החלקה ברעידות אדמה.

$P_{a(\max)}$ - הכוח האקטיבי המקסימלי הפועל על הקיר.

ϕ_b - זווית החיכוך בין בסיס הקיר התומך לקרקע.

5.9 ביסוס

יסוד רדוד (שטוח) הוא הביסוס הנהוג בדרך כלל לקירות תומכים. השימוש בביסוס עמוק (דוגמת כלונסאות) שמור למקרים מיוחדים, כגון קרקע ביסוס בעלת תסכולת נמוכה מאוד. בהתייחס ליסוד רדוד, היציבות להזזה מובטחת באמצעות כוח החיכוך. מקדם החיכוך בין הקיר לקרקע, תלוי בסוג הקרקע ובחומר של בסיס הקיר. מקדמי חיכוך מסוימים, מפורטים בטבלה A 2.4 שבהצעת ת"י 1926. כמו כן, נדרש שערכו של מקדם החיכוך לצורכי תכן יהיה קטן מ:

א. מקדם החיכוך לפי בדיקה מעבדתית.
ב. חוזק הגזירה של הקרקע מוכפל ב-0.75, היינו זווית חיכוך של $\delta = \arctg(0.75 \operatorname{tg} \phi)$ והדבקות של $c_w = 0.75c$.

ידיעת כל הכוחות הפועלים על קיר, מאפשרת לבדוק את יציבותו להזזה ולהיפוך. בבדיקת היציבות קיימת דילמה אם להתחשב בלחץ הפסיבי, זאת עקב הספק לקיומו לאורך זמן (למשל עקב חפירה שתבוצע בעתיד). בכל מקרה, בביסוס של קיר לעומק של עד 60 ס"מ, אין להתחשב כלל בלחץ פסיבי. בביסוס עמוק יותר, יש להתחשב בהערכת הכוח הפסיבי, בחפירה אפשרית לעומק של לפחות 60 ס"מ ולפחות 15% מהגובה הנתמך

ומישקי התכווצות לכיוון מיקום הסדקים העלולים להיווצר עקב התכווצות הבטון לאחר היציקה. המרחק בין מישקי ההתפשטות לא יעלה על 25 מטר, ובין מישקי ההתכווצות לא יעלה על 9 מטר.

יש לקבוע מרחק מינימלי מהקיר, שבתחומו לא יתבצע הידוק ויברציוני של המילוי, ויורשה רק הידוק בכלים ידניים.

6. קירות שיגומים

6.1 כללי

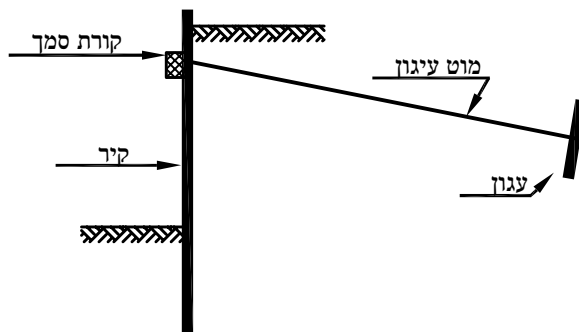
קיר שיגומים הוא אלמנט קונסטרוקטיבי, שמטרתו לקיים הפרש מפלסים בקרקע במצב יציב. קיר השיגומים עשוי לוחות או שורת כלונסאות המוחדרים אנכית לקרקע. להבדיל מהקיר התומך, אין לקיר השיגומים יסוד ויציבותו מתבססת על "ריתום" בקרקע באמצעות הלחץ הפסיבי.

למקם בחזית הקיר רשת זיון מינימלית בשטח של 10 סמ"ר למ"ר שטח חזית. המרווח המקסימלי בין המוטות הוא פעמיים עובי הקיר, אך לא יותר מ-30 ס"מ.

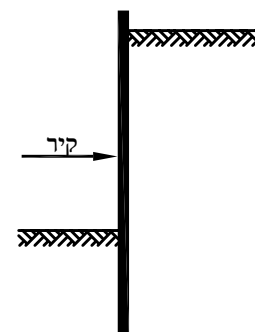
כאשר הקיר נבנה על קרקע במדרון ששיפועו קרוב לגבול שווי המשקל של הקיר כולו או כאשר קרקע הביסוס רכה מאוד ותסכולתה הלא מנוקזת גדלה באטיות לעומק או כאשר לקרקע הביסוס תסכולת גבוהה אך מתחתיה שכבת חרסית או כשקרקע הביסוס היא קרקע מילוי או קרקע תופחת, יש לבדוק את יציבות המדרון כולו, למשל בשיטת הפלחים (Terzaghi, Peck and Mesri, 1995).

יש להבטיח מילוי גרנולרי בגב הקיר וניקוז המים שם, באמצעות צינורות ניקוז או שכבות ניקוז אנכיות. מותר מילוי בחומר קוהזיבי לא פעיל לקירות תומכים מסוימים (הצעת ת"י 1926).

יש לתכנן מישקים לאורך הקירות בהם מישקי התפשטות לתווה אופקית ואנכית הברדלית,

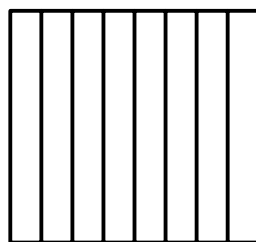


קיר שיגומים מעוגן

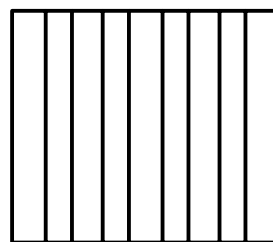


קיר שיגומים זיזי

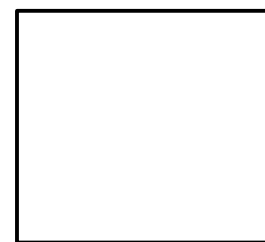
תרשים 15: חתכים טיפוסיים בקירות שיגומים



שורת כלונסאות



שיגומי פלדה



בטון טרומי

תרשים 16: סוגים אופייניים של קירות שיגומים

q - לחץ אפקטיבי אנכי בקרקע, בנקודה בה מחושב הלחץ.

ϕ - זווית החיכוך הפנימית בקרקע, בנקודה בה מחושב הלחץ.

c - הקוהזיה של הקרקע, בנקודה בה מחושב הלחץ.

במצב של קרקע מטובעת, יש לנהוג כאמור בסעיף 5.6 ד' לעיל. כמו כן, יש להתחשב בעומסים נוספים כאמור בסעיף 5.7. בערכי לחץ שליליים לפי נוסחה (45), יש לטפל כאמור בסעיף 5.6 ב'.

6.3 יציבות קיר שיגומים זיזי

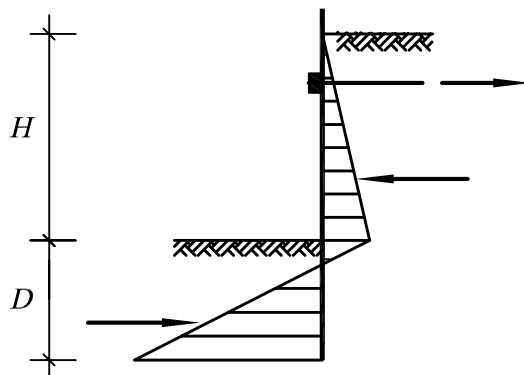
בתרשים 18 מתואר קיר שיגומים זיזי, המגשר על הפרש מפלסים H (מפלס הקרקע מימין גבוה מהמפלס בצד שמאל). תכונות הקרקע c, ϕ, γ , יכולות להיות משתנות לפי העומק בתחום H , אך לא בתחום עומק ה"תקיעה" D . בתרשים מתואר מהלך לחצי הקרקע מימין ומשמאל לקיר. לחישוב ערכם של לחצי העפר p_1, p'_1, p_2, p'_2 בנקודות (1) ו-(2), יש לחשב את הלחצים האקטיביים בנקודות אלה, p_{a1} (ימין) מימין לנקודה (1), p_{a2} (שמאל) משמאל לנקודה (2) ו- p_{a2} (ימין) מימין לנקודה (2). כן יש לחשב את הלחצים הפסיביים p_{p1} (שמאל) לנקודה (1), p_{p2} (ימין) מימין לנקודה (2) ו- p_{p2} (שמאל) משמאל לנקודה (2) ואז:

$$P_1 = P_{a1} \text{ (ימין)} \quad (46)$$

$$P'_1 = P_{p1} \text{ (שמאל)} - P_{a1} \text{ (ימין)} \quad (47)$$

$$P_2 = P_{p2} \text{ (ימין)} - P_{a2} \text{ (שמאל)} \quad (48)$$

$$P'_2 = P_{p2} \text{ (שמאל)} - P_{a2} \text{ (ימין)} \quad (49)$$



קיר שיגומים מעוגן

מבדילים בין קיר שיגומים זיזי לקיר שיגומים מעוגן, כמתואר בתרשים 15.

יחידות הקיר המוחדרות לקרקע, יכולות להיות עשויות לוחות בטון טרומיים, לוחות פלדה צורתיים, שורת כלונסאות (בטון, פלדה או עץ), כמו כן ניתן לתכן קיר שיגומים כקיר כלונסאות בטון קדוחים, כמתואר בתרשים 16.

6.2 לחצי עפר ועיקרון הפעולה

על קיר השיגומים פועלים לחצי עפר אקטיביים ופסיביים, שההפרש ביניהם מתואר בתרשים 17, לקיר מעוגן ולקיר זיזי.

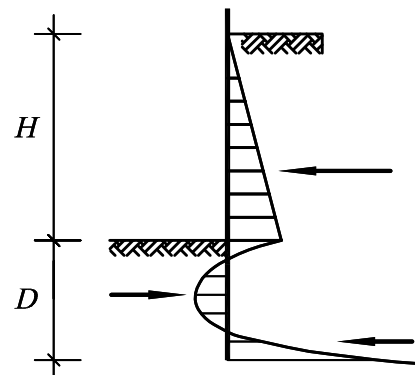
קיר שיגומים מתנהג למעשה, כקורה על מצע אלסטי. את המצע האלסטי ניתן לתאר כקפיצים המסוגלים לשאת כוח לחיצה בלבד. באמצעות תוכנת מחשב מתאימה, ניתן לחשב את דיאגרמת הלחצים על הקיר ואת מהלכי כוחות הגזירה, מומנטי הכפיפה והתזוזות בחתכי הקיר (Bowles, 1996). לחישובי יציבות ידניים (Bowles, 1996), מניחים שלקיר קשיחות אינסופית, מבצעים קירוב של דיאגרמת לחצי העפר לקווים ישרים, ומניחים שמקדם החיכוך בין הקרקע לקיר הוא אפס. עבור פני קרקע אופקיים, הלחץ האקטיבי בעומק מסוים מפני הקרקע יהיה:

$$P_a = -2c\sqrt{K_a} + qK_a \quad (44)$$

והלחץ הפסיבי יהיה:

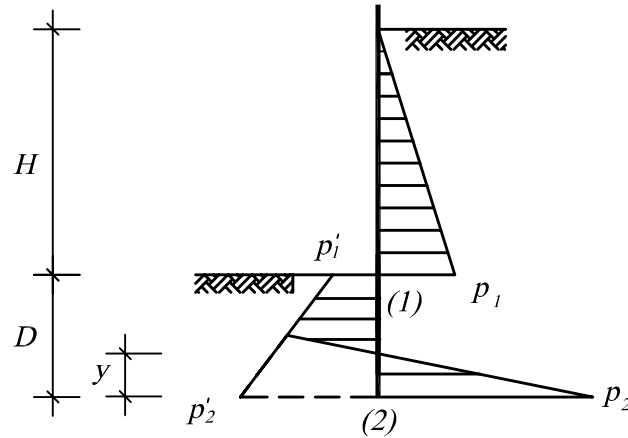
$$P_p = 2c\sqrt{K_p} + qK_p \quad (45)$$

כאשר: K_a, K_p - לפי נוסחאות (26) ו-(27).

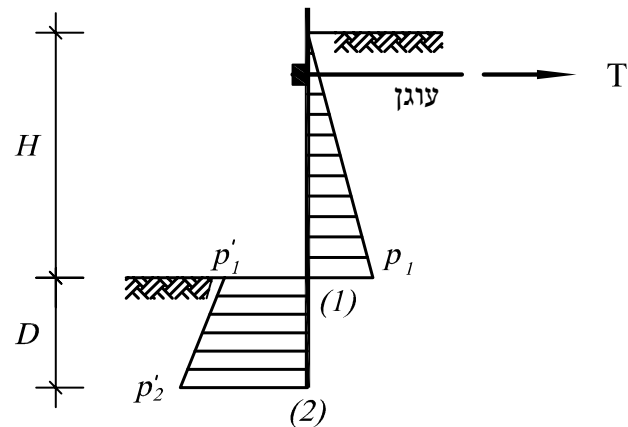


קיר שיגומים זיזי

תרשים 17: תיאור סכימטי של לחצי עפר על קירות שיגומים



תרשים 18: דיאגרמה מקורבת של לחצי עפר, לקיר שיגומים זיזי



תרשים 19: דיאגרמה מקורבת של לחצי עפר, לקיר שיגומים מעוגן

ה"תקיעה" D והכוח בעוגן T , ניתן לחשב באמצעות שתי משוואות שווי משקל.

מתארים את דיאגרמת הלחצים לפי התרשים, כאשר γ "נעלם". באמצעות שתי משוואות שווי משקל ניתן לחשב את הנעלמים D, γ .

6.5 מקדם הביטחון

קיימות שתי גישות בתכנון קיר שיגומים, למקדם הביטחון הנדרש (Bowles, 1968):
א. חלוקת הלחץ הפסיבי במקדם ביטחון וחישוב עומק ה"תקיעה" D , שיקיים שיווי משקל. מקדם הביטחון המומלץ בספרות הוא 1.5.
ב. חישוב עומק ה"תקיעה" D בגבול היציבות (כאשר הלחץ הפסיבי מנוצל במלואו), והכפלת התוצאה במקדם ביטחון. מקדם הביטחון המומלץ בספרות הוא 1.4.

6.4 יציבות קיר שיגומים מעוגן

בתרשים 19 מתואר קיר שיגומים מעוגן, המגשר על הפרש מפלסים H (מפלס הקרקע מימין גבוה מהמפלס בצד שמאל). תכונות הקרקע c, ϕ, γ יכולות להיות משתנות בתחום H , ובתחום עומק ה"תקיעה" D . לחצי העפר מימין ומשמאל לקיר, מתוארים בתרשים ומחושבים לפי הפרש בין הלחץ הפסיבי ללחץ האקטיבי בכל נקודה, לפי הנוסחאות (46), (47), (49) לעיל. את עומק

6.6 תכן החתך

לאחר שנקבע עומק ה"תקיעה" D בהתחשב במקדם הביטחון, ניתן לתאר את לחצי העפר על הקיר, לחשב את הכוחות הפנימיים (כוחות גזירה ומומנטי כפיפה), ולתכנן את חתך הקיר.

7. מובלים סגורים - צינורות ניקוז

7.1 סוגי צינורות

מגוון של צינורות משמשים לצורכי ניקוז:

7.1.1 צינורות פלדה (דוגמת "צינורות המזרח התיכון").

א. צינורות פלדה עד קוטר של 80".

ב. צינורות פלדה עם ציפוי בטון פנימי, עד קוטר של 80".

ג. צינורות פלדה עם עטיפת בטון, עטיפה פלסטית, עטיפה אספלטית או צבע מגן, עד קוטר של 80".
החיבורים בין הצינורות מבוצעים בריתוך, כולל הספחים. חיבור אוגנים אפשרי, ומשמש בעיקר לחיבור אבזרים.

7.1.2 צינורות בטון (דוגמת "אקרשטיין תעשיות", "וולפמן תעשיות").

א. צינורות בטון שקע-תקע, עד קוטר של 250 ס"מ.

ב. צינורות דחיקה מבטון, עד קוטר של 250 ס"מ.

ג. צינורות מכופפים בזווית.

ד. תאי בקרה (שוחות).

החיבור בין הצינורות בשיטת שקע-תקע. על צינורות הבטון חל ת"י 27. תקן זה מחייב סימון ייעוד הצינור באמצעות אותיות. האות ב' לצינור ביוב, האות ת' לצינור תיעול והאות x לצינור

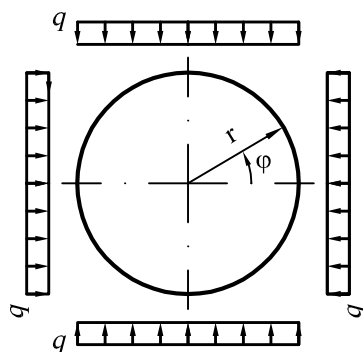
גשרונים (מעבירי מים). כמו כן, נדרש סימון לגבי הימצאות/ אי-הימצאות זיון וסוג הזיון. צינור מבטון לא מזוין, יסומן במספר 1. לגבי סוג הזיון (אם הוא קיים), מוגדר סימן מוסכם בתקן. אם כלוב הזיון אינו גליל שלם (אליפטי, רביעי רשת, שלושה רביעי רשת), יסומן הצינור גם בשלושה חצים בקצה הצינור, בחלק הפונה למעלה. דרגת העומס להרס, תסומן באמצעות מספר (120, 150, 175). התקן מגדיר את עומס המעכה למטר אורך צינור, בהתאם לדרגת העומס וקוטר הצינור.

7.1.3 צינורות PVC ופוליאתילן (דוגמת "סלילוק תעשיות")

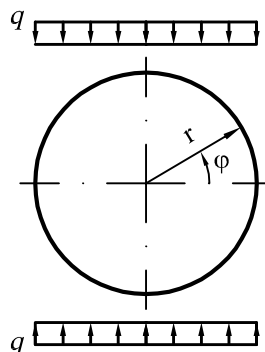
צינור פלסטי חלק בפנים ובעל צילוע ספיראלי חיצוני, עד קוטר של 250 מ"מ. חיבור צינורות על ידי השחלת הקצוות זה בזה. החוזק העצמי של הצינור נמוך, על כן יש צורך בחיזוקו באמצעות כלוב זיון עגול ויציקת עטיפת בטון חיצונית.

7.1.4 צינור פלדה - פח גלי (דוגמת "אדמיר טכנולוגיות")
צינור פלדה בחתך אורכי גלי. קיימים חתכי רוחב שונים, כגון: עיגול, אליפסה, קשת, ארגז ועוד. מידת חתך עד כ-6 מטר. הצינורות מגולוונים או בציפוי אפוקסי. החיבור על ידי השחלת הקצוות זה בזה.

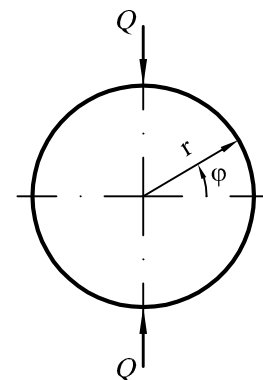
7.1.5 אלמנטי בטון טרומיים בחתכים שונים (דוגמת "אקרשטיין תעשיות")
אלמנטי בטון בחתך קשת או ארגז. החיבור בין האלמנטים בשיטת שקע-תקע.



ג. עומס מפורס שווה אנכי ואופקי



ב. עומס מפורס שווה אנכי



א. כוח קווי לאורך צינור

תרשים 20: עומסים שונים על צינורות תת קרקעיים

ומוברג באומים לשני עוגני 1/2 שבתומכה. בין החבק לצינור נדרשת שכבת ניאופרן בעובי 3 מ"מ, ומרווח שיאפשר חופש התפשטות תרמית.

7.3.2 צינורות תת קרקעיים

המפרט הבין-משרדי 57, מפרט גם את הדרישות לביצוע צינורות תת קרקעיים בתוך תעלות. בקרקע חול, אפשר להניח את הצינורות בתחתית התעלה. בקרקע סלעית או בחרסית, יש לרפד את תחתית התעלה בשכבת חול (10 ס"מ עובי בקרקע סלעית ו-15 ס"מ עובי בקרקע חרסית). לצינור בקוטר עד 50 מ"מ, רוחב התעלה צריך להיות גדול ב-20 ס"מ מכל צד של הצינור, ולצינור בקוטר גדול מ-50 מ"מ, רוחב התעלה צריך להיות גדול ב-35 ס"מ מכל צד של הצינור. עד מחצית גובה הצינור יש לבצע מילוי חול מהודק. מכאן ועד 20 ס"מ מעל פני הצינור, ניתן לבצע מילוי מוחזר תוך הרטבה והידוק. בתחום של 20-70 ס"מ מעל פני הצינור, יש לבצע מילוי בקרקע נקייה מחומרים אורגנים ופסולת, ובה מותרים רגבים ואבנים שגודלם עד 7 ס"מ, גם זה תוך הרטבה והידוק. מעל גובה של 70 ס"מ מעל פני הצינור, מותר להשתמש במילוי מוחזר מהחומר החפור, תוך פיזור הרטבה והידוק בשכבות של 20 ס"מ עובי. בשטח פתוח, מותר מילוי עורף של עד 30 ס"מ מעל פני הקרקע הטבעית.

8. מובלים פתוחים - תעלות

8.1 כללי

מהבחינה הקונסטרוקטיבית, ניתן להגדיר שלושה סוגים של תעלות:

א. תעלות חפורות בקרקע טבעית ללא ציפוי כלשהו, כעין נחל מלאכותי, כך שהמים הזורמים מתחככים בקרקע הטבעית. בקרקע סלעית, ניתן בדרך כלל להסתפק בפני תעלה טבעיים, אך בקרקע גררית, יש לדאוג לשיפוע דפנות מתאים ליציבות המדרון. הפתרון זול יחסית, אך תהליך הבלייה מהיר, דבר שיחייב השקעה רצופה בתחזוקה הולמת.
ב. תעלות חפורות בקרקע טבעית, כאשר פני קרקעית התעלה ודפנותיה מצופים בחומר קשה יחסית, שעמידותו לבלייה עקב זרימת מים גדולה. הציפוי האמור אינו אלמנט קונסטרוקטיבי, דבר המחייב ששיפוע הדפנות יהיה קטן במידה שתבטיח את יציבות המדרון.

7.2 תכן דופן הצינור

צינורות בטון לפי ת"י 27, מתוכננים לפי מקדם ביטחון לעומס של 1.0 למצב גבולי של שירות (מקדם לסדק), 1.3 למצב גבולי של הרס לצינורות בקוטר נומינלי של 800 מ"מ ומטה, ו-1.5 למצב גבולי של הרס לצינורות בקוטר נומינלי גדול מ-800 מ"מ. התקן מגדיר גם את עובי הדופן ועומס המעיכה לצינורות בטון ללא זיון ועם זיון, בהם מוגדר גם הזיון המינימלי. בהתאם לעומס המעיכה הפועל כמפורט בסעיף 3.5, ניתן לבחור לפי התקן את הצינור המתאים.

באשר לצינורות מחומרים אחרים, יש לבצע חישוב סטטי של הכוחות הפנימיים במעטפת הצינור ולבדוק את המאמצים בחתך. להלן נוסחאות למומנטים במעטפת הצינור לפי שקלרסקי (1957):

א. כוח קווי Q לאורך הצינור (תרשים 20 א'), בהנחה שגם תגובת הקרקע היא כוח קווי,

$$M = \frac{1}{2} Qr \left[\frac{2}{\pi} - \cos \phi \right] \quad (50)$$

ב. עומס אנכי q מחולק שווה (תרשים 20 ב'), בהנחה שגם תגובת הקרקע היא כוח מחולק שווה,

$$M = \frac{qr^2}{2} \left[\frac{1}{2} - \cos^2 \phi \right] \quad (51)$$

בפעולת עומס אנכי מחולק שווה ועומס אופקי מחולק שווה, יקבע המומנט כסופרפוזיציה של שני המצבים. אם העומס האופקי שווה לאנכי, אז המומנט בכל זווית ϕ יהיה אפס, והכוח הפנימי במעטפת הצינור יהיה כוח צירי, כפי שמתקבל בפעולת לחץ פנימי או חיצוני אחיד p על מעטפת הצינור, כמתואר בתרשים 20 ג':

$$T = pr \quad (52)$$

לצורכי תכן לעומסים אחרים וחתכים אחרים, יש להיעזר בתוכנות מחשב מתאימות.

7.3 כללי ביצוע

7.3.1 צינורות על קרקעיים

הדרישות להנחת צינורות על קרקעיים, מפורטות במפרט הכללי הבין-משרדי מס' 57. לפי מפרט זה, הצינורות יונחו על תומכות בטון יצוקות באתר או טרומיות. על התומכה לכלול תושבת שקועה המתאימה לקוטר הצינור, ועליה נאופרן בעובי 3 מ"מ. יש לחבר את הצינור לתומכה על ידי חבק ברזל שטוח 50/5 מ"מ, מנוקב בקצוות

ג. תעלות שדפנותיהן עשויות משטחים בעלי חוזק ויציבות, היינו אלמנטים קונסטרוקטיביים כגון קירות תומכים, קירות שיגומים או בטון מזוין בחתך תעלה, כפי שיפורט בהמשך.

8.2 תעלות מצופות

8.2.1 ציפוי גבינים

הקרקע החפורה בצורת תעלה טרפזית, מצופה בגבינים. הגביון, כאמור בסעיף 5.3ב', הוא ארגז רשת ממולא אבן. הרשת לפי המפרט הכללי הבין-משרדי 51, תהיה שזורה מחוט פלדה מגולוון בעובי 2 מ"מ לפחות. הארגזים יכללו מחיצות בכל 50 ס"מ. חיבורים יבוצעו בכל עין. כל רשת תיקשר לגביון הסמוך. מידת גובה הארגז 15 ס"מ ועיני הרשת במידות של 7.5 ס"מ לכל היותר. מילוי הארגזים יבוצע מאבן דבש גוויל או אבן חצובה, שלא תעלה על 15 ס"מ ולא תהיה קטנה ממידת העין. ההנחה תבוצע בעבודת ידיים. לאחר מילוי הארגז וסגירתו, יש לחזק את המקצועות באמצעות מוטות חיזוק.

8.2.2 ציפוי "מרוצף"

ניתן לבצע ציפוי מחומרים שונים כגון אבן שטוחה קובית או עגלגלה, עם או בלי בטון, כחומר הדבקה בין האבנים. קיימים גם מוצרים חרושתיים

לציפוי, דוגמת אבן G של "אקרשטיין תעשיות". לאבן זו גיאומטריה של שקע-תקע, המאפשר חיבור האבנים זו לזו ליצירת משטח אופקי, משופע מישורי, מעגלי אובאלי וכדומה. ההנחה מתבצעת על שכבת חצץ שומשום או עדש.

8.3 תעלות טרומיות

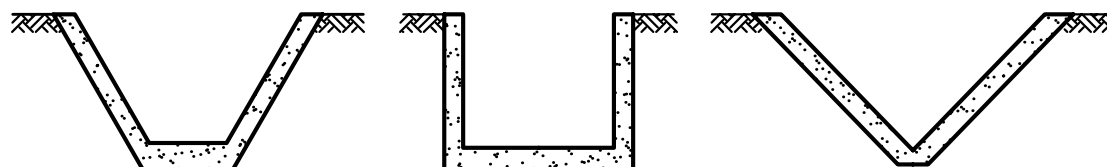
אלמנטים טרומיים של תעלות עם דפנות אנכיות כתעלת ניקוז לאורך דרכים או כתעלת ניקוז של משטחים, דוגמת תעלות טרומיות של "אקרשטיין תעשיות". חתכי התעלות עד 80/80 ס"מ, והן יכולות לכלול רשת כיסוי.

8.4 תעלות בטון יצוקות באתר

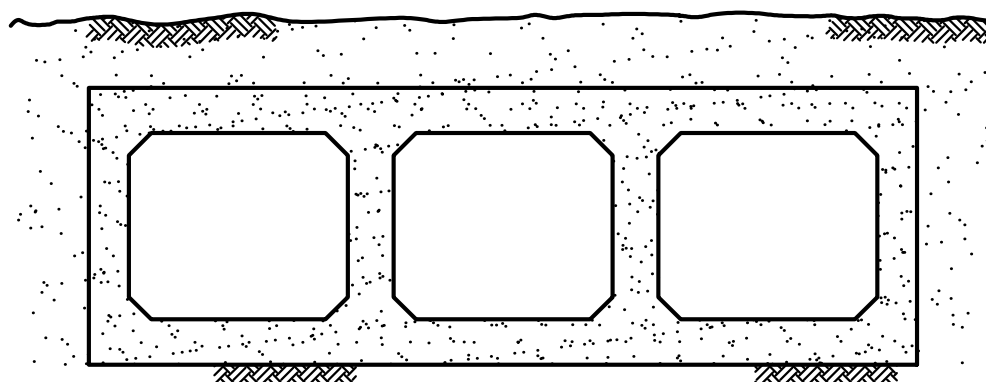
לתעלות בטון מזוין יצוק באתר, חתכים שונים - כגון משולשי, מלבני, טרפזי, כמתואר בתרשים 21 או כל חתך אחר. חתך התעלה מחושב ללחץ עפר חיצוני על הקירות ו/או לחץ מים פנימי, שלפיהם, על בסיס מצבי העמיסה האפשריים, נקבעים הכוחות הפנימיים ומתוכנן החתך.

8.5 גשר אירי

דיפון פני הדרך באזור בו תוואי זרימה של מים חוצה את הדרך. הדיפון מתבצע במפלס פני הדרך



תרשים 21: חתכים טיפוסיים בתעלות בטון יצוקות באתר



תרשים 22: חתך אופייני במעביר מים בחתך ארגז - 3 תאים

אלמנטים אלה כוללים ראש וגפיים מבטון מזוין, והם משמשים להגנה על המדרון של חתך הדרך ולהגנה כנגד חדירת מים לגוף המבנה התחתון של הדרך. אלמנט כניסה/יציאה זה מתפקד כקיר תומך. גובה מינימלי של ראש האלמנט מעל פני הדרך, 50 ס"מ.

אין מניעה ליצור מבנה אחר ומחומרים אחרים שיתאים לתפקוד של מעביר מים. תרשים 24 מתאר מעבירי מים עשויים מלוחות עץ או גזעי עץ. במעביר מים כזה, יש לתכנן ולחשב כל אלמנט לעומסים הפועלים עליו, בהתאם לתנאי השענתו ובהתאם לסכימה הסטטית שלו.

מראי מקומות

המפרט הכללי הבין-משרדי מס' 40 (1993). מפרט כללי לסלילת מסלולים בשדות תעופה כבישים ורחבות. משרד הביטחון ההוצאה לאור.
המפרט הכללי הבין-משרדי מס' 51 (1988). מפרט כללי לסלילת מסלולים בשדות תעופה כבישים ורחבות. משרד הביטחון ההוצאה לאור.
המפרט הכללי הבין-משרדי מס' 57 (1990). מפרט כללי לקווי מים ביוב ותיעול. משרד הביטחון ההוצאה לאור.
שקלרסקי, א' (1957). מובלים תת-קרקעיים -

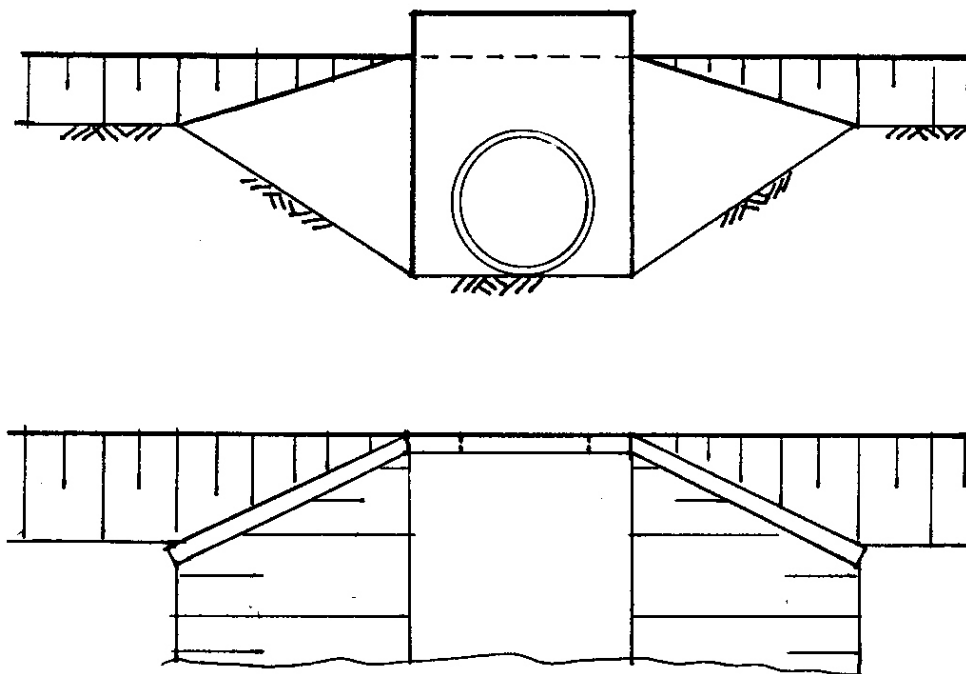
המתוכנן כמפלס פני תוואי הזרימה. הדיפון עשוי בדרך כלל מבטון מזוין, ומיועד למניעת סחיפת פני הדרך. למונח "גשר אירי" אין כמוכן המשמעות המקובלת של "גשר".

9. מעבירי מים

מעביר מים או בשמו האחר גשרון, הוא מובל המונח בתוך ערוץ הזרימה של נחל או תעלה, ומאפשר זרימת מים דרכו ומעבר של דרך מעליו. מעביר המים חוסם חלק משטח חתך הזרימה ומאפשר זרימה רק דרך מעברים מוגדרים.

מעבירי מים מקובל לבצע מצינורות תיעול, כמפורט בסעיף 7 לעיל או מבטון מזוין יצוק באתר בחתך ארגז, כמתואר בתרשים 22. התרשים מתאר חתך טיפוסי של מעביר מים בעל 3 פתחים. הסכימה הסטטית של מעביר זה היא מסגרת בת 3 שדות על מצע אלסטי, אותה יש לחשב לשילובי העומסים האפשריים כאמור לעיל בסעיף 3. את הכוחות הפנימיים ותכן החתכים ניתן לבצע תוך שימוש בתוכנות מחשב מתאימות דוגמת "עתיר" ו-"Strap".

למעביר מים יש לתכנן גם אלמנטי כניסה ויציאה בצד כניסת המים למעביר ובצד היציאה שלהם מהמעביר, כמתואר לדוגמה בתרשים 23.



תרשים 23: אלמנט כניסה/יציאה במעביר מים

- ת"י 1926, (הצעה, 1999). קירות תמך.
Bowles, J.E. (1968). **Foundation Analysis and Design**. McGraw-Hill, Kogakusha.
Bowles, J.E. (1996). **Foundation Analysis and Design**. McGraw-Hill, New York.
Novak, P. (2001). **Hydraulic Structures**. E.& E.F.Spon, London.
Seelye, E.G. (1956). **Foundation Design and Practice**. John Wiley, New York.
Terzaghi, K.; Peck, R.B.; Mesri, G. (1995). **Soil Mechanics in Engineering Practice**. John Wiley, New York.

קטלוגים של חברות מסחריות:

"אדמיר טכנולוגיות"

"אקראשיין תעשיות"

"וולפמן תעשיות"

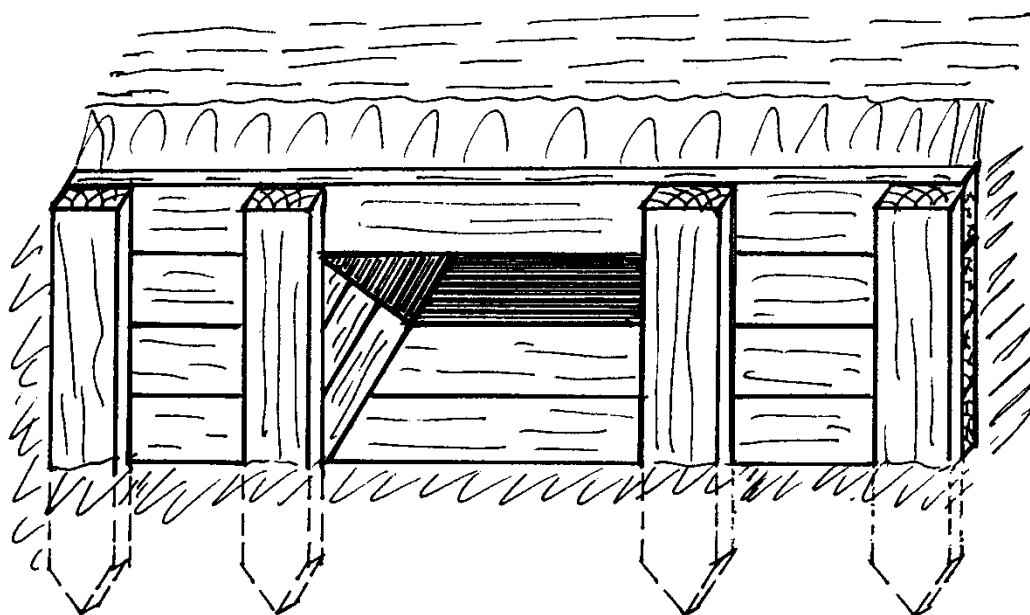
"סלילוק תעשיות"

תוכנות מחשב

"עתיר"

"Strap"

- חישוב העומס והתסבולת. בשדה הבנייה, 50.
התחנה לחקר הבנייה, הטכניון.
ת"י 27 (אוגוסט 1984). צינורות גליליים מבטון ומבטון מזוין.
ת"י 109 (ספטמבר 1996). משקלים של חומרי בניה ושל חלקי מבנה.
ת"י 412, (מאי 1992). עומסים במבנים: עומסים אופייניים.
ת"י 413 (יוני 1995). תכן עמידות מבנים ברעידות אדמה.
ת"י 414 (אוקטובר 1982). עומסים אופייניים בבניינים: עומס רוח.
ת"י 466 (חלק 1 - יוני 2003 וגיליון תוספת דצמבר 2005, חלק 2 - ינואר 1979). חוקת הבטון.
ת"י 904 (חלק 1, אוגוסט 1995). טפסות לבטון עקרוניות.
ת"י 940 (דצמבר 1978). ביסוס בניינים.
ת"י 940, (הצעה, אפריל 2005). חוקת הביסוס.
ת"י 1225 (דצמבר 1998). חוקת מבני פלדה.
ת"י 1227 (חלק 1, ספטמבר 1988). עומסים בגשרים: עומסי דרך.
ת"י 1556 (דצמבר 2005). גגות קלים עם סיכוך רעפים.



תרשים 24: מעביר מים מלוחות עץ

מבנים הידרולים

לאוניד גריניס¹, אריה בן-צבי²

¹ד"ר, המחלקה להנדסת בניין, המכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון;
²פרופסור, מורה מן החוץ, המחלקה להנדסת בניין, המכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון;
 לשעבר מנהל השירות ההידרולוגי.

1. אפיקים ותעלות

מאמר זה עוסק במבנים הידרולים הנמצאים באפיקים ובתעלות. אפיק הוא שקע אורכי בפני הקרקע או הסלע, בו יכולים לזרום נוזלים כאשר פניהם חופשיים. תעלה היא אפיק מלאכותי. במאמר זה נדון במבנים הקשורים לזרימת מים בלבד.

1.1 אפיונים גיאומטריים של החתכים לרוחב בתעלות

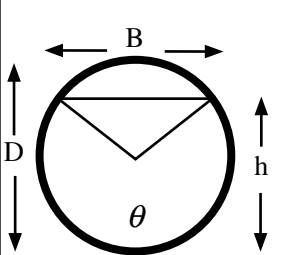
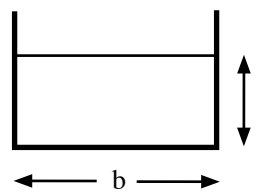
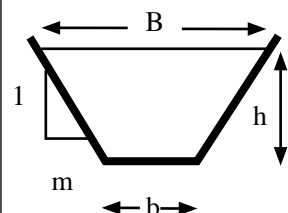
לחתך הרוחבי של תעלות, מקובלות הצורות הבאות:
 - מלבן

- משולש
- טרפז
- עיגול
- פרבולה

בטבלה 1, רשומים האפיונים הגיאומטריים של החתך לרוחב תעלות בעלות צורות נפוצות. לאפיקים טבעיים אין חתך קבוע ובעל צורה מוגדרת, ולכן המאפיינים ההידרוליים שלו מחושבים באורח אמפירי.

מקרא לטבלה 1: h עומק המים הזורמים, b רוחב התעלה בקרקעיתה, B רוחב פני המים בתעלה, m שיפוע הדפנות (1 אנכי ל-m אופקי), θ הזווית המרכזית של קו פני המים, D קוטר חתך עגול.

טבלה 1: קשרים גיאומטריים למאפיינים הידרולים של תעלות בעלות צורות נפוצות

תעלה עגולה	תעלה מלבנית	תעלה טרפזית	מאפיין הידרולי
			תרשים החתך
$\frac{1}{8}(\theta - \sin\theta)D^2$	bh	$(b + mh)h$	שטח חתך, A
$\frac{1}{2}\theta D$	$b + 2h$	$b + 2h\sqrt{1 + m^2}$	היקף מורטב, P
$(\sin\theta / 2)D$	b	$b + 2mh$	רוחב פני המים, B
$\frac{1}{4}(1 - \frac{\sin\theta}{\theta})D$	$bh / (b + 2h)$	$\frac{(b + mh)h}{b + 2h\sqrt{1 + m^2}}$	רדיוס הידרולי, R
$\frac{1}{8}(\frac{\theta - \sin\theta}{\sin(1/2\theta)})D$	h	$\frac{(b + mh)h}{b + 2mh}$	עומק ממוצע, h_a

מאפייני חתך משולשי מתקבלים מאלה של טרפזי תוך הצבה $b = 0$.

1.2 משוואת זרימה באפיקים

המשוואות לחישוב זרימה באפיקים, מבוססות על החוקים הפיסיקליים של שימור המסה והאנרגיה או התנע (ראה בן-צבי וגריניס, 2008). במרבית השימושים ההנדסיים הקשורים לניקוז, הן מופיעות בצורה מפורשת לזרימה קצובה ותמידית של נוזל בעל צפיפות קבועה וללא תוספות צדיות. משוואת שימור המסה (הרציפות) לזרימה כזו, לאורך שפופרת זרם:

$$Q = A_1 U_1 = A_2 U_2 \quad (1)$$

כאשר Q הספיקה, A שטח החתך לרוחב, U מהירות הזרימה הממוצעת בחתך, והסימנים התחתונים מציינים מיקום.

משוואת שימור האנרגיה מוצגת באמצעות משפט ברנולי, לפיה מתקיים לאורך קו זרם:

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{U_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{U_2^2}{2g} = H = \text{const} \quad (2)$$

כאשר z רום טופוגרפי, P לחץ, γ משקל סגולי, g תאוצת הכבידה, H עומד כולל. יש לשים לב כי משפט ברנולי מתעלם מהפסדי עומד לאורך מסלול הזרימה.

משוואת שימור התנע לזרימה חד-ממדית:

$$F_x = \rho Q (U_{x2} - U_{x1}) \quad (3)$$

כאשר F_x הפרש התנע בין שני חתכים, ρ צפיפות, x מציין אורך בכיוון הזרימה.

מאמץ הגזירה הממוצע על דפנות האפיק (נוסחת די-בואה):

$$\tau = \gamma R I \quad (4)$$

כאשר τ מאמץ הגזירה, γ משקל סגולי, R רדיוס הידרולי, I הגרדינט ההידרולי (שיפוע קו העומד). הנוסחאות המקובלות בהנדסת מים לקישור בין מהירות הזרימה לבין המאפיינים הגיאומטריים של החתך, הן של שזי (5) ושל מנינג (6). כאשר מציבים יחידות בריטיות בנוסחת מנינג, יש לכפול את אגף ימין ב-1.49.

$$U = C \sqrt{RI} \quad (5)$$

$$U = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (6)$$

כאשר C מקדם הקשור לחספוס פני האפיק, n מקדם ההתנגדות למנינג. מקדמים אלה קשורים

זה לזה באמצעות הרדיוס ההידרולי:

$$U = R^{1/6} / n \quad (7)$$

ערכי המקדמים וטבלאות עבור כושר הולכה של תעלות שונות פורסמו במקומות רבים, למשל, טבלאות: 2-1, 2-2 אצל Eisenbrey et al. (2005).

1.3 סוגי זרימה

האנרגיה הסגולית של המים הזורמים, E_s , מוגדרת כאנרגיה ליחידת משקל (עומד) של הזורם ביחס לקרקעית התעלה:

$$E_s = h - \frac{\alpha U^2}{2g} \quad (8)$$

כאשר h עומק המים, α מקדם שערכו גדול מעט מיחידה.

בגלל מהירות הזרימה, האנרגיה הסגולית גבוהה תמיד מעומק המים. הקשר ביניהם אינו חד ערכי, כי בתחום מסוים יכולה אותה אנרגיה להתקבל עבור שני עומקים. בעומק מסוים, שנקרא העומק הקריטי, h_c יש לאנרגיה הסגולית ערך מזערי. כאשר $h > h_c$ - הזרימה תת קריטית וכאשר $h < h_c$ - הזרימה על קריטית (ראה תרשים 1). המרחק מהמצב הקריטי מתואר כמותית באמצעות מספר פרוד, Fr :

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh_a}} \quad (9)$$

כאשר h_a עומק המים הממוצע בחתך.

מספר פרוד מתאר את היחס בין כוחות האינרציה לבין כוחות הכובד או את היחס בין מהירות הזרימה לבין מהירות ההתקדמות של גלים בתוך מים זורמים באפיק או על פני השטח. המעברים בין שני סוגי הזרימה, מאופיינים בשינויים חריפים בעומק המים ובמהירות זרימתם. הם מתוארים סכמטית בתרשים 2.

כאשר: $Fr < 1$ - הזרימה תת קריטית והיחס בין

עמקי הזרימה הוא $h > h_c$,

$Fr > 1$ - הזרימה על קריטית והיחס בין

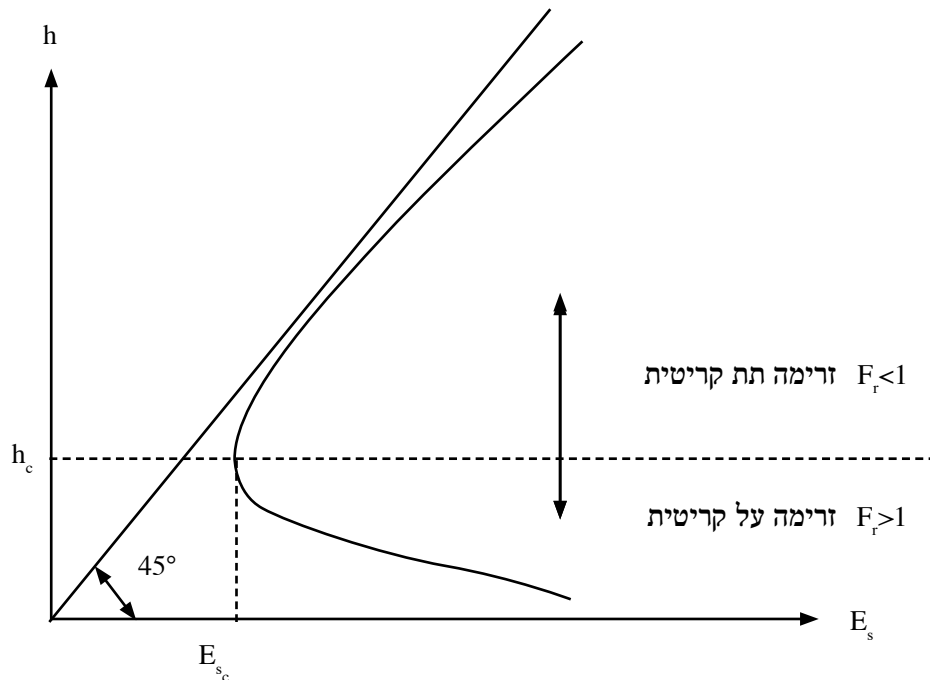
עמקי הזרימה הוא $h < h_c$.

2. סכרים

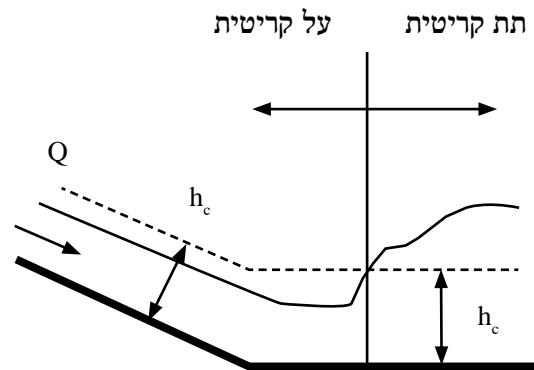
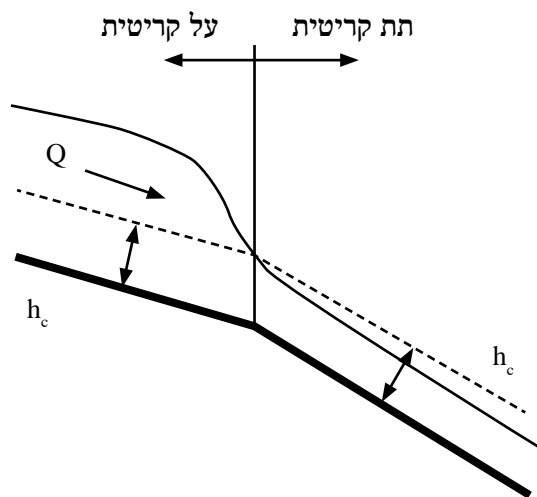
2.1 מיון סכרים

סכרים נבנים באפיקים כדי ליצור מאגרים, לרסן או להטות את הזרימה או למדוד את ספיקת המים העוברים דרכם. מרביתם נבנים לרוחב האפיק ומיעוטם לאורכו. מבחינה גיאומטרית אפשר למיין את סכרי הרוחב באופן הבא:

א. לפי צורת הפתח לזרימת המים: מלבן, טרפז,



תרשים 1: הקשר בין עומק הזרימה לבין האנרגיה הסגולית עבור ספיקה קבועה



תרשים 2: מעבר בין סוגי זרימה

(10)

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} (0.602 + 0.083 \frac{h_1}{H_s}) b (h_1 + 0.0012)^{3/2}$$

כאשר H_s גובה הסכר מעל קרקעית התעלה, h_1 ההפרש בין רום פני המים במרחק מתאים מן הסכר לבין רום קודקוד הסכר, b רוחב האפיק שהוא גם רוחב קודקוד הסכר. הנוסחה נכונה בתנאים

משולש, עיגול, פרבולה או אחר.

ב. לפי שיפוע הדופן לרוחב האפיק; אנכי, משופע עם או כנגד הזרם.

2.2 נוסחאות זרימה לסכרים נפוצים

• סכר מלבני ללא הצרות (full-width weir) לפי

Chadwick (1999):

א. נוסחת Rehbock:

הבאים:

$$30\text{mm} < h_1 < 750\text{mm}, b > 300\text{mm}, H_s > 100\text{mm}, h_1 < H_s$$

ב. נוסחת White:

$$Q + 0.561 \left(1 + 0.153 \frac{h_1}{H_2} b \sqrt{g} (h_1 + 0.001)^{3/2} \right) \quad (11)$$

הנוסחה נכונה בתנאים הבאים:

$$h_1 > 20\text{mm}, \quad H_s > 150\text{mm}, \\ h_1 < 2.2 H_s$$

ג. נוסחה לחישוב ספיקה אידיאלית, Q_{ideal} :

$$Q_{\text{ideal}} = \frac{2}{3} b \sqrt{2g} h_1^{3/2} \quad (12)$$

• סכר מלבני עם הצרות בכניסה אליו (contracted weir).
(weir).

נוסחת Hamilton-Smith:

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} b h_1^{3/2} \quad C_d = 0.616 \left(1 - \frac{h_1}{H_s} \right) \quad (13)$$

כאשר C_d מקדם ההתכווצות.

• סכר משולשי סימטרי:

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan(\alpha/2) h_1^{3/2} \quad (14)$$

כאשר α זווית הקודקוד של הסכר. בעולם נפוצים

סכרים בזווית $\alpha = 90^\circ$. בישראל נבנו סכרי מדידה

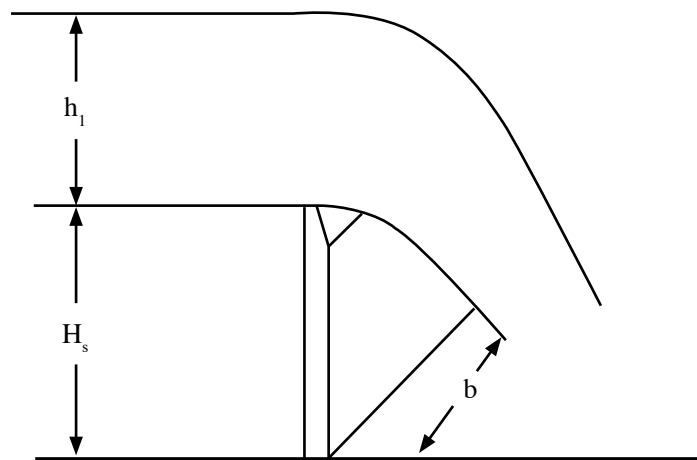
רבים ששיפועי צלעותיהם 1 (אנכי) ל-3 (אופקי).

מדידות אמפיריות אמתו את נוסחת הכיול שלהם.

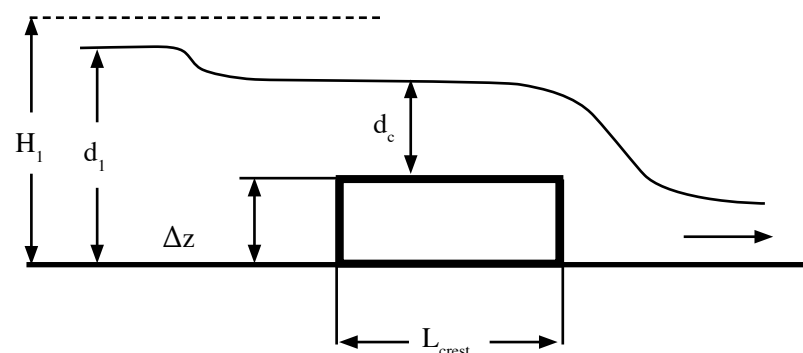
נוסחאות ומקדמים לכושר הולכה של סכרים

שונים פורסמו במקומות רבים, למשל, טבלאות:

5-4 עד 5-6, אצל Eisenbrey et al. (2005).



תרשים 3: מבנה ומשתנים של סכר מלבני



תרשים 4: חתך לאורך אפיק עם סף

מבנים הידרולים

2. המרווח בין המפתנים (מתבסס על נוסחה אמפירית):

$$L \leq \frac{70}{V} \quad (18)$$

כאשר L המרווח בין המפתנים (מ'), V מהירות הזרימה באפיק (מ' לשנייה).

3. המרווח בין המפתנים בקרקעות קוהסיביות:

$$L \leq \frac{0.35}{J - J_1} \quad (19)$$

כאשר J השיפוע האורכי של התעלה (מ' למ'), J_1 השיפוע האורכי היציב התיאורטי (מ' למ') מחושב באמצעות נוסחת מנינג: $J_1 = \left(\frac{V_1 \times n}{R_1^{2/3}}\right)^2$ בה V_1 מהירות המותרת באפיק (מ' לשנייה), R_1 הרדיוס ההידרולי בתנאי מהירות מותרת (מ'). ניתן לחשב את J_1 גם בהקשר למאמץ הגריפה המותר, τ_1 (ק"ג למ"ר), לפי הנוסחה:

$$J_1 = \frac{\tau_1}{1000R_1} \quad (20)$$

4. התקנה המפתן בתעלה

המפתן יותקן בתעלה לפי ההמלצות הבאות:

- גובה המפתן (H) יגיע עד לכתפי התעלה,

- עומק המפתן (d) בקרקע יהיה לפחות 0.7 מ'.

2.5 סכרי הטיה

סכרי הטיה נבנים לרוחב האפיק או לאורכו. במעלה סכר רוחבי נחפרת תעלת הטיה למאגר או לאפיק אחר. סכר אורכי נבנה לאורך דופן האפיק ובמקרים רבים מתרחק ממנה בהדרגה. בדרך כלל נפרצת הדופן הנגרית כדי לאפשר יציאת המים מהאפיק המקורי לאפיק אחר, טבעי או מלאכותי. רצוי שרוחב התעלה, B , לא ירד מהרשום להלן:

2.3 ספים

סף הוא הגבהה קצרה של קרקעית אפיק, שנועדה להשפיע על הזרימה או ליצור מצבים מתאימים למדידת הספיקה. לפי Chanson (2001), כדי שהזרימה מעל הסף תהיה קריטית, מידותיו צריכות להיות (תרשים 4):

$$\frac{L_{\text{crest}}}{H_1 - \Delta z} > 1.5 \div 3 \quad (15)$$

כאשר L_{crest} אורך הסף, H_1 עומד המים המתקרבים אל הסף, Δz גובה הסף.

ספיקת המים ליחידת רוחב על פני הסף, q :

$$q = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3} g (H_1 - \Delta z)^3} \quad (16)$$

ועומק הזרימה על פני הסף, שהוא העומק הקריטי, d_c :

$$d_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (17)$$

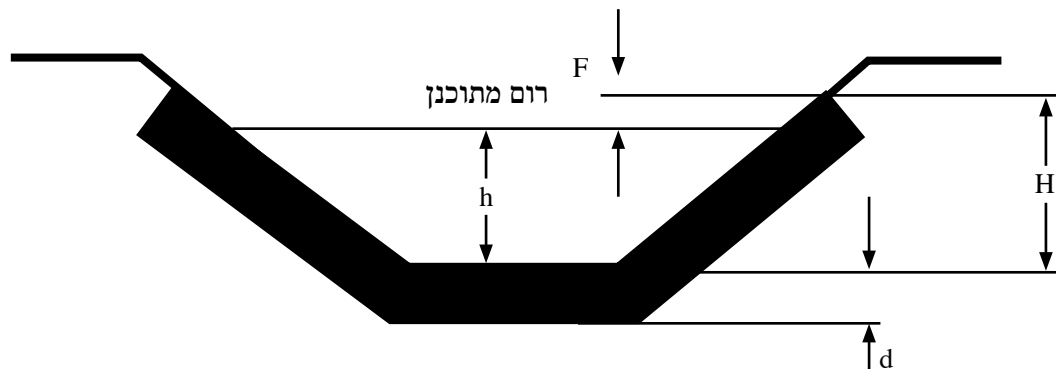
2.4 מפתנים (על פי מסמך מאת רמי גרתי, התחנה לחקר הסחף)

מפתנים הם סכרי בטון או אבן חפורים בתחתית התעלה ובדפנותיה, ואינם בולטים (או בולטים מעט) לתוך החתך שנועד לזרימת המים. הם משמשים אמצעי עזר לייצוב התעלה. להלן תנאים והמלצות לתכנונם:

1. טווח מהירויות ושיפוע אורכי:

- מהירות הזרימה באפיק 1.8 - 3.5 מ' לשנייה.

- שיפוע אורכי 0.8% - 4%.



תרשים 5: התקנת המפתן בחתך התעלה

מהירות הזרימה המרבית במורד מברץ (בתנאים אידיאליים, ללא הפסדי עומד), V_{\max} :

$$V_{\max} = 2 g(H_1 - d \cos \alpha) \quad (24)$$

כאשר d עומק המים במורד הסכר, α השיפוע האורכי של קרקעית האפיק.

3. מפלים

3.1 אפיונים הידרוליים של מפלים

מפל הוא מבנה מווסת, אשר נועד למתן את הגרדינט ההידרולי ביחס לשיפוע קרקעית האפיק לאורך מסלול הזרימה. מבנה סכמטי של מפל מוצג בתרשים 7. אפשר למיין את המפלים לשלוש הקבוצות הבאות:

- א. אנכיים - הזרימה במורדם נופלת חופשי לבריכת שיכון.
- ב. משופעים - הזרימה במורדם מחליקה על דופן המפל (ראו פרק מברצים).
- ג. צינוריים (לעתים בעלי חתך משתנה או מוטים הצדה) - הזרימה במורדם מתרחשת בתוך צינור. מפל כזה חסכוני ביותר עבור ספיקות קטנות מ- 50 ל/שנ'. הקשרים בין המשתנים השונים של המפל לבין

$$B = 4.75 Q^{1/2} \quad (21)$$

כאשר: Q ספיקה מקסימלית בתעלה (מ"ק לשנייה).

2.6 מברצים

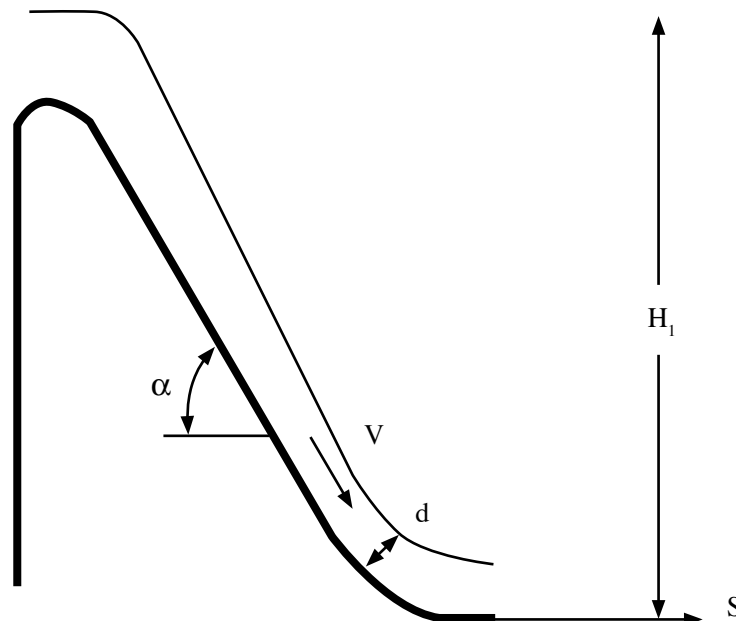
מברץ הוא פתח בראש סכר, שנועד לשחרר את עודפי המים המגיעים לשם. בדרך כלל צורתו מלבנית והזרימה יוצאת דרכו בהתאם לנוסחאות סכר מלבני. לאחר היציאה נופלים המים על פני הדופן המורדית של הסכר, שהיא אלכסונית. לאורך מסלול נפילתם, מואצים המים על ידי כוח הכבידה. המאפיינים הגיאומטריים של הזרימה מתוארים בתרשים 6.

נוסחאות לחישוב עובי שכבת המים לאורך דופן חלקה או בעלת מדרגות הן, בהתאמה, לפי Chanson (2001).

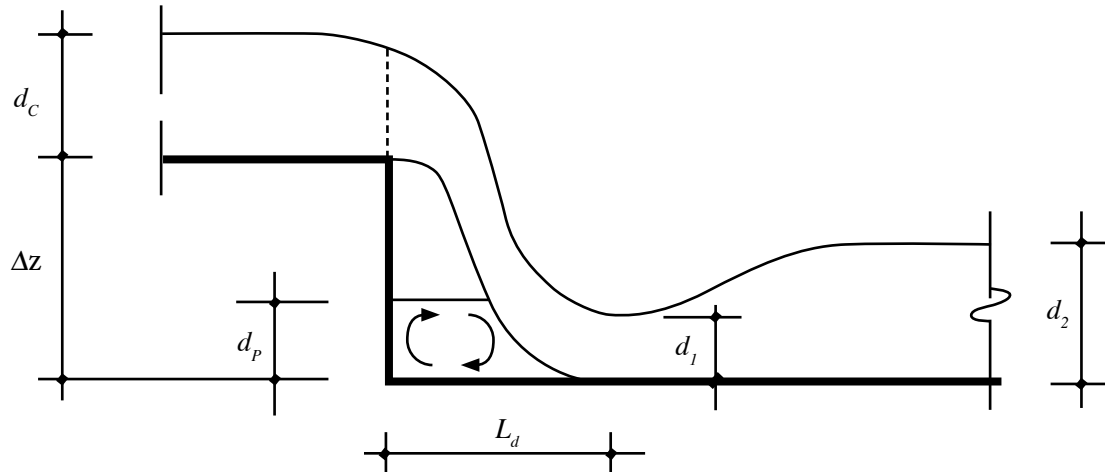
$$\frac{\delta}{S} = 0.0212 (\sin \alpha)^{0.11} \left(\frac{S}{k_s} \right)^{-0.10} \quad (22)$$

$$\frac{\delta}{S} = 0.06106 (\sin \alpha)^{0.133} \left(\frac{S}{h \cos \alpha} \right)^{-0.17} \quad (23)$$

כאשר δ עובי שכבת המים, S מרחק מקודקוד המברץ, k_s מקדם החספוס, α זווית שיפוע הדופן, h גובה כל מדרגה בדופן.



תרשים 6: זרימה לאורך מברץ



תרשים 7: מאפייני זרימה במפל

3.3 משברי אנרגיה במורד מפלים

משברי אנרגיה נועדו לבזבז את עודף האנרגיה הקינטית במורד מפלים, כדי להקטין את מהירות הזרימה במורד. לפי צורתם ואופן תפקודם ניתן למינם לקבוצות אלה:

1. בריכה סטנדרטית, אשר בתוכה נוצר זנק הידרולי שלאורכו מומרת הזרימה מעל-קריטית לתת-קריטית.

2. בריכה עמוקה יותר מקרקעית האפיק במורד, אשר סילון המים הנופל לתוכה יוצר ערבולים טורבולנטים מבזבזי אנרגיה.

3. מגלשה הגורמת להתזה כלפי מעלה של סילון המים ונפילתם אחר כך לבריכה עמוקה. ההתזה, החיכוך באוויר והטורבולנציה בבריכה, מבזבזים את האנרגיה המיותרת.

בזבוז האנרגיה בזנק הידרולי, ניתן לחישוב באמצעות הנוסחה:

$$\frac{\Delta H}{d} = \frac{(\sqrt{1+8Fr^2} - 3)^3}{16(\sqrt{1+8Fr^2} - 2)} \quad (30)$$

כאשר ΔH הפסד העומד, d עומק המים במורד המפל, Fr מספר פרוד של הזרימה במעלה הזנק.

4. גשרים

גשרים וגשרונים הם מבנים שנועדו לאפשר מעבר מים (או תחבורה, תקשורת וכדומה) מתחת לכבישים, מסילות ברזל ומתקנים קווים אחרים.

משתני הזרימה, מתוארים בנוסחאות Rand הבאות:

$$\frac{L_d}{\Delta z} = 4.3 \left[\frac{d_c}{\Delta z} \right]^{0.81} \quad (25)$$

$$\frac{d_p}{\Delta z} = \left[\frac{d_c}{\Delta z} \right]^{0.66} \quad (26)$$

$$\frac{d_1}{\Delta z} = 0.54 \left[\frac{d_c}{\Delta z} \right]^{1.275} \quad (27)$$

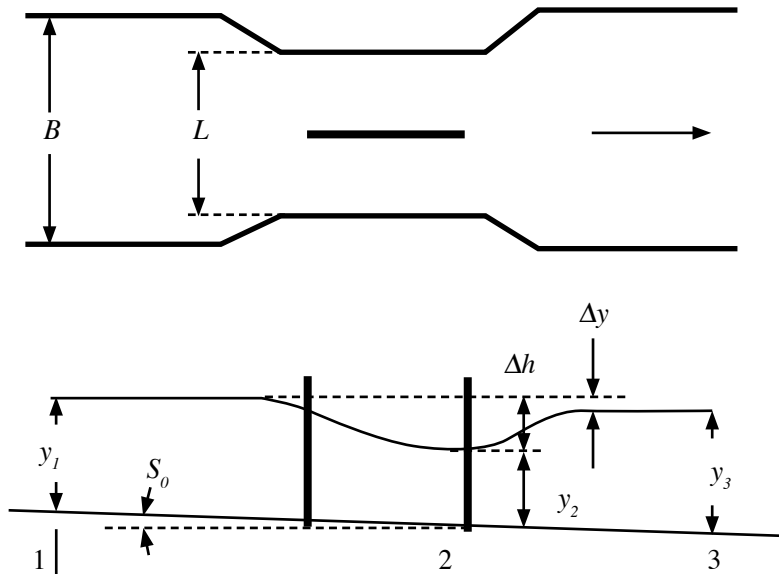
$$\frac{d_2}{\Delta z} = 1.66 \left[\frac{d_c}{\Delta z} \right]^{0.81} \quad (28)$$

כאשר L_d מרחק הנפילה של הסילון מתחתית המפל, Δz גובה המפל, d_c עומק המים במרחק מתאים במעלה המפל, d_p עומק המים בין דופן המפל לבין מקום נפילת הסילון, d_1 עומק המים המזערי במקום נפילת הסילון, d_2 עומק המים במרחק מתאים במורד המפל.

3.2 כוח על רצפת מפל

הכוח המופעל על רצפת מפל, ניתן לחישוב בקירוב מתוך אנלוגיה להתפצלות תעלה, כמתואר בתרשים 7 ולפי הנוסחה:

$$F = \rho Q(2g\Delta Z)^{1/2} \quad (29)$$



תרשים 8: מתווה זרימה בתוך גשר עם הצרות בכניסה והרחבה ביציאה, מבט-על וחיתך לאורך

כאשר Δy הפרש העומד בין הזרימה התקינה במעלה הגשר לבין במורדו, y_3 עומק הזרימה התקינה בחתך 3 שנמצא במרחק מתאים במורד הגשר, $A = \{C_D(b/B) + 2\} Fr_3^2 - 2$ מקדם, C_D מקדם ההצרות, b רוחב הזרימה, B רוחב הגשר, Fr_3 מספר פרוד של הזרימה בחתך 3.

איבודי האנרגיה הסגולית לאורך הגשר, ניתנים לחישוב לפי הנוסחה:

$$E_1 - E_2 = C_L V_1^2 / 2g \quad (33)$$

כאשר E_1, E_2 האנרגיה הסגולית בחתכים 1 ו-2, בהתאמה, C_L מקדם צורת הגשר שערכו בין 0.18 לבין 0.35.

לגשרים עם עמודי תמיכה, ניתן לחשב את הספיקה לפי נוסחת Nagler:

$$Q = K_N b (2g)^{0.5} (y_3 - \theta V_3^2 / 2g) (\Delta y + \beta V_1^2 / 2g)^{0.5} \quad (34)$$

כאשר K_N מקדם התכווצות, θ מקדם תיקון להפחתת עומק המים מ- y_3 ל- y_2 , β מקדם תיקון מהירות הגעה כתלות ביחס העברה σ . ערכי המקדמים פורסמו במקומות רבים, למשל, טבלה 10.4 אצל Novak et al. (2001).

עומק החתירה תחת הגשר, הוא נושא מסובך. אחת הנוסחאות לחישובו:

$$D_{MAX} = R_s (W/L)^{1.56} \quad (35)$$

כאשר D_{MAX} העומק המרבי של החתירה, R_s מקדם הצורה של בור החתירה, W עומק חתירה ממוצע,

תקרת גשר מגיעה עד למיסעה התחבורתית ואילו תקרת גשרון (שנקרא גם מעביר מים), מגיעה עד למרחק מסוים מתחת למיסעה וביניהן נמצאת סוללת עפר.

4.1 הזרימה דרך מפתח גשר

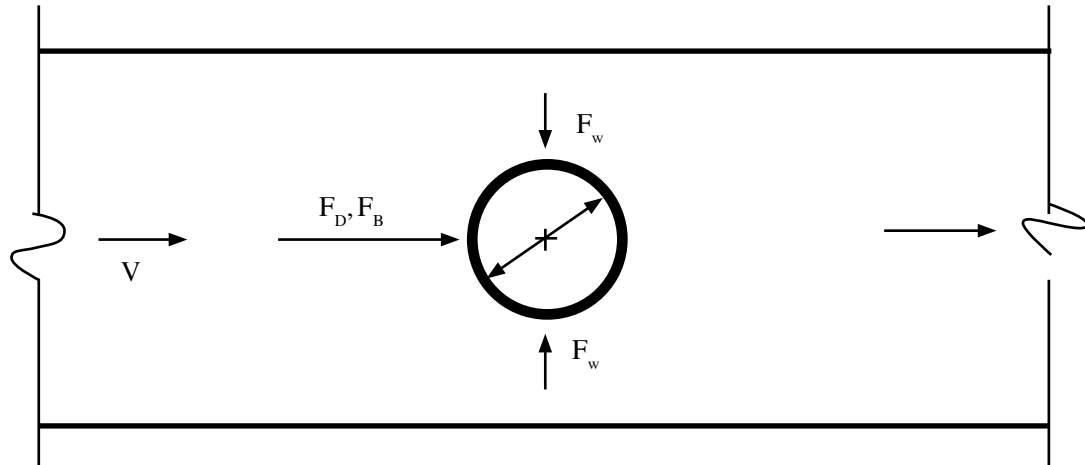
מתווה הזרימה בתוך מפתח גשר, מופיע בתרשים 8. בזרימה דרך שטח חתך צר יחסית (גשר צר ללא גישה לתעלה), עם מספר קטן של עמודי תמיכה, השינוי בגובה פני המים, Δh , בין חתך 1, שנמצא במרחק מתאים במעלה הגשר לבין חתך 2, שנמצא בקצה המורדי של הגשר, ניתן לחישוב באמצעות הנוסחה:

$$\Delta h = K_B V_2^2 / 2g + S_0 L / \sigma - V_1^2 / 2g \quad (31)$$

כאשר K_B מקדם ההתנגדות של הגשר, V_2 מהירות הזרימה בחתך 2, S_0 השיפוע האורכי של האפיק, L אורך הגשר, $\sigma = k_b / K_B$ היחס בין מקדם ההתכווצות לבין מקדם ההתנגדות של הגשר, V_1 מהירות הזרימה בחתך 1. ערכי המקדמים פורסמו במקומות רבים, למשל, טבלה 10.2 אצל Novak et al. (2001). במקרה שישנם לגשר עמודי תמיכה רבים ו/או סוללת גישה ארוכה, מופיעים תחתיו ובקרבנו ערבולים הגוזלים כמות משמעותית של אנרגיה.

את פחיתת העומד ניתן להעריך לפי:

$$\Delta y / y_3 = \{A + [A^2 + 12C_D(b/B)Fr_3^2]^{0.5}\} / 6 \quad (32)$$



תרשים 9: כוחות הידרודינמיים על ניצב

רבים, למשל, Figs. 14.16, 14.17, 14.18 אצל
(2001) Novak et al.

4.3 הצרויות באפיק והשפעתן על שינויים באפיוני הזרימה, כולל מתקני מדידה

הצרויות באפיק משנות את הפסדי האנרגיה
בזרימה ואת עומק הזרימה. נתייחס לתעלה
מלבנית המתוארת בתרשים 10.

תרשים 10 מציין כי במקרי זרימה תת-קריטית,
 $Fr < 1$, פני המים יורדים באזור ההצרות ואילו
במקרי זרימה על-קריטית, $Fr > 1$, פני המים עולים.
אם הרוחב b קטן במידה משמעותית מהרוחב B ,
נוצרת בחתך 2 זרימה קריטית. כדי שהיא תיווצר,
נחוץ שיהיה להצרות רוחב מינימלי, b_{min} , לפי,

$$b_{min} = \frac{Q}{\sqrt{\frac{8}{27} g E^3}} \quad (39)$$

Chanson (2001) שהוא:

כאשר E האנרגיה הסגולית במעלה ההצרות.
יש לציין שמשוואה (39) מתאימה לתעלה
מלבנית. כאשר $b = b_{min}$, מתקיימים בחתך 2 זרימה
קריטית ועומק קריטי. כאשר $b > b_{min}$, מתקיימת
בחתך 2 זרימה תת-קריטית ועומק הזרימה קטן.
כאשר $b < b_{min}$, מתקיימת בחתך 2 זרימה על-
קריטית ועומק הזרימה גדל. במקרה שהזרימה
בהצרות קריטית, הזרימה בחתך 3 על-קריטית.
אחריה יכול להיווצר זנק הידרולי (תלוי ברוחב
התעלה ובשיפועה).

שוויון ערכי האנרגיה הסגולית בשני החתכים,
מאפשר חישוב עומק המים בהצרות, h_2 , לפי

L אורך הגשר. לפי Lacey, מקדם הצורה הוא R_s ,
 $d = 0.394 Q^{1/3} / d^{1/6}$ קוטר גרגיר ממוצע של החומר
תחת הגשר.

4.2 כוחות על ניצבי גשר ועל גופים בולטים באפיק

א. כוח גרר פועל בכיוון הזרימה, כמתואר בתרשים
9, לפי (2001) Novak et al., ערכו ליחידת גובה:

$$F_D = 0.5 C_D \rho v^2 D \quad (36)$$

כאשר F_D כוח הגרר ליחידת גובה, C_D מקדם התלוי
בצורת החתך האופקי של הניצב, במספר ריינולדס,
מספר Keulegan Carpenter ובחספוס פני השטח,
 ρ צפיפות המים, v מהירות הזרימה, D רוחב הניצב
בניצב לכיוון הזרימה.

ב. כוח גלי מים בכיוון הזרימה, הפועל בתחום
גובה הגל H_B :

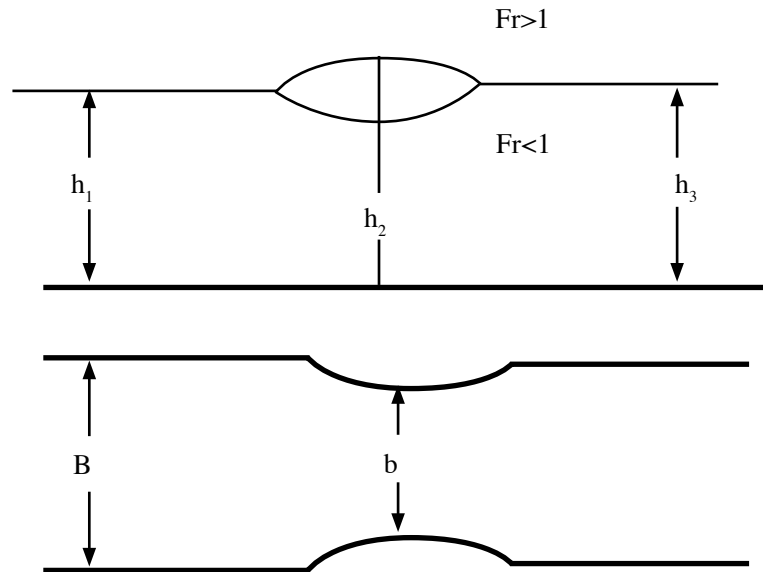
$$F_B = C_B \rho g D H_B^2 \quad (37)$$

כאשר C_B מקדם שערכו $3.0 \div 1.2$ ותלוי במספר
ריינולדס ובמספר Keulegan Carpenter, g תאוצת
הכבידה.

ג. כוח עקב ערבולים שמתפתח בניצב לכיוון
הזרימה. הכוח ליחידת גובה של ניצב מנסרתי:

$$F_w = \frac{1}{2} C_w A \rho U^2 \sin \omega t \quad (38)$$

כאשר C_w מקדם תלוי בצורת החתך האנכי של
הניצב, A שטח חתך הניצב מול המים הזורמים,
 U מהירות הזרימה, $\omega = \frac{St}{2\pi D}$ תדירות יציאת
ערבולים אחרי הניצב, St מספר סטרוהל, D
רוחב הניצב. ערכי המקדמים פורסמו במקומות



תרשים 10: השפעת הצרויות מקומית על עומק הזרימה: חתך אנכי ומבט-על

כדי למנוע חתירה. הגשר מאפשר זרימה חופשית של מים באפיק ומעבר כלי רכב לאורך הדרך. התחבורה מופרעת בעת שפני המים הזורמים מעל הגשר גבוהים יחסית. קיימים שני סוגי גשרים איריים:

א. גשר אירי מושלם (fords and bed-level causeways), בו פני הדרך נמצאים ברום תחתית האפיק. נבנה בדרך כלל באפיקים בעלי זרימת נגר גשמים בלבד, ובו מופרעת התחבורה כמעט בכל עת שמופיעים מים באפיק. בצדו מוצב בדרך כלל גם סרגל שמראה את עומק המים. בגלל תהליכי חתירה ושיקוע סחף בקרבת גשרים כאלה, לא תמיד מתאפשרת בהם תנועת רכב אחרי שיטפונות. ב. גשר אירי למחצה (vented causeways and submersible bridges), בו פני הדרך מוגבהים

הנוסחה:

$$E = h_1 + \frac{Q}{2gB_1^2 h_1^2} = h_2 + \frac{Q}{2gb_2^2 h_2^2} \quad (40)$$

קיומה של זרימה קריטית בהצרות, יוצר קשר חד-ערכי בין הספיקה לבין עומק פני המים. קשר זה מנוצל להקמת מתקני מדידה לספיקת המים, שנוסחתם הכללית היא:

$$Q = Kh^n \quad (41)$$

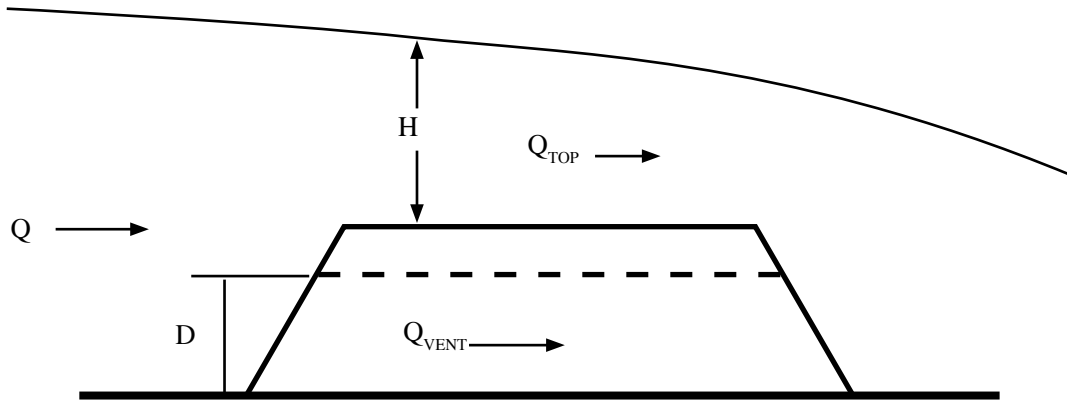
בנוסחה זו, המקדמים K ו-n תלויים בצורת מתקן המדידה. ערכים אופייניים שלהם מפורטים בטבלה 2. כושר ההולכה של הצרויות פורסמו למשל, בטבלאות: 5-2, 5-3 אצל Eisenbrey et al. (2005).

4.4 גשרים איריים

גשר אירי הוא הנמכה של פני דרך החוצה אפיק עד לרום קרקעית האפיק וחיווקה בחומר קשיח,

טבלה 2: ערכי מקדמים לנוסחה (41)

מערך n	מקדם K	סוג המתקן
$n = 3/2$	$C_d = 0.58 \div 0.62, K = \frac{2}{3} C_d (2g)^{1/2} b$ - מקדם ספיקה, b - רוחב המים בסכר	סכר מלבני
$n = 5/2$	α - זווית הסכר, $K = \frac{8}{15} C_b (2g)^{1/2} \tan \alpha / 2$	סכר משולש
$n = 3/2$	$C_d = 0.85 \div 0.99, K = 0.544 C_d g^{1/2} b$	מפתן
$n = 3/2$	$C_d = 0.95 \div 0.99, K = 0.544 C_d g^{1/2} b$	וונטורי



תרשים 11: חתך לרוחב גשר אירי למחצה

ההתנגדות למנינג.

עבור תעלות רחבות מאוד, $B/H \geq 10$, ניתן להשתמש בנוסחה:

$$H = \left[\frac{nQ}{4.94BI^{1/2}} \right]^{3/5} \quad (43)$$

כדי שעומק המים מעל הגשר לא יהיה גדול מ-150 מ"מ, יש להשתמש בנוסחה:

$$Q_{TOP} = 9.527L^{0.823} \quad (44)$$

כאשר Q_{TOP} ספיקת המים הזורמים מעל הגשר (מ"ק לשנייה), L אורך הגשר (מ').

הספיקה בתוך מעבירי המים של הגשר האירי למחצה, Q_{VENT} , היא:

$$Q_{VENT} = Q - Q_{TOP} \quad (45)$$

כאשר Q הספיקה הכללית דרך הגשר.

5. מעבירי מים (גשרונים)

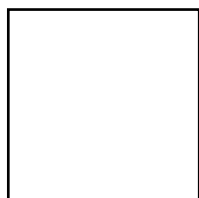
מעביר מים הוא תעלה מקורה, דרכה זורמים מים מצד אחד של דרך לצדה האחר. לפי כיוונם ניתן למינם לשתי קבוצות:

מעט מעל תחתית האפיק ובתוך ההגבהה מוצבים מעבירי מים (בדרך כלל בנויים מצינורות), שיכולים להוליך זרימה בספיקות נמוכות. התנועה על פני הדרך מופרעת רק בעת ההופעה של זרימות גבוהות (שיטפונות). גשרים אלה בנויים באופן שעומק המים מעל פני הגשר, H, לא יהיה גדול מ-150 מ"מ. בישראל, עומק המים מגיע במקרים רבים ל-0.5 מ' ויותר.

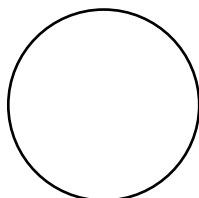
המיקום המתאים לגשרים אלה צריך להיות בעל גישה נוחה לרכב, ובו הזרימה שקטה, עומק המים מינימלי ומהירות זרימתם מינימלית. שיפוע הכביש היורד אל הגשר או למעבר, חייב להיות לא תלול מ-10%. כדי שעומק המים מעל גשרים איריים מושלמים לא יהיה גדול מ-150 מ"מ, ניתן להשתמש בנוסחה:

$$Q = \frac{4.94(B \cdot H)^{5/3}}{n \cdot (B + 2H)^{2/3}} I^{1/2} \quad (42)$$

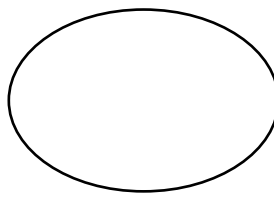
כאשר Q ספיקת המים מעל הגשר, B רוחב האפיק, H עומק המים, I שיפוע אורכי של האפיק, n מקדם



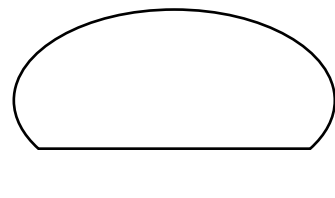
א



ב

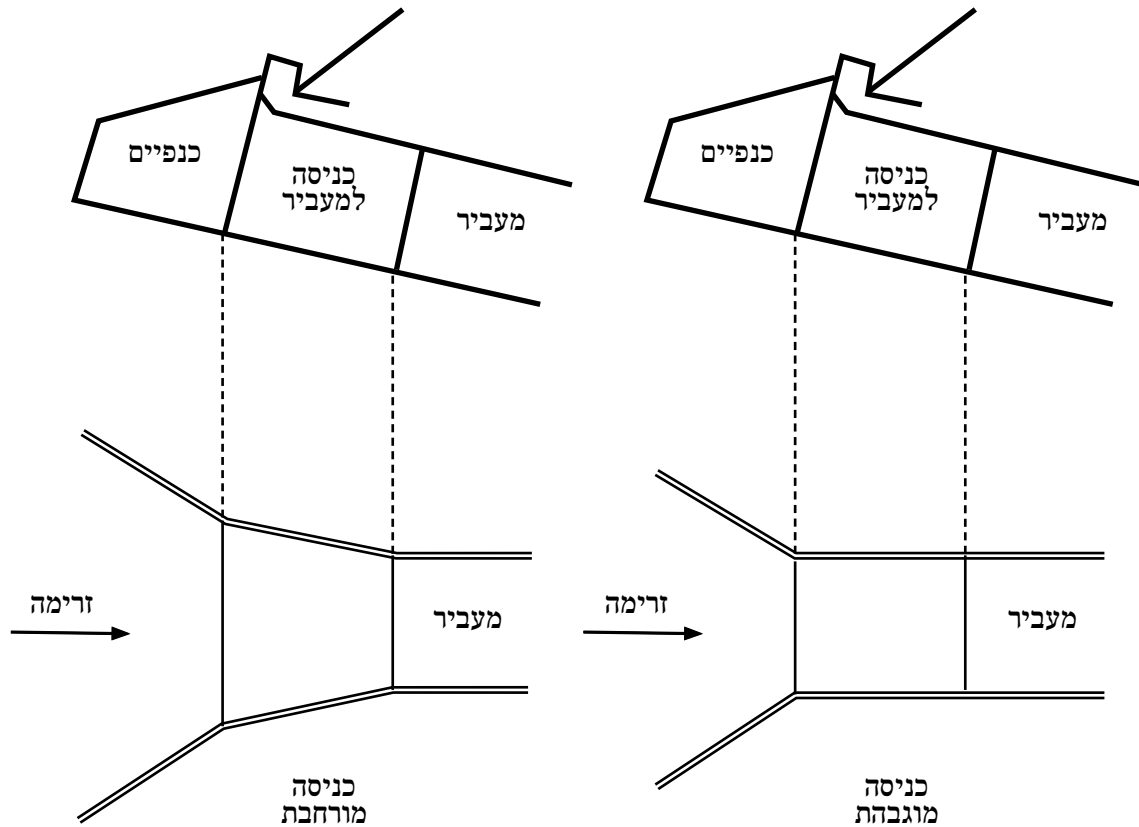


ג

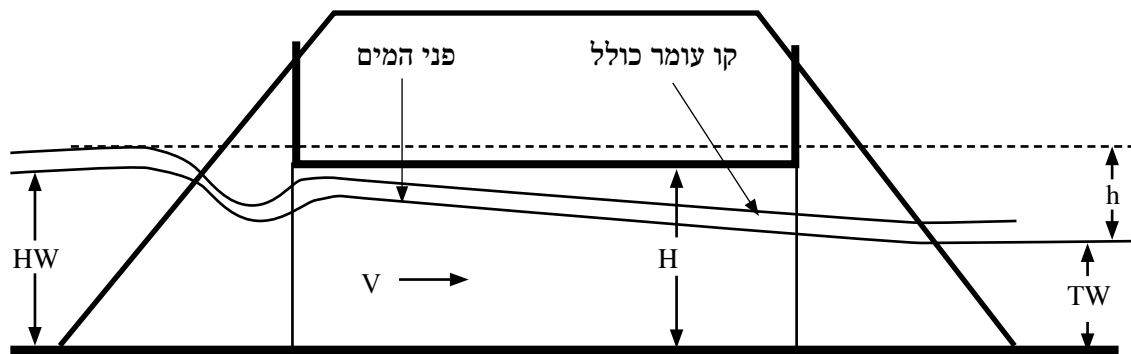


ד

תרשים 12: צורות שכיחות של מעבירי מים



תרשים 13: חתך לאורך ומבט-על של צורות כניסה למעביר מים



תרשים 14: מהלך הזרימה לאורך מעביר מים

רבים מהם תוך שימוש בניסויי מעבדה. גם לאורך מעביר המים יש השפעה על הזרימה בתוכו, ולכן מבחינים בין מעבירי מים קצרים לבין ארוכים.

5.1 צורות מעבירי מים והכניסות אליהן
הצורות השכיחות של מעבירי המים הן: עגולות, מלבניות, אליפטיות וקשתיות. הן מתוארות

א. לרוחב, Stream Crossing
ב. לאורך, Runoff Management
זו תעלה להולכת נגר גשמים, במקביל לכביש או תחתיו. למעבירי מים צורות רבות ושונות, הם בנויים מחומרים שונים ולהם מתקני כניסה ויציאה מגוונים. לכל אחד מהמשתנים האלה השפעה על אופי הזרימה בתוך מעביר המים. מסיבה זו תוכננו

מבנים הידרולים

מחוץ למעביר מים, נהוג לתאר כתקינה (קצובה ותמידית) ואילו בתוך מעביר המים, היא אינה קצובה. מקובל לקבוע שני תנאי טבילות ושלושה תנאי טיבוע. צירופיהם יוצרים שישה סוגי זרימה. הכניסה נחשבת טבולה במקרה ש- $HW > 1.2H$ וחופשית במקרה ש- $HW < 1.2H$. כאשר HW (Head Water) ההפרש בין רום פני המים במעלה המעביר לבין רום קרקעית המעביר בכניסה אליו, H גובה מעביר המים. נסמן ב- TW (Tail Water) את ההפרש בין רום פני המים במורד המעביר לבין רום קרקעית המעביר ביציאה ממנו וב- h את הפסד העומד בין סוף הזרימה התקינה במעלה המעביר לבין ראשיתה במורד המעביר. קו העומד הכולל לאורך המעביר הוא:

$$HW + \frac{V^2}{2g} = TW + h \quad (46)$$

כאשר V מהירות הזרימה התקינה במעלה מעביר המים.

להפסד העומד לאורך מעביר המים שלושה רכיבים: הפסד כניסה, h_e , הפסד אורכי, h_f , והפסד ביציאה, h_o .

$$h = h_e + h_f + h_o \quad (47)$$

$$h_e = k_e \frac{V^2}{2g} \quad (48)$$

$$h_f = \frac{n^2 V^2 L}{R^{4/3}} \quad (49)$$

בתרשים 12. על פי רוב, ייצורם חרושתי (שלא כגשרים שבדרך כלל נבנים במקום). בחירת הצורה נעשית, בדרך כלל, משיקולים הנדסיים: מחיר רכישה ובנייה, גובה סוללת הכביש, אפשרות התחזוקה והדרישות ההידרוליות.

כושר הולכת המים של המעביר, תלוי במידה רבה גם בצורת הכניסה אליו. ישנן צורות יעילות יותר וצורות יעילות פחות. רצוי לבחור את אלה הגורמות להפסדי עומד מזעריים. כדי למוצאן ולהתאימן לתנאי אזור העבודה, רצוי לערוך ניסוי מעבדה. לדעתנו, הצורות הגורמות להפסדי עומד מזעריים צריכות להיות רחבות וגבוהות יותר מממדי מעביר המים, מתכנסות אליו בהדרגה ונוסף לזה נדרשות פאזות על הפינות (תרשים 13).

5.2 הידרוליקה של מעבירי מים

מהלך קו העומד של הזרימה בתוך מעביר מים, מתואר בתרשים 14. הספיקה והעומד בכניסה, תלויים בגורמים רבים. בגלל המגוון הגדול של משטרי הזרימה בתוך מעבירי מים, קשה לתארם באמצעות נוסחה כללית אחת. אחד הגורמים החשובים שבהם, הוא מקום הבקרה ההידרולית. נהוגים שני מקומות: בכניסה למעביר המים או ביציאה ממנו. בכניסה, משפיעה מידת הטבילות; וביציאה, משפיעה מידת הטיבוע. משמעות שתיהן היא היחס בין גובה פני המים בקצה מעביר המים לבין גובהם במרחק מתאים מחוצה לו. את הזרימה

טבלה 3: טבלת סיווג הזרימה במעבירי מים

תרשים	סוג	מצב הבקרות	מצב
15	1	$HW > H$ $TW > H$	עומקי המים בכניסה וביציאה גדולים מעומק המעביר.
16	2	$HW > H$ $TW = H$	עומק המים בכניסה גדול מעומק המעביר ועומק המים ביציאה שווה לעומק המעביר.
17	3	$HW > H$ $TW < H$	עומק המים בכניסה גדול מעומק המעביר והעומק ביציאה קטן מעומק המעביר.
18	4	$HW < H$ $TW < H$	עומקי המים בכניסה וביציאה קטנים מעומק המעביר.
19	5	$HW = H$ $TW < H$	עומק המים בכניסה שווה לעומק המעביר והעומק ביציאה קטן מעומק המעביר.
20	6	$HW < H$ $TW < H$	עומקי המים בכניסה וביציאה קטנים מעומק מעביר המים אולם במורד מתפתחת זרימה קריטית (או על-קריטית).

לסוגים 6,5,4 של מעבירי מים, בעלי כניסה בלתי טבולה, ניתן להציג את נוסחת האנרגיה בצורה הבאה:

$$h + \frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} = h_e + h_f \quad (53)$$

ואת הספיקה:

$$Q = A \sqrt{2g(h + \frac{V_1^2}{2g} - h_e - h_f)} \quad (54)$$

5.4 חישוב הידרולי של מעבירי מים

נומוגרמות וטבלאות לחישוב ההידרולי של מעבירי מים ואופייניהם נמצאות, למשל, אצל Chanson (2001): Figs. 19.5, 19.6 וטבלאות 19.3, 19.4. הנומוגרמות מוצגות במאמר זה לאחר התרשימים.

מראי מקומות

- בן-צבי, א'; גריניס, ל' (2008). הידרוליקה. בתוך: נחלים וניקוז - תהליכים, הנדסה ותכן (ע' א' בן-צבי). רשות הניקוז שקמה-בשור והמכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון, עומר: 25-45.
- Aisenbrey, A. J.; Hayes, R. B.; Warren, H. J.; Winsett, D. L.; Young, R. B. (1995). **Design of Small Canal Structures**. Water Resources Publications, LLC. Littleton, CO, USA.
- Chadwick, A.; Morfett, J. (1999). **Hydraulics in Civil and Environmental Engineering**. SPON, London and New York.
- Chanson, H. (2001). **The Hydraulics of Open Channel Flow**. Butterworth-Heinemann, Oxford UK.
- Novak, P.; Moffat, A.I.B.; Nalluri, C.; Narayanan, R. (2001). **Hydraulic Structures**. SPON, London and New York.

$$h_o = k_o \frac{V^2}{2g} \quad (50)$$

כאשר k_e, k_o מקדמים, V מהירות הזרימה הממוצעת בכל אחד מהאתרים, בהתאמה, n מקדם ההתנגדות למנינג, L אורך מעביר המים, R הרדיוס ההידרולי הממוצע.

5.3 השפעת הבקורות בכניסה וביציאה

תנאי הזרימה במעביר מים, תלויים בעומק המים התקין לפני הכניסה למעביר. ככל שהוא גדול יותר, גדולה גם הספיקה דרך המעביר. כאמור לעיל, הבקורות משפיעות על אופי הזרימה בתוך המעביר. ששת צירופיהן ודרך השפעותיהן מתוארים בתרשימים 15 - 20. כללית, קיימים שני סוגי זרימה בתוך המעביר - עם לחץ וללא לחץ. הם נקבעים, כמובן, על ידי הבקורות. מצבי הבקורות, הרשומים בטבלה 3, קובעים את סוגי הזרימה.

בשלושת הסוגים הראשונים מתקיימת במעביר או בחלק ממנו, זרימה בלחץ ואילו בסוגים האחרונים, הזרימה חופשית. נוסחת הזרימה לסוגים 1,2 (תרשימים 15, 16) היא:

$$Q = A \sqrt{\frac{2gh}{\frac{2gV^2L}{R^{4/3}} + k_e + k_o}} \quad (51)$$

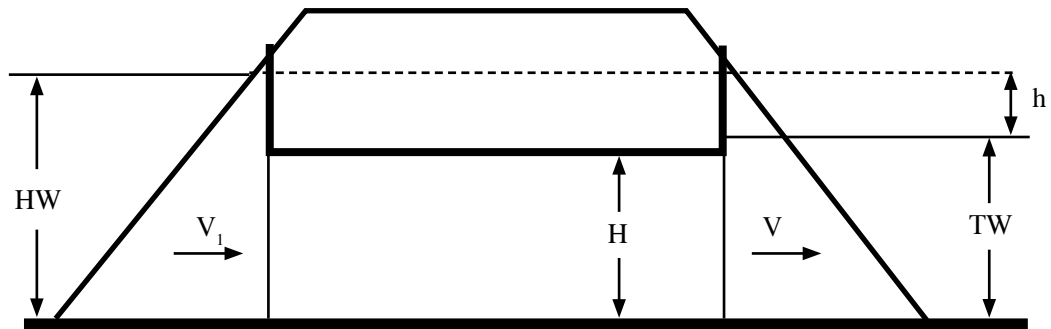
כאשר V, R הם המהירות והרדיוס ההידרולי במוצא מעביר המים.

לזרימה מסוג 3 (תרשים 17) מתאימה נוסחת הקליחה:

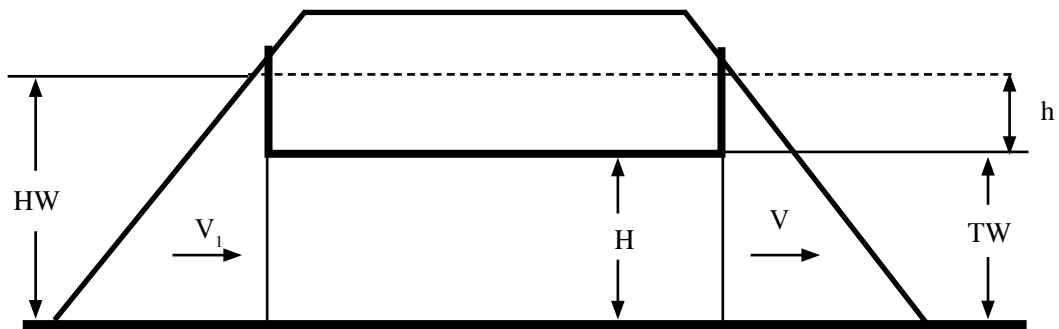
$$Q = C_d A \sqrt{2gh_1} \quad (52)$$

כאשר C_d מקדם הכניסה למעביר המים, תלוי בגיאומטריה של הכניסה, h_1 ההפרש בין פני המים בכניסה לבין מרכז המעביר.

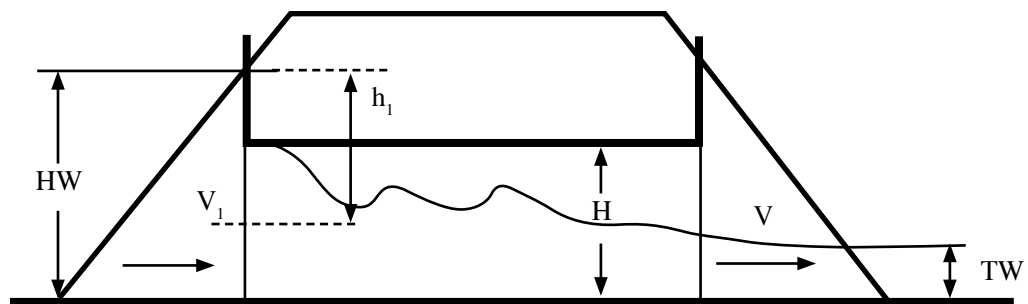
מצבים עם לחץ במעביר מיון מצבים לפי Chanson (2001)



תרשים 15: (סוג זרימה 1)

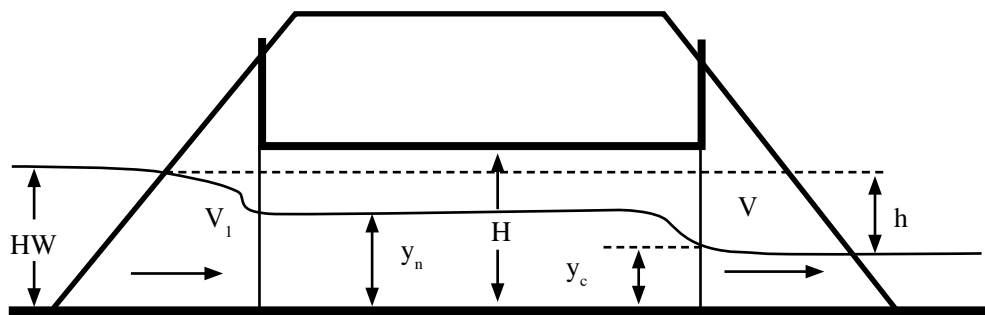


תרשים 16: (סוג זרימה 2)

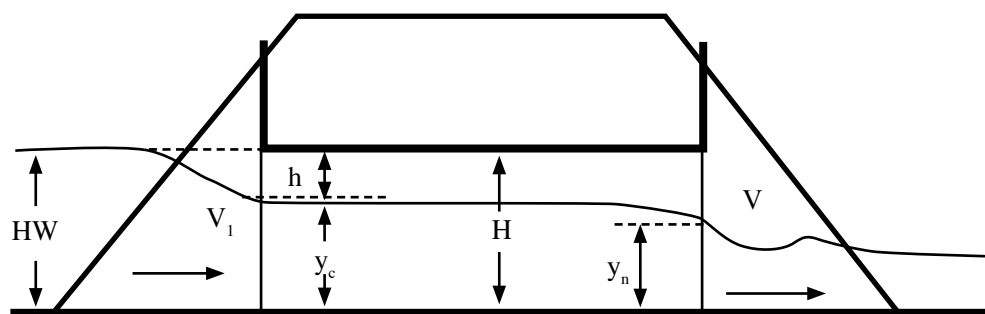


תרשים 17: (סוג זרימה 3)

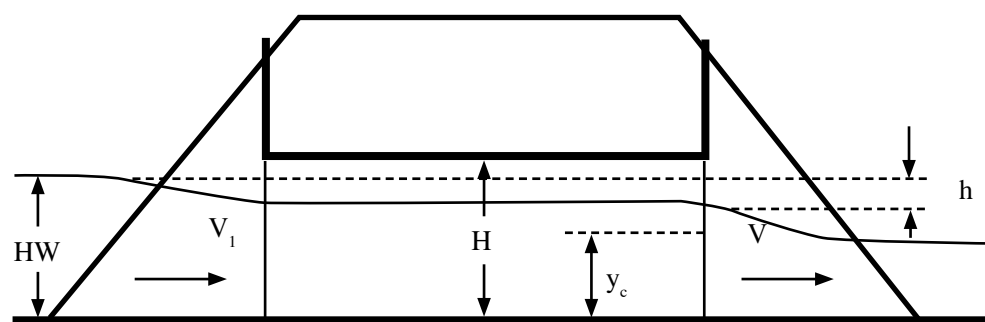
מצבים ללא לחץ במעביר



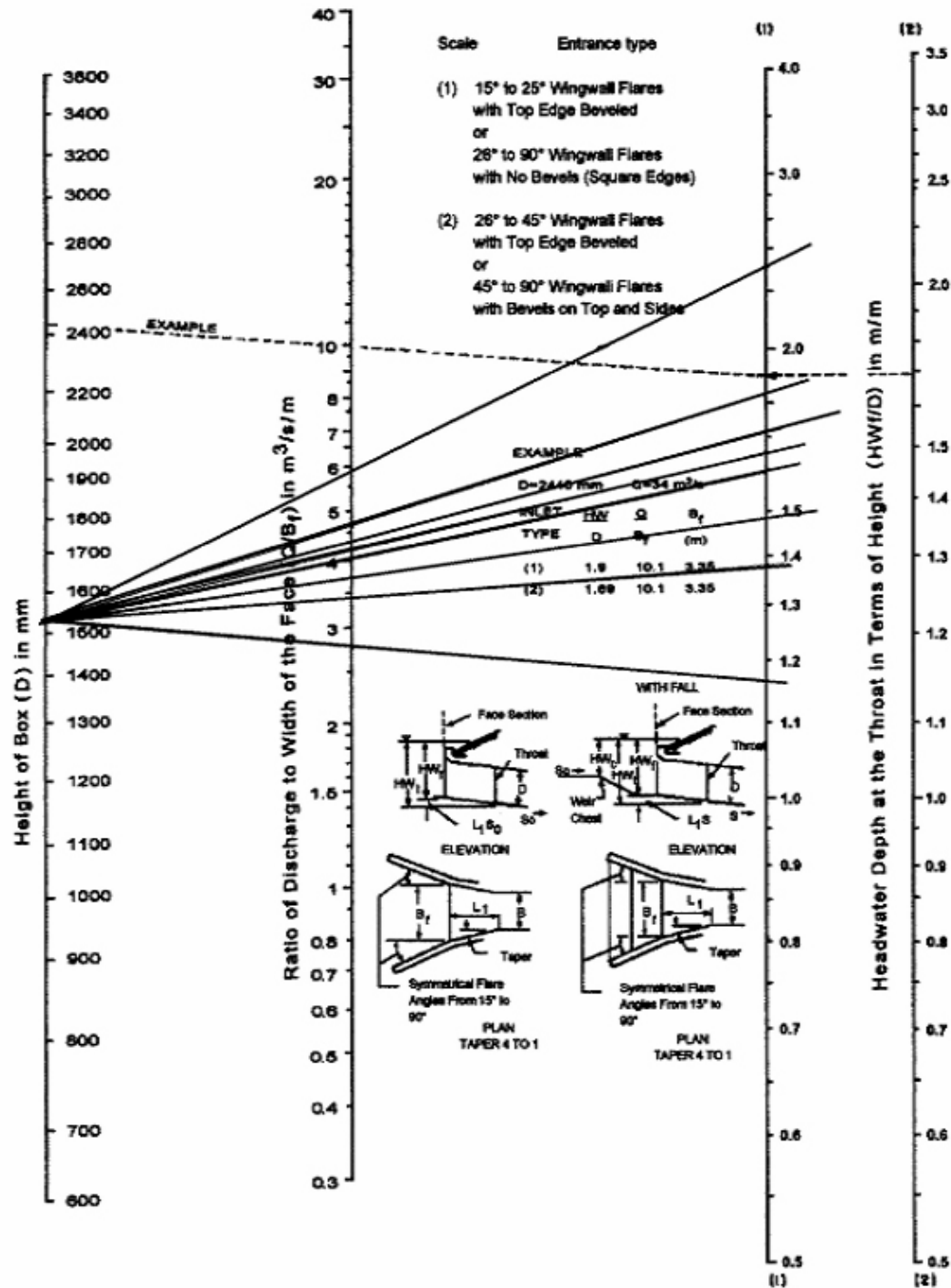
תרשים 18: (סוג זרימה 4)



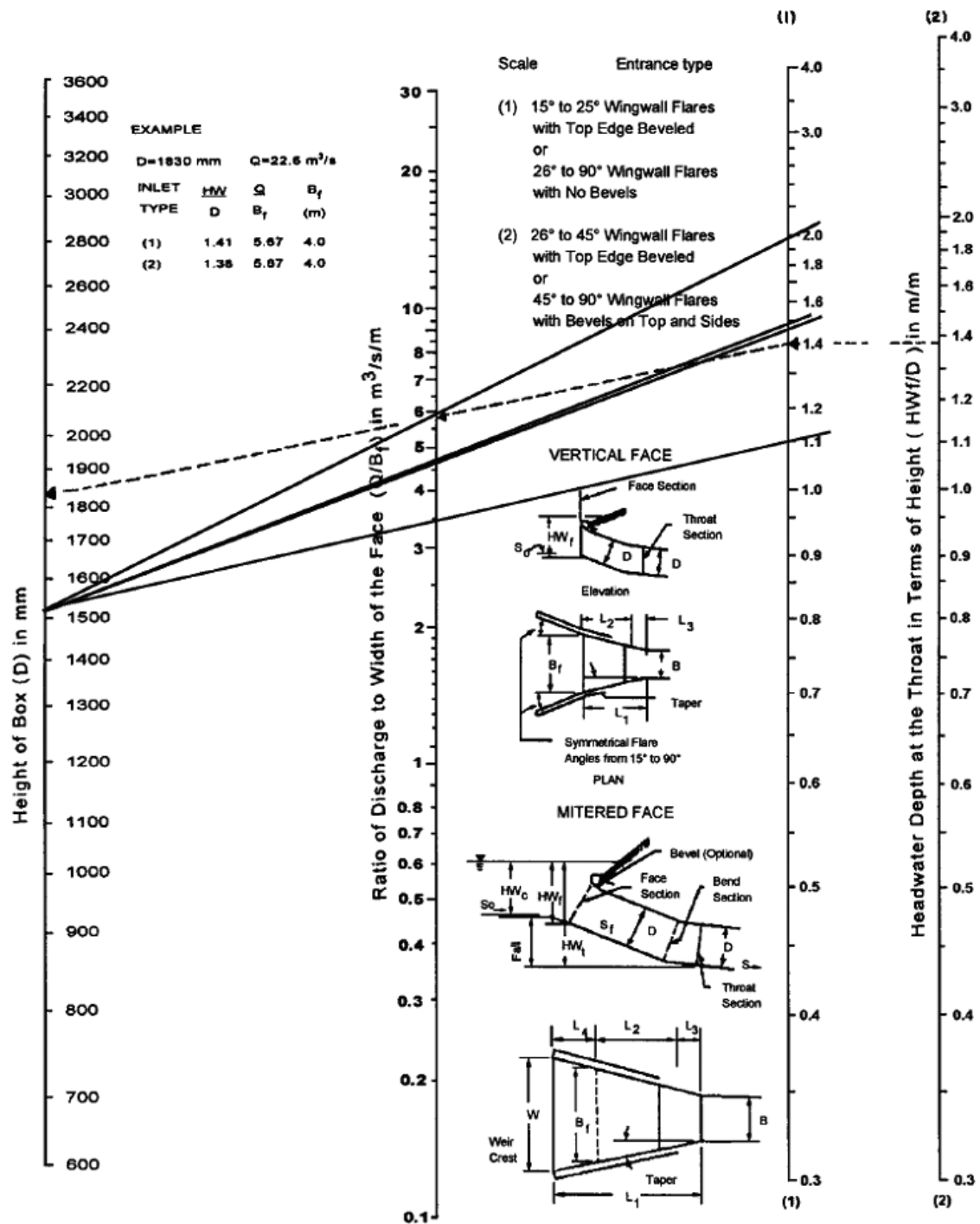
תרשים 19: (סוג זרימה 5)



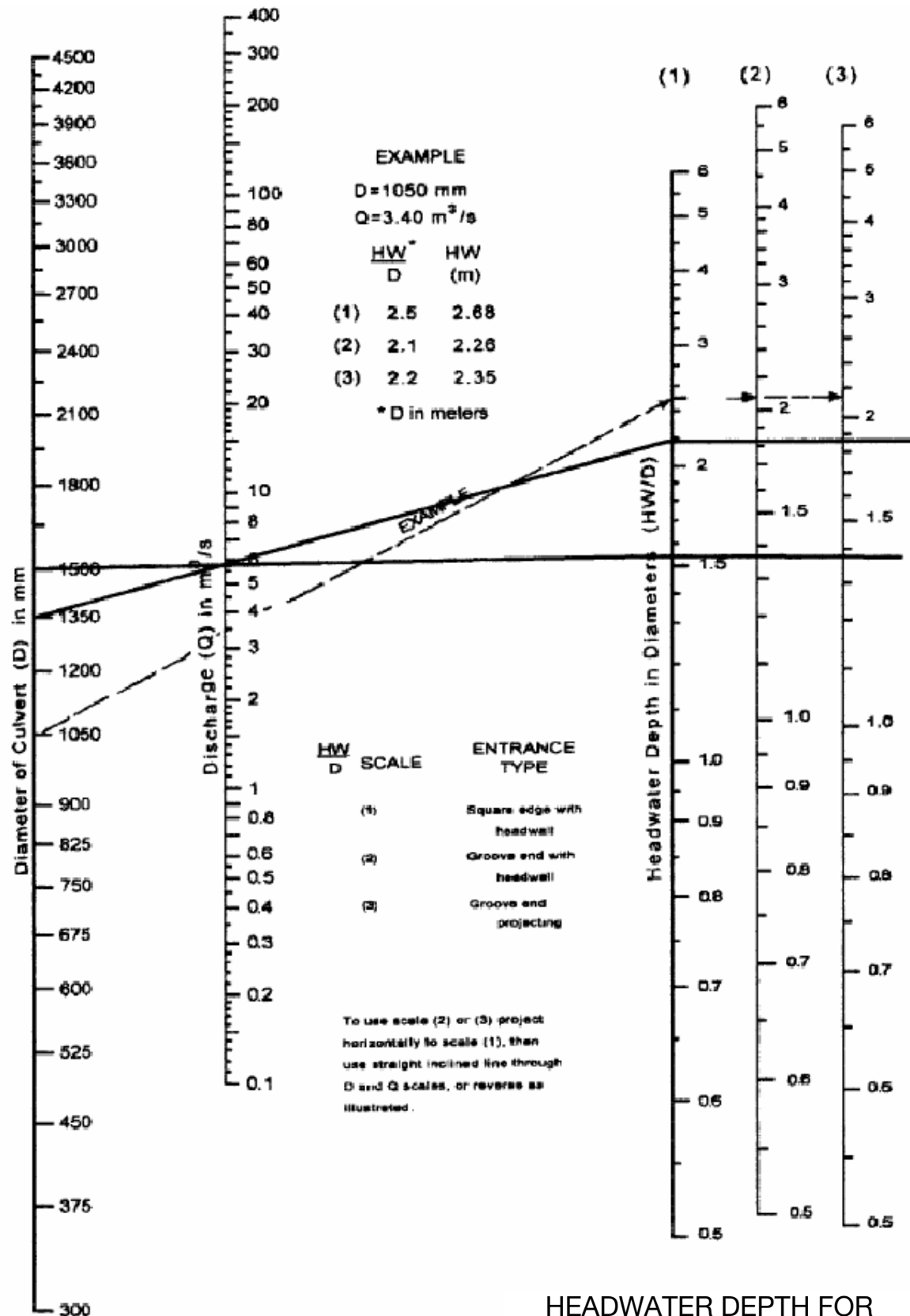
תרשים 20: (סוג זרימה 6)



FACE CONTROL FOR BOX CULVERTS
WITH SIDE-TAPERED INLETS



FACE CONTROL FOR BOX CULVERTS WITH SLOPE TAPERED INLETS



Adapted from
Bureau of Public Roads Jan. 1963

HEADWATER DEPTH FOR CONCRETE PIPE CULVERTS WITH INLET CONTROL

תכנון אפיקי נחלים ותעלות ניקוז

דן רוזנצביג

ד"ר, מהנדס יועץ, לשעבר מנהל האגף הבכיר לשימור קרקע וניקוז.

1. מבוא

האפיק, בין אם הוא טבעי או מלאכותי, מהווה חלק בלתי נפרד מסביבתו, משפיע עליה ומושפע ממנה. תפקידו להוליך באופן חופשי את מי הנגר העל קרקעי, שפיעת מעיינות ומים אחרים המגיעים או מוזרמים אליו. תכנונו מבוסס על התפיסה האגנית, מושפע מהתנאים הגיאומורפולוגיים, הקרקעיים, המטאורולוגיים וההידרולוגיים. התכנון מתייחס לעקרונות הידרוליים ולמשוואות הזרימה, למהירויות וכוחות גריפה ולאופי הקרקעית והדפנות. מאמר זה נוגע בקצה המזלג בכל אחד מהנושאים האלו, תוך הדגשת תרומתו המיוחדת של כל מרכיב לתכנון השלם והיעיל ביותר של האפיק. המאמר איננו עוסק בנושא התחזוקה, שהוא קריטי לתפקודו של האפיק, שימורו והארכת הקיים שלו. שיטות התחזוקה ויכולת התחזוקה, מהווים את אחד הבסיסים ההכרחיים לכל תכנון. לנושא התחזוקה מוקדש מאמר נפרד בספר זה (שטרית, 2008).

2. הגדרות

אפיק - שקע טופוגרפי רציף וטבעי אליו מתרכזים ובתוכו זורמים מי נגר גשמיים, שפיעת מעיינות ומים אחרים.
תעלה - אפיק מלאכותי.
עורק ניקוז - אפיק או תעלה.
קו אפיק - רצף הנקודות הנמוכות ביותר לאורך האפיק.
אגן היקוות - (מכונה גם תחום התנקזות) השטח ממנו מגיעים לאפיק בזרימה חופשית מי נגר גשמיים ומים אחרים.
קו פרשת המים - קו רצוף וסגור שגובל את אגן ההיקוות. הוא מבדיל בין מסלולי זרימה חופשית לכיוון האפיק לבין מסלולים בכיוונים אחרים. התווייתו על גבי מפה יוצאת מנקודת הריכוז וממשיכה בניצב לקווי הרום.

קו רום - קו רצוף שעובר דרך נקודות בעלות רום זהה בשטח.
נקודת ריכוז - הקצה המורדי של אפיק, שביחס אליו נקבע אגן ההיקוות של האפיק.
משך הריכוז - משך הזרימה החופשית הארוך ביותר בתוך תחום ההתנקזות (T).
אורך האפיק - המרחק לאורך האפיק הראשי והמשכו הטופוגרפי, החל מנקודת הריכוז ועד קו פרשת המים (L).
השיפוע הממוצע של האפיק - השיפוע הממוצע של קו האפיק לכל אורכו (1).
פשט הצפה - התחום אליו מגיעים מי הנגר, כאשר הם גואים מעבר לגדות האפיק.
רום פני המים - הרום הטופוגרפי האבסולוטי של פני המים (L).
חתך מורטב - חתך לרוחב האפיק, בניצב לכיוון הזרימה. תחום על ידי קרקעית האפיק, דפנותיו ופני המים הזורמים (L^2).
עומק המים - המרחק בין פני המים לנקודה הנמוכה ביותר בחתך המורטב (L).
הקף מורטב - קו המגע של המים בקרקעית האפיק ובדפנותיו בחתך המורטב (L).
מהירות זרימה - המהירות הממוצעת בחתך המורטב, בה זורמים המים לאורך האפיק (LT^{-1}).
מהירות מותרת - קביעה הנדסית של מהירות הזרימה המרבית, בה חתך הזרימה אמור להיוותר יציב וללא שינוי (LT^{-1}).
ספיקה - נפח המים הזורמים בחתך לרוחב האפיק ביחידת זמן (L^3T^{-1}).
ספיקת תכן - הספיקה שנקבעה לצורך תכנון האפיק (L^3T^{-1}).
מקדם החיכוך - מספר המבטא את התנגדות האפיק לזרימה ($TL^{-1/3}$).
מאמץ גזירה - הכוח המופעל ידי המים הזורמים על יחידת שטח, שאורכה יחידת אורך בכיוון הזרימה ורוחבה יחידת אורך של

ההיקף המורטב ($ML^{-1}T^{-2}$).

כוח גריפה - מאמץ הגזירה הממוצע על פני ההיקף המורטב ($ML^{-1}T^{-2}$).

הסתברות השגה - ההסתברות להופעה של אירוע גדול לפחות כמו האירוע הנדון (1).

תקופת חזרה - מרווח הזמן הממוצע בין הופעות אירועים, שגודלם לפחות כמו הגודל הנדון (T).

הסתברות שנתית - ההסתברות שספיקת השיא של הגאוויות בשנה כלשהי תהיה גבוהה לפחות כמו הערך הנדון (%). מחושבת כערך ההפוך של תקופת החזרה (כפול 100), תוך שגיאת יחידות והתעלמות מהופעת גאוויות גבוהות, ששיאיהן לא היו הגבוהים ביותר בשנות הופעתן.

עומד - כמות האנרגיה ליחידת משקל של מים (L). מורכב מרום הקרקעית, עומק המים והעומד המהירות (מחצית המנה של ריבוע מהירות הזרימה בתאוצת הכבידה).

עומד סגולי - סכום עומק המים והעומד המהירות (L).

קו העומד - קו רצוף בחתך לאורך אפיק, המתאר את עומד המים שם.

גרדינט הידרולי - שיפוע קו העומד (1). הזרימה מתקיימת בכיוון פחיתת העומד.

הסדרה - מכלול פעולות על האפיק, המיועדות לשפר את תפקודו כעורק ניקוז.

3. הגישה האגנית

3.1 חשיבות אגן ההיקוות

תכנון אפיק צריך להתבסס על האופי הגיאומורפולוגי, הקרקעי, האקלימי וההידרולוגי של אגן ההיקוות. הוא צריך להתחשב בשימושי הקרקע ולהתייחס להיבטים הסביבתיים. אגן ההיקוות מוגדר בהקשר לנקודת הריכוז שנמצאת בקצה המורדי של האפיק. כדי לחסוך בהוצאות ביצוע ותחזוקה, אפשר לבחור נקודות ריכוז משניות הנמצאות במעלה האפיק וביובליו ולהגדיר עבורן אגני משנה לתכנון קטעים עליונים של האפיק ויובליו.

בישראל מקובל לסווג את אגני ההיקוות למקומיים, אזוריים וארציים. האגנים הארציים, הנקראים על פי בסיסי הניקוז שלהם, הם אגן

הים התיכון, אגן ים המלח ואגן מפרץ אילת. אגנים אלה משתרעים גם מחוץ לגבולות מדינת ישראל, והם בינלאומיים באופיים. האגנים האזוריים מוגדרים עבור כל נחל בנפרד ונקראים על שמו. האגנים המקומיים משתרעים, כל אחד, בתחום רשות מקומית אחת וכל אחד מהם מתנקז לנחל אחד בלבד (כלומר, יכולים להימצא מספר אגנים מקומיים בשטח השיפוט של רשות מקומית אחת). האחריות לניקוז האגנים המקומיים חלה על הרשויות המקומיות, והאחריות לניקוז האגנים האזוריים חלה על רשויות הניקוז. האחריות לניקוז הירדן התחתון, בין הכנרת לים המלח, חלה על הממשלה. כמו כן חלה עליה האחריות לניקוז שטחים שאינם נכללים בגבולות רשויות הניקוז והרשויות המקומיות (ראה לסטר וחור, 2008).

אין עדיין קביעה מדויקת של גבולות האחריות של רשויות הניקוז. בעת כתיבת הדברים האלה נמצאת בניסוח הצעה של האגף הבכיר לשימור קרקע וניקוז שזה תוכנה:

1. כל עורק או קטע שלו, שעובר דרך רשות מקומית אחת ומגיע אליה מרשות מקומית אחרת שנמצאת מעליה, בתנאי שהשטח הבנוי המתנקז אליו גדול מ- 0.5 קמ"ר.
2. כל עורק שעובר ברשות מקומית אחת, אך קולט נגר מאגן התנקזות פתוח הנמצא מחוצה לה וגודלו לפחות 1 קמ"ר. כלל זה חל גם תעלות הגנה על יישובים.
3. כל עורק ראשי, למעט תעלות מאספות ודרכי מים, המנקז שטח פתוח גדול מ- 2 קמ"ר ונמצא במועצה אזורית אחת.
4. כל עורק המוגדר בתמ"א 34 ב' כעורק ראשי או משני.

לצורך תכנון הניקוז יש לאסוף מידע על האגן ותכונותיו, מצב הניקוז שלו, תוכניות הפיתוח, הגורמים בעלי העניין והאפשרויות התקציביות. יש להעריך את התאמת הניקוז לצרכים העכשוויים והעתידיים, להגדיר פערים בין רצוי למצוי, ולהחליט על מטרות הניקוז ועל האפיקים הדורשים שיפור. לכל אפיק כזה יש להגדיר את האגן המיוחד לו ולרכז את המידע על אופיו. תכנון האפיק עוסק תחילה בצירו, מתייחס לאזורים הסמוכים לו ואחר כך עובר להיבטים פרטניים יותר.

לרגל הבינוי המתרחב והולך של שטחים עירוניים ושל עורקי תשתיות, גדלה החשיבות

עם זאת, אין תכנון אפיק לצורכי ניקוז יכול להסתפק בשמירה על ציר הנחל במצבו הטבעי. שינוי שימושי הקרקע והטופוגרפיה שלה ליצירת שדות חקלאיים, יישובים ועורקי תשתיות, גורם לשינוי במשטר הזרימות של נגר הגשמים ועל כן גם במידת ההתאמה של האפיק להולכת ספיקות המים. פעילות אנושית בפשט ההצפה הטבעי של נחל, עלולה להינזק כתוצאה מהתפשטות ההצפות שם. על כן, יש צורך לשנות באופן מלאכותי את כושר ההולכה של האפיק ולהתאים את צירו למצב החדש. שמירה על אפיק מחייבת תחזוקה, ועבודה נדרש להכין אפשרויות פעולה ודרכי גישה. לאור כל אלה, יש למקם מיטבית את תוואי האפיק, דרכי השירות לצדיו, תעלות הגנה ופשט הצפה למקרי גאותות גבוהות. כמו כן, יש להתוות את רצועות המגן וההשפעה כמתחייב בתמ"א 34 ב'3. משתני ההחלטה של המתכנן הם התוואי, צורת החתך, עומק החפירה ושיטות ההגנה והתחזוקה.

3.3 מגבלות תכנוניות

א. קביעת מיקומו של תוואי אפיק הזרימה - לא תמיד ניתן לקבוע תוואי אופטימלי מבחינת האפיק ולא תמיד ניתן להשאיר את התוואי במקומו הטבעי. יש והתוואי הטבעי מתפצל, מתרחב ו/או משנה את מיקומו עם הזמן ועם גודל ועוצמת השיטפון. יש ונקבעו עובדות, אפילו בלתי רצויות, בתחומו של הנחל ה"מכרסמות" אפילו בגדותיו - עובדות שקיים קושי רב עד כדי בלתי אפשרי לשנותן. יש, לעתים, צורך לשנות את תוואי האפיק לשם שיפור שילובו בסביבה.

ב. קביעת פרופיל חתך רוחבו של האפיק - כאשר השונות בספיקות הנחל גדולה (כמו: זרימת בסיס "קבועה" או, לא עלינו, זרימת ביוב), יש לתכנן את חתך הרוחב של האפיק בהתאם. כלומר, נבחר חתך משתנה, כאשר חלקו התחתון מתאים להעברת הספיקה הקבועה/הנמוכה וחלקו העליון עבור הזרימה השיטפנית. את החתך לזרימה הקבועה יש לתכנן באופן שמהירות הזרימה המינימלית תהיה 0.3 מטר לשנייה ועומק המים לא יפחת מ- 50 ס"מ. זאת על מנת למנוע התפתחות אצות ויתושים בתוך מי הנחל. יש לקחת בחשבון אפשרויות של גידול הספיקות בעתיד, בעקבות שינויי תכסית בשטח האגן.

הכלכלית של ניקוזם, וגדלה השפעתם על ניקוז השטחים הפתוחים. מערכות הניקוז של שטחים כאלה שונות באופיין מאלה של שטחים פתוחים ותכנון שונה אף הוא. העיסוק בהם נמצא מחוץ למסגרת הספר הזה והמאמר הזה. עיקר ההתייחסות כאן הוא לניקוז האזורי, אם כי תוכנו מתאים גם לניקוז מקומי וארצי.

3.2 התייחסות לציר הנחל

ציר הנחל הוא מרכז התוואי לאורכו זורם האפיק. האפיק הטבעי נוצר כתוצאה משולבת של מספר גורמים אופייניים לנחל ולאגן ההיקוות שלו:

- התנאים הגיאומורפולוגיים. כלומר, השילוב בין הטופוגרפיה ותכונות הקרקע.
 - המסלע וסוג הקרקע. בעיקר הקשיות והסחיפות שלהם.
 - כיווני רוחות ותנועת חולות (דיונות).
 - כמויות המשקעים, תדירותם, עוצמתם ופרוסם על פני האגן.
 - כמויות הנגר העל קרקעי, מהירות זרימתו וכוחות הגזירה שהוא מפעיל על דפנות האפיק.
 - סוגי הצומח וצפיפותו.
 - אירועים הידרולוגיים חריגים בגודלם ובתדירותיהם וכנגדם אירועים קטנים ושכיחים של נגר.
- התוצאה הסופית, היא תוצר של שיווי המשקל הדינמי שמשקף את ההופעה המשולבת של הגורמים האלו. כל שינוי מעשה ידי אדם, מערער את שיווי המשקל ומחייב התייחסות מיוחדת. למשל: יישור פיתול בנחל, המגדיל את כושר ההולכה של האפיק, מתליל את השיפוע האורכי, ובעקבותיו מגביר את מהירות הזרימה, העשויה לגרום לסחיפה מואצת, לחתירה בקטע אחד ולהשקעת סחף בקטע אחר. שינוי סוג הצומח וצפיפותו - הקטנה, תוביל להגדלת מהירות הזרימה על כל המשתמע מכך. הגדלה, תוביל להאטת מהירות הזרימה, לאפשרות של שקיעת סחף, הקטנת חתך הזרימה, עד כדי סתימת האפיק כליל. אירועים חריגים בגודלם ונדירים בהופעתם, עשויים להחזיר את אפיק הנחל לתוואי ולמצבו הטבעי וכבר קרו דברים מעולם. מומלץ לשמר, ככל האפשר, את ציר הנחל במצבו הטבעי. כל שינוי משמעותי מחייב השקעות כבדות בהסדרה או לקיחת סיכונים גבוהים.

החיכוך) להקטנת שינויי המהירות במקרה הראשון, ואמצעים מייצבים במקרה השני. חשוב גם להקפיד על שיפוע רציף בכל קטע, על מנת למנוע הישארות שלוליות באפיק לאחר תום השיטפון.

ח. שינויים בחספוס הדפנות - שינויי חספוס לאורכו של האפיק, מביא גם הוא לשינויי מהירות הזרימה ולתופעות הגברת כוח הגריפה והשקיעה. יש לתת את הדעת לכך, במיוחד כאשר מתוכנן ייצוב צמחי של הנחל.

ט. כניסת יובלים - הזרימה במפגש מושפעת מהמצב היחסי באפיק הראשי וביוכל. ספיקה גבוהה באחד מהם, עשויה לעכב את הזרימה באחר ולגרום לעליית פני המים שם. ספיקת השיא המשולב קטנה, בדרך כלל, מסכום ספיקות השיא באפיק הראשי וביוכל. בגלל שינוי כיווני הזרימה, יש להקדיש תשומת לב להגנת הדפנות באזור המפגש.

י. תשתיות אחרות - יש להתחשב בקיומן ולמזער את ההפרעות לתפקודיהן. לשם כך, רצוי לתאם פעילות עם מתכנניהן ומחזיקיהן ועם הרשויות המתאימות.

שטחים פתוחים ושטחים חקלאיים, מיועדים לשמש פשטי הצפה כחלק מההגנה על השטחים הבנויים. תכנונם צריך להתבסס על תקופות החזרה המתאימות לאופי השטחים האלה. חשיבות מרובה חייבת להינתן, במיוחד בשטחים חקלאיים, לקיצור משך ההצפה ולהתאימו לסוג הגידול ועמידותו ולסוג השימוש בשטח. זאת, ניתן וחיבים להשיג, באמצעות ניקוז עילי מקומי, אשר יסלק את מי ההצפה סמוך ככל האפשר למועד דעיכת הגאות אל מתחת לספיקת התכן.

4. קריטריוני תכנון

4.1 שימושי הקרקע

קביעת שימושי הקרקע באגן ההיקוות ובמיוחד השימושים בקרבת אפיק הנחל, נדרשת עבור שתי מטרות עיקריות: האחת, להערכת כמויות הנגר וספיקותיו ולקביעת ספיקת התכן (ראה פולק, 2008) והאחרת, לקביעת פשט ההצפה ומידת ההגנה הנדרשת לו. כפי שצוין בפרק 3.4, יתוכננו פשטי ההצפה לשטחים פתוחים, על פי דרגת כלכליותם ויכולתם לעמוד בתקופות הצפה ללא נזק משמעותי.

ג. קביעת רוחבו העליון של האפיק - הרוחב העליון כולל את דרכי השירות ותעלות ההגנה בשני צדי האפיק וגם את רצועות המגן וההשפעה. קביעת הרוחב העליון קריטית, במיוחד לאחר שנקבעו עובדות בשטח. הוא עשוי להכתיב את צורת חתכו של הנחל, את שיפועיו הצדיים ואת הצורך המיוחד לייצבם, כמו גם את האפשרות לתחזקם כראוי. רוחב עליון קטן מגביל את האפשרות ליצירת דרכי תנועה ותעלות מגן לאורכן של שתי הגדות, כמתחייב לניקוז תקין.

ד. קביעת עומק האפיק - עומק חפירה מוגבל הוא קריטי, בעיקר עבור נחלים הזורמים בשיפועים מתונים עד אפסיים. מגבלה זו יוצרת האטת הזרימה, הצטברות סחף כדי סתימת התעלה, זרימת מים הפוכה לכיוון הזרימה המתוכנן והצפתם של אזורים נרחבים.

ה. פיתולי האפיק - למרות המגמה לאפשר לנחל לזרום באפיקו הטבעי, מחויבת התייחסות מיוחדת לפיתולים בנחל. מהירויות הזרימה השונות, בחתך הרוחבי, עשויות ליצור חתירה בצדו החיצוני של הפיתול (שם מופיעה מהירות גבוהה יותר) והשקעת סחף בצדו הפנימי (שם מואטת המהירות). קיצור פיתולים משחרר קרקע למטרות אחרות ומגביר את שיפוע האפיק, והארכתם צורכת עתודות קרקע גדולות יותר וממתנת את שיפוע האפיק.

ו. ארוזיביות של האפיק - הסחף הנוצר כתוצאה מכוח הגריפה על פני תחום ההתנקזות ובאפיק, מוסע בשלוש צורות: גרופת של חלקיקים גדולים על פני הקרקעית ובקרבתה, רחופת של חלקיקים קטנים בכל גוף המים וצופת של חומרים קלים על פני המים. כמות הסחף המוסע בכל שלוש הצורות היא פונקציה של מהירות הזרימה, מידת הטורבולנטיות שלה, זמינות החלקיקים, גודלם ואפשרות ניתוקם ממקומם הקודם. כל שינוי בתנאי הזרימה, יגרום להגברת החתירה או לשקיעת סחף.

ז. שינויים בשיפוע האורכי - משנים את מהירות הזרימה ואתה את כוח הגריפה ואת כושר הנשיאה של המים. מעבר משיפוע תלול למתון, עשוי לגרום להשקעת סחופת ומעבר משיפוע מתון לתלול, עשוי להגביר את החתירה לאחור. יש לנקוט באמצעים (בעיקר הקטנת מקדם

תכנון אפיקי נחלים ותעלות ניקוז

להערכת כמויות הנגר וספיקותיו ולקביעת ספיקת התכן (ראה פולק, 2008) והאחרת, לתיחום האפיק, הערכת יציבותו הטבעית ובצורך לייצבו. סוג הקרקע והמסלע (כאשר הם חשופים), קובעים את מהירות הזרימה המותרת, את כוח הגריפה המותר, שהוא פונקציה של הגרדינט ההידרולי ומהירות הזרימה ואת שיפועי דפנות האפיק.

יציבות האפיק מתערערת על ידי סחיפת חלקיקים מקרקעיתו ודפנותיו, וכישר הולכתו עלול להיפגע על ידי שיקוע סחופת בתוכו. מקורות הסחופת השוקעת פרוסים על פני תחום ההתנזות ובאפיק עצמו. על מנת שתיווצר סחיפה, דרושים להתקיים בכמות מספקת שני כוחות: כוח ניתוק וכוח הסעה. כוח הניתוק, פועל כנגד מידת סחיפותה של הקרקע וזו פונקציה של דרגת הקוהזיה שבין חלקיקיה ושל גודל החלקיק הצפוי להיסחף. כוח ההסעה, תלוי בעיקר בגודל החלקיק המוסע. תיאור נרחב של תהליכי הסעת הסחופת, נמצא אצל לקח וח' (2008). כאן נתייחס בקיצור להשפעתה על תכנון האפיקים.

קרקע חרסיתית, היא בעלת קוהזיה גבוהה ולמרות החלקיק הקטן הבונה אותה, פוטנציאל הסחיפה שלה נמוך ביותר. קרקע חולית ללא קוהזיה כלל, בעלת חלקיקים גדולים, גם היא איננה בעלת פוטנציאל סחיפה גבוה. לעומתן, לקרקע בעלת הרכב סילט גבוה, פוטנציאל הסחיפה הגבוה ביותר. הסילט מאופיין על ידי חלקיקים קטנים חסרי קוהזיה. כאשר הסילט משתחרר, משתחררים אתו גם חלקיקי החרסית הקטנים המעורבים בו והסחיפה מואצת.

תכנון נכון כלכלית, צריך להוביל למזעור סכום העלויות הכרוכות בו. עלויות אלה הן ההשקעות בהקמה ובאחזקה של האפיק ותוחלת הנזק הנותר לאפיק ולסביבתו, מחמת שיטפונות בעלי ספיקות גבוהות מספיקת התכן. בדרך כלל, אין נעשה חישוב כזה, ובמרבית מדינות העולם נקבעו תקנים לספיקות תכן מותרות. גם במדינת ישראל נחקק לאחרונה תקן מחייב לספיקת התכן (תמ"א 34 ב/3). שני קריטריוני הבחירה הראשיים אליהם מתייחסים בפועל הם: האפשרות לסיכון חיי אדם במקום הראשון, וערך הנזק הכלכלי הנגרם כתוצאה משיטפון אפשרי במקום השני. כללים אלו מוצגים בטבלה 1. תקופת החזרה היא המשתנה המקובל בעולם לקביעת מידת הסיכון המותר, והערכים הרשומים בטבלה 1 דומים לאלה המקובלים בארצות מפותחות. תקופת החזרה צריכה להיקבע על ידי מזמין העבודה, שהוא הנושא בהוצאות הניקוז. בהינתן התקן, רצוי לא לבחור ברמת סיכון גבוהה יותר (תקופת חזרה קצרה יותר) מהרשום בו.

התקן המוצג בתמ"א מחמיר עבור חקלאות בשטח פתוח ולבטח עבור גידולי שדה, פארקים ואפילו מטעים. תכנון על פיו עשוי שלא לעמוד במבחן הכלכלי ולהטיל הוצאות מיותרות על היום. טבלה 1' מציגה ערכים מקובלים כיום במדינת ישראל.

4.2 סוג הקרקע והמסלע

כמו בשימושי קרקע, גם סוג הקרקע והמסלע נדרשים עבור שתי מסרות עיקריות: האחת,

טבלה 1 : תקופות חזרה לספיקות התכן

השימוש בשטח	תקופת חזרה (שנים)	הסתברות שנתית (%)
חקלאות: גידולי שדה ומטעים, פארקים	10	10
בתי צמיחה ומבנים בשטחים פתוחים	25	4
כבישים ומסילות ברזל*	50	2, לכל היותר
סוללות מאגרים וסכרים**	100	1
שטחים מבונים - מעורקי ניקוז ראשיים**	100	1
שטחים מבונים - רחובות, מגרשי חנייה, חצרות בתים מכל מערכת ניקוז	5 - 50	2 - 20
הצפה פנימית של בתים מכל מערכת ניקוז	100	1

*הצפת מיסעות וגשרים לפי תקני מע"צ ורכבת ישראל.

**בכל מקרה שיש סיכון ישיר לחיי אדם, הסתברות התכנון תהיה 1% ומטה, בהתאם לדרגת הסיכון ולחומרת הנזק.

טבלה 1'א: ערכי תקופות חזרה והסתברות תכנון מקובלים

סוג השימוש	חקלאות אינטנסיבית	חקלאות רגילה	שטחים פתוחים
תקופת חזרה (שנים)	10 - 20	5 - 10	2 - 5
הסתברות שנתי (%)	5% - 10%	10% - 20%	20% - 50%***

*** כאשר הנחל עובר בשטח פתוח המהווה שמורת טבע, לא מחויבת (או לעתים אסורה) הסדרתו. זאת בתנאי שאי הסדרתו איננה גורמת נזקים או מטרדים לסביבתו.

האפיק, קביעת צורת החתך לרוחב ושיטת בנייתו (בחפירה במילוי או במשולב).

שיפועו האורכי של אפיק הזרימה, הוא אחד הקובעים את מהירות הזרימה הנוצרת בו והשלכותיה על יציבותו (ראה פרק 4.2), ומכאן גם את כושר ההעברה של החתך לרוחב. באורח טבעי, הסחיפה והשיקוע מביאות במשך הזמן לשיפוע יציב. מכאן, מגמת התכנון ליצור מראש שיפוע יציב הכרוך בשינויים קטנים בלבד של חתך האפיק. התנאים הגיאומורפולוגיים והטופוגרפיים של אפיק הזרימה ותחומיו, הינם גורם מכריע בקביעת השיפוע.

הקשר בין מהירות הזרימה, שהיא הגורם הקובע את יציבות האפיק, לבין השיפוע, ספיקת התכן וגודל החתך לרוחב, מחושב, בדרך כלל, באמצעות נוסחאות לזרימה קצובה ותמידית ומשפט הרציפות (ראה בן-צבי וגריניס, 2008). משפט הרציפות קובע, שבזרימה קצובה ותמידית ספיקת המים היא מכפלת המהירות בשטח החתך המורטב. זרימה קצובה ותמידית מתרחשת לאורך קטע בעל חתך רוחבי קבוע וללא שינויים בעומק המים עם הזמן. בזרימה כזאת מקבילים זה לזה שיפוע הקרקעית, שיפוע פני המים והגרדינט ההידרולי, מצב המקל על ביצוע החישובים. למעשה, מצב כזה איננו מתקיים בעת זרימת גאווית, מאחר ששטח החתך המורטב, ההיקף המורטב והגרדינט ההידרולי משתנים עם הזמן ולאורך האפיק, והזרימה הופכת לזרימה מודרגת. כל עוד השינויים בזמן ולאורך האפיק אינם חריפים, מותר להשתמש בנוסחאות לזרימה קצובה ותמידית גם לחישוב זרימה מודרגת.

זרימת מים באפיקים, מתקיימת במצב תת-קריטי או במצב על-קריטי. בזרימה תת-קריטית, עומק המים גדול ומהירות הזרימה נמוכה, ואילו בזרימה על-קריטית, עומק המים קטן ומהירות גבוהה. ביניהן נמצאת הזרימה במצב הקריטי,

קרקע משוכבת, גם היא בעלת פוטנציאל סחיפה גבוה. רגישותה לסחיפה נקבעת על ידי השכבה הרגילה ביותר. כאשר זו מתערערת, קורסות בעקבותיה גם השכבות העמידות יותר. סחיפה מואצת ביותר, עד כדי יצירת ערוצים, קיימת בקרקעות מלוחות. שם היא מתחילה בהתפתחות מחילות ומנהרות תת-קרקעיות (tunneling, piping), נמשכת בערעור כל השכבה וקריסה כוללת. מצב זה אופייני בעיקר באזורים מדבריים יבשים.

עוצמת הסחיפה מושפעת גם מעומק זרימת המים (קטנה עם הגדלת העומק), מדרגת פיתולי האפיק (גדלה ככל שהאפיק מפותל יותר) ומתכנסת ההיקף המורטב (קטנה ככל שצפיפות התכנסת גדלה או הופכת ליציבה יותר). ערכי המהירות המותרת, נקבעו בהתאם לכל הגורמים האלה. ערכים נבחרים מוצגים בטבלה 2.

השיפועים המותרים של דפנות האפיק, גם הם נגזרים מסוג הקרקע. בקביעתם חייבים להתחשב גם באפשרות התחזוקה השוטפת של האפיקים. למעשה, במרבית האפיקים של התעלות והנחלים המוסדרים בארץ, אפשרות התחזוקה היא הגורם הקובע את שיפוע הדפנות. טבלה 3 מרכזת שיפועים מינימליים שנקבעו על פי הניסיון בארץ. בפועל יוצרים שיפועים מתונים יותר, במיוחד מסיבות ביצוע ותחזוקה.

4.3 גיאומורפולוגיה וטופוגרפיה

המידע על גיאומורפולוגיה וטופוגרפיה דרוש גם הוא עבור שתי מטרות עיקריות: האחת, להערכת כמויות הנגר וספיקותיו ולקביעת ספיקת התכן (ראה פולק, 2008) והאחרת, להתוויית האפיק, לקביעת שיפועו האורכי, כמויות החפירה והמילוי בעת ביצוע ההסדרה וגם להערכה של השינויים הצפויים להתרחש באפיק עקב זרימת המים. נושא זה מתואר במידה ראויה במאמר גיאומורפולוגיה (ענבר, 2008). כאן נתרכז בהשפעתו על תיחום

טבלה 2: ערכי המהירות המותרת המקובלים

סוג הקרקע או התכסית	גודל גרגיר (מ"מ)	מהירות מותרת (מטר לשנייה)
סילט	0.005	0.20
חול דק	0.25	0.45
חמרה חולית	1.00	0.60
חמרה חרסיתית, חול גס		0.95
חרסית	0.002	1.20
אבנים קטנות	25	1.45
אבנים בינוניות	40	1.85
אבנים גדולות	100	2.50
אבנים גדולות מאוד	300	4.20
אבנים ענקיות	1000	7.50
צמחייה צפופה ביותר, סוג B*		3.50
צמחייה טבעית גבוהה, סוג C*		2.50
צמחייה טבעית בקרקע קשירה, סוג D*		1.90
צמחייה דלה בקרקע סחיפה, סוג E*		1.20

*על פי הגדרות התחנה לחקר הסחף

מקדמי תיקון של המהירות המותרת לעומקי זרימה שונים:

עומק זרימה (מטר)	0.5	1.0	2.0	3.0
מקדם תיקון	0.9	1.0	1.15	1.25

מקדמי תיקון המהירות המותרת לדרגת הפיתול

מידת הפיתול	תעלה ישרה	מתפתלת מעט	מתפתלת בינוני	מתפתלת מאוד
מקדם התיקון	1.00	0.95	0.87	0.78

טבלה 3: שיפועים צדיים מינימליים של אפיקים

סוג הקרקע	שיפוע הדפנות (1:1, 1 בכיוון האנכי, m בכיוון האופקי)	
	תעלות בעומק מים עד מטר	תעלות בעומק גדול ממטר
כבול	1 : 0.25	1 : 0.5
חרסית	1 : 1	1 : 1.5
חמרה חרסיתית או סילטית	1 : 1.5	1 : 2
חמרה חולית	1 : 2	1 : 3
חול	1 : 3	1 : 4

האחרים. עומק המים בזרימה קצובה ותמידית במצב הקריטי, נקרא העומק הקריטי ומהירות הזרימה אז, נקראת המהירות הקריטית. השיפוע שגורם לספיקה נתונה להופיע בעומק ובמהירות הקריטיים לזרימה קצובה ותמידית, נקרא השיפוע הקריטי. שיפוע תלול יותר, נקרא על-קריטי ושיפוע מתון יותר, נקרא תת-קריטי. לנוכח הקשר בין מהירות הזרימה ליציבות האפיק, ברורה חשיבות מצב הזרימה והשיפוע שגורם להופעתו. שינויי שיפוע

בו העומד הסגולי מינימלי. בזרימה תת-קריטית, הפרעות לזרימה משפיעות על העומק והמהירות במעלה ובמורד האתר בו מתרחשת ההפרעה, ואילו בזרימה על-קריטית, הן משפיעות על העומק והמהירות רק במורד. ההשפעות בזרימה תת-קריטית, קטנות במשרעתן ונמשכות למרחק ארוך וההשפעות בזרימה על-קריטית, גדולות במשרעתן וקצרות באורכן. זרימה קריטית אינה יציבה ועוברת בתדירות גבוהה בין שני המצבים

ההידרולי (מטר), J הגרדינט ההידרולי (חסר ממד, מוצב ביחידות שלמות = מטר למטר). הרדיוס ההידרולי מוגדר כיחס בין שטח החתך המורטב, A (מטר רבוע), לבין ההיקף המורטב, P (מטר):

$$R = A/P \quad (2)$$

ביחידות בריטיות נכתבת נוסחת מנינג:

$$V = 1.49 n^{-1} R^{2/3} J^{1/2} \quad (א1)$$

לפי משפט הרציפות בזרימה קצובה ותמידית מתקיים הקשר:

$$Q = VA \quad (3)$$

כאשר Q (L^3T^{-1}) הספיקה. משוואה (3) נכונה מבחינה ממדית, ולכן יחידות הספיקה הן מכפלת יחידות המהירות והשטח וכל עוד הן אחידות אין צורך במקדם.

חישוב שטח החתך המורטב והשיפוע, נערך בשיטת הניסוי והטעייה. קובעים את ספיקת התכן ואת השיפוע המצוי או הרצוי, ומניחים את צורת החתך ואת מקדם החיכוך. לפי צורת החתך מנסחים את הקשר בין עומק המים, שטח החתך המורטב והרדיוס ההידרולי. קשר זה ומשוואות (1 - 3), מאפשרים את חישוב המהירות, העומק, השטח וההיקף. למהירות המחושבת אסור להיות גבוהה מהמהירות המרבית המותרת, כפי שמופיע בטבלה 2 או בטבלאות דומות. אם מתקבלת מהירות גבוהה מדי, חוזרים על התהליך תוך כדי שינוי צורתו וממדיו של החתך, השיפוע ומקדם החיכוך, עד שמתקבל ערך מתאים למהירות. מוודאים, באמצעות משוואה (3), כי הספיקה אותה מסוגל החתך להעביר אינה קטנה מספיקת התכן. קיימות היום תוכנות מדף המסייעות בפתרון על כל מרכיביו.

פני החתך המורטב המחושב עבור ספיקת התכן, צריכים להיות נמוכים מקצה גדות האפיק. העומק הנוסף לאפיק, שנקרא בולט, נועד למנוע גלישה והתפשטות החוצה של גלי מים שעלולים להיווצר עקב רוחות או הפרעות לזרימה, לתת מרווח ביטחון למקרה של הצטברות סחופת או הקטנת כושר ההולכה של החתך עקב צמחייה הגדלה שם. כמו כן, הוא נותן מרווח ביטחון למקרה שהחישובים לא היו מדויקים מספיק או שמקדם החיכוך שהונח מלכתחילה לא התממש בדיוק מספיק.

חישוב מדויק יותר המאפשר את חישובי קו העומד לאורך האפיק (נקרא גם ציר הידרולי) ועומק המים בזרימה ובחתכים בעלי שינויים הדרגתיים,

ממתון לתלול ומתלול למתון, גורמים לשינויים חדים במצב הזרימה ולכן גם בעומק ובמהירות. הם נקראים מפל הידרולי וזנק הידרולי, בהתאמה. במקומות התרחשותם מופיעים ערבולים ומאמצי גזירה גבוהים על קרקעית האפיק ודפנותיו.

הגיאומורפולוגיה והטופוגרפיה קובעות גם את שיטת בניית החתך: במילוי, בחפירה מינימלית או בחפירה עמוקה (תרשימים 1 - 3). במציאות משלבים את שלושתן, לפי הצורך. החתך במילוי נדרש לגישור שקעים מקומיים לאורך האפיק, במטרה למנוע חפירת אפיק עמוק לכל אורכו. הוא נדרש גם כאשר קיימים קטעים המחייבים סוללות הגנה, בעיקר מצדו האחד של האפיק וצדו השני מהווה פשט הצפה מתוכנן. בנייה של סוללות הגנה, מחייבת פתרון לניקוז המקומי של השטח שנמצא בעורפן, באופן שיוכל לתפקד גם בעת זרימה גבוהה באפיק.

כאשר החתך בחפירה, חייבים להקפיד על הגנת האפיק בפני כניסת מים חיצוניים ישירות מצדיו. כניסת מים בלתי מסודרת ובלתי מבוקרת, חורצת את גדות האפיק ואת דפנותיו, יוצרת סחיפה חזקה, עד כדי פתיחת ערוצים והרס כללי של האפיק. יש לחפור תעלות הגנה בשני צדי האפיק ולנתב את המים בצורה מוסדרת, באמצעות מתקני כניסה אל תוך הנחל. הקפדה יתרה על תעלות מגן יש לתת, כאשר הנחל עובר בשטחים חקלאיים מעובדים ו/או באזורים חרבים בעלי מליחות קרקע גבוהה. הצורך להן בשטחים חקלאיים, הוא למניעת עיבוד השטח אל תוך האפיק-מה שגורם להרס רב ולכניסה ישירה של סחף. באזורים חרבים בעלי מליחות קרקע גבוהה, קיימת תופעה של מיחתור. מים העומדים בקרבת האפיק, מחלחלים, יוצרים ומאיצים את המיחתור וגורמים להרס האפיק. תעלת ההגנה מונעת את תופעת עמידת המים.

5. חישובי חתכים

5.1 נוסחאות החישוב

נוסחת מנינג, היא הנפוצה ביותר בדורות האחרונים לחישוב זרימה קצובה ותמידית, וכאמור לעיל משתמשים בה גם לחישוב זרימה מדורגת. ניסוחה ליחידות מטריות:

$$V = n^{-1} R^{2/3} J^{1/2} \quad (1)$$

כאשר V מהירות הזרימה (מטר לשנייה), n מקדם ההתנגדות (חיכוך) (שנייה למטר^{1/3}), R הרדיוס

אולם במקרים רבים משתמשים בנוסחת מנינג:

$$S_f = (nQA^{-1}R^{-2/3})^2 \quad (7)$$

הניסוח הדינמי הרשום כאן, קשה לפתרון ומחייב כמות נתונים רבה יחסית. הניסוח המקובל ביותר נקרא קינמטי, והוא מבוסס על העובדה שבמקרים רבים שני האיברים באגף ימין של משוואה (5), גדולים מאוד ביחס לאיברי אגף שמאל. לכן אפשר להזניח את אגף שמאל, ונותר $S_0 = S_f$. הניסוח החד-ממדי הרשום כאן, מתאים לזרימה באפיק מוגדר. ניסוחים דו-ממדיים מאפשרים התחשבות בהתפשטות המים מעבר לגדות האפיק, זרימה בדלתאות ובמניפות, התחשבות בזרימה מיובלים ובזרימה חוזרת לתוכם, וכדומה. מצויות בשוק תוכנות מדף לא יקרות לזרימה חד ממדית, מרביתן קינמטיות, ויישומן אינו מסובך. הן מאפשרות חישוב מדויק של מהלך הציר ההידרולי לאורך האפיק.

חישוב הציר ההידרולי, מאפשר ווידוא שספיקת התכן ניתנת להולכה בתוך האפיק. לחילופין, היא מאפשרת הערכה של רוחב התפשטות המים מעבר לגדות, אם כי במקרה כזה לא תמיד מתאים החישוב החד-ממדי ואז יש לעבור לחישוב מורכב יותר. נוסף לכך, הוא מאפשר הערכה בדיעבד של גודל ספיקות גבוהות שגרמו להצפות.

5.2 חתכי תעלות מתוכננות ומוסדרות

נערך באמצעות פתרון המשוואות הדיפרנציאליות של שימור התנע והרציפות (ראה ספרות מקצועית, ובקיצור גם אצל בן-צבי, 2008, משם מועתקות הפסקאות הבאות). נוסחאות מיוחדות עבור שינויי זרימה חריפים, הינן מעבר לנדרש במאמר הזה והקורא מופנה לספרות המקצועית העוסקת בהן. מקצת מהנוסחאות העוסקות בזנק הידרולי בתעלה מלבנית, נמצאות אצל בן-צבי וגריניס (2008).

נתאר כאן חישוב למקרה פשוט. נתון קטע אפיק קצר (תרשים 4), שאורכו dx (L), ושיפועו $S_0 = \sin(\theta)$ (1) כאשר θ (1) שיפוע קרקעית האפיק. שטח החתך הממוצע לאורך הקטע A (L^2), האוגר בקטע $S = Adx$ (L^3) ומסת המים שם $m = \rho Adx$ (M). עומק המים במעלה y ובמורד $y + (\partial y / \partial x) dx$ (L). במעלה הקטע נכנסת ספיקה Q (L^3/T), לאורך הקטע נכנסת זרימה צדית בכיוון ניצב לכיוון הזרימה ובספיקה q (L^2/T) ליחידת אורך (בסך הכול qdx), ובמורד יוצאת ספיקה $q + (\partial Q / \partial x) dx$. המהירות הממוצעת של הזרימה בקטע זה V (L/T). לקו העומד שיפוע S_f (1).

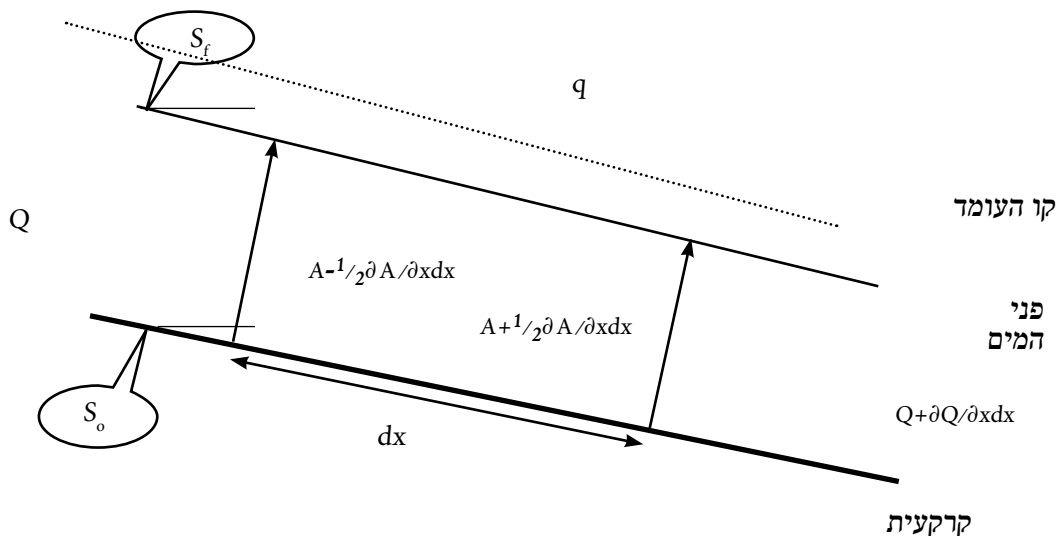
הניסוחים הדיפרנציאליים של משוואת הרציפות וחוק שימור התנע, בהתאמה:

$$\partial A / \partial t + \partial Q / \partial x - q = 0 \quad (4)$$

$$\partial V / \partial t + V \partial V / \partial x + g \partial y / \partial x + qV/A = gS_0 - gS_f \quad (5)$$

לפי ההגדרה:

$$S_f = \partial(z + y + V^2/2g) / \partial x \quad (6)$$



תרשים 4 : הילוך גיאיות באפיק

מדויקת, למשל באמצעות מד-זרם. אפשרות הביצוע של מדידה כזו אינה זמינה, בדרך כלל, למהנדס הניקוז, ועל כן לא נרחיב את הדיון בה. עליו להסתמך על ניסיונו ועל טבלאות ותמונות המצויות בספרות ועל המקובל בארץ. ניתן למצוא בספרות ערכי n עבור מגוון של מצבים. טבלה 5 מביאה חלק מייצג מהם.

6. יציבות ויצוב

6.1 כללי

תעלות עפר חשופות לכוחות גזירה, המופעלים על ידי זרימת המים. כוחות אלה עשויים לנתק חלקיקים ממקומם וליצור התמוטטות בגדות האפיק בקטע אחד ולהשקיע אותם ולסתום את האפיק בקטעים אחרים. נוסחת די-בואה לחישוב כוח הגריפה היא:

$$\tau = \gamma R J \quad (12)$$

כאשר τ ($ML^{-2}T^{-2}$) כוח הגריפה, γ ($ML^{-2}T^{-2}$) המשקל הסגולי של הזורם. כאשר התעלה רחבה מאוד ביחס לעומקה, ניתן להציב את עומק הזרימה במקום הרדיוס ההידרולי. מאחר שכוח הגריפה הוא פונקציה של הגרדינט ההידרולי והרדיוס ההידרולי ושניהם קובעים את מהירות הזרימה באפיק, תכנון להמירות מותרת, כפי שמוצג בפרק 4.2, הוא תכנון אפיק יציב. מצב זה עלול להתערער, כאשר מופיעה ספיקה גבוהה מספיקת התכן ומהירות הזרימה גבוהה מהמהירות המחושבת.

התקופה הקריטית ביותר מבחינת הסחיפה וההרס, היא בחורף הראשון לאחר ביצוע הסדרה. מאחר שהקרקע באפיק ובסביבתו טרם התייצבה ואמצעי הייצוב המלאכותיים לא תמיד מספיקים להגיע לביצוע נאות. לפיכך, רצוי לסיים את ההסדרה מוקדם ככל האפשר לפני החורף. את אמצעי הייצוב נתכנן מן הקל אל הכבד ומן הזול אל היקר ביותר. הכול על פי המקרה והתנאים הסביבתיים הקיימים. בדרך כלל, נעדיף את הייצוב הצמחי על פני הייצוב ההנדסי.

6.2 ייצוב צמחי

הייצוב הצמחי צריך להיות כזה, שמצד אחד יאפשר מהירות זרימה גבוהה בתעלה ומהצד השני מערכת שורשי תשריין את שכבת הקרקע העליונה המועדת להיסחף. חשוב שתהיה לו

אופייניים

חתכי מרבית התעלות המתוכננות, משתייכים לשתי משפחות בסיסיות: החתך הטרפזי והחתך העגול (תרשים 5). משפחת החתך הטרפזי כוללת: חתך ריבועי, מלבני, משולשי וטרפזי. משפחת החתך העגול כוללת: חתך עגול או אליפטי ורומי, אליהם לא נתייחס כאן. כמובן שהחתכים הטבעיים הם אמורפיים ויש להתייחס אליהם באורך אפירי, אם כי ההתייחסות התכנונית אליהם זהה. המאפיינים של המשפחה הראשונה הם רוחב הבסיס, m (L) , רוחב פני המים, B (L) , שיפוע דפנות, m $(1:m)$ בכיוון האופקי, חסר ממד, ועומק המים, L (h) . מאפייני המשפחה השנייה הם קוטר העיגול, D (L) , עומק המים, h (L) , וזווית המיתר המתאים לפני המים, Φ (ברדיאנים, חסר ממד).

מתוך הגיאומטריה של חתכים אלו, נחשב את שטח החתך המורטב ואת ההיקף המורטב, באמצעות המשוואות הבאות, ומתוצאותיהן את הרדיוס ההידרולי באמצעות משוואה (2).

עבור המשפחה הטרפזית:

$$A = h(b+B)/2 \quad (8)$$

$$P = b + 2h(m^2+1)^{1/2} \quad (9)$$

עבור החתך העגול (בלבד):

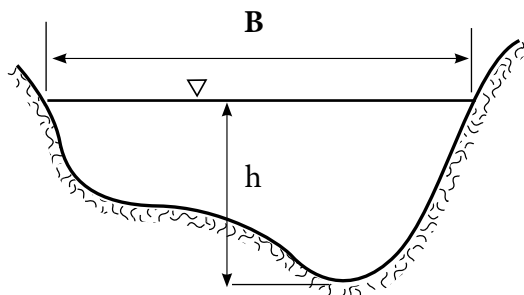
$$A = D^2(\Phi - \sin(\Phi))/8 \quad (10)$$

$$P = D\Phi/2 \quad (11)$$

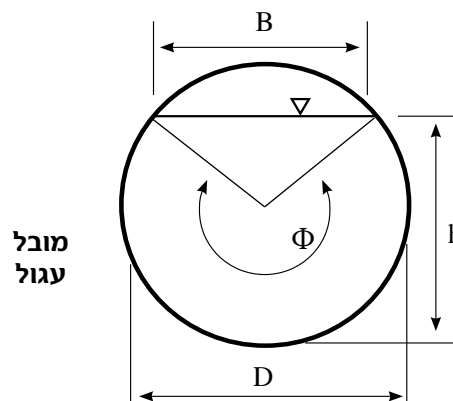
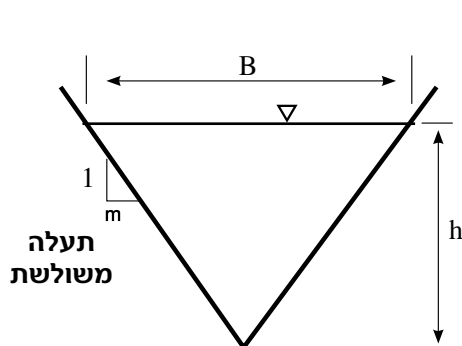
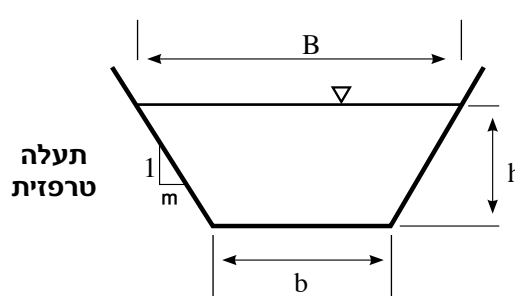
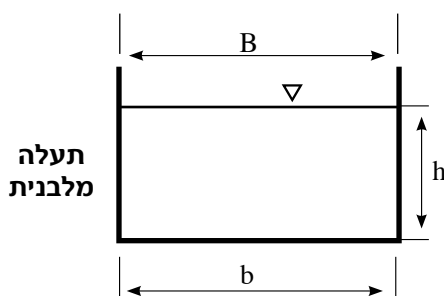
ממדי החתך וצורתו, קובעים את הרדיוס ההידרולי של התעלה. על פי נוסחת מנינג, ניתן להראות שעבור שטח חתך מורטב נתון, הספיקה גדלה עם הגידול ברדיוס ההידרולי. החתך האופטימלי מבחינה הידרולית, הוא בעל הרדיוס ההידרולי המרבי לשטח חתך מורטב נתון. יש לשים לב, שלא כל חתך אופטימלי מבחינה הידרולית הוא גם האופטימלי מבחינת הנדסית וכלכלית. מצויות בספרות מידות יחסיות של החתכים האופטימליים הידרולית (למשל, רוחב חתך מלבני אופטימלי כפול מעומק המים), אך בדרך כלל נבחר החתך תוך התחשבות מרבית ביכולת התחזוקה של האפיק ובזמינות הקרקע. החתך היעיל ביותר מהבחינה ההידרולית, לא ימלא את ייעודו ללא תחזוקה נאותה.

5.3 קביעת מקדמי החיכוך

אפשר לקבל את מקדם החיכוך מתוך הצבה בנוסחת מנינג של הגיאומטריה ומדידת ספיקה



אפיק נחל טבעי



תרשים 5: צורות חתכים אופייניים

על מנת למנוע עומד צמחי גבוה העשוי להיות גורם מפריע לזרימה החופשית, להאטת המהירות, לשקיעת סחף ולהתמלאות בפסולת.

6.3 ייצוב הנדסי

כאשר תנאי השטח ומהירות הזרימה נעשים הרסניים מדי, יש לעבור לאמצעים הנדסיים. האמצעי ההנדסי המהווה "גבול" בין הייצוב הצמחי להנדסי, הוא המפתן. המפתן הוא קיר אנכי המוחדר לעומק הקרקע, במטרה לעצור את המשך החתירה לאחור מהמקום בו הוא מתהווה. עומק המפתן והמרווחים בין המפתנים, נקבע על ידי

התפתחות מהירה ועמידות בתנאי יובש. הייצוב הצמחי הפשוט ביותר הוא לתת לטבע לעשות את שלו - אלא שכאן הסכנה הגדולה היא בחורף קשה וזרימות מוקדמות, בטרם הצליחה הצמחייה להתייצב ולייצב. על מנת להקטין את הסיכון, ניתן לסייע לצימוח הטבעי ולהתבססותו באמצעות השקיות עזר ודישון. ביסוס יתר ניתן להשיג באמצעות זריעה או שתילה של צמחי ייצוב, על פני השטח עצמו או על מצעים גיאוטכניים או אפילו בתוך כוורות פלסטיות או בדומה להן. הייצוב הצמחי מחייב תחזוקה מתאימה, הקשורה בעיקר בכיסוח (בשום פנים ואופן לא בשריפה),

טבלה 5: ערכים מקובלים של מקדם החיכוך למיניג

טווח ערכי n	תכסית הדפנות
0.025 - 0.017	תעלת עפר ללא תכסית
0.030 - 0.020	תעלה מתפתלת ללא תכסית
0.033 - 0.025	אפיק טבעי נקי
0.045 - 0.033	אפיק טבעי מתפתל
0.055 - 0.040	אפיק טבעי מתפתל - זרימה רדודה
0.150 - 0.075	אפיק טבעי צמחייה סבוכה
0.035 - 0.025	תעלה מצופה באבני גוויל
0.018 - 0.015	תעלה עם ציפוי בטון
0.034 - 0.032	ציפוי אבן מדורגת לחציון 10 ס"מ*
0.048 - 0.040	ציפוי אבן מדורגת לחציון 30 ס"מ*
0.059 - 0.046	ציפוי אבן מדורגת לחציון 50 ס"מ*
0.087 - 0.057	ציפוי אבן מדורגת לחציון 100 ס"מ*
0.0482 D ^{1/6}	משוואה של California Highways
0.030 R ^{-1.601}	צמחייה צפופה ביותר מסוג B **
0.027 R ^{-0.855}	צמחייה טבעית גבוהה מסוג C **
0.0234 R ^{-0.667}	צמחייה טבעית בקרקע קשירה מסוג D **
0.024 R ^{-0.191}	צמחייה דלה בקרקע סחיפה מסוג E **

* מתוך נוסת ה- USSCS בה n היא פונקציה של עומק הזרימה וקוטר האבן החציוני. n גדל ככל שהקוטר החציוני גדל, וקטן ככל שעומק הזרימה גדל.
 ** על פי התחנה לחקר הסחף. ניתן לראות שערכי n קטנים, כאשר הרדיוס ההידרולי גדל.

על כיסוח הצמחייה. את האבן ניתן להניח בתפוזות או בצורת גביונים. חשוב שהאבן שבתוך הגביון תהיה מהודקת וממדיה יהיו גדולים מגודלה של העין ברשת. שיטות ייצוב נוספות הן השימוש בכורות ממולאות בקרקע, בצומח, באבן או גם בבטון.

האמצעים ה"כבדים" הם מגלשים מטיפוסים שונים, מפלים, דורבנות ועד כדי אפיקים מצופים בבטון. השימוש במבנים אלה נעשה, כאשר כל האמצעים האחרים אינם מסוגלים לתת מיגון מספק לאפיק. יש לדאוג לשבירת האנרגיה של המים במורד המפלים והמתקנים האחרים, כי המים צוברים מהירות תוך כדי המעבר במתקנים אלה ועלולים לחתור בחוזקה את האפיק במורדם.

6.4 סדר תכנון וביצוע

הסדרה ושיקום של אפיקים, מביאים לשיפור הניקוז בקטע המשוקם ועשויים להגביר את הספיקות המגיעות למורד. כדי למנוע הזרמת ספיקות מוגברות לקטע האפיק שלא הוכשר לכך, רצוי לתכנן ולבצע כל הסדרה החל מהמורד

שיפוע האפיק ועומק החתירה המותר, כפי שנקבעו על ידי המתכנן.

המפתן מאפשר גם מתן מענה זמני, עד לשלב התבססות הצמחייה הטבעית או המלאכותית באפיק. בשלב הטרם צמחייה, עשויה להיווצר חתירה מסוימת שאינה מסכנת את האפיק. כאשר הצמחייה מתבססת והולכת, סחף מושקע בתחומי החתירה הזו והשיפוע חוזר לקדמותו או נותרים מעין מפלים קטנים מיוצבים.

כאשר נדרש מיתון השיפוע הטבעי (או הקיים מהסדרות קודמות), ולא ניתן או לא רצוי לפתל יותר את האפיק, יש להשתמש בתללות או במפלים קטנים. אורכן של התללות ומרווחי המפלים, נקבע בהתאם להפרש השיפועים ולהפרש הגבהים שבין המעלה למורד.

כאמצעי ייצוב נוסף, מקובל הציפוי באבן. כאן חייבים להקפיד על ההתאמה בין גודל האבן החציונית לבין מהירות הזרימה. יש להקפיד על אבן מדורגת המונחת על פילטר מתאים. בחפירת חתך האפיק, יש לקחת בחשבון גם את נפח האבן. דיפון באבן מקשה על פעולות התחזוקה - במיוחד

כלפי המעלה. אפשרות זו לא תמיד ישימה, עקב היווצרות מצבים הדורשים פעולה בקטעים שונים של האפיק, שלא תמיד נמצאים ברציפות. מצבים אלה מופיעים כתוצאה מנזק או מהתפתחות שמסכנת חיי אדם. תכנון נכון בוחן, בכל מקרה, את השפעות הפעולות בכל קטע על המצב במעלה ובמורד ונוקט באמצעים למזעור הפגיעות כתוצאה מההסדרה החלקית. בין האמצעים נמנים הגדרה של פשטי הצפה, הטיה לאיגום זמני או קבוע וכדומה.

מראי מקומות

בן-צבי, א'. (2008). הידרולוגיה. בתוך נחלים וניקוז - תהליכים הנדסה ותכן (ע' א' בן-צבי). רשות ניקוז שקמה-בשור והמכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון: 47-68.

בן-צבי, א'; גריניס, ל' (2008). הידרוליקה. בתוך נחלים וניקוז - תהליכים הנדסה ותכן (ע' א' בן-צבי). רשות ניקוז שקמה-בשור והמכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון: 25-45.

לסטר, ר'; לבני, ד'; גרינברג, א' (2008). ניקוז, סחף קרקע ונחלים: המסגרת המשפטית והמנהלית.

בתוך נחלים וניקוז - תהליכים הנדסה ותכן (ע' א' בן-צבי). רשות ניקוז שקמה-בשור והמכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון: 291-311.

לקח, י'; אלכסנדרוב, י'; לרון, י' (2008). הסחף הנחלי. בתוך נחלים וניקוז - תהליכים הנדסה ותכן (ע' א' בן-צבי). רשות ניקוז שקמה-בשור והמכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון: 97-128.

ענבר, מ' (2008). גיאומורפולוגיה נהרית. בתוך נחלים וניקוז - תהליכים הנדסה ותכן (ע' א' בן-צבי). רשות ניקוז שקמה-בשור והמכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון: 85-95.

פולק, ש' (2008). תכנון הידרולוגי באפיקי מים. בתוך נחלים וניקוז - תהליכים הנדסה ותכן (ע' א' בן-צבי). רשות ניקוז שקמה-בשור והמכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון: 229-232.

שטרית, נ' (2008). תחזוקה. בתוך נחלים וניקוז - תהליכים הנדסה ותכן (ע' א' בן-צבי). רשות ניקוז שקמה-בשור והמכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון: 251-258.



שיטפון בנחל חברון 2010



נחל סכר



נחל חתירה



הסדרת נחל גיאה - מושב ברכיה



מאגר ויסות - נחל בתרים



כנס הנדסה אזרחית ירוקה 2009 עם נשיא המכללה פרופ' יהודה חדד



כנס אקדמי באוניברסיטת בן גוריון בשנת 2006 בנושא ניהול אינטגרטיבי של נחלים



טקס הצגת תוכנית אב פארק נחל באר שבע עם השר להגנת הסביבה צחי הנגבי



ביקור נשיא המדינה שמעון פרס בפארק נחל באר שבע, 2010



כנס הצגת תוכנית אב נחל הבשור בשנת 2004 עם השרה לאיכות הסביבה - יהודית גאות



כנס הצגת תוכנית אב לפארק אופקים עם יו"ר קק"ל יחיאל לקט



טקס חנוכת מחצבת נבטים 2006 עם שר התשתיות בנימין בן אליעזר



חנוכת גן הפעמון 2004 עם יו"ר קק"ל יחיאל לקט



נחל באר שבע 2000 נחל לא מוסדר ביוב, מחצבות ופסולת



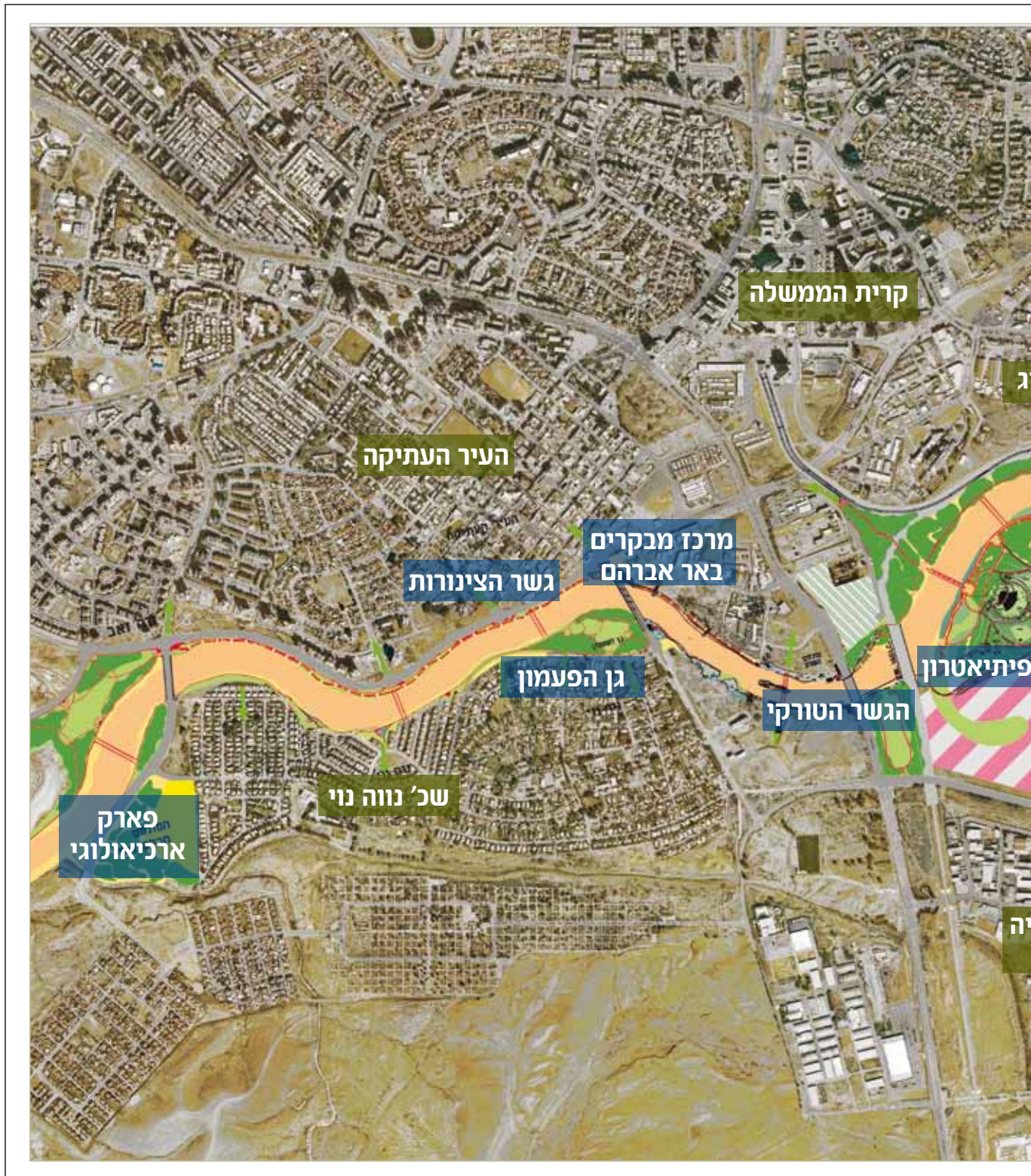
נחל באר שבע 2001 הסדרה ניקוזית, סילוק מזהמים

שיקום נחלים





נחל באר שבע 2010 תוכנית לפארק עירוני על גדות הנחל

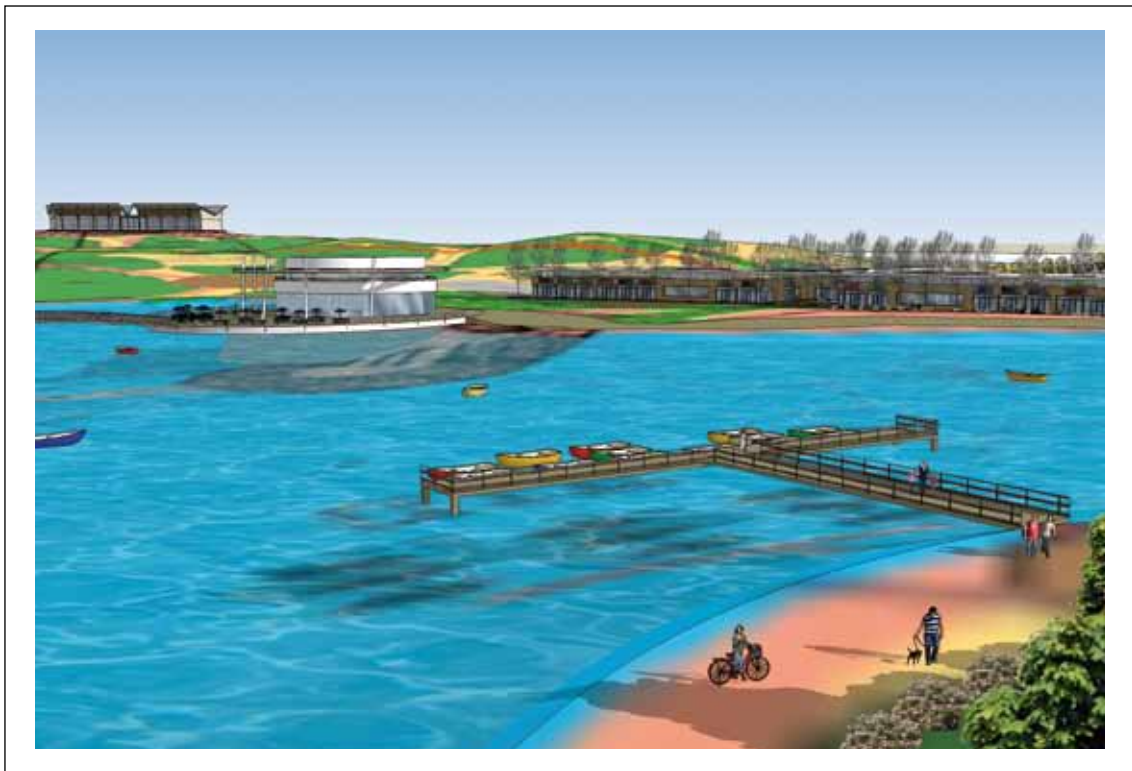




גשר הצינורות להולכי רגל בפארק נחל באר שבע



תיאטרון בפארק נחל באר שבע

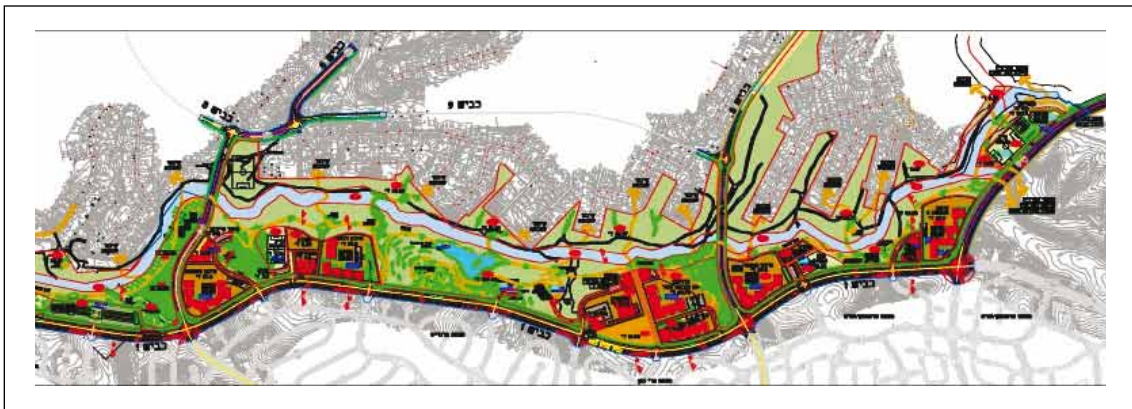


אגם נופי בפארק נחל באר שבע

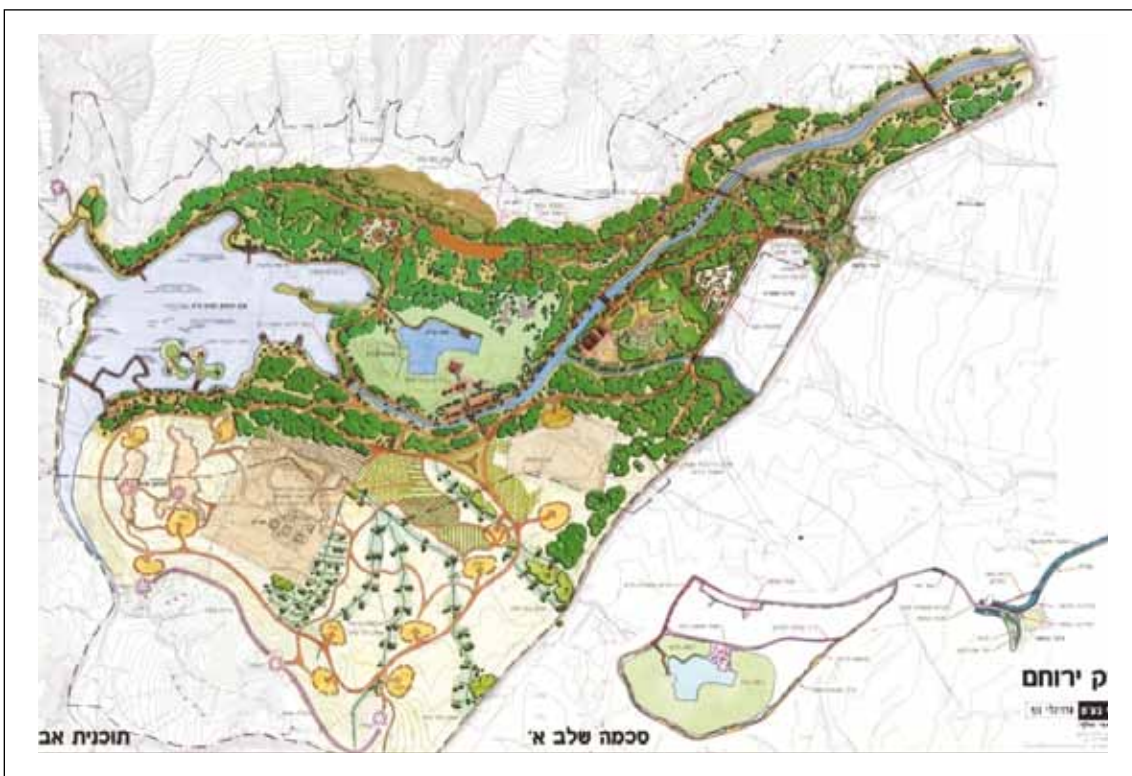


אגם באפיק הנחל - פארק נחל באר שבע

תוכניות שיקום נחלים



תכנון פארק נחל גרר



תכנון נחל ירוחם - פארק ירוחם

שימור קרקע

יצחק וולף¹; בהשתתפות צבי רבהון²

¹מהנדס חקלאי; ²מנהל האגף הבכיר לשימור קרקע וניקוז.

1. מבוא

קרקע ומים הנם המשאבים החיוניים ביותר להפקת תוצרת חקלאית, לכל גווניה. לכן שומה על האדם הרוצה להפיק את מרב הברכה ממשאבים אלה, לשמור עליהם מכל פגע. הקרקע איננה נחה לעולם – היא נסחפת ממקומה, ומהתרווחות הסלע נוצרת קרקע חדשה. קרקע הנסחפת ממקומה נחה במקום אחר ונספחת שם לקרקע הקיימת.

הכוחות הטבעיים הגורמים לסחיפת קרקע הם: מים – זרימה של מים, גשם, נחל או השקיה מלאכותית, נושאת אתה חלקיקי קרקע. רוח – הפועלת על קרקע חשופה, נושאת חלקיקים למרחקים גדולים.

חז"ל אומרים שנח התקין את המחרשה לטובת האדם (ראה בראשית ה' כ"ט ברש"י). זו היתה מהפכה חקלאית שהקלה על האדם לגדל את הצמחייה הרצויה לו, ולהפיק יכולים טובים. אבל יחד עם זה, כל פליחה של הקרקע מפרה את האיוון הטבעי וחושפת את הקרקע להשפעה ההרסנית של המים והרוח. עם התפתחות הטכנולוגיה ועם הגידול באוכלוסייה, גדלה גם הפרת האיוון הנעשית על ידי האדם; הוא משתלט על שטחים נרחבים יותר, ועם כלים בעלי עוצמה אדירה. כיום לא זו בלבד שהאדם חושף את הקרקע לכוחות הטבעיים, אלא הוא עצמו משנה את מבנה הקרקע; מיישר גבעות, סולל דרכים, חופר, חוצב ובונה, מעביר קרקע ממקום למקום, מכסה שטחים נרחבים בבטון ואספלט ומשנה סדרי בראשית.

רק בעשורים האחרונים התעוררו רשויות בארצות אחדות לדאוג לכך שבתהליך זה לא תהיה הפקרות, ולשמור את המשאב החיוני הזה גם לדורות הבאים. בארצות רבות, גם בישראל, חוקקו חוקים והקצו משאבים לשמירת הקרקע, ופותחו אמצעים ושיטות לשימוש נכון של הקרקעות. העיקרון המרכזי של חוקי שמירת קרקע חקלאית, הוא ממשק נכון. שמירה על קרקע פירושה ניהול נכון של אגן ההיקוות כולו והתאמת הגידולים

לסוג הקרקע ולמצבה הטופוגרפי, כמו כן התאמת האמצעים לקרקעות השונות. כל זאת גם בהתחשב בכלכליות הפעולות.

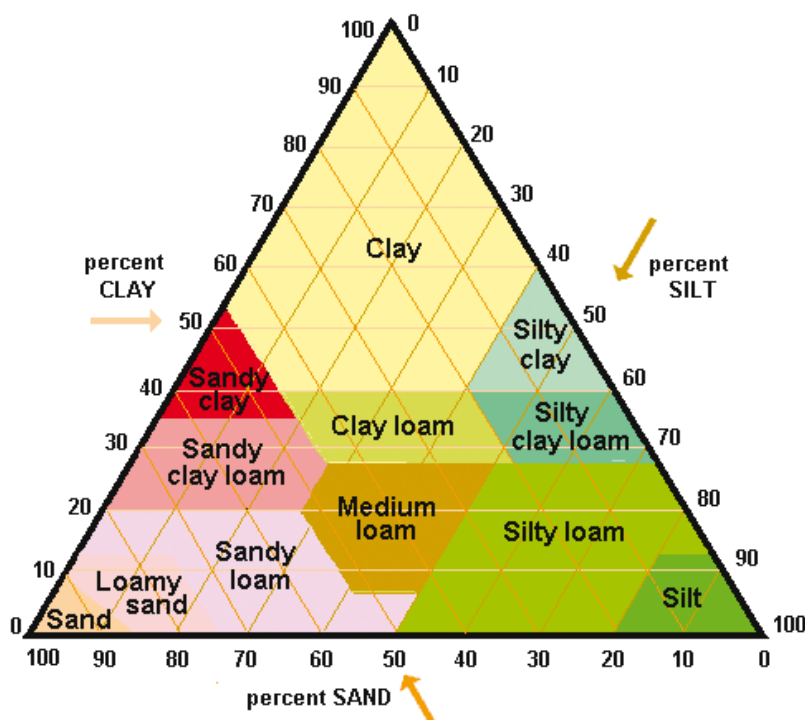
להלן ראשי פרקים של בעיות הסחיפה ושל פתרונות אשר התגבשו במשך השנים. אלו קווים כלליים בלבד, וכל בעיה טעונה התייחסות מיוחדת לגיבוש הפתרון המיוחד לה. הבורא הפקיד בידנו נכס חשוב זה לקיומנו ולקיום הדורות הבאים, אנו מצווים לשמור עליו ואז נזכה לברכתו: "וְנִתְּנָה הָאָרֶץ פְּרִיָּה וְאֶכְלֶתֶם לְשָׂבַע וְיִשְׂבַּתֶּם לְבָטָח עָלֶיהָ" (ויקרא כ"ה י"ט).

2. מה היא קרקע?

כדי להבין את התהליכים ולתכנן את האמצעים למניעת דלדול הקרקע, חשוב להבין את מרכיבי הקרקע, אופן התהוותה, והקשרים בין הקרקע לבין הסובב אותה; מים, אוויר, צמחייה וכדומה. הקרקע היא שכבת המסלע הניתן לפליחה באמצעים פשוטים. הקרקע שאנו רואים בעידן שלנו, נוצרת בתחילה מהתרווחות של סלע האם. אופי סלע האם, הוא הגורם העיקרי לסוג הקרקע הראשונית הנוצרת. הקרקע מורכבת מגרגרים המופרדים מסלע האם. המשקל הנפחי של הקרקע, תלוי במקום ובמידת הדחיסות של הקרקע. הוא נמצא בין הערכים 1.2 ו-1.8.

מבחינים בארבע פרקציות של קרקע לפי גודל הגרגרים:

- חרסית (clay) – גרגרים עד גודל 2 מיקרומטר (0.002 מילימטר).
 - טין (silt) – גרגרים בגודל 2 - 60 מיקרומטר (0.002-0.06 מילימטר).
 - חול (sand) – גרגרים בגודל 60 מיקרומטר עד 2 מילימטר.
 - חצץ (gravel) – גרגרים גדולים מ-2 מילימטר.
- לקרקעות בלי חצץ, מוגדר מרקם הקרקע לפי אחוז הרכבה מכל פרקציה: חרסית, טין וחול. הגדרת מרקם הקרקע נעשית לפי "משולש



תרשים 1: משולש ההגדרה של קרקעות

בגדות נהרות ונחלים ובעמקים. בקרקעות אלוביות, ככל שהן רחוקות ממקור היווצרותן, גדל אחוז הפרקציות הדקות.

● קרקע איאולית - קרקע שנוצרה מחלקיקים המוסעים ברוח ממרחקים ונוחתים על פני שטחים נרחבים. דוגמאות לקרקעות כאלה הן אדמות הלס בנגב והחולות הנודדים. גם בקרקעות אלה, הפרקציות הדקות והמינרלים הדקים יותר מרוחקים יותר מן המקור.

קרקע היא בית הגידול הטבעי לצמחים השונים המהווים מזון בסיסי לחי. כבר משחר ההיסטוריה למד האדם לגדל את הצמחים הרצויים לו ולסלק משדותיו את הצמחים המפריעים לגידולים התרבותיים. ברם, קרקע המכוסה בצמחייה, שמורה טוב יותר מפני סחיפה של מים ורוח.

3. סחף מים

בין גרגרי הקרקע יש חללים המכילים אוויר ומים. הימצאות המים בקרקע מתחלקת לפי הכוחות הפועלים על המים:

● מים ספוחים - מולקולות המים הנספחים לגרגרי הקרקע בכוחות האלקטרוכימיים. זו שכבה דקה העוטפת כל גרגר ומהווה גם "דבק" המגבש

ההגדרה" המוצג בתרשים 1. לדוגמה: קרקע המכילה 20% חרסית, 40% טין ו-40% חול, נקראת חמרה חרסיתית (clay loam). בדוגמה זו אנו רואים, כי לכמות קטנה של חרסית ישנה השפעה ניכרת על תכונות הקרקע.

הגרגרים נדבקים זה לזה בכוחות משיכה חשמליים ועל ידי המצאות מים ביניהם. ככל שהגרגרים קטנים יותר, שטח הפנים הסגולי (סכום שטח הפנים של כל גרגר וגרגר ליחידת נפח קרקע) גדול יותר. לכן ככל שכמות הפרקציות הדקות גדולה יותר בקרקע, הקוהסיביות (ההדבקות של חלקיקים זה לזה) גדולה יותר וקשה יותר לפילוח, זו "אדמה כבדה". לעומתה, ככל שהקרקע חולית יותר, היא קלה לפילוח ונקראת "אדמה קלה". בקרקעות חוליות וחצציות לא מתגבשים רגבים, אלא אם מעורבים בהם טין וחרסית.

ניתן להבחין בקרקעות בהתאם לאופן היווצרותן:

● קרקע מקורית - הקרקע במקום היווצרותה מהתרווחחות סלע האם. אלו הקרקעות ההרריות.

● קרקע אלובית - קרקע שנוצרה עקב סחיפת מים והרבדתה במורד הזרימה. קרקעות אלה מצויות

במקומם עד שיוכלו לחלחל לתוך הקרקע. מי גשם או המטרה מלאכותית המגיעים לקרקע, חודרים לתוכה. כל עוד כושר החדור גדול מעוצמת הגשם, כל המים חודרים. אחרי המטרה של מילימטרים ספורים (לפי סוג הקרקע ומצב העיבוד), כושר החדור פוחת והמים העודפים נאגרים על פני הקרקע. היות והקרקע איננה חלקה, נאגרים המים בשלוליות על פניה, ואלה יחדרו לתוך הקרקע כאשר הגשם ייפסק. אוגר זה נקרא "אוגר השהיה" (detention storage).

חשוב לציין כי בקרקעות טיניות (למשל אדמות הלס כנגב), נוצר על ידי מכת טיפות הגשם קרום בפני הקרקע, שמקטין מאוד את כושר החדור של מים לתוך הקרקע. בקרקעות אלו אין כמעט אפשרות להגדיל את כושר החדור (למעט שימוש בחומרים כימיים - סיד ופולימרים מתאימים). אבל ישנם אמצעים להגדיל את אוגר ההשהיה.

- צמחייה צפופה מונעת זרימה. הן על ידי אגירת מים על פני העלים, והן בשל הגבשושיות שיוצרים הצמחים.

- עיבוד השדה לאורך קווי הגובה. זהו אמצעי יסודי לשיטות שלהלן (שיחים, גידול בפסים, מדרגים). יתרונו בכך, שהוא מגדיל את חדור המים לקרקע וכך גם גורם לניצול טוב יותר של מי הגשם ומגדיל את היבולים.

הצורות המומלצות לעיבודים בקווי גובה, תלויות בשיפוע המדרון כפי שמומחש בתרשים 2.

- בשיפועים של 3% - 8%, אפשר לעבד בפסים או על ידי יצירת שיחים.

- בשיפועים תלולים יותר יש לבנות מדרגים (טרסות).

- בראשי ההרים והגבעות, בדרך כלל הקרקע כבר סחופה, וכדי לשמר את הקרקע בהם, ניתן לטעת עצים רק בכיסי קרקע שנותרו, לזרז את התרווחחות הסלע על ידי השורשים ולעצור סחף קרקע שמגיע אליהם.

5. מדרגים (טרסות) (תרשים 3)

זהו אמצעי קלאסי הנהוג אלפי שנים והוכיח את יעילותו. בתכנון המדרגים יש להתחשב בגורמים הבאים:

- השיפוע לרוחב המדרג
- הרווחים בין המדרגים

גרגרים לרגב גדול.

- מים נימיים (קפילריים) - הנאחזים בחלקיקי הקרקע על ידי מתח הפנים של המים עצמם, אם החללים שבין החלקיקים קטנים מספיק לצורך זה.

- מי כובד - מים שאינם נאחזים בקרקע ומחלחלים לשכבות נמוכות יותר בקרקע, בכוח הכובד (גרביטציה).

- מי נגר (מי שטף) - אם הספקת מים מגשם או מזרימה חיצונית, אינה נקלטת בקרקע, הרי הם נקווים על פני הקרקע. אם גם הקיבול העל-קרקעי איננו מספיק לאגור אותם, הם מחפשים מוצא וזורמים על פני הקרקע.

מי הנגר הם הגורם העיקרי לסחיפת קרקע, ובהם נעסוק בעיקר במאמר זה. הם גורפים אתם חלקיקי קרקע. כמות הגריפה, וגודל החלקיקים תלויים באנרגיה של זרימת המים.

מים הזורמים בשיפוע מתון ובספיקה סגולית (ספיקת מים ליחידת רוחב חתך זורם) קטנה, גורפים רק חלקיקים קטנים ובכמות קטנה. סחיפה כזו נקראת "סחיפה שטחית" (להבדיל מסחיפה ערוצית).

מים הזורמים בשיפוע תלול, גם אם הספיקה קטנה יחסית, כמו מים הפורצים משדה אל אפיק עמוק, הם בעלי אנרגיה גדולה ומסוגלים לגרוף כמויות גדולות של קרקע וכך נוצרות בתרונות.

מים הזורמים בתוך אפיק - כאשר הספיקה גדולה, מסוגלים לגרוף אתם גם אבנים גדולות. החתירה באפיק מתרחשת הן בתחתית האפיק, והן בדפנותיו, בעיקר כאשר מסלול האפיק איננו ישר. ככל שהנחל או הנהר גדולים יותר, הספיקה ומהירות הזרימה קובעים את האנרגיה הגורמת לסחיפה.

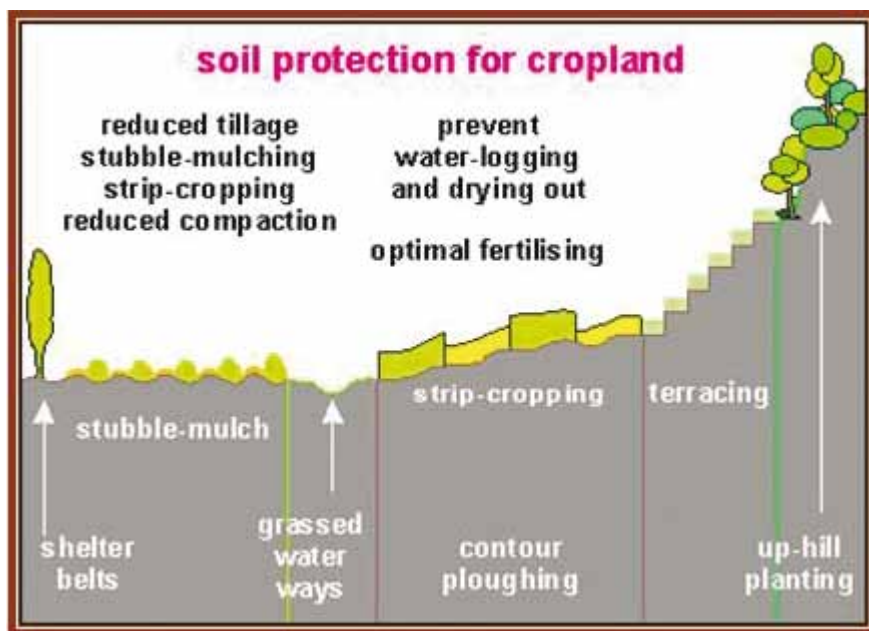
4. דרכי המניעה של סחף מים

קיימות שתי פעולות עקרוניות כדי למנוע סחף על ידי המים:

1. למנוע או לפחות להקטין, את זרימת המים ואת האנרגיה בזרימתם.

2. לנתב את הזרימה העודפת למקומות מוגדרים, ושם לבנות מתקנים המסוגלים לעמוד בפני הזרימה בלי סחיפת קרקע.

מניעה של זרימת מים בשדה (להלן יפורטו אמצעים), מתאפשרת על ידי השהיית המים

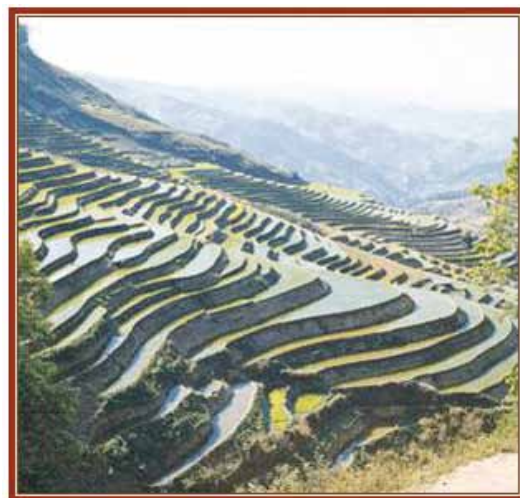


תרשים 2: צורות עיבוד מומלצות לעצירת סחף קרקע

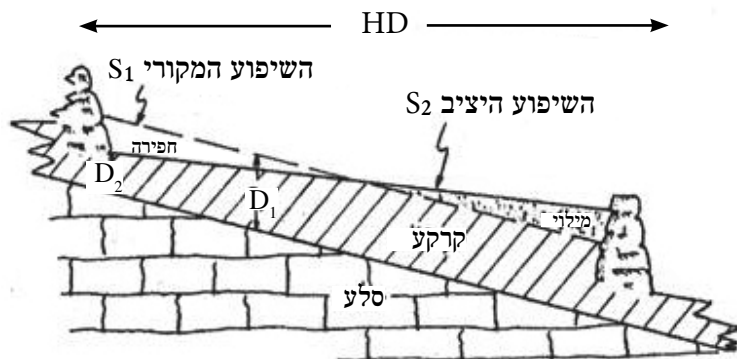
- השיפוע לאורך המדרג
- מבנה תמך המדרג

המדרג היציב ביותר, הוא המפולס לכל רוחבו. אולם מדרג כזה יקר ומקשה על העיבודים, כי הוא מחייב מרווח תמכים גבוהים ומרווח קטן ביניהם. ניתן להגדיל את השיפוע הרוחבי עד השיפוע הטבעי היציב של הקרקע (תרשים 4). כן מומלץ לעבד את הקרקע על ידי דיסק דו כיווני או מחרשה דו כיוונית להפיכה ודחיפה מתמדת של הקרקע כלפי מעלה המדרון. המרווח האופקי בין התמכים, יחושב לפי הנוסחה הבאה:

$$HD = 2(D_1 - D_2) / (S_1 - S_2)$$



תרשים 3: תמונת מדרגים



תרשים 4: חתך לרוחב מדרג

שימור קרקע

בכלים מכנים. יש להדק את הסוללה משני צדיה. העיבודים בסוללה יהיו רדודים בלבד, כגון דיסוק אשר יופעל כך שיעלה את הרגבים לכיוון קדקוד הסוללה.

מבחינים בין שני סוגי שיחים:

- שיחים סופגים - המתאימים למקומות בהם כמות המשקעים קטנה, המדרון איננו תלול מ-4%, ותנאי החדור והחלחול טובים. שיחים כאלה מתכננים ללא שיפוע אורכי, אבל עם קיבול גדול דיו כדי לקלוט את כל הגשמים הצפויים.
- שיחים מנקזים - המתאימים לשיפוע עד 12% (10% בשטחים מעובדים) ולשטחים בהם ערוצים או שקעים מבתרים את השדה. הרווח האופקי בין שני שיחים, מחושב לפי הנוסחה:

$$HD = 200 / S + 10$$

כאשר S שיפוע המדרון באחוזים, HD המרווח האופקי בין שיחים במטרים.

השיפוע לאורך שיח מנקז לא יעלה על 0.3% בקרקעות מחלחלות, ולא יותר מ-1.5% בקרקעות בעלות חלחול אטי (השיפוע הרצוי הוא בתחום 0.5% עד 1.0%). משיקולים פרקטיים של עיבוד השדה, יש לשאוף לתכנון שיחים מקבילים.

תכנון השיחים נעשה על גבי מפה טופוגרפית. מסמנים תחילה את "שיח המפתח" שהוא בדרך כלל השיח העליון בשדה. סימון השיח יעקוב קו גובה ויתרחק ממנו מהרס אל ערוץ המוצא, בהתאם לשיפוע האורכי. בהתאם לתכנית זו, מסמנים את השיחים בשדה. לאחר הסימון הראשוני ניתן ליישר במידת מה את הפיתולים. ברכס ניתן להעלות את התוואי, ואז להעמיק את התעלה. בחציית ערוץ ניתן להוריד את התוואי ולבנות סוללה גבוהה יותר (תרשים 6). כל סטייה כזו כרוכה בעבודות עפר ויישורים, ואין להפריז בזה משום שכך מתגלית שכבה לא פורייה. הספיקה שתעלת השיח צריכה להעביר, חייבת להיות גדולה מכמות הנגר הצפוי

כאשר D_1 עומק הקרקע הנוכחי, D_2 עומק הקרקע המינימלי הדרוש לגידול, S_1 השיפוע המקורי של המדרון, S_2 השיפוע היציב של הקרקע, HD המרווח האופקי. כל המידות במטרים; השיפועים במטר למטר.

גובה התמך הבנוי, מחושב לפי הנוסחה הבאה:

$$H = (H_1 + X_1) + (H_2 + X_2)$$

כאשר H גובה התמך, H_1 עובי שכבת הקרקע הנחפרת לרגלי התמך למדרג התחתון, H_2 עובי שכבת הקרקע הנוספת במעלה התמך, X_1 תוספת לעיגון התמך (20-30 ס"מ), X_2 תוספת ביטחון בראש התמך, למקרה של הקטנת השיפוע הרוחבי.

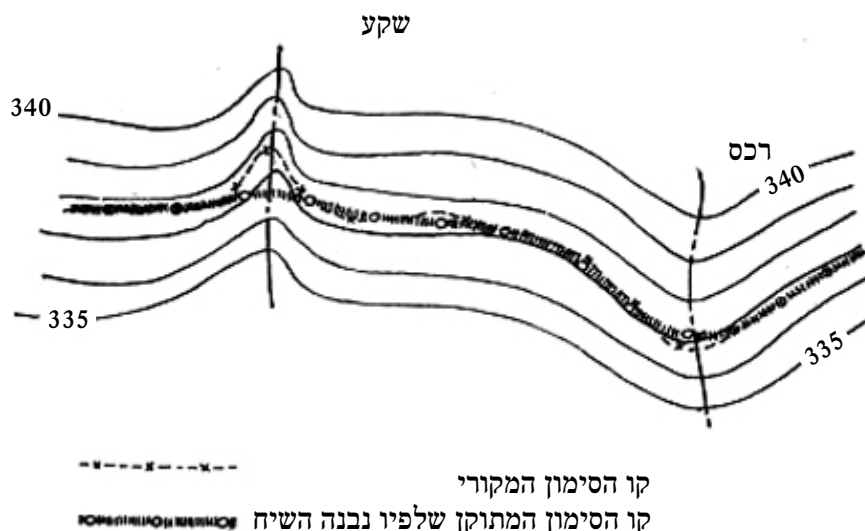
התמך בדרך כלל נבנה מאבנים גדולות המצויות בשטח, אולם יכול להיבנות גם מבטון, גביונים (אבנים קטנות המוכנסות לארגז רשת, ראה להלן בסעיף על מפלים) ואפילו מסוללת עפר מהודק ומיוצב על ידי צמחייה בחלקו החשוף. בין תמך מבטון או אבנים גדולות לבין קרקע המדרג הנתמך, צריך להיות פילטר מחצץ וחול או אריג גיאוטכסטיל, כדי למנוע גריפת קרקע בזרימות מים בין האבנים. סוללות עפר אינן מומלצות לתמכים הגבוהים מ-2 מטרים. השיפוע לאורך המדרג לא יעלה בדרך כלל על 0.5%, כדי שלא תהיה גריפה לאורכו בעת זרימה שאיננה נקלטת במדרג. המוצא חייב להיות אל אפיק או דרך מים מוסדרת, כפי שיפורט להלן.

6. שיחים

שיח הוא תעלה שקוטעת מדרון וקולטת את מי הנגר ממקטע המדרון שמעליו. החתך הרוחבי שלו מתואר בתרשים 5. את התעלה בונים מקרקע מקומית הנערמת לסוללה במורד המדרון ומעוצבת בשיפועים מתונים שלא יעלו על 1:8, כדי לאפשר את עיבודם לאורך התעלה. רוחב הדופן הפנימית תהיה לפחות 4.0 מ' כדי לאפשר עיבוד זוריעה



תרשים 5: חתך אנכי לרוחב שיח



תרשים 6: סימון שיח בשני שלבים

מהשטח המתנקז לשיח. ספיקת השיא הצפויה, מחושבת לפי הנוסחה הרציונלית:

$$Q_R = C \cdot I \cdot A_S / 3600$$

כאשר A_S שטח אגן ההיקוות (בדונמים) של השיח, כלומר מכפלת רוחב המרווח (מ') שבין שני שיחים באורכו (מ'), מחולק ל-1000, I עוצמת הגשם המרבית הצפויה במ"מ לשעה, C מקדם הנוסחה הרציונלית (תלוי בטיב הקרקע ובתכסית), Q_R הספיקה הצפויה בתעלת השיח (במ"ק לשנייה). את ספיקת המים בתעלה, מחשבים לפי נוסחת מנינג (Manning):

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

7. דרך מים

דרך מים היא תעלה הניצבת לקווי הגובה, וקולטת את הנגר מתעלות השיחים ו/או מתלמים המעובדים לאורך קווי הגובה. על דרך המים להיות בעלת חתך רוחבי מתון, כדי לאפשר מעבר של כלים לעיבוד השטח, לזריעה ולקציר (תרשים 7). את הספיקה הצפויה ואת ספיקת דרך המים, מחשבים כמו בתעלת השיח. כמובן שכאן צפויות ספיקות גדולות יותר, ככל שהן מצטרפות מן השיחים. היות והשיפוע לאורך דרך המים הוא תלול, תהיה מהירות הזרימה גדולה, והזרימה תחתור בקרקעית התעלה. כנגד אפשרות החתירה האורכית הזו יש לדאוג לייצוב התעלה. לייצוב תעלות יש מספר שיטות, וניתן לנקוט בכמה מהן במשולב.

- ייצוב בצמחייה - השיטה הזולה ביותר, מתאימה לשיפוע אורכי עד 4%, ומהירות זרימה עד 2.0 מ' לשנייה. חשוב שיהיה כיסוי מלא של הקרקעית והדפנות בצמחייה צפופה.

כאשר A_S שטח אגן ההיקוות (בדונמים) של השיח, כלומר מכפלת רוחב המרווח (מ') שבין שני שיחים באורכו (מ'), מחולק ל-1000, I עוצמת הגשם המרבית הצפויה במ"מ לשעה, C מקדם הנוסחה הרציונלית (תלוי בטיב הקרקע ובתכסית), Q_R הספיקה הצפויה בתעלת השיח (במ"ק לשנייה). את ספיקת המים בתעלה, מחשבים לפי נוסחת מנינג (Manning):

$$Q_R = C \cdot I \cdot A_S / 3600$$

כאשר A_S שטח אגן ההיקוות (בדונמים) של השיח, כלומר מכפלת רוחב המרווח (מ') שבין שני שיחים באורכו (מ'), מחולק ל-1000, I עוצמת הגשם המרבית הצפויה במ"מ לשעה, C מקדם הנוסחה הרציונלית (תלוי בטיב הקרקע ובתכסית), Q_R הספיקה הצפויה בתעלת השיח (במ"ק לשנייה). את ספיקת המים בתעלה, מחשבים לפי נוסחת מנינג (Manning):

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

$$R_h = A / P \quad Q = A \cdot V$$

כאשר A שטח החתך המורטב בתעלה (מ"ר), P אורך מגע המים עם קרקעית ודפנות התעלה (מ'), R_h הרדיוס ההידרולי (מ'), S השיפוע לאורך התעלה (מ"/מ'), n מקדם ההתנגדות (מקדם החספוס) של תחתית התעלה ודפנותיה, V מהירות זרימת המים בתעלה (מ' לשנייה), Q ספיקת התכן של התעלה (מ"ק לשנייה). ערכי n לתעלות בשדה: קרקע חשופה חלקה - 0.022, קרקע עם ייצוב צמחי עשבוני - 0.025, מצע אבנים - 0.030.

שטח חתך התעלה צריך להיות גדול מספיק, כדי שהסוללה תבלוט מעל פני המים בגובה 20-30 ס"מ, ותמנענה גלישות מעל הסוללה. הפרש גובה מינימלי בין תחתית השיח לבין הקודקוד, צריך להיות 0.5 מ'. ספיקת התכן לא תהיה קטנה



תרשים 7: חתך לרוחב דרך מים, עם ייצוב בצמחייה

התעלה במוצא המים בתעלה התחתונה, כדי לשבור את האנרגיה של הנפילה (תרשים 9).

החומרים לבניית מפלים:

- אבנים - במקומות בהם השדות טעונים סיקול, ניתן לנצל את האבנים לבניית המפלים. חשוב לרפד את האבנים בחצץ וחול או בכד גיאוטכסטיל, כדי למנוע חתירה תחתן. מומלץ שגובה המפל לא יעלה על מטר אחד.
- גביונים - ארגזי רשת מוכנים הממולאים באבנים (רצוי להשתמש באבנים מזוותות ולא מעוגלות כמו חלוקי נחל), מהם בונים מבנים לייצוב (תרשים 10).

- בטון - ניתן לבנות מפלים גבוהים בתכנון מיוחד, אולם מפלים אלה יקרים מאוד. יש לדאוג לייצוב המגע בין הקרקע הטבעית לבין הבטון, אפשר על ידי חרסית שמנה, אחרת תתאפשר זליגת מים במשטח המגע וגריפת הקרקע מתחת לבטון או מצדיו.

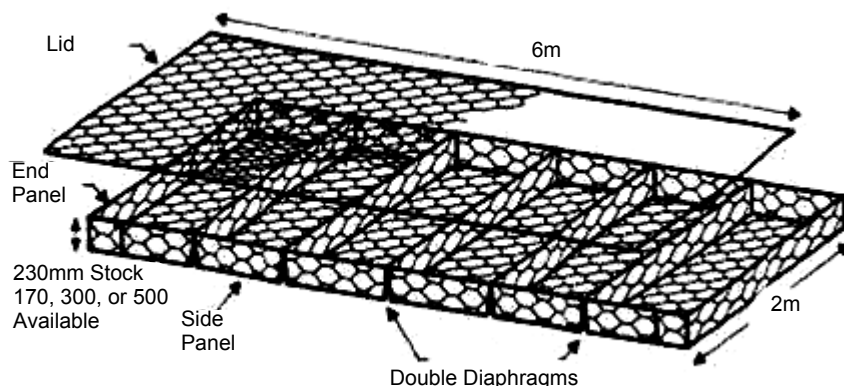
- גזעי עצים נעוצים בקרקע בצפיפות - מתאים למפלים עד גובה נפילה של חצי מטר. יש לרפד את מעלה המפל בכד גיאוטכסטיל או בדרך אחרת, כך שמים לא יעברו דרך הגזעים ויגרפו את הקרקע מהמעלה.

- ייצוב על ידי אבנים - מאבנים גדולות משולכות או "מזורוני רנו" (reno) העשויים ארגזי רשת עם אבנים קטנות (תרשים 8). אפשרי עד שיפוע של 12%. יש לרפד את האבנים הגדולות בחצץ וחול או להניחם על יריעת בד גיאוטכסטיל, כדי למנוע חתירה מתחת לאבנים.
- מיתון השיפוע האורכי של דרך המים על ידי מפלים - בניית מפל גורמת למילוי האפיק במעלה המפל ולחתירה מסוימת במורדו. המרחק האופקי בין שני מפלים, יחושב לפי הנוסחה הבאה:

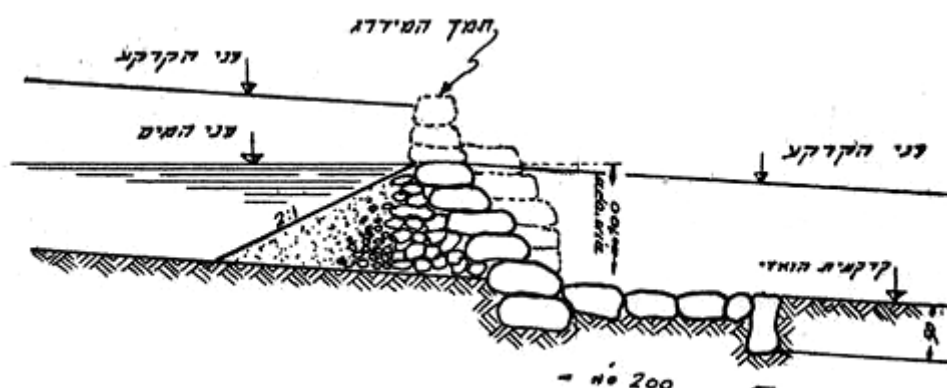
$$D = (H_u + H_d) / (S_n - S_p)$$

כאשר H_u גובה המפל מעל פני הקרקע הטבעית (ס"מ), H_d גובה הגריפה המשוערת במורד המפל (ס"מ), S_n שיפוע האפיק הקיים (אחוזים), S_p השיפוע הרצוי בו לא תהיה גריפה בתחתית האפיק (אחוזים), D המרחק בין המפלים (מטרים).

במורד המפל, עומק דרך המים גדול מאשר במעלה המפל. כדי למנוע נפילת מים בגובה גדול מתעלת השיח (הגורם לחתירה לאחור), יש לתכנן את כניסת תעלות השיח לדרך המים במעלה המפל. יש לבנות למפל "כנפיים" בגדת התעלה, הן במעלה והן במורד. יש לייצב גם את קרקעית



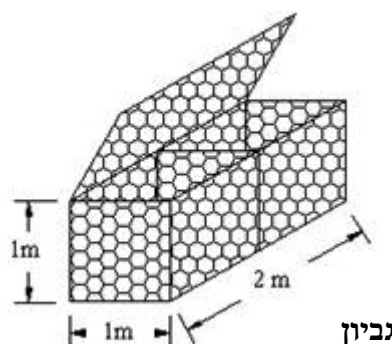
תרשים 8: מזורוני "רנו"



תרשים 9: חתך סכמטי של מפל אבנים



מפל בנוי גביונים



גביון

תרשים 10: מפל גביונים

הקיצוץ והנגר והסחף מהפסים שעליו ייעצרו בו. במשך החורף ייזרעו הדגן החורפי והשחת וכאשר יעובד פס הדגן הקיצי, כבר יהיו אלה עם צמחייה שתעצור את הנגר מהפס המעובר. את הדגן הקיצי של העונה הבאה זורעים עם קציר השחת, וחוזר חלילה. שיטה זו מתאימה לאזור שחון למחצה בגידולי בעל, ואיננה מצריכה אמצעים אחרים. הסחף איננו נעצר לגמרי, רק מואט באופן משמעותי (תרשים 11).

שיטה דומה, היא שתילת פסי מגן צמחיים לאורך קווי הגובה. הצמחים יכולים להיות מהצמחייה הטבעית המצויה או צמחייה מסחרית, ובלבד שהשתילה תהיה צפופה וסבוכה דיה כדי לעצור את הסחף. במשך הזמן נוצרים מדרגים נמוכים. לפיכך, המרווח האופקי בין פסי המגן יחושב בדומה לחישוב המרווח האופקי בין מדרגים. אלא שיש לחשב שגובה המדרג לא יעלה על הגובה שהצמחייה השתולה תוכל להחזיק.

• מתקן מענפים וזרדים - עשוי בצורת משפך אלכסוני. מתקן כזה מחייב פיקוח צמוד ותיקונים מתמידים.

טרקטור החוצה דרך מים בעיבוד השטח, יעלה את כלי העיבוד ולא יעבד את דרך המים. רצוי לעבד עם טרקטור אופני, כי טרקטור שרשרות מקלקל את הייצוב, אם זה ייצוב בצמחייה או באבן. מעבר בקרבת מפל, מחייב משנה זהירות בעקיפת המפל.

8. גידולי פסים

אמצעי זה מבוסס על ניצול סגולות צמחים צפופים שבמחזור הזרעים, לעצירת מי הנגר והחדרתם לקרקע ובלימת תהליכי התערצות. אמצעי זה בא רק בעיבוד בקווי גובה, ומשמש לו לעזר. השרדה מחולק לפסים לפי קווי הגובה, והגידולים באים בו לפי הסדר במחזור הזרעים. אם, לדוגמה, המחזור כולל שחת, דגן קיצי ודגן חורפי, יתחיל החורף עם כיסוי השלף של הדגן



עיבוד בפסים בגידולים שונים



פסי מגן

תרשים 11: גידולי פסים

עיבוד יעודי "חופר" גומות קטנות בנפח של כליטר אחד בצפיפות של כ-10 גומות למ"ר (תרשים 12). עובי האיגום המחושב על כל פני השטח, כ-10 מ"מ. מתאים מאוד לגידולי בעל בקרקעות הלס של הנגב הצפוני. מול הגדלת ניצול מי הגשם וצמצום הסחיפה, הגימור מחייב השקעת אנרגיה ביצירת הגומות ותוספת זרעים לקיזוז ההפרעה בפני השטח. כמו כן, הגומות פוגעות ביעילות הגיבוב וכך ביכול הקש שנאסף. בנוסף לכך, בשנים שחונות הגימור בדרך כלל לא אפקטיבי ועלול לגרום לפחיתת יכול.

2. סיכור, מיושם בגידולי שורה. סכרים ב"תעלות" שבין תלמים או ערוגות כולאים את מי הגשם, כנראה בתמונה (תרשים 13). עובי האיגום 40 עד 60 מ"מ. השיטה מתאימה לתפוחי אדמה חורפיים וכן לשטחים שהוכנו לזריעה אביבית

9. אצירת מי גשם ונגר בשדה

כפי שצוין בפרק 4, צמצום הנגר מקטין מאוד את סחיפת הקרקע. עוצמות שיא של הגשם אף אם משכן קצר, גורמות לספיקות נגר רגעיות גבוהות מאוד שנוזקן מרובה. יצירה של תאי איגום קטנים בשדה, מאפשרת קליטה והשהייה של הגשם העודף סמוך מאוד למקום ירידתו וחדירתו לקרקע, בפרקי הזמן שבין שיאי עוצמת הגשם. מלבד צמצום הסחף, לפעולה זו תועלת כלכלית חשובה בהגדלת ניצול הגשם לגידולים החקלאיים. אצירת מי גשם בשדה, אפקטיבית במיוחד באזורים צחיחים למחצה ובקרקעות שבהן הגשם יוצר קרום בפני הקרקע.

בישראל נהוגים (לצערנו בהיקף שאינו נרחב), שני דגמים של אצירת מי גשם:

1. גימור, מיושם בגידולי שדה בזריעה חופשית (תבואות חורף לסוגיהם). במהלך הזריעה, כלי



תרשים 12: שדה חיטה מגומם - הקרקע לס



תרשים 13: סכרורים בערוגות תפוחי אדמה - הקרקע חמרה

במכלול האגרוטכניקה של חקלאות המשמרת קרקע, מים, משאבי טבע אחרים ואיכות סביבה. המציאות מלמדת שמשדות שלף, ויותר מכך משדות עם חיפוי קש, לא נוצר כמעט נגר גם לא במהלך סופות גשם קיצוניות. הנגר שבכל זאת נוצר בשדות מדרוניים או שמגיע משטח חולש במעלה האגן, לא גורם לסחיפת קרקע בגלל החוזק של קרקע בלתי מופרת והשריון שמעניקה רשת השורשים של הגידול הקודם. ויתור על פליחת הקרקע חוסך אנרגיה רבה, על כל המשתמע מכך, ועלויות משמעותיות למגדל. כמו כן צמצום סחיפת הקרקע כמעט לאפס, מקטינה את הדרישה לדישון וגם בכך יש תרומה לחיסכון באנרגיה ובעלויות. לעומת זאת, אי פליחה מציבה אתגרים בתחום

מוקדמת כמו כותנה ועגבניות לתעשייה. הסיכרור אפקטיבי במיוחד לקרקעות החמרה בשטחים הגליים של השרון, בהם גידולי שורה ללא אמצעי שימור קרקע גורמים לנזקי סחיפה חמורים במיוחד, ולשטחי שלחין באדמות הלס. החיסרון של הסכרור הוא בהפרעה למעברי עיבוד חיוניים בחורף, כגון ריסוסים. באזורים גשומים או בחורפים גשומים, הסיכרורים עלולים להביא לעודף רטיבות בחורף ולהתייבשות מאוחרת באביב.

10. אי פליחה - זריעה באפס עיבוד

זריעה באפס עיבוד על שלפים וקש של הגידול הקודם (תרשים 14), היא הפעולה הדומיננטית



תרשים 14: זריעה באי פליחה

11. בתרונות

שטחים הסמוכים לנחלים עמוקים, מנקזים את מי הנגר אל הנחל, לאורך מסלולים שקרקעיתם עמוקה מפני השטח בצדדיהם. היות והפרש הגובה בין השטח לבין אפיק הנחל הוא גדול, אנרגיית המים גדולה, המים סוחפים את הקרקע מגדת הנחל ונוצרת שם חתירה. חתירה זו מתקדמת לאורך מסלול הזרימה לתוך השטח, אפילו אם הוא מישורי. במשך הזמן נוצר שם כעין אפיק משני עמוק, אשר אליו זורמים מי נגר מכל הכיוונים. כך נוצרים בתרונות (תרשים 16).

קשה מאוד לשקם בתרונות במצב מתקדם ולהפוך אותם לשדה שלחין או בעל. הניצול הטוב לשטח זה הוא הכשרתו לנטיעת יער או צמחי מרעה, על ידי טשטוש המהמורות. חשובה יותר עצירת החתירה אל תוך השדה למעלה. הפתרון הפשוט הוא לבנות מפל בכל מקום בו מתחילה חתירה; אך מפל כזה הוא גבוה, עלותו גבוהה מאוד, ובדרך כלל נדרשים מפלים כאלה בכמה מקומות בשדה. כדי לחסוך מפלים, אפשר לחפור תעלה מאספת לאורך הגדה (כמו תעלת שיח) ולהפנות את הזרימה אל מפל אחד במורד השטח.

12. ניקוז עילי

בשטח חקלאי מישורי פני הקרקע אינם בהכרח מישוריים, ולא פעם מוצאים שקעים מקומיים בהם נקווים מי גשם ומי השקיה. הדבר ניכר בעיקר בגידולי שורה ובתלמים ישרים, אשר אינם מעובדים לאורך קווי הגובה. התוצאה היא שבמקומות כאלה

הגנת הצומח ומיכון. הפרקטיקה מחייבת מחזור של חריש ו/או עיבודים אחרים אחת לכשלוש שנים. על מנת שלא לחשוף שטח מדרוני גדול לסחיפה בשנת העיבוד, יש לחלק את המדרון לפסים, כאשר בכל שנה רצועות צרות יחסית בהיקף כולל של כשליש מהשטח מעובדות ושני שליש נזרעים באפס עיבוד. האפקט מבחינת שימור הקרקע דומה לעיבוד בפסים שתואר בפרק 8. חשוב להדגיש, שאי הפליחה מחוברת לקונספט הרב צדדי של חקלאות בת קיימא, ולכן יש לה גם השלכות על התרבות החקלאית ועל חוסנה ואיכותה של הקהילה החקלאית.

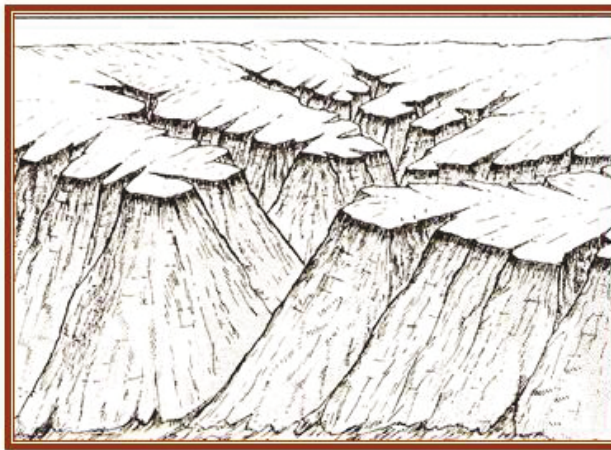
אי פליחה וחיפוי בצמחייה כשיטה לשימור קרקע ומים, מיושמת גם במטעים, היא אפקטיבית במיוחד בנשירים הנטועים על גודריות ובמטעים צעירים. בין רצועות העצים זורעים דגנים, לרוב שיבולת שועל. מועד הכיסוחים מותאם כך שיישארו מספיק זרעים להתחדשות הצמחייה בעונה הבאה מצד אחד, אך לא בכמויות שיגרמו לריבוי נברנים מצד שני. הזריעה עצמה נעשית בדרייל מיוחד למטעים וללא פליחה. למעט הזריעה, לא נעשה כל עיבוד אחר שחודר לתוך הקרקע. את הכסח של הצמחייה מפנים לפסי העצים ליצירת חיפוי מנותק, שמגן על קדקוד הגדודית מסחיפה בחורף ומהתייבשות בקיץ (תרשים 15). חיפוי תמידי מלא של כל פני הקרקע, מאפשר התפתחות וקיום רשת שורשים סמוך לפני הקרקע, בתנאי אוורור מיטביים וללא סידוק. בכל מספר שנים יש צורך לחדש את הזריעה היזומה.



תרשים 15: חיפוי קרקע של מטעים, בצמחייה חד שנתית (שיבולת שועל)



שלב סופי: קרקס אירוסניכי בנחל סחף



שלב התחלתי של חתירת בתרונות אל תוך שטח מישורי, עקב הפרש הגובה בין פני השטח לבין הנחל

תרשים 16: התפתחות בתרונות - אדמות הלס ליד בארי

מאספות יהיו בקצות השטח או במקומות מוגדרים בתוכו (קצה של קו השקיה וכיוצא בזה). תעלות השדה יתנקזו אל תעלה מאספת, שתהיה לאורך אפיק טבעי קיים. אם התנאים מאפשרים, ניתן ליישר את התוואי בהתאמה לתכנון השדה, וכך להרוויח עוד שטח לעיבוד האינטנסיבי (תרשים 18).

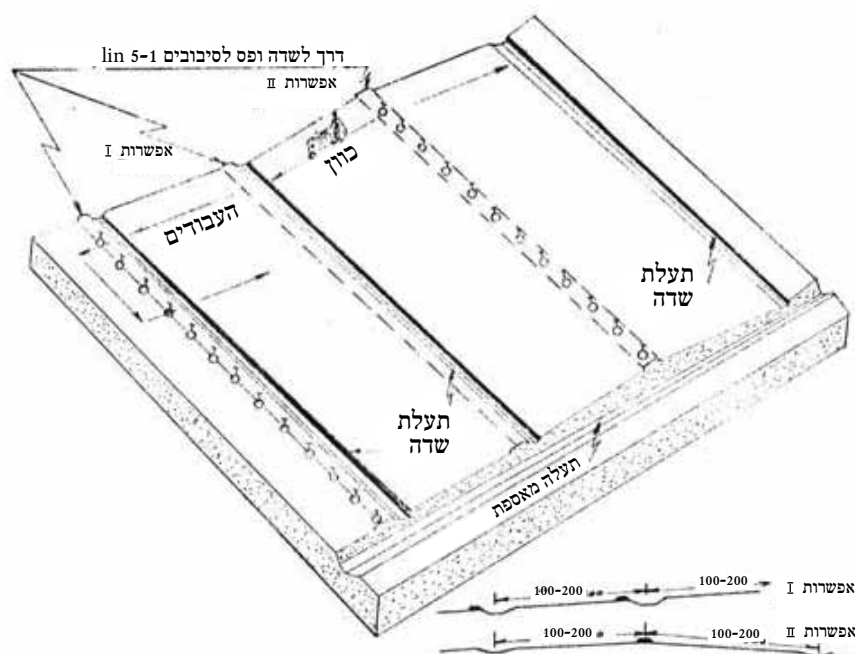
13. ניקוז תת קרקעי

בשטחים מישוריים נפוצה התופעה של בעיית

מצטבר עודף מים, הגורם לחוסר אחידות הגידול ומפריע לטיפולים הבאים (ראה תרשים 17). לפני כל תכנון של יישורים ודרכי מים, יש לערוך סקר קרקע מפורט כדי לדעת עד איזה עומק מגיעה הקרקע הפורייה שבפני השטח, ולא תתגלה קרקע סטרילית בלתי פורייה. כדי לקבל שדה במשבצת מלבנית נוחה לעיבודים יעילים, יש לתכנן את השדה כך שלאורך קו העיבוד יהיה שיפוע מינימלי רצוף של 3%-5%, כדי שעודפי מים יתנקזו ממנו אל קצה השורה. תעלות שדה



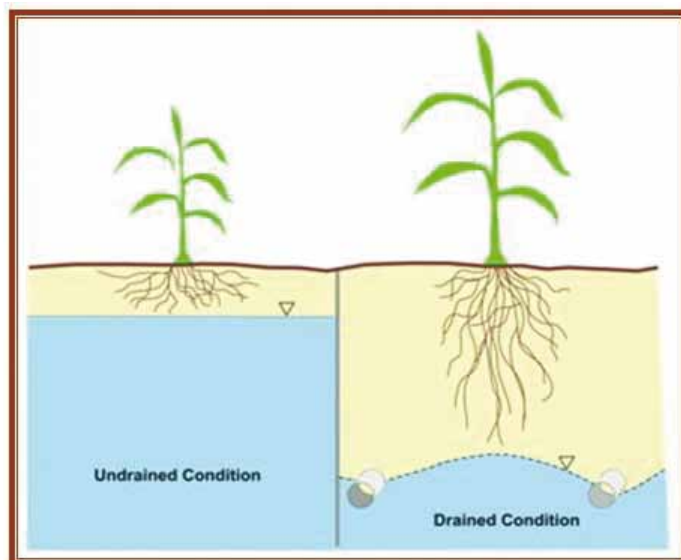
תרשים 17: כתם רטיבות ותוצאתו



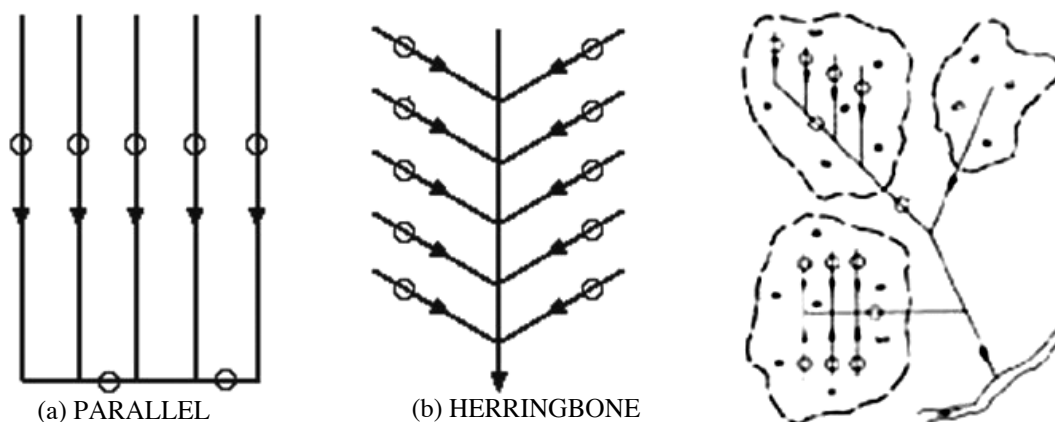
תרשים 18: דוגמה לתכנון יישורי קרקע בשדה שלחין

אשר איננה מאפשרת לצמחים לשרוד. הפתרון לבעיה זו הוא התקנת מערכת ניקוז תת קרקעי. לפני תכנון ניקוז תת קרקעי, יש לערוך בדיקות למציאת מקור המים. כמו כן יש למפות את שכבות הקרקע השונות ולבדוק את השתנות גובה פני המים בעונות שונות. יש לבדוק גם את מליחות המים והקרקע בשטח הנגוע. אם נמצא, למשל, כי מקור המים הוא ממי תהום המתנקזים לשדה מגבעה סמוכה, ייתכן ומספיק להכניס נקז

ניקוז תת קרקעי. מתחת לשכבת העיבוד קיימת שכבה אטימה (למשל "נזאז" במישור החוף), אשר מונעת מהתנקזות מי הכווד לעומק (תרשים 19). במצב בלתי מנוקז, מי התהום הגבוהים מונעים התפתחות השורשים ובשל כך הצמחים אינם מתפתחים כראוי. במקרים חריגים, כאשר הקרקע איננה מיושרת, מבצבצים המים גם מעל פני הקרקע. מים אלה מתאדים ומשאירים את המלחים בפני הקרקע. כך נמצאת הקרקע בתהליך התמלחות,



תרשים 19: ניקוז טבעי של תת הקרקע



תרשים 20: מבנה רשת ניקוז תת קרקעי

כל המים הנאספים ויוציא אותם אל מוצא מתאים (ואדי, אגם וכיוצא בזה), זו צורת המקבילית. אם השיפוע בשדה מתון מאוד, נהוג להניח את הנקזים בצורת "שדרת דג" עם מאסף עמוק אחד בתוך השטח (תרשים 20). לעתים כדאי להניח נקזים רק במקומות בהם מתגלה בעיית הניקוז, כדוגמת המוצג בחלקו הימני של תרשים 20.

הנקז המקובל והזול ביותר, הוא מצינור שרשורי מנוקב. על מנת שהנקבים לא יתמלאו בחלקיקי קרקע, עוטפים אותם לפי הצורך, תלוי בסוג הקרקע, בבד גיאוטכני. יש מפעלים המספקים את הצינור עם הבד (תרשים 21, ימני). אם הנקז מונח בתוך שכבה מוליכה, אפשר להניח את הצינור השרשורי עם השרוול מבד גיאוטכני על ידי "מקונל" המחדיר את הנקז לקרקע לפי השיפוע, ללא צורך בפתיחת תעלה. אם הנקז מוכנס לשכבה אטומה,

מאסף למרגלות הגבעה, וכך לקלוט את זרימת מי התהום. אם הבעיה קיימת בכל השדה, יש להכניס רשת נקזים שיורידו את מפלס המים עד עומק בית השורשים. בדרך כלל מספיק עומק של 80-100 ס"מ. אם יש צורך בשטיפת מלחים, יש להעמיק קצת יותר. רצוי שלא לחדור אל שכבת קרקע אשר המוליכות ההידרולית שלה נמוכה.

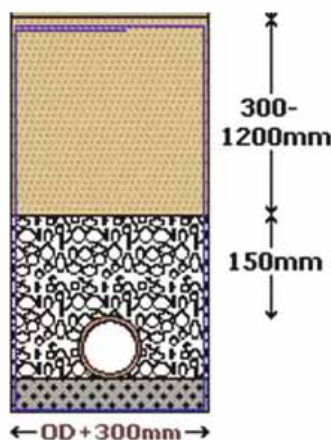
המרווח האופקי בין הנקזים, תלוי במוליכות ההידרולית של שכבות הקרקע. בקרקעות קלות בעלות מוליכות גבוהה, די בנקז בכל 50-60 מ'. בקרקעות כבדות יותר, יש לצופף את הנקזים. ניתן גם לבצע בשלבים; לבצע בשלב ראשון במרווח גדול, 60 מ', ואם יש צורך - אפשר בעונה הבאה להוסיף ביניהם נקז נוסף.

התנוחה הרצויה של הנקזים, היא בניצב לקווי העיבודים. בקצה השדה יהיה מאסף אשר יקלוט את

תא ביקורת לנקזים



צינור שרשורי מנוקב



תרשים 21: פרטי נקז



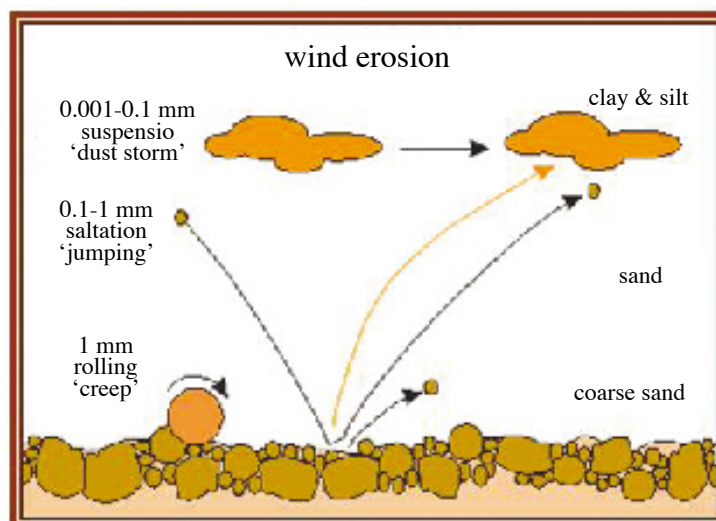
תרשים 22: מראה סחף רוח

שמאלי). המאסף יכול גם הוא להיות נקז. אולם אם הוא עובר בשטח שאין בו בעיות ניקוז או אם הוא בקרבת שדרת ברושים או קנה וסוף, מוטב שהצינור לא יהיה מחורר, פן יחדרו אליו שורשים ויסתמו אותו.

14. סחף רוח

הרוח, תנועת האוויר על פני הקרקע, סוחפת אתה חלקיקים אשר ביכולתה להניעם. מדובר בעיקר בקרקעות קלות-חוליות ואדמת כבול (ראה בתרשים 22, סחף רוח של קרקע חשופה). קרקע מכוסה היטב בצמחייה, כמעט איננה מושפעת מכוחות הרוח. ניתן להבחין בשלוש צורות של

יש לפתוח תעלה ולכסות את הנקז בחצץ דק, על מנת ליצור רצף של זרימה מהשכבה המוליכה אל הנקז (תרשים 21, מרכזי). שיפוע הנקז יהיה רציף עד המוצא שלו. השיפוע המינימלי המומלץ הוא 2%. אי אפשר לדייק בשיפועים מתונים מזה, כי אז ייווצרו שקעים אורכיים אשר יעכבו את זרימת המים. קוטר הצינור יחושב כך שיתמלא רק כ- $\frac{3}{4}$ מחתכו הרוחבי. מקדמי החספוס של הצינור יסופקו על ידי היצרן. בצומת הכניסה של נקז לתוך מאסף ובפניה של המאסף, יש להתקין נקודת ביקורת הניתנת לפתיחה ולבדיקת תקינות המערכת. גם כאשר נקז ארוך מ-100 מ', רצוי להכניס נקודת ביקורת לאורכו כדי לאפשר את ניקיו (תרשים 21,



תרשים 23: תנועת חלקיקים בסחף רוח



תרשים 24: כיסוי המרווח בין השורות, להגנה מפני סחף רוח

24).
 • נטיעת "משברי רוח" (windbreak) - עצים גבוהים העוזרים חלק מעוצמת הרוח מעל פני הקרקע (תרשים 25). מחקרים הראו כי מהירות הרוח בפני הקרקע פוחתת עד כדי מחצית, במרחק של 5 פעמים גובה משבר הרוח. ההמלצות של המומחים הן, לטעת משברי רוח במרחק של כ- 15 פעמים גובה העצים. כלומר, אם גובה העצים 7-8 מ', יש לטעת שדרת משברי רוח בכל 100 מ' לערך.

העצים המומלצים הם עצים גבוהים וצרים, המפתחים עלווה לכל גובהם. זאת כדי שהרצועה הנתפסת על ידי השדרה תהיה צרה ולא תגזול מהשטח. עצי ברוש הם דוגמה נפוצה. ברם, ציצת השורשים של הברוש מתפרסת לצדדים ופוגעת בגידולים החקלאיים עליהם רצינו להגן. לפיכך יש לחפור לאורך השדרה ולחתוך את השורשים מדי פעם. ניתן גם להכניס "וילון" מפוליאתילן עבה, כדי לעצור את השורשים.

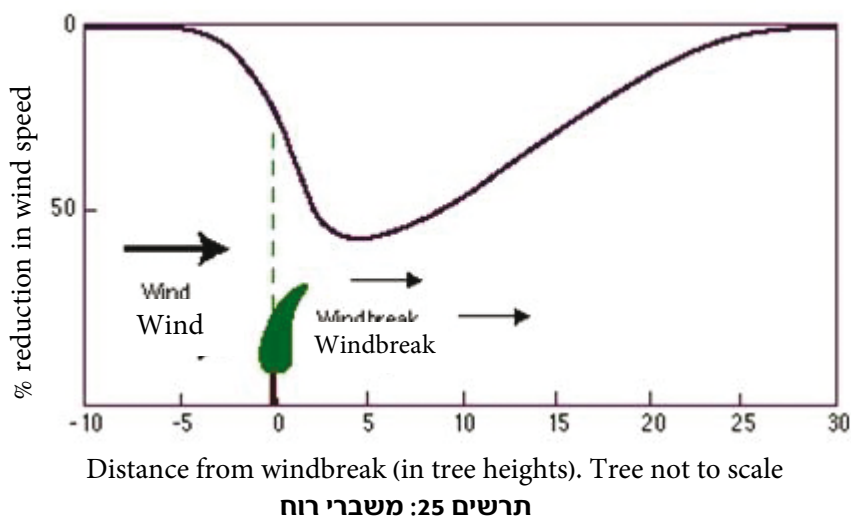
15. דרכי שדה

דרכי נסיעה בשדה חקלאי, הן צורך חיוני לכל הפעילויות שם, אולם הדרך מהווה מפגע מבחינת שימור הקרקע. הדרך המהודקת מזרימה נגר עילי רב, וגורמת לערוצים במקומות לא רצויים. דרך

תנועת חלקיקי קרקע על ידי הרוח (תרשים 23).
 • רחיפה - תנועה באוויר של חלקיקי קרקע קטנטנים - חרסית וטיין - המוסעים על ידי הרוח למרחקים גדולים.
 • קפיצות - חלקיקים גדולים יותר - חול - המוקפץ למרחקים קטנים. אך הקפצות חוזרות מצטברות גם הן למרחקים ניכרים.
 • זחילה - דרדור חלקיק על פני הקרקע. פעולה זו פועלת אף על חלקיקים גדולים, בדרך כלל על ידי גלגולו.

כמות הקרקע המוסעת, תלויה במהירות הרוח ובמשך הזמן שהיא נושבת. הנזק של סחף רוח הוא כמעט תמיד כפול: החסרת הקרקע מהמקום שממנו החלקיקים מוסעים, וכיסוי לא רצוי בשטחים בהם החלקיקים נוחתים. בשטחי מזרע, הרוח חושפת זרעים באזור הסחיפה, קוברת צמחים אשר זה עתה נבטו וחונקת אותם באזור השקיעה של הסחף. הרוח פוגעת גם בצמחים גבוהים אשר עמידותם נמוכה, משירה עלים ופרחים ומפילה את הפירות. אפשרויות ההגנה מפני הרוח:

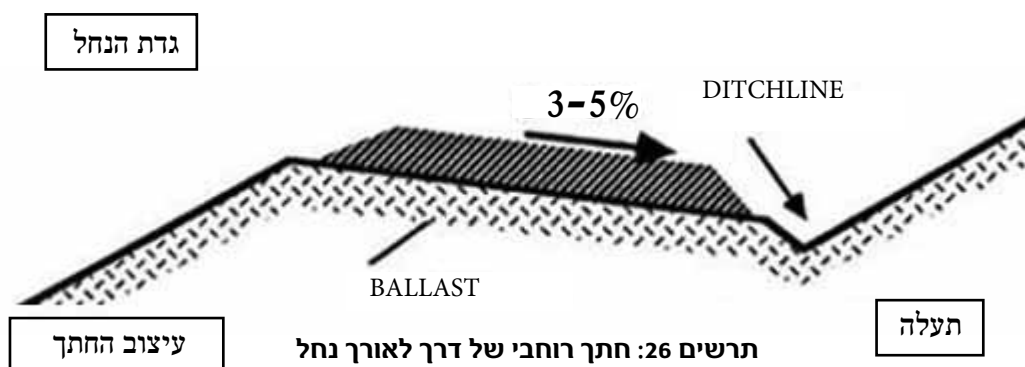
• כיסוי שטח המזרע, בכל חומר שמקשה על הרוח לנתק ולשאת את חלקיקי הקרקע. בשדה בעל, די אם נשאר את השלף כדי להקטין משמעותית את סחף הרוח. בגידולי שורה, מכסים את המרווח בין השורות בזמורות או בקש המצוי במשק (תרשים



16. שטחי מרעה

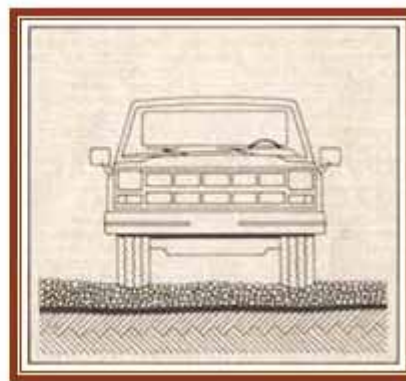
למרעה מקצים בדרך כלל את השטחים השוליים, אשר אינם מתאימים לגידולים אינטנסיביים יותר. אולם גם שטחים אלה נתונים לפגעי הטבע וחשוב לשמור על כללי שימור הקרקע, כדי שלא ייפגעו וכדי להפיק מהם את מרב התועלת. הכלל החשוב ביותר הוא, שלא להשאיר שטח חשוף מצמחייה בעונת הסתיו ולא כאשר מנשבות רוחות חזקות. על הרעיה להיות מבוקרת, יש להכניס את העדר לחלקות באופן מחזורי, כך שהמרעה יצמח מחדש כאשר העדר רועה בחלקה אחרת. גודל העדר יותאם לגודל החלקה ולכושר נשיאתה. אפשר להגדיל את כושר הנשיאה של השדה, הן על ידי דישון והן על ידי הוספת זרעים של צמחים המתאימים לתנאי הגידול ולצורכי העדר. בתרונות וערוצים נסחפים, יש לייצב כמוסבר לעיל. אפשר לטעת עצים כדי לעצור את הסחיפה וכך גם לאפשר לרועה לנוח בצל.

העוברת שקע, נרטבת, והנהג (גם האחראי ביותר) מנסה לעקוף את השלולית ודורך בתוך השדה הזרוע. לפיכך דרכי שדה צריכות תשומת לב מיוחדת, הן בתוואי הדרך והן במבנה שלה. הדרך הראשית בשדה בעל, תהיה ככל הנחת על קו הרכס. כדאי לבנות אותה עם שיפועים לשני הצדדים, כך היא תהיה מנוקזת בימי הגשמים ועבירותה תהיה טובה תוך זמן קצר אחרי הגשם. דרך לאורך אפיק נחל, מחייבת בנייה בצורה שתאפשר עבירות ולא תגרום לסחיפה. מומלץ להסדירה עם שיפוע רוחבי נגדי של 3% - 5% אל תעלה קטנה לאורך הדרך (תרשים 26). התעלה תקלוט את הנגר מהדרך וגם את הנגר הישיר מהשטח. במקום שהדרך חוצה שקע, יש לבנות גשרון מצינור מתאים או "מעביר אירי" מבטון, מזרון רנו עם ציפוי אספלט וכיוצא בזה. דרך שדה בשלחין כמעט תמיד רטובה, וכל רכב שוקע בה וגורם לחריצים. הטמנת בד גיאומטרי מתאים בעומק כ-30 ס"מ מייצבת את הדרך ומאפשרת לכלים חקלאיים לחצות אותו ללא בעיות.





דרך שדה רטובה



תרשים 27: דרך עם בד גיאוטכני

שטנר י'. (1976). גיאומורפולוגיה. הוצאת קריית ספר.

FAO (1965). **Soil Erosion by Water.**

FAO (1966). **Soil Conservation - an International Study.**

USDA, SCS (1972). **Drainage of Agricultural Lands.**

תמונות וחלק מהאיורים הורדו מאתרים שונים באינטרנט, חלקם הגדול מהאתר של FAO.

17. ספרות מקצועית

המדריך המקצועי. האגף לשימור הקרקע וניקוז, משרד החקלאות.

לוטן א'. לניר י' (1960). שימור הקרקע (ראשי פרקים). הוצאת המרכז המשותף להדרכה חקלאית.

לניר י'; הנקין ע'; לוטן, א' (1976). הניקוז העילי. הוצאת האגף לשימור הקרקע, משרד החקלאות.

תחזוקה

ניר שטרית

סמנכ"ל ומהנדס רשות ניקוז שקמה בשור.

1. הגדרות

ניקוז - כל פעולה שמטרתה לרכז, לאגור, להשהות, להוביל, להחדיר או להרחיק מיים עיליים או אחרים, לרבות הגנה מפני שטפונות המזיקים או העלולים להזיק לחקלאות, לתשתיות, לבתי מגורים, לבריאות הציבור, לפיתוח הארץ או לקיום שירותים סדירים במדינה ולסכן נפשות. **מפעל ניקוז** - כהגדרתו בחוק הניקוז והגנה בפני שיטפונות, התשי"ז - 1957.

נחל - גיא, ערוץ או אפיק שזורמים בו מים משך כל השנה או בחלקה.

עורק - כהגדרתו בחוק הניקוז והגנה בפני שיטפונות, התשי"ח - 1957.

תעלה - עורק ניקוז שעוצב בידי אדם ע"י חפירה, בניה דיפון וכו'.

קרקעית - משטח מוצק, אופקי למדי, שמגביל את חלל העורק בתחתיתו.

דופן - משטח מוצק, אנכי או משופע, שמגביל את חלל העורק באחד מצדדיו.

גדה - פיסת קרקע אופקית למדי הצמודה לדופן בצידה העליון.

ספיקה - נפח מים הזורמים בחתך רוחב מוגדר של העורק ביחידת זמן.

ספיקת תכן - הספיקה המרבית שהאפיק מתוכנן להוליך בתוכו.

פשט הצפה - שטח שבו זורמים או עומדים מים, באופן קבוע או לפרקים, כתוצאה מזרימת מים בספיקה עודפת על זו שהאפיק יכול להעביר. **מהירות זרימה** - המהירות, הממוצעת לחתך הרוחב, בה זורמים המים לאורך קו האפיק, מטר לשניה.

רשות ניקוז - תאגיד שהוקם מכוח חוק הניקוז והגנה בפני שיטפונות, התשי"ח - 1957.

סחיפה - (אירוזיה) הינו תהליך פירוק מבנה קרקע לגרגרים והעברתם מהמקום בו הם מצויים.

מתחור - סחיפה שמתרחשת מתחת לפני הקרקע.

סחף - חומר מוצק המוסע ע"י מים זורמים.

2. תחזוקת נחלים

זרימה בנחלים מאופיינת באנרגיה גבוהה אשר גורמת לשינויים במורפולוגיית הנחל - סחיפת קרקע, השקעת סחף, סתימת מעבירי מים בפסולת מוצקה ופגיעה בכושר ההולכה בנחל, התחתרות לאחר וחשיפת תשתיות שונות באפיק הנחל (בעיקר במפגש בין מתקן ניקוז הבנוי מחומר קשיח לבין ההתחברות לקרקע טבעית). השינויים בחתך הנחל באים לידי ביטוי הן ברוחב האפיק והן בעומק האפיק. צמחייה אשר גדלה בתחתית האפיק ובגדות הנחל מאטה את מהירות הזרימה וגורמת לירידה באנרגיה והשקעת סחף באפיק.

שינויים אלה קיצוניים יותר בנחלי אכזב ובעיקר באזורים מדבריים, שם כמות המשקעים נמוכה והצמחייה דלילה. הצמחייה שוברת את מכת טיפות הגשם היורד, מיצבת בשורשיה את מרקם הקרקע ובולמת את מהירות זרימת המים על פני הקרקע. העדרה משפיע על אופי הזרימה בנחלים ומעודד יצירת שינויים במורפולוגיה של פני השטח והאפיק.

לשינויים מורפולוגיים אלה מצטרפים שינויים הנוצרים ע"י התערבות האדם, כגון - בנייה בתוך ובסמוך לערוצי נחלים, הזרמת ביוב ושפכים לאפיק הנחל, השלכת פסולת מוצקה לנחל. כרייה וחציבה באפיקי נחלים משנות את משטר הזרימה ופוגעים קשות במבנהו. חתך האפיק ושיפועו האורכי נפגעים, פיתוליו משתנים ומוטים. הכרייה והחציבה גורמים להשקעת סחף מרובה באזורי הכרייה בנחל ובמורדם, וליצירת ברכות מלאכותיות ושלוליות המהוות אזורי דגירה של יתושים. השינויים באפיק הנחל עלולים להפריע למעבר המים בנחל ולגרום לנזקים ולהצפות בעת אירוע שיטפוני.

לתחזוקה נאותה יש משקל רב בשמירה על כושר ההולכה והתפקוד אפיק הנחל. עבודות התחזוקה הנן צורך בסיסי ונועדו להבטיח את תקינותו של עורק הניקוז והמשך תפקודם של

הכנת נהלי עבודה ותכנון מראש של העבודות. את נושא התחזוקה השוטפת ניתן לחלק לשניים: תחזוקה באזורים מיושבים או רגילים, ותחזוקה באזורים פתוחים. כאמור, התחזוקה באזורים מיושבים הינה בעלת תדירות גבוהה עד גבוהה מאוד (אחת לשנה ובמקומות מסוימים יכולה להגיע למספר פעמים בשנה). באזורים מיושבים לעיתים נדרש יותר שימוש באמצעים קשיחים, כגון מתקנים הנדסיים (גביונים, גיאווה ועוד) וזאת על מנת לצמצם את רוחב עורק הניקוז ואת פשט ההצפה ולהותיר קרקע רבה לפיתוח ובנייה לטובת הצרכים האנושיים (מגורים, טיילות ופארקים). התחזוקה באזורים פתוחים הינה פשוטה יותר ובד"כ אינה מצריכה שימוש באמצעים הנדסיים קשיחים. באזורים אלה מומלץ יותר לבצע עבודות תחזוקה רק במקומות שבהם נחוצה תחזוקה זו, ניתן להסתפק בעבודות עפר בלבד וע"י כך לשמור על סביבה טבעית ככל הניתן ולצמצם את עלות התחזוקה.

3.2 תחזוקה חירום

בעקבות זרימות בערוצי הנחלים לעיתים נגרמות הצפות, פגיעה במבנים וחשיפה של תשתיות שונות הדורשים התערבות מיידית וטיפול בנחל על מנת למנוע נזקים גדולים יותר לסביבה ולאפיק הנחל. תחזוקת חירום מתבצעת בעונת החורף תוך כדי זרימות בנחלים ובקרקע רטובה, אשר מקשה על הגישה לאפיק הנחל ועל היכולת לביצוע התחזוקה עקב שקיעת כלים החלקה וזרימת המים באפיק. הגישה לאזור הרטוב בעלת קושי רב לרוב תתבצע על ידי כלים בעלי מרכב שרשרת, דבר המצריך הערכות שונה ואופי עבודות שונה כאשר קיימת סכנה הצפה למבנים ואף סיכון חיי אדם (ראה תרשים 1).

תחזוקת חירום נעשית עפ"י תכנון שדה על מנת לספק מענה מידי, תוך כדי מתן פתרון על פי הנזק שנגרם. רשויות הניקוז נערכות מבעוד מועד לתחזוקת חירום באתרים רגילים באגן היקוות, על ידי כלים הנדסיים שנמצאים בכוונות קריאה לכל נקודה בשטח הרשות במשך 24 שעות ביממה. וזאת על ידי קבלני התחזוקה אשר נמצאים בכוונות ברשויות הניקוז, מערך העובדים ברשויות הניקוז בעל ידע מתאים למתן פתרונות תחזוקה בחירום.

המיתקנים באפיק לאורך שנים רבות. חשובה במיוחד תחזוקה של הנחלים באזורים מיושבים ובסמוך למתקנים הנדסיים שונים הממוקמים בסמוך לנחלים. זאת על מנת להבטיח תפקוד יעיל של הנחלים ומערכות הניקוז מצד אחד ומניעת פגיעה במבנים ויישובים מצד שני. תחזוקה סדירה של הנחל מבטיחה המשכיות וקיום עורקי ניקוז והנחלים לאורך זמן רב. העדרה גורם להיווצרות של בעיות ניקוז וסכנת הצפות ונזקים גדולים במספר מונים מעלות התחזוקה של אותם נחלים ומתקני הניקוז. לפיכך מסדירות רשויות הניקוז ומתחזקות מאות קילומטרים של נחלים באגני הניקוז השונים במדינת ישראל מידי שנה.

בעת תכנון מתקני ניקוז ובתכנון הסדרת ושיקום נחלים, יש להכין נספח תחזוקה המתאר את העבודות הנחוצות לתחזוקה שוטפת לנחל. בעת בחירת הטכניקה לטיפול בנחל חשוב לתת תשומת לב מיוחדת לתחזוקה נאותה של הנחל והמתקנים, כגון בניית מעבירי מים בעלי כושר הולכה מתאים לספיקת התכן וכן שיאפשרו עבודה של כלים הנדסיים ומכאניים לניקוי והוצאת סחף. במקרים שהמפתח קטן מידי, יש צורך לנקות את הסחף בעבודות ידיים הכרוכות בעלות כספיות גבוהה וקושי פיזי לביצוע המשימה.

המפתח לתחזוקה נאותה של הנחל מתחיל ביצירת דרכי שירות וגישה נגישות בכל עונה. דרכי תחזוקה אלו מעוגנות בחוק "הניקוז והגנה מפני שיטפונות והצפות". הן מאפשרות תחזוקה נאותה ויכולת כניסת כלים כבדים לצורך פינוי פסולת מעורק הניקוז ויכולת הגעה לכל נקודה בנחל לשם תחזוקתו. לכן ערכן רב ליכולת התחזוקה של הנחל.

3. סוגי התחזוקה

קיימים שני סוגי תחזוקה: תחזוקה שוטפת ותחזוקת חירום.

3.1 תחזוקה שוטפת

תחזוקה שוטפת כשמה כן היא תחזוקה המתבצעת באופן סדיר ובתדירות קבועה (אחת לשנה, שנתיים וכד'). היא כוללת בעיקר ניקיון הנחלים מפסולת מוצקה, ניקוי וחישוף צמחייה, פינוי סחף, תחזוקת מתקנים וטיפול בהתחתרויות. רשויות הניקוז נערכות מבעוד מועד לתחזוקה השוטפת תוך



תרשים 1: תחזוקה בעזרת כלי הנדסי בעל זרועה ארוכה המאפשר עבודה מהגדה.

4. הגורמים העיקריים לצורך

בתחזוקת נחלים

4.1 שיטפונות

מערכת ניקוז מתוכננת ומבוצעת להולכת זרימה בספיקות תכן, שנקבעות בדרך כלל בהקשר לתקופות חזרה נתונות. שיטפונות בעלי ספיקות גבוהות יותר עלולים לפגוע באפיקים ובמתקנים הבנויים בהם. שיטפונות בספיקות נמוכות מספיקות התכן עלולים לגרום נזקים בקטעים שניזוקו בעבר ולא תוקנו.

4.2 פסולת מוצקה

אפיק הנחל נתפש בעיני רבים כ"חצר האחורית" ומשמש אתר לא חוקי להשלכת פסולת. הנחל הינו האזור הטופוגרפי הנמוך ביותר באגן ההיקוות. כתוצאה מכך ניצפותו נמוכה והוא נסתר בקטעים מסוימים, עובדה שמקלה על השלכת פסולת לתוכו. הפסולת מכילה חומרי בניה, פסולת ממפעלים שונים והן פסולת ביתית. מירי שנה נערמות ערמות פסולת רבות באפיקי הנחלים והן פוגמות בכושר ההולכה שלהם. רשויות הניקוז וגורמים רלוונטיים אחרים מבצעים משימות של פינוי הפסולת ניקוי אפיק הנחל ופינוי הפסולת לאתר מורשה על מנת לאפשר ניקוז רציף ופתוח באפיק.

4.3 תשתיות סמוכות לנחלים

עורך הניקוז מהווה פרודור פתוח בעל שיפוע אורכי רצוף ממעלה הנחל אל המורד, ומעצם כך קווי תשתיות רבים מונחים בצמוד ובסמוך לאפיק הנחל. לדוגמא קווי ביוב אשר פועלים בגרוויטציה מוצמדים במקרים רבים לגדת הנחל, על מנת לנצל את השיפוע האורכי הטבעי הקיים שם.

קווי תשתיות אלו יש להטמין בעומק רב אשר ימזער את הפגיעה בערוץ הנחל, ויאפשר יכולת תחזוקה באפיק. יש להוסיף רצועת סימון תת קרקעית למנוע פגיעה עתידית בקווי תשתית אלו, ועמודי סימון בגדת הנחל לזיהוי קווי התשתיות. התשתיות אשר עוברות בסמוך לאפיקי הנחלים גורמות קשיים רבים ביכולת התחזוקה, ועלולות לפגוע בדרכי השירות בגדת האפיק. תשתיות עיליות, כגון קווי מים, מהוות מגבלה פיזית לכלים הנדסיים הנדרשים לבצוע פעולות תחזוקה רציפה במרחב.

תשתיות אשר חוצות את עורך הניקוז לרוחבו צריכות להיטמן בעומק רב שלא יפגעו ביכולת התחזוקה של האפיק, ולא יחשפו כתוצאה של התחתרות טבעית באפיק. יש להטמין אותן עם מערכת הגנה העוטפת את התשתית כגון שרוול פלדה, אשר מטרתו הן הגנה על התשתית בעת

ורצוי לכסח באמצעות מכסחת מטעים וללא זרוע הידרולית צדית.

באזורים בהם קיים סכך ללא יכולת תחזוקה ע"י מכסחות, ניתן להשתמש בכלים הנדסיים ככדים יותר. צורת פתרון זו מחייבת החזרה של שכבת הקרקע העליונה (Top soil) שכבה זו הינה הקרקע הפורייה ביותר, מכילה בתוכה זרעים רבים וחומרים אורגאניים הנחוצים להתפתחות מחודשת של צמחייה באפיק. עם החזרת שכבת הקרקע העליונה מתפתחת הצמחייה בגדת הנחל. את ההחזרה יש לבצע תוך כדי הידוק וייצוב מתאימים שימנעו סחיפה בעת מעבר גאיות. צמחיית אפיקים רטובים כל השנה תכוסח באמצעות מכסחה צדית שמאפשרת לטרקטור לנוע על קרקע יבשה. במקרים רבים יש לחזור שם על פעולות הכיסוח בתדירות גבוהה יחסית.

5. אמצעים ושיטות לביצוע תחזוקה בנחלים

באזורים מיושבים שנבנו בסמוך לאפיקי הנחלים קיים צורך מוגבר להגן על התשתיות והמבנים. עבודות עפר ופתיחת ערוצי הזרימה מספקות את הפתרון האידיאלי. האמצעים לייצוב באזורים אלו הינם קשיחים, וזאת על מנת לצמצם את רוחב עורק הניקוז ואת פשט ההצפה. הייצוב באזורים הפתוחים הינו פשוט יותר כדוגמת ייצוב צמחי או על ידי עבודות עפר בלבד וכד"כ אינו מצריכה שימוש באמצעים הנדסיים קשיחים (כפי שניתן לראות בתרשים 2). התחזוקה מתבצעת בעורקי ניקוז על פי שיטות הייצוב.

5.1 עבודות עפר

תעלות עפר חשופות לכוחות גזירה המופעלים ע"י זרימת המים. כוחות אלה עשויים לנתק חלקיקים ממקומם, למוטט גדות בקטע אחד ולהשקיע אותם באזורים אחרים באפיק. עבודות התחזוקה בעורקי ניקוז כאלה מתבצעות ע"י כלים הנדסיים. מטרת העבודה הינה הוצאת סחף ותיקונים של השיפוע האורכי בקרקעית האפיק. צוואר הבקבוק של ערוצים רבים הינם מעבירי מים וגשרים, בהם מצטבר סחף רב. רשויות הניקוז מבצעות תחזוקה קבועה באזורים המועדים להצטברות סחף אשר פוגעת בכושר ההולכה של האפיק (ראה תרשים 3). תחזוקה נאותה באפיקים הפתוחים שומרת

ביצוע עבודות התחזוקה והן מפני זיהום אפיק הנחל.

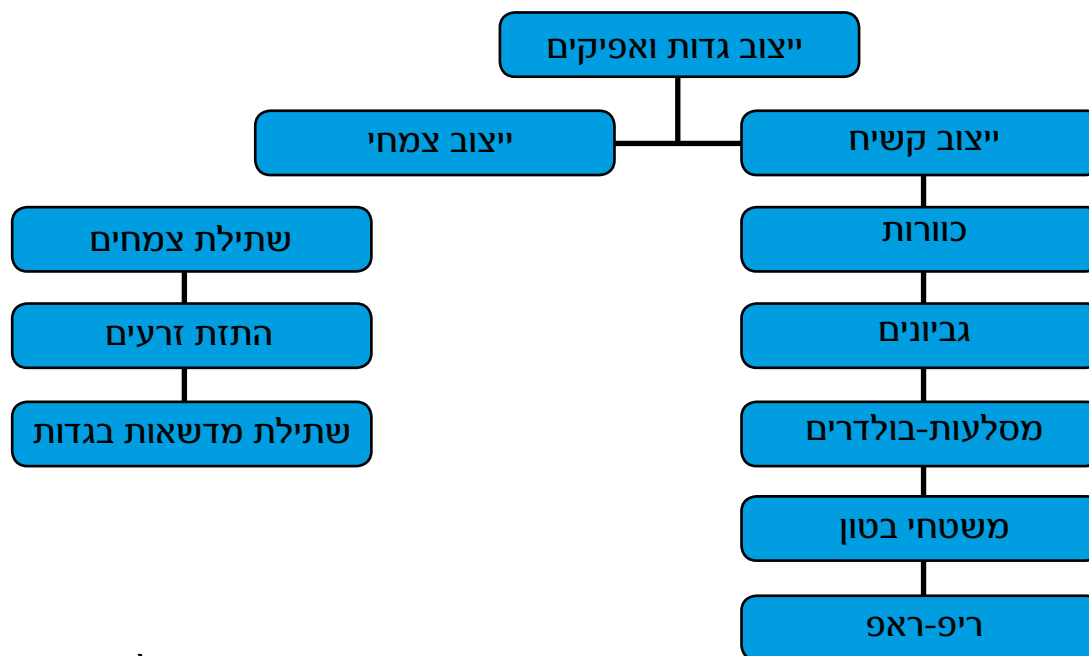
4.4 אתרי כרייה בעורקי הניקוז

שנים רבות שימשו הנחלים כמקור אספקה לתעשיית הבניה וסלילת הכבישים במדינת ישראל. חומרי הכרייה כגון חומר הוואדי, חלוקי הנחל, והחול נכרו מהנחלים ושימשו לתעשיית הבניה והכבישים. מרבית הכרייה באפיקי הנחלים בוצעה בנחלי הנגב הן בקרקעית והן בגדות האפיק. החציבה מביאה לפגיעה בפני השטח וגורמת להתחתרות יתר ולמפגעי סחף במורד. החציבה משפיעה על משטר הזרימה בעורק הניקוז, מחצבות נחל רבות פוגעות בשיפוע האורכי של האפיק, הנמכת הקרקעית גורמת למי הנגר לעמוד בבורות הכרייה ללא זרימה רציפה.

במחצבות פעילות יש לשמור בעת כריית החומר על השיפוע האורכי על מנת שמי הנגר ימשיכו בזרימתם למורד האפיק. לכל מחצבה יש להכין תוכנית לשיקום הנחל ושהכרייה תתבסס על תוכנית זו. בעבודות התחזוקה במחצבות נטושות שבהן נכרו חומרים רבים, רשויות הניקוז יוצרות אפיקי זרימה רצופים. התחזוקה באזורי כרייה בנחלים מבחינה הנדסית בעלת קושי רב עקב שינויים בטופוגרפיה לאחר כל זרימה באזורי הבורות כתוצאה מהחציבה שערערה את יציבות הקרקע ואת הרציפות הטופוגרפית בסביבת האפיק.

4.5 צמחייה באפיקים

צמחייה גדלה בקרקעית, בדפנות ובגדות עורקי ניקוז רבים. הצמחייה מהווה חוליה המקשרת את הקרקע ומייצבת אותה. אולם היא עלולה לסתום את אפיק הזרימה ולפגוע בכושר ההולכה שלו. על כן עדיף לכסחה, כדי לשמור על כושר ההולכה ובו בזמן על ייצוב הקרקע, וזאת ללא פגיעה במבנה האפיק. מכסחת צד, שמאפשרת כיסוח טוב, מחוברת באמצעות זרוע לטרקטור אשר נוסע לאורך דרך השירות ומפעיל אותה על הגדה או על הדופן. המכסחה גוזמת את הצמחייה, ומשאירה שלף בגובה סנטימטרים אחדים, אשר מהווה גורם מייצב קרקע מצד אחד ומצד שני נשמרת היכולת לצמחייה להתפתח ולהתחדש. במקרים בהם השיפוע הצדי של הקרקע מתון, 1:4 ויותר, אפשר



תרשים 2: סוגי הייצוב השונים בגדות ובאפיק נחל

5.3 ייצוב קשיח

בעת הימצאות בניה ותשתיות בסמוך לנחלים וקיימת סכנת הצפות ופגיעה בגדות, האמצעים לייצוב יהיו לרוב הנדסיים קשיחים. קיימים סוגי אמצעי ייצוב קשיחים רבים כגון מפתנים, מפלים, ארגזי גביונים, ריפ-ראפ ועוד. תכנון האפיק בהתאם לספיקה הנדרשת מביא בחשבון את קיומם וסוגם. התחזוקה סביבם תתבצע על ידי כלים הנדסיים מתאימים ללא פגיעה בהם ובכושר תפקודם.

המפתנים הינם קירות נמוכים הניצבים לכוון הזרימה ותפקידם למתן את השיפוע האורכי. הם נבנים מבטון מזוין, בטון גס, מבני אבן עם מלט או גביונים. התחזוקה בין המפתנים נעשית ע"י כלים הנדסיים או ע"י מכסחות צד. בעת פעילות התחזוקה יש לוודא שאין התחתרויות בצידו המפתן.

ציפוי דפנות התעלות צריך למנוע סחף וארוזיה של התעלות ולאפשר תחזוקה נוחה. ניתן לבצע את ציפוי הגדות ע"י רשתות ברזל ובטון, מזרונים רנו, גיאווה ותעלות j/k. עבודת התחזוקה בתעלות אלו מתבצע בדרכים הבאות: פינוי והוצאת הסחף והניקוי מבין ארגזי הגביונים, אשר נבנים מרשת ברזל וממולאים באבנים בגודל של 15 - 20 ס"מ (בקלש), יתבצע בזירות יתרה עקב החשש

על מאפייני הערוץ הטבעיים ועל פיתולי הנחל לכל אורך עורק הניקוז. בעת ביצוע עבודות התחזוקה בנחלים יש למזער את הפגיעה במערכת האקולוגית. קיימת שיטת תחזוקה בגדות אפיקי הנחלים ע"י שרשרת זיזים אשר מחוברת לטרקטור הנע על דרך השירות. תפקידה - מילוי החריצים שנוצרו כתוצאה מהנגר הצידי שזורם לעבר האפיק (ראה תרשים 4).

5.2 ייצוב צמחי

פתרון ביניים לייצוב גדות, בין עבודות עפר בלבד לבין הייצוב הקשיח, הוא הייצוב צמחי. ייצוב צמחי מאפשר זרימה חופשית של הנגר באפיק הנחל מצד אחד, ומצד שני ללא פגיעה בגדות ובקרקעית וללא סחיפת הקרקע. לצמחייה המתפתחת בגדת הנחל שורשים אשר תפקידם לשריין את שכבת הקרקע הבאה במגע עם המים הזורמים. לצמחים אשר נזרעים בגדות הנחל התפתחות מהירה וכושר עמידות בתנאי יובש.

הייצוב הצמחי מחייב תחזוקה מתאימה לרוב כיסוח על ידי מכסחות צד בנחלים, על מנת לשמור על עורק הניקוז בעל כושר הולכה של ספיקת התכן. עומד צמחי גבוה מידי מהווה גורם הפוגע ביכולת זרימה החופשית באפיק, וגורם להאטת הזרימה ולהשקעת סחף.



תרשים 3: הוצאת סחף במעבירי המים ובגשרים

הניטור מתבצע לאורך כל ימי השנה בתדירויות שונות, ועיקרו מתבצע לפני עונת הקיץ. המשרד להגנת הסביבה מבצע ניטור רעלים ומזהמים בנחלים הכולל בדיקת פרמטרים קבועים ואת איכויות המים הזורמים בנחלים, הבדיקה כוללת אחוז מוצקים מרחפים במים, בדיקת הימצאות חומרים מסוכנים כגון זרחן, חנקן, אמוניה, כלורידים, מתכות כבדות ועוד. רשויות הניקוז מבצעות ניטור תחזוקה באמצעות בדיקה פיזית לאורך הנחלים ובכניסות למאגרים. הבדיקות כוללות איתור סחיפת קרקע, השקעת סחף, התחתרויות בגדות, פגיעה במתקנים הנדסיים, מעבירי מים, גשרים ובתשתיות השונות הקיימות בסמוך לנחל.

משאבים רבים מושקעים בשיקום סביבתי של נחלים ובתחזוקה שוטפת אך עם זאת עדיין מתקיימת זרימה של שפכים לנחלים ובכך נגרם הרס של מערכת אקולוגית מיוחדת בסביבת הנחל. בעיקר במשטחים רחבי מימדים, כגון מגרשי חניה, הנגר העילי הזורם על פני האספלט אוסף עימו מזהמים כגון שמנים, חומרים אילו מתנקזים לנחלים באזורי מתקני הכניסה של מערכת הניקוז,

לקריעת רשת הברזל ויציאת האבנים מן הארגז. על מזרוני רנו וארגזי גיבוינים לא ניתן לעלות עם כלים הנדסיים עקב החשש להיווצרות קרעים ברשתות הברזל וליציאת אבנים מהמזרון או הארגז ולכן עבודת התחזוקה נעשית לרוב ע"י פועלים בעבודות ידיים והוצאת הצמחיה ופסולת. כאשר דפנות הערוץ המיוצב הינן מבטון מזוין ניתן להעלות עם כלים הנדסיים להוצאת הפסולת והסחף.

6. ניטור

אחד המרכיבים העיקריים בתחזוקת נחלים הינו הניטור. קיימים שני סוגי ניטור הראשון מערך זיהוי לזרימת מי ביוב וקולחין, וכן ניטור רעלים ומזהמים המתבצע על ידי המשרד להגנת הסביבה והשני הינו ניטור תחזוקה המתבצע על ידי רשויות הניקוז בכל אגן ההיקוות. מטרת הניטור הינה יצירת בסיס נתונים עדכני המציג תמונה של מצב הנחלים במדינת ישראל. בסיס הנתונים הבנוי על מערך הניטור משמש את מקבלי ההחלטות ברשויות הניקוז בעת הכנת תוכניות תחזוקה לנחלים.



תרשים 4: הוצאת סחף מאפיק בעל ייצוב קשיח

ובפשט ההצפה של הנחלים חשוב להבין את המשמעויות הנובעות מכך על הנחלים ואת הצורך לטפל ולתחזק את הנחלים באזורים אלה בעתיד. העדר תחזוקה יגרום לפגיעה חמורה במבנים ותשתיות ואף עלול לגרום לנזקים בנפש. ישנה נטייה לא להתחשב בצרכי הנחל ובשינויים המורפולוגיים שמתרחשים באופן טבעי בנחלים, כגון סחיפת קרקע במקומות מסוימים והשקעתה במקומות אחרים, אשר גורמים לפגיעה בתשתיות על ידי חשיפתם ובמקומות אחרים השקעת הסחף גורמת לירידה בכושר ההולכה של הנחלים, מעבירי המים ולהצפות.

תחזוקה שוטפת של ערוצי הנחלים שבסמוך אליהם עלולה להיות פגיעה כל שהיא מונעת נזק כלכלי כבד תוך השקעה קטנה יחסית של משאבים. כמו כן פעולות שמבוצעות על ידי האדם עלולות גם הן לגרום לנזקים. העדר תחזוקה וניקוי ערוץ הנחל יגרום לסחיפת פסולת שנזרקת לנחל והשקעתה במורד. פרט למפגע החזותי והתברואתי שגורמת פסולת מוצקה, היא עלולה לסתום מעבירי מים וגשרים דבר שיביא להשקעה והיווצרות נוספת של פסולת וסחף וכתוצאה מכך

ניתן לראות כתמים בקרקעית הנחל בעלי גוון כהה מאוד, זיהום זה פוגע בקרקעית הנחל ובמי הנחל. עקב החשש הרב לאיכויות המים הזורמים בנחלים, קיים ניטור קבוע במאגרים אשר ניזונים ממי הנחל כגון מאגרי צד וגיא וכן מאגרים אשר המים נשאבים מהנחל אל המאגר. מעקב רציף וביצוע ניטור שוטף הכולל בדיקות של איכויות מים בנחלים ובמאגרים, בעל חשיבות רבה למניעת נזקים עקב שימוש במים מזוהמים. ניטור רציף לאורך השנה מציג תמונה עדכנית לשיפור או החמרה באיכות במי הנחל.

רשויות הניקוז בונות מידי שנה את התמונה העדכנית על מצב הנחלים באגן הניקוז ומכינים את תוכניות התחזוקה על פי המצב הקיים. תמונת המצב כוללת את מצבם הפיזי והנזקים של הנחלים בכל אזור ומקטע. רשויות הניקוז נערכות לביצוע העבודה הנדרשת על פי הנזקים הקיימים וסדר עדיפות שנקבע על פי חומרת המצב והקרבה לאזורים מיושבים.

7. סיכום

בעת תכנון, הכשרת קרקע, ובנייה בסמוך לנחלים

ירידה בכושר ההולכה של המתקנים והצפות במעלה. בנוסף לכך בנחלים באזורים מיושבים נבנים מתקנים הידרוליים שונים כדי לצמצם את פשטי ההצפה ולהקטין את מהירות הזרימה. העדר תחזוקה שוטפת של מתקנים אלה גם היא פוגעת בתפקוד הנחל. ישנה חשיבות רבה לביצוע עבודות התחזוקה בעונה היבשה ממשקעים בה העבודה

נוחה יותר מאלה המבוצעות בעונה הגשומה עת נוצר קושי של קרקע בוצית, כלומר החלקה של כלים, שקיעה ועוד. במאמר זה תוארו מרבית השיטות לביצוע תחזוקה של נחלים ועורקי ניקוז אך כל אלה יתאפשרו רק לאחר התחשבות בערוצי הנחלים ובצרכי ערוצי הניקוז והקצאת משאבים באופן שוטף.

מאגרים

משה צ'וברוצקי

מהנדס מים, מ.מ. מהנדסים יועצים "דרום".

1. כללי

1.1 הגדרות

מאגר הוא חלל מוגבל על ידי דפנות מוצקות שמיועד לאגירת חומרים שונים: נוזלים, גזים, וכן מוצקים כמו גרעיני חיטה או תירס. קיימים שלושה סוגים של מאגרי מים: מאגרי גיא, מאגרי צד ומאגרי רשת. מאגרי גיא נוצרים על ידי סכירת אפיקים, מאגרי צד על ידי בניית סוללות מחוץ לאפיקים, ומאגרי רשת על ידי בניית מבנים בתוך רשת אספקה. מאמר זה עוסק במאגרי עפר לאגירת מים, בעיקר מאגרי גיא, אך גם מאגרי צד נזכרים. למאגרים משני סוגים אלה, משמעות הנדסית דומה. ההבדל העיקרי ביניהם הוא, שמאגרי גיא מתמלאים באורח טבעי מזרימה גרביטציונית, ואילו למילוי מאגרי צד, יש לחפור תעלת הטיה או להתקין מערכת משאבות וצינורות.

1.2 מטרות ההקמה של מאגרים

מאגרים מוקמים כדי לרסן שיטפונות או כדי לשפר את אפשרות ניצול המים. ריסון השיטפונות נעשה על ידי עצירה של המים הזורמים אל המאגר, השהייתם ושחרורם באורח מבוקר. שיפור הניצול נעשה על ידי עצירה ואגירה של חלק מהמים המגיעים בספיקות עודפות על הדרוש ושחרורם המבוקר, בזמנים בהם הספיקות נמוכות מהדרוש ובמסלולים מתאימים. מטרות הניצול השכיחות הן: אספקת מי שתייה והשקיה, הקטנה של נזקי שיטפונות, ייצור חשמל, יצירת עומק מים מתאים לשיט, גידול דגים, שמירת ערכי טבע ונוף, תיירות ונופש.

1.3 מיקום המאגר

מאגר ממוקם בהקשר למטרות אגירת המים ובהתחשב בטופוגרפיה של השטח המיועד למאגר, בזמינות הקרקעות, עלויות ההקמה והתחזוקה וקשר עם הסביבה. מאגר לריסון שיטפונות, צריך להיבנות במעלה האזור עליו הוא אמור להגן.

מאגר לניצול מים, רצוי שייבנה בקרבת מקורות המים ואזור הניצול. הערכה כמותית של התועלות, העלויות וההשפעות על הסביבה, יכולה להיעשות עם השלמת התכנון הכללי של המאגר. כדי למזער עלויות ונזקים ולהרבות תועלות, רצוי לתכנן חלופות אחדות שנמצאות באתרים אפשריים אחדים, ומביניהן לבחור את המיטבית. החלופה הנבחרת עוברת לתכנון מפורט.

1.4 הרכב חלל המאגר

חלל המאגר צריך להכיל קיבול מספיק לשלוש מטרות, שמדרך הטבע נחלקות אופקית: א. "נפח מת", שמיועד להכיל את הסחופת אשר תשקע במאגר. ב. נפח אגירה, לשם ניצול המים. ג. נפח לריסון שיטפונות ובלט, למניעת גלישה בלתי רצויה.

1.5 שיקולי החלטה על הקמת מאגר

- כדאיות כלכלית
- יכולת תקציבית
- קיום ידע וניסיון
- מסורת מקומית וכדומה

יש לציין כי להקמת מאגר גיא, נדרשת הקמה של מערכת מתקנים יקרה יחסית. בדרך כלל היא כוללת סכר עפר ומברץ לשחרור עודפי מים.

1.6 מספר המאגרים בארץ

בישראל הוקמו עשרות בודדות של מאגרי גיא, לעומת כ-400 מאגרי צד המתמלאים בשאיבת מי נגר עילי או מי קולחין. ההבדל הגדול בין שני המספרים האלה, קשור למשטר האקלימי וההידרולוגי, לטופוגרפיה ולאופי ההתפתחות העירונית והחקלאית. עם גידול הביקוש למים שפירים ועלות הפקתם וייצורם (בהתפלה), גדלה כדאיות הניצול של מי גאיות בנחלים, אשר כיום זורמים אל הים התיכון בנפח ממוצע של כ-150

כאלה יכולה למנוע הסדרה של קטעי נחלים ארוכים, לפי ספיקות תכן גבוהות ובניית גשרים גדולים. רעיונות כאלה הגיעו גם לישראל וכתה נדונה הקמה של מאגרים כאלה באפיקי הנחלים יבנה, רבא בראש העין, נפחא, בוקק ועוד.

1.9 ויסות באפיקים ובמבנים הידרוליים

ויסות הנגר העילי, היא תופעה רחבה שקיימת באפיקים טבעיים וגם בסביבת מבנים הידרוליים. בכניסה לגשרים ולמעברי מים, מושהית הזרימה לעתים קרובות (ראה גריניס ובן-צבי, 2008). מצב דומה מתרחש בכל מקום בו נמצא מתקן המשפיע על הזרימה החופשית באפיק והוא עשוי להועיל במקרי ניקוז משמר מים ובמערכות אחרות. תופעה זו נקראת River regulation by storage, מהווה פרק חשוב בהידרולוגיה השימושית וניתנת להערכה ולתכנון הנדסי. במקומות רבים בעולם, היא מנוצלת כאמצעי הגנה בפני שיטפונות. למרות זאת, מועט יישומה בארץ. להלן סיבות אחדות למיעוט ההתחשבות בגורם זה.

א. הקושי בהערכת נפח האיגום הנדרש מבנים הידרוליים נבנים, בדרך כלל, בהקשר לתקופות חזרה של 10 - 100 שנה. כלומר, הם צפויים להפריע לזרימה החופשית רק פעם בעשרות שנים, בממוצע. תקופת התצפיות בתחנות הידרומטריות היא בת עשרות שנים בלבד. על כן מצויים בידינו נתונים על גאוויות בודדות, שמנתונין אפשר לחשב במישרין את נפח האיגום הנדרש לוויסות הזרימה. החישובים המקובלים נעשים בהקשר לזרימה תמידית שדורשת נתונים מעטים; ואילו ספיקת הגאות, ובמיוחד בסביבת השיא שלה, אינה תמידית. הנפח המתקבל בחישוב על פי זרימה תמידית, גדול במידה ניכרת מזה המתקבל בחישוב על פי זרימה שאינה תמידית. כתוצאה מכך, נדרשים, לפי החישוב המקובל, נפחי ויסות ושטחי הצפה מוגזמים מאוד ביחס לאלה שנדרשים למעשה. Ben-Zvi (1993, 1996) הציע שיטת חישוב באמצעות אקסטרפולציה של נתוני גאוויות בינוניות וגבוהות, אך הצעתו נשארה כקול קורא במדבר. במקרים רבים, כדי להימנע מהקצאת שטחים גדולים ויקרים לאיגום, אין המהנדסים מתייחסים לאפשרות ויסות הזרימה.

מליון מ"ק לשנה. במדינת מולדובה, למשל, ששטחה כ-30 אלף קמ"ר, קרקעות דומות לאלה שבישראל, עובי משקעים כ-500 מ"מ לשנה בממוצע, טמפרטורת קיץ 35° ועובי התאדות שנתית 0.7 מ' (כמחצית מזו שבישראל), ישנם יותר מ-3,000 מאגרי גיא המפיקים קרוב למיליארד מ"ק מים לשנה, בעיקר להשקיה. בהיעדר אקוויפרים מתאימים, המים במולדובה נאגרים במאגרים על-קרקעיים ומהם מועברים להשקיה. בישראל, ישנה אגירה כזו במקום בו אין אפשרות החדרה לאקוויפרים (בגולן), וישנם מפעלים לאגירה תת-קרקעית (מפעל נחלי מנשה, מאגר שקמה ליד זיקים, משמר אילון, מחצבת הנסון ליד נחשונים ועוד).

1.7 מאגרים למניעת הצפות

מאגרי הגיא שהוקמו בישראל, נועדו בעיקר לניצול המים. בדיעבד הם גם מרסנים שיטפונות. בבקעת הירדן ישנם מאגרי צד למניעת הצפות, והוותיק שבהם הוקם בצד נחל בזק במורד כביש הבקעה. מאגר סנסנה בנחל עומר, שמרסן שיטפונות ונועד לאגירת מים לשם השקיה, נבנה באפיק הנחל. צורת סוללותיו ותעלת העורפים העוקפת אותו, גורמות לו להיות מאגר צד שמתמלא בגרביטציה. לצרכים דומים הוקמו בזמנו מספר סכרונים לאורך נחל הבשור, אחד מהם משמש כמאגר תפעולי למילוי מאגר צד (מאגר נירים) ולניצול מי הנחל להשקיה. למאגרים אלה קיבול קטן יחסית, ובדרך כלל אין להם השפעה משמעותית על הספיקות ועל הזרימה במורד. עם זאת, כיוון הפעולה של בניית מאגרי השהיה לריסון גאוויות במקום הגדלה של מובלי ניקוז ראשיים, מתחיל לתפוש מקום בתכנון תשתית הניקוז של ישראל. לדוגמה, לאחרונה נשקלת האפשרות להקמת מאגרי גיא למניעת הצפות במקומות רגישים באגן נחל אילון.

1.8 מאגרים להקטנת ספיקות התכן במורד הזרם, כאמצעי להוזלת מובלי ניקוז

מטרה אחרת לריסון שיטפונות, הקטנה של ספיקות התכן והוזלת של עלות הניקוז במורד הזרם. בעשורים האחרונים עושים בעולם רבות בכיוון זה, בעיקר בניקוז עירוני (שהדיון בו אינו נכלל במסגרת הספר הזה). במקרים רבים, הקמת מאגרים

יאפשר מיצוי מיטבי של שתי האפשרויות. מאגרי הגיא שהוקמו בישראל נועדו לניצול המים, אך למעשה גם מרסנים את הספיקות השיטפונות במורדם. חישוב התועלת מהמאגרים האלה, צריך לכלול את שני הרכיבים שלהם. תכנון מאגרים עתידיים צריך גם הוא להתייחס לשתי התועלות.

1.11 נתוני החלטה על הקמת מאגר גיא

- עלות ההקמה והאחזקה של המאגר;
- שטח הצפה מתוכנן, נזקי הצפה, נזקי החתירה;
- תועלת כלכלית-הנדסית ממניעת הצפה במורד או חיסכון בבניית מפעל ניקוז חליפי;
- אפשרות טופוגרפית לייצור קיבול גדול מספיק לוויסות הזרימה;
- כדאיות כלכלית של רכיבי אספקת המים באמינות מספקת;
- יכולת תקציבית להקים מתקנים הידרוליים מתאימים לספיקת התכן המווסתת;
- בטיחות באזור שעתיד להיות מוצף, יציבות הסכר ובדיקת ההשלכות במקרה שתיפרצה הסוללות או יגלשו מים לכיוונים בלתי רצויים, והתחשבות בשאר המפגעים האפשריים בעת ההקמה ובתקופת הקיום של המאגר;
- השפעות אחרות על הסביבה.

2. היבטים הנדסיים פרטניים

2.1 כללי

מאגר גיא חוסם אפיק זרימה, ועל ידי כך מעלה את מפלס המים בתוכו ובמעלה הזרם ממנו. שחרור המים אטי יחסית, וכתוצאה מכך נמצאים בחלל המאגר מים ברומים גבוהים מאלה ששררו לפני הקמתו. בפרק זה אנחנו מעיינים בהיבטים ההנדסיים של המאגר, מזווית שונה במקצת מזו שבפרק הקודם.

2.2 רכיבי המאגר

• חלל המאגר

עיקר המאגר הוא החלל המיועד לאגירת המים. במאגר גיא, נוצר החלל על ידי הסכר והסוללות הממשיכות אותו ומשתרע במרחב עד למקומות בהם משתווה רום פני הקרקע לרום פני הסוללות. הוא צריך לספק קיבול מתאים לאפשרויות ניצול המים וריסון השיטפונות. הקיבול לניצול נמצא

ב. הצורך במודלים אזוריים

נתונים הידרולוגיים נמדדים בתחנות הידרומטריות דלילות יחסית, שממוקמות במקומות מתאימים למדידה. במרבית המקרים, נדרש יישום הנתונים באתרים בהם אין ממוקמות תחנות הידרומטריות. מצב זה מחייב הערכה מתוך מודלים אזוריים, שבנויים על סמך הנתונים בתחנות. בנייה של מודלים כאלה למשתנה מורכב, כנדרש לוויסות הזרימה באמצעות מבנים הידרוליים, היא קשה ומסובכת, ולכן גם מרתיעה. נדירותה עלולה להרתיע את מנהלי הפרויקטים מהסתמכות עליה.

ג. החשש מפריצה

ברבות מארצות העולם נפוצים מפעלים לוויסות הזרימה, באמצעות מאגרים ומבנים הידרוליים. מאגר משמר אילון, למשל, שהוקם לשם ניצול המים, לא גלש מיום הקמתו, בשנת 1955, ותרם משמעותית להקטנת הספיקות שהופיעו מאז בנתב"ג ובנתבי אילון. חסימה מוחלטת או חלקית של האפיק, והצטברות הנתונים ההידרולוגים לאחר הקמתה, מאפשרים התחשבות במצב הקיים בעת חישוב ספיקות התכן במורד הזרם. במקרים רבים מקנן החשש שמא יפורק המפעל בעתיד או ייהרס עקב שיטפונות, ואז תכנון שאינו מתחשב באפשרות הזו ימצא בחסר. תכנון מכוון לוויסות הזרימה, כרוך בחישובים הנהירים רק למעטים ויישומו מחייב תחזוקה נאותה ואבטחה שהחסימה לא תשוחרר בעתיד. ידע, ניסיון ומערכת מנהלית איתנה, עשויים לעודד את השימוש במפעלים לוויסות הזרימה, תוך הקצאת שטחים מתאימים לאיגום המים העודפים זמנית. ברוסיה, מוכרים היטב החישובים האלה והם כתובים בספרי הידרולוגיה שימושית בפרק שנקרא "חישובי משק המים", בארצות הברית, הנושא נקרא River regulation by storage. בישראל, עם התעצמות השימוש בתוואי נחל אילון התחתון, והעלויות הגבוהות הכרוכות בפתרונות השונים לניקוז זרימות שיטפונות שם, נדונות לאחרונה האפשרויות לוויסות הזרימה באמצעות מאגרים ומבנים הידרוליים.

1.10 מאגרים דו-תכליתיים: להפקת מים

ולוויסות זרימות

רבים ממאגרי הגיא בעולם, נועדים לניצול מים ולריסון שיטפונות. לשם כך יש לדאוג שקיבולם

לשחרור או לשאיבת מים לשם ניצולם ומברץ חירום לשחרור מים במקרי הופעה של גאות גבוהות מגאות התכן.

2.3 הקצאת חלל המאגר

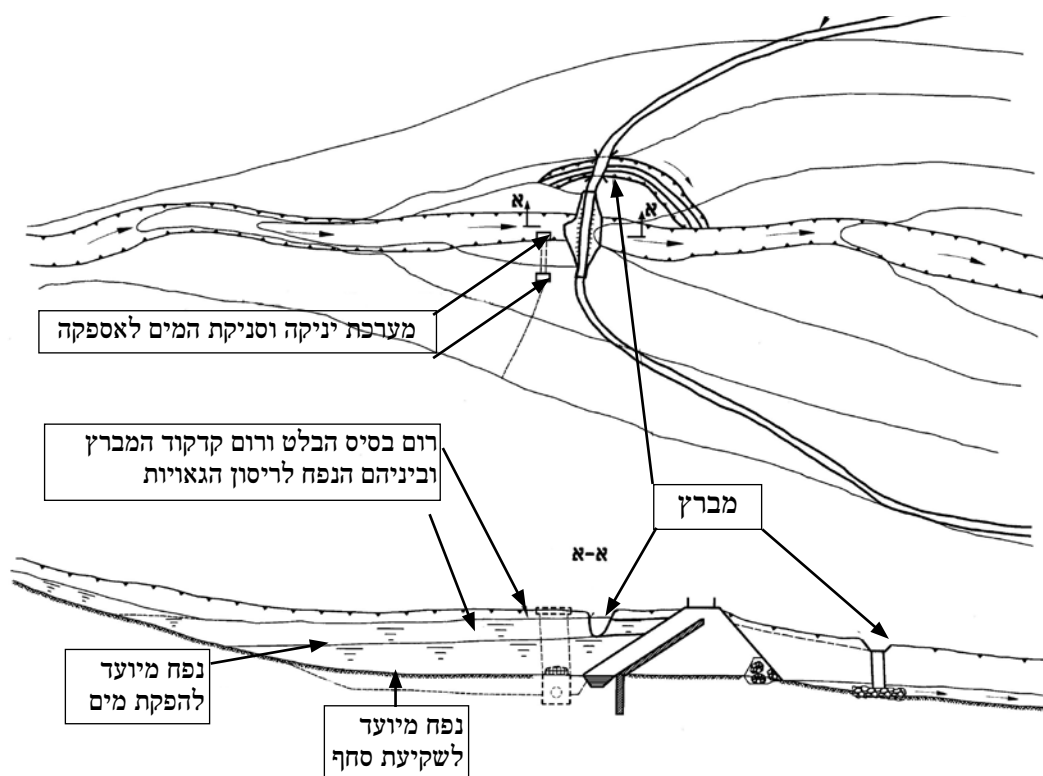
במאגר לניצול מים, נמצאים כל הרכיבים המתוארים לעיל, וחללו צריך לספק קיבול מתאים הן לניצול המים והן לריסון שיטפונות. במאגר לריסון שיטפונות בלבד, אין נמצאים מתקנים לניצול המים, אך ישנם מתקנים לשחרור מים עד כדי ריקון המאגר, וזאת כדי לאפשר קיבול מרבי לריסון השיטפונות. במאגר דו-תכליתי, משמש החלל עד רום קדקוד המברץ לאגירת מים לשם ניצולם, והחלל שמעליו לריסון שיטפונות. אם קיים סיכוי סביר להתמלאות המאגר לאחר תום עונת השיטפונות, אפשר להשאיר בו בעונת השיטפונות מים ברום נמוך יותר מרום קדקוד המברץ ולהגדיל את יכולתו לריסון שיטפונות, מבלי לפגוע ביכולתו לספק מים לניצול. במאגר שנועד לרסן שיטפונות, רצוי להוסיף בתחתיתו צינור בגודל מתאים להולכת זרימה חופשית ללא לחץ הידרולי, בספיקות קטנות שאינן מזיקות. בעת שהמאגר

בין קרקעית המאגר לבין קדקוד המברץ. הקיבול לריסון שיטפונות (נפח ריק במצבו הרגיל), נמצא בין רום קדקוד המברץ (או תחתית פתח הריקון של המאגר במקרה של מאגר שנועד לריסון בלבד) לבין רום נמוך מעט מקדקוד הסכר והסוללות. מעליו ועד לקדקוד הסכר והסוללות נמצא בלט בטיחות.

לאחר שנקבעים מקום המאגר וסוללותיו, מודדים את הטופוגרפיה של החלל בפירוט רב ומכינים עקומי רום-נפח ורום-שטח. אלה מתארים, בהתאמה, את נפח המים שניתן למלא במאגר עד לכל רום נתון ואת שטח פני המים בכל רום. הם משמשים לחישובי מאזן המים ולהערכת איבודי החלחול וההתאדות מן המאגר. את העקומים האלה יש להכין בעת תכנון המאגר ולעדכןם מיד לאחר הקמתו. ערכונים חוזרים נדרשים בעקבות הצטברות סחף בתוך המאגר.

• הרכיבים המוצקים

הרכיבים הקונסטרוקטיביים (המוצקים) של המאגר מתוארים בתרשים 1. הם כוללים: סכר על האפיק, סוללות, מברץ לשחרור מים עודפים, מתקנים



תרשים 1: מבנה מאגר גיא

בהקשר לתהליך המתואר לעיל, נציין כי אין קשר חד משמעי בין הספיקה הנכנסת לבין הספיקה היוצאת. ההפרש בין ספיקת השיא של הכניסה לבין ספיקת השיא של הגלישה, תלוי בצורת ההידרוגרף. על כן, גאוויות שוות בנפחן ובספיקת השיא שלהן אך שונות בצורת ההידרוגרף שלהן, תרוסנה במידה שונה זו מזו. ויסות הגאות נעשה על ידי חלל המאגר וכושר שחרור המים ממנו. בדרך כלל, תהליך הריסון אינו ניתן לחיזוי כללי, אלא מחייב חישוב מסודר. ניסיון מקצועי והיכרות עם האקלים והמשטר ההידרולוגי באזור העבודה, עשויים לאפשר אומדן מראש של מידת הריסון באמצעות מאגרים מוצעים.

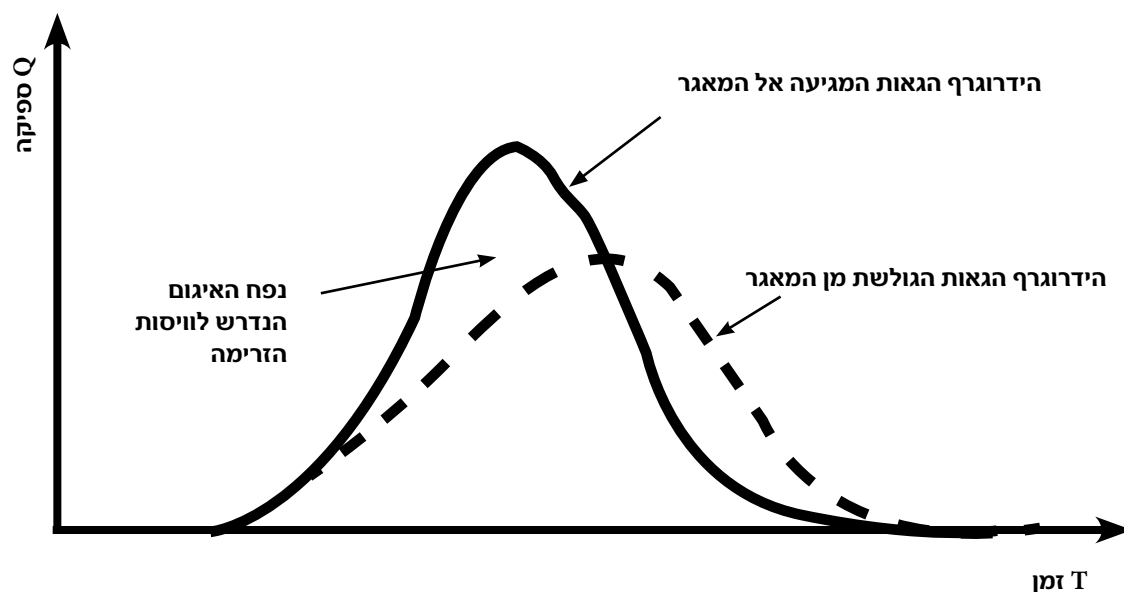
2.5 חישוב קיבול המאגר ומידת ריסון הספיקות באמצעותו

א. מאגר גיא לריסון שיטפונות
בדרך כלל מתייחסים לספיקה המגיעה לאתר המאגר לתקופת חזרה נבחרת (למשל 100 שנה), וקובעים עד כמה יש להקטין. לקראת החישוב, יש למדוד את הטופוגרפיה של אתר המאגר ולהכין על פיה עקום רום-נפח של האתר. כמו כן, יש לייצר הידרוגרף של גאות צפויה בעלת ספיקת השיא הנדונה. אם אין ביטחון בצורת ההידרוגרף, יש לייצר הידרוגרפים צפויים אחדים בעלי הספיקה הזו ולהשתמש בהם במקביל. מכאן עוברים לחישובי הילוך גאות במאגרים אפשריים. מניחים רום

מתמלא, הצינור פועל בלחץ הידרולי שגובר עם התרוממות פני המים. כשהגאות דועכת, יורדים פני המים במאגר וספיקת השחרור דרך הצינור דועכת. בסופו של התהליך, כל מי הגאות עוברים ממעלה המאגר למורדו, אך בספיקות קטנות יותר, כמתואר בתרשים 2.

2.4 הילוך הגאות במאגר

גאות שמגיעה למאגר נעצרת בתוכו. במהלך כניסתה מתרוממים פני המים במאגר. כאשר הם עולים מעל רום קרקוד המברץ, מתחילה גלישה. ספיקת הגלישה נמצאת בקשר עולה עם רום פני המים. כל עוד גדולה ספיקת הכניסה אל המאגר (סכום ספיקת הגאות המגיעה וספיקת מים אחרים שנכנסים למאגר) מספיקת היציאה ממנו (סכום ספיקות הגלישה והשחרור לניצול), גדל האוגר (נפח המים שנמצאים במאגר), פני המים מתרוממים וספיקת הגלישה גדלה. כאשר ספיקת הכניסה קטנה מספיקת היציאה, האוגר קטן, פני המים נוחתים וספיקת הגלישה קטנה. ספיקת הגלישה המרבית מופיעה, כאשר ספיקת הכניסה נמצאת בדעיכה ושווה לספיקת היציאה. על כן נמוכה ספיקת השיא של הגלישה מספיקת השיא של הגאות וגם מועד הופעתה מאוחר יותר (ראה תרשים 2). הנוסחאות המתמטיות של הילוך הגאות, מופיעות במאמר ההידרולוגיה, (בן-צבי, 2008) ולא נחזור עליהן כאן.



תרשים 2: הילוך גאות במאגר

מהם וגם פונקציית איבודים. פונקציית איבודים, קושרת את החלחול ואת ההתאדות מן המאגר אל רום פני המים בתוכו. בשלב הבא עורכים מאזני מים של המאגר (ראה נוסחאות המאזן אצל בן-צבי, 2008), ורושמים את אמינות האספקה (אחוז הזמן בו ניתן לספק את כמויות המים הנדרשות), תדירות הכשלים (מקרים בהם אין די מים כנדרש לניצול) ואת היחס בין נפח האספקה הנדרש לבין הנפח המסופק בפועל. בשלב הבא משווים את העלויות והתועלות מן המאגר בכל אחת מהחלופות ובכל אחד מהתנאים המטאורולוגיים וההידרולוגיים. בהסתמך על תוצאות ההשוואה ועל שיקולים חברתיים וסביבתיים, בוחרים את החלופה המועדפת.

ג. מאגר צדי לניצול מים

אופן החישוב דומה לזה של מאגר גיא, אלא שלמאגר צדי יש להוסיף את מערכת ההטיה של מים לתוכו (תעלה או משאבה וצינור) ולתכנן את ספיקת ההטיה. הנפח המוטה אל המאגר, אינו תמיד נפח הגאות המגיעה לאתר ההטיה של המים אליו. כאשר ספיקת המים הזורמים באפיק נמוכה מספיקת ההטיה, ניתן להטות את כל הזרימה באפיק. אולם כאשר ספיקת המים באפיק גבוהה מספיקת ההטיה, ניתן להטות רק בספיקת ההטיה ואילו הספיקה העודפת זורמת למורד האפיק. כתוצאה מכך, יכול להיווצר מצב בו אין המאגר מלא, אולם לא כל מי הגאותות הוטו אליו. לכשמוכנים ההידרוגרפים של המים בני ההטיה, אפשר לערוך מאזן מים כשם שעורכים למאגר גיא. משתני ההחלטה העיקריים הם, קיבול המאגר וספיקת ההטיה. כאשר המאגר מיועד לקליטת קולחים, מים מותפלים או מים אחרים שיוצאים ממערכת נשלטת, יש להתקין מוצא חליפי לשחרור עודפי מים מן המאגר כאשר הוא מלא.

ד. מאגר משולב

במאגר משולב לניצול מים ליעדים אחדים, יש להכין טבלת קדימויות או לוח מים לאספקה, כאשר אין הם מספיקים למילוי כל הדרישות. במאגר משולב לריסון שיטפונות ולניצול מים, יש לפנות לקראת עונת השיטפונות אוגר מספיק לקליטת נגר, אשר באמצעותו מרוסן השיטפון. הנחת המוצא לחישוב מידת הריסון היא, שלקראת ההופעה של גאות

קדקוד וממדי מברץ של מאגר סביר, מתאימים לו את עקום רום-נפח של האתר ומחשבים את ספיקות הגלישה כפונקציה של רום פני המים. בהסתמך עליהם, מוליכים דרך המאגר את ההידרוגרף הגאות (ראה נוסחאות הילוך הגאות אצל בן-צבי, 2008), ורושמים את ספיקת הגלישה המרבית והרום המרבי של פני המים במאגר, אשר מתקבלים מן החישוב. לאחר מכן מניחים רום קדקוד ורוחב מברץ של מאגר סביר אחר, וחוזרים על הפעולות בהקשר אליו. כך מתייחסים למאגרים אפשריים אחדים. מתוך התוצאות המתקבלות למאגרים השונים, בונים קשרים בין ספיקת הגלישה המרבית ורום פני המים המרבי לבין רום קדקוד המברץ ורוחבו. לאחר מכן מעריכים את עלות המאגר בהקשר לרום קדקוד המברץ ורוחבו, ובוחרים את המאגר בעל העלות המזערית אשר עדיין מרסן את ספיקת הגאות במידה שנקבעה מראש.

השימוש בשיטה הרשומה לעיל, של מאזנים והילוכי גאות, עלולה לגזול זמן ואמצעים מרובים. כדי לחסוך בהם, במיוחד בשלבים התחיליים של התכנון, סוקרים כללית את האפשרויות. אפשר להשתמש בשיטות חסכוניות יותר - אחת מהן היא שיטת קוצ'רין. לצורך ההערכה בשיטה זו, משתמשים בגרף ההידרולוגי-טופוגרפי: נפח/שטח הצפה/רום פני המים, ועל בסיסו מחשבים את רמת הוויסות במאגר ואת ספיקת המברץ. נוסחת החישוב שלו:

$$Q = (1 - W/W^{P\%}) Q^{P\%}$$

כאשר $Q^{P\%}$ היא ספיקת התכן להסתברות שנקבעה, $W/W^{P\%}$ היחס בין קיבול המאגר לבין נפח התכן להסתברות זו.

ב. מאגר גיא לניצול מים

מים הזורמים באפיק, יכולים להיאגר לשם השקיה חקלאית או עירונית, ייצור חשמל, אפסור זרימה רצויה במורד הזרם לצורכי טבע ונופש ועוד. לקראת תכנון מאגר לניצולם הנאות, יש להעריך ההידרוגרפים צפויים של הזרימה אל המאגר במצבים מטאורולוגיים והידרולוגיים שונים, ואת ההידרוגרפים הנדרשים להוצאת המים מן המאגר במצבים אלה. גם במקרה זה מתוכנן המאגר באורח אמפירי, תוך הערכה של עקום רום-נפח של האתר, בחירת רומי קדקוד ורוחב מברץ של מאגרים סבירים אחדים, הכנת פונקציית גלישה לכל אחד

- קיבול המאגר וגודל המברץ הנדרשים לריסון הגאות, במגבלות קו ההצפה המרבי וספיקת הגלישה המרבית שנקבעו בשלב הקודם.
- מיקום הסכר והסוללות שייצרו את הקיבול הזה, גובהם ורוחבם, תוך התחשבות בנתונים הגיאוטכניים וההידרולוגיים של האתר.
- מיקום המברץ, מברץ החירום וכן מתקני שחרור המים וגודלם. מברץ החירום, יתוכנן בהתייחס להופעה של גאות גדולה במידה ניכרת מגאות התכן. מתקני השחרור, יתוכננו בהתייחס לצורך בניצול המים בעונת הגאות ובעונת היובש ולצורך לפנות קיבול מספיק לריסון גאות שששויות להופיע בעקבות גאות התכן.
- אמצעים למניעת חתירה במדרונות הסוללות ובגדות האפיק במורד המאגר.
- כביש תקני על גבי הסכר (אם נחוץ), כולל מעקה בטיחות ומיסעה מתאימה.
- מערכת דרכי גישה לתפעול המאגר ולאחזקתו.
- מתקני ניקוז סביב המאגר, במקומות בהם הוא מפריע למערכת הניקוז הטבעית.
- התייחסות למראה המאגר ולהשתלבותו בסביבה, ויצירת מעברים לבעלי חיים.

2.8 אמצעי זהירות

חשוב מאוד לתכנן בזהירות את כל המתקנים החיוניים למניעת פריצה של המאגר, כולל נקזים של הסוללות, אמצעים למניעת חלחול ומחתור, ממברנות, מחיצות וכדומה. לפי משרד הפיתוח של ארה"ב (USBR): "כל המתקנים השומרים על שלמות הסכר ואי פריצתו, יתוכננו כאילו הוא אינו עומד בלחצי המים, ובמקביל יתוכננו הסכר וסוללותיו, כאילו אין המתקנים האלה קיימים". כך נוצרת הגנה כפולה. עם זאת, יש לזכור כי גאות התכן, שכנגד הופעתה מחושבת יציבות הסכר, נבחרת בהקשר לתקופת חזרה נדרשת. כלומר, ידוע מראש שתיתכן הופעה של גאות גדולה יותר. רצוי להכין מראש כלים להתמודדות עם הופעה כזו ("קו הגנה שני"), כגון מברץ חירום ברום קדקוד נמוך מזה של הסוללות העיקריות, סוללות הגנה על מתקנים רגישים במורד הזרם וכדומה.

2.9 אמצעי חישוב

החישובים דלעיל ניתנים להיעשות באמצעות

שיטפונת עומד לרשות הריסון רק האוגר המיועד לו. במקרה שעונת השיטפונות אינה זהה לעונת הניצול, אפשר להגמיש את הגדרות האוגר המיועד לכל אחד מהיעדים ולהקצות להן ערכים עונתיים. יש לציין כי מאגר צדי אינו מתרוקן, בדרך כלל, בזרימה גריבטיבית. אי לכן אין לסמוך על נפחו כאמצעי לריסון שיטפונות.

נוסף לאוגר לניצול ולאוגר לריסון, יש להקצות במאגר גם אוגר "מת", להצטברות הסחופת השוקעת במאגר. אוגר זה נוצר באמצעות בנייה של מתקני שחרור המים ברום מסוים מעל קרקעית המאגר. האוגר ה"מת" יכול לשמש גם לשמירת ערכי טבע ולקישט ונופש.

2.6 סכנת פריצה

שיקול חשוב בתכנון מאגר, הוא החשש מפני פריצת הסכר או הסוללות, אשר עלולה לגרום להצפה ולזרימה מהירה במורד בספיקה גבוהה מספיקת התכן ומספיקת הגאות המגיעה אל המאגר. כדי להתגונן מפני הנזקים שהגאות המתפרצת עלולה לגרום, יש לחשב את גודלה. ישנן היום תוכנות מיועדות למטרה זו. כדי להתגונן מפני ספיקות כה גבוהות, יש למגן את מורד המאגר, עד לרמה נסבלת של נזקים.

2.7 הליכי תכנון עקרוניים

א. כדאיות כלכלית

יש לקבוע את קו ההצפה המרבי המותר במאגר ובמעלה ובמורד הזרם ממנו, ובהתאם לכך את ספיקת התכן לגלישה. זאת עושים באמצעות חישובים הנדסיים-כלכליים של עלויות הרכיבים השונים של המאגר ותועלותיו, כנגד היקף הנזקים הנותרים בהקשר לקו ההצפה המרבי. חישוב הנזקים צריך להתייחס לפגיעה במבנים, בשטחים חקלאיים, ברכוש אחר, בתחבורה וגם לנוחות האנושית ולסביבה. החישובים הכלכליים מתייחסים לתקופת הקיום של המאגר. במקרים רבים נהוג לקבוע אותה כ- 30 שנה.

ב. מיקום רכיבי המאגר

להמשך התכנון, מכינים עקומי רום-שטח-נפח והידרוגרף תכן עבור האתר הנבחר, וממפים את קו ההצפה המרבי. בהתחשב בהם, מתכננים בפירוט רב יותר את רכיבי המאגר הרשומים להלן.

גבוהה. מאחר שקיים קשר בין ממדיהם הפיסיים הנדרשים כדי לעמוד בצורכי אספקת המים ובמגבלות ריסון השיטפונות, יש לתכננם בו-בזמן כמכלול אחד, תוך כדי אופטימיזציה הנדסית-כלכלית שלו.

3.3 שילוב מומחיות

תכנון סכרים מערב מומחיות רב-תחומית, ולכן מחייב עבודת צוות מורכב וניהול מאוחד ומתואם. נושאי העבודה העיקריים הם: הידרולוגיה, הידרוליקה, גיאוטכניקה, הידרוגיאולוגיה, הנדסת מבנים, הנדסת כבישים, ניהול הנדסי, בטיחות ועוד.

3.4 פרטים חשובים בתכנון

- א. רום קדקוד המברץ וגובה הסוללות מעליו;
- ב. רום קדקוד מברץ החירום, מקומו ומסלול המים שישתחררו דרכו;
- ג. גובה הבלט, נקבע לפי מהירות הרוח לתקופת חזרה מתאימה ואורך הדרך שלה על פני המאגר (כשהוא מלא). תקופת החזרה של עוצמת הרוח יכולה להיות קצרה מזו של גאות התכן, כי הופעתן אינה בו-בזמן, בדרך כלל, וסכנתה המתוכננת מותנית בהופעה של גאות התכן.
- ד. שיפועי הסוללות נקבעים על סמך חישובים גיאוטכניים של יציבותן ופשטות אחזקתן (שיפוע מתון מ-3:1 מאפשר אחזקה ממוכנת).
- ה. חומר מילוי הסכר והסוללות.
- ו. אמצעים למניעת חלחול ומחתור בתוך הסכר והסוללות ומתחתם (בדרך כלל בונים חציץ מחרסית אטימה ומהודקת בתוך הגוף ומתחת לסכר) (ראה תרשים 3).

תוכנות חישוב פשוטות (כגון אקסל), אולם בשנים האחרונות פורסמו באינטרנט תוכנות מדף אחדות, כגון התוכנה הקנדית HYDRO ROUT, אשר מאפשרות לבצע את החישובים בנקל, תוך מזעור טעויות אפשריות.

3. הסכר

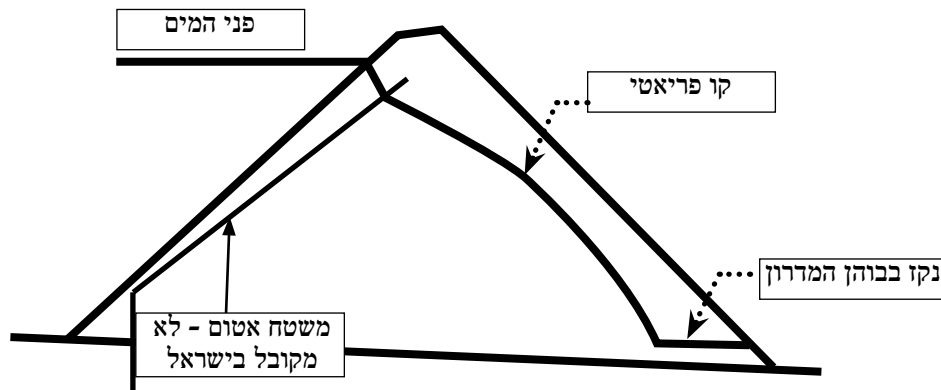
3.1 מבנה הסכר

הסכר הוא הרכיב הכבד ביותר של המאגר. תפקידו לחסום את האפיק וליצור, עם הסוללות המשלימות אותו משני צדדיו, את חלל המאגר. גובה הסכר נקבע על פי נפח החלל הנדרש ומגבלות השטח המותר בהצפה. בחתך אנכי לרוחב הסכר (תרשים 1, חלק תחתון), נראות שכבות החלל הבאות (מלמטה למעלה):

- א. אוגר "מת" לשיקוע סחף. שכבה זו צמודה לקרקעית המאגר. ברום הקרקעית נמצא צינור לריקון מוחלט של המאגר.
- ב. אוגר לניצול המים. ברום התחתון של שכבה זו נמצא מתקן/צינור להפקת מים בגרביטציה או בשאיבה.
- ג. אוגר לריסון שיטפונות. בדרך כלל הוא ריק ממים, ומתמלא, למשך זמן קצר, בעת הופעת שיטפונות. הרום התחתון של שכבה זו הוא רום קדקוד המברץ, שנועד לשחרור מי שיטפונות.
- ד. בלט. אוגר שנוצר על ידי הגבהה של הסכר והסוללות, מעל לרום הנדרש לריסון שיטפון התכן, ונועד לבלימת גלים ולתוספת ביטחון בעת הופעת שיטפונות.

3.2 תכנון לממדים אופטימליים

הקמת הסכר, המברץ והסוללות, כרוכה בעלות



תרשים 3: חלחול בתוך הסכר ואמצעי מניעתו

המידע על ספיקות הכניסה, הגלישה והניצול, מאפשר הערכה כלכלית בדיעבד של התועלת מן המאגר, הערכה של כדאיות הגדלתו וגם מסייע בהערכה של כדאיות ההקמה של מאגרים אחרים באזור בו נמצא המאגר הנדון.

חשוב למדוד את עומד מי התהום, בתוך סוללת המאגר ובקרבתו. הדבר נחוץ לצורך הערכת קצב חלחול המים בתוך הסוללה ולמניעת תופעת מנהור ופריצת הסכר. לצורך המדידות הללו מקימים קידוחים מיוחדים לאורך הסוללות, עומק הקידוחים נקבע לפי גובה הסכר ומפלס מי התהום הצפוי במקום זה. חשוב להכיר את ההפרעה של המאגר לזרימה החופשית של מי התהום תחתיו, ולנקוט את המים שזרימתם מופרעת. בעמק יזרעאל, למשל, גרמה הפרעה זו להמלחת קרקעות במעלה המאגר. כדי למונעה, יש להקים רשת קידוחי תצפית מי תהום סביב המאגר.

6. שמירה על הסביבה

כל סכר החוצה אפיק נחל, מהווה מפגע סביבתי שמונע תנועה חופשית של מי נגר עילי, בעלי חיים ודגים. תכנון נכון של מאגרים, אמור להתבסס על הנחיות הגורמים ה"ירוקים". רצוי לכלול יועץ סביבה בצוות התכנון. רצוי שמאגר לא יראה כמתקן הנדסי זר לסביבה, אלא ישתלב עם הנוף, היקפו יהיה מעוגל וסוללותיו מחופות בצמחייה המתאימה למקום.

מאגרים לריסון שיטפונות (בלבד) אינם מקטינים את נפח הגאות העוברות דרכם, אלא מקטינים את הספיקות הגבוהות ומאריכים את משך הזרימה. כתוצאה מכך, הטבע מקבל את מנת המים הטבעית במלואה, אולם בספיקה מבוקרת. לצורך זה מצוידים המאגרים במתקן לשחרור מים, שנמצא בתחתיתם. המאגרים מצמצמים את היקף ההצפות והחתירה של אפיקים ואת שיקוע הסחופת. המים המשוחררים מגיעים לאפיק הנחל בזרימה רגועה יחסית. עם זאת, יש שמעדיפים לשמר את הספיקות הגבוהות והחריגות והשפעותיהן על אפיק הנחל וצמחייתו. בהקשר לכך, יש לזכור כי ספיקות הגאות וכמות החומרים המוסעים בהן, עלולות לגדול גם עקב פעולות אנוש (כגון ניקוז והסדרה במעלה הזרם, עיבוד קרקעות), ועל כן מאגר לריסון גאות עשוי להחזיר לקרבת המצב הטבעי.

ז. הנקזים בתוך ובבוהן הסוללות.

ח. אמצעים למניעת חלחול לאורך הצנרת, החוצה את הסכר או הסוללות ובמישקים בין הסכר לבין הסוללות וביניהם לבין פני הקרקע הטבעיים.

4. מתקנים לשחרור מים ולהפקתם

- מברץ עילי או מברץ חירום לגלישת עודפי מים בצורת מגלש על גבי הסכר או במקום צדדי או תעלה בצד הסכר. בקצה התחתון של המברץ צריך להימצא מתקן לשבירת אנרגיה, כדי למנוע חתירה חזקה של האפיק הקולט את המים המשתחררים. מברץ בצורת תעלה (תלולה), יכול לכלול שוברי אנרגיה לכל אורכו ומתקן יציאה לשחרור מתאים של המים לאפיק הקולט. המברץ יכול לכלול מתקן כניסה להכוונה נאותה של המים.
- מברץ תחתית בצורת מעביר מים עם מגוף, בתוך הסכר או הסוללה. הוא צריך לכלול מתקן כניסה, צינור הולכה עגול או מלבני, מתקן לשבירת האנרגיה במוצאו ומתקן ליציאת המים.
- מתקן לריקון המאגר בצורת שוחת ניקוז עם מגוף וצינור מוצא או מתקן צף עם משאבה וצינור סניקה צף.
- מתקני הפקה לניצול המים, בדרך כלל דומים למברץ תחתית או למתקן לריקון המאגר.

5. מתקני מדידה

מתקנים למדידה רצופה של רום פני המים במאגר, נחוצים לקביעת נפח המים הנמצאים בו והספיקה של המים הגולשים ממנו. מדידה זו צריכה להיעשות בנקודה נמוכה טופוגרפית, אך לא סמוכה מדי למברץ, כי בקרבתו פני המים לא תמיד אופקיים. במקביל יש למדוד את ספיקות המים המשוחררים מהמאגר, כדי לעמוד על מידת ניצול המים לצרכים השונים. שילוב מהלך הרומים במאגר עם עקום רום-נפח ועקום האיבודים ועם הידרוגרפי הגלישה והניצול, מאפשר לחשב, באמצעות מאזן מים, את הידרוגרף הכניסה אל המאגר. עקום האיבודים הוא פונקציה אמפירית שקושרת את שיעור איבודי המים בחלחול, התאדות ודליפה דרך הסוללות אל רום פני המים במאגר. מכינים אותו בעת שאין כניסת מי גאות למאגר או מתוך מאזן מים, אם ישנה מדידה בלתי תלויה של ספיקות הכניסה.

7. תחזוקה

7.1 אמצעים מקדימים

כדי למנוע נזקים ולהקל על פעולות התחזוקה, יש להכין מראש אמצעים מסייעים, כגון דרכי גישה על הסוללות ואל המתקנים השונים, סמנים שמצביעים על מצב הסוללות, מסננות אבן להכוונת הבצבוע דרך הסוללות, קידוחים למדידת עומד מי התהום הרדודים תחת המאגר ובקרבנו ועוד. צירוף אמצעים טלמטריים למתקני המדידה של מפלס המים, מקל על התפעול. חיבור למערכת אזעקה ויישומה במקרים של מפלס גבוה מדי או נמוך מדי, מאפשר התמודדות מידית עם כשלי גלישה גדולה או תקלות במערכות ניצול המים. יש להכין מראש את תכנית התחזוקה של המאגר והטיפול ברכיביו המכניים. יש להכין מתקנים לשחרור מים למטרות תחזוקה או כאשר, מסיבה כלשהי, אין איכות המים הנמצאים במאגר מתאימה לניצולם הנאות. תכנית הפעולה צריכה להביא בחשבון גם מקרים של חבלה זדונית.

7.2 שגרה

יש לבחון לעתים תדירות את מצב סוללות המאגר ואם מופיעים בהן סימנים של בצבוע או מחתור, לעקוב אחר התפתחות הדליפות מן המאגר, לתקן נזקי חתירה בסוללות בעקבות גשמים רבי עוצמה, לסתום חתירה במורד המברץ ולהגן מפני התחתרותה כלפי המאגר, לנקות סחף שמצטבר במאגר (אם הוא מפריע או מזיק), לעדכן מדי פעם בפעם את עקומי רום-נפח ורום-שטח, לבדוק לקראת כל חורף את תקינות המברץ ובמיוחד אם יש לו רכיבים מכניים ואת מצב מברץ החירום. רצוי לדאוג לניקיון האפיק במורד המברץ ולשמור על כושר ההולכה שלו.

7.3 תיקון נזקים

נזקים עלולים להיגרם על ידי גשמים רבי עוצמה ועל ידי ספיקות נגר גבוהות. יש לתקנם מיד לאחר הופעתם, פן יתרחבו וכשילו באירועים הבאים. במקביל, יש לשקם את סביבת המאגר שניזוקה ואת המערכות לניצול המים. לעתים כדאי יותר לחדש את המאגר או לנטשו. תיעוד מסודר של אופן התהוות הנזקים וגורמיהם, מסייע בתכנון נכון של המאגרים הבאים ובשיפור התחזוקה של המאגרים הקיימים.

7.4 קשר עם הניקוז

מאגרים, ובמיוחד מאגרי גיא, עוצרים את זרימת המים ואילו הניקוז מיועד להקל עליה, בדרך כלל. עם זאת, מאגרים שמיועדים לריסון שיטפונות, מהווים חלק חשוב בתכנית ניקוז. הריסון מיועד לסייע בהגנה על שטחים רגישים ויכול לחסוך בהיקף אמצעי ניקוז במורד הזרם ובעלותם. מאגרים שמיועדים לניצול מים, עלולים להפריע לתהליך הניקוז. אם איכות המים באפיק מתאימה, אפשר להטות למאגר את מי הניקוז. אם אין האיכות מתאימה או אם אין מי האפיק רצויים למאגר מסיבות אחרות, יש לחפור סביב המאגר תעלה שתטה את מי האפיק אל מורד המאגר. כל מאגר זקוק למברץ, אשר משחרר למורד את המים העודפים בו. השחרור עלול להתנגש עם מי הנגר המגיעים למורד המאגר בדרכים אחרות, ולגרום להופעת ספיקות בלתי רצויות שם. אם איכות מי המאגר אינה רצויה לסביבה, יש למנוע את גלישתם החוצה. אחד האמצעים לכך הוא מניעת הכניסה של מי נגר ממעלה המאגר אל תוכו.

מראי מקומות

- בן-צבי, א' (2008). הידרולוגיה. בתוך: נחלים וניקוז - תהליכים, הנדסה ותכן (ע' א' בן-צבי). רשות ניקוז שקמה-בשור והמכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון, עומר: 47-68.
- גריניס, ל'; בן-צבי, א' (2008). מבנים הידרוליים. בתוך: נחלים וניקוז - תהליכים, הנדסה ותכן (ע' א' בן-צבי). רשות ניקוז שקמה-בשור והמכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון, עומר: 183-202.
- פושמן, א'; לור, ה' (1995). מודל אופטימיזציה-סימולציה ככלי לתכנון ותפעול מאגרים בנגב. הנדסת מים, 20: 31-34.
- Ben-Zvi, A. (1993). Distribution of flood volumes beyond design discharges. In: **Engrg. Hydrology** (ed. C.Y. Kuo). ASCE, San Francisco, CA USA: 97-102.
- Ben-Zvi, A. (1996). Prediction of rare inundation volumes of runoff. In: **Proc. VIIth IAHR Intl Symp. Stochastic Hydraulics '96** (eds. K. Tickle et al.). Balkema, Rotterdam, Netherlands: 349-356.

Davis, C.D. (Ed.) (1952). **Handbook of Applied Hydraulics**, 2nd Ed. McGRAW-HILL, N.Y.

USBR (1981). **Training for Dam Operators**, a manual for instructors.

Федичкин, И.К.; Волков; И.М. Автономов, Б.П. (1970). Методическое пособие по выполнению курсового проекта. **Водохранилищный узел сооружений**. Новочеркасский

иженерно - мелиоративный институт (פדיצקין, וולקוב ואבטונומוב). מתודולוגיה מלמדת לסטודנטים - תכנון מערכות מאגרי גיא. המכון להידרוטכניקה (ומלירציה, נובוצ'רקסק).

Шабанов, А.Д. (1977). Пруды в сельском хозяйстве. изд-во Колос, Москва שבנוב א.ד., מאגרי גיא במשק החקלאי. הוצאת (קולוס, מוסקבה).

תכנון הידרולוגי באפיקי מים

שמואל פולק

מהנדס מתכנן, הידרומודול, קיראון.

1. מטרות והליכים פורמליים

תכנון הידרולוגי של אפיקי הנחלים מתבצע בדרך כלל למטרות הבאות:

- א. שיפור הניקוז האזורי.
 - ב. הזזת האפיק עקב שינויים בשימושי הקרקע.
 - ג. ריסון שיטפונות במורד.
- לשיפור הניקוז האזורי מגדילים, בדרך כלל, את כושר הובלת המים באפיק, מקצרים פיתולים, מרחיבים את החתך ומקטינים את חספוס הדפנות, רצוי תוך ביצוע שינויים מינימליים הכרחיים מהמזב הטבעי. ריסון שיטפונות במורד הנחל ו"חיתוך" שיאי גאוויות מלווה בהגדלת פיתולי הנחל, בניית מכשולים להגבהת פני המים בפשט ההצפה, שימור המים באזור וכדומה. בישראל, אין הנחיות ברורות וחד משמעיות או סטנדרטים מאושרים להסדרת הנחלים, והתכנון מתבצע בהתאם למטרה ולמשאבים העומדים לרשות המתכנן ולמידת הבנתו.

תכנון הסדרת הנחלים מתבצע באופן כללי לפי חוק הניקוז וההמלצות המקובלות (עד כמה שקיימות), כאשר התהליך הוא כדלקמן:

- א. תכנית ההסדרה יזומה על ידי בעל עניין או על ידי רשות הניקוז.

- ב. תכנית יזומה על ידי בעל עניין מועברת לאישור רשות הניקוז.

- ג. רשות הניקוז מגישה את התכנית לוועדה הנדסית משותפת למשרד החקלאות ולנציבות המים בהשתתפות נציגי המשרד להגנת הסביבה, רשות שמורות הטבע ונציגי משרדים ובעלי עניין אחרים בהתאם לסוג הפרויקט.

- ד. לאחר אישור התכנית על ידי הוועדה המשותפת, מציגה אותו רשות ניקוז לאישור מועצת הניקוז.

- ה. לאחר אישורה, מועברת התכנית לאישור שר החקלאות.

- ו. לשכת שר החקלאות מעבירה אותה לסיכומים עם לשכת התכנון המחוזית.

- ז. לאחר עדכונים ודיונים, החומר חוזר ללשכת השר לקבלת אישור סופי לביצוע הפרויקט לפי חוק הניקוז.

- ח. התכנית מפורסמת בעיתונות ואם ישנן התנגדויות, מתחיל תהליך שמיעתן ונערכים דיונים עד לקבלת החלטה.

ההליך הזה אורך כשנתיים, והוא מיועד בעיקר לנחלים ארציים. נחלים אזוריים ותעלות מקומיות עוברים הליך קצר יותר.

2. קביעת תקופת החזרה

עד לאחרונה לא היו בישראל כללים מחייבים לקביעת תקופת החזרה לספיקות תכן בהסדרת נחלים, המתכננים השתמשו בנהלים ממדינות שונות ובהתאם להבנתם. כיום מחייבת תמ"א 34 ב'3 לתכנן את האפיקים בהתאם לספיקות הרשומות בטבלה 1. לשטחים חקלאיים מקובלות, אם כי אינן מחייבות, תקופות החזרה הרשומות בטבלה 2. יש לזכור כי תקופת החזרה היא פרק הזמן הממוצע בין הופעות של גאוויות ששיאיהן גבוהים לפחות כמו הספיקה הנדונה. משמע, תכנון כזה עדיין מותיר סיכון מסוים להופעת גאות בעלת שיא גבוה יותר מספיקת התכן, על כל הכרוך בה. על כן, כאשר ישנה סכנה גדולה לחיי אדם או לאסון כלכלי, יש להחמיר ולהאריך את תקופת החזרה. יזם התכנית אחראי לקביעת תקופת החזרה. האחריות מתגלגלת גם לגורמים המאשרים, החל ברשות הניקוז וכלה בשר החקלאות.

3. קביעת ספיקת התכן

תכנון ההסדרה מתחיל בסקר הידרולוגי לקביעת פרמטרים הידרולוגיים והידרוליים בשני מישורים: מצב קיים ומצב מתוכנן. הוא מתחיל בקביעת ספיקת התכן, אשר מחושבת, בדרך כלל, באמצעות מודלים ובהקשר לתקופת החזרה שנבחרה. רצוי לבדוק את תוצאות המודלים באורח אמפירי כנגד נתונים מדויקים באזור העבודה. כדי

טבלה 1: תקופות חזרה לספיקות התכן (לפי תמ"א 34 ב'3)

השימוש בשטח	תקופת חזרה (שנים)	הסתברות השגה שנתית (%)
חקלאות: גידולי שדה ומטעים, פארקים	10	10
בתי צמיחה ומבנים בשטחים פתוחים	25	4
כבישים ומסילות ברזל*	לפחות 50	2, לכל היותר
סוללות מאגרים וסכרים**	100	1
שטחים מבוזנים - מעורקי ניקוז ראשיים**	100	1
שטחים מבוזנים - רחובות, מגרשי חנייה, חצרות בתים מכל	5 - 50	2 - 20
מערכת ניקוז		
הצפה פנימית של בתים מכל מערכת ניקוז	100	1

*הצפת מיסעות וגשרים לפי תקני מע"צ ורכבת ישראל.

** בכל מקרה שיש סיכון ישיר לחיי אדם, הסתברות התכנון תהיה 1% ומטה, בהתאם לדרגת הסיכון ולחומרת הנזק.

טבלה 2: תקופות חזרה מקובלות לספיקות התכן של שטחים חקלאיים

השימוש בשטח	תקופת חזרה (שנים)	הסתברות השגה שנתית (%)
מרעה	2	50
חקלאות אקסטנסיבית, פארקים	10	10
חקלאות אינטנסיבית, מטעים	20	5
מבנים הידרוליים	לפחות 50	2, לכל היותר
מאגרים	100	1

בישראל, על תכונות הקרקע של תחום ההתנקזות ועל נוסחאות ושיטות סטטיסטיות מקובלות בברית המועצות לשעבר. שלושת המודלים מצויים כעת (שנת 2007) בהליכי עדכון.

לבד מהשימוש במודלים, מומלץ להעריך את ספיקת התכן על סמך נתונים מתאימים שנמדדו בסביבתו הגיאוגרפית של האפיק העומד לתכנון. לכל תחנה הידרומטרית מתאימה, יש להכין סטטיסטיקה של הספיקות שנמדדו בה. במקרה שהנתנים בתחום התנקזותה דומים מבחינת שטח תחום ההתנקזות (הבדל קטן מ-20%), צורת הנחל, שיפועים אורכיים, מצב הידרוגיאולוגי, מצב הניקוז באגן או הקטע הנדון וכדומה, אפשר להעתיק את התוצאות הסטטיסטיות באמצעות נוסחת מעבר הקושרת את הספיקה לשטח תחום ההתנקזות:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^n$$

כאשר Q - ספיקה (מ"ק לשנייה), A - שטח תחום ההתנקזות (קמ"ר), n - מעריך החזקה. הידרולוגים

להקל על בחירת תקופת החזרה ולאפשר שיקולי כדאיות, רצוי להעריך ספיקות צפויות לטווח של תקופות חזרה. הטווח המקובל הוא להסתברויות השגה שנתיות של 1% עד 20%. רצוי להכין גם עקום הסתברות (גרף של ספיקה כנגד הסתברות השגה).

עד עתה פורסמו בישראל שלושה מודלים ארציים לחישוב ספיקות התכן: מודל השירות ההידרולוגי (שנצ'ס וחו', 1994), מודל התחנה לחקר הסחף (תחל"ס) ומודל פולגט (פולק וגטקר, 2003). מודל השירות ההידרולוגי מבוסס על נתוני תחנות בעלות תקופת תצפיות ארוכה וקושר אמפירית את ספיקת התכן לתקופת החזרה ולשטח תחום ההתנקזות, כאשר הקשרים מתחשבים במיקום הגיאוגרפי ובליטולוגיה של תחום ההתנקזות. המודלים של תחל"ס מבוססים על הנוסחה הרציונלית, על נוסחה מיובאת מארה"ב לחישוב משך הריכוז, ועל שטח תחום ההתנקזות, עוצמות גשם בהסתברויות שונות וסוג הקרקע של תחום ההתנקזות. מודל פולגט מבוסס על ניתוח מעודכן של נתוני כל התחנות ההידרומטריות שפועלות

להשתמש במערכות היוצרות תאים-תאים במילוי קרקע מקומית + חיפוי קרקע גננית + צמחייה, אפשרי שימוש במזורני גביונים ומילוי קרקע מעליהם + צמחיה וכדומה. יש לזכור שהפיכת הנחל לתעלת בטון (או חומר קשיח אחר), פוגעת קשות בחיי הנחל ועוצרת תהליכים טבעיים בו. הנחל הוא לא רק המים הזורמים בו, אלא מגוון תהליכים אקולוגיים וסביבתיים שלצורך הבטחתם נדרשת התחשבות בהם.

בתכנון הסדרת הנחל, יש לחשוב על תחזוקתו (ראה שטרית, 2008) ולצורך כך יש לתכנן מראש דרכי שירות לא רק מעבר למדרונות הנחל, אלא מעבר לפשט ההצפה שלו ובצורה שאפשר יהיה להגיע לאפיק הנמוך ולבצע פעולות ניקוי ושיפור המצב בעזרת כלי מכני (לדוגמה - באגר).

6. בדיקות סופיות

לאחר ביצוע הבדיקות ההידרוליות והאחרות וקביעת חתכים מתוכננים טיפוסיים המציגים את מהלך מבנה האפיק לכל אורכו ותהליכים ההידרוליים בו, מומלץ לבצע בדיקה סופית תוך שימוש בתוכנה הידרולית כוללנית (לדוגמה, HEC-RAS). באמצעותה אפשר לבחון סופית אפשרויות שונות כגון שיפועי אורך, גובה יציאת מים לפשט ההצפה, מהירויות ברומים שונים וכדומה ולקבל החלטה סופית על הגיאומטריה, קו האפיק, מקדם ההתנגדות של הקרקעית והגדות, אופן ההסדרה, מידת שמירת פיתולי הנחל וכדומה.

7. פעולות משלימות

לאחר מכן הפעולות הן טכניות. חלקן קשורות בשרטוט הסדרת הנחל כגון: תנוחות, חתכי רוחב, חתכי אורך, פרטי מבנים הידרוטכניים בנחל, כאשר הכוונה היא למפלים, הגנות שונות, מתקני שחרור מים לנחל מהסביבה הקרובה, מפתנים, סוללות הכוונה וכניסות ערוצים משניים. אלה נועדים לקשור את כל הקצוות הכרוכים בתכנון ולשמש בסיס טכני למכרז על ביצוע ההסדרה. מלבדם, דרושים למכרז כתב כמויות, מפרט טכני ולעתים גם מפרט מיוחד.

כמו כן יש להכין דוח מסכם, המפרט את אופן התכנון והשיקולים המנחים. הדוח יכול להיכתב ברמות אחדות, בהתאם לגופים השונים שלעיונם נועד. דוח זה אמור לספק את ההסברים הדרושים

בישראל ובמקומות אחרים בעולם מציבים למעריך ערך של 0.5, אולם במקרים רבים בישראל נמצא לו ערך של 0.8.

4. בדיקות הידרולוגיות והידרוליות

לאחר שנקבעה ספיקת התכן, יש לבדוק את התאמתה לתנאי האפיק. את הספיקות וקשריהן לגיאומטריה של האפיק ולחפסו מחשבים באמצעות נוסחת מנינגאונותוך שימוש בתוכנות מדף תוכנות Hec-Ras (River Analyses System). הן המקובלות ביותר. מידת ההתאמה נקבעת על ידי חישוב עקום ספיקה בחתכים אופייניים לקטע הנחל במטרה לבדוק יחסי גובה-ספיקה, גובה-מהירות, גבולות השתנות מהירות הזרימה, גובה יציאת מים אל פשט ההצפה ועומק מים בפשט. דברים אלו חשובים כדי להשוות בין מצב קיים לבין מצב מתוכנן ולוודא שההסדרה משפרת את מצב הנחל בהתאם למטרה שהוצבה בפני המתכנן. חשוב לבדוק את מהירויות הזרימה בנחל בעומקי מים שונים. שינויים גדולים במהירויות פוגעים קשות בחיי הנחל, בצמחייה שלו ובתהליכים ההידרודינמיים באפיק.

5. בדיקות משלימות

תכנון האפיק ייעשה כמתואר במאמרים תכנון אפיקים ותעלות ניקוז (רוזנצביג, 2008) וקשר עם הסביבה (קפלן, 2008). כאן מובאות נקודות להדגשה.

במקביל לתכנון ההידרולוגי ולבדיקות ההידרוליות, יש לבצע בדיקות קרקע ולהחליט על שיפוע מינימלי של מדרון הנחל. לצורך כך מומלץ לשתף בפרויקט יועץ קרקע. יש להשתדל לתכנן את המדרונות שיהיו בעלי שיפוע מתון ככל האפשר, אם הדבר מתאפשר (מבחינת גבולות ההסדרה).

יש להימנע ככל הניתן מייצוב קשיח בנחל ולהשתדל לבצע "תכנון ירוק" - ייצוב צמחי מותאם לאזור הגיאוגרפי, עצים בחלקו העליון של האפיק שמעל גובה פני המים בהסתברות השגה שנתית 5% וטיפול נופי בסביבה הקרובה לנחל, כל זאת על ידי שיתוף אדריכל נוף בפרויקט. כאשר התנאים ההידרוליים מחייבים ייצוב קשיח של האפיק, יש לבחון את הנושא בקפדנות. מומלץ להשתמש בחומרים טבעיים. יש אפשרות

כיוון שזה תהליך ההתחדשות בטבע, שזה כנראה נכון. פתאום מתברר שיש לך חור בהשכלה. היית צריך ללמוד בנוסף גם יחסים בין-ישראליים (אם יש מקצוע כזה). אתה כמוכן תוהה מה חשוב יותר: חיי אנשי השכונה או חיי מיקרואורגניזמים?! כך זה מתגלגל כאילו אתה, המתכנן, המצאת את הפרויקט ובכלל איש לא צריך אותו. זו המציאות ויש להתרגל לכך.

מראי מקומות

פולק, ש'; גטקר, ק' (2003). מודל לחישוב ספיקות שיא בישראל. הידרומודול, קרית אונו.
 קפלן, מ' (2008). קשר עם הסביבה. בתוך: נחלים וניקוז – תהליכים הנדסה ותכן (ע' א' בן-צבי). רשות ניקוז שקמה-בשור והמכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון, 259-277.
 רוזנצביג, ד' (2008). תכנון אפיקי נחלים ותעלות ניקוז. בתוך: נחלים וניקוז – תהליכים הנדסה ותכן (ע' א' בן-צבי). רשות ניקוז שקמה-בשור והמכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון, 215-228.
 שטרית. נ' (2008). תחזוקה. בתוך: נחלים וניקוז – תהליכים הנדסה ותכן (ע' א' בן-צבי). רשות ניקוז שקמה-בשור והמכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון, 251-258.
 שנציס, א'; בן-צבי, א'; גולץ, ס' (1994). מודל אזורי לתדירות ספיקות שיא בישראל. דוח הידרו/94/4, השירות ההידרולוגי, ירושלים.

להליכי אישור הפרויקט ולשמש בסיס להמשך הטיפול בנחל בעתיד. יש לזכור כי ככל שההסברים פשוטים וברורים יותר, גדל כושר השכנוע שלהם ומתקצר תהליך האישור.

8. הליך הייסורים

תהליך האישור מתואר בפרק הראשון וכבר שם הוא נראה מורכב מאוד, אולם למעשה המצב מסובך עוד יותר. הסיבוך מתחיל בבדיקת הפרויקט על ידי ועדה הנדסית באגף לשימור הקרקע והניקוז וקבלת אישור רשות הניקוז. אנשי הוועדה הם אמנם מקצוענים, אולם בהרכבה נכללים נציגי משרדים רבים הנוגעים לנושאי המים, שמירת אפיקי זרימה, שמירת החי והצומח ואנשי תשתיות. לכל אחד מהם דרישות רבות, לפעמים שונות ומשונות, בהתאם לאינטרסים של משרדו, וכדי להגיע לאישור מוסכם מכניסים שינויים בתכנון. זאת לאחר השקעת מחשבה רבה בתכנון ההידרולוגי והידרולי מיטביים ומתואמים ופעולות הנדסיות רבות.

לדוגמה, תכנון הסדרת נחל במטרה ראשית להגן על תושבי שכונה ורכושם מפני שיטפונות. הגדלת את כושר ההולכה בנחל, הנמכת מפלסים למניעת הצפה – ואז אחד מאנשי הוועדה מסביר לך שאין צורך בהסדרת הנחל כיוון שהשכונה נבנתה ללא אישורים; ואחר טוען שהרסת לו (!) את הנחל ופגעת במיקרואורגניזמים באפיק ובכלל הוא והם (המיקרואורגניזמים) אוהבים הרס נחל מדי פעם

קשר עם הסביבה¹

מוטי קפלן
מתכנן

1. מבוא

משחרר ההיסטוריה היתה סביבת הנחלים מקום משכנו של האדם. הסמיכות בין מגורי האדם לבין הנחל, הביאה לתלות והשפעה הדדית בין השניים. האדם ניצל את הנחל לצרכיו - לשאיבת מים, לדייג, לניקוז הקרקע, לשיט ולמסחר. האיומים אשר הנחל יוצר על מושב האדם - בהצפות, בשיטפונות ובכיצות - זכו לטיפול מקיף ולעתים אגרסיבי - הביצות בשולי הנחל נוקזו, נתיב הזרימה הוסדר והועמק, פיתולי הנחל קוצרו ויושרו, וגדותיו יוצבו - כל זאת כדי למנוע הצפות, לייעל את הניקוז, ולהגדיל את שטחי הקרקע העומדים לרשות הישוב. פעילות זו השפיעה בהכרח על הנחל. הזרמת שפכים ושאיבת מים גרמו לפגיעה במאזן האקולוגי שלו, וביכולתו לשיקום ולהתחדשות עצמית. מגוון המינים בו צומצם לבלי היכר וביטוייו הנופי טושטש ועוות.

במחצית השנייה של המאה העשרים, וביתר שאת בעשרים השנים האחרונות, חדרה לתודעה הציבורית ההכרה בהיקף הנזק שנגרם לנחלים ובצורך לעסוק בשיקומם. במקום ניצול הנחל לצרכים פרטניים בטווח הקצר, הלכה והתגבשה גישה כוללת בעלת אוריינטציה סביבתית, במסגרתה נתפס הנחל כמערכת בעלת מאפיינים ייחודיים, הראויה לשימור, שיקום ופיתוח בר קיימא. זיהום הנחלים היה הנושא הראשון אשר עלה על סדר היום בהקשר זה. במדינות המערב, מקובל כיום לראות את מניעת הזיהום כעניין מובן מאליו. הזרמת שפכים לנחל נתפסת כבלתי לגיטימית, ותכניות השיקום מתבססות על ההנחה שהזיהום הופסק או יופסק בעתיד הקרוב. בשלב מאוחר יותר, נקבעו עקרונות נוספים לשיקום הנחל, כגון שימור נופי, שיקום אקולוגי וטיפול אזורי נופש ופנאי. יעדים אלו נתפסים כיום כמרכזיים בתכניות שימור ופיתוח נחלים.

מן הניסיון שנצבר בתחום עולה, כי שיקום

הנחל עשוי להתפרש על פני שנים רבות. מדובר בפעילות רב-מערכתית, הכוללת הפסקת הזרמת שפכים, ניקוי האפיק מפסולת, שחזור נתיב הזרימה, וסיוע לתהליכים הטבעיים של התחדשות בתי גידול. השבת המים לנחלים היא פעילות הכרחית, בעלת השפעה אקולוגית ונופית ראשונה במעלה, וערכה גבוה מבחינת תרומתה לשירותי פנאי, רווחה ותיירות. יחד עם זאת, יש להכיר בעובדה כי לא ניתן להחזיר את הגלגל לאחור ולבטל כליל את השפעתו המתמשכת של האדם על הנחל. יעדי השיקום מנוסחים במושגים מתונים יותר, המתמקדים בצמצום הנזקים ובשימור המערכת האקולוגית הדינמית בנחל, כאשר התערבות האדם נתפסת כחלק בלתי נפרד ממערכת זו. השגת שיפור ממשי במצבם של נחלי ישראל, נראית היום אפשרית מתמיד. המנהלה לשיקום נחלי ישראל, אשר הוקמה על ידי המשרד לאיכות הסביבה והקרן הקיימת לישראל, פעלה רבות במהלך העשור האחרון לטיהור המים, לשיקום אקולוגי, ולפיתוח שטחי רווחה ופנאי בגדות הנחלים. פעילות זאת, יחד עם המודעות הציבורית אשר התפתחה בנושא, מהוות פתח תקווה לעתיד טוב יותר לנחלי ישראל ולסביבתם (עד כאן מתוך פתח הדבר מאת ד"ר ישעיהו בראור, לחוברת מאת קפלן (2004)).

גיבוש עקרונות תכנון ומדיניות ארצית כוללת לשיקום הנחלים, להסדרתם ולניהולם, מהווה סוגיה מרכזית בהתייחסותן של התכניות הארציות לשטחים הפתוחים. על פי התפיסה התכנונית הקושרת את הנחל לסביבתו, משמשים צירי הנחלים מסגרת לשטחים הפתוחים המתכנסים אליהם, ובכך מסייעים בשמירה על רציפותם, ובהקניית מבנה וסדר במערך התכנון הארצי. עיקריה של תפיסה זו שולבו בתכנית האב לישראל בשנות האלפיים - "ישראל 2020", ובתכנית המתאר הארצית המשולבת - תמ"א 35, והם מהווים קו מנחה לתכנון הנחלים ברמה המחוזית

¹מבוסס על החוברת נחלי ישראל - מדיניות ועקרונות תכנון (קפלן, 2004).

והמקומית.

שיקום נחלים תופס מקום חשוב בסדר היום הסביבתי בארצות המערב. המגמות והשקפות העולם הנוגעות בתחום, שונו ללא היכר בעשרות השנים האחרונות: מראיה חד-ממדית של שליטה בנחל וריסונו - על ידי סיכור, קיצור פיתולים, ודיפון גדות - לתפיסה הרואה בערכיו האקולוגיים והנופיים של הנחל מטרה מרכזית לשימור ולטיפוח. גם בקרב הגישות ה"ירוקות" חלו שינויים - מניסיון להקפיא את המצב הקיים בנחל או לשחזר את מאפייני הבראשית שלו - לתפיסת הנחל כמערכת דינמית משתנה תדיר, ולשאפה לשמירת תהליכי הנחל, ולא דווקא מצב סטטי זה או אחר. האמצעים הננקטים בארצות שונות לשם השגת שיפור במצב הנחלים הם רבים ומגוונים, ומשלבים פעולות תכנון ושיקום, חקיקה ואכיפה, הסברה ושיתוף הציבור.

בישראל, נפגעו חמורות מערכות הנחלים והמעיינות, בעקבות הניצול האינטנסיבי של משאבי המים. שאיבת מי תהום ותפיסת מי מעיינות הביאו להפסקת הזרימה הטבעית בנחלים, החל מראש אגן ההיקוות. נתיבי הזרימה, אשר שפעו בעבר מים, צמחייה ובעלי חיים, היו לנתיבים עקרים וצחיחים. יתר על כן, עם הגידול באוכלוסייה ובצרכיה, רבו הזרמות פסולת, שפכים עירוניים וביוב תעשייתי לאפיקי הנחלים, על ידי רשויות ציבוריות וגורמים פרטיים. זיהום הנחל במוקד מסוים, יוצר השלכה מיידית על המשך מהלכו ועל המערכת האקולוגית בכללה, וכך הפכו הנחלים לרשת של נתיבי פסולת וזיהום החובקת את הארץ. ניתן לומר, כי חלק ניכר מנחלי ישראל מהווים כיום מפגעים אקולוגיים ואסתטיים, בזהם את הסביבה, את מי התהום ואת הנוף הפתוח.

שיקום הנחלים והשבתם לתפקודים סביבתיים וחברתיים, תופסים בשנים האחרונות מקום חשוב בסדר היום הציבורי בישראל. תכניות ופעולות לשיקום נחלים מבוצעות היום, רובן ככולן, על ידי המנהלה לשיקום נחלי ישראל, בראשות המשרד לאיכות הסביבה והקרן הקיימת לישראל, בשיתוף פעולה עם רשויות הניקוז, הגופים הירוקים ומשרדי ממשלה נוספים. פעילות השיקום נותנת אותותיה - בהעלאת העניין והמודעות לנושא בקרב הרשויות, המתכננים, מוסדות מחקר וחינוך והציבור הרחב, ובשינוי ממשי במצבם של הנחלים.

הרעיונות והתכניות אשר הועלו בשנים האחרונות סביב שיקום הנחלים, מהווים מצע רעיוני, בסיס ורקע למסמך העקרונות שיצא לאור על ידי המשרד לאיכות הסביבה (קפלן, 2004).

בעוד מערכות תשתית אחרות - כגון, חשמל, תחבורה ותקשורת - הן מלאכותיות, מעשי ידי אדם, ולפיכך גמישות ומתאימות עצמן לדפוסי התישבותו, הרי שתוואי הנחלים מתקיימים על תשתית טבעית הבנויה על פי מאפייני השטח. ערוץ הניקוז נמצא במקום הנמוך ביותר מבחינה טופוגרפית, וקשה עד בלתי ניתן לשנות את מיקומו. כמויות המים אותן יש להעביר תלויות בכמות הממטרים ובעוצמתם, במבנה הקרקע ומידת חלחולה - וגם אלו פרמטרים שאינם בשליטת המתכנן. כאן נדרש האדם להתאים עצמו לדפוסי הטבעיים בפרישת שימושי הקרקע, ובמגוון הפעולות המותרות בקרבת הנחלים. מטרת הניקוז היא פינוי עודפי מים עיליים ותת קרקעיים משטחי אגן ההיקוות של הנחל הקולט. מטרה זו מפורטת ליעדים הבאים: הקטנת נזקיהן של הצפות; יצירת מוצאים לניקוז הסביבה; והקטנת סחף והתחתרות האפיק.

תחזוקת ערוצי הניקוז מהווה פרק חשוב בפני עצמו. קיום ערוצי ניקוז יעילים דורש תחזוקה אינטנסיבית, הסרה עונתית של עודפי צמחייה החוסמים את האפיק, הרחקת אשפה, תחזוקת מבנים ודרכי שירות ואמצעי הגנה נלווים. אופי הקרקעות והשימושים באגן, יוצרים בעיות המקשות על תחזוקת האפיקים. הצמחייה הטבעית מהווה מלכודת לפסולת, שהרחקתה, ללא פגיעה בצמחייה, מחייבת עבודת ידיים. בתכנית הניקוז יש לתכנן אמצעים הדורשים תחזוקה מעטה וריאלית, דרכי גישה לכלי האחזקה ועוד.

2. עקרונות שיקום נחלים

שיקום נחלים, תכנונם וניהולם, נועדו להשגת קשת רחבה של יעדים, בתחומים מגוונים. תפקודי נחלים סווגו על פי תחומים מערכתיים, אקולוגיים, הידרולוגיים וחברתיים. הנחלים נושאים על גבם את יסודותיה של מערכת השטחים הפתוחים הארצית, והם משתתפים בעיצוב יחסי-בנוי-פתוח. את יתרונותיהם ותרומתם של הנחלים באזורי הארץ השונים, אפשר לראות בחלוקה על פי מספר תחומים:

במשטר גאויות והצפות. שימור המאפיינים הטבעיים של המערכת ההידרולוגית מאפשר לנחל למלא את תפקידו בהולכת מים, ולצמצם את נזקי ההצפות. לפיכך, תוכנן במסגרת שיקום הנחל רציפות האפיק וזרימת המים בו, והסדרת ניקוז תקין בנחל ובסביבתו.

- איכות מים נאותה. הזרמת שפכים ופסולת לאפיק הנחל, זכתה ללגיטימציה במשך שנים רבות. כתוצאה מכך הפכו נחלים רבים לתעלות ביוב פתוחות. תנאי הכרחי לשיקום מערכות הנחל, הוא הפסקת סילוק מזהמים לאפיק וטיהור המים. שמירה על איכות המים מחייבת אמצעי התמודדות וכלי יישום, המותאמים ועונים על מקורות הזיהום. ראוי להבדיל בין אמצעי מדיניות המכוונים לעצירת המזהם באתרו (בעיקר במצב של זיהום נקודתי) ובין אמצעים המכוונים להגן על הנחל בסמיכות לאפיק (בעיקר במצב של זיהום דיפוזי). יש להתאים לכל מצב את הכלים הראויים, ואפשרויות השילוב השונות שלהם. מקורותיהם של אחדים מנחלי הארץ, נמצאים בשטחי המדינות הגובלות בישראל ובשטחי הרשות הפלשתינית. במקרים רבים מסייעים נחלים אלה מים מזהמים לישראל. במקרים בהם לא מטופלים הגורמים המזהמים במקור – יש לטפל בזיהום באמצעות מכונני טיהור בסמוך לאזור הגבול, כדי למנוע כניסת המזהמים לישראל. באותה מידה יש לנקוט גם בנחלי הארץ הזורמים לגבולות שכנותיה, ולדאוג לאיכות תקינה של המים הזורמים בהם.
- "ניקוז ירוק". דרישות הניקוז ימולאו, לפי תמ"א 34/ב'3, תוך שמירה על נתיב הזרימה הטבעי של הנחל, ערכי טבע ונוף והימנעות מפגיעה בהם. ייבחנו מפעלי ניקוז שהוקמו בעבר ופגעו באיכויות הטבעיות של הנחל, ותיבחן האפשרות להמיר אותם באמצעים "ירוקים" המשתלבים במערכת הטבעית הקיימת.
- ניהול אגני. כל אחד מנחלי ישראל ינוהל כמערכת אחת, שמשמעותה – חלוקה נכונה של שימושי הקרקע השונים ברחבי אגן ההיקוות, על בסיס הכרת והבנת מאפייניו הפיזיים וההידרולוגיים, במטרה לשמר ולנצל באופן מיטבי את משאבי המים, למתן הצפות ושיטפונות לחידור ולהעשרת מי התהום.

- יצירת חייצים בין מערכים אורבניים, והתווית היחס בין הבנוי לבין הפתוח. הנחלים העוברים בליבת המדינה הבנויה בצפיפות יוצרים שדרה, אליה מתכנסים השטחים הפתוחים, ובכך הם מפרידים בין האזור הבנוי לבין האזור הפתוח. הנחל יהווה ציר אליו מתכנסים השטחים הפתוחים, הכוללים שטחי חקלאות, פארקים, יערות ושמורות טבע. שטחים פתוחים המשמשים ליעודים שונים, ישולבו ויצורפו לציר הנחל, ליצירת מרחב גדול ובעל משמעות. מרחבים אלו יהוו אתגרותאות נופיות בין הערים, ויספקו לאוכלוסייה הסמוכה פעילויות נופש, ספורט ופנאי המצריכות שטחים פתוחים רחבי ידיים, והם יתכנסו ויפנו אל הנחל.
- עיצוב וגיבוש רוח המקום. חיזוקם של הדימוי והזהות המקומית מבחינה תרבותית ונופית. שמירת ערכי סובב וטבע האופייניים לאזור מסוים. אלה תפקידיהם העיקריים של הנחלים הזורמים במרחב הפתוח, בצפון ובנגב. שמירה על רוח המקום פירושה טיפוח מאפייניו הייחודיים של מקום, הדגשת סגולותיו ואיכויותיו, והקניית דימוי וזהות המיוחדים אך לו. התיישבותו של האדם לאורך צירי הנחלים, השאירה עקבות ראויים לשימור: אתרים ארכיאולוגיים והיסטוריים, סכרים, גשרים, טחנות מים, מעיינות, תלים וערים הקיימות עד ימינו.
- תפקידים חברתיים. הנחלים כריאות ירוקות ושטחי פנאי, כפארקים מטרופוליניים בעלי תרומה לחיזוק הדימוי העירוני. זה תפקידם המרכזי של הנחלים האורבניים, העוברים בעיר או בסמוך לה.
- השבת מים לנחלים. מטרה מרכזית של תהליך השיקום, היא שחזור הזרימה ההיסטורית של מים שפירים בנחל. במצוקת המים החריפה בישראל כיום, ידרשו אמצעי ביניים, כגון הזרמת קולחין בנחלים, בשילוב עם מים שפירים. הזרמת המים לנחלים תהיה באיכות, בכמות, במקום ובעונה המתאימים ביותר לשיקום הנחל ולהחייאתו. יש לפתח את המודעות להיות הנחל צרכן מים לגיטימי, שווה בערכו ובחשיבותו לשטחי חקלאות, גינות ציבוריות, בריכות וצריכה ביתית.
- רציפות הזרימה באפיק. נחלי ישראל מאופיינים

• **מניעת סחף ושימור קרקע.** שימור קרקע ומניעת סחף, כרוכים בעיקר בניהול וממשק שטחים חקלאיים, בנקיטת אמצעים מיוחדים לעיבוד חקלאי בשטחים תלולים, עיבוד בקווי גובה, השארת חיפוי צמחי, הימנעות מעיבוד באפיקים, ושימוש במתקנים ומבנים למיתון הנגר ועצירת הסחף. באזורים צחיחים, ינוהלו מי הנגר על ידי תפיסתם במעלה, ריבוד המדרונות, ביצוע לימנים, שיקום ואחזקת טרסות אבן ובניית טרסות חדשות ומתקנים לייצוב ראשי הערוצים הפעילים. תפיסה ואיגום מי הנגר, תאפשר החדרה מוגברת של מים לקרקע והתפתחות צומח, המסייע בייצוב הקרקע.

• **שימור ערכים אקולוגיים.** תכניות שיקום הנחלים יבחינו בין נחלים בעלי רגישות אקולוגית שונה, ויורו על הגבלות מחמירות במקטעי נחל בעלי ערכים גבוהים (כגון אזורי נביעות או בתי גידול של מינים נדירים). לנחלי ישראל תפקיד בבניית המערכת הארצית של מסדרונות אקולוגיים. הנחל מהווה ציר הקושר את השטחים הפתוחים במרחב, ומהווה מסדרון מעבר לנדידת בעלי חיים ותפוצת צמחים. לפיכך, יכללו תכניות הנחלים הנחיות בדבר שמירת רצף מסדרון הנחל, ומניעת קיטוע על ידי בינוי ותשתיות. לתוואי הטבעי של הנחל, ערך נופי ואקולוגי. פיתולי הנחל, והשינויים בעומק הקרקעית, מקיימים בתי גידול ייחודיים. תכניות הנחל יורו על שמירת התוואי הטבעי והגדות הטבעיות, תוך הימנעות מיישור פיתולים וקיצורם, דיפון בבטון או הטמנת הנחל בצינור תת קרקעי. ההתערבות לצרכי שיקום, תיעשה תוך השתלבות מרבית בנוף הטבעי ובטכנולוגיה "ירוקה" (כגון ייצוב צמחי). ניהול איכות המים מתוך יעדים אקולוגיים, נדרש לבחור בין שתי אסטרטגיות פעולה: שחזור מערכות שהתקיימו בעבר ואבדו כתוצאה מהזיהום; טיפוח של מערכות אקולוגיות חדשות, שאינן דומות למערכות שהתקיימו בנחל לפני התערבות האדם, ועם זאת הן בנות קיימא.

• **תחזוקה.** הצלחתו של פרויקט שיקום נחל תלויה, בסופו של דבר, בהמשכיות וקיום לאורך זמן, לאמור - תחזוקה וניהול שוטף של הישגי השיקום. הנחלים הם מערכות אקולוגיות

רגישות, ופגיעה - אפילו מצומצמת וחד פעמית - באחד ממרכיביהם, עשויה להפוך על פיו תהליך שיקום שהושג בעמל רב. רשויות ומנהלות הנחלים נדרשות להכיר בעובדה שהשיקום אינו מסתיים עם ביצוע פרויקט ההסדרה, והוא מהווה תהליך רציף, הכולל ניהול יומיומי, ניטור שוטף של מערכות הנחל ופעילות תחזוקה אינטנסיבית. תחזוקה נאותה של הנחל תלויה במידע מהימן ועדכני בנוגע למצבו, תגובתו לפעולות השיקום, והשינויים החלים בו לאורך זמן.

3. היבטים חברתיים

• **חשיבות תרבותית ותיירותית.** לחלק מנחלי ישראל נודעת חשיבות תרבותית והיסטורית רבה. נחלים אלה נזכרים בתנ"ך, שמותיהם נקשרים למאורעות שהתרחשו בתחומם, הם מהווים ציוני דרך בהיסטוריה ובתודעה הכלל אנושית, ומספרים את סיפורה של הארץ. הנחלים ראויים לשילוב במערך התיירות הארצי, להבלטה, לתיעוד ולסימון, כנדבכים במורשתה של הארץ. נמצאנו למדים כי המתהלך באפיקי הנחלים, מתהלך בעצם בנתיביה ותולדותיה של ארץ ישראל. והרי אם יאבדו הנחלים, יאבד הרבה ממטענה ההיסטורי והתרבותי של הארץ ופניה יהיו חסרים ופגועים. געגועים לנחל אינם אלא געגועים לדמותה וליופייה של הארץ, ומעשה שיקום הנחלים ותיקונם, מקיים במלואו רעיון זה של תיקון הארץ והשבת פניה.

• **מהלכם של הנחלים.** הנחלים חוצים את נופיה של ישראל מן ההר ועד הים והמדבר, ונותנים בידינו הזדמנות להפכם לצירים מרכזיים במערך שבילי הטיול והסיור בישראל. תכניות שיקום הנחלים מציגות את הפוטנציאל הטמון בצירי הנחלים להפיכתם לצירי טיול, הקושרים אתרים ומרחבים סביבם. לנחל יתרונות רבים כציר טיול והליכה. נתיבו ברור, לאורך אפיק הנחל יתרכזו תמיד צמחייה ובעלי חיים הנשענים על הנביעות ומקורות המים לאורכו. בצדי הנחל יחשפו קירותיו, ובהם חתכים גיאולוגיים, כצוהר לעבר הרחוק. המורפולוגיה המעניינת לאורך הנחל, זרימת המים, התחדשות הצומח, התקבצות בעלי החיים הבאים לשתות ממימיו ולמצוא מסתור בסבכו, כל אלה עושים

כלכלי שיציג הערכות אלו. תכניות הנחל יתוו אפשרויות לרתימת עסקים שונים, הנסמכים על ערכי הטבע והנוף בנחל, לצורך מימון השיקום ותחזוקתו.

- **הסברה וחינוך.** מנהלות הנחלים יפתחו כלים להסברת ערכיו של הנחל לציבור הרחב, והעמקת המודעות לצורך בשימורו ובשיקומו. ההסברה תתבצע באמצעות תכניות חינוך, מערך סיורים והכרת הנחל, "יום נחל" עירוני, אימוץ קטעי נחל ועוד.
- **שיתוף הציבור בתכנון ובשיקום.** לקהילות המקומיות אינטרס לשיקום הנחל העובר בסמוך למקום מגוריהן. הרשויות העירוניות ומנהלות הנחלים יפתחו אמצעים לשיתוף פעולה עם התושבים, אשר ייטלו חלק – ברמות השונות – בפעולות השיקום.

4. כלים

לצד עקרונות שיקום הנחלים, נוסחו עקרונות ומסגרות באשר לדרך השיקום, ולצורת הניהול, הארגון, הממשק והתחזוקה השוטפת של הנחל המושקם.

- **ממשק ותחזוקה.** נהלים לתחזוקה שוטפת של הנחל, מתקניו וסביבתו, יוטמעו בתכנית השיקום מראשיתו. פרויקט השיקום יותנה בהבטחת תקציב ומסגרת מנהלית מתאימה לביצוע תחזוקה שוטפת ובמעקב אחר תוצאות השיקום. תכנית הנחל תוכן במטרה להביא למצב בו הנחל יממש את יכולתו לשיקום והתחדשות עצמית, כך שהממשק שיידרש יהיה מצומצם ככל הניתן. שמירה על הישגי שיקום הנחל, מחייבת ניטור שוטף של מצבו ומקורות הזיהום הפוטנציאליים הזורמים אליו. הניטור ייעשה בדרך של דיגום מימי הנחל וקרקעיתו, ודיגום מאגרים, מתקני טיהור קולחין, מפעלי תעשייה וחקלאות וכיוצא באלו, המזרימים מים אל הנחל.
- **משפט, ארגון ומנהל.** בתחום ציר הנחל ובתחום ההשפעה של הנחל, תהיה עדיפות לשימושי קרקע הקשורים בתפקודי הנחל ההידרולוגיים, האקולוגיים והחברתיים, לאמור – ייעודים המסדירים נושאי זרימה, ניקוז, שאיבה, פיתוח ירוק, שיקום בתי גידול, נטיעות ואחזקה ושימושי פנאי ונופש. כל שימוש אשר אינו נחוץ וחיוני בקרבת הנחל, יורחק לאזורים אחרים.

את הטיול בנחל למרתק ומעניין. רציפותו של מסלול הנחל, והאפשרות ללכת שעות ארוכות מבלי לפגוש במחסומים והפרות, מוסיפה לחשיבותו כמסלול סיור וטיול.

- **פיתוח שימושי פנאי, תיירות ונופש.** הנחל יתפקד כריאה ירוקה לשימושי פנאי ורווחה. הנחל חודר באמצעות יובליו אל האזור העירוני, ומקרב את הטבע והמרחב לאוכלוסייה המתגוררת בעיר. תכניות שיקום הנחלים יציבו הנחיות והוראות בדבר פיתוח אמצעי פנאי, טיפוח נטיעות, שבילים ומתקנים ברצועת הנחל ובמרחב הסובב אותו, ותוך בחינת כושר הנשיאה. לנחל העובר בעיר אין, בדרך כלל, ערכים אקולוגיים גבוהים. לעומת זאת, הפוטנציאל החברתי הטמון בו גבוה ביותר. פוטנציאל זה יבוא לידי ביטוי בשני אופנים: הראשון – כציר ירוק, פתוח ופעיל, פארק עירוני סביבתי, הקושר את העיר למרחב הפתוח; והשני – כשדרה עירונית, המושכת אליה פעילויות אינטנסיביות – מסחר, בילוי ותיירות – כאשר הנחל מעניק להן ערך מוסף של נוף ומגע עם הטבע. פארקים מטרופוליטניים משמשים כמוקדי נופש בחיק הטבע, עבור האוכלוסייה הרבה המתגוררת בסמוך להם. צירי הנחלים העוברים בסמוך לעיר, מהווים הזדמנות ליצירתם של פארקים מטרופוליטניים רחבי ידיים בסביבה העירונית הצפופה. כך נוצר שילוב מיטבי בין הפוטנציאל של נחל זורם וסביבתו, ובין צרכים חברתיים. לנושא זה נודעת חשיבות יתרה על רקע הגידול בשיעור הזמן הפנוי שבידי האוכלוסייה, והעלייה בתודעה ובביקוש לשירותי נופש, בילוי ויציקת תוכן בשעות הפנאי.
- **עקרון הרציפות.** לאורך ציר הנחל תישמר זכות הציבור לתנועה חופשית. עיקרון זה ינחה את תכניות האב והמתאר לנחל, בהקמת מערכת של שבילים לאורך הגדות, שישמרו על רציפות המעבר להולכי רגל ולרוכבי אופניים.
- **התועלת הכלכלית משיקום הנחל.** שיקום נחלים נתפס כעניין אקולוגי וחברתי, אך קיימים בו היבטים כלכליים משמעותיים. פעילות השיקום כרוכה בהשקעות כבדות העתידות לשאת פרי. יש לפתח הערכה כלכלית של התועלות מהנחל, בהתבסס על ערכי נדל"ן, תיירות ונופש, תועלת במניעת הצפות ועוד. תכניות הנחל יכללו פרק

קו פרשת המים הארצי, עובר על גבה של שדרת ההר המרכזית של ארץ ישראל, ומחלק את מערכת הניקוז בישראל לשני אגנים: מערבי, הכולל את הנחלים המתנקזים לים התיכון; ומזרחי, הכולל את הנחלים היורדים אל בקע הירדן והערבה. קיימים הבדלים מהותיים בין נחלי הניקוז המערביים לבין נחלי הניקוז המזרחיים של ארץ ישראל. הנחלים המערביים הם בעלי נוף מתון יותר מאשר המזרחיים, הם ארוכים יותר ובעלי שיפוע יחסי קטן יותר. הנחלים המזרחיים, היורדים אל בקע הירדן ואל ים המלח, הם קצרים, תלולים ולעתים קרובות בעלי אופי קניוני-מצוקי ורבים בהם המפלים.

קיימות מספר סיבות להבדלים בין נחלי הניקוז המזרחיים לבין המערביים. ראשית - מרחקה של פרשת המים מן הים התיכון הוא רב מאשר המרחק אל בקע הירדן והערבה. שנית - הפרש הרום בין קו פרשת המים לבין הים התיכון, שהוא בדרך כלל קטן מאשר הפרש הרום כלפי בקע הירדן. ערכי הרום של בקע הירדן, כידוע, נמוכים מפני הים, ויורדים בהדרגה עד 400 מטר מתחת לפני הים בים המלח, בעוד שהים התיכון הוא בסיס ניקוז בעל רום קבוע - אפס מטר. האקלים הצחיח המאפיין את האזור שממזרח לקו פרשת המים, מסייע להתפתחות נופים בעלי קווים טופוגרפיים חדים, בהשוואה למערב העשיר במשקעים ובצומח. לפיכך, מתפתחת ממערב לקו פרשת המים מורפולוגיה בעלת קווים רכים יותר, ותכונה זו מאפיינת גם את נופי הנחלים.

יצאי דופן הם נחלי רמת הגולן, שבהם מפותח נוף קניוני-מצוקי עתיר מפלים וזרימות מים קבועות, החותרות בשכבות הבזלת. מבחינה מורפולוגית דומים נחלי הגולן דווקא לטיפוס המדברי, אך מבחינות אחרות הרי הם נחלים ים-תיכוניים טיפוסיים. פרשת המים נעלמת מתחומי מדינת ישראל באזור הנגב הדרומי - מהר רמון ועד אילת. באזור זה כל הנחלים הם בתחום הניקוז המזרחי בלבד. כאן מרוכזים הגדולים והארוכים בנחלי ישראל - המערכת הגדולה של הנחלים צניפים, חיון ופארן.

כלל שטח אגן ההיקוות של נחלי החוף הינו כ-10,500 קמ"ר, ומרבית אוכלוסיית ישראל מתגוררת באזור זה. כתוצאה מכך, מגיעים אליהם

המערכת המנהלית העוסקת במים בישראל היא מורכבת ומסועפת, כאשר כל רשות ממונה על טיפול בהיבט אחד בלבד של הסוגיה. מצב זה מונע יישום מדיניות נחלים מקיפה. יש לשאוף להקמתה של רשות מנהלית אחת, שתעסוק בכל נושאי המים בנחל, במשולב. רשות נחל תפעל על פני אגן היקוות שלם, ובהתייחס לניהול מקיף של משאבי המים בו. תפיסה זו תאפשר הפעלת מדיניות מים הלוקחת בחשבון את מכלול השיקולים ההידרולוגיים באגן.

5. מאפייני הנחלים²

לימוד והבנת תכונות הנחל, עומדים בבסיסה של כל תכנית לשיקומו. אין דומה המושג "נחל" בישראל, לזה שבארצות אירופה או אמריקה. בארצות אלו נוהגת היררכיה שלמה של נחלים: flow, river, stream וכדומה. בישראל המושג נחל אינו כה יומרני, והוא עלול להטעות: הנחל הינו עמק היורד מקו פרשת מים אל בסיס ניקוז, ובקרקעיתו אפיק מוגדר. המושג נחל יכול להצטמצם לאפיק בלבד - ללא מדרונות הרריים משני עבריו. מרבית נחלי ישראל הם נחלי אכזב - כלומר, נחלים ללא זרימת מים קבועה באפיקיהם. הופעת זרמי מים בנחלים אלה היא תופעה עונתית של תקופת גשמים רצופה, הגורמת להתנקזות מי הגשם אל עמק הנחל, ולזרימת מי הנגר באפיקו במשך שעות אחדות או לכל היותר במשך מספר ימים. במיוחד בולטת תופעה זו בנחלי המדבר, בהר הנגב ובמדבר יהודה, שאפיקיהם יבשים לחלוטין במשך כל ימות השנה. אך יש ולאחר סערת גשם חזקה מעל המדבר, יתגלגלו בהם מים בכמות אדירה - עד עשרות מיליוני מטרים מעוקבים, באירוע שטפוני אחד.

גם נחלי צפון הארץ ומרכזה יבשים ברובם. אמנם היו באזורים אלה בעבר נחלי איתן בזכות מעינות שנבעו לאורך אפיקיהם, אך תפיסת מי המעינות וניצולם באמצעות צינורות ומשאבות, גרם להתייבשותם והפיכתם לנחלי אכזב. רוב נחלי האיתן בישראל מרוכזים בצפון הארץ, ואילו בדרום, במספר ערוצים בודדים, קיימת זרימת מים קבועה אך דלה בכמותה.

²מבוסס על מרקוס (1984).

אקולוגי של הנחל ואגנו; הבטחת הקצאת מים לנחלי איתן; שיקום נחלים על פי עקרונות אקולוגיים; שילוב בין אינטרסים שונים בנחל, כגון ניקוז, רווחה חברתית וכלכלית וצרכים סביבתיים; והשגת שיתוף פעולה מרבי בין הגורמים והרשויות המופקדות על נושאים שונים הקשורים בנחל (שגיא, 1996). המנהלה פועלת להכנת קווים מנחים לתכניות נחל והקמת מנהלות נחלים מקומיות; קביעת סדרי עדיפויות בטיפול; איסוף וניתוח מידע כבסיס לתכנון; הכנת פרוגרמה לשיקום, תכנית אב לנחל ועבודה לתכנית מתאר סטטוטורית; שיקום הנחל בפועל; מעקב ובקרה, הפעלה ואחזקת הנחל המשוקם.

מגמת המנהלה לבצע את פעולות השיקום ככל הניתן על ידי גורמים מקומיים. לשם כך הוקמו מנהלות נחלים מקומיות כגופים ניהוליים-ביצועיים, לצד רשויות הניקוז והרשויות המקומיות, ותוך שיתוף פעולה עם נציגיהן. המנהלות המקומיות עוסקות בתכנון הנחל, בביצוע השיקום, ובאחזקת הנחל וניהולו לאורך זמן. התכנון נעשה ברמות שונות - החל מתכנון קטעי נחל ועד לאגן ההיקוות כולו. מתכונת העבודה כוללת היבטים הידרולוגיים - הסדרת הזרימה בנחל כנקז וכמקטין סיכוני שיטפונות; היבטים אקולוגיים - שיקום המערכת הטבעית והנופית, הפסקת מטרדים וזיהום, בחינת משאבי המים ושימור שטחים פתוחים לאורך הנחל; והיבטים חברתיים - פיתוח תשתיות פנאי, רווחה ותיירות, שביטויים נמצא בעיקר בערים ובסמוך להן (קאופשטיין, 1996).

מאז שהוקמה, נערכו ביוזמת המנהלה לשיקום נחלי ישראל, תכניות שיקום לחלק ניכר מנחלי הארץ ובהם מרבית נחלי החוף. תכניות אלה השתלבו במערך התכנון הארצי, והעשירו את ספרות התכנון בישראל. פעולות תכנון הנחלים נמשכות, ועתידות לתפוס מקום מרכזי גם במהלך השנים הבאות. תכנית המתאר הארצית המשולבת - תמ"א 35, ותכניות המתאר המחוזיות, נתנו משנה תוקף למערכת תכנון הנחלים, בקובען כי נדרשות תכניות אב ומתאר למרחב הנחל, המהוות תנאי לכל פעילות סביבו. המבנה המוצע הינו מסגרת כוללת, הנתונה לשינויים, דגשים ותוספות, הכול לפי תנאי המקום ודרישות התכנון בכל אתר. ממשק המים בנחל, יתבסס על מידע מלא ככל הניתן

מרבית השפכים, פגעי הפסולת והזיהום. נחלי מישור החוף תופסים את המקום המרכזי בפעילות שיקום הנחלים, מפני שהפגיעה בהם היתה ועודנה חמורה מכול, ומנגד - הם מהווים פוטנציאל לשטחי פנאי וריאות ירוקות לאוכלוסייה הרבה המצטופפת במרכז הארץ.

6. המנהלה לשיקום נחלי ישראל

המנהלה לשיקום נחלי ישראל הוקמה בשנת 1993, ביוזמת המשרד לאיכות הסביבה והקרן הקיימת לישראל, כגוף בין משרדי המאגד בעלי עניין שונים העוסקים בנושא הנחלים. שותפים נוספים במנהלה הם משרד החקלאות, משרד הפנים, משרד התיירות, החברה הממשלתית לתיירות, המנהלה הארצית למים ולביוב, מנהל מקרקעי ישראל, משרד התשתיות, משרד השיכון, רשות הטבע והגנים, רשויות הנחלים ירקון וקישון ואחרים. מטרותיה: "לקדם את שיקום נחלי ישראל, תוך שילוב בין כל ההיבטים ותיאום בין כל הגורמים הנוגעים לנחלים, על ידי ניקוי הנחלים, טיהור המים והשבתם אל נחלי האיתן, שמירה ושיקום של החי והצומח ובתי הגידול האופייניים לכל נחל, הבטחת תפקוד הנחלים כעורקי ניקוז, מניעת נזקי שיטפונות, ופיתוחם של הנחלים על בסיס המצאי והפוטנציאל שלהם למטרות בילוי, נופש, טיול, לימוד ותיירות" (שגיא, 1996). היעד הסופי, שיכוון את ממשק המים, הוא חידוש הזרימה של מים שפירים בנחלי ישראל, בהיקף שישקף את הזרימה ההיסטורית. שיקום אקולוגי מלא של הנחלים לא יהיה ברי-השגה, כל עוד לא זורמים בהם מים שפירים - מי נביעות ונגר גשמים. המנהלה לשיקום נחלי ישראל פועלת על פי תפיסה זו, ומאשרת קטעי נחל בהם קיימים מעיינות טבעיים - דוגמת נחל ציפורי, נחל תנינים ואחרים - עליהם ניתן להסתמך כמקור מים שפירים (קאופשטיין, 1996). אמנם, במצוקת המים החריפה בישראל כיום, קשה ליישם מטרה זו. שיקום מי הנחל יתבסס, בטווח הקצר, על אמצעי פשרה - כגון מי קולחין או מי ים. אף על פי כן, אין לראות באמצעים אלו שלב סופי, ואין לקבע את השימוש בהם לטווח רחוק.

העקרונות המנחים את פעילותה של המנהלה לשיקום נחלי ישראל, כוללים הבטחת רצועה רחבה של שטח פתוח סביב הנחל, לצרכי שיקום

7. תפיסת התכנון ותמונת העתיד לנחל

ראשית צעדי התכנון, בהבנת מקומו ותפקידו של הנחל במערך התכנון הארצי, איתור יתרונותיו היחסיים, ותרומתו מבחינה חברתית וסביבתית כאחד. השבת חיים לנחל כוללת פעילות בשלושה תחומים:

- שימור ערכים קיימים;
- שיקום ושחזור ערכים שהיו בנחל ואבדו;
- פיתוח ערכים חדשים - אקולוגיים, נופיים, חברתיים וכלכליים.

תפיסת התכנון תגבש תמונת עתיד לנחל, אשר תכוון את נושאי הפעילות המרכזיים, ואת המינון והאיוון בין תחומי התכנון השונים. בניית תמונת עתיד לנחל - גם אם יש בה יסודות שהם כיום אוטופיים - תהווה יעד, אליו יכוונו מאמצי התכנון והשיקום.

הערכת רגישות מקטעי הנחל והמרחב הסובב - הערכים האקולוגיים, הטבעיים והתרבותיים לאורך ציר הנחל, עשויים להשתנות בקטעי הנחל השונים. תכנית הנחל תעריך את דרגת הרגישות של קטעי הנחל ועל פי זאת את דרגת העדיפות לשימור או לפיתוח. בנוסף לכך, עוסקות תכניות שיקום נחלים בשטחים פתוחים ושטחי משאבי מים הסובבים את ציר הנחל, ומתוות הנחיות לשימורם ושיקומם. מטבע הדברים לא ניתן לשמר או לשקם את מלוא שטח התכנית. מכאן נדרש תהליך המסווג את השטחים בתחום התכנית על פי רגישותם וערכיותם, כאשר שטח רגיש בעל ערך גבוה יזכה למרב ההגנה ומאמצי השיקום.

קיימות גישות שונות להערכת שטחים פתוחים ומשאבי טבע. המתודולוגיה שפותחה במסגרת תכנית האב לישראל בשנות האלפיים (תכנית 2020), ומאוחר יותר בתמ"א 35 (תכנית המתאר הארצית המשולבת), משמשת כיום במגוון של תכניות ומחקרי רגישות. על פיה, מסווג מרחב התכנון ליחידות נוף הומוגניות, המנותחות כל אחת על פי משאבי השטח הקיימים בה (מסלע, תבליט, צומח וחי וכיוצא באלו). משאבי השטח מוערכים על פי סדרה של קריטריונים (מצב השתמרות, נדירות, מגוון וכדומה), כאשר לבסוף מקבלת כל יחידת נוף דירוג בנושאים השונים, המשמש להשוואה בינה ובין יחידות נוף אחרות. בהערכת רגישות יחידות הנוף קיימת

בנוגע למאפייני המערכת ההידרולוגית הטבעית שלו. מידע זה יאפשר לשחזר את מערכות הנחל ויכוון את ממשק המים בו.

פרידלר וחואניקו (1996), סיכמו כלהלן את מאפייני הנחלים בישראל: בחלק גדול מנחלי ישראל הזרימה הטבעית היא זרימת גאויות. זרימת הבסיס, כאשר היא קיימת, מהווה שיעור קטן בלבד מכלל נפח הזרימה בנחל. היוצאים מכלל זה הם מעטים. קיימת עונתיות ברורה במשטר המים בנחלי ישראל. עונת הגאויות נמשכת בין שלושה לבין ארבעה חודשים, לרוב מדצמבר עד מרץ. כל גאות נמשכת מספר שעות עד מספר ימים, העלייה לספיקות שיא והדעיכה בספיקה הן מהירות ודרמטיות. קיימת שונות שנתית גבוהה בזרימה בנחל, הבאה לידי ביטוי בסטיות ניכרות מנפח הזרימה השנתי הממוצע, ומקשה על אומדן "הזרימה הטבעית" בנחל ועל קביעת כמות המים הנחוצה לשיקומו. שיטפונות מהווים אלמנט חשוב בדינמיקה של נחלי ישראל, בהיותם דרמטיים, מרוכזים בפרקי זמן קצרים, ועשויים להיות הרסניים במיוחד עבור תשתיות ומבנים הגובלים בנחל. משטר השיטפונות מהווה סוגיה בקונפליקט בין מהנדסי מערכות מים - הפועלים למניעת שיטפונות - ובין אקולוגים, הטוענים כי השיטפון חיוני לשימור המערכת האקולוגית של הנחל: השיטפונות מנקים את האפיק מהתפשטות בלתי מבוקרת של צמחייה, שומרים על היותו פתוח ומסלקים בוצה מהקרקעית (סילוק זה חיוני בנחלים הסובלים מזיהום). חשיבותם של השיטפונות גדולה בפרט בנחלים מדבריים. שינוי המשטר ההידרולוגי של הנחל, למשל על ידי סכרים, יכול לסכן את עצם קיומו של אפיק הנחל ושל המערכות האקולוגיות והנופיות הקשורות בו. תהליכי סחיפה אופייניים לרבים מנחלי ישראל. תהליכים אלו תורמים לנחלים כמויות סחופת המשפיעות על תהליכי ההתחתרות באפיק, וגם על אתרים מיוחדים מבחינה אקולוגית המצויים באפיק וברצועת הנחל. במרבית נחלי ישראל מצויה מעטפת חרסיתית מסביב לערוץ, המונעת חלחול מים מהאפיק לאקוויפר שמתחתיו. הדבר בולט בעיקר בנחלי החוף, הזורמים בתחום קרקעות החמרה.

השונים. עודף זה צפוי לגדול בעתיד, לאור הגידול באוכלוסייה, הצמצום בענף החקלאות ושימוש במים מושבים, והגדלת היקף הטיהור ברמה הארצית, עם הקמתם של מכוני טיהור נוספים. עודפי הקולחין ניתנים להזרמה בנחלים, וכך תתאפשר החיאתם בזרימה קבועה בספיקות גבוהות. המים יוזרמו באפיק, ויסייעו בשיקום חלק מבתי הגידול, הצמחייה ובעלי החיים, ושחזור נופי הנחל לשימושי פנאי ונופש. הזרמת עודפי קולחין, הוא הפתרון הישים ביותר לשיקום הנחלים, בתנאי מצוקת המים בישראל כיום. עם זאת, יש לזכור שהיעד הסופי הוא זרימה של מים שפירים בנחלים - הזרמת קולחין היא רק שלב ביניים, ואין להשלים עם מצב בו הנחלים נתפסים כ"מתקן טיהור שפכים משוכלל". הזרמת מי הקולחין בשלב זה אינה מתבצעת לשם טיהורם, אלא לשם החיאת הנחל, ושימוש בו לצרכים חברתיים (גפני ובראור, 1995).

8. מגמות בשימור, שיקום ופיתוח נחלים

בעבר, התמקד תכנון הנחלים בניצול משאביהם, בשימוש בהם כמערכת להובלת מים וניקוז או בהגבלת סיכוני הצפות ושיטפונות. לפיכך, אומצו פתרונות קשיחים להתמודדות עם הנחל: פתרונות הנדסיים סטרוקטורליים, כגון סיכור, קיצור פיתולים, החלפת הקרקע הטבעית בתעלה בנויה או בצינור סגור, וייצוב הגדות בסוללות עפר. הנחל טופל בתחזוקה קשיחה, שבמסגרתה הושמדה צמחיית הגדות והערוץ, והקרקעית נוקתה מסלעים וחלוקים, להבטחת זרימה מהירה של המים. כיום, מתגבשת ההכרה שכוחם של פתרונות מסוג זה במיתון הצפות ושיטפונות הוא מוגבל; מאידך - הם מסבים נזק רב לסביבה, מבחינה אקולוגית ונופית. מכאן המגמה לאימוץ פתרונות "ירוקים" ומתונים יותר, שעיקרם: צמצום נזקי הצפות על ידי הגבלת הבנייה בפשט ההצפה של הנחל ו"תחזוקה ירוקה" של הנחל, הנמנעת מהשמדת הצמחייה ובתי הגידול בערוץ. במקביל, מתגבשת ההסכמה כי ראוי להשלים עם מידה מסוימת של נזק או חוסר יעילות בתפקודי הנחל, כדי לשמר ערכים אקולוגיים, נופיים או חברתיים. פרויקטים רבים של שיקום נחלים הנערכים

מידה של סובייקטיביות, המתבססת על ניסיונו והשקפת עולמו של המתכנן. מכאן החשיבות הרבה לשקיפות התהליך - שימוש במתודולוגיה מובנית המוצגת במלואה לקורא, הצגת תהליך ההערכה והכימות לכל שלביו, והסברת הקשרים בין רגישות לבין ערכיות יחידות הנוף וההמלצות התכנוניות הנובעות מהם.

על בסיס תכנית האב לנחל, תוכן תכנית מתאר, על פי חוק התכנון והבנייה. התכנית תתווה את ייעודי השטח במרחב הנחל, ותשתלב במערכת התכנון הארצי. תכנית המתאר תתרגם את המלצותיה ומסקנותיה של תכנית האב לשפה סטטוטורית מחייבת ובעלת תוקף, בכלים המקובלים - תסריט והוראות. במספר תכניות מתאר לנחלים, שנעשו בשנים האחרונות, התגבשה זה כבר שפת תכנון מתארי, העונה אחר דרישותיו הייחודיות של הנחל.

תכניות הנחלים יציעו פרויקטים יישומיים בתחומים שונים, אשר יהיו נדבכים בהליך שיקומו של הנחל. השלמתו של תהליך התכנון, אינה תנאי הכרחי לתחילתו של שלב היישום. ניתן לערוך פעולות שונות, בקנה מידה מצומצם או ניסיוני, במקביל להכנת התכנית. הפרויקטים הפרטניים יתבססו על המידע שנאסף בהכנת תכנית האב, ויקיימו היזון חוזר עם תהליך התכנון, כמכשיר להפקת לקחים וכמשוב בהמשך הליך התכנון.

תכנית שיקום הנחל, נדרשת להתייחס לימים שלאחר חתימתה. שיקום הנחל אינו מסתיים עם השלמת התכנון ואפילו לא לאחר יישומו. שיקום וניהול הנחל הם תהליכים מתמשכים, הכרוכים בתחזוקה שוטפת, שמירת תפקודי הניקוז, ניטור, זיהוי תקלות ותיקונן, בקרת תוצאות התהליך, הפקת לקחים ושינוי תהליכי השיקום בתגובה להיזון מהשטח. הבקרה והתחזוקה הנם תהליך רציף, ללא נקודת סיום מוגדרת מראש, והם מהווים את לבו של שיקום הנחל ואת המפתח להצלחתו.

המשבר המחריף והולך במשק המים אינו מאפשר, לעת עתה, השבה מלאה של מים שפירים לנחלים. במצב זה, יש לבחון פתרונות ביניים להזרמת מים לנחל ממקורות חיצוניים, שהמרכזי בהם הוא קולחין (מי שפכים שעברו טיהור). באזורים שונים בארץ, קיים כבר כיום עודף מי קולחין במכוני הטיהור של היישובים

אינו יכול לשקם את עצמו, נדרשת התערבות מתקנת (Brooks and Shields, 1996).

שיקום הנחלים הונחה בעבר על ידי מטרה בודדת, כגון צמצום הצפות, הפחתת זיהום או יצירת אתרי נופש. יעדים נוספים זכו להתייחסות כל עוד לא איימו או פגעו במטרה המרכזית (Boon et al., 1992). כיום, מוגדרים שירותי הנחל ומטרות שיקומו באופן מורכב יותר. הנחלים מהווים משאב במחסור, ולכן תכנונם לתכלית יחידה איננו יעיל. שירותי הנחל יתפרשו על פני מגוון נושאים משולבים, שאינם סותרים או פוגעים זה בזה. לדוגמה: שיקום אקולוגי יהיה קשור בטיפוח נופי, ובפיתוח מוקדי נופש וחינוך. כאשר הנחל משרת מגוון יעדים וקבוצות אוכלוסייה, מתרחב קהל המשתמשים המעוניין בשימורו. תכנון רב מטרתי מגדיל, לפיכך, את סיכויי של הנחל לעמוד בלחצי פיתוח (Brooks and Shields, 1996).

פעילויות שיקום הנחלים, התאפיינו בעבר באימוץ קו פעולה בודד להשגת המטרה. כיום, מזהות רשויות השיקום את מרב אמצעי הפעולה האפשריים להשגת מטרת התכנית, ופועלות באופן משולב ליישומה. זאת, בהנחה שפעולה רב-אמצעית, התוקפת את הבעיה ממספר כיוונים בו זמנית, מבטיחה סיכוי גבוה יותר למימוש מטרות השיקום (Riley, 1998). העקרונות הנזכרים מוצאים את ביטויים בעבודתה של המנהלה לשיקום נחלי ישראל, הפועלת בגישת תכנון רב-מטרתי ובאופן רב-אמצעי, ומשתמשת בתכנון מרחבי, אכיפה שיטתית ושיקום פסי להשגת שיפור במצבם של הנחלים.

תנאי הכרחי לשיקום מערכות המים בנחל, הוא ניהול כולל על פי גבולות טבעיים – גבולות אגן ההיקוות. שיקום או שימור מערכות הנחל אינו אפשרי ללא התייחסות לגורמים המשפיעים עליהן, בכלל אגן ההיקוות. אופי המערכת ההידרולוגית של הנחל, בה כל חלק קשור ומשפיע על חלקים אחרים, מחייב מעבר מפתרונות מקומיים לראייה אזורית, כאשר יחידת הניהול היא אגן ההיקוות בכללו. יש לשלב את פתרון סוגיית המים בנחל בפתרון אזורי של כלל בעיות המים: שאיבה, יצירה (התפלה), הקצאה, ניהול חסכוני, ניקוז, ביוב וטיהור. ניהול ברמה אזורית מאפשר יעילות וגמישות בניצול מאגרים, מכוני טיהור ועודפי

בעולם כיום, עוסקים בשחזור ערכי טבע ונוף בנחלים שהוסדרו בעבר בקונסטרוקציות קשיחות. החזרת פיתולים היסטוריים לנחלים שהוסדרו בתעלות ישרות, יצירה מחדש של שטחי ביצות, של בריכות ומפלים, שחזור הגדות הטבעיות ותחזוקה "ירוקה" של נתיב הזרימה, הם חלק מהפעולות הננקטות במסגרת זו במדינות רבות. דוגמה להסדרת ניקוז המתחשבת בצרכים אקולוגיים ונופיים, היא הסדרתו של קטע בן כ-2 ק"מ מנחל חרוד סמוך לניר דוד. עקב מבנהו הטופוגרפי, שימש קטע זה כפשט הצפה ונוצרה בו אקולוגיה טרום ביצתית. הקטע הוסדר בשנת 1988 להעברת שיטפונות על ידי בניית סוללות בגדותיו, ללא התערבות כל שהיא בשטח הנחל שבין הגדות, כך נשמר אופיו הטבעי של הנחל.

בעבר, נתפסה מטרת שיקום הנחלים כביטול הנזקים שהסב להם האדם; הנחל המשוקם יחזור למצבו ה"טבעי", שלפני ההתערבות האנושית. החשיבה האקולוגית המודרנית, מכירה ומשלימה עם חוסר היכולת להחזיר את הגלגל לאחור. במרבית המקרים, ההתערבות האנושית היא נרחבת וממושכת, ולא ניתן לבטל כליל את תוצאותיה. לעתים חסר מידע על מאפייני הסביבה לפני התערבות האדם או שהנחל במצבו הטבעי מאיים באופן בלתי נסבל על האוכלוסייה (בהצפות הרסניות, או שטחי ביצות). מתכנני השיקום מסתפקים, לכן, בהגעה למצב של שיווי משקל אקולוגי באגן ההיקוות, המאפשר למערכת הטבעית להתחדש ולשקם את הסביבה ובתי הגידול האופייניים לה.

שימור אקולוגי של נחלים, נתפס בעבר כהקפאה של נקודה נתונה בזמן, הנתפסת כאידיאלית. כיום, רווחת תפיסה דינמית יותר, המדגישה ומעדיפה את התהליך האקולוגי ולא את המצב הנתון. תפיסה זו מכונה בספרות "שיקום טבעי" (naturalization). היא גורסת שנחלים הם מערכות אקולוגיות דינמיות המשתנות תדיר, ושינויים אלו צריכים להמשיך ולהתקיים, כאשר המטרה היא לאפשר לטבע לחדש את עצמו ולהגיע באופן עצמאי למצב מיטבי (Eiseltova and Biggs, 1995). כל עוד מצוי הנחל במצב בו התהליכים הטבעיים מתקיימים – המערכת נתפסת כיציבה, למרות ההתערבות האנושית. כאשר הדינמיקה הטבעית מופרת והנחל

לדוגמה במהלך שיקומו של נחל אלכסנדר. הפארק, שאורכו כ-1.5 ק"מ, הוקם בקטע נחל שסבל בעבר מזיהום ופגיעה מתמשכת. הזרימה בנחל הוסדרה במפלים קטנים, הגדות מותנו ויוצבו בחומרים טבעיים, ולאורכן הותווה מסלול הליכה, נשתלו מאות עצים ושיחים, והוקמו פינות ישיבה. גשר תלוי הוקם מעל הנחל בקטע זה, לשם יצירת נקודת תצפית ומעבר להולכי רגל. פרויקט ההדגמה בנחל שימש להכשרת אנשי מקצוע בעבודה משותפת בשיקום נחלים, לשם ניסוי פתרונות שונים לטיפול בנחל, ולשם גיוס דעת הקהל לתמיכה בהמשך הפרויקט. הצלחתו הביאה ליישום פרויקטים נוספים במתכונת דומה, שיתחברו, בסופו של התהליך, לציר נחל שלם, מטופח ומשוקם.

• רוח כלכלי אינו סותר יעדים של שיקום סביבתי; ניתן לרתום את הסקטור הפרטי למימון ויישום פעילויות שיקום הנחלים על ידי התניית רשיונות לפיתוח, כרייה או שאיבת מים, בשיקום אקולוגי של בתי גידול או ביצירת מקומות נופש. שיקום אקולוגי של סביבת פרויקט נדל"ן, תורמת לעליית ערך הנכסים ורווחי היזם, ומהווה תמריץ עבורו לעסוק בכך (Boon et al., 1992). פן אחר של הפעלת הסקטור הפרטי, הוא רתימת החקלאים המקומיים לתהליך השיקום. נוכח ירידת הכדאיות הכלכלית של הענף, נכונים החקלאים ליטול על עצמם תפקידים חדשים, בין השאר של שומרי הנחלים, העוסקים בטיפול בביוב, מחזור שפכים ביתיים, וסילוק נאות של פסולת חקלאית רעילה ברחבי אגן ההיקוות (Eiseltova and Biggs, 1995). מפעלים וחברות שיש בפעולתם משום פגיעה בסביבה, נדרשים לפיצוי סביבתי בשיקום או שיחזור מערכות פגועות. דוגמה בולטת לכך היא פעילות חברת החשמל בהקמת פארק חדרה, כפיצוי לנזק הסביבתי שנגרם עקב הקמת תחנת כוח בשפכו של נחל חדרה. דוגמה זו ראויה ליישום במקרים אחרים של פגיעת מפעלים בנחלים.

דרך נוספת לרתימת הסקטור העסקי לשיקום הנחל, הנה קשירה בין השיקום לבין יזמות נדל"ן. בבריטניה, פרויקט שיקום אגן המרסי העמיד לעצמו כמטרה מרכזית את השבת

קולחין. הגישה האגנית לניהול המים בנחל, תכלול זיהוי כלל מקורות המים הקיימים בו ושימוש בהם כבמשאב להחייאת הנחל; עיצוב מדיניות אגנית להזרמה ושאובה - הזרמה במעלה ושאובה במורד; ושימוש במקורות המים השונים בסמוך למקום בו הם נוצרים, תוך הימנעות ממערכות הובלה מסורבלות. הממשק בנחל, ראוי שיתבצע על ידי גוף ניהולי אחד, שיישם מדיניות מקיפה בכלל אגן ההיקוות. גוף זה יאגד נציגים וסמכויות של כלל הרשויות העוסקות בניהול המים במרחב.

9. אמצעי פעולה

• חוקים ותקנות. מדיניות ועקרונות שיקום מבוטאים מעשית, בין השאר, בחוקים ותקנות, המתייחסים לשורה של נושאים הקשורים לנחל: איכות המים, הקצאת מים להזרמה, תחזוקת הנחל ושמירת עורקי זרימה פנויים, עיצוב נופי, ועוד. לעתים קרובות יש צורך במספר חוקים, המתייחסים כל אחד להיבט אחר של הסוגיה, על מנת להביא לשיפור בכלל התפקודים של הנחל.

• תכניות מרחביות. תכניות מרחביות הינן כלי חשוב לשימורם ושיקומם של נחלים. מערכת התכנון עשויה להתייחס לנחלים בשני אופנים: א. תכנית סקטוריאלית, אשר נושאה המרכזי הינו הנחל וסביבתו הישירה. תכניות אלו מעדיפות במובן מסוים את "האינטרס" של הנחל, מזהות את יתרונותיו ומנסות להעצים אותם, ומונעות ומרחיקות מטרדים מן הנחל. תכניות מעין אלו הן תכניות שיקום הנחלים הנעשות במסגרת המנהלה לשיקום נחלי ישראל.

ב. תכניות מרחביות, הכוללות חבל ארץ גדול, ומתייחסות ברמה מפורטת לנחל ולסביבתו כחלק אינטגרלי ממערך התכנון. במקרה זה הנחל אינו נושא תכנון יחיד, אך הוא תופס מקום נכבד במערך התכנון הכללי.

• פרויקטים לדוגמה. אחד האמצעים להנעת תהליך שיקום נחל הוא הפעלת פרויקט הדגמה, שמטרתו הן העלאת המודעות לאפשרויות השיקום, המחשת ערכו למערכת האקולוגית ולחברה, לימוד, מחקר והכשרת אנשי מקצוע בתחום. פרויקט הדגמה מרכזי לשיקום נחלים נערך באירופה במהלך שנות ה-90, ביוזמת הקהילה האירופית. בישראל בוצע קטע נחל

יחד לגישור קונפליקטים ולמציאת פתרונות, המוסכמים על כל הגורמים באגן ההיקוות. גישה זו אומצה במסגרת פרויקט שיקום אגן המרסי. הפרויקט הוקם כשותפות בה חברים נציגי רשויות ממשלתיות, רשויות מקומיות, אנשי עסקים ומתנדבים מקרב הציבור הרחב. הוא מנוהל על ידי שלוש זרועות - הזרוע האדמיניסטרטיבית, בה חברים נציגי הרשויות השונות; האגודה העסקית - המייצגת את אנשי העסקים המקומיים; וקרן אגן המרסי - המאגדת את קבוצות המתנדבים והארגונים הציבוריים השונים הפועלים לשיקום נחלי האגן. הגישה, שהיתה חדשנית למדי עם הכרזת הפרויקט ב-1985, הוכחה כמוצלחת, והפרויקט הגיע להישגים מרשימים במהלך 16 שנות קיומו (Mersey Basin Campaign, 1997).

מרבית אמצעי הפעולה שנסקרו לעיל, מיושמים כיום בארץ על ידי המנהלה לשיקום נחלי ישראל וגופים אחרים. בישראל קיימת חקיקה נרחבת, שמטרתה להגן על משאבי המים ועל ערכי הטבע והנוף בנחל (ראה לסטר וחו', 2008). אכיפת חקיקה זו, היא אמצעי מרכזי בו נוקטת המנהלה לשיקום נחלי ישראל במאבק במזהמי הנחלים. המנהלה עוסקת בתכנון מרחבי - בכל אחת ממנהלות הנחל המקומיות הוכנה תכנית אב לנחל (או נמצאת בשלבי הכנה), וחלקן תורגמו לתכניות מתאר סטטוטוריות. ניתן לראות בחלק מתכניות הנחל הללו, אף אם לא הוכרוזו כך רשמית, פרויקטים לדוגמה, במסגרתם נערכה למידה והכשרת אנשי מקצוע בתחום. שיתוף הסקטור הפרטי לוקה עדיין בחסר במערכת השיקום הישראלית - והפוטנציאל הטמון בסקטור העסקי אינו ממומש במלואו. גם שיתוף הציבור בשיקום נחלים נמצא בתחילת דרכו - תכניות הנחל השונות מתייחסות לסוגיה, ונערכו תכניות לימוד לבתי הספר בנושא. דוגמה ראויה לציון, היא מעורבותה ויוזמתה של המועצה האזורית עמק חפר בשיקום נחל אלכסנדר. עם זאת, המצב בישראל עדיין רחוק ממצבה של ארצות הברית, בה שיקום נחלים נעשה מתוך יוזמה ועל ידי הקהילה המקומית.

10. גבולות התכנון

בספרות העוסקת בשיקום נחלים, קיימת התייחסות נרחבת לקביעת גבולות אזור השיקום. לקביעה זו השלכות אקולוגיות מהותיות: גבולות מצומצמים

הקרקע הסמוכה למים, והכשרתה לפיתוח נדל"ן איכותי. לשם כך הוקם ה-Mersey Development Corporation ששיקם והכשיר למעלה מ-9,600 דונם של קרקע מזוהמת ברחבי אגן ההיקוות. ההכנסות מפיתוח הנדל"ן, שימשו להבראת הנחל ושיקומו. באותו פרויקט הוקמה התאגדות של אנשי עסקים מקומיים (Mersey Basin Business Foundation), שמטרתה איסוף תרומות והרחבת מעגל העסקים התומכים במטרות הפרויקט, ומיישמים את המלצותיו בנוגע לשמירה על איכות המים. כמו כן מפעיל הפרויקט תכנית המיועדת לסקטור החקלאי, שתפקידה להפיץ טכניקות עיבוד המשמרות משאבי סביבה, יחד עם חינוך מצבם הכלכלי של החקלאים (Mersey Basin Campaign, 1997).

• נחלים, ובפרט נחלים אורבניים, מהווים נושא מרכזי לתכנון בהשתתפות הציבור. התארגנויות וולונטריות של התושבים לשיקום הנחל - במטרה לשפר את איכות החיים בשכונה, לטפח מקומות לנופש ופנאי או להעלות את ערך הנכסים - יכולה להביא לתוצאות מרשימות, בייחוד כאשר הן זוכות לתמיכה ועידוד מצד הרשויות. הציבור המקומי מסוגל לגייס משאבים שאינם עומדים לרשות הרשויות - כגון עבודה התנדבותית ותרומות. יתר על כן, ציבור מעורב, המהווה חלק מתהליך השיקום, יפעל לשימור הישגי הפרויקט ולמניעת מפגעים עתידיים בנחל. בארה"ב קיימים כ-4,000 ארגונים התנדבותיים העוסקים בשיקום נחלים ומפעילים מוקדי הסברה, תכניות לימוד בבתי ספר, ופעילויות ניקוי ושיקום אקולוגי. הרשויות מעודדות את הקהילות המקומיות לשקם נחלים בעצמן, על ידי הפצת ידע וספרי הדרכה, הקצאת קרנות תמיכה בפעילויות שיקום עצמיות, הפעלת תכניות בחינוך הפורמלי והבלתי פורמלי, ותמיכה בארגונים לא-ממשלתיים (Riley, 1998).

אחת התפיסות המובילות בשיתוף הציבור בשיקום נחלים, היא גישת השותפות (Partnership Approach), התומכת ביצירת שותפויות ציבוריות-פרטיות, בהן חברים נציגים מהרשויות, מהסקטור העסקי ומהציבור הרחב. שותפויות אלו פועלות

יעוד הקרקע בצדי הנחל בתכניות מתאר. לשם קביעת רוחבה של רצועת הנחל, יש להתייחס למאפיינים פסיים-מורפולוגיים, לתפקודי הניקוז והסדרת הזרימה, לפוטנציאל הנופי והאקולוגי של סביבת הנחל, לגורמים הסמוכים המשפיעים על מערכות הנחל ולזמינות השטח בקרבתו. כאן יש להתייחס לרוחב פשט ההצפה, והרצועה החזותית של הנחל. רצועת הנחל מיועדת לשימור ושיקום הנחל ומערכותיו, למסדרון אקולוגי למעבר בעלי חיים וזרעי צמחים, וכן לשימושי נופש אינטנסיביים ושימושים חקלאיים, שאינם פוגעים במטרות השיקום. רצועת הנחל היא התחום שיתוכנן בפירוט, ובו יבוצעו הפעילויות הקשורות בנחל: מפעלים הידרולוגיים, שיקום אקולוגי, תכנון נופי, תיירות, מיזמים כלכליים וכדומה.

ה. אגן ההיקוות. המרחב המתנקז כולו אל ציר אחד, לאמור - גבולות המערכת ההידרולוגית של הנחל. קיימת מערכת יחסים הדוקה בין הנחל לבין אגן ההיקוות: חילוף חומרים מתמיד בחתך הרוחב ובחתך האורך של הנחל. בספרות האקולוגית מוסכם כיום ששיקום בר-קיימא של הנחלים, יתבסס על גישה מקיפה והתייחסות לאגן ההיקוות כולו. על אף שבתכניות מרחביות מקובל להסתפק בהתייחסות לרצועת הנחל, טוענת התפיסה האקולוגית העכשווית, כי על הטיפול בנחל להתייחס ולהקיף את הנעשה בכלל אגן ההיקוות. תכנון אגני, מתוך מטרה של שימור משאבי מים, הוא תנאי הכרחי לשיקום בר קיימא של הנחל, שכן לכל הנעשה במרחב אגן ההיקוות השפעה על איכות המים המגיעים אל הנחל והזורמים בו. תכנון אגן ההיקוות יתייחס, בין השאר, לבינוי, פיתוח תשתיות, רעייה, כריתת יערות, כרייה וחציבה, והגבלת שאיבת מים (Eiseltova and Biggs, 1995; Brooks and Shields, 1996).

מרבית הפרויקטים העוסקים בשיקום נחלים, נקבעים בקטעי נחל או מצטמצמים למסדרון הנחל, ואינם פרושים על פני אגן ההיקוות כולו. זאת בשל מחסור במשאבים לטיפול ביחידות שטח גדולות או חוסר יכולת לתאם בין הרשויות השונות הקיימות באגן. אגני ההיקוות הן יחידות פיסיות-הידרולוגיות שלמות, אך לעתים רחוקות הם תואמים את החלוקה הפוליטית-מוניציפלית

מדי, שאינם כוללים את מוקדי ההשפעה על מערכות הנחל, יחלישו את יכולתו של השיקום להתקיים לאורך זמן. מאידך, גבולות רחבים מדי יסיטו את מרכז הכובד מן הנחל, למרחב ולבעיותיו. בהקשר זה, יש להתייחס למספר מושגי יסוד בהגדרת מערכת הנחל, חלקם מונחים פסיים-הידרולוגיים וחלקם מונחים תכנוניים, המשמשים לסימון הנחל כיעוד קרקע בתכניות מרחביות. לעתים קרובות משמשים מושגים אלו בערבוביה. המונחים הפסיים הקשורים בהתוויית גבולות מערכת הנחל הם:

א. האפיק (עורק הזרימה). מושג גיאוגרפי, המתייחס לתוואי הליניארי, הכולל את ערוץ הנחל עצמו וגדותיו בסמיכות יתרה אליו. תחום האפיק הוא "האזור הרטוב" של הנחל, והוא המרחב בעל הרגישות האקולוגית-הידרולוגית הגבוהה ביותר.

ב. פשט ההצפה. המרחב בסביבתו של הנחל, העשוי להיות מוצף על ידי מי שיטפונות, מעבר לתוואי הזרימה באפיק. פשט ההצפה קולט את מי נגר הגשמים בעת מעבר גאויות גבוהות, אך נותר ללא זרימה בין הגאויות ולעתים מתייבש בעונת הקיץ. כאן מדובר במושג הידרולוגי, שעשוי לשמש בסיס להגדרה הסטאטוטורית של מסדרון הנחל. שימור פשט ההצפה וקיום משטר הצפות תקין חיוני למערכת האקולוגית, באפשרו לנחל להחליף חומרים בין האזור היבש לבין האזור הרטוב ולקיים בית גידול עונתי לח. בפשט ההצפה שוקעים חומרים מזהמים מכלל אגן ההיקוות לפני הגעתם לנחל עצמו, וכך הוא מסייע בשמירה על איכות המים במורד הזרימה. הגבלת הפיתוח בפשט ההצפה, תאפשר לנחל להתמלא מים ולהציף את סביבתו בעונת הגשמים, מבלי לפגוע בשימושי קרקע גובלים. פשט ההצפה ממקד אליו תשומת לב רבה מבחינה תכנונית, בהיותו המרחב שנפגע יותר מכול על ידי פעולות כגון יישור וקיצור פיתולים, ייצוב גדות בקונסטרוקציות קשות, והעמקת נתיב הנחל.

ג. האגן החזותי של הנחל. האזור הנצפה מהנחל, החשוף לעיניו של המטייל בו, ומשפיע על החוויה החזותית של המתהלך לגדותיו ועל שימושי הנופש והתיירות בסמוך אליו.

ד. רצועת הנחל. זה מונח תכנוני, המשמש לסימון

מסורות התכנון המרכזיות הן (Riley, 1998):

א. תכנון כולל (Comprehensive Planning) - תכנון רציונלי של שימושי קרקע בהתייחס ליחידות שטח גדולות; הגדרת מטרות ופרוגרמה, בניית בסיס מידע סביבתי, חברתי וכלכלי, יצירת חלופות ובחירה של המיטבית מתוכן. תהליך זה הוא המקובל ביותר בעולם התכנון, ותוצריו הן תכניות אב ומתאר. תכניות אלה עוסקות, בדרך כלל, בקביעת פיזורם של ייעודי קרקע שונים במרחב: מגורים, מסחר, תעשייה וכיוצא בזה.

התכנון הכולל יתייחס למשאבי מים, הן בדרך של יצירת תכנית ייעודית לנחל וסביבתו (במתכונת תכניות הנחל אותן יוזמת המנהלה לשיקום נחלי ישראל), והן על ידי הטמעת עקרונות של שימור משאבי מים בתכניות עירוניות ואזוריות כלליות. תכנית עירונית או אזורית, המתייחסת לשימור משאבי מים, תקבע את פיזור ייעודי הקרקע באופן שיצמצם את הנגר העילי, ימנע שיטפונות, יעשיר את מי התהום ויגן על נתיבי מים מפני זיהום אורבני. בסיס הנתונים של התכנית יכול לכולל מיפוי של אזורים החשופים לסכנות ומטרדים, ומנגד - מיפוי של איכויות הידרולוגיות לשימור ושיקום. עם זאת, הניסיון המצטבר בתחום מראה, כי לעתים נדירות בלבד מוצאים שיקולים אלו מקום במסגרת תכניות כלליות. זאת, בשל היעדר מומחיות בנושאי מים מצד העוסקים בתכנון ערים ואזורים. ניסיון רב שנים בארה"ב ובארצות אחרות העלה, שתהליך התכנון הכולל יעיל פחות לשיקום נחלים. תכנית עמק טנסי, נותרה כתכנית בודדה שזכתה להצלחה. מרבית התכניות שהופקו בדרך זו לא זכו ליישום בפועל ונודעו כתכניות מדף.

ב. תכנון מקטעי (Incremental Planning) - מודל גמיש ומבוזר יותר, הבנוי בצורה שלבית, ולא דרך תכנית מקיפה. התכנון המקטעי כולל יישום פתרונות בקנה מידה קטן המותאמים לכל מקרה ומקרה, בתהליך ניסוי וטעייה, תוך למידה מתמדת ושינוי תדיר של מטרות ואמצעי פעולה. התכנון המקטעי מתבסס על ההנחה, כי ניתן להגשים את שיקום הנחל באופן מיטבי על ידי תהליך מבוזר של משא ומתן ויישום פרויקטים. תהליכי התכנון והיישום נבנים מראש במתכונת גמישה, המעודדת ביזור סמכויות וצמתי החלטה. אין מדובר בתכנית צרה וקשיחה, אלא בעיצוב אסטרטגיה לבחירת פרויקטים פרטניים, תוך

בין רשויות המים לבין גופי התכנון. גבולות התכנון בתכניות מתאר נגזרים, לעתים קרובות, על פי גבולות מוניציפליים, ומאפשרים טיפול במקטעים של אגן ההיקוות בלבד. עם זאת, לא ניתן לגשת לשיקום הנחל ללא הבנה והכרה של מכלול ההשפעות והגורמים בתחום אגן ההיקוות, אף אם אין יכולת לטפל בהם בפועל. אגן ההיקוות הוא מרחב התכנון הראוי והנכון מבחינה אקולוגית. יחד עם זאת, היכולת ליישם פרויקט שיקום באגן ההיקוות כולו, היא קטנה. אחת ההמלצות המקובלות היא, לפיכך, לחשוב בגדול - לשקול את הצרכים של אגן ההיקוות כולו - ולפעול ברמה המקומית, בפרויקטים לשיקום מקטע נחל או יובל בודד. הפרויקטים הפרטניים ייקחו בחשבון את התנאים והדרישות של כלל המערכת האקולוגית-הידרולוגית, אך הפעילות תבוצע בפועל במוקד מצומצם יחסית.

תמ"א 35, מייעדת את צירי הנחלים הראשיים כרצועת נחל, ומורה על הכנת תכניות מחוזיות לרצועת הנחל, שיקבעו את גבולותיה המדויקים (בין השאר על בסיס פשט ההצפה) ויעסקו בשיקום הנחל ובתי הגידול בו, מניעת זיהום, עיצוב ויישוב גדות, פיתוח אתרי נופש וצירי טיול וכיוצא בזה. תכניות המתאר המחוזיות החדשות, אף הן משתמשות בייעוד רצועת נחל לצורך סימון הנחלים וקביעת הוראות לפיתוחם. המנהלה לשיקום נחלי ישראל מונחה בפעולותיה על ידי תפיסה אגנית - למשל בקידום מכוני טיהור שפכים ובאכיפה נגד מזהמים באגן ההיקוות כולו. לגישתה, מצרף של פעולות פרטניות המתבסס על תפיסה כוללת, יביא לשיפור משמעותי במצבו של אגן ההיקוות. רשויות הניקוז עברו שינוי מנהלי מקיף בשנת 1997, וכיום סמכויותיהן נגזרות מחוק הניקוז על פי גבולות אגני ההיקוות המרכזיים. אף על פי כן, הניהול האגני בישראל נתקל בקשיים אדמיניסטרטיביים ובחוסר שיתוף פעולה בין גורמים שונים באגן, כך שמרבית הטיפול המעשי עודו מוגבל לרצועת הנחל בלבד.

11. אופני תכנון

מספר הליכים ומסורות תכנון מנחים עריכת תכניות מרחביות, ועשויים להשפיע על יישום תוצריהן בפועל. מן הניסיון עולה, שלהליכי תכנון מסוימים קיימים יתרונות בכל הנוגע לשיקום נחלים. שלוש

הצמחת התכנית מתוך הקהילה. התכנית אינה מתבססת על מסורת התכנון המקצועית, אלא על טכניקות של גישור, הסכמות רחבות ופתרון קונפליקטים, בעזרתם מתבררות המטרות של האוכלוסייה המקומית, ואמצעי הביצוע המקובלים עליה. התכנית נקבעת תוך משא ומתן בין הגופים לבין הפרטים הפועלים באזור התכנון.

טכניקות התכנון הקהילתי פותחו בארה"ב, במהלך שנות ה-60 וה-70. המוטיבציה הראשונית בפיתוח טכניקות אלו, היתה יצירת תכניות אלטרנטיביות על ידי הקהילה במחאה על תכניות שהוצעו על ידי הממשד, ונתפסו כמאיימות על הציבור המקומי. בעבר נחשבו טכניקות אלו כרדיקליות, אך כיום הן נתפסות כדרך תכנון פרגמטית ויעילה להפחתת התנגדויות וקונפליקטים, ויצירת בסיס פוליטי להסכמה לתכנית. טכניקות של גישור ופתרון קונפליקטים נמצאות כיום, בארצות רבות, בשימוש נרחב בכל דרגי התכנון, והן מקובלות במסגרת תכנון רציונלי ותכנון מקטעי כאחד.

מנהלות הנחלים, הנהוגות בישראל לכל אחד מנחלי הארץ הגדולים, נוקטות גישות ביניים, המשלבות בין שלוש מסורות התכנון שהוצגו מעלה. מחד, עוסקות מנהלות הנחלים בתכנון כולל, המתבסס על לימוד מגוון מאפייניו ושימושיו של הנחל בהווה ויצירת תכנית לייעודי הקרקע הסמוכים לנחל. מאידך, עוסקות מנהלות הנחלים ביישום שלבי של פרויקטים בקנה מידה מצומצם, במטרה להביא לשיקום הדרגתי של הנחל, תוך כדי לימוד והפקת לקחים. בנוסף - הולך ומתגבש במנהלות הנחלים פן של שיתוף הציבור, מעצם פעולתן במסגרת הרשויות המקומיות הסמוכות לנחל, ושיתוף פעולה עם הגורמים המוניציפליים. ניתן לומר, כי כל אחת ממסורות התכנון שנסקרו, מתאימה למערך ספציפי של בעיות ופוטנציאל. גישת התכנון הכולל, במתכונת של תכניות אב ומתאר, תתאים לאזורים בהם משאבי הטבע מצויים במצב טוב יחסית, והתכנון מכוון לשימור וחיזוק הקיים. תכניות מתאר יגדירו אזורים לשימור או הגבלת פיתוח, אך הן חלשות יותר בכל הקשור להפעלה של פרויקטים. כאשר משאבי הטבע מצויים במצב מדורדר, ונדרשת פעילות שיקום אקטיבית, עדיף הליך תכנון במתכונת מקטעית. התכנון המקטעי, הרואה את

שמירה על מרב האפשרויות העתידיות.

אחד המרכיבים הבסיסיים בגישה המקטעית, הוא תפיסת התוצרים כחלק מהתכנון ולא כשלב הסופי שלו. התכנון הכולל מסתיים בתוצאה - תכנית או פרויקט. גישת התכנון המקטעי רואה בתכנון תהליך, שאין לו נקודת סיום או תוצאה סופית מוגדרת. ביצוע פרויקטים נתפס כמרכיב אינטגרלי של התכנית, ולא תוצר שלה. התכניות נתפרות כמענה לצורך חברתי או מצב סביבתי מסוים, ויישומן מלווה בתהליך מתמיד של התבוננות וניתוח התוצרים שהתקבלו ועריכת שינויים בפעולות עתידיות. כל פרויקט או רעיון תכנוני, כולל את זרעי השינוי או השיפור שלו עצמו.

התכנון המקטעי הוא מודל כללי, המהווה כלי מתאים ויעיל בשיקום נחלים. נחלים מדורדרים מהווים בעיה אקולוגית סבוכה, ולעתים קרובות חסר מידע מספק בנוגע לפעולות השיקום הרצויות ולהשפעותיהן. במצב זה, לתכנון המקטעי יש יתרון על פני התכנון הכולל, כיוון שהוא מאפשר ניסוי וטעייה, והתקדמות ליישום נרחב של פתרונות שהוכחו כמוצלחים. מצרף של תכניות מצומצמות בהיקפן ובשאיפותיהן, מהווה מתכון מוצלח יותר לשיקום אגני היקוות, מתכנית אחת גורפת. לתכנון המקטעי יתרון נוסף בכל הנוגע להסברה ושינוי דעת הקהל - תוצאות הפרויקטים הראשונים מהוות אמצעי שכנוע לתמיכה בשיקום הנחל באמצעות הפרויקטים הבאים. ככלל, תופס התכנון המקטעי את העלאת המודעות הציבורית כאחת מהמטרות העיקריות של פרויקט שיקום הנחל. יתרון נוסף כרוך בחיסכון במשאבים - המכוונים בעיקר ליישום פרויקטים, ניטור ולימוד, ולא לתכנון ויצירת בסיס מידע נרחבים.

המודל של תכנון מקטעי תופס מקום בישראל, בשיקום נחל חרוד, נחל חדרה ונחלים אחרים. פרויקטים אלה מתבססים על תכניות אב לניקוז ומערכת סקרים אקולוגיים. הכנתה של תכנית מתאר כוללת וסטטוטורית, נדחית לשלבים מאוחרים יותר. למרות יתרונותיו של התכנון המקטעי, אין להתעלם מן החסרון של אי-ראיית התמונה הכללית ועקב כך סיכוי לאובדן הזדמנויות.

ג. תכנון קהילתי (Community-Based Planning) - מודל זה מבוסס על העיקרון של

נחלים. גופים בינלאומיים שונים – ביניהם האו"ם והקהילה האירופית, ניסחו תקנות וסטנדרטים לשיקום ולשימור נחלים, ויזמו פרויקטים ומרכזי לימוד משותפים.

מתכונת ניהול הנחלים בישראל, נמצאת לכאורה בין שתי מגמות סותרות – מחד, מעבר מניהול ברמה ארצית לרמה נמוכה יותר – אזורית או מקומית; ומאידך, מעבר לניהול ברמה גבוהה יותר – בינלאומית. סתירה זו ניתנת ליישוב לאור המגמות שהוזכרו מעלה – אימוץ חשיבה מקיפה וניסוח קווי מדיניות הלוקחים בחשבון את כלל המערכת, בקנה המידה הגבוה ביותר, ובמקביל פעולה ממשית במרחב מצומצם, ברמה המקומית.

בישראל, המגוון הרחב של נופים ומאפיינים אקולוגיים של נחלים, מחייב תכנון וניהול ברמה המקומית. לצד מגמה זו קיימת גם המגמה ההפוכה – המחייבת התייחסות חוצה גבולות. משאבי המים בארץ מושפעים מגורמים שמחוץ לתחומי המדינה, לדוגמה – מרבית נחלי מישור החוף נובעים בשטח הרשות הפלסטינית. תכנון נחלים יהווה נושא לניהול משותף, בעידן שלום. צעדים ראשונים בכיוון זה נערכו במסגרת פרויקט שיקום נחל אלכסנדר, שבמהלכו נערכו דיונים ונחתמו הסכמים משותפים בין נציגי מנהלת הנחל הישראלית לבין נציגי ציבור פלשתינאים, במטרה לפתור את בעיית השפכים המגיעים לנחל מהערים שכם וטול כרם (ברנדיס, 2001).

13. "ניקוז ירוק"

שיקום ושיפור מערכת הניקוז בישראל, הוא מטרה ראשונה במעלה. עם זאת, יש לתת את הדעת על הקונפליקט הבסיסי הקיים בין ראיית הנחל כערוץ ניקוז, ובין שאר תפקידיו. דווקא בנחלים בעלי ערכים נופיים ואקולוגיים גבוהים, יקשה לקיים מערכת ניקוז סדורה ויעילה. נחל בעל מורפולוגיה מגוונת – תוואי מתפתל, ומופעים שונים בחתך האורך והרוחב, מעביר זרימה במהירות נמוכה יותר, בהשוואה לנחל בעל נתיב מישור וחתך אחיד; אך המגוון הצורני והתוואי המפותל הם אותם המופעים המושכים את העין, ובהם טמון ערכם הנופי של הנחלים. תחזוקת הנחל למטרות ניקוז, דורשת כיסוח של צמחיית הערוץ והגדות, כדי להקטין את ההתנגדות לזרימה. טיפוח ערכו הנופי של הנחל, ובתי הגידול לאורכו, דורשים

הפרויקט כחלק מהתכנון ולא כתוצאתו, מעודד התנסות ופתרונות יצירתיים, ומהווה דרך להמרצת פעולה ממשית. תכנון קהילתי מהווה מתכונת מועדפת בשיקום נחלים אורבניים, העוברים בסמוך או בתוך ישובים. במצב זה קיים קשר בלתי אמצעי בין התושבים והנחל, ולכן קיימת מוטיבציה לעסוק בשיקומו. בנחלים העוברים במרחב הכפרי, שיתוף ציבור החקלאים בשיקום עשוי למנוע חיכוכים והתנגדויות לפרויקט. במקרים אלו, ישלב השיקום בין מסורת התכנון המקצועית ובין רצונותיה ומטרותיה של האוכלוסייה המקומית.

12. מנהל וארגון

אופי הניהול של משאבי המים, משפיע על ישימות פעולות השיקום והשימור. שתי הסוגיות המרכזיות בנוגע לניהול נחלים הן: מידת הפיצול בניהול, והיררכית הניהול. ניהול משאבי המים מפוצל, במרבית המדינות, בין רשויות וגופים שונים. הנושאים הקשורים במים – ניהול הצפות, הגבלת זיהום, שימור בתי גידול ומשאבי נוף, שאיבה, הקצאת מים, ביוב, ניקוז ושימור ערכי טבע ונוף בנחל – מנוהלים כל אחד על ידי גוף נפרד. פיצול הסמכויות נתפס כמכשלה מרכזית בשיקום הנחלים (Boon et al., 1992). במדינות רבות, מתקיים כיום ניסיון לניהול אגני היקוות על ידי רשויות משולבות, בהן מעורבים נציגים מכל הגופים הרלוונטיים.

ניסיון של מדינות שונות בניהול ארצי-כולל של הנחלים, התגלה כמסורבל מנהלית ופוליטית. מכאן, המגמה למעבר לניהול מקומי או אזורי של נחלים. ניהול ברמה מקומית, הוא פועל יוצא של ההכרה בעובדה שהתנאים האקולוגיים והחברתיים הם מגוונים, כל נחל פועל במערכת אילוצים משלו, ולכן לא ניתן לנהל באופן אחיד ומשותף את כל נחלי המדינה. הגופים הלאומיים שומרים על סמכויות חקיקה, ועוסקים בייעוץ ותמיכה בגופים המקומיים, המתכננים ומיישמים את השיקום בפועל. תכניות ארציות לשיקום נחלים מקבלות, בדרך כלל, צורה של אסטרטגיה או מסגרת לפרויקטים מקומיים, ולא דווקא צורה של תכנית מרחבית במובנה המקובל של המילה.

מתוך הבנת ההשפעות הסביבתיות בין מדינות שונות, נוצרות כיום בעולם מסגרות בינלאומיות משותפות ללמידה הדדית, ייעוץ ותמיכה בשיקום

של "ניקוז ירוק": שימור הפיתולים וחתכי הנחל הטבעיים, שימור הקרקעית והצמחייה הטבעית ושימוש בחומרים טבעיים (צמחייה, אבן מקומית) לייצוב גדות. בטיפול בצמחייה בערוץ הנחל, יישקלו הפגיעה במערכות האקולוגיות הצפויה עם הסרתה, למול הנזק העלול להיגרם כתוצאה מהצפות. יש לשקול מחדש את אמצעי הניקוז שנקטו בתקופות קודמות, ולבדוק האם ניתן להסיר חלק מהם או להחליפם באמצעים "ירוקים".

מערכת ניקוז יעילה ונאותה, הינה תשתית בסיסית והכרחית לקיום חיים ופעילות תקינה, בעיר, ביישוב הכפרי ובשטחי החקלאות. קיום מערכת ניקוז תקינה תלוי לא רק ביישום פתרונות הנדסיים, שמחירם הנופי והאקולוגי בצדם, אלא גם בראייה רחבה הלוקחת בחשבון את האפשרות לצמצם מראש ולמנוע את הצורך באמצעי ניקוז מסיביים. תשתיות הניקוז שנבנו בשנות ה-50 וה-60, ניזוקו ושובשו, כתוצאה משינוי דרסטי בפני השטח - בניית ערים, כבישים, מתקנים ותשתיות, התורמים נגר רב, ואינם מתואמים עם קיבולת הניקוז. כמו כן נפגעה תשתית הניקוז במספר נחלים, כתוצאה משיטפונות שאירעו לאורך השנים. יש לערוך תהליך מקיף של שיקום תשתית הניקוז הלאומית, ולעדכן במסגרתו את תכניות האב לניקוז בכל אגני ההיקוות (פעולה המתבצעת כיום ונדרשת להתמדה והמשכיות), על יסוד התנאים והצרכים החדשים שנוצרו.

14. סיכום

במהלך המחצית השנייה של המאה העשרים, חל שינוי מקיף במגמות שיקום וניהול הנחלים בעולם. מוקד התכנון הוסט מתועלת חד-ממדית ופרטנית לפעילות שיקום ושימור רב-תחומית, ולמטרות אקולוגיות, נופיות, וחברתיות. השינוי במטרות גרר שינוי באמצעים. לא עוד שימוש בהנדסה קשיחה להגבלת הנחל, סיכורו והסדרת פיתוליו, אלא "תחזוקה ירוקה" של מובילי המים, שימור בתי הגידול, הצמחייה ובעלי החיים, והחזרה של מאפייני הנחל השונים למצב של טרם ההתערבות האנושית. חלק ניכר ממגמות אלו באו לידי ביטוי - אמנם באיחור - גם בישראל. בשנות ה-50 וה-60 היה מקובל בארץ לראות בנחלים מכשלה טכנית, ותכניות נחל התייחסו לניקוזו ומניעת הצפות לאורכו בלבד. כיום רואות מסגרות התכנון בישראל בנחל משאב נופי ואקולוגי. ההבנה שהוטמעה

דווקא את שימורה של צמחיית הגדות, המשמשת מסתור לבעלי חיים רבים. הקונפליקט מתבטא גם בתחזוקת נתיבי הניקוז: צרכי הניקוז של הנחל דורשים, לעתים, הסרה של צמחיית הגדות לצורך ייעול זרימת המים. שמירה על אפיק נקי, תוך הימנעות מפגיעה בצמחייה טבעית ושימור ערכים אקולוגיים גבוהים, מחייבת תשומת עבודה גבוהה. הרחקה של שימושים הרגישים לנזקי הצפה, ושמירה על פשט הצפה רחב ידיים, יאפשרו הסדרת הנחל באמצעים טבעיים ופשוטים יחסית. שיטפונות והצפות ייקלטו בפשט ההצפה, ולא יגרמו כל נזק. כך תישמר גם ריאה ירוקה בסביבת הנחל. מאידך, ככל שהבינוי, הפיתוח והתשתיות נמצאים בקרבה יתרה לנחל וברמת אינטנסיביות גבוהה, כן עולה הדרישה להגן עליהם מפני הצפות. בנושא זה תידרש התייחסות לזכויות מוקנות וקיימות בקרבת הנחל, ושאיפה להסדרת הזכויות בדרך של העתקה, פיצוי וכיוצא באלו.

"הניקוז הירוק" הינו כינוי לצורת הסדרה של הנחל, העונה על הפרמטרים ההנדסיים, תוך שימוש בחומרים ואמצעים בעלי מראה טבעי. מדובר בגישת תכנון רב-תחומית, המשלבת את הסדרת אפיק הנחל כעורך זרימה של מי הניקוז בפיתוח הנופית-ירורית של סביבת הנחל והנחל עצמו. למשל: מיתון וייצוב גדות בעזרת צמחייה מקומית מגוונת; תכנון מגוון של שיפועי גדות; ייצוב באבן ולא בבטון; תכנון נפתולי הנחל ושימור מרביתם. תכנון השם דגש על מורכבות מבנית, פיתולים בגדלים וחתכים שונים, חתך רוחבי ואורכי משתנה ושילוב בריכות ומפלים בנחלי איתן. באמצעים של ניקוז ירוק, ניתן להגיע לפשרה משביעת רצון בין דרישות הניקוז לבין ערכיו הטבעיים של הנחל. לשם כך נידרש שיתוף פעולה בין אדריכל נוף ובין מהנדס הניקוז לכל אורך שלבי התכנון.

אפשרות אחרת לקיום "ניקוז ירוק", היא צמצום הדרישה לאמצעי ניקוז הנדסיים, על ידי שימור שטחים פתוחים נרחבים בפשט ההצפה של הנחל, ותכנון הבינוי באגן ההיקוות מתוך מטרה לצמצם נגר עילי ולמנוע הצפות. גישה תכנונית זו אינה מתמקדת ביצירת פתרונות הנדסיים להעברת המים, תוך שיבוש מופע הנחלים, אלא במניעה של הצורך בפתרונות הנדסיים כאלו. לשם כך נדרשות תכניות מתאר לניקוז, שיקבעו את השימושים המותרים בקרבת הנחל. במידת האפשר יש לנקוט בטכניקות

בחומרת מצב הנחלים ובצורך בשיקום, החשיבות הגוברת להגנה וטיפול שטחים ירוקים זמינים לרווחת האוכלוסייה - כל אלה מהווים רקע ובסיס למסגרת התכנונית המוצעת. על פי תפיסה זו, הנחלים הם מרכיב חשוב במבנה המרחבי-הפיסי של הארץ, ומסייעים בתיחום גבולות הבינוי ועיצוב מערך השטחים הפתוחים. לנחלי הצפון והמדבר, נודע תפקיד בעיצוב תכנית הנוף ושמירה על ערכים אקולוגיים. לנחלי החוף, ולמרחבים החקלאיים הסובבים אותם, תפקיד מערכתי מהותי כאזורי חיץ, המפרידים בין המערכים האורבניים, וכריאות ירוקות לשימושי פנאי ורווחה. לנחלים האורבניים, העוברים בתוך הערים או בסמוך להן, שמורות פונקציות חברתיות ותדמיתיות, לשיפור איכות החיים העירוניים.

הטענה, כי המכשלה העיקרית נעוצה בגורמים המזהמים וכי אין טעם בפעולות שיקום טרם הפסקת הזיהום, מהווה מכשול לתהליכי השיקום. ההמתנה להסרת גורמי הזיהום, תמשיך לעכב את התהליך. אולם אם יחלו עבודות הפיתוח במקביל להסדרת זרימת הביוב, טיהור וניצול הנכון, ותוך כדי מאמץ לאכוף למניעת זיהום הנחלים - יהיה בכך כדי להעלות את רמת המודעות הציבורית להאצת הטיהור. פגיעה בנחל המהווה מרחב בעל ערך סביבתי, נופי וחברתי, תזכה לתהודה, ובעקבותיה - לתגובה ציבורית ולהפעלת לחץ של דעת קהל למניעת הישנות המפגע. מנגד, הזרמת השפכים בנתיבים סתמיים, לא תזכה ליחס ציבורי. במילים אחרות, לעצם הפעילות של תכנון, שיקום ופיתוח הנחל - גם במצבו הפגוע ובמקביל להפסקת מזהמים - יש ערך נכבד במניעת המפגעים ובתהליכי הטיהור והשיקום.

מראי מקומות

ברנדייס ע' (2001). ריכוז חומר בנוגע לשיקום הציבור בפרויקט שיקום נחל אלכסנדר. גפני, א'; בראור י' (1995). ניצול עורפי קולחים להחייאת הנחלים הראשיים בישראל - הצעה רעיונית.

לסטר, ר'; לבני, ד'; גרינברג, א' (2008). ניקוז, סחף קרקע ונחלים - המסגרת החוקית והמשפטית. בתוך: נחלים וניקוז - תהליכים, הנדסה ותכן (ע' א' בן-צבי). רשות ניקוז שקמה-בשור והמכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון,

בתודעה העולמית כבר בשנות ה-70, כי לא ניתן להמשיך ולנצל ביד גסה את הנחלים, לשאוב את מימיהם ולהחליפם במי ביוב ושפכים, וכי ראוי להקצות משאבים לשימורם ושיקומם - תופסת אט אט אחיזה גם בדעת הקהל בישראל.

תנאי הארץ, ומאפייני הנחלים בה, שונים באופן ניכר מהמקובל בעולם המערבי. השוני מתבטא בעיקר בקנה המידה - הנופים הפתוחים, האפיקים הרחבים ושפע המים אותם ניתן למצוא באירופה ובצפון אמריקה, לעומת ממדיה הקטנים של ישראל. נחלי הארץ צרים והזרימה בהם מועטה. תרמו לכך תנאיה הגיאומורפולוגיים של ישראל - נוכחות הבקע הסורי אפריקאי, אשר הביא להיווצרות קו פרשת מים בלבה של הארץ, ממנו מתפצלים נחלים קצרים, למזרח ולמערב, בעלי אגני היקוות מצומצמים בשטחם, וזרימה דלה. חסרונותיה אלו של ישראל, עשויים להוות יתרון מבחינה אחרת: אפשרות ניהול כולל של נחל שלם או אגן היקוות. הניסיון העולמי מוכיח כי לא ניתן לנהל באופן יעיל נהר או אגן היקוות שלם: הנהרות ארוכים ורחבים, ולעתים חוצים מספר מדינות; הפתרונות הרלוונטיים לאפיקו המרכזי של נהר או למעלהו, אינם תקפים ליובליו או למורדו; המערכת האדמיניסטרטיבית, הפוליטית והמשפטית, סבוכה מכדי שניתן יהיה להפעילה כגוף אחד. לעומת זאת, בנחלי ישראל קטני הממדים, ניתן לשקול את יישומה של גישת התכנון האגנית. גישה זו מקובלת כיום כנכונה אקולוגית, ובקנה המידה של נחלי הארץ היא עשויה להתברר אף כשיממה ויעילה.

שיקום הנחלים הוא תחום דינמי, הנמצא בתהליכי שינוי, למידה וצמיחה מתמידים. מימוש תכנית לשיקום נחל היא פעילות ממושכת, לעתים כדי עשרות שנים. בטווח זמן כזה, המגמות העולמיות, החומר המקרי הנצבר בתחום, השקפות העולם וסדר היום החברתי, עשויים לעבור שינוי ניכר. לפיכך, אין די בהכנת תכנית לנחל, גם לא ביישום פרקיה הראשוניים. ראוי לקיים תהליך רצוף של לימוד והתנסות, ונכונות לתיקון טעויות ולהפקת לקחים, תוך כדי מעשה השיקום.

השגת המטרה של שיקום הנחלים והשבתם לתפקוד סביבתי וחברתי, נראית היום אפשרית מאי פעם. צירוף של גורמים - עליית המודעות הציבורית לנושאי סביבה ואקולוגיה, ההכרה

- ותכנון.
 Boon, P.J.; Calow, P.; Petts, G.E. (eds.) (1992). **River Conservation & Management**. John Wiley & Sons.
 Brooks, A.; Shields, D. (eds.) (1996). **River Channel Restoration**. John Wiley & Sons.
 Eiseltova, M.; Biggs, J. (eds.) (1995). **Restoration of River Ecosystem - an Integrated Catchment Approach**. IWRB Publication 37, UK.
 Mersey Basin Campaign (1996). **Building a Healthier Economy Through a Cleaner Environment**. Mid term report, Mersey Basin Publications.
 Riley, A.L. (1998). **Restoring Streams in Cities - A Guide for Planners, Policymakers and Citizens**. Island Press, USA.
- 311-291.
 מרקוס מ' (1984). נחלי ישראל - הגדרות ומאפיינים. בתוך: נחלי ישראל. רשות שמורות הטבע.
 פרידלר, ע'; חואניקו, מ' (1996). הקצאת מים לשיקום נחלים נבחרים בישראל. המנהלה לשיקום נחלי ישראל.
 קאופשטיין, ע' (1996). שיקום נחלי ישראל - דו"ח מס' 1 למליאת המנהלת. המנהלה לשיקום נחלי ישראל, 25.4.1996.
 קפלן, מ' (2004). נחלי ישראל - מסמך מדיניות ועקרונות תכנון. המנהלה לשיקום נחלי ישראל, המשרד לאיכות הסביבה אגף מים ונחלים, קרן קיימת לישראל מנהל פיתוח הקרקע.
 שגיא, י' (1996). שיקום נחלי ישראל - דו"ח מצב לאוקטובר 1996 והמלצות להמשך פעילות. המנהלה לשיקום נחלי ישראל, ועדת היגוי

היבטים כלכליים של מפעלי ניקוז

סינייה נתניהו

ד"ר, תהל מהנדסים יועצים בע"מ.

1. מבוא

הצורך בפעולות ניקוז מתעורר, כאשר מופר האיזון בין כמויות הגשם והנגר לבין יכולתן של מערכות הניקוז הטבעיות לקלוטן. פעולות של שינוי יעוד הקרקע והתעצמות השימוש בקרקע כגון כריתת יערות, חקלאות אינטנסיבית, כריית מחצבים, סלילת כבישים, בנייה עירונית ותעשייתית ושאר פעילות אנושית בפשטי ההצפה של נחלים, יצרו מגוון בעיות ששיבשו את מערכות הניקוז הטבעיות כגון סחיפת קרקע, איטום וחסימת ערוצי זרימה טבעיים. כמויות גשמים גדולות היורדות בפרקי זמן קצרים, שנרשמות בשנים האחרונות והנקשרות לעתים לרעת מדענים לבעיית ההתחממות הגלובלית, גם הן יוצרות עומסים על מערכות הניקוז הטבעיות. הפרת שיווי המשקל הטבעי יוצרת שיטפונות גדולים בעלי היקף הצפה ועומק נרחבים, אשר מסבים נזקים כבדים לסביבה האקולוגית, לרכוש, לפעילות הכלכלית של המשק ולחיי אדם.

מפעלי ניקוז בישראל מוקמים ופועלים באמצעות רשות ניקוז, שהינה גוף סטטורי עצמאי. רשויות הניקוז פועלות מתוקף חוק הניקוז וההגנה מפני שיטפונות התשי"ח - 1957, שעל ביצועו ממונה שר החקלאות. עד לשנת 1996 פעלו בישראל 26 רשויות ניקוז ששטח פעולתן השתרע על פני כ-40% משטח המדינה. במקרים רבים, מספר רשויות ניקוז טיפלו באגן היקוות אחד. המפנה בהתייחסות לנושא הניקוז אירע לאחר השיטפונות וההצפות של חורף 1991/92 בהם נגרמו אסונות בחיי אדם, נזקים לרכוש והושבתו פעילויות כלכליות במשק.

ההתייחסות מבקרת המדינה לאי המוכנות לאירועי שיטפונות והזנחת נושא הניקוז בכלל הובא לפני הממשלה, וזו החליטה ב-1996 בעקבות תכנית אב שגובשה בנושא (תהל, 1995), על ארגון מנהלי מחודש של הניקוז בישראל. מאז ה-1/1/1997 פועלות בישראל 11 רשויות ניקוז

בפריסה ארצית מלאה: כנרת, ירדן דרומי, קישון, גליל מערבי, כרמל, שרון, ירקון, שורק-לכיש, שיקמה-בשור, ים המלח וערבה (צו הניקוז, 1996). ההגדרה המחודשת של הרשויות מתבססת על אגני היקוות הידרולוגים, כפי שהוגדרו בתכנית האב ועל ידי נציבות המים. שלושה קריטריונים הנחו את תכנית האב (תהל, 1995):

1. מניעת ריבוי רשויות באגן אחד.
2. הכללת כל שטח האגן בתחום האחריות של רשות הניקוז.
3. יצירת רשות בעלת גודל קריטי שיאפשר תפקוד עצמאי.

לרשויות הניקוז הואצלו סמכויות מתוקף חוק המים (באמצעות נציבות המים, המשרד לתשתיות לאומיות) בתחום שמירה על איכות המים והוצאת מזהמים מנחלים ומתוקף חוק רשויות נחל ומעיינות (באמצעות המשרד להגנת הסביבה), בתחום "שמירת מתנות הטבע" ופיתוח סביבת הנחל.

תפקידי רשות הניקוז הם "לדאוג לניקוז הסדיר של התחום שנקבע לה בצו המקום, ולשם כך להקים, לשנות ולהחזיק ולפתח מפעלי ניקוז באותו תחום; במילוי תפקידיה אלה תפעל רשות הניקוז גם למניעת מפגעי בריאות" (סעיף 12 לחוק).

ניקוז מוגדר על פי החוק: "כל פעולה שמטרתה לרכז, לאגור, להוביל או להרחיק מים עיליים או אחרים המזיקים או העלולים להזיק לחקלאות, לבריאות הציבור, לפיתוח הארץ או לקיום שירותים סדירים במדינה, לרבות ייבוש ביצות והגנה בפני שיטפונות ומניעתם, אך למעט טיפול במי בויב".

2. רשויות הניקוז בישראל

הפעולות העיקריות שמבצעות רשויות הניקוז בישראל הן (לפי רשות ניקוז ונחלים ירדן דרומי):

- ניהול, שליטה, בקרה ופיקוח על כלל מערכת הניקוז באגן ההיקוות.

מתואמות מול בעלי העניין הציבוריים, שמייצגים את הציבור בתחומים מגוונים, וגם הפרטיים.

3.1.1 גורמים ציבוריים: ממשלה, רשויות אזוריות ורשויות מקומיות

רשות המים: מערכת המים

מניעת נזקי שיטפונות, שמירת מפלסי מים תקינים, מניעת זיהום הנחלים ומקורות המים, חיסכון במים על ידי ויסות השהייה והחדרת מי שיטפונות לתת הקרקע.

משרד הפנים ומשרד החקלאות: פיתוח ואוכלוסייה
תכנון הניקוז ופיתוח הישובים, אזורי התעשייה והמסחר, הסדרת הפעילות החקלאית והעסקית, שימור קרקע, מניעת סחף והמלחת קרקעות, פיתוח אזורי לצורכי תרבות ופנאי, שיתוף פעולה עם הרשויות המוניציפאליות.

משרד התשתיות: גורמי תשתית

תכנון והסדרת תשתיות: כבישים, רכבות, נמלי תעופה, חשמל, מים ודלק, תשתיות פיתוח ועסקים, שיקום מחצבות.

המשרד להגנת הסביבה: טבע ואקולוגיה

שיקום נחלים ומניעת זיהום מקורות המים, הפיכת הנחל מחצר (אשפה) אחורית לחזית קדמית ושטחי ביקוש, תפעול בר קיימא לשמירת הטבע ופיתוח ירוק ומיועד של פארקים וגנים לאורך הנחל.

3.1.2 גורמים פרטיים

לבעלי העניין הפרטיים יש אינטרס בהסדרת הניקוז, הן מטעמי מניעת נזקים עקב שיטפונות והן בשל שיפור ברווחה בשגרה. ניתן להגדיר את קטגוריות האינטרסים של בעלי העניין הפרטיים כדלהלן:
רכוש פרטי - מניעת נזקי רכוש (בית, נכסים, רכבים וכו') בבעלות הפרט עקב שיטפון ועלייה בערך הנדל"ן בכלל באזור המוסדר, בגין השיפור הנופי והאסתטיקה.

פעילות כלכלית, מסחרית ותעשייתית - מניעת נזקי רכוש ונזקים כלכליים, כתוצאה מהשבתת פעילות כלכלית שוטפת בזמן שיטפון ובעקבותיו ופיתוח פעילות כלכלית-תיירותית לאזור המוסדר בשגרה.

חיי אדם - מניעת פגיעות ואבדן חיי אדם.

- תחזוקה, שיקום והסדרת נחלים, והגנה על נפש ורכוש מפני מפגעי שיטפונות.
- שיקום, חידוש ופיתוח מפעלי מים לתפיסת מי שיטפונות לשם שימוש חוזר.
- שימור וטיוב קרקע חקלאית למניעת סחף והורדת מליחות ומפלס מי תהום.
- פיקוח וטיפול להוצאת ומניעת מזהמים מהנחלים וממקווי המים.
- חינוך, לימוד הדרכה ופיתוח היכרות ומודעות לנחל, נופיו וסביבתו.
- פיתוח וטיפול בנחלים, מעיינות, פארקים, שבילים וחניונים כאתרים קולטי קהל.
- שיקום, שימור, שחזור ופיתוח אתרים ייחודיים במרחב, אתרי תיעוד והנצחה.
- תכנון והנחייה לשימור ערכי טבע ושימוש מוגבר בהנדסה ירוקה.
- שילוט להדרכה, הנחייה, לימוד והוראה לידיעת ורווחת המבקרים.

רשויות הניקוז בארץ ממומנות באמצעות תקציב המדינה לפעולות מיוחדות ובאמצעות גביית ארנונות ניקוז על המקרקעין באזור הניקוז. שיעור ארנונות הניקוז נקבע לפי שטח המקרקעין, סוגו, טיבו, ייעודו, דרך ניצולו, מידת התועלת של מפעל הניקוז בהשבתת המקרקעין, ומידת הצורך בהקמת מפעל הניקוז, החזקתו או שינויו על ידי המתקנים הממוקמים בשטח הניקוז.

3. בעלי העניין

3.1 זיהוי בעלי העניין

ניהול משולב של מערכת ניקוז, מנסה למצוא ולממש פתרונות למגוון אתגרים: סחף קרקע, מניעת הצפות, מניעת נזקים אקולוגיים ונזקי רכוש פרטיים וציבוריים, מניעת השבתת תשתיות כלכליות ומניעת אבדן חי אדם. רשויות הניקוז פועלות מול מספר גורמים ציבוריים ופרטיים: ממשלה, רשויות אזוריות, רשויות מקומיות, הציבור הביתי (הפרטי) ובעלי העסקים והמפעלים. יש לציין כי גורמים נוספים כמו: הרשויות המקומיות והאזוריות, רשות המים, קק"ל, רשות שמורות הטבע והגנים הלאומיים, מנהל מקרקעי ישראל, משרד הפנים וגופים אחרים, גם הם פועלים בנושא מתוקף תפקידם וסמכויות שהוענקו להם באותם תחומים. להלן נמנה בקצרה את האחריות והאינטרסים של הגורמים השונים בנושא הניקוז. פעולות הניקוז צריכות להיות

סחף והמלחת הקרקע, והגברת ההזדמנויות הכלכליות הנובעות מטיוב הקרקע.

- שיקום נופי - שיקום נחלים, הקמת פארקים, פינוי אשפה מאתרי פסולת בלתי מאושרים ושיקום מחצבות (תועלת גם למשק המים).

3.3 זיהוי קונפליקטים פוטנציאליים

גם כאשר מובחנות תועלות רבות, אנו נוכחים כי האינטרסים של הפרטים השונים והאינטרסים בין המוסדות וגורמי הממשלה לא תמיד דרים בכפיפה אחת. נבחין בקטגוריות הקונפליקטים הפוטנציאליים למימוש פעולות ניקוז בנות-קיימא, פעולות אשר כרוכות בשילוב של שימור סביבתי, צמיחה ויעילות כלכלית ושוויון וצדק חברתי.

כידוע, פיתוח בר קיימא דוגל בהצבת ובהגשמת שלוש מטרות בו בזמן:

1. שימור סביבתי.
 2. צמיחה ויעילות כלכלית.
 3. צדק חברתי, הזדמנות כלכלית ושוויון חברתי.
- בדרך למימוש המטרות הללו נוצרת תחרות ולפיכך נוצרים גם עימותים בתחומי המשאבים, הפיתוח והקניין (תרשים 1).

תחרות על המשאבים

תחרות על משאבי הטבע, נוצרת בין קידום ופיתוח הצמיחה והיעילות הכלכלית לבין קידום השימור הסביבתי. למשל, נוצרת תחרות בין הצרכנים ובעלי האינטרסים השונים של משאבי המים (נחל, חקלאות, בית ותעשייה), תחרות על משאבי הקרקע (ניצול וייעוד שטחים למטרות חקלאות, מגורים, עסקים, נופש, מטמנות, מחצבות וכו'). קידום מושכל של מפעלי ניקוז ישיב את משאבי המים והקרקע ויציב תנאי תחרות חדשים בעלי פוטנציאל כלכלי גבוה יותר.

תחרות על משאבים אזוריים, אינה מנותקת ממדיניות ניהול של המשאבים ברמה הלאומית. מים המוקצים לייעוד מסוים באזור ניקוז מסוים, אינם זמינים לשימושים אחרים באזורים אחרים ולכן יש השלכות כלכליות שיש לתת עליהן את הדעת.

תחרות על הפיתוח

תחרות על הפיתוח, נוצרת בין קידום הצדק והשוויון החברתי לבין השימור הסביבתי. למשל,

3.2 זיהוי התועלות

ניתן לחלק את התועלות הנגזרות מהסדרת אזור ניקוז, לתועלות המופקות מכך שנמנעים נזקים שמזוהים עם אירועי הצפה ולתועלות המופקות מעצם ההסדרה ללא קשר עם אירועי הצפה. התועלות הן פרטיות וציבוריות.

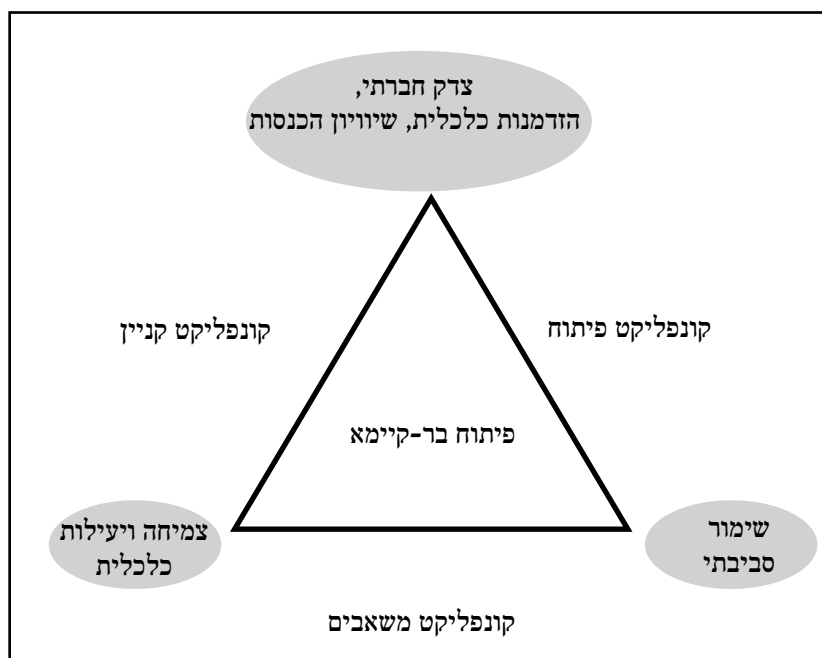
תועלות ממניעת נזקים עקב אירועי הצפה
תועלות המופקות מכך שנמנעים או מצומצמים נזקים המזוהים עם אירועי הצפה:

- מניעת מפגעים אקולוגיים: סחף קרקע, הרס וסכנת הכחדה של החי והצומח.
- מניעת אבדן תוצרת חקלאית.
- מניעת נזק לרכוש פרטי.
- מניעת נזק לרכוש ציבורי (מבנים ציבוריים, דרכי תעבורה, תשתיות אחרות).
- מניעת שיבושים בפעילות הכלכלית.
- מניעת אבדן הכנסות לפרט, למשק ולקופת המדינה.
- מניעת פגיעה ואבדן חיי אדם.

תועלות מעצם ההסדרה (ללא קשר עם אירועי הצפה)

תועלות המופקות מעצם ההסדרה של אזור הניקוז וללא קשר עם מניעת נזקים בגין אירועי הצפה, קשורות לערך הנדל"ן, לשיפור הנוף והאסתטיקה של האזור ולשימוש במשאבי הטבע בכלל:

- עלייה בערך הנדל"ן - האוכלוסייה המקומית נהנית מהסדרת אזור הניקוז ושיקום הנחלים, גם בשל תרומת הנוף והאסתטיקה לערך הנכסים וגם בשל עלייה ברמת החיים וברווחה, כתוצאה מהפיכת אזור המגורים לאזור בו מצוי אתר נופש וביילוי לשעות הפנאי עבור התושבים המקומיים. תוצאה נוספת - שיפור תדמיתי של הרשות המקומית.
- פיתוח כלכלי-תיירותי - פיתוח הנוף והאסתטיקה של האזור יוצר הגברת מגוון הפעילויות הכדאיות במקום כגון תיירות עבור תושבים מחוץ לאזור, ובכך נוצר מקור הכנסה הן לרשות המקומית והן מקור תעסוקה לתושבי המקום.
- שיפור איכות וכמות משאבי המים הלאומיים במערכות העליות והתת-קרקעיות.
- שיפור משאבי הקרקע הלאומיים על ידי מניעת



תרשים 1: מטרות וקונפליקטים בפיתוח בר-קיימא (Campbell, 1996)

נשכרים ממניעת הצפות ושיבוש אורח החיים והפעילות הכלכלית במשק. עם זאת, לגורמים השונים קיים אינטרס ברמות שונות. את רמת האינטרס אפשר לזהות לפי המוכנות לשלם עבור מניעת ההצפה ועבור השיפור הכלכלי, הנובע מעצם ההסדרה והעלייה בחזות הנופית. נזכיר כי התועלות הן בחלקן פרטיות ובחלקן ציבוריות. אם כך, זיהוי המשלם ומידת נכונותו לשלם וגובה התשלום, הם גורמים חשובים בהצדקת ובמימון פעולות הניקוז.

4. מסגרת החשיבה הכלכלית של ניהול אגני ניקוז

כיום, בתכנון וניהול משאבי טבע, מקובל לתת דגש על נושא פיתוח בר-קיימא. בהתבסס על הנאמר בפרק 2, תכנון וניהול בר-קיימא של אגני ניקוז הינם כאלה אשר תורמים לקידום ומימוש מטרות החברה בתחום הפיתוח הסביבתי, הצדק והשוויון החברתי והצמיחה הכלכלית, בהווה ובעתיד, תוך שימור השלמות האקולוגית, הסביבתית וההידרולוגית.

בעבר, בשל ההתבססות הכלכלית של משקים במדינות רבות בעולם על ענף החקלאות והקצאות השטחים לשם גידולים, ההקשר הראשוני של הניקוז היה באופן טבעי עם המגזר החקלאי. למשל,

הקצאת שטחים במתחם אחד באזור הניקוז לצורכי פיתוח פארקים בסביבת מגורים אמידה, על חשבון צמצום הקצאת שטחים לאותה מטרה בסביבת מגורים ענייה, יוצרת קונפליקט פיתוח של קרקע ציבורית שאינה מפותחת ומחולקת באופן שווה בין אוכלוסיות שונות, פעולה שמעצימה פערים.

תחרות על הקניין

תחרות על הקניין, נוצרת בין קידום הצדק והשוויון החברתי לבין הצמיחה והיעילות הכלכלית. למשל, המרת שטחים ציבוריים לטובת פעילות פרטית באגן הניקוז, מסבה נזק לרווחת הציבור בכך שהיא מצמצמת באופן מהותי את היקף האוכלוסייה הנהנית מהמשאב.

מכאן, שהקונפליקטים הפוטנציאליים יכולים לנבוע ממימוש מטרות לאומיות, מוניציפאליות ופרטיות מרובות, שלעתים באות זו על חשבון זו בשל מחסור במשאבים פיננסיים ובמשאבי טבע ואשר יש להן נגיעה ישירה באיכות החיים וברווחת התושבים באזור הניקוז.

3.4 זיהוי אינטרסים משותפים בין בעלי העניין

לציבור ככלל יש עניין בפעולות שממזערות נזקים ומגדילות תועלות. גם הממשלה וגם הפרט, יוצאים

לממן לבדו את הפעולות האלה. בנוסף, מפעלי ניקוז הם דוגמא למוצר ציבורי שמאופיין:

1. בקושי לגדרו ובכך לתחום ולהגביל את בעלי העניין משימוש בו ומההנאה ממנו.
 2. התועלת ממנו לגורם אחד אינה מפחיתה מיכולת האחרים ליהנות ולקבל תועלת מקיומו.
- מוצר מעין זה מסב לפרט תועלת שולית קטנה בהרבה יותר מסך התועלות השוליות שהציבור בכללו מפיק, ולפיכך ככזה נדרשת יוזמה ממשלתית (ישירה או באמצעות רשות או על ידי פיקוח על פרויקטי תכנון ביצוע והפעלה פרטיים), ויכולת לגבות מהפרטים הרבים את החזר עלות ההשקעה.

חשיבות נוספת למעורבות של מתכנן לאומי למוצר ציבורי היא, כאשר בעלי העניין יכולים ליהנות מפעולות ניקוז או להינזק מהיעדרן באופן בלתי שוויוני. במקרה זה מוטל על הממשלה לראות בטובת הכלל. למשל, במקרה שפעולות ניקוז המבוצעות במעלה הנחל יש בה בכדי להשפיע לרעה על האוכלוסייה במורד הנחל או כשפעולות ניקוז משפיעה באופנים שונים על גורמים שונים השוכנים בתחום האגן. במקרים כאלה יש לאתר את הבעיות ולפעול במתואם להשגת תועלות שוויוניות לכלל בעלי העניין.

הקמת מפעלי ניקוז כרוכה בהשקעות רבות, אשר מניבות תשואה פרטית ולאומית לאחר פרק זמן ארוך ואין זה מעשי לצפות כי ההשקעה צריכה להתבסס על יכולת התשלום של הפרטים בעלי העניין באגן הניקוז ולפיכך יש לאתר מקור מימון אחר.

מלמד (1960) מציע קריטריון נוסף לאמידת הכדאיות של פעולות ניקוז, והוא יחס עלות-תועלת המקובל בספרות הכלכלית. לשם כך, יש לכמת את עלויות הפרויקט והתועלות הישירות והעקיפות. בעוד כימות העלויות נגיש, בדרך כלל, כימות התועלות אינו בהכרח משימה קלה. פרקים 5 ו-6 יעמדו על נושאים אלו.

5. עלויות מפעלי ניקוז

5.1 עלות ההקמה והתחזוקה

עלות ההקמה של מפעלי ניקוז, כוללת בעיקר עלות הון. יש לכלול בה גם את העלות של בדיקות הידרולוגיות, גיאולוגיות, תשלומים משפטיים, עלות הקרקע, עלויות נוספות ועלויות בלתי צפויות

עבודה כלכלית בנושא מפעלי ניקוז בישראל שפורסמה לפני כיוכל שנים (מלמד, 1960), נותנת דגש רב לתועלת מפעולות ניקוז באזורי ניקוז באזורי התיישבות חקלאיים.

המטרה בדרך כלל הייתה מניעת הצפות, הגדלת החיסכון במים והורדת מפלס מי התהום בשטחי העיבוד (בעיה המזוהה עם מניעת המלחת הקרקע, פגיעה ביבולים וקושי בתפעול כלי עיבוד מכניים). התועלת המרבית שנצפתה, מקורה היה מהגדלת הייצור החקלאי. מלמד מציין שני קריטריונים לאמידת הכדאיות של פעולות ניקוז:

- א. יכולת החזרת ההוצאות על ידי הנהנים.
- ב. היחס בין התועלת לבין הוצאות מפעל הניקוז.

הקריטריון הראשון נדחה בטענה שהינו חלקי, משני טעמים:

1. סך התועלת השולית לפרטים (החקלאים) קטן מהתועלת השולית לציבור ככלל. לנהנים העיקריים, החקלאיים, ייקח זמן רב עד שיהיו מסוגלים להחזיר את ההוצאות ולפיכך נדרש מקור ציבורי למימון מפעל הניקוז.
2. הטלת הוצאות מפעל הניקוז על הנהנים השונים אינה מעשית, ויתרה מכך אין להשתמש ביכולת התשלום על ידי הפרטים כבסיס לקביעת כלכליות מפעל הניקוז.

בכך נוגע המאמר בכמה מושגים בסיסיים בניתוח ובהבנה כלכלית של כדאיות הקמת מפעל ניקוז. קיימות פעולות כלכליות אשר ההשלכות של ביצוען על ידי ישות כלכלית אחת, משפיעות על ישות כלכלית אחרת ובדרך כלל על יותר מישות אחת. ההשלכות הן לעתים חיוביות ולעתים שליליות. תופעה זו, spill-over effect, קשורה בהחלט בפעולות ניקוז. יתרה מכך, פעולות של ישות כלכלית אחת יכולות להסב נזק שעלות תיקונו נישאת לא רק על ידי הישות הגורמת לכך. תופעה זו ידועה כהחצנה שלילית. למשל, הטיית ניקוז משטח פרטי לשטח ציבורי, מסבה נזק לכלל הציבור ותיקון הנזק ממומן ממשאבי כלל הציבור. תיתכן כמובן גם החצנה חיובית, כאשר פעולות חיוביות ממומנות על ידי הפרט ורבים אחרים נהנים מהן.

ביצוע ותחזוק (או היעדרם) מפעלי ניקוז, הינן פעולות שיש בהן כדי להשפיע על מספר גורמים נהנים. בדרך כלל אין ביכולתו של אף גורם אחד

6. תועלות ממפעלי ניקוז

בפרק זה נסקור את מגוון התועלות מהקמת ותחזוקת מפעלי ניקוז, וכן את השיטות המקובלות בספרות של כלכלה סביבתית להערכת התועלות.

6.1 תועלות מהקמת ותחזוקת מפעלי ניקוז

ניהול בר-קיימא של מפעלי ניקוז, יוצר רצף תועלות החל בשינוי התכונות הפיסיקליות-כימיות של המים המתועלים לנחלים, לתגובות ביולוגיות-אקולוגיות של סביבת המים בכלל, שיפור באיכות המים העיליים והתחתיים ועלייה בכמותם במקרה של איגום או החדרה, מניעת הצפות ונזק לאדם ולרכוש, מניעת הטלת עומסים על מט"שים בזמן שיטפונות, והעלאת הערך הכלכלי המוסף של פשט ההצפה של הנחל, בכך שיתאפשרו מגוון פעילויות כלכליות נוספות.

נחלק את התועלות ממפעלי ניקוז לארבע קטגוריות ראשיות:

1. הפחתת עומסי מזהמים.
2. השפעה ישירה על האקולוגיה בסביבת המים הטבעית ועל ההידרולוגיה.
3. תועלות כלכליות ממניעת נזקי רכוש, הגברת הפעילות הכלכלית של המשק, בריאות הציבור ואסתטיקה.
4. ערך כלכלי מוסף בפשט ההצפה של הנחל.

6.1.1 תועלת מהפחתת עומסי מזהמים

פעולות אפקטיביות בניהול בר-קיימא של אגני ניקוז, מאופיינות על ידי מניעת מזהמים ופסולת מוצקה אחרת מלהגיע לנחלים ולמקורות מים. כאמור, רמת התועלת משתנה בהתאם לסוג פעולת המנע המיושמת. ניתן לתמוך בפעולות הסדרת הניקוז, על ידי פעולות מועילות נוספות, כגון: ניקיון האגן מפסולת מוצקה, שינוי יעוד/שימוש בקרקע על מנת למנוע סחף, חינוך והסברה, ומניעת הטיית ביוב לנחלים. פעילויות שונות באגן (מפעלי תעשייה, מגורים, כבישים מחצבות וכו'), מייצרות מזהמים ויש להתאים את פעילות ההסדרה לפי סוג המזהם שאת הגעתו מבקשים למנוע (כגון: מוצקים, חומרים צורכי חמצן, פתוגניים, זרחן, ניטרוגנים, דלקים, מתכות, חומרים אורגנים סינטטיים, pH וטמפרטורה).

אחרות. העלויות של הקמת מפעל הניקוז, תלויות בתנאי אגן הניקוז. השיטות וההתייחסות המגוונות, תורמות לשונות הגבוהה של העלויות בין פרויקט לפרויקט, בתוך האגן ובין אגני ניקוז שונים.

קיימת גם שונות גדולה בערך הקרקע בין אגני הניקוז. בנוסף, באגני הניקוז קיימת שונות גבוהה ברמת ההקצאה של שטחים פתוחים זמינים לניקוז והקמת פארקים. במקרים שכבר מצויים שטחים פתוחים רבים, העלות האלטרנטיבית האפקטיבית של הקרקע נמוכה, בדרך כלל.

בנוסף, יש לקחת בחשבון אפשרות של תופעות אקלימיות חריגות. אירועי גשם גדולים מאלה ששימשו לקביעת ספיקות התכן או בלתי צפויים בחריגותם מהשכיח עלולים לגרום לקריסת מערכות הניקוז. לאור אי ודאות זו יש לשקול את היקף ההשקעה. אמינות מפעלי הניקוז נגזרת, לא אחת, מהיקפי ההשקעה בטכנולוגיות ובמתקני הניקוז. ככל שההשקעה וגמישות קליטת המערכת בתכנון יגדלו בשלב ההקמה והתפעול, תעלה גם רמת האמינות של המערכת. לשם מציאת גובה ההשקעה האופטימלי, נדרשים ניתוחי עלות-תועלת לכל מפעל ניקוז.

לבסוף, נציין כי גם לעלויות התפעול והתחזוקה שונות גבוהה בין אגני הניקוז. הן מתחלקות לעלויות תחזוקה ותפעול שגרתיות ולעלויות תחזוקה למטרות אסתטיקה והפחתת מטרדים (למשל ריח).

5.2 עלות שאינה כרוכה באופן ישיר בהקמת מפעל הניקוז

קיימות עלויות נוספות הכרוכות בניהול אגן הניקוז, שאינן קשורות ישירות בהקמת תשתית ניקוז ספציפית באגן והן קשורות בפעולות למניעת זיהום המים העיליים ומי התהום, באמצעות מניעת הזיהום במקור הזיהום (למשל במפעלים) ובכך מונעות את הצורך בטיפול במי הניקוז לאחר שהזדהמו. פעולות אלו כוללות פעולות ספציפיות באגן ובאזור, כמו למשל ניקוי פסולת שעלולה להיסחף עם מי נגר ולשבש את מערכות הניקוז, זיהוי ומניעת הטיית ביוב לנחלים, חינוך והסברה לציבור, שינויים בשימושי קרקע ומניעת הצמצום בשטחים בלתי חדירים, איסוף אשפה רעילה, שיקום מחצבות ואחסון מוסדר של חומרים מסוכנים.

ידי בני אדם; והאחר, במקרה שהמים משמשים לשתייה, רחצה ופעילות נופש. לפיכך מניעת עול בריאותי כפול זה מהווה תועלת ישירה לציבור.

תועלות ממניעת נזק לרכוש פרטי, לרכוש ציבורי, לפעילות הכלכלית של המשק לאסטיקה ולשימור

ההשפעה של הסדרת אגני ניקוז, משתנה מאתר לאתר לפי ערך הבנייה הפרטית והציבורית ומבנה הנוף ואסתטיקת המרחב, העלולים להיפגע במקרה של שיטפונות. באגנים בלתי מוסדרים ובהיעדר תשתיות ניקוז טבעיות ויזומות, עלולים להיגרם נזקי רכוש רבים בגלל שיטפונות. ניתן לאמוד את התועלת ממניעת הנזק ברכוש, על פי מידת מוכנות התושבים לשלם עבור נכס שממוקם בסביבה שבוצעה בה הסדרת אגן הניקוז. למשל, במחקר שבוצע באילינוי, ארה"ב, ופורסם לפני כעשור, נמצא כי דיירים מוכנים לשלם עבור נכס שממוקם באזור בו נבנה אגם ניקוז וחלחול ראוי, מחיר בהיקף של 5% עד 25% יותר מאשר עבור נכס שממוקם על יד מתקן ניקוז לקוי בתכנונו או באתר ללא מתקן ניקוז. התועלת הנגזרת מבניית אגם ניקוז גדולה, ונובעת לא רק מאיגום המים וממניעת נזקי רכוש אלא גם מהתועלת האסתטית-נופית שהאגם מוסיף לאזור המגורים, בקיזוז העלות הנתפסת על ידי הציבור, אשר נובעת מסכנת טביעת ילדים במאגר כזה.

דוגמא למוכנות הציבור לשלם עבור טיפול מי נגר ושיפור אסתטי, הוא ניסוי שנעשה באוסטרליה. עם ההתפתחות העירונית באוסטרליה, גדלים והולכים העניין והתמיכה בתכניות לניהול משאבי מים עירוניים. פילוסופיית ה- WSUD (Water Sensitive Urban Design), גורסת ניהול משולב של משאבי קרקע ומים. אחד העקרונות של תורה זו, הוא ניהול מקומי של מי נגר עירוניים (Management at-source), על מנת להקטין עלויות ונזקים של זרימה עירונית וזיהום משאבי מים אחרים (Lloyd, 2004).

Lloyd (2004) מדווח כי נבדקו ההיבטים הכמותיים-טכנולוגיים, הכלכליים והחברתיים של החלפת נקזי בטון תת-קרקעיים במערכת ביו-פילטרציה (תעלות עם צמחים ירוקים וניקוז תת קרקעי) ברחובות העיר. נמצא כי מערכות ביו-פילטרציה כאלה, מקטינות את נפח הזרימה

6.1.2 תועלות אקולוגיות והידרולוגיות

אגני ניקוז שלא נעשות בהם פעולות הסדרה (למשל ניקוי ופתיחת ערוצי נחל) ופעולות תומכות אחרות (כגון ניקוי פסולת באגן), צפויים בזמן שגרה ובעת שיטפונות להידרדר אקולוגית. בנוסף, שיטפונות בעלי עוצמה גבוהה, גורמים להתרחבות נחלים ולפגיעה בזנים שחיים בסביבת המים הטבעית, עד להכחדתם ולהיעלמותם מסביבת המים. באגני ניקוז רבים נסתמו עם השנים ערוצי הנחל, על ידי סחף קרקע ועל ידי הטלת פסולת מוצקה באופן בלתי חוקי. באזורים עירוניים, פחות ופחות מי נגר חודרים לתהום בשל איטום הקרקע ולפיכך יותר ויותר כמויות נשטפות ומבוזבזות. הבנייה המואצת של כבישים, מבנים וכדומה, חוסמת את שטחי ההחדרה הטבעיים ומפחיתה מפותנציאל המילוי הטבעי של האקוויפרים ובכך מחייבת להסדיר תשתיות ניקוז טבעיות ו/או לבנות תשתיות חלופיות לקליטת מי הנגר. בעשורים האחרונים נעשות פעולות לעידוד בנייה משמרת מים וליצירת כושר החדרה בשטחים בנויים (ראה למשל, ה"מדריך לתכנון ובנייה משמרת נגר עילי" בהוצאת משרד הבינוי והשיכון, משרד החקלאות ופתוח הכפר והמשרד לאיכות הסביבה 2004 ותמ"א 34 ב'4 - תוכנית מתאר ארצית משולבת למשק המים: איגום מים עיליים, החדרה, העשרה והגנה על מי-תהום, אפריל 2006).

מבחינה הידרולוגית, המים הם משאב לאומי והסדרת מפעלי ניקוז באגנים השונים, עשויה להביא גם לעלייה בכמויות המים המעשירים אקוויפרים ולהקלה בקיום המחויבות הלאומית בהקצאת מים לסביבה, כחלק מנתח המאזן ההידרולוגי.

6.1.3 תועלות כלכליות ממניעת נזקי רכוש, בריאות הציבור ואסטיקה

תועלות כלכליות נוספות שנגזרות מהסדרת אגני ניקוז, נמצאות בנושאים כגון: בריאות הציבור, מניעת נזקי רכוש, הפעילות הכלכלית של המשק, האסטיקה והשימור.

תועלות בבריאות הציבור

סחף ומזהמים הנישאים במי הנגר יכולים להוות עול בריאותי בשני אופנים. האחר, במקרה שהמים שמגיעים לנחלים ומזיקים לדגה הנצרכת על

שהוא מקצה למוצרים ולשירותים. המוכנות להחליף בין המוצרים והשירותים, נמדדת על ידי המוכנות לשלם (Willingness to Pay) עבור המוצר או השירות או על ידי המוכנות לקבל פיצוי (Willingness to Accept Compensation) עבור גריעה מרמת המוצר או השירות. ערכים אלו מבוטאים בכסף. במקרה של שיפורים באגני ניקוז, המוכנות לשלם הינה הסכום המקסימאלי שהפרט מוכן לשלם באופן וולונטרי, על מנת לקבל שיפור (או להימנע מגריעה) באיכות החיים. המוכנות לקבל פיצוי היא הסכום המינימאלי שהפרט מוכן לקבל, על מנת לוותר על השיפור (או לספוג גריעה). השיטה מיושמת באמצעות ניתוח נתונים הנאספים בסקר דעת קהל, בו הפרט מתבקש לענות על שאלות בנושא הרלוונטי. בדרך כלל, במועד הסקר חשוף הציבור לשיטפונות פוטנציאלים, ולפיכך יש בסיס להניח כי מאחר ואין התחייבות לשלם בפועל, ידווח הנשאל על רמת מוכנות לתשלום גבוהה יותר מאשר לו היה נדרש לשלם בפועל.

עלות מניעת הנזק

בשיטת זו, מכמתים את ערך הפעולות הנדרשות למניעת הנזק בבריאות, באבדן הפעילות הכלכלית, ברכוש ובנכסים פרטיים וציבוריים. למשל, עלות מניעת הנזק כתוצאה משיטפונות, יכולה להימדד על ידי חישוב עלות הוספת ותחזוק מערכת הניקוז הביתית והטייתה אל מחוץ לשטח הפרטי.

עלות תיקון הנזק

בשיטה זו, מעריכים את העלות של תיקון הנזק, כך שיוחזר המצב הראשוני לקדמותו. במקרה של נזק בריאותי של התפרצות מחלה זמנית, מדובר בעלות החלמה הכרוכה בעלות התרופות, אשפוז (אם נדרש) וימי עבודה שאבדו. במקרים של מחלות מתהוות בעלות פוטנציאל לגרימת סרטן (הצטברות של חומרים מסוכנים באגן הניקוז), תיקון הנזק לא תמיד אפשרי וכימות והערכת חיי אדם הינו נושא שנוי במחלוקת ועומד על 2 - 10 מיליון דולר לאדם. תיקון נזק לרכוש, שנגרם עקב שיטפונות, משתנה בין בית-אב למשנהו ואת היקפו ניתן להעריך לפי אומדנים שמצויים בחברות ביטוח שונות.

ואת ספיקת השיא באירועי גשם אופייניים, ולכן מקטינות את ההשפעה ההידרולוגית המזיקה של שיטפונות עירוניים. כמו כן, גורמות מערכות אלה להקטנה משמעותית ברמת זיהום מי הנגר. עלות התקנת המערכת נמוכה מעלות התקנת נקזי בטון קונבנציונליים. עלות הטיפול במים ירדה ב-25%. הצרכנים הביתיים תומכים באופן ברור בהתקנת מערכות ביו-פילטריציה בשכונות מגורים, עד כדי עליה ב-50% בנכונות לשלם עבור עלות התחזוקה השוטפת.

ההסדרה והניקוי מקטינים גם את הנזקים למתקני טיפול בשפכים. בזמן שיטפונות, עלולים מי נגר רבים להגיע למערכות הביוב ולמתקני הטיפול בשפכים ולגרום לקריסתם. כמו כן, נגזרות תועלות ממניעת השבתת צירי תחבורה, מוסדות עסקיים ומפעלים, ואחרים עקב שיטפונות, דבר שתורם לכלכלה הלאומית.

6.1.4 ערך כלכלי מוסף בפשט ההצפה של הנחל

מלבד התועלות הנגזרות ממניעת נזקי הצפה, להקמת מפעלי ניקוז ערך מוסף של השבתת הקרקע באזור פשט ההצפה של הנחל. אזור זה אטרקטיבי ובעל ערך תיירותי-כלכלי מובהק וההסדרה לאורכו מגבירה את ההזדמנויות הכלכליות שיכולות להיעשות בתחומו. דוגמא לניתוח התועלת הכלכלית שעשויה לנבוע משיקום ופיתוח של נחל ראה מאמרו של חקלאי (2003) בהתייחסות לנחל הבשור.

6.2 שיטות מקובלות להערכת תועלות

קיימות מגוון שיטות לכימות התועלות המתקבלות ממשאב סביבתי. הקושי הבסיסי בכימות תועלות מסוג זה, נובע מהיות המוצר ציבורי שאינו סחיר.

השיטה הישירה; המוכנות לשלם (Willingness to Pay)

(Pay)

בשיטה זו, ניתן לבחון את המוכנות לשלם עבור הקמת מתקן ניקוז על ידי הישות אשר תיהנה מתועלת המערכת. הגישה המקובלת להערכת תועלת, הינה מדידת שביעות רצון הפרט וידועה כמדד לרווחת הפרט. התיאוריה הכלכלית מניחה, כי הפרט יכול לשמר אותה רמת רווחה על ידי החלפה בין מוצרים, שירותים וכסף. ההחלפות (trade-off) שהפרט עושה, חושפות מידע על הערך

לפרט, ומבלי להיות אחראית לפיצוי.

Lachman, שקושר את חבות הרשויות המקומיות לנשיאתן בנטל פיתוח תשתיות הקשורות בניקוזים ובהצפות, מסביר כי בארה"ב מאפשר החוק לעתים חסינות הרשות מפני תביעות משפטיות בנושא הצפות. באזורי שיפוט אחרים, מטופלת חבות הרשות בנושא הצפות כהרחבה של חבות הצפה פרטית, הטוענת לזכות של בעל קרקע לשחרר מים מנכסו לנכס של בעל קרקע אחר. מדינות מעטות בארה"ב פיתחו חוק בנושא חבות הרשות להצפות. לטענתו, יהיה זה בניגוד לאינטרס הציבורי, להעניק לרשויות המקומיות חיסיון מפני החבות לנשיאה בנטל הכספי של נזקים שנוצרים בגין הצפות, כאשר הרשויות תורמות להצפות על ידי מתן רישיונות למבנים ולמתקני ניקוז בלתי ראויים.

לסיכום, הענקת חיסיון לרשויות המקומיות, מנוגד לאינטרס הציבורי בשל שלוש סיבות:

1. פיתוח והתרחבות העיר לצורכי מגורים ותעשייה, מפחיתים משטח הקרקע הזמין לקליטת מים, וכתוצאה מכך זורמים עודפי מים רבים באירועי גשם סוער.
2. תחת צפי של תרחישי התחממות גלובלית, אירועי סערות צפויים להיות קשים יותר וליצור סיכון הצפות גדול יותר.
3. הטלת חבות במקום מדיניות פזרנית במתן אישורי בנייה, תשמש תמריץ לעידוד בנייה צפופה ומרוכזת, ולכן תעודד שימור משאבים והשארת שטחים פתוחים וצמצום נתיבי התחבורה. צמצום התחבורה יפחית גם את יצירת גזי חממה ואירועי התחממות גלובלית.

עוד טוען Lachman, כי חוסר משאבים כספיים זמינים, הרצון לנצל שטחי קרקע עירוניים בעלי ערך כלכלי גבוה לטובת מגורים ומסחר והסיבות המוזכרות לעיל, מדגישים את הצורך ביצירת מחויבות של הרשויות לטפל בנושא מי נגר. נקודת מבט זו על הבעיה, מהווה תמריץ לרשות לפעול להסדרת נושא הנגר העילי, על מנת להימנע מהצורך לפצות על נזקים. האחריות של הרשות לתכנון עירוני תקין, מחייבת אותה להתאים את התכנון לתנאי הסביבה העירונית המשתנה, ובכך מקטינה את הנטל על כלל האוכלוסייה. המחבר מציין, כי מאחר והגבולות הפוליטיים של העיר אינם חופפים בהכרח את גבולות אגן ההיקוות, יש

התנהגות מניעתית - (Averting Behavior)

בשיטה זו, נצפית ההתנהגות בפועל של בתי האב, במטרה לבחון את הפעולות הנעשות על מנת להימנע מהנזק הצפוי בזמן שיטפונות. פעולות מניעתיות כוללות שיפור הניקוז הביתי, שינוי בגובה הקרקע וכדומה. בחינת פעולות המניעה וכימותן, מאפשרת הערכת התועלת שיש ליחיד ממניעת נזקי שיטפונות. למשל, ניתן היה לבחון את השינוי בהתנהגות התושבים אחרי אירוע שיטפון ולברוק אלו פעולות נקטו בתי האב ובאיזה היקף. יש לכמת את עלות הפעולות המניעתיות ולעקוב אחר אורך התקופה בה שונתה ההתנהגות (מימים ספורים עד לתמיד). כימות הפעולות שננקטו והשינוי ההתנהגותי, יכולים לרמז על ערך הצרכן לגבי פעולות באגן הניקוז בכלל.

כשלים של השיטה נובעים מאי-הוודאות הקיימת בהתייחס לשאלה, אם הנשאל אכן מבין את הקשר בין כמות המים, מצב התשתיות והנזקים והאם הוא אכן מסוגל לכמת את סך התועלות מפעולותיו, כמו למשל, להעריך את תכולת הבית, ימי עבודה שיפסיד בגין נזק לרכושו וכו'. הגישה מספקת לפיכך, גבול מוניטרי תחתון או גבול מוניטרי עליון של המוכנות לשלם (תלוי בנושא ובשאלות).

7. היבטים כלכליים נוספים

בפרק זה נסקור שלושה היבטים חשובים נוספים בתחום מפעלי ניקוז: חבות הנטל, מימון ציבורי ותקצוב רשות הניקוז.

חבות הנטל על הרשויות

חבות הנטל והאחריות של הרשויות בנושא מניעת הצפות והסדרת הניקוזים, נסקרת למשל על ידי Lachman (2001). ההתפתחות העירונית המודרנית מגדילה את שטח הקרקע האטום (על ידי בניינים, דרכים סלולות וכיוצא בזה), ביחס לגודל האוכלוסייה. מצב זה מקטין את מידת החדור של מי גשמים לקרקע, ומגדיל את נפח הנגר העילי. מבחינת החוק האמריקאי, ניתן להתייחס להצפות משטחים עירוניים לשטחים פרטיים כאל חדירה לתחום הפרט. כלומר, אסור לרשות לגרום להפניית מי נגר לתוך שטח פרטי (אם על ידי בנייה לא נכונה ואם על ידי תכנון לקוי של מערכות ניקוז) בצורה אשר עלולה לגרום נזק

מקום לבחון יצירת תיאומים בין רשויות במקומות הרלוונטיים.

מימון ציבורי

הסוכנות האמריקאית להגנת הסביבה (EPA, 1995), דירגה את הנגר העירוני ומערכות איסוף מי הגשמים, כאחד הגורמים הראשונים בשכירותם לזיהום מקורות מים. עלות הטיפול בנזקי זיהום הנובע ממי נגר עירוניים (הוצאות ממשלה, חולי, פגיעה בכלכלה), נאמדת במאות מיליוני דולרים לשנה. הנזק הסביבתי מוערך אף הוא בסכום דומה. בשונה ממקורות זיהום נקודתיים, כמו זיהום תעשייתי, זיהום מי הנגר הינו נרחב ונובע מפעילות יומיומית המותירה מזהמים רבים על פני השטח (נסיעת מכוניות, השלכת אשפה, צואת בעלי חיים, וכדומה). תוספת מזהמים למי הנגר מגיעה גם מאתרי בנייה, מפעלי אנרגיה, זליגה ממערכות ביוב וסניטציה, שימוש בחומרי דישון והדברה, חלקיקי מתכות, שמנים ועוד.

מכיוון שנושא הטיפול בזיהום הנובע ממי נגר עירוניים אינו נחשב לאטרקטיבי בתודעה הציבורית והפוליטית, הרשויות נתקלות בקושי רב לגייס כספים בשיטות המקובלות. מסיבה זו נעשים מאמצים לפתח דרכי מימון אלטרנטיביות: היטלי פיקוח והרשאות, הטלת חלק מהמימון על חברות העוסקות בפיתוח הקרקע, הטלת מיסים גבוהים על פרויקטים חדשים, פיתוח גופים אוזריים לניהול מי הנגר והקמת רשויות ציבוריות. כמובן שבאגני ניקוז יש להתייחס לא רק לנגר העירוני, אך דוגמא זו מהווה אינדיקציה להתייחסות לנושא ספציפי זה בארה"ב.

בישראל, החליטה הממשלה על הפסקת העברת תקציבי מדינה לרשויות הניקוז (החלטת ממשלה מס' 2307 מיום ה-30/7/2002). בהמשך, החליטה הממשלה (החלטה מס' 1769 מיום ה-13/4/2004) לאשר תקציב של 50 מלש"ח לרשויות הניקוז עבור פעולות של הסדרת נחלים בתחומן.

קיום רשויות לניהול מי נגר באמצעות דמי משתמש

מאחר ובמשך שנים התקציב לניהול מערכות הניקוז והשיטפונות לא היה ייעודי, לא טופלו נושאי הזיהום, הסחף והשיטפונות באופן המיטבי. קיים כמובן צורך בתקציבים ובגביית העלויות. למשל, בתחום מי הנגר, נציין כי בעשור האחרון

קמו בארה"ב יותר מ-500 רשויות מי נגר אשר ממומנות באמצעות גביית דמי משתמש במי נגר (Storm water user fee). דמי המשתמש מחושבים על בסיס שטח הנכס או על בסיס השטח הבלתי חדיר של הנכס, ובאמצעותו נמדדת האחרייות היחסית של בעל הנכס על מי השיטפונות הניגרים. התשלום נגבה בצמוד לתשלום הארנונה של בעל הנכס ובכך משקף את העלות והתועלת המשותפת לנכס הספציפי.

8. סיכום

התועלות הכלכליות המושגות מהסדרת אגני ניקוז, נובעות משיפור נופי והשלכותיו וכן ממניעת נזקים עקב שיטפונות:

- שיפור האגן ברמה הנופית והאסתטית כתרומה לשיפור הדימוי.
- עליה בערך הנדל"ן של קרקעות האגן, בזכות השיפור הנופי ופיתוח הגישה לפארקים ונחלים מסודרים.
- פיתוח ענף כלכלי של תיירות אזורית בתחום האגן המוסדר.
- פיתוח משאבי המים הלאומיים.
- עלייה בתפוקה החקלאית.
- השבחת השימוש בקרקע לצורך שימושים בעלי ערך כלכלי גבוה.
- עלייה ברמת החיים כתוצאה ממניעת אבדן חיי אדם, מניעת נזק לרכוש פרטי וציבורי ומניעת שיבוש הפעילות הכלכלית בזמן שיטפונות והצפות.

מראי מקומות

החלטות ממשלה: מס' 2307 מ-30/7/2002, מס' 1769 מ-13/4/2004.

חוק הניקוז וההגנה מפני שיטפונות, התשי"ח, 1957.

חקלאי, ר' (2003). תוכנית אב לשיקום ופיתוח נחל הבשור, כרך ב' פרק 10. המנהלה לשיקום ופיתוח נחל הבשור: 331-354.

מלמד, א' (1960). כלכליות מפעלי ניקוז בישראל. תהל.

צו הניקוז וההגנה מפני שיטפונות (הקמת רשויות ניקוז), התש"ך, 1960, עדכון אחרון 14/11/1996.

רשות ניקוז ירדן דרומי - אתר האינטרנט.

- be liable for development-related flooding? **Natural Resources Journal**, The University of New Mexico School of Law, **41** (3-4): 945-980.
- Lloyd, S.D. (2004). **Quantifying environmental benefits, economic outcomes and community support for water sensitive urban design**. Monash University, Melbourne, Victoria, Australia.
- תהל, (1995). תוכנית אב להגנה מפני שיטפונות ולניצול נגר עילי. בוצע עבור נציבות המים.
- Campbell, S. (1996). Green Cities, Growing Cities, Just Cities? Urban Planning and the Contradictions of Sustainable Development. **J. American Planning Association**: 296-312.
- EPA. (1995). **Economic Benefits of Runoff Controls**. Report.
- Lachman, S.F. (2001). Should municipalities

ניקוז, סחף קרקע ונחלים: המסגרת המשפטית והמנהלית

ראובן לסטר¹; דני לבני²; אריאלה גרינברג³

¹ פרופ' לדיני סביבה בפקולטה למשפטים, המחלקה לגיאוגרפיה והמכון לחקר כדור הארץ, האוניברסיטה העברית בירושלים; שותף בכיר במשרד לסטר את גולדמן;
² עו"ד, משרד לסטר את גולדמן, ירושלים, מתמחה בדיני סביבה ובעיקר בבעיות חוצי גבולות;
³ סיימה תואר במשפטים ובמדעי הסביבה באוניברסיטה העברית, מתמחה במשרדו של ד"ר יובל לוי.

1. פתח דבר

נושאי מים נחקרו רבות בארץ, אולם נושאי ניקוז, נגר עילי, והקשר בין מים עיליים לבין שימושי קרקע, לא זכו לתהודה אקדמית ראויה. מאמר זה מתאר את המערכת התחיקתית, אשר משמשת מסגרת לטיפול בנגר עילי, נחלים, ואדיות ואגמים. כן מתוארת המערכת המנהלית, שהוקמה על בסיס המסגרת המשפטית, כדי לאכוף מדיניות ממשלתית לניהול מערכות ניקוז, לרווחת תושבי המדינה. המאמר סוקר בקצרה פסקי דין תקדימיים בנושאי ניקוז, סחף קרקע ושיטפונות. התיאור המשפטי-מנהלי-שיפוטי, נותן תמונת מצב על דרכי ניהול מים עיליים, נגר עילי ומערכות הניקוז בארץ, טרם קום המדינה ועד היום.

בימי המנדט הבריטי בארץ, הושם דגש על מניעת סחף קרקע וחול, ומסורת זו ממשיכה עד היום. בישראל פרושה רשת רשויות ניקוז, אשר פועלות למזער נזקי שיטפונות וסחף קרקע, בעידוד וגיבוי אגף הניקוז במשרד החקלאות. רשת זו נשענה בתחילה על המועצות האזוריות, אשר ראו בסחף קרקע נזק לגידולים חקלאיים. כיום, עם גידול השטח העירוני והקטנת שטחי הגידולים, רשויות הניקוז למדו להכיר בצדדים האקולוגיים ובצורכי הנופש של עורקי ניקוז ונחלים, לרווחת תושבי העיר.

הרפורמות במשק המים לא פסחו גם על המערכת המשפטית-מנהלית לניקוז, ובשנת 1996 עברו רשויות הניקוז למתכונת אגנית, אשר מתאימה לניהול מערכות ניקוז יותר מאשר מתכונת שלטונית-אזורית. האתגר העומד בפני רשויות

הניקוז כיום, הוא זה שמציג משרד האוצר, אשר רואה במים מצרך למסחר ולא נכס לאומי השייך לטבע ולעם היושב בציון. מול אתגרי האוצר, מצביע מאמר זה על דרך ניהול אינטגרטיבי על פי המודל האירופאי, גישה הוליסטית אשר מציבה את הנחל במרכז החיים העירוניים, מבלי לשכוח את חשיבות הנחל, סביבתו וגדותיו לצורכי חקלאות. הצורך בניהול המדינה על פי כללי פיתוח בר קיימא, מחייב את רשויות הניקוז לקדם פרויקטים אשר ישאירו את הנחלים כנכס לאומי גם לדורות הבאים, וזאת כנגד גישת האוצר, למכור נכסים אלה למרבה במחיר. תקוותנו שמאמר זה יעזור להבנת המצב המשפטי הנוכחי, כדי שמקבלי החלטות יכירו טוב יותר את המסגרת הקיימת, בבואם להחליט החלטות חורצות גורל על מקורות המים במדינה. עליהם לזכור את הכלל הוותיק: "מה שאינו שבור, אין לתקן". המערכת המשפטית-מנהלית לניהול מים עיליים איננה שבורה, אלא זקוקה לתיקונים תחיקתיים מסוימים.

2. מבוא

מסגרת משפטית אופטימלית לניהול מקורות המים, מחייבת הבנה של המערכת ההידרולוגית והימצאות כלים גמישים לניהול [הערת סיום]. המסגרת המשפטית להגנה ופיתוח מקורות המים בישראל, אשר עוצבה בשנות ה-50 של המאה העשרים, נבנתה על בסיס שתי מחויבויות אלה. ארבעה חוקי מים העניקו לשר החקלאות ולנציב המים גמישות מרבית לנהל את המחזור

שאין בעלות פרטית על מקור מים. אולם בעולם המשפט, מקובל מאוד שאדם הגר ליד נחל או אגם או אדם החופר באר, מקנה לעצמו "בעלות" במקור המים.⁹ מדינות אשר מעניקות זכויות פרטיות בנוגע למים, מקשות מאוד על קביעת סדר בחלוקת המים, שמירה על מקורות המים, הסדרת ערוצי מים או מניעת זיהומם. המג'לה אמנם אימצה אתיקה חשובה בנושא הבעלות על מקור מים, אולם חסרים בה סעיפים הקשורים למניעת שיטפונות, סחף קרקע וזיהום, אשר חשובים ביותר לניהול משק המים במדינה מודרנית. בנוסף לכך, הקוד העות'מני אינו מקים מנגנון ממשלתי לניהול משאבי מים, אלא קובע כללי התנהגות של הפרט בסוגיה, ואת דרכי השימוש במים.¹⁰

3.2 פקודות מתקופת המנדט הבריטי

הבריטים אשר שלטו בארץ ישראל בתקופת המנדט (1922-1948), היו ערים מאוד לבעיות של שיטפונות וסחף קרקע. לאחר מאות שנים של השלטון העות'מני, ניכרה ההזנחה בהגנה מפני שיטפונות עקב כריתת עצים ורעיית יתר.¹¹ חלק גדול מארץ ישראל לא היה מכוסה בצמחייה, והמתכנן הבריטי המפורסם הנרי קנדל, בספרו על פיתוח כפרי בפלסטינה, ציין מקרים של שיטפונות באזור שכס, בגלל בנייה בתוך פשט הצפה.¹² השפעה מכרעת היתה של פרופסור וו. ק. לאודרמילק ופרסום בשנת 1938 של ספרו ארץ ישראל - הארץ היעודה. בעקבות ממצאי הספר, מינה הנציב העליון מועצה לשימור קרקע המורכבת מעובדי הממשלה.

הבריטים ניסו להתגבר על בעיות סחף קרקע על ידי פקודות רבות, החל בפקודת סחף-חול 1922, "כדי לעצור חולות לבל יסחפו קרקע הראויה לעיבוד". באמצעות חקיקה זו, נעשו פעולות לייצוב הקרקע לגידולים. בשנת 1941, פורסמה פקודת השיטפון וסחף הקרקע (מניעה). פקודה זו נתנה לנציב העליון סמכות להכריז על ביצוע עבודות הסדרה ותחזוקה ועל איסור רעיית יתר וכריתת הצמחייה כשטחים מסוימים. פקודת הניקוז (מים עיליים) שפורסמה בשנת 1942,¹³ אפשרה לנציב העליון למנות נציב מים עם סמכות "לבנות, להחזיק ולשמור על מפעלי ניקוז...". לנציב המים הוענקה סמכות לבנות מפעלי ניקוז, כדי לשפר את עיבוד הקרקע וכדי למנוע שיטפונות

ההידרולוגי, החל משמירה על מקורות המים, עובר לקביעת טיבם וכלה בניצולם ובדרכי אספקתם. במשך הזמן, פוזרו סמכויות אלו בין מספר גורמים ממשלתיים וממשלתיים למחצה. בשל כך, פועלת המערכת התחקית לניהול מקורות המים בישראל בצורה מסורבלת; היא בנויה כטלאים בעלי רובדי סמכויות שונים ומחייבת שיתוף פעולה הדוק בין מספר רב של גורמים. מבנה זה הוביל לכך, שבעוד שהמערכת פועלת לשביעות רצון של חלק מהאוכלוסייה, חלק מהזמן, מבנה המערכת גורם לנזקים לטווח הקצר והארוך. אין זו המערכת שחלמו עליה מייסדיה ואין זו מערכת הצועדת עם הזמן. אין ניהול אינטגרטיבי של המערכת ההידרולוגית ואין גוף המחבר בין תכנון, לבין שימושי הקרקע ומקורות המים.² בניסיון לרפא את ה"חולי" במערכת, יזמו נציבות המים ומשרד האוצר, תיקון לחוק המים שמבטל את הטלאים בחקיקה. תיקון זה נכנס לתוקף בינואר 2007, ומוקדם מדי לשפוט אם התרופה תשיג תוצאות. כבר נמתחה ביקורת על דרך קבלת התיקון וייתכן וחלק ממנו לא יעמוד בביקורת בג"צ; ניכר בתיקון שדרוג סמכות רשות המים, אך לא שדרוג אופן תפעול מקורות המים.³ אולם מאמר זה אינו מנתח את התיקון הזה לחוק המים, אלא מתמקד בתיאור המערכת המשפטית לניקוז, מניעת סחף קרקע והגנה מפני שיטפונות; נושא שלא זכה עד כה לניתוח משפטי מעמיק.⁴

3. מקורות היסטוריים של דיני מים והשפעותיהם על הדין הישראלי

3.1 ירושת חוקי המג'לה העות'מנים

עם הקמת המדינה, ירשה ישראל את חוקי המים מהמג'לה (החוק העות'מני), אשר אומצה על ידי הממשל הבריטי בתקופת המנדט.⁵ המג'לה שימשה כרית נוחה לבניית מסגרת משפטית לפיתוח מקורות המים, כי ביסודם המים הם משאב ציבורי. המג'לה קובעת, כי לא ניתן לרכוש בעלות על המים הזורמים בטבע.⁶ קביעה זו, מקורה במשפט הרומי⁷ והיא אומצה על ידי המג'לה וכאמור, אומצה בחוק המים הישראלי שנחקק מאוחר יותר. המג'לה מאפשרת לאדם לחפור באר ולקבוע את גבולותיה, אך גם במקרה של באר "פרטית", בעל הבאר חייב לספק מים לדורשים.⁸ בישראל מקבלים כמובן מאליו את העובדה,

לביצוע החוק בידי השר לתשתיות הלאומיות. אולם עדיין נשארו לשר החקלאות סמכויות רבות, בעיקר בנושאי מים לחקלאות, ניקוז ושימור קרקע. בשנת 2006, באמצעות חוק ההסדרים במשק, הוכנסו תיקונים בחוק המים לשם הקמת הרשות למים וביוב²³. רשות המים קיבלה על עצמה חלק מסמכויות שר התשתיות ונציב המים, אולם אלו אינן כוללות סמכויות בענייני ניקוז.

חוק המים קובע, שכל מקורות המים במדינה הם קניין הציבור. המשמעות היא, שעם פרסום החוק בשנת 1959, כל מקורות המים במדינה הולאמו ומאותו יום אין מקור מים במדינה השייך לגורם פרטי²⁴. מעניין לציין שלא הוגשה אף תביעת פיצויים כנגד המדינה על הלאמה זו. מכל מקום, מקורות המים אינם קניין פרטי אך גם לא קניין המדינה אלא "קניין הציבור", והמדינה אמורה לנהל אותם לטובת הציבור. במסגרת חוק המים מופיעות אמירות חשובות מאוד, המעצבות את דמות השימוש במים במדינת ישראל. תחילה נקבע בחוק שהזכות במקרקעין איננה מקנה לאדם זכות במים²⁵. נקבע גם שלכל אדם הזכות למים, בתנאי שאינו גורם להמלחתו או דלדולו²⁶ וכן זכויות המים צמודות למטרות המופיעות בחוק: שימוש ביתי, חקלאי, תעשייתי וציבורי²⁷. בעקבות ביקורת שהוטחה כלפי החוק, בשנת 2004 הצליחו בעלי עניין סביבתיים לגרום לתיקון, אשר קובע כי גם לטבע זכות במים²⁸. למעשה, אין להוספת סעיף זה משמעות רבה מעבר לאפקט ההצהרתי. המים נלקחים מהטבע ולכן מובן מאליו שאין מדובר במתן זכויות במים לטבע, אלא בכך שנציב המים אמור למנוע לקיחת מים מהטבע, דבר שהיה בסמכותו מיום פרסום החוק ב-1959²⁹. אולם תיקון זה מראה, שהמהפכה הסביבתית הגיעה למקבלי ההחלטות והדבר ניכר גם אצל רשויות הניקוז.

כאמור, כולל החוק סמכויות רחבות ביותר בנוגע למניעת זיהום ודלדול מקורות מים. כמו כן, ההגדרה של מים היא כה רחבה, עד שלא ניתן למצוא מקור או מקווה מים שאינו כלול בהגדרה זו³⁰. במסגרת חוק המים, הוקמה רשות המים הארצית³¹, חברת "מקורות", וקיימת אפשרות להקמת רשויות מים אזוריות³². בנוסף, הוקם בית דין לענייני מים, אשר דן בזכויות במים וערעורים על החלטות של נציב המים³³. לאחרונה, עם פרסום התיקון לחוק המים, הסמכויות שניתנו לנציב המים

או סחף קרקע¹⁴. הפקודה קבעה שהקצבת תקציב לבניית המפעל, מוטלת על הממשלה ועל הנהנים מהמפעל. הפקודה גם הסמיכה את הנציב העליון, למנות פקידי ניקוז שבסמכותם להורות לציבור להסיר מכשולים קיימים. על סמך פקודה זו, הכריז הנציב העליון על בניית מפעלי ניקוז והסרת מכשולים מפשטי הצפה במקומות רבים.

דרכי ניהול במערכת הניקוז, נקבעו במסגרת שתי פקודות נוספות: פקודת העיריות ופקודת בניין ערים¹⁵. גישת הממשל הייתה, שעל הטיפול להיות ברמת המקומית. בפקודת העיריות, הוסמכה הרשות המקומית לטפל בענייני תיעול מקומי ולהתקין חוקי עזר לשם שמירה על בריאות וביטחון הציבור¹⁶. פקודת בניין ערים, חייבה כל ועדה מקומית לתכנן להכין תכנית מקומית ולהתייחס לאלמנטים הבאים: ביוב, תיעול ואספקת מים.

4. התפתחות החקיקה בנושאי מים וקרקע מקום המדינה ועד היום

4.1. דיני מים וקרקע

עם קום המדינה, חוקקה הכנסת ארבעה חוקים בנושאי מים. הראשון היה חוק הפיקוח על קידוחי מים¹⁷, אשר אסר על קידוח של באר ללא אישור הממשלה. בו ביום נחקק גם החוק למדידת מים¹⁸, אשר חייב כל אדם שמספק מים למדוד אותו טרם אספקה. בשנת 1957, חוקקה הכנסת את חוק הניקוז וההגנה מפני שיטפונות¹⁹ (להלן - חוק הניקוז), אשר משמש גם כיום כבסיס לניהול המערכת להגנה מפני סחף קרקע ומזעור נזקי שיטפונות. להשלמת התמונה, חוקקה הכנסת את חוק המים, תשי"ט-1959²⁰, גולת הכותרת של המערכת ואחד מחוקי המים המוערכים בעולם, הודות לחזון הגלום בו והכלים שניתנו לממשלה לניהול מקורות המים עבור תושבי המדינה²¹.

חוק המים

חוק המים משנת 1959, הוא גולת הכותרת של חוקי המים במדינה ואחד מחוקי המים המקיפים ביותר בעולם. החוק מאפשר לנציב המים לנהל את ענייני המים במדינה²² (כלשון החוק) ומאפשר לו גמישות יתרה בעבודתו. בתחילה, הסמיך חוק המים את שר החקלאות להיות הגורם האחראי על ביצוע החוק. כמשך הזמן הועברו חלקים מסמכויות שר החקלאות לשרים אחרים וכיום נתונה הסמכות

כל אפיק בו מופיעים מים תמיד או לפרקים³⁹. גם המושג ניקוז זוכה להגדרה רחבה ביותר: "ניקוז - כל פעולה שמטרתה לרכז, לאגור, להוביל או להרחיק מים עיליים או אחרים המזיקים או העלולים להזיק לחקלאות, לבריאות הציבור, לפיתוח הארץ או לקיום שירותים סדירים במדינה, לרבות ייבוש ביצות והגנה בפני שיטפונות ומניעתם, אך למעט טיפול במי ביוב"⁴⁰.

החיבור בין עורק וניקוז, מוביל את הראייה הכוללת הניכרת בחוק, של כל מפת הניקוז בארץ. אין אפיק של מים עיליים שאינו זוכה להתייחסות בחוק. כדי לתת מענה לכל דרישות הניקוז, מקים החוק מנגנון ניהול היררכי, החל מהשר הממונה על החוק, עובר במועצת ניקוז עליונה ורשויות ניקוז אזוריות וכלה ברשויות ניקוז מקומיות. אולם, כובד המשקל הושם דווקא על ישות נמוכה בהיררכיה המשפטית, קרי רשות הניקוז. רשות הניקוז, על פי החוק, היא זרוע הביצוע של החוק ועליה מוטלת אחריות בעלת משקל. זו התפיסה ה"מודרנית" אשר מעוררת הערכה לאלה שניסחו כבר בשנת 1957 את חוק הניקוז⁴¹. לחוק פנים להגנה על מקורות המים מפני הסביבה והגנת הסביבה מפני מקורות המים. החוק מסמיך את רשויות הניקוז למנוע את התרוממות מפלס המים באפיקים באמצעות כלים לשימור הקרקע, מחד, ומעניק לרשויות הניקוז את הסמכות לקבוע רצועות מגן מסביב לעורקים ומפעלי ניקוז, כדי למנוע מהמים להציף שם שטחים, מאידך. החוק אוסר על הטיית מים, וכן על רעייה או בנייה בתוך עורק ניקוז, שלא בהיתר של נציב המים⁴².

מנגנון הניהול: הדרג הארצי

חוק הניקוז ממנה את שר החקלאות כאחראי על המסגרת המשפטית לניהול מערכת הניקוז, אשר פועלת לשימור קרקע ולצמצום נזקי נגר עילי ושיטפונות. הוא אחראי על קביעת מנגנון הניהול הכללי של הסדרת הניקוז ועל הפיקוח עליו. הוא קובע את התחום הגיאוגרפי של רשויות הניקוז; הוא מאשר את תכניות מפעלי הניקוז, את תקציביהן ואת חוקי העזר שלהן. על פי החוק, הוקמה מועצה עליונה לענייני ניקוז⁴³, שמתפקדה לייעץ לשר החקלאות ואשר משמשת כמפקח עליון על רשויות הניקוז האזוריות. על השר להתייעץ עם המועצה בנוגע להכרזה על אזורי ניקוז, אישור

הועברו למנהל הרשות הממשלתית למים וביוב³⁴. במהלך השנים, כאשר התעוררו בעיות בניהול מקורות מים, התערבה הכנסת ושינתה את המסגרת המשפטית שנחקקה. אולם הבעיות לא היו בחקיקה אלא ביישומה. המערכת המשפטית לניהול והגנה על מקורות המים שנחקקה בשנות ה-50 של המאה הקודמת הייתה, לכל הדעות, מערכת חכמה. יש בה תמהיל נכון של הגדרה רחבה של מקורות מים וגמישות מרבית לניהולם. לא הוקנה קניין במים לגורם פרטי כמו במדינות רבות בעולם והוקם מנהל אחיד, סטאטוטורי וגמיש, לנהל את ענייני המים במדינה. עם זאת, כעבור זמן קצר, שינתה הכנסת את מפת הניהול, אך לא על בסיס הידרולוגי.

בשנת 1962, חוקקה הכנסת את חוק הרשויות המקומיות (ביוב)³⁵. חוק זה קובע שהרשות המקומית היא האחראית על הטיפול בביוב בתחומה: הנחת קווי ביוב, גביית תשלום לתשתיות הביוב ולמכונני ביוב וטיפול באיכות המים. נוסף לכך, נקבע בחוק שהביוב הוא "קניין הרשות המקומית"³⁶, דבר שסותר את הסעיף הראשון של חוק המים הקובע שהמים הם "קניין הציבור". כתוצאה מכך, מחפשות הרשויות המקומיות דרכים להרוויח במקום לדאוג שהמים יוחזרו לטבע באיכות ראויה. חלון זה שנפתח, שימש לאחר מכן כאחת הדרכים לשכנע את הכנסת להפריט את משק המים העירוני; מגמה שיש הטוענים כי טמונה בה יותר אידיאולוגיה מחוכמה³⁷. הליך זה גם מציב אתגר לרשויות הניקוז, אשר פועלות כרשויות נחל על בסיס אגני. תאגידי מים וביוב, אשר בודקים את יעילותם על בסיס של רווח ולא של רווחה, מנסים לחסוך בטיפול בביוב שברשותם, דבר אשר משפיע על איכות וכמות הקולחים בנחלי הארץ, שנמצאים בסמכות רשויות ניקוז ורשויות נחל³⁸.

חוק הניקוז

ניתן לומר מתוך פרספקטיבה של זמן, כי חוק הניקוז שנחקק בשנת 1957 הנו בעל ראייה לטווח ארוך. החוק בונה מסגרת מקיפה לניהול מערכות הניקוז בארץ ומקנה סמכות לממשלה לנהל כל אפיק של מים עיליים, כאשר הוא מגדיר "עורק" כיעד לטיפול ולא "נחל" או "אגם". עורק מוגדר בחוק כך: "...נהר, נחל, ערוץ, תעלה, שקע וכל אפיק אחר, בין טבעיים ובין מותקנים או מוסדרים, שבהם זורמים או עומדים מים, תמיד או לפרקים". דהיינו,

החלטות נשען על פוליטיקה מקומית. רוב חברי רשויות הניקוז הם נציגי הרשויות המקומיות⁴⁸, דבר אשר נותן לגיטימציה להחלטות רשות הניקוז כגוף סטטוטורי. לרשויות המקומיות אינטרס מובהק למנוע שיטפונות ובמקביל אינטרס לשמור על הקופה הציבורית. לרשויות המקומיות תכניות פיתוח, ועליהן לתאם תכניות אלה עם רשויות הניקוז. רשויות הניקוז אמורות להקים מפעלי ניקוז אזוריים להסדרה ולאחזקה של עורקי ניקוז. מפעלי הניקוז מאושרים הן על ידי מועצת הניקוז העליונה והשר האחראי והן על ידי מוסדות התכנון. מפעלי ניקוז אזוריים מחוברים ומשרתים מפעלי ניקוז/ תיעול מקומיים, אשר מנוהלים על ידי העיריות והמועצות המקומיות. בחוק קיימת עמימות, באשר אין הוא מגדיר את האחריות המפורשת למערכות ניקוז במועצות האזוריות. מהלאו בחוק ניתן ללמוד שרשויות הניקוז אחראיות לרשת הניקוז הכפרי, אולם מאחר והמועצות האזוריות גובות דמי פיתוח מתושביהן, גם הן עוסקות בניקוז ותיעול.

הקמת רשות ניקוז

רשויות הניקוז הן עמוד השדרה של מערכת המים העיליים הארצית; כשאלו אינן מתפקדות כהלכה, עלולה כל המערכת לקרוס. כדי להקים את המערכת, קובע החוק ששר החקלאות יכריז על הקמת רשויות הניקוז לאחר התייעצות עם שר הפנים⁴⁹. נוסף לכך, הקמת רשויות ניקוז מחייבת הסכמה של רוב הרשויות המקומיות החברות ברשות הניקוז. דבר זה חיוני למערכת, שהרי מחד, הרשויות המקומיות זקוקות לעזרה במניעת שיטפונות, ומאידך, הרשויות המקומיות מעוניינות לפתח את תחומן ולכל פיתוח יש השלכות על הטופוגרפיה ועל כמות הנגר העילי. לאחר שהרשויות המקומיות מאשרות את הצטרפותן לרשות ניקוז והשר מכריז על הקמתה, הופכת רשות הניקוז לישות משפטית נפרדת ומוקם תאגיד סטטוטורי עצמאי. החוק מעניק לרשות הניקוז את הסמכות לרכוש קרקע, להכין תכנית למפעלי ניקוז⁵⁰, לחוקק חוקי עזר⁵¹, לגבות מכסות⁵² וארנונות ניקוז⁵³, לתבוע ולהיתבע⁵⁴.

מפעלי ניקוז

עיקר עבודתן של רשויות הניקוז, בא לידי ביטוי בתכנון, הסדרה ואחזקה של מפעלי ניקוז. מפעל

תכניות מפעלי ניקוז וכל עניין של מדיניות כללית בביצוע החוק. המועצה מורכבת מיושב ראש, מנהל רשות המים, שמונה נציגים של הממשלה ושנים עשר נציגים במינוי שר החקלאות - שמונה מהם נציגים של ארגונים חקלאיים בפועל. מועצת הניקוז העליונה רשאית לאצול מסמכותה לגופים אחרים, למשל, לוועדת משנה הנדסית לבדיקה ואישור תכניות מפעלי ניקוז.

מנגנון הניהול: הדרג האזורי

רשויות הניקוז, אשר פועלות להסדרה ואחזקת עורקי הניקוז, מורכבות ממנכ"ל, מהנדס וצוות פיקוח. רשויות הניקוז מתכננות ומבצעות מפעלי ניקוז⁴⁴. הן אמורות לעבוד על בסיס אזורי, דהיינו, לקבוע תכנית ניקוז אזורית בשטחים שמחוץ לאזור הבנוי של העיר⁴⁵. הבחנה זו חשובה, משום שבתחומי העיר פועלות מחלקות ניקוז עירוניות. החוק אינו מגדיר מה הם יחסי הגומלין בין רשויות הניקוז האזוריות לבין מחלקות הניקוז העירוניות⁴⁶. עם זאת, ברור כי על מנת לתכנן ולתחזק מערכת ניקוז יעילה אשר פועלת בהרמוניה, וכדי לאפשר זרימה חופשית של מים עליים ומזעור שיטפונות, מתחייב שיתוף פעולה בין הגופים. יותר מכול, גישה זו מחייבת את רשויות הניקוז להכין תכנית ניקוז אזורית או אגנית.

סמכויות רשות ניקוז

"החידוש העיקרי של החוק המוצע הוא בהעלותו לנושא חדש לפעולת ניקוז - רשות ניקוז הפועלת בתחומים הטבעיים של אזורי ניקוז... עם הרחבת פעולות הניקוז לא תוכל הממשלה לרכז בידיה בלבד את היוזמה של תכנון, ביצוע ואחזקה של מפעלי הניקוז. זה גם אינו רצוי. מן ההכרח הוא לשתף בזה את בעלי הקרקעות ותושבי היישובים המעוניינים" - מתוך ההסבר לחוק הניקוז - דברי הכנסת מיום 27.5.1957.

ניתן להצביע בבירור על ההיגיון הטמון בהקמת רשויות ניקוז על בסיס תחומים גיאוגרפיים ולא פוליטיים⁴⁷. להבדיל מרוב הגופים האזוריים הסטטוטוריים בארץ (הממונה על המחוז, איגודי ערים, ועדות תכנון מחוזיות), רשויות הניקוז פועלות על בסיס גיאוגרפי לניהול מקורות מים. ביסוס זה מחייב את רשויות הניקוז בגישה הידרולוגית, אשר תכוון את מדיניותה. עם זאת, הבסיס לקבלת

על אותם מקרקעין ועל ידי הזרמת מי ביוב לעורקי ניקוז על ידי מפעלים ומתקנים כאמור⁶⁰. לצורך גביית ארנונת ניקוז, על רשות הניקוז להכין לוח שומה ולהציגו לבעל המקרקעין ולו הזכות להגיש ערר.

כנאמר לעיל, אין רשויות הניקוז מטילות ארנונות ניקוז למימון פעולותיהן, אלא מעדיפות את הכלי השני למימון פעולותיהן – מכסות הניקוז⁶¹. מכסות אלו אינן מוטלות על בעלי מקרקעין אלא על הרשויות המקומיות החברות ברשות הניקוז, באישור שר החקלאות, שר הפנים ושר האוצר. השיטה אמנם פשוטה ואין צורך בלוח שומה לכל בעל מקרקעין, אולם גביית מכסות ניקוז אינה פטורה מבעיות. ראשית, הרשויות המקומיות החברות ברשות הניקוז, הן אלו שמחליטות על הטלת המכסות שהן עצמן נדרשות לשלם. מובן מאליו שקשה לצפות כי הרשויות יורו על הוצאת סכום כספי גדול מקופותיהן הדלות. שנית, אם הרשויות בכל זאת נדיבות בקביעת מכסות הניקוז, עדיין רשאים שר הפנים ושר האוצר להתערב ולרסן נדיבות זו, משום שחלק מתקציביהן של הרשויות המקומיות מגיע מאוצר המדינה באמצעות משרד הפנים. דרך נוספת למימון פעולות ניקוז, היא הצבתן כפרויקטים לאומיים שממומנים במישרין על ידי הממשלה. דוגמאות לפרויקטים כאלה בשנים האחרונות: אפיק ליד העיר פרדיס, הטיית נחל גרורה במפרץ חיפה ובניית גשר על נחל ערוגות בקרבת ים המלח.

חלוקת סמכויות

מבחינת מנגנון הניהול, ניכרת הגמישות שמעניק החוק לרשויות הניקוז לנהל את ענייני הניקוז שבמדינה. עם זאת, לעתים קשה החוק ליישום, בשל ניסוחים עמומים של מספר סעיפים. שלושה תחומים בולטים קשורים באפיון "התפר" בין סמכות רשות הניקוז לבין סמכויות גופים סטטוטוריים אחרים. הראשון, עמימות בכל הנוגע לחלוקת האחריות בין רשות הניקוז לבין הרשות המקומית⁶². היכן נגמרת אחריות האחת ומתחילה אחריות האחרת? מה הוא מפעל ניקוז אזורי ומהו מפעל מקומי? מהו תיעול מקומי לעומת ניקוז אזורי?

אין מדובר בשאלות אקדמיות, אלא בסוגיות של חיים ומוות, ורשות הניקוז או הרשות המקומית

ניקוז אינו מוגדר בחוק, אבל הכוונה בהתייחסות אליו היא למפעל אשר מיישם את עקרונות החוק, דהיינו, מסדיר את האזור המנקז מים עיליים. רוב מפעלי הניקוז עוסקים בקטעים של נחל, הדורשים טיפול והסדרה מיידית. עם זאת, לרשות הניקוז הסמכות לקבוע תכנית מפעל ניקוז אגנית, דהיינו מעין תכנית אב למים עיליים הקובעת דרכי פעולה במרחב האגני⁵⁵. לקראת הקמתו של מפעל ניקוז, חייבת רשות הניקוז להכין תכנית המתארת את שטח המפעל, הערכה של כמות ואופי העבודות הדרושות, אומדן תקציבי ואפיון של סוג המקרקעין שיש לתפוס, זמנית או לצמיתות, ורצועות המגן לאורך העורקים⁵⁶. רשות הניקוז מכינה את התכנית ומפרסמת אותה ברבים, כדי לאפשר לציבור להתנגד. הרשות שומעת את התנגדויות הציבור ומעבירה את התכנית, בצירוף ההתנגדויות, לאישור מועצת הניקוז העליונה והשר⁵⁷. טרם אישור השר, מוצגת התכנית לאישור הוועדה המחוזית לתכנון ולבנייה⁵⁸.

רוב מפעלי הניקוז מגבילים את השימוש במקרקעין סמוכים לעורק. מסיבה זאת נקבע בחוק, שרשות הניקוז רשאית לקבוע רצועות מגן מסביב לעורקי ניקוז ונחלים, ואם יש צורך בכך, להפקיע קרקע שתיתפס לצמיתות⁵⁹. תפיסה צמיתה על פי החוק, מחייבת פיצוי לבעל הקרקע. אם אין הסכמה על גובה הפיצוי בין הרשות לבין בעל הקרקע, מוכרע הנושא בבית הדין למים. ברוב המקרים רשויות הניקוז אינן תופסות קרקע לצמיתות, אלא קובעות רצועות מגן מסביב לעורקים אשר בתוכן אסור לבנות מבני קבע.

מימון פעולות הניקוז

הקמה ואחזקה של מפעל ניקוז דורשים מימון. לצורך כך נתן המחוקק לרשויות הניקוז שתי דרכים לגיוס כספים: ארנונת ניקוז ומכסות ניקוז. כל רשויות הניקוז בחרו במכסות ניקוז למימון פעולותיהן, אולם ראוי לזכור את קיומה של ארנונת הניקוז כאמצעי נוסף.

ארנונת ניקוז היא תשלום שמשלם בעל נכס, אשר משפיע על עורק הניקוז ו"נהנה" מתפקודו. גובה הארנונה הוא פונקציה של תרומת מפעל הניקוז להשבחת הקרקע או "באיזה מידה נגרם הצורך בהקמת מפעל ניקוז ובהחזקתו או שינויו על ידי המפעלים, המבנים או המתקנים הנמצאים

לכך, יש לברך על אישור תמ"א 34 לניקוז ונחלים, אשר מהווה מסמך מדיניות לתאום הפעילויות של הגורמים המעורבים בהסדרת נחלים ושיקומם. אולם יש לציין שגם מסקנות הוועדה הבינמשרדית וגם תמ"א 34, הן מסמכי מדיניות. על בסיסם מחויבת רשות הניקוז להכין תכנית אב לאישור הגורמים הסטאטוטוריים ותכנית פעולה ליישום תכנית האב.

נקודת העמימות השנייה בחוק הניקוז, מופיעה ב"תפר" בין אחריות רשות הניקוז ובין אחריות מוסדות התכנון. בחוק הניקוז נאמר, שמפעלי ניקוז מתוכננים ומאושרים על ידי רשות הניקוז, מועצת הניקוז העליונה והשר. מכאן עוברת תכנית מפעל ניקוז לוועדה המחוזית לתכנון ולבנייה, לאישור תכנוני⁶³. האם בשלב זה רשאית הוועדה המחוזית לקיים דיון מעמיק עם התנגדויות לתכנית כמו בכל תכנית אחרת? החוק אינו מפרט, אך ברור שהתהליך הנו שונה מאלה הקשורים בתכניות אחרות. לאחר שתכנית מפעל ניקוז נדונה במליאת רשות הניקוז ועברה הליך של התנגדויות, הן ברשות והן במועצת הניקוז העליונה, אין זה ראוי שהוועדה המחוזית לתכנון ולבנייה תתחיל בתהליך התנגדויות מלכתחילה. נמצא בחוק רמז שמחזק תחושה זו. חוק הניקוז קודם לחוק התכנון וקובע שתכנית מפעל ניקוז "כוחה יפה" על תכנית לפי חוק התכנון⁶⁴. בנוסף, נקבע בחוק, שערעור על החלטת הוועדה המחוזית היא למליאת הממשלה ולא כמקובל למועצה הארצית לתכנון ולבנייה. לאור זאת, סביר להניח, שתפקידה של הוועדה המחוזית בבואה לדון בתכנית מפעל ניקוז, מצטמצם לבדיקה אם תכנית מפעל הניקוז אינה עומדת בסתירה לתכנית בניין ערים מאושרת. אם אין סתירה, על הוועדה המחוזית לאשר את התכנית ללא שינויים. מחד, רשויות הניקוז חייבות להתחשב בהערות מוסדות התכנון ומאידך, על מוסדות התכנון להבין שעורק ניקוז היא תשתית בראשית, ולכן עדיף להזיז מעשי אדם מפני עורק ניקוז ולא עורק ניקוז מפני מעשי אדם.

עמימות נוספת קיימת בהקשר לפעולות תשתיות אחרות. קיימות בארץ חברות ממשלתיות כגון מע"צ, הרכבת, בזק, רשות שדות תעופה ואחרות, אשר להן סמכויות לשינוי פני הקרקע על פי דין. מה דינה של סמכות זו מול סמכות רשויות הניקוז אשר מגינות על מים עיליים, מונעות סחף

אינן יכולות להתחמק מאחריות. כאשר יש עמימות בחוק, שתי הרשויות אחראיות ביחד ולחוד⁶⁵. הגיוני הדבר שאם רשות הניקוז מורכבת מרשויות מקומיות, אזי הן קובעות ביחד את הקמת מפעלי הניקוז ואת קצב ביצוען. הגיוני שהן קובעות גם סדרי עדיפות - כאשר הסכנה לחיי אדם קודמת לסכנה לבעלי חיים או לבנינים או לסביבה הטבעית. לכן, התשובה לשאלה היא בעצם הצגתה בפני מליאת רשות הניקוז: האם קבעתם סדר עדיפות למפעלי ניקוז בתחום שיפוטכם והקצבתם לנושא את האמצעים הכספיים הדרושים? שנית, האם הרשויות המקומיות קבעו בתוך תחומיהן תכניות אב לתיעול, אשר מתחברות למפעלי ניקוז של רשויות הניקוז? האם הרשויות המקומיות החברות ברשות הניקוז, דאגו לחוקק חוקי עזר מתאימים לגיוס כספים למימון מפעלי ניקוז ותיעול? מובן מאליו, אפוא, ששיתוף הפעולה בין רשויות הניקוז האזורית ומחלקות הניקוז המקומיות, נדרש לתפעול נכון של כל המערכת.

בניסיון להביא לחלוקה ברורה של סמכויות רשויות הניקוז וסמכויות הרשויות המקומיות, קבעה ועדה בינמשרדית קריטריונים לתיחום האחריות בנושא תיעול וניקוז בין שתי רשויות אלה. קריטריונים אלה מבוססים על שני פרמטרים: מצב הטיפול כיום והקביעות בתמ"א 34 לניקוז ונחלים. המצב כיום הוא, שרשויות הניקוז אינן עובדות בשטח הבנוי של הרשות המקומית בתוך ה"קו הכחול התכנוני". תמ"א 34 קובעת שרשויות הניקוז אחראיות על נחלים מסדר גודל מסוים, כפי שסומנו בתמ"א. הוועדה מאמצת את שני הקריטריונים הללו ומוסיפה שיפורים. היא קוראת לכל רשות ניקוז לערוך תכנית אגנית ולסמן את העורקים שבאחריותה מבחינת הסדרה ואחזקה. הוועדה קובעת תקופות חזרה לספיקות תכן בעורקי ניקוז ונחלים, כדי לכוון את רשויות הניקוז בבואן להכין את תכנית האב. מעבר לכך, הוועדה קובעת ש"לרשות ניקוז תהיה אחריות כוללת למוצאי התיעול העירוני / ניקוז מקומי חקלאי אל עורקי הניקוז שלה והיא תהיה מעורבת בתוך המערכות שאינן באחריותה בהליכי תכנון, ייעוץ תפעולי, מצבי חרום וכיו"ב"⁶⁴.

מבלי לשפוט את הקריטריונים שנקבעו, יש לברך על הניסיון לקבוע תחומי אחריות ברורים בין רשות הניקוז לבין הרשות המקומית. נוסף

הגיונית בשנת 1960 כאשר המדינה התנהלה על בסיס פעילות חקלאית ענפה, אבל היתה טמונה בה מלכודת, ככל שהזמן לא הטיב עם הסקטור החקלאי. בהמשך, נדון ברפורמה שעברה מערכת הניקוז ב-1996, שבעקבותיה צומצמו מספר רשויות הניקוז ל-11 לפי מפתח אגני.

שימור קרקע

בשנת 1960 שר החקלאות התקין תקנות לשימור קרקע. מאז ועד היום, יש לרשות שימור קרקע אותם תפקידים: "ליזום, לסייע ולפקח על הקמת מפעלי שימור קרקע בתחומה ועל החזקתם, והיא רשאית, באישור המנהל, לבצע מפעלי שימור קרקע שנכללו בתכנית הכללית...". התקנות הכריזו על 11 רשויות מקומיות (שהוחלפו ברשויות הניקוז בתיקון התקנות ב-1982) כרשויות, באישור שר החקלאות, למנות רשות שימור קרקע. בשנות ה-60 קמו שלוש רשויות שימור קרקע: הגליל התחתון, מטה יהודה ולכיש. אולם, עם הזמן הן הפסיקו לפעול, בעיקר בגלל חוסר תקציבים. מאז ועד שנת 2004, לא קמה אף רשות שימור קרקע. המגמה השתנתה בהקמת רשות שימור קרקע בתחום רשות ניקוז שקמה-בשור.

4.2 דיני תכנון

חוק התכנון והבנייה הוא החוק המרכזי המסדיר את ייעודי שימושי הקרקע בישראל, לרבות שימושי קרקע שלהם השלכות על מים, ניקוז וקרקע. על פי החוק אין לבצע כל פעולה שיש בה משום הקמת מבנה בקרקע מדינת ישראל, אלא אם נתקבל לכך אישור מוסדות התכנון של המדינה. החוק יוצר מדרג של מוסדות תכנון ותכניות ברמה ארצית, מחוזית ומקומית, כאשר הנציגים בממשלה הנם רוב במוסדות התכנון הארציים והמחוזיים⁶⁸. ברמות התכנון הארצית והמחוזית נקבעים עקרונות התכנון, ייעודי שטחים לפרויקטים לאומיים, והפרטים הדרושים ליישום נקבעים בתכניות מקומית מפורטות. מגוון החברים, המשקיפים והמוזמנים המשתתפים בדיון במוסדות התכנון, מאפשרים ייצוג מגוון רחב של אינטרסים.

תמ"א (תכנית מתאר ארצית) 34/ב-4 משנת 2006, עוסקת בנושא איגום מים עיליים, החדרה, העשרה והגנה על מי תהום. התכנית יוצרת מסגרת תכנונית המשלבת שימור וניצול מיטביים של מי

קרקע ושומרות על מערכת הניקוז ממעשי אדם ועל האדם ממערכת הניקוז? שוב אין תשובה חד משמעית בחוק, כי לכל גוף סטאטוטורי סמכויות שמוקנות לו בדין. אולם כללי מנהל תקין, קובעים מספר נורמות לניהול ממשל. האחת, כאשר יש לשני גופים סמכויות מקבילות, עליהם לקבוע נוהל לשיתוף פעולה. נוהל כזה נכתב בין מספר ועדות מחוזיות לתכנון ולבנייה לבין רשויות הניקוז. נורמה שנייה היא, שעל גוף סטאטוטורי עם סמכויות ייחודיות לנושא מסוים, לקבוע מדיניות ועל אחרים להתחבר אליה. בעניין כבישים למשל, על מע"צ לקבוע מדיניות ארצית ואם חברת בזק רוצה למתוח כבל מעל או מתחת לכביש, עליה לעבוד בשיתוף עם מע"צ. מקרה ניקוז שונה מאחרים, כי עורקי ניקוז הם תשתית בראשית, דהיינו הם אינם מעשי אדם אלא נוצרו על ידי הטבע במשך אלפי שנים. לאור זאת, על גופי תכנון ופיתוח לקחת בחשבון את התשתית הבסיסית הקיימת, כאשר הם מתכננים פרויקט. ומה קורה כאשר פרויקט מעשה אדם מיצר עורק ניקוז? כי הרי חוק הניקוז מגדיר עורק ניקוז: "נהר, נחל, ערוץ, תעלה, שקע וכל אפיק אחר, בין טבעיים ובין מותקנים או מוסדרים, שבהם זורמים או עומדים מים, תמיד או לפרקים". הגדרה זו כוללת עורקי ניקוז לאורך כבישים, אשר נבנו לצורך ניקוז הכביש. מי אחראי לתכנון, בנייה, אחזקה ומניעת סחף קרקע ושיטפונות עורקים מלאכותיים אלה? בראש ובראשונה מע"צ, אולם על מע"צ להציג את תכניתה לניקוז לרשויות הניקוז ועל שני הגופים לקבוע ביחד את דרכי ניהול התשתית החדשה שנוצרת⁶⁷.

תחום השיפוט של רשויות ניקוז

חוק הניקוז מסמך את שר החקלאות, להקים רשויות ניקוז אזוריות בכל חלקי הארץ. עד פרסום חוק הניקוז, פעלו בארץ "הועדות האזוריות לניקוז, יבוש והגנה מפני שיטפונות". עם פרסום החוק, חילק שר החקלאות את שטח המדינה ל-26 רשויות ניקוז וביקש מכל רשות מקומית בתחום אותה רשות ניקוז לשלוח נציגים למליאת הרשות. בדרך זו עיצב השר את דמותן של רשויות הניקוז בארץ. השר "חילק את המדינה" על פי גישתו החקלאית, הרכב רשויות הניקוז נתן משקל יתר לסקטור החקלאי, באמצעות המועצות האזוריות, על פני הישובים העירוניים. פעולה זו נראתה

מקומיות, בעלי מקרקעין וגורמים הקשורים לגורל הנחל. לרשות נחל יש מליאה והנהלה בדומה לאלה של רשות ניקוז, אולם חוק הנחל מגדיר את תפקידיהם של שני הגופים האלה, לעומת חוק הניקוז אשר משאיר את הנושא פתוח להחלטת הרשות.⁷⁴

חוק הנחל מאפשר לרשות נחל לטפל בתוואי הנחל, ניקוי הנחל וגדותיו,⁷⁵ מפלס המים בנחל והשימושים במים, לאורך הנחל וגדותיו. אולם בחוק הנחל ישנה גם פגיעה ביעילותו, בכך שנקבע בו כי כאשר מעבירים סמכויות לרשות נחל, עלול הדבר לפגוע בסמכויות של רשויות מקומיות החברות ברשות הנחל.⁷⁶ רשויות מקומיות רבות התנגדו להקמת רשויות נחל, מאחר ולא רצו לוותר על סמכויותיהן. גם כאשר הוקמה רשות נחל, למשל רשות נחל הירקון, עיצבו את תחום השיפוט שלה באופן צר, כדי למנוע ממנה לפעול בכל אגן ההיקוות. הדבר מצר את יכולת הטיפול והתפעול של רשויות אלה. עם זאת, ניהול נכון של סמכויות רשות נחל, מאפשר שיקום ושיפור נחלים. עובדה היא שרשות נחל הירקון וכמוה רשות נחל הקישון, מאז הקמתן, עשו רבות לשנות את התדמית של הנחלים ולהעביר אותם מהחצר האחורית של הרשויות המקומיות לחצר הקדמית.⁷⁷

רשות נחל

חוק רשויות נחלים ומעיינות, נחקק במטרה להקים רשות לנחל הירקון. אולם, במהלך תהליכי החקיקה, הפך החוק לחוק ארצי. דהיינו, הכנסת הסמיכה את השרים הממונים על החוק, אז שר הפנים ושר החקלאות וכיום שר הפנים והשר להגנת הסביבה, להקים לכל נחל (או קטע ממנו) רשות נחל.

תפקידי רשות נחל רחבים וכוללים:

- הסדרתה של זרימת המים בנחל, במגמה לשמור על מפלס מים מתאים במשך כל חדשי השנה.
- ניקוזו הסדיר של תחום הרשות.
- קביעת תוואי לנחל או העברת מי הנחל לאפיקים אחרים.
- הסרת מפגעי תברואה הכרוכים בזיהום הנחל או מקור המים או בזרימתם המשתנית של מימיו.
- שמירת הנוף ונכסי הטבע לאורך הנחל בשתי גדותיו או מסיבי למעיין, למעט נחל ומעיין שבתחומי גן לאומי או שמורת טבע, כמשמעותם בחוק גנים לאומיים ושמורות טבע, תשכ"ג -

נגר עילי, הקטנת נזקי סחף והצפות, העשרת מי התהום ושמירה על איכותם. התכנית מחייבת השהיה והחדרת מי נגר עילי משטחים מבונים על ידי בנייה המעשירה את מי-התהום ומנצלת באופן מיטבי את הפוטנציאל הגלום במי הנגר העילי. תמ"א 34/3 עוסקת בנחלים כעורקי ניקוז למניעת שיטפונות ונזק מנגר עילי, יחד עם תפקידם לשמירת ערכי טבע, נוף ואקולוגיה. התכניות הללו מייצרות יחד מסגרת עקרונית שמנחה תכניות מפורטות. תמ"א 34/3 מחייבת נספח ניקוז לתכנית, אשר כולל התייחסות לשטחים בתוך פשט ההצפה של נחל. נספח זה עובר לרשות הניקוז לצורך מתן חוות דעת. בכך משלבת התמ"א בין פעילויות רשויות הניקוז לבין מוסדות התכנון.

5. המהפכה הסביבתית והשפעותיה על מערכות הניקוז

5.1 חוק רשויות נחלים ומעיינות והקמת רשות נחל הירקון ורשות נחל הקישון

בשנת 1965, חוקקה הכנסת את חוק רשויות נחלים ומעיינות⁷⁸ (להלן חוק הנחל), אשר הקים מסגרת מקבילה לרשות הניקוז, לניהול מים עיליים. חוק הנחל לא מומש על ידי המדינה עד ערב הקמת המשרד לאיכות הסביבה בשנת 1988, עת הוקמה רשות נחל הירקון⁷⁹. אולם חשוב לציין, שהחוק שנחקק בשנת 1965 הסמיך את שר הפנים ואת שר החקלאות להקים רשויות נחל בכל חלקי המדינה או להעניק לרשות ניקוז סמכות של רשות נחל⁸⁰. מדוע שר הפנים ושר החקלאות מונו להיות אחראים יחדיו לביצוע החוק? מכיוון ששר הפנים ממונה על השלטון המקומי שנציגיו הם החברים העיקריים ברשויות נחל וברשויות הניקוז ושר החקלאות היה ממונה על חוק הניקוז וחוק המים באותה תקופה. מינויים של שני שרים ליישם חוק, לא בישר הצלחה ביישום כוונת הכנסת. שרי הפנים והחקלאות מעולם לא הצליחו ליישר את ההדורים ביניהם ולהקים רשות נחל. עם הקמת המשרד לאיכות הסביבה, עברו אליו הסמכויות לביצוע החוק⁸¹.

חוק רשויות נחלים ומעיינות, התבסס על הצעת חוק רשות הירקון⁸² ולכן טבעי הדבר שרשות הנחל הראשונה שהוקמה, היתה רשות נחל הירקון. רשות נחל מורכבת מנציגים של הממשלה, רשויות

1963, והשכרת שטחים אלה לצורכי גנים, נופש וספורט.

- ו. הסדרה של חלוקת המים בין המעוניינים בהם.
- ז. הסדרת דרכי השימוש בנחל או מקור המים, על ידי המעוניינים.

מבנה רשות נחל

רשות נחל אינה בנויה על בסיס אגני, אלא הצו שמקים את הרשות הוא זה שקובע את גבולותיה. לדוגמה בעניין הירקון, הגבולות של הנחל הם מהים ועד למקורות הירקון לרוחב 20 מטר מכל צד של האפיק. חברים ברשות הנחל: הרשויות המקומיות שהנחל עובר בשטח שיפוטן, בעלי מקרקעין הנושקים לנחל, משרדי ממשלה (על פי החלטת השר להגנת הסביבה) וגורמים ציבוריים אחרים. רשות נחל פועלת במתכונת דומה לרשויות שלטון רבות. יש לה מועצה והנהלה, במועצת הרשות יושבים נציגי כל הגופים המנויים לעיל. המועצה קובעת את מדיניות הרשות ותקציבה השנתי. הנהלת הרשות הנה גוף מצומצם המפעיל את כל פעולות הרשות ומיישם את המדיניות שנקבעת על ידי המועצה. ליד ההנהלה פועלת יחידת כוח אדם, המורכבת ממנכ"ל ואנשי מקצוע.

ניסיון הרשויות הוותיקות מלמד, שהן פועלות ביעילות ובהתמדה לשיקומם של נחל הקישון ונחל הירקון. מאז הקמת הרשויות השתקמו שני הנחלים באופן חלקי וכיום ניתן לשוט בהם. אין לפקפק בהישגים אלה, בהתחשב בעובדה שעד להקמת הרשויות, גידלו הנחלים הללו יתושים, שימשו כמובילי ביוב והכילו אחוזים גבוהים של מזהמים. הציבור השלים אז עם המצב בו אקוסיסטמה בריאה ומשגשגת, הופכת לתעלת ביוב. גם במסגרת של רשות נחל יש מגבלות, והעיקרית בהן היא גבול השיפוט. כפי שצוין לעיל, רשויות הקישון והירקון אינן ממונות על כל אגן ההיקוות של הנחל, אלא רק על קטע קטן שלו ולכן מוגבלת מידת ההגנה שהן מסוגלות להעניק לנחל⁷⁸.

5.2 המשך פירוק מחזור המים

אחרי חקיקת חוק רשויות נחלים ומעיינות, עסקה הכנסת בסמכויות של השרים בנושא איכות המים. בשנת 1972, שר הבריאות כיהן גם כשר החקלאות והעביר סמכויות ממשרד החקלאות למשרד

הבריאות. הכנסת תיקנה את חוק המים וקבעה שהסמכות לקביעת איכות מי השתייה בישראל תהיה בידי שר הבריאות⁷⁹. שנתיים לאחר מכן, שר הבריאות שכנע את הכנסת להעביר סמכויות לקביעת איכות מי השופכין אל משרדו, והדבר נלקח מהסמכויות שניתנו מלכתחילה לשר החקלאות⁸⁰. על כן, כבר בשנת 1974, למרות החקיקה משנות ה-50, איבד שר החקלאות את שליטתו המלאה במחזור ההידרולוגי, הן בתוך הרשויות המקומיות והן בשליטה על מי השתייה ומי השופכין.

בסוף שנות השמונים עם הקמת המשרד לאיכות הסביבה, הועברו הסמכויות להגנה על מקורות המים משר החקלאות לשר לאיכות הסביבה⁸¹. עם הקמת המשרד לתשתיות לאומיות בשנת 1996, כל חוק המים הועבר לסמכות השר לתשתיות לאומיות⁸². בשנת 2001, נחקק חוק תאגידי מים וביוב⁸³. חוק זה מאפשר לרשויות המקומיות להקים חברות מים וביוב או למכור את תשתיות המים לחברות מים מקומיות או לחברות פרטיות. בינתיים, מספר רשויות מקומיות כבר העבירו את ניהול תשתיות המים והביוב שלהן לחברות מים. בשנת 2006 נחקק תיקון נוסף לחוק המים, במטרה להחזיר לרשות הממשלתית למים וביוב חלק מהסמכויות המפוזרות שציינו לעיל⁸⁴. הרשות החדשה מאגדת בתוכה את רוב הסמכויות הדרושות לניהול משק מים לאומי, למעט קביעת איכות מים לשתייה ואיכות הקולחים למטרה כלכלית (בריאות), איכות מי התהום ומים עליים (סביבה) ומים לחקלאות, ניקוז ומניעת שיטפונות (חקלאות). היום המסגרת לניהול מקורות המים בישראל מפולגת, כפי שניתן לראות בהמשך.

אחריות לניהול מים ושימור קרקע ברשויות הממשלתיות בישראל, תמונת מצב בשנת 2008
הרשות הממשלתית למים ולביוב (הרשות הממשלתית) - הסדרת משק המים, פיתוח ופיקוח עליין; קביעת כללים למתן רישיונות הפקה; מחירים, תעריפים והיטלים; איכות, אספקה, וטיפול בשפכים; ביצוע מדיניות הממשלה; פיקוח על חברת מקורות ורשויות המים האזוריות.

מועצת הרשות הממשלתית למים וביוב - מורכבת ממנכ"ל חמישה משרדי ממשלה: חקלאות, פנים, תשתיות, איכות הסביבה והאוצר, מנהל הרשות הממשלתית למים וביוב ושני נציגי ציבור. תפקידי

המועצה:

- (1) הסדרת משק המים, פיתוחו ופיקוח עליו;
- (2) ביצוע מדיניות הממשלה שיש לה השלכות על משק המים;
- (3) קביעת כללים למתן רישיונות לפי חוק זה;
- (4) קביעת תעריפים והיטלים לשימושי המים השונים;
- (5) קביעת כללים בדבר הפקת מים, אספקתם, כמותם, איכותם, מחירם, השימוש בהם במסגרת מטרות המים, ואירוע פגיעה במים;
- (6) קביעת תקנים לטיפול במי שפכים;
- (7) פיקוח על רשות המים הארצית ורשויות המים האזוריות;
- (8) סיוע לשר התשתיות הלאומיות במילוי תפקידו כשר היוזם לעניין אמנות בין-לאומיות בנושא מים.

מנהל הרשות הממשלתית (לשעבר נציב המים) - אחראי על ביצוע מדיניות מועצת הרשות וניהול משק המים. יש לו סמכויות עצמאיות הן בחוק המים והן בחוק הניקוז.

שר התשתיות - ממונה על ביצוע חוק המים ואחראי על רשות המים וחברת "מקורות" (רשות המים הארצית).

"מקורות" - רשות המים הארצית, אחראית על אחזקת המוביל הארצי. "מקורות" מפעילה גם מפעלי מים אזוריים, מכונים לטיפול בשפכים ומכוון להתפלת מים.

רשויות מקומיות - אחראיות על אספקת מים, שירותי ביוב (ביחד עם חברות פרטיות החל משנת 2009) וניקוז בתחומן.

המשרד להגנת הסביבה - אחראי על מניעת זיהום מים והגנה על מקורות מים מפני זיהום, כולל זיהום של נחלים ואגמים, מי תהום ומי שיטפונות.

משרד החקלאות - אחראי על אספקת מים לחקלאות, רשויות הניקוז ורשויות שימור קרקע.

רשויות ניקוז - אחראיות על ביצוע מדיניות הממשלה בענייני ניקוז והגנה מפני שיטפונות. לחלקן סמכות לפעול כרשות נחל וסמכות לפעול גם כרשות שימור קרקע. לרשות ניקוז כנרת גם הסמכות להוציא לפועל של הוראות חוק איגוד ערים כנרת.

רשויות נחל - אחראיות על מניעת זיהום הנחל, שיקומו והכשרתו לצורכי קיט ונופש, קביעת מפלס המים בנחל וניקוזו הסדיר של תחום הרשות. משרד הבריאות - אחראי על איכות מי השתייה ומי

הקולחין לשימוש כלכלי.

מוסדות התכנון - אחראיים על תכנון פני המדינה, לרבות מתקני מים וביוב. טבלה, המתארת בתמצית את אחריות הגורמים הממשלתיים, נמצאת בעמוד הבא.

5.3 שינוי תפיסה באנגליה בשנות ה-70 - מעבר לטיפול אגני בניהול מערכות מים, ניקוז, הסדרת מים עיליים ומניעת זיהום קרקע

המהפכה הסביבתית שהחלה בסוף שנות ה-60 של המאה העשרים, לא פסחה על אנגליה. שם התקיימו דיונים קפדניים על מצב משק המים הלאומי. בסדרה של ניירות עמדה ומאמרים, שוכנעו מקבלי ההחלטות שהמערכת לניהול משאבי מים באנגליה מסובכת בין גורמים רבים והדבר משפיע על איכות הנחלים ומי התהום⁸⁵. בבסיס החוק האנגלי קיימת זכות הגדה למים עיליים, דהיינו מי שגר בגדת הנחל רשאי לקבל מים מהנחל, בתנאי שאינו פוגע בזכות הגדה של בעל עניין במורד הנחל. זכויות אלה פגעו בניהול מערכות מים. נוסף לכך, ובדומה למצב בארץ, לפני הרפורמה באנגליה קרוב ל 2,000 רשויות מקומיות ניהלו את מערכת האספקה והביוב, כל אחת בתחום השיפוט שלה. הוחלט, אפוא, שיש לשנות את מדיניות הניהול ולהטיל על גוף אחד, היושב באגן ההיקוות, ללמוד, להבין ולתפעל את כל מקורות המים באגן. רשות אגן זו תהיה אחראית לאספקת המים ולטיהור הביוב, לקביעת איכות הנחלים לקיט, שיט ונופש. הרשות גם תמנע בעיות ניקוז ושיטפונות. מדובר בגישה הוליסטית, אשר מציבה את המחזור ההידרולוגי במרכז ואת הפוליטיקה בצד. מדיניות זו אינה רק הוליסטית אלא הולכת עם זרם המים - מהנחל עד לצרכן, דהיינו, קודם כל קובעים כללי קיימות לנחל מבחינת כמות ואיכות ואחר כך מתקדמים בזרם המים כדי למנוע חריגה מהסטנדרט שנקבע. בשנת 1972, ערב ועידת שטוקהולם לאיכות הסביבה, פרסמו האנגלים את חוק המים, אשר ריכוז את כל הסמכויות דלעיל בעשר רשויות מים על בסיס אגני⁸⁶. רשויות אלה פעלו בהצלחה עד לתחילת השלטון של מרגרט תאצ'ר, אשר, יש אומרים כי ראתה בצמצום מעורבות ממשלתית - דת ובהפרטה - אפיפיור. היא החליטה להפריט מערכות שלמות באנגליה כדי להביאן ל"יעול",

האחריות הממשלתית למים ושימור קרקע בישראל בשנת 2008

הנושא	אחריות ישירה	אחריות עקיפה (פיקוח)
<p>א. מים בטבע</p> <p>1. מים עיליים</p> <p>(א) בטבע</p> <p>(1) נחלים ומעיינות</p> <p>(2) ואדיות גאיות</p> <p>(3) אגמים</p> <p>(ב) אספקה</p> <p>(ג) מניעת זיהום</p> <p>(ד) החדרת מים</p> <p>2. מי תהום</p> <p>(א) בטבע</p> <p>(ב) אספקה</p> <p>3. שיטפונות</p> <p>(א) ניקוז</p> <p>(ב) תיעול</p> <p>ב. מים מתועלים</p> <p>1. אספקת מים (Potable)</p> <p>(א) בתפוזת (Bulk)</p> <p>(ב) לצרכן</p> <p>2. מי ביו</p> <p>(א) גולמי - (שופכין)</p> <p>(ב) מטוהר - (קולחין)</p> <p>3. מחיר המים</p> <p>(א) מי שתייה</p> <p>(ב) מי ביו</p> <p>(ג) מי קולחין</p> <p>(ד) היטל הפקה</p> <p>א. קרקע</p> <p>1. שימור קרקע</p> <p>2. תכנון</p>	<p>רשות נחל / רשות ניקוז</p> <p>רשות נחל / רשות ניקוז</p> <p>"מנהלת הכנרת", רשות ניקוז</p> <p>כנרת, אגוד ערים כנרת</p> <p>"מקורות" - רשות המים הארצית</p> <p>אגודות מים וצרכני מים</p> <p>רשויות ניקוז ורשויות נחל</p> <p>רשויות מקומיות</p> <p>"מקורות"</p> <p>"מקורות", תאגידי מים וביו</p> <p>רשויות מקומיות</p> <p>רשויות ניקוז</p> <p>רשויות ניקוז</p> <p>רשויות מקומיות</p> <p>"מקורות", תאגידי מים וביו</p> <p>רשויות מקומיות</p> <p>רשויות מקומיות, תאגידי מים וביו</p> <p>רשויות מקומיות, תאגידי מים וביו</p> <p>המל"ב</p> <p>רשויות מקומיות, תאגידי מים וביו</p> <p>רשויות מקומיות, תאגידי מים וביו</p> <p>רשויות מקומיות, תאגידי מים וביו</p> <p>רשויות ניקוז, משרד החקלאות - אגף</p> <p>שימור קרקע וניקוז, קק"ל</p> <p>מנהל התכנון</p> <p>ועדות לתכנון ובניה (ארצית, מחוזית ומקומית)</p> <p>מנהל מקרקעי ישראל</p>	<p>המשרד להגנת הסביבה (הה"ס)</p> <p>(רשויות נחל)</p> <p>משרד החקלאות</p> <p>(רשויות ניקוז)</p> <p>שימוש: הרשות הממשלתית למים</p> <p>וביו (המל"ב)</p> <p>איכות: המ' לה"ס</p> <p>המל"ב, משרד התשתיות, (למעט מים לחקלאות: שר החקלאות)</p> <p>המל"ב, משרד הבריאות</p> <p>הה"ס</p> <p>המל"ב</p> <p>משרד הבריאות</p> <p>(רשויות תכנון)</p> <p>קידוח: המל"ב</p> <p>מניעת זיהום: הה"ס</p> <p>משרד החקלאות</p> <p>משרד החקלאות</p> <p>משרד הפנים</p> <p>רישיון: המל"ב</p> <p>איכות: מ. בריאות</p> <p>מדיניות כללית: המל"ב</p> <p>רישיון: המל"ב</p> <p>איכות: מ. בריאות</p> <p>מ. פנים, הה"ס, בריאות, תשתיות, נציבות מים, המל"ב</p> <p>משרד לתשתיות (חקלאות)</p> <p>מ. פנים + תשתיות</p> <p>מ. פנים + תשתיות</p> <p>המל"ב, מוסדות התכנון</p> <p>שר התשתיות בהסכמת שר האוצר</p> <p>ואישור הכנסת</p> <p>משרד החקלאות</p> <p>משרד הפנים, משרד התשתיות</p> <p>הלאומיות</p>

רבים החליטה הוועדה שיש להשתית את המסגרת המשפטית לניהול מים עיליים בישראל, לא על גבולות פוליטיים אלא על גבולות הידרולוגיים.

במקביל, הקמת רשויות נחל הירקון ונחל הקישון, הכניסה אלמנט נוסף - דאגה - אצל מנכ"ל רשויות הניקוז, אשר חשדו שמכויותיהם יועברו לרשויות נחל. כל אלה הביאו את שר החקלאות לערוך רפורמה ברשויות הניקוז. כפי שצוין לעיל, שר החקלאות כאחראי על חוק הניקוז הקים בשנת 1960, 26 רשויות ניקוז, בהן ניתן עיקר הכוח לסקטור החקלאי באמצעות המועצות האזוריות. בחלוף הזמן, ככל שהסקטור החקלאי איבד מכוחו והונח, ירדו רשויות הניקוז מכוחן ומתקציביהן. עד כדי כך שבשנות התשעים התעורר החשש, שרשויות הניקוז יפשוטו רגל ולא יוכלו להמשיך לפעול.

הרפורמה ברשויות הניקוז לוותה על ידי צוות מחקר מיוחד, אשר אחרי בדיקה העלה הצעות לניהול נכון על בסיס מנהל תקין⁹⁰. במסגרת הרפורמה, שינה שר החקלאות את הצו של רשויות הניקוז ובמקום 26 הוקמו 11 רשויות ניקוז, שהושתתו על בסיס אגני היקוות⁹¹. המסגרת המשפטית של רשויות הניקוז לא השתנתה ולכל אחת מהן יש מועצה והנהלה, אך תחום השיפוט השתנה כדי לאפשר להן גם ראייה אגנית וגם מרכז כובד ומשקל. ככל שיש יותר רשויות מקומיות החברות ברשות הניקוז, כך גדל התקציב למימון הפעולות. נוסף לכך, יזם מנהל אגף הניקוז במשרד החקלאות החלטת ממשלה, שאפשרה בסיס איתן לתקציב רשויות הניקוז לפעולות השוטפות. הממשלה הטילה מכסת ניקוז על מנהל מקרקעי ישראל, בעל המקרקעין הגדול ביותר במדינה, שהחל עקב כך להשתתף במימון רשויות הניקוז.

עם יישומו של הארגון המחודש, הפנימו רשויות הניקוז את האתגר שעמד בפניהן ואז התברר להן הקשר ההדוק בין המים לבין הקרקע. לא ניתן לנהל מערכת ניקוז אגנית מבלי לנהל גם נושאים של שימור קרקע, תכנון שימושי קרקע ומניעת בעיות סביבתיות הקשורות לנגר עילי⁹². הדבר הוביל לרפורמה נוספת ברשויות הניקוז, הרפורמה הסביבתית. החל בשנת 2002, רשויות הניקוז ביקשו וקיבלו סמכויות של רשות נחל, בנוסף לסמכויותיהן כרשות ניקוז⁹³. סמכויות אלה מאפשרות לרשות הניקוז לעבוד גם בנושאים

והמים זכו לטיפול כחלק מתוך סדר היום שלה. גב' תאצ'ר ידעה שאי אפשר להרוויח מקיט, נופש ושיט, ולכן הפרידה את האלמנטים לרווחת הציבור מניהול מקורות המים אשר נותנים קופונים: טיהור ביוב ואספקת מים. אלמנטים אלה נמסרו לעשר חברות מים, שמניותיהן נסחרות בבורסה, ובכך הסתיימה תקופת הזהב בניהול משק המים הלאומי באנגליה. עם הפרדת המחזור ההידרולוגי, שגשגו חברות המים והביוב, אבל הצרכן האנגלי שילם. לא הושקע כסף במערכת המים כפי שהובטח ונושאים כגון שיטפונות, ניקוז ובעיות בצורת, לא נעלמו. עם זאת, למדה אירופה את שיטת הניהול האגני בתקופה שלפני תאצ'ר והעתיקה אותו לדירקטיבה שפורסמה בשנת 2000. על פי הדירקטיבה, כל נהרות אירופה, כולל אלה החוצים גבולות, ינוהלו על בסיס אגני וכל מדינה נתבקשה להכין תכנית אגנית ותכנית פעולה בהתאם⁸⁷.

הרפורמה באנגליה לא פסחה על ישראל; היא הועתקה במנהלת הכנרת, אשר מנסה ליישם גישה הוליסטית באגן הכנרת. אמנם המנהלת מעולם לא קיבלה מעמד סטאטוטורי, אך היא משמשת שולחן עגול לקבלת החלטות הנוגעות לכלל בעיות המים באגן הכנרת: קיט, שיט, דיג, טיפול בפסולת, בנייה לא חוקית, גניבת חלוקי נחל, ואחרים⁸⁸. הרפורמה באנגליה השפיעה רבות על ניהול רשויות הניקוז בארץ. החל משנות ה-80, היו ניסיונות לאחד רשויות ניקוז על בסיס אגני. ניסיונות אלה נבנו על בסיס הסכמה הדדית, בהיעדר הסמכה מפורשת משר החקלאות. תחילה היה ניסיון לאחד את רשות ניקוז עמק בית שאן עם רשות ניקוז גלבוע. ניסיון זה קירב את הרשויות, אך לא הביא בסופו של דבר להקמת מנהלת משותפת. מה שהביא את רשויות הניקוז להתאחד בגישה אגנית, היו שני אירועים: האחד, שיטפונות חורף 1991/92. שיטפונות אלה הראו, שהמערכת לא הייתה מסוגלת להוליך מים בספיקות גדולות. הדבר הגביר את הלחץ על רשויות השלטון לעבוד בשיתוף פעולה עם גורמי שלטון נוספים, כדי למנוע שיטפונות מהסוג הקטלני. האחר, היה דוח מבקרת המדינה משנת 1993⁸⁹, בו נמתחה ביקורת חריפה על אופן ניהול מערכות הניקוז. דוח זה השפיע רבות על המערכת והוביל להקמת ועדה בינמשרדית שהמליצה על ארגון מחדש של רשויות הניקוז, אשר במסגרתו הן יושתתו על דרך ניהולית חדשה. לאחר דיונים

ומהעולם. ככל שמצב החופים החמיר, דרישות הציבור לחופים פתוחים ומסודרים גדלו, עד שהובילו להתערבות האוצר.

עם קבלת פניית האוצר, רשות ניקוז כנרת ומנהלת הכנרת, בליווי אנשי מקצוע, ניסחו תיקוני חקיקה כדי לאפשר את ניהול החופים מסביב לאגם על ידי רשות הניקוז / מנהלת הכנרת. חקיקה זו שונתה במשרד המשפטים לחוק איגוד ערים כנרת, אשר מקיים תאגיד סטאטוטורי לניהול חופי האגם. הוא מקים איגוד ערים שונה מאיגודי ערים אחרים בארץ. בדרך כלל איגוד ערים מורכב מרשויות מקומיות בלבד. איגוד ערים כנרת מורכב מרשויות מקומיות ומנציגי ממשלה וגופים ציבוריים. נוסף לכך, בדרך כלל איגוד ערים אינו תחליף לסמכויות ובעלות על קרקע של הרשות המקומית. במקרה הכנרת, סמכויות ובעלות על קרקע ברצועת החוף סביב הכנרת הועברו לידי איגוד הערים החדש.

מוקדם לדעת אם חקיקה זו מוצלחת, אולם דבר אחד ברור, רשות ניקוז כנרת תהיה הזרוע הביצועית של איגוד הערים. זו דוגמה נוספת להטלת סמכויות וכוח ביצוע על רשות ניקוז, אשר מוכיח את הנחיצות של גוף אחראי לניהול מים עיליים וסביבתו במרחב גיאוגרפי. זה מוכיח גם את הנחיצות בהקמה מסודרת של רשות אגן ולבטל את כל טלאי החקיקה הקיימים אשר מנסים לבנות אותה באמצעות חלקי חקיקה וחקיקות משנה.

6. פסקי דין תקדימיים בנושאי ניקוז

6.1 סוגי סכסוכים

בתי המשפט הישראליים נדרשים מעת לעת לדון בסוגיות מתחום הניקוז. קיימים מספר סוגי סכסוכים נפוצים שניתן לסווגם לקבוצות. ראשית, סכסוכים בין הרשויות המקומיות החברות ברשות ניקוז לבין רשות הניקוז, על רקע מכסות ניקוז או על רקע חלוקת הסמכויות בענייני ניקוז ביניהן. פעמים רבות טוענת אחת הרשויות, כי אין לה אחריות כלל או שיש לה אחריות חלקית או מקבילה לזו של הרשות האחרת. העובדה שחוקים שונים מסדירים את אחריות כל אחת מהרשויות לטיפול בנושאי הניקוז, תורמת לחוסר ודאות לגבי הגורם האחראי.

דוגמא בה הובהרה חלוקת הסמכויות בין הרשויות, נמצאת בפסק דין בעקבות הצפה באזור טבריה, שהובילה לגרימת נזקים למלון "קיסר".

האקולוגיים הקשורים לאיכות הנחלים וסביבתם. הדבר הוביל לפעילות אינטנסיבית, להקמת פארקים לאורך הנחלים ולשיפור איכות הנחלים, ככל שהדבר ניתן⁹⁴. הפעילות הדגישה את הצורך בהזרמת מים בנחלים שיובשו, כדי לספק מים לבני אדם⁹⁵.

5.4 הוספת סמכויות לרשויות הניקוז

כיום עומדות רשויות הניקוז בפני מהלך נוסף. לרשויות הניקוז שקמה-בשור וכנרת הוענקו סמכויות של רשות שימור קרקע⁹⁶. מתוקף סמכות זו, יכולה רשות הניקוז להורות לחקלאים בתחום שיפוטה על דרך ניהול אדמות חקלאיות, כדי לשמור על כמות ואיכות הנגר העילי. סמכות זו מאפשרת לרשות הניקוז לחייב שימוש בשיטות חקלאיות, כדי להקטין את כמות הסחף שמגיעה לנחלים בתחומה. סמכות זו, אם תנוצל נכון, תקטין את הוצאות רשות הניקוז לניקוי תחתית הנחל מסחף קרקע. באמצעות סמכות זו, יכולה רשות הניקוז לעצב את הסביבה באגן היקוות לצמצום אפשרות של שיטפונות. רשות ניקוז ערבה מקימה מאגרי מים, ורשות ניקוז ירדן דרומי גובה מכסות (אגרות) ניקוז, לבנות תשתית תקציבית איתנה לניהול המערכת. אולם עדיין ארוכה הדרך לטיפול בנחלים חוצי גבולות וטרם הוענקה לרשויות הניקוז סמכויות של רשויות מקומיות ותאגידי מים וביו, כדי שתיהפכה לרשויות אגניות.

5.5 איגוד ערים כנרת

כפי שצוין מספר פעמים במאמר, רשויות הניקוז הן פלטפורמה נוחה למספר מטלות הקשורות לניהול מקורות מים עיליים. מתברר, שהצירוף של גוף פוליטי, שמוקם על פי חוק, אשר שולט במרחב גיאוגרפי מוגדר ומנוהל על ידי אנשי מקצוע, הוא מרשם להצלחה. מסיבה זו, פנה משרד האוצר לרשות ניקוז כנרת / מנהלת הכנרת, בבקשה לשמש פלטפורמה לניהול חופי הכנרת. חופים אלה הוזנחו על ידי המדינה שנים רבות וכאשר מספר התיירים גדל, ההזנחה החריפה. מצד אחד, חופים מסוימים נסגרים לקהל, ומצד שני, שאר החופים מלוכלכים על ידי הקהל הרב. הרשויות המקומיות, האחראיות בדרך כלל על חופים בתחומן, לא עמדו במשימה מסיבות תקציביות. קשה להלין עליהן, כי הן רשויות קטנות המשרתות קהל גדול מהארץ

הוא אינו מתפקד כקולט מים אלא כמקור למים הזורמים לסביבתו ובמצב זה אין נפקות למערכת הניקוז. טענה זו נדחתה¹⁰¹.

בחורף 91/92 ובחורף 92/93 ירדו כמויות משקעים גדולות ברחבי הארץ, אשר הובילו להצפות ולגרימת נזקים במקומות רבים. גלי גשמים אלה הובילו לגל של תביעות שיבוב מצד חברות הביטוח, אשר נאלצו לפצות את מבוטחיהן. טענה נפוצה שהעלו רשויות הניקוז והרשויות המקומיות בהקשר זה, הייתה טענת נדירות/כוח עליון. הרשויות טענו כי האירועים שגרמו לנזק, הם אדירים בהיקפם מבחינת כמות המשקעים. הרשויות טענו כי הן נהגו באופן סביר להסדרת נושאי הניקוז שבאחריותן בהתאם לסטנדרטים המקובלים, ולא לפי אירועים נדירים כגון אלו שהתממשו. הן טענו כי לא ניתן לצפות מהן לנהוג לפי סטנדרטים חמורים, רק משום שהמקרה הנדיר אכן התרחש בפועל¹⁰².

ניתן למנות טענות הגנה נוספות של הרשויות, למשל טענות אשם תורם של התובע. לדוגמה, במקרה שרכב ניזוק בשל הצפה, טענה העירייה כי היא הציבה שלט המזהיר מפני הצפות בעת ירידת גשמים ועל כן התובע שנגרם לו נזק, נושא בחלק מהאחריות לנזק כאשם תורם¹⁰³.

6.2. "מבול" של תביעות לאחר שיטפונות 1991/92 - 1992/93

לאחר דוח מבקרת המדינה ב-1993 והרפורמה שבאה בעקבותיו, הגיעה תורה של מערכת המשפט לנער את מערכת ניהול הניקוז. בעקבות השיטפונות הגדולים בשני החורפים האלה, הגיעו לדיון בערכאות שונות ברחבי הארץ מקרים שעסקו בנזק שנגרם לבעלי רכוש או ליתר דיוק, לחברות הביטוח אשר ביטחו בעלי רכוש (לרוב היה מדובר בתביעות שיבוב של חברות הביטוח, כנגד הרשויות המקומיות, רשויות הניקוז, הממשלה ואחרים). לעתים נקבע כי האחריות לנזק היא הרשות המקומית, ולעתים נקבע שהאחריות היא רשות הניקוז.

במקרה תביעת שיבוב של חברת הביטוח "מנורה", לגבי נזקים שנגרמו בעקבות שיטפונות 1991/92 באזור חיפה והקריות, קבע בית המשפט המחוזי אחריות משותפת לכלל הגורמים: העירייה, מוסדות התכנון, רשויות הניקוז

השופט בבית משפט השלום בטבריה, הטיל אחריות ברורה לנושאי הניקוז בעיר על עיריית טבריה, לפי פקודת העיריות⁹⁷. השופט קבע, כי אין להטיל על רשות הניקוז אחריות ביחס למערכת הניקוז שבתחום שטח השיפוט של הרשות המקומית. הוא התבסס בעיקר על העובדה, שחוק הניקוז הוא חוק כללי ביחס לפקודת העיריות שהיא ספציפית יותר, ולכן היא גוברת. לכן קבע שלמרות טענות העירייה, אין לרשות הניקוז סמכות מקבילה לנושאי הניקוז בשטחה, אלא שהאחריות מוטלת כולה על העירייה⁹⁸.

שנית, תביעות על רקע נזקים שנגרמו כתוצאה מהצפות, אשר הניזוקים קושרים לניהול לא ראוי של תשתית הניקוז. תביעות כאלו מוגשות לרוב כתביעת שיבוב על ידי חברות הביטוח, אשר ביטחו את הניזוקים. לעתים מועלות הטענות כלפי הרשות המקומית, לעתים כנגד רשות הניקוז ובמקרים רבים כלפי שתיהן יחדיו וגם כנגד נציב המים.

בתביעות האחריות לנזקים, נוקטות הרשויות בכמה אסטרטגיות הגנה. הראשונה בהן, טענת היעדר תקציב. רשות הניקוז או הרשות המקומית טוענות, כי התקציב שעומד לרשותן אינו מאפשר להן לעמוד בדרישות להתקין מפעלי ניקוז נרחבים⁹⁹. למשל, בתביעה שהוגשה כנגד עיריית באר שבע וגם כנגד רשות הניקוז שקמה-בשור¹⁰⁰, טענה רשות הניקוז כי התקציב שעמד לרשותה לא היה יכול להספיק למימון הסדרת כל פרויקט ניקוז נחל באר שבע, ועל כן נאלצה להפעיל שיקול דעת לגבי בחירת המקומות בהן תשקיע את הסכומים שעמדו לרשותה. רשות הניקוז טענה כי בחרה להשקיע במפעלי ניקוז צנועים אך חיוניים, באזורים אחרים מאלו שנדרשו בתביעה. הטענה לא התקבלה על ידי בית המשפט.

טענה מקובלת נוספת שהרשויות טוענות, היא היעדר סמכות, כלומר שאין הרשות אחראית לטפל בעניין הספציפי שהוביל לגרימת הנזק, אלא שהסמכות נמצאת בידי גורם אחר. למשל, בתביעה בגין נזקים שנגרמו עקב הצפה של נחל הירקון, טענה העירייה כי אינה אחראית לנושא צינור הניקוז. מנהל אגף התשתיות בעירייה טען, שלעירייה אין יכולת לתרום לפתרון נושא ההצפות שמקורן בגאות מהירקון וכי תפקיד מערכת הניקוז הוא להעביר מי גשם לירקון, וכאשר הירקון מוצף,

והממשלה¹⁰⁴. פסק דין זה התבסס על חוות דעת מומחה בודד, אשר קבע שהמערכות בשטח לא היו ערוכות לקלוט את ספיקת המים שהיתה בשנים אלו, משום שההיערכות נעשתה לפי הנחות לא מתאימות לשטח עירוני בנוי, אלא נבנתה תשתית ניקוז לפי תכנון משנות ה-50 לספיקת מים בשטח חקלאי. כמו כן, הוזכרה פעילות רשות ניקוז נחל הקישון, אשר תרמה להצפות הקשות שהובילו לנזקי השיטפון. בית המשפט קבע אם כן, על פי טענות התביעה ובעיקר על סמך חוות דעת יחידה זו של התביעה, כי הייתה התרשלות מצד הנתבעים. פסק דין זה עורר תגובות חריפות בקרב הנתבעים, שערערו עליו. הערר לבית המשפט העליון גרר פסק דין תקדימי, אשר ביקר קשות את התנהלות הגורמים השונים הממונים על ניהול מערכות הניקוז במדינה¹⁰⁵.

בית המשפט העליון בחן מספר שאלות: שאלת הקשר בין סמכות סטטוטורית לבין חובת זהירות ברשלנות של רשות הניקוז, שאלת רשלנות העיריות, רשלנות מוסדות התכנון ואחריות המדינה. השופטת חיות, שכתבה את פסק הדין, קבעה כי למרות שאין שוויון בין סמכות סטטוטורית לבין חובת זהירות ברשלנות, לקיומה של סמכות סטטוטורית יש משקל רב בגיבוש מדיניות לגבי התקיימותה או אי התקיימותה של חובת הזהירות¹⁰⁶. כמו כן, הדגישה השופטת, כי בית המשפט נוהג כלפי המדינה באופן שבו הוא נוהג כלפי כל גוף מאוגד לעניין דין האחריות בנזיקין, שעשוי להוביל לאחריות ברשלנות¹⁰⁷.

בנוגע לרשויות הניקוז, מצאה השופטת חיות שסמכויות האישור, הפיקוח והביצוע בנושאי ניקוז, הוענקו במסגרת חוק הניקוז לתאגידים סטטוטוריים אזוריים, שאינם זרוע של השלטון המרכזי. השופטת הסיקה מכך, כי אחת ממטרות החוק הייתה להוציא מידה הבלעדיות של הממשלה את נושאי יוזמת התכנון, הביצוע והאחזקה של מפעלי הניקוז¹⁰⁸. בית המשפט קבע, כי רשות הניקוז עמק זבולון היא הגוף העיקרי המופקד על ביצוע כל הפעולות הנדרשות לשם ניקוזו היעיל של אזור שיפוט, וכי עמדו לרשותה כל הכלים הדרושים למלא את תפקידה. בהמשך לרוח הדברים שבפסק הדין בבית המשפט המחוזי, איששה השופטת חיות את הטענה, כי למרות קיומם של כלי ביצוע רבים ומגוונים שהפקיד המחוקק בידי רשות הניקוז,

רשות הניקוז עמק זבולון נהגה בחוסר מעש כמעט מוחלט בהסדרת העניינים שבאחריותה, וכי היא לא הסדירה את מפעלי הניקוז באופן שתאם את הצרכים בשטח¹⁰⁹. על כן נקבע, כי רשות הניקוז עמק זבולון התרשלה בכך שלא מילאה אחר חובת הזהירות המוטלת עליה.

לעניין חלוקת הסמכויות בין רשות הניקוז לרשויות המקומיות, נקבע בפסק הדין כי "קיומן של רשויות ניקוז אזוריות איננה מאיינת את החובה המוטלת על העיריות לדאוג לתשתיות ניקוז עירוניות מתאימות"¹¹⁰. זאת משום שלעיריות חובות סטטוטוריות בענייני ניקוז¹¹¹, המטילות עליהן חובה לדאוג לניקוז סדיר בתחומן. כמו כן, על העיריות לפקח על מצב תשתיות הניקוז העיקריות. שימוש מעשי בסמכויות אלו היה יכול, אילו נעשה כראוי, לתפקד כמונע נזק יעיל ביותר¹¹². השופט חיות קבעה, כי באי פיקוח וביצוע של התאמת תשתית הניקוז העירונית לצורכי העיר, היה משום התרשלות של העיריות.

בנוסף לאחריות של רשויות הניקוז והרשויות המקומיות, נקבע כי גם על מוסדות התכנון קיימת החובה למנוע את המצב שנוצר ערב השיטפונות. מוסד תכנון אמור להיות מודע להשפעות תכניות הבנייה שהוא מאשר על מערכות הניקוז ולדרוש את התאמת התכניות המוגשות לידין לשינויים המתרחשים בשטח. מתוקף סמכות זו, נובעת חובת זהירות המוטלת על מוסדות התכנון בעת פעילותם. בית המשפט קבע, כי משום שחובה זו לא מומשה, מוסדות התכנון צריכים לשאת באחריות ברשלנות בעניין אישור תכניות, שאינן מתאימות לתשתית הניקוז הקיימת והצפויה.

המדינה טענה כי לא ניתן לייחס לה אחריות ספציפית בנושא ניקוז, וזאת משום שהאחריות הישירה מוטלת על רשויות הניקוז והיא מתפקדת כמפקחת בלבד¹¹³. מנגד, קבעה השופטת חיות, כי העובדה שלשלטון הוקנו סמכויות פיקוח נרחבות, מעידה על כך שהנושא הנו בעל חשיבות לאומית גדולה¹¹⁴. מכאן, שהאחריות ברשלנות שתוטל על המדינה היא רשלנות בפיקוח ולא רשלנות בביצוע¹¹⁵.

המדינה ניסתה לטעון כי חברות הביטוח אמורות לגבות דמי ביטוח מתאימים לנזקים אפשריים, כמו אלו שהתממשו. אולם, לאחר דיון בעקרונות המנחים בתחלוף, הדגיש בית

שנועדו למטרות תחזוקה בתוך רצועת מגן לנחל, הרי שהם אינם אמורים לשרת את הציבור. בקשה זו נדחתה ע"י השופט מודריק. הוא קבע כי רשות הניקוז רשאית לסלול דרכי גישה לנחל ללא היתר בנייה, על פי חוק התכנון והבנייה. הדרישה לקבלת היתר עבור סלילה והתקנה של דרך עפר, תפגע ביכולתה של רשות הניקוז לבצע את תפקידה על פי החוק. כמו כן קבע השופט, כי שבילים אלה יכולים לשמש גם להולכי רגל ולרוכבי אופניים ליד נחלים, כל עוד אין פעילות זו עיקר הדברים.

פסקי דין אלו עולים בקנה אחד עם פסק דין אחר בבית המשפט העליון, שעסק ביחסי הגומלין של סמכויות בין רשויות. בית המשפט העליון דן בערעור המדינה על זיכוייה של המועצה האזורית גליל תחתון בבית המשפט המחוזי, מאחריות לעבירה על החוק למניעת מפגעים¹²¹, בעניין אתרי פסולת פיראטית שפעלו בתחום שיפוטה¹²². הדמיון בין מקרה זה לאחריות הרשויות המקומיות ורשות הניקוז, הוא שגם כאן לא הקל בית המשפט עם מידת האחריות החלה על מועצה אזורית, הגם שלא היא גרמה למטרד ואפילו שאחריותה כללית ולא ספציפית. המועצה אחראית למטרדים אלה, משום שהם גרמו למטרד ריח חזק ובלתי סביר בתוך תחום שליטתה ופיקוחה. כמו כן קבע בית המשפט, כי בנסיבות מסוימות חייבת המועצה האזורית להפעיל את סמכויותיה ואין לה אפשרות להפעיל שיקול דעת, מה גם שהיא ידעה על המפגעים שנדרונו ובכל זאת לא עשתה דבר כדי לטפל בהם בעצמה או לדאוג כי גורם אחר יטפל בהם.

מפסקי דין אלו משתקפת הגישה, כי בית המשפט אינו מוכן לקבל תירוצים בגין אי מימוש סמכויות ואחריות של הרשויות השונות. השאיפה היא למלא באופן מיטבי את התפקידים המוטלים על רשות מכוח החוק, ובית המשפט אינו מוכן שגורמים חיצוניים יחבלו ביכולת זו. בד בבד, בית המשפט אינו מוכן לקבל מצב בו הרשות מתרצת את אי מעורבותה באמצעות הטלת אחריות על גורם מקביל או בשיקולי תקציב, בייחוד כאשר אין הוכחה לכך שהרשות נתנה את הדעת על הדרכים בהן היתה יכולה לממש את תפקידה או שהפעילה את כל שיקול דעתה בנושא. בתי המשפט מבקשים ניהול מיטבי על בסיס אגני,

המשפט כי העיקרון הוא שהמזיק אמור לשלם בגין הנזק שהוא גורם¹¹⁶. בית המשפט לא קיבל את טענת המדינה כי היא נקטה בפעולות סבירות בענייני ניקוז על רקע האוטונומיה של רשויות הניקוז, וקבע שהמדינה לא הצליחה להראות שהפעילה שיקול דעת בהפעלת סמכות הפיקוח שברשותה¹¹⁷. לאור זאת, קבע בית המשפט העליון, שהתנהגותה של המדינה היתה בגדר מחדל מתמשך והתנהלות בלתי סבירה, שהגיעה עד כדי רשלנות¹¹⁸. לגבי טענת היעדר תקציב שהועלתה על ידי המדינה, קבע בית המשפט, כי אם המדינה לא רצתה לתקצב את נושא הניקוז, היה עליה לעשות כן במסגרת מדיניות מוצהרת. על כן, המדינה אינה יכולה לתלות את אי העשייה של רשויותיה באילוץ תקציבי¹¹⁹.

לסיכום פסק הדין, ניתן לומר כי בית המשפט חידד את העובדה שמדיניות של אי עשייה מצד המדינה איננה מדיניות אלא רשלנות, אשר עליה לשאת באחריות לגביה. כמו כן נקבע, כי על רשויות הניקוז והרשויות המקומיות לעשות שימוש בסמכויות הנרחבות שברשותן, ביתר הרחבה. במידה שאינן יכולות לבצע את מה שהן רואות לנכון, עליהן להתריע על כך כלפי מעלה, בניסיון למנוע נזקים עתידיים כדוגמת אלו שנדרונו בפרשה זו.

פסק דין נוסף, שניתן בבית המשפט העליון, עסק בשאלת מסגרת הסמכות של רשות ניקוז בהיבט אחר, רצועות מגן. במקרה זה הוגשה בקשה על ידי חברת "הזרע", למתן צו ביניים כנגד רשות הניקוז ירקון, במטרה שזו תחדל להמשיך ולסלול דרכי תחזוקה לאורך נחל איילון. חברת "הזרע" הגישה את הבקשה על רקע התנגדותה להקמת התכנית של פארק איילון¹²⁰. היא טענה כי סלילת דרכי העפר נעשית שלא בסמכות וללא היתר ממוסדות התכנון. רשות הניקוז טענה, כי הדרכים נסללו במסגרת חוק הניקוז ומשמשות לשם תחזוקת מפעלי הניקוז. בית המשפט, באמצעות השופט בייניש, קיבל את טענת רשות הניקוז ודחה את הערר של חברת "הזרע". כעבור זמן מה הגישה שוב חברת "הזרע" בקשה לצו ביניים בבית המשפט המחוזי, בבקשה שיפסיק את עבודות רשות הניקוז. הפעם טענה, כי השבילים שנסללים משמשים להולכי רגל ולרוכבי אופניים, ואם אכן מדובר בשבילים

עלולה להוביל להתנגשויות בתחום ניהול מערכות ניקוז ולמדיניות מים בזבזנית, יקרה, עם השלכות סביבתיות חמורות. ישנן דעות כי באמצעות חוק תאגידי מים וביו, ידו החזקה של האוצר מובילה את המדינה ממדינת רווחה למדינת רווחה. אוצרות המדינה, כולל אוצרות הטבע, עוברים מידי הציבור לידיים פרטיות, דבר שמביא עושר למיעוט בלי אושר לרבים. התחרות המונחת בבסיס המדיניות הזו אינה צריכה להיות מטרה, אלא אמצעי להוזלת מחיר ולמניעת בזבזים בלבד.

יש החוששים כי גישת משרד האוצר, תגדיל את הפער בין עשירים לבין עניים ותקצין את החיכוכים בחברה. מים אינם מצרך שבמחסור כדעת הכלכלנים, אלא משאב טבע חיוני לקיום חיים. "Water is the bloodstream of the biosphere..."¹²³ הפיכת מקורות המים למצרך, מעוותת את הערך הטמון בטיפת מים: הערך האקולוגי, הקיומי והאסתטי. מדינת ישראל ראויה למדיניות מים המושתתת על ניהול ממשלתי מושכל. אין תחליף לניהול אגני, כבסיס לביצוע מדיניות ממשלתית מושכלת במים זורמים¹²⁴. יש להכיר ביכולת של רשות אגן לאזן בין צורכי אקולוגיה, מים וקרקע, כדי לתת למים את מקומם הראוי במדינה מודרנית, הפועלת על בסיס העיקרון של פיתוח בר קיימא. יש לראות במקורות המים העיליים מקור לקיט, נופש, פעילות דתית, דיג, ושימושים רבים אחרים, ויש לבנות מנגנון הוליסטי להשגת מטרות רבגוניות אלה. רשות ניקוז אשר תקבל סמכות של רשות אגן, היא התשובה לדרישות פיתוח בר קיימא. ישראל זקוקה לשלטון (governance) נכון של מימיה העיליים; הבסיס קיים, אם רק ניתן למים להוביל אותנו ולא לכסף.

"Governance has to make possible a managing of land-based human activities within river basins that influence availability and quality of water resources and therefore the ecosystems depending on those resources.... It means achieving multiple river basin management goals in multiple sectors by optimizing the different ecosystem functions of importance for those sectors. And, it means to secure resilience—and their capacity to withstand environmental pressure and perturbations without degradation or collapse—of crucial ecosystems".¹²⁵

מדד ההצלחה בניהול נגר עילי הוא בשיקום והגדלת מגוון המינים הניזונים ממים עיליים,

ואם אין לגוף אחד סמכויות מספיקות, אזי נחוץ שכל הגופים הסטאטוטוריים יעבדו בהרמוניה כדי להשיג את המטרה. פסקי הדין ממחישים את החשיבות של ראייה אגנית והוליסטית, ומניעת נתק בין המערכות השונות הממונות על שיקום נחלים ומזעור נזקי סחף קרקע ושיטפונות.

7. סיכום

בישראל אין כיום ניהול אינטגרטיבי של המערכת ההידרולוגית ואין גוף המחבר בין תכנון ופיתוח, שימור קרקע ומקורות המים. ניצול מקורות המים מקבל עדיפות אצל הרשות הממשלתית למים וביו, ולאחריו שמירה על מקורות המים, שמירה על מערכת הניקוז, מניעת סחף קרקע, ההגנה מפני שיטפונות, ושיקום נחלים. התוצאה היא שהמשרד לאיכות הסביבה, משרד החקלאות, משרד הבריאות ומוסדות התכנון, עומדים בפני עובדות גמורות כגון שאיבת יתר, זיהום מי התהום והנחלים, אספקת מים שאינם ראויים לשתיה, ומערכת ניקוז שזקוקה להשקעות רבות כדי למנוע אסון עתידי משיטפון.

שר החקלאות אחראי על הניקוז ברמה ארצית. השר קובע את התחום הגיאוגרפי של רשויות הניקוז, מאשר את תכניות מפעלי הניקוז, את תקציביהן ואת חוקי העזר שלהן. ברמה האזורית, פועלות רוב רשויות הניקוז על בסיס מפעלי ניקוז לקטעים של נחל, ובתחומי העיר, פועלים מחלקות ניקוז עירוניות או תאגידי מים וביו, בנפרד מרשויות הניקוז. אין תיאום מספיק בין רשויות הניקוז, הרשויות המקומיות ומוסדות התכנון, ומוקדם מדי לדעת אם הקריטריונים שנקבעו על ידי אגף הניקוז והתכנון של תמ"א 34/4, יובילו לשינוי מהפכני בנושא זה. אולם תמ"א זו לניקוז ונחלים, הנה מסמך מדיניות ראוי שאמור להציע את ישראל לניהול אגני ההיקוות. בעת כתיבת דברים אלה, עדיין מוקדם מדי לדעת אם הרשות הממשלתית למים וביו תדע לעבוד בשיתוף עם רשויות הניקוז או שמא תרצה לבלוע אותן. הרשות הממשלתית למים וביו, הוקמה ללא זרוע ביצועית והיא חייבת להישען על רשויות הניקוז/נחל אשר עובדות בשטח. אם רשות המים תדע לעבוד עמן כדי ליישם את מדיניות הרשות הממשלתית למים וביו, תוכל המערכת לתפקד כראוי. כנגד, הקמת תאגידים עירוניים למים וביו,

C. Wiel, Running Waters, 22 Harvard L. Rev. 190, 191 (1909)

⁸"The right of thirst is juridically the right to take water to quench one's thirst or to water one's animals." Dante Caponera, see above note 1 at 74.

⁹Ludwik A. Teclaff, Water Law in Historical Perspective, William S. Hein Co. 1985 at p. 6 et al. For an excellent presentation of the right of prior appropriation, the water law in the western part of the United States, see, Justice Gregory J. Hobbs, Jr. 1 Water Law Review 1 (1997).

¹⁰שימור קרקע וניקוז בישראל, תש"ט-תשל"ה, 1975-1949.

אגף שימור קרקע וניקוז, נציבות המים, 1976, עמ' 85.
¹¹מרדכי וויץ, יצחק עופר, המרעה הטבעי, שימור קרקע וניקוז בישראל, 1949-1976, האגף לשימור הקרקע ולניקוז, נציבות המים, משרד החקלאות, 1976 עמ' 57.

¹²Henry Kendall, Village Development in Palestine during the British Mandate, Waterlow & Sons, Ltd., London, 1949 at 14.

¹³Drainage (Surface Water) Ordinance, P.G. #1204 June 1942.

¹⁴אריה שחר, תחיקת שימור קרקע וניקוז, שימור קרקע וניקוז בישראל, 1949-1976, אזכור 9 דלעיל, עמ' 85.

¹⁵פקודת בניין ערים, 1936; פקודת העיריות, 1925.
¹⁶Municipal Corporations (Sewerage, Drainage and Water) Ordinance 1936, P.G. 1 p. \$ 3 (1).

¹⁷חוק קידוחי מים, תשט"ו-1955, ס"ח 182 עמ' 84.

¹⁸חוק מידרת מים, תשט"ו-1955, ס"ח 182 עמ' 82.

¹⁹חוק הניקוז וההגנה מפני שיטפונות, התש"ח-1957, 236 עמ' 4.

²⁰להלן - חוק המים.

²¹ראה לדוגמא Teclaf, הערה 9 דלעיל.
²²סעיף 11.

²³ס"ח תשס"ו מס' 2057 מיום 15.6.2006 עמ' 331 (ה"ח הממשלה תשס"ו מס' 236 עמ' 298)

²⁴בג"צ 221/64 המועצה המקומית פרדס חנה ואח' נ. שר החקלאות ואח' פ"ד כרך י"ח (4) 533.

²⁵סעיף 4 לחוק המים.
²⁶שם, סעיף 5.

²⁷שם, סעיף 6.
²⁸תיקון מס' 19 לחוק המים, 2004.

²⁹ראה לעניין זה מאמר של רחל אדם, "האם זכאי הנחל למים?" מים והשקיה, גיליון 427 (מאי 2002) והתשובה של ראובן לסטר "ליישם את החוקים", מים והשקיה, גיליון 432 (אוקטובר 2002).

³⁰סעיף 2 לחוק המים.
³¹שם, סעיף 46.

³²שם, סעיף 49.
³³שם, סעיף 140.

³⁴תיקון מס' 22 לחוק המים, 2006.
³⁵חוק הרשויות המקומיות ביוב, תשכ"ב-1962.

³⁶שם, סעיף 8. ייתכן וכוונת המחוקק היא למפעל הביוב ולא מי השופכין, אולם לא ניתן לדעת זאת מדברי החוק.

³⁷אין מקום במאמר זה "לקטול" את מגמת האוצר להפריט את המדינה ואוצרות הטבע שלה. נכתב מספיק על הכישלון בהפרטת משאבי מים בעולם ודי לזכור שמערכות אספקת מים וטיפול בביוב בארה"ב מנוהלות על ידי רשויות מקומיות ולא חברות פרטיות. הסיבה היא שאי אפשר להפריט משאבי מים; הדבר היחיד שניתן לעשות הוא לפזר את הניהול

כולל האדם. על הגופים המנהלים את הנגר העילי לעצב מדיניות, שמביאה להעשרת המגוון הביולוגי ולמנוע הכחדתו.

8. הערות, מראי מקומות והבהרות לנוסח הדברים

¹מאמרים רבים קובעים כללי ניהול אלה, אבל ברצוננו להפנות את הקורא לספר של אחד מגדולי חוקרי המים במאה ה-20, דנטה קפונירה:

Dante Caponera, National & International Water & Administration, Kluwer Law Int'l, 2003, page 25: "From available historical records and the study of socio-anthropological patterns of development which cannot be analyzed in this brief note, it may be safely assumed that the development, growth, and disappearance of hydraulic civilizations was also closely related to the flexibility and effectiveness of the administrative, managerial, religious and legal controls put on waters."

²Malin Falkenmark, "Water is the Entry Point to Better Ecosystem Management," Stockholm Water Front, A Forum for Global Water Issues, No. 3 October 2006, page 14.

³יואב כסלו, מים והשקיה, אוגוסט 2006, עמ' 8. ראה גם ראובן לסטר, "ליישם את החוקים", מים והשקיה, אוקטובר 2002 עמ' 26.

⁴יש התייחסות לרשויות הניקוז בספר של עפר שפיר, אגרות והיטלי פיתוח ברשויות מקומיות, כרך א' עמ' 79 (1998).

⁵Article 46 of the 1922 King's Order in Council states: "The jurisdiction of the Civil Courts shall be exercised in accordance with the Ottoman Laws in force in Palestine on 1st November 1914, and such Ottoman Laws as have been or may be declared in force by Public Notice, and such Orders in Council, Ordinances and Regulations as are in force in Palestine at the date of the commencement of this Order, or may hereafter be applied or enacted". The 1940 Amendment to the Palestine Order in Council of 1922 proclaimed that the surface water of the country should be formally vested in the Government. The Amendment and the regulations promulgated thereunder severed all private rights in surface water and created a power in the Water Commissioner to restrict rights of use in all water sources in controlled areas.

⁶Mejelle, Art. 1234. "Water flowing under ground is not the absolute property of any person." Mejelle, Art. 1235. "Seas and large lakes are free". Mejelle, Art. 1237. Mejelle, Art. 1238. Also see Mudir El Asqaf al Islawiyah El'Am v. Att'y. Gen'l, 10 P.L.R. 187 (1943).
⁷Mejelle, Arts. 1264, 1265, 1266.8 Mejelle, Art. 1265. Mejelle, Art. 1239.

⁷Dante Caponera, note 1 above at 75; Samuel

הרשות. פעולה זו היא חריגה ולא נבחנה משפטית.
⁶² "חלוקת האחריות": "בחוק הניקוז לא קיימת הגדרה של מערכות הניקוז. נהוג להבחין בין מערכת ניקוז ארצית ואזורית ובין מערכת ניקוז מקומית. אבחנה זו אומצה בפסיקת בתי המשפט בערכאות הנמוכות. מערכת הניקוז האזורית מתבססת על הנחלים ויובליהם, המשרתים מספר רשויות מקומיות, והיא באחריות רשויות הניקוז. מערכת הניקוז המקומית היא מערכת פנימית המשרתת את הרשות המקומית ואת תושביה או את צרכי הפיתוח החקלאי, והיא באחריות הרשות המקומית. התברר, כי היו מחלוקות בין רשויות הניקוז והרשויות המקומיות בשאלה אם ניקוז הוא אזורי או מקומי וכתוצאה מכך בשאלה על מי מוטלת החובה להסדירו. מן הראוי שמשדרי הממשלה הנוגעים בדבר יפעלו יחד, על מנת להגדיר באופן ברור את מערכות הניקוז השונות, וכנגזר מהן את תחומי אחריותן של רשויות הניקוז ושל הרשויות המקומיות בכל הנוגע להסדרת תשתית הניקוז." דוח מבקר המדינה, 1993.
⁶³ כך נקבע גם בפסיקה - ע"א 2906/01 עיריית חיפה נ. "מנורה" חב' לביטוח בע"מ.
⁶⁴ פנייה לתגובות בנושאי ניקוז: תקופות חזרה להגנה מהצפות ותיחום בין רשויות ניקוז לרשויות מקומיות, צבי רבהוק, מנהל אגף שימור קרקע וניקוז, משרד החקלאות, 20 אוקטובר 2006.
⁶⁵ סעיף 23.
⁶⁶ סעיף 23.
⁶⁷ בעניין זה, ניתן לראות את העבודה המשותפת בין רשות ניקוז ים המלח לבין מע"צ בעניין גשר על נחל ערוגות.
⁶⁸ חוק התכנון והבניה, ס' 6, 7.
⁶⁹ חוק רשויות נחלים ומעיינות, תשכ"ה-1965.
⁷⁰ צו רשות נחל הירקון, תשמ"ח-1988.
⁷¹ סעיף 2 לחוק רשויות נחלים ומעיינות.
⁷² תוקן, ספר החוקים תשס"ב מס' 1852 מיום 27.6.2002, עמ' 454.
⁷³ דברי הסבר לחוק רשויות נחלים ומעיינות.
⁷⁴ תפקיד ההנהלה לפי סעיף 12(ב) לצו רשות נחל הירקון: ההנהלה תפעיל ותבצע את תפקידי המועצה וסמכויותיה, למעט: קביעת מדיניות רשות הנחל. אישור תכנית עבודה שנתית של רשות הנחל. אישור התקציב השנתי של רשות הנחל. הוצאת חוקי עזר של רשות הנחל. הטלת מכסות לפי סעיף 18(א) לחוק. כל תפקיד או סמכות שהמועצה החליטה במפורש כי יהיו בידיה.
כמו כן ההנהלה אחראית על מינוי והעסקה של עובדים לפי סעיף 13 לחוק ועל ניהול כספי הרשות, ביצוע ההתקשרויות החוזיות ועריכת המכרזים לפי סעיף 14.
⁷⁵ סעיף 3 לחוק מגדיר את תפקידי רשות נחל, שכולל הסדרתה של זרימת המים בנחל, במגמה לשמור על מפלס מים מתאים בכל חודשי השנה; ניקוזו הסדיר של תחום הרשות; קביעת תוראי לנחל או העברתם של מי הנחל או מקור המים לאפיקים אחרים; הסרת מפגעי תברואה הכרוכים בזיהום הנחל או מקור המים או בזרימתם המשתנית של מימיו; שמירת הנוף ומתנות הטבע לאורך הנחל בשתי גדותיו או מסביב למעיין, למעט נחל ומעיין שבתחומי גן לאומי או שמורת טבע, כמשמעותם בחוק גנים לאומיים ושמורות טבע, תשכ"ג-1963, והכשרת שטחים אלה לצרכי גנים, נופש וספורט; הסדרתה של חלוקת המים בין המעוניינים בהם; הסדרת דרכי השימוש בנחל או במקור המים על ידי המעוניינים.
⁷⁶ סעיף 12.

הממשלתי בין אחראי על כל משאבי המים לבין רגולטור ממשלתי האחראי על אספקת מים וביוב. דבר זה מנוגד לניהול הוליסטי של המערכת ומביא לסרבול במקום יעילות. על נושא זה כדאי לעיין במאמרים:
Regulating the Water Industry: Swimming Against the Tide or Going through the Motions, by Richard Schofield and Jean Shaoul, The Ecologist Vol. 27 #1 Jan. Feb. 1997; The Honorable Hulihi Williams Moore, Competition: The Wrong Goal, 39 Univ. Rich. L.Rev. 739 (2005);
מאיר ניצן ראש עיר ראשון לציון גייס 85 מיליון שקלים בהנפקת אגרות חוב. הנדסת מים נוזלים והשקיה (2005).
³⁸ שיחה עם ד"ר דוד פרגמנט, מנהל רשות נחל הירקון, אפריל 2007.
³⁹ סעיף 1 לחוק המים.
⁴⁰ סעיף 1 חוק הניקוז וההגנה מפני שיטפונות.
⁴¹ Jerome C. Muys, George William Sherk and Marilyn C. O' Leary, *Utton Transboundary Resources Center Model Interstate Water Compact*, University of New Mexico School of Law, 2006.
⁴² חוק הניקוז וההגנה מפני שיטפונות, סעיף 4 ו-5. כאן אחת החולשות בחוק. התרת האיסור היא בידי נציב המים ולא בידי רשות הניקוז. חקיקה יעילה אמורה להעניק סמכות אכיפה לגורם בשטח ולא לפקיד בתל אביב.
⁴³ חוק הניקוז וההגנה מפני שיטפונות, סעיף 2.
⁴⁴ סעיף 17.
⁴⁵ דן רוזנצביג, רה-ארגון רשויות הניקוז, מסמך לעדכון ואישור שר החקלאות יעקוב צור, 23 אוקטובר 1994 עמ' 2: "אין בסמכויות רשות הניקוז שליטה ישירה על תשתית הניקוז המקומי, ואין כוונה להטיל זאת עליה".
⁴⁶ חוק הניקוז מסייג עבודת ניקוז של הרשות המקומית מעבודה של רשויות הניקוז. "9. הוראות מיוחדות לתיעול עירוני: פרק זה אינו חל לגבי עורקים שהותקנו או סודרו במיוחד על ידי עירייה או מועצה מקומית בתחומה לשם ניקוז מי גשמים אלא במידה שקבע שר החקלאות, בהתייעצות עם שר הפנים, לגבי אותה עירייה או מועצה מקומית, בהודעה שפורסמה ברשומות."
⁴⁷ הצעת חוק אגני ההיקוות של פרופ' ראובן לסטר.
⁴⁸ חוק הניקוז וההגנה מפני שיטפונות, סעיף 11.
⁴⁹ סעיף 10.
⁵⁰ סעיף 17.
⁵¹ סעיף 44.
⁵² סעיף 44 ו-ב.
⁵³ סעיף 36.
⁵⁴ סעיף 14.
⁵⁵ ראה למשל תכנית ניקוז אגנית של רשות ניקוז ירדן דרומי, 2006. בית המשפט העליון קבע: "מפעל ניקוז: הכוונה היא למיזמים, אשר נועדו להבטיח את ניקוזו הסדיר של האזור שבו הם ממוקמים, וברוך זו להגן על האינטרסים המנויים לעיל" דנג"צ 3201/96 שר החקלאות נ' המועצה האזורית עמק לוד. פ"ד נא(3) 661.
⁵⁶ סעיף 18.
⁵⁷ סעיפים 20 ו-21.
⁵⁸ סעיף 23.
⁵⁹ סעיף 29.
⁶⁰ סעיף 36.
⁶¹ רשות ניקוז ירדן דרומי דורשת ממנהל מקרקעי ישראל ארנונת ניקוז על אדמת מנהל קרובה למפעל ניקוז של

במקרה דומה טענה עיריית בני ברק כי נגרמות הצפות בשל התנהגות התושבים המשליכים לכיוב חפצים הגורמים לסתימה, תופעה שהעירייה מנסה להילחם בה. ראו ע"א 73/86 שטרנברג נ' עיריית בני-ברק או למשל בתביעה של בעל חממות לנזק שנגרם לו עקב הצפות, טענה רשות הניקוז נחל חדרה כי בעלי החממות נהגו לזרוק פסולת לאפיק הנחל, דבר שתרגם לסתימתו ולהצפות. ראו ערעור אזרחי 663/94 עקאר סאלח פואד נ' רשות הניקוז נחל חדרה.

¹⁰⁴ תיק אזרחי 307/93 "מנורה" חברה לביטוח בע"מ.

¹⁰⁵ פירוש חופה נ' "מנורה" - ראו הערה 46.

¹⁰⁶ בע"א 862/80 עיריית חדרה נ' זוהר פ"ד ל"ז (3) 757, 765 אליו מפנה השופט חיות בפסקה 17 לפסק דינה בחיפה נגד "מנורה", ראו הערה 46.

¹⁰⁷ בפסקה 17 לפסק הדין בפרשת חיפה נגד "מנורה", ראו הערה 46.

¹⁰⁸ זאת בין השאר, מתוך שאיפה לשתף בעניינים אלו את בעלי הקרקעות ותושבי היישובים המעוניינים. שם, פסקה 19.

¹⁰⁹ שם, פסקה 23 (בבית המשפט המחוזי נקבע באותו הקשר, כי מחל זה יצר מצב בשטח ש"גבל בהפקרות, בוודאי בכל הקשור למורד נחל קישון"). פסקה 136 לפסק הדין במחוזי.

¹¹⁰ שם, פסקה 28.

¹¹¹ סעיפים 235 - 248' לפקודת העיריות.

¹¹² פסקה 27 לפסק הדין בפרשת חיפה נגד "מנורה", ראו הערה 46.

¹¹³ שם, פסקה 35.

¹¹⁴ שם, פסקה 39.

¹¹⁵ שם, פסקה 37.

¹¹⁶ שם, פסקה 40.

¹¹⁷ טיעוני המדינה בהקשר זה אינם אלא ניסיון להעטות בדיעבד אצטלא של שיקול דעת ושיקולים של מדיניות על חוסר מעש ועל מחל מתמשך בכל הנוגע להפעלת סמכויות הפיקוח על רשויות הניקוז מאז חקיקתו של חוק הניקוז... אוסף ואומר כי אפילו היתה המדינה מאמצת באופן מודע מדיניות של אי התערבות כנטען על ידה, ספק אם ניתן היה לראות במדיניות כזו מדיניות סבירה השוללת אחריות בנזיקין". פסקה 43 לפסק הדין בפרשת חיפה נגד "מנורה", ראו הערה 46.

¹¹⁸ שם, פסקה 45.

¹¹⁹ פסקה 47, בעניין סוגית התקציב, התבסס בית המשפט על חוות דעת של גדעון צור, נציב המים לשעבר, שטען כי לאורך השנים הושם בנציבות המים דגש על פיתוח מקורות המים ורוב תקציבי הפיתוח הופנו להבטחת אספקת מים לצורכי תושבי המדינה ולא לתשתיות ניקוז. וכי רק בשנת 1989 הוכרה נחיצותה של השקעה רצינית לפיתוח מפעלי ניקוז ואז התברר כי אין די תקציב לשם כך מתוך התקציב הכולל לנושא פיתוח משק המים, שאינו גדול כשלעצמו.

¹²⁰ בר"ם 7190/04 חברת "הזרע" (1939) בע"מ נ' יו"ר הוועדה המחוזית לתכנון ובנייה מחוז תל-אביב.

¹²¹ החוק למניעת מפגעים, התשכ"א - 1961.

¹²² רע"פ 7861/03 מדינת ישראל נ. המועצה האזורית גליל תחתון.

¹²³ ראה Malin Falkenmark, הערה 2, עמ' 13.

¹²⁴ יישום נרחב של חקלאות משמרת מחייב פעילות מערכתית מקיפה הכוללת התארגנות חקלאים על בסיס גיאוגרפי של אגני ניקוז מול תמיכה ציבורית מקצועית ארגונית וכלכלית. פיתוח חקלאות משמרת משאבי קרקע וסביבה חקלאית: תכנית ארצית רב שנתית, משרד החקלאות, פב' 2007.

¹²⁵ ראה הערה 2.

⁷⁷ ראה תכנית האב לירקון, עורך אריה רחמימוף, 1996.

⁷⁸ נוסף לכך, למקורות הירקון מגיע ביוב מקלקיליה, שנמצאת מחוץ לגבולות הקו הירוק.

⁷⁹ סעיף 52 לפקודת בריאות העם מס' 40 לשנת 1940.

⁸⁰ תיקון מס' 5 לפקודת בריאות העם, 1973 סעיף 65 (א).

⁸¹ תיקון מס' 7 לחוק המים, 991; החלטת הממשלה מספר 525 מיום 28 במאי, 1989.

⁸² החלטות הממשלה מספר 117 מיום 7 ביולי, 1996 ומספר 203 מיום 27 באוגוסט, 1996.

⁸³ חוק תאגירי מים וביוב, תשס"א-2001.

⁸⁴ חוק הסדרים במשק המדינה (תיקוני חקיקה להשגת יעדי התקציב והמדיניות הכלכלית לשנת הכספים 2006), התשס"ו-2006 - תיקון חוק המים מס' 22.

⁸⁵ Ian Sinclair, A Study of the Water Industry in England and Wales as Changed by the Water Act of 1989, FAO. Water Act 1973, Chapter 37.

⁸⁶ Water Act 1973.

⁸⁷ EU Water Framework Directive 2000.

⁸⁸ פרופ' משה גפן ויצחק גל, ספר הכנרת, משרד הביטחון ומנהלת הכנרת, 1992 עמ' 322-323.

יצחק גל, מנהלת הכנרת והפעולות לשמירת הכנרת, רשות ניקוז כנרת - מנהלת הכנרת, 1990.

Richard E. Laster, Lake Kinneret and the Law, Israel Law Review volume 12, no. 3.

⁸⁹ דוחות ביקורת על תשתית הניקוז במדינה; נתיבי איילון-תכנון, תפעול ותחזוקה של תעלת איילון; התשנ"ג-1993.

⁹⁰ דוח מרמט - מדרוך להפעלת רשות הניקוז, בהדרכתו של ד"ר עמרם פרוג'נין, משרד החקלאות/נציבות המים, ינואר 1996.

⁹¹ צו הניקוז וההגנה מפני שיטפונות (הקמת רשויות ניקוז) (תיקון), התשנ"ז - 1996.

⁹² ראה Malin Falkenmark, הערה 2, עמ' 14.

⁹³ צו רשויות נחלים ומעיינות (הטלת תפקידי רשות נחל על רשויות ניקוז), תשס"ג-2003.

⁹⁴ מספר דוגמאות: נחל אלכסנדר, נחל לכיש, נחל באר-שבע וכו'.

⁹⁵ בנחל הירקון זרמו 220 מיליון מ"ק מים בשנה לפני החיבור עם המוביל הארצי. כיום מוזרם לירקון 4 מל"מ"ק בלבד.

⁹⁶ לעניין שקמה בשור ראה מכתב משר החקלאות לרשות ניקוז שקמה בשור, דצמבר 2004 ולעניין רשות ניקוז כנרת ראה מכתב משר החקלאות לרשות ניקוז כנרת, מאי 2007.

⁹⁷ פקודת העיריות (נוסח חדש).

⁹⁸ ת"א 30/92 "איילון", חברה לביטוח בע"מ נ' עיריית טבריה.

⁹⁹ ראו ת"א 36976/92 "מנורה" חברה לביטוח בע"מ נ' עיריית באר שבע, שם רשות הניקוז טענה כי חוסר תקציב הדרוש להסדרת הנחל מנע הן ממנה והן מהעירייה לבצע את תפקידיה.

¹⁰⁰ ת"א 2267/98 "סהר" חברה לביטוח בע"מ נ' עיריית באר שבע.

¹⁰¹ ת"א 1193/99 שמואל בן ציון נ' עיריית בני ברק.

¹⁰² יא"ו למשל: ע"א 003229/03 רשות הניקוז קישון נ' פנחס אסור, ע"א 1218/01 רשות הניקוז - בקעת בית שאן נ' קיבוץ שלוחות, ת"א 1950/94 הרצל תבור נ' "מקורות" חברת מים בע"מ, ערעור אזרחי 663/94 עקאר סאלח פואד נ' רשות הניקוז נחל חדרה, 066732/03 עינב ניסים נ' עיריית הרצליה, ע"א 2906/01 עיריית חיפה נ' "מנורה" חברה לביטוח בע"מ.

¹⁰³ 021157/02 "הדר" חב' לביטוח בע"מ נ' עיריית חיפה.

ניהול אינטגרטיבי של נחלים בישראל*

נחמיה שחף¹; יוליה אלכסנדרוב²; גדעון אורון³; יהודה גרדוס⁴

¹ מנכ"ל, רשות ניקוז נחל שיקמה-בשור;
² ד"ר, המחלקה לגיאוגרפיה ופיתוח סביבתי, אוניברסיטת בן גוריון בנגב;
³ פרופסור, המחלקה לתעשייה וניהול, אוניברסיטת בן גוריון בנגב;
⁴ פרופסור, המחלקה לגיאוגרפיה ופיתוח סביבתי, אוניברסיטת בן גוריון בנגב;
*מבוסס על עבודת דוקטורט של המחבר הראשון.

1. מבוא

במשך אלפי שנים הייתה סביבת הנחלים מקום משכנו של האדם. יישובים הוקמו לאורך גדות, והנחל שימש כמקור חיים – מים, דיג, אנרגיה ותעבורה. במאה האחרונה האדם גרם להרס רב למקור חיים זה על ידי פיתוח מואץ ובנייה ללא התחשבות באפיקי הנחלים, שאיבת מים עד כדי ייבוש הנחלים, והזרמת ביוב ומזהמים לאפיקים. כתוצאה מכך נפגעה המערכת האקולוגית הסביבתית והניקוזית של הנחלים וסביבתם. בעשורים האחרונים, בעידן הגלובליזציה, מתחוללת בעולם המערבי מהפכה במודעות המדינה והחברה לנושא הנחלים. במדינות שונות גובשו מודלים למדיניות ציבורית בנוגע לניהול סביבתי של מרחבים גיאוגרפיים, ומודלים של ניהול אינטגרטיבי של אגני ניקוז העוסקים בשיקום, שימור ופיתוח נחלים לפי תפיסה בת-קיימא. הוקמו רשויות מרכזיות, "רשויות אגן", המנהלות את האגנים בגישה אינטגרטיבית לפי תפיסות הוליסטיות, המותאמות לתנאים הייחודיים של כל אגן ובהתאם למדיניות בכל מדינה.

בשנים האחרונות חל מהפך בנושא שיקום הנחלים ופיתוח תשתיות הניקוז גם בישראל. השינוי נובע ממספר סיבות:

- מודעות ממשלתית לנושא ניקוז נחלים. שיטפונות בשנת 1991/92 גרמו נזקים כבדים למשק הישראלי. בעקבות בדיקת מבקר המדינה אשר פורסמה בשנת 1993 וקבעה כי המדינה

נכשלה בניהול תשתיות הניקוז, בוצע בשנת 1997 ארגון מחודש, מקיף ומהותי והוקמו 11 רשויות ניקוז בישראל.

- מודעות ממשלתית וציבורית לנושא שיקום נחלים. נושא הסביבה קיבל דחיפה משמעותית עם הקמת המשרד לאיכות הסביבה (נקרא כיום המשרד להגנת הסביבה). המשרד פועל לשיפור מצב הנחלים, על ידי העלאת המודעות הציבורית לצורך בפעולות שיקום ושימור נחלים.
- נחלים כאזורי פיתוח. כתוצאה מהפעילות לשיקום, שימור ופיתוח נחלים, חל שינוי בהתייחסות הציבור לאזורים שבעבר נחשבו נחותים. כיום יש ביקוש למגורים ולמסחר בקרבת נחלים, וקיים קונפליקט בין הרצון לשמר את סביבות הנחלים ובין מגמת הפיתוח.

שינויים משמעותיים אלה עושים את ניהול המרחבים הגיאוגרפיים של נחלי ישראל לנושא חשוב ומעניין. שיקום, שימור ופיתוח נחלים, נמצא כיום על סדר היום הציבורי בישראל.

עם זאת, ישראל מפגרת אחר התפיסה העולמית של ניהול אינטגרטיבי של אגני נחלים. נושא הניהול הסביבתי של אגני הניקוז נמצא רק בראשית דרכו, מספר הגופים והארגונים בעלי העניין בסביבות הנחלים הוא גדול, אך האינטרסים שלהם שונים ולעתים אף מנוגדים. לפיכך, למרות הרצון לקדם את הנושא, קשה מאוד לתאם בין הגופים השונים. החזון החדש של השיקום, השימור והפיתוח של נחלים לטובת האדם, הטבע והסביבה, מתממש לאט ובצורה חלקית בלבד. מטרת מאמר זה, לבחון את מצב הניהול הקיים בארץ ולהציג את המודל

החדש המתפתח בישראל - מודל אינטגרטיבי לניהול סביבה נחלית במסגרת של אגן ניקוז.

2. רקע היסטורי עולמי

למרות שגישה אינטגרטיבית של ניהול משאבי הטבע על בסיס אגני ניקוז נחשבת כגישה חדשנית שהתפתחה במדינות רבות בסוף המאה ה-20, ההיסטוריה מלמדת על הקשר בין האדם והחברה לבין הטבע, שבו המים היו והנם משאב הטבע החשוב ביותר משחר התרבות האנושית. מספר מחקרים נערכו על הקשר בין משאבי המים לבין מערכת הניהול של משאבי הטבע ומערכות חברתיות-פוליטיות המתפתחות באזור ספציפי.

כבר במיתולוגיה היוונית ניתן לראות פנייה לציבור לנהל את טבע באופן מאוזן ובר-קיימא (Priscoli, 1998). המאפיינים של אגן הניקוז השפיעו על מיקום יישובים הרבה לפני שנולד הרעיון להתייחס לאגני ניקוז כאל יחידות אדמיניסטרטיביות. ברוב המדינות הקדומות שהתפתחו באזורים צחיחים וצחיחים למחצה, הדרישה המתמדת למים והמגבלה הטבעית של משאב טבע זה, העצימו את חשיבות הניהול ההוגן של חלוקת המים בין התושבים (James, 1974; Beaumont, 1989). כך התפתחה הציוויליזציה של השומרנים (Sumerian) על בסיס של מערכות השקיה, והיחידות האדמיניסטרטיביות במדינה התבססו על יחידות השקיה (Priscoli, 1998).

השימוש בנהרות כדרכי ניווט הביא גם לקביעת גבולות פוליטיים, ולהיווצרות יחידות טריטוריאליות נפרדות סביב אגני ניקוז במצרים לאורך הנילוס, בפרס ובסין. מכיוון שהנהרות פעלו גם כדרכי קשר בין אזורים, נוצרו מדינות אוטוקרטיות ("ציוויליזציות הידרוליות") שכוחן היה בשליטה על משאבי מים, לשם השקיה ועבור תעבורה בנהרות (Priscoli, 1998). להלן, נעקוב בקצרה אחר התפתחות הגישה האגנית במהלך המאה ה-20 ועד היום במספר מדינות בעולם.

2.1 ארה"ב:

בסוף המאה ה-19 הציע Sir William Willcocks תכנית רב-מטרית לנהרות הנילוס, הפרת והחידקל (Priscoli, 1998). באותה עת הציע John Wesley Powell לראות את ניהול ה-Western Lands בארצות הברית כמבוסס על אגני ניקוז (Powell,).

Theodore Roosevelt אמר: "כל מערכת נחלים מקו פרשת המים עד יציאתה לים מהווה יחידה אחת וצריך להתייחס אליה ככזאת" (Inland Waterways Commission, 1908) השלב הבא היה ב-1917, כאשר Newland Act of Congress קבע, שאגן ניקוז ישמש כיחידת תכנון לצורך מדידה ובקרה של שיטפונות.

ההתייחסות נוספת לאגן ניקוז כיחידת תכנון, חלה עם קבלת ה-Water Resources Planning Act, 1965, 42 U.S.C. # 1962, שקבע תכנון על בסיס אגני ניקוז לצורך בדיקה של כמות ואיכות המים. באותה שנה דרש Water Quality Act of 1965 מהמדינות, לפתח תקנים אחידים של איכות המים עבור גופי מים משותפים. נקודה חשובה בתולדות התפתחות הגישה האגנית בארה"ב הייתה קבלת ה-Water Clean Act בשנת 1972, המתייחס למקורות זיהום נקודתיים על שטח אגן הניקוז וטיפול בשפכים קרוב לנקודת הזיהום ולא בנחל עצמו. תיקון של Water Clean Act ב-1987 חייב טיפול במקורות זיהום לא נקודתיים, ובכך קיבל את הגישה של ניהול, שימור ושיקום הטבע על בסיס אגן הניקוז במלואו.

הגישה האגנית שהתפתחה במאה ה-20, הובילה בשנת 1991 להקמת EPA (Environmental Protection Agency's Office of Water and The Office of Wetland, Oceans and Watersheds). זו סוכנות ברמה פדראלית, אולם באותן שנים התפתחה גם ברמה של המדינות (States) גישה אגנית לפתירת בעיות במערכות אקולוגיות (Ruhl, 1999).

2.2 מדינות אחרות

באנגליה התחילה להתפתח גישה של תכנון על בסיס אגן הניקוז כבר בשנת 1921, בעקבות דוח של ארגון בשם The Board of Trade Water Power Resources Committee. בשנים 1941-1950 הוקמו מספר רשויות אגני ניקוז במדינות שונות - הודו, סרילנקה, ברזיל, אוסטרליה, ואחרות. המבנה והסמכויות של הרשויות היו שונים - חלקן השתתפו רק בתכנון וחלקן נטלו חלק בביצוע. באמצע שנת 1950 הכריז מזכיר האו"ם: "River basin development is now an essential feature of economic development".

הנוגעות לחוק רשויות הנחל. הוקמו שתי רשויות נחל - רשות נחל ירקון ורשות נחל קישון. גם רשויות נחל אלה לא הוקמו לפי תפיסה אגנית, בדומה לרשויות הניקוז.

1991/92: שנה ברוכת גשמים, מערכת הניקוז בישראל קורסת, המים בנחלים עולים על גדותיהם. נגרמים נזקים לתשתיות, לכבישים, למבנים, למכונות, יש השבתת מסחר, דיירים מפונים מבתיים. סך כל הנזקים שנגרמו למשק הלאומי הוערך במיליארד שקל.

1993: מתפרסם דוח חריף של מבקר המדינה, המבקר את תפקודה של המדינה בנושא הטיפול בניקוז הנחלים. הדוח קובע כי המדינה כשלה בטיפול בתשתיות הניקוז. בעקבות הדוח הוקמה ועדה מקצועית שבחנה את נושא הניקוז והנחלים והציעה תכנית לרה-ארגון של רשויות הניקוז בישראל.

עוד בשנת 1993: ביוזמת המשרד לאיכות הסביבה והקרן הקיימת לישראל, מוקמת המנהלה לשיקום נחלי ישראל, כגוף בין משרדי, ללא מעמד סטטוטורי. מטרתה הוגדרה בקידום ההיבטים הסביבתיים של הנחלים, גישור בין בעלי העניין השונים הפועלים בתחום הנחל, תיאום בין הרשויות השונות כדי להגיע לפעילות משותפת לצורך קידום השיקום של נחלי ישראל.

1997: הוקמו 11 רשויות ניקוז הפרושות על פני 100% משטח המדינה. לראשונה נבנו הרשויות לפי תפיסה אגנית. החלוקה הגיאוגרפית של הרשויות מוצגת בתרשים 1. הרשויות נבנו לפי תפיסה חדשה של ביזור פעולת המדינה לאזור. הרשות מנוהלת על ידי הרשויות המוניציפאליות שבתחומה. לרשויות מוקצים משאבים כספיים גדולים לביצוע פעולות ההסדרה ותחזוקת הנחלים. רמת הפעילות עולה עשרות מונים על זו שבעבר.

2002: בשל הקושי בהפעלת המנהלות לשיקום נחלים, ולאור שיתוף הפעולה עם רשויות הניקוז, החליט המשרד לאיכות הסביבה להעניק סמכויות של רשות נחל לשתי רשויות ניקוז שהיו פעילות בתחום הסביבתי. הכוונה הייתה לתת לגוף מרכזי הפועל בתחומי ניקוז מחויבות וכלים לפעולה אינטגרטיבית עם היבטים סביבתיים.

ניהול אגני נחלים, מוגדר כתהליך של הדרכה וארגון שטחים פתוחים ושימוש יעיל ונכון

בחוברת שפורסמה בעקבות סמינר בנושא של ניהול אגני ניקוז שאורגן על ידי Committee on Water Problems of United Nations Economic Commission for Europe (1971), הודגשה באירופה החשיבות של ראייה אינטגרטיבית בתכנון על בסיס אגני ניקוז.

לאחר International Conference on Water and the Environment שהתקיים בדבלין בשנת 1992 ו-Earth Summit שהתקיים בריו דה'ז'נרו באותה שנה, חתמו רוב מדינות העולם על הכרזה התומכת בגישה אגנית. כתוצאה מכך משתמשות הרבה מדינות בהמלצות הבנק העולמי משנת 1993, כדי להגדיר את מטרות הניהול של אגני ניקוז ומשאבי טבע.

3. רקע היסטורי בישראל

מאז קום המדינה היו מספר נקודות מפנה בהתייחסות לנושא הנחלים וסביבתם.

שנות ה-50: לאחר הקמת מדינת ישראל נחקקו מספר חוקים העוסקים במים, ביניהם חוק הניקוז ומניעת שיטפונות (1957). בעקבות החוק הוקמו 26 רשויות ניקוז אזוריות על פי גבולות של רשויות מוניציפאליות (ללא קשר לאגן הניקוז של הנחל) והן התפרשו על 40% משטח המדינה. המשרד הממונה על הנושא היה משרד החקלאות והאחריות הייתה של נציב המים. במשך השנים תפקדו רשויות הניקוז באופן חלקי ומוגבל גם כאשר לביצוע וגם כאשר לאכיפה.

1962: נחקק חוק רשויות מקומיות (ביוב), שהוציא את נושא הביוב משליטת נציב המים ומשרד החקלאות והעבירו לשליטת שר הפנים והרשויות המקומיות, כך שביוב שזורם בנחלים אינו בשליטת נציבות המים ומשרד החקלאות שאחראים על הנחלים.

1965: נחקק חוק רשויות נחלים ומעיינות. מטרת החוק הייתה לפעול בהיבטים הסביבתיים הקשורים לאגן הניקוז, שמשמעותו ראייה כוללת של מרחב הנחל, הכוללת סמכות ואחריות בטיפול בהיבטי ניקוז, סביבה ואקולוגיה. האחריות על החוק הוענקה למשרד החקלאות ולמשרד הפנים ובפועל לא הוקמו רשויות נחל עד שנת 1988.

1988: הוקם המשרד לאיכות הסביבה וחלק מן הסמכויות שעסקו בזיהום המים הועברו ממשרד החקלאות אל המשרד החדש. הועברו גם סמכויות

כיצד הופכים את החזון למציאות ואת היעדים לעובדות? וכיצד ניתן לקדם מערכת אינטגרטיבית מורכבת ומסובכת של ניהול סביבתי של הנחלים? התשובה היא, שנדרשת בחינה מדוקדקת והקמה של מערכת ניהולית אינטגרטיבית.

4. אגן ניקוז כמערכת אקולוגית וניהולית

לאחר הצגת הסיבות האנושיות והסביבתיות לבחירה של אגן ניקוז כיחידת ניהול ותכנון, נבחן כעת מהם הגבולות של מערכת אקולוגית. יחידה פיזיוגרפית של אגן הניקוז - הנה אחת השיטות להגדיר את המערכת האקולוגית. תנועת מים דרך הביוספירה גוררת תנועה של אנרגיה, חומרים (סחף, תמס, ביוטה וכו') וגם תנועה של מידע (מידע על תהליכים טבעיים, מידע חזותי). לכן גבולות טופוגרפיים של אגן ניקוז הם לא רק אינדיקציה לכיוונים של תנועת המים העיליים אלא גם לתהליכים אחרים, כגון שינוי כיוון הרוח וכיוון תנועת המזהמים, כמויות ועוצמות הגשם, ועוד שינויים אקלימיים וגיאומורפולוגיים (Jewitt, 2002). לקביעת אגן ניקוז כיחידה שאיננה רק אקולוגית אלא גם ניהולית, קיימים יתרונות וחסרונות (טבלה 1).

5. ניהול אינטגרטיבי

כיום, ניהול משאבי טבע וניהול סביבתי עוברים לגישה השלטת, הגישה האינטגרטיבית (IWM - Integrated Watershed Management).



תרשים 1. רשויות הניקוז בישראל, תמונת המצב אחרי 1997

במשאבי טבע אחרים באגן הנחל, כדי לספק תוצרים ושירותים ללא פגיעה במשאבי מים וקרקע (Brooks et al., 1991). מספר הארגונים והגופים בעלי עניין בנחל וסביבותיו הנו רב, אך יכולת השיתוף ותיאום הפעולות ביניהם קטנה. החזון של שיקום, שימור ופיתוח הנחלים, הפך למגמה עם יעדים ומטרות ברורות. מכאן, נשאלת השאלה,

טבלה 1. יתרונות וחסרונות לבחירת אגן הניקוז כיחידה ניהולית (Jewitt, 2002).

יתרונות	חסרונות
<ul style="list-style-type: none"> גבולות טופוגרפיים טבעיים קלים להגדרה; המושג "אגן ניקוז" והתהליכים הקשורים לזרימת המים נלמדו במשך מאות שנים; קל לבחור יחידת תכנון לפי הגודל הדרוש, מכיוון שבאופן טבעי ניתן לחלק אגן ניקוז לתת-אגני ניקוז וכן לאחד מספר אגני ניקוז ליחידה אחת גדולה; ההגדרה של "אגן ניקוז" מקובלת על אנשים באופן טבעי. בחברות מתפתחות הגבולות של אגן ניקוז הם גם גבולות ההתיישבות. 	<ul style="list-style-type: none"> הגבולות לא תמיד נראים באופן טבעי; גבולות אגן ניקוז חוצים גבולות מדיניים; קשה לבחור את הגודל המתאים לניהול, כי מצד אחד השטח צריך להיות גדול דיו כדי לפתור בעיות, ומצד שני עליו להיות קטן ונוח לניהול; לא כל הגורמים בטבע פועלים בקנה-מידה של אגני ניקוז. לכן עולה בעיה של הגנת צמח מסוים או חיית בר מסוימת, כאשר שטח המגורים שלהם לא מתאים לקווי פרשת המים.

בהגדרות ICM ו- IWM השתמש לראשונה Gardiner (1984, 1996). הוא פיתח את IWM כגישה יישומית לניהול אגני ניקוז ברוח של פיתוח בר-קיימא. גישה זו כוללת עקרונות סביבתיים ומבוססת על ניתוח סביבתי, ניהולי, חברתי ותרכותי באגן הניקוז. מאפיינים עיקריים של הגישה, כמו שצוינו על ידי מספר רב של חוקרים, ניתן לראות בטבלה 2.

6. ניהול נחלים בישראל

מספר הגופים הפועלים בסביבת הנחל הוא רב (תרשים 2) ולעתים יש ביניהם ניגודי אינטרסים מהותיים. לכן יש לבחון את האינטרסים של כל הגופים ואת מדיניותם, ואת האפשרות לבנות מערך של שותפות והסכמות. להלן משתני הניהול העיקריים:

6.1 ארגון ומנהל

למבנה הארגוני של גופים וארגונים, השפעה רבה על יכולות הניהול של סביבת הנחלים. מאפייניהם העיקריים הם:

אופי הארגון: משרדים ממשלתיים (כגון: חקלאות, תשתיות הגנת הסביבה), תאגידים ממשלתיים (כגון: רשויות ניקוז, רשויות נחל, רשות הטבע והגנים), תאגידים ציבוריים (כגון: הקרן הקיימת לישראל, החברה להגנת הטבע).

מטרת הארגון בנושא הנחלים: מטרה יחידה ומרכזית (כגון: רשויות ניקוז, רשויות נחל). מטרה חלקית משנית (כגון: חקלאות, הגנת הסביבה, הקרן הקיימת לישראל).

אופי הפעילות: תכנון ומדיניות, פיקוח, ביצוע. **תחומי הפעילות:** תחום רחב של נושאים, תחום צר של נושאים.

לארגון המבצע המרכזי הפועל בנחל ובסביבתו, רשויות הניקוז בישראל, שלושה מאפיינים ייחודיים:

- (1) הן בעלות סמכות ואחריות על פי החוק.
- (2) הן מנוהלות לפי תפיסה אגנית.
- (3) תפקידן היחיד הוא טיפול בנחל ובסביבותיו. לפיכך רשויות הניקוז מהוות ארגון מרכזי בכל מודל של ניהול אינטגרטיבי של נחלים. כל רשות ניקוז מהווה תאגיד של כל הרשויות המוניציפאליות שבתחומה ושל שלושה משרדי ממשלה. המבנה והסמכויות של כל רשות ניקוז,

הניהול מתבסס על מערכות אקולוגיות תוך התחשבות בגבולות סטאטוטוריים (Adams, 1993; Riebsame, 1996; Griffin, 1999 Environmental Management System). הגדרות למערכת זו (ISO – 14001 standard) ניתנו על ידי Geneva-based International Organization for Standardization (ISO) בספטמבר 1996, כחלק מ-ISO 14000 Series. גישה זו התפתחה מאז הוקם ב-1990 The Business Charter for Sustainable Development.

גישה אינטגרטיבית לניהול מערכת סביבתית, שאגן ניקוז הוא חלק ממנה, כוללת את העקרונות הבאים:

- מדיניות המדישה מחויבות לרמה מיוחדת של ביצוע סביבתי;
 - מטרות ויעדים מיוחדים לביצוע, הניתנים למדידה מבחינת כמות ואיכות;
 - אסטרטגיה ותהליך של תכנון, כדי לבצע התחייבויות;
 - ארגון של מערכת מוסדות לביצוע האסטרטגיה שנבחרה;
 - הוצאה לפועל של מטרות וכלים תומכים בביצוע מטרות;
 - תכניות לתקשורת, הכשרה והשכלה של הגורמים המעוניינים;
 - מדידות ובקרה בזמן הוצאת תכניות לפועל.
- כל ניתוח של ניהול אגן ניקוז כניהול סביבתי, צריך אפוא להביא בחשבון את הגורמים הבאים (Schramm and Rubin, 1995):
- (1) מדיניות; (2) מטרות ויעדים; (3) תכנון; (4) מבנה ארגוני ומערכת מוסדית להוצאה לפועל של תכניות; (5) מערכת מבצעת; (6) בקרה וניטור.
- ניהול סביבתי אינטגרטיבי כולל גם עבודה משותפת של מוסדות ציבור עם בעלי עניין בשטח, המבוססת על עקרונות השוק החופשי. מטרות סביבתיות ימומשו במחיר מזערי מצד הציבור, ונועדות למנוע העברת מזהמים במערכת האקולוגית (אוויר, מים, קרקע). ניהול אגני ניקוז הוא גישה מקיפה, המאחדת תכנון, מדיניות ופעילויות שמבצעים לשם פיקוח על המים ועל משאבי טבע אחרים, כולל גם תהליכים טבעיים, במסגרת אגן הניקוז. פעילות מעשית של ניהול תלויה במטרות.

טבלה 2. מאפיינים עיקריים של גישת IWM (Integrated Watershed Management).

מאפיינים	מקור
גישה כוללת, הנוטה להכליל ולאחד את מרכיבי המערכת.	Nelson, 1993; Ballweber, 1995
גישה המשלבת את כמות ואיכות המים, בעלי חיים החיים במים, מניעת זיהום - ולא רק הספקת מים ומניעת הצפות.	Nelson, 1993; Cobourn, 1999; National Research Council (U.S.), 1999
התייחסות רבת-חומית לכל המערכת האקולוגית, כולל הממד האנושי. קבוצת הניהול ומקבלי ההחלטות הם בעלי קרקעות, אנשי פיתוח, מהנדסים, אנשי ניהול סביבתי, עורכי דין. הם משתמשים בשיטות תקשורתיות שונות כדי להגיע לתכנית משולבת.	Wayland, 1993; Burt, 1993; National Research Council (U.S.), 1999
פיתוח בר-קיימא לטווח ארוך, המתייחס לבעיות עכשוויות ועתידיות, עם פתרונות משולבים ושרשרות של פתרונות.	Cairns, 1993; Heaney, 1993; Schneiders and Verheyen, 1998
הואיל ואגני ניקוז חוצים גבולות מדיניים, כל הגופים המעורבים חייבים לשאת פעולה ברמות ניהול שונות. הניהול דורש שיתוף פעולה ברמה פדרלית, ברמה של מדינות וברמה מקומית, כדי למצוא אסטרטגיה נכונה.	Wayland, 1993; Funk, 1993; Margerum, 1995; Cobourn, 1999
קנה המידה של התכנון הוא רחב בקשר להספקה ומסחר, אבל צר יותר בנושאים כמו זיהום אוויר ואיכות המים. קנה המידה תלוי במטרת הניהול ובתנאים סביבתיים, פוליטיים וכלכליים (משאבים) הקשורים למטרה.	Wayland, 1993; National Research Council (U.S.), 1999
ההשתפרות נמשכת בשלבים ולא מסתמכת על תכנית יחידה. התכנית אינטראקטיבית ומשתנה בהתאם לתוצאות הביניים.	Heaney, 1993; Cobourn, 1999
גישה המכילה גם ממד אנושי. יש בה ניסיון להסביר לבעלי עניין את חשיבות שיתוף הפעולה בנושאי שמירת הטבע, מניעת זיהום ושיפור הניהול של אגן הניקוז.	Wayland, 1993; Nelson, 1993; Margerum, 1995; Bulkley, 1995; Steel and Weber, 2001
כל בעלי העניין צריכים לפתח חזון אחיד לטווח ארוך לניהול אגן הניקוז.	Cobourn, 1999; Steel and Weber, 2001
השקעה כספית נדרשת מכל בעלי העניין - והרווח מחולק בין המשתתפים בצורה הוגנת.	National Research Council (U.S.), 1999

בעבר, הייתה המדיניות בישראל ניהול ריכוזי על ידי המדינה; כיום, המדיניות היא ביזור הניהול והעברת הניהול לאזור. בעבר, שררה ראייה צרה של נחל כתשתית ניקוז בלבד; כיום, יש ראייה רחבה של נחל כמכלול של היבטים אקולוגיים, חברתיים וכלכליים. המדיניות הממשלתית והציבורית נקבעת בהתאם לארגונים ולמוסדות השונים הפועלים בתחומי הנחל. נמנה את העיקריים:

משרדי ממשלה:

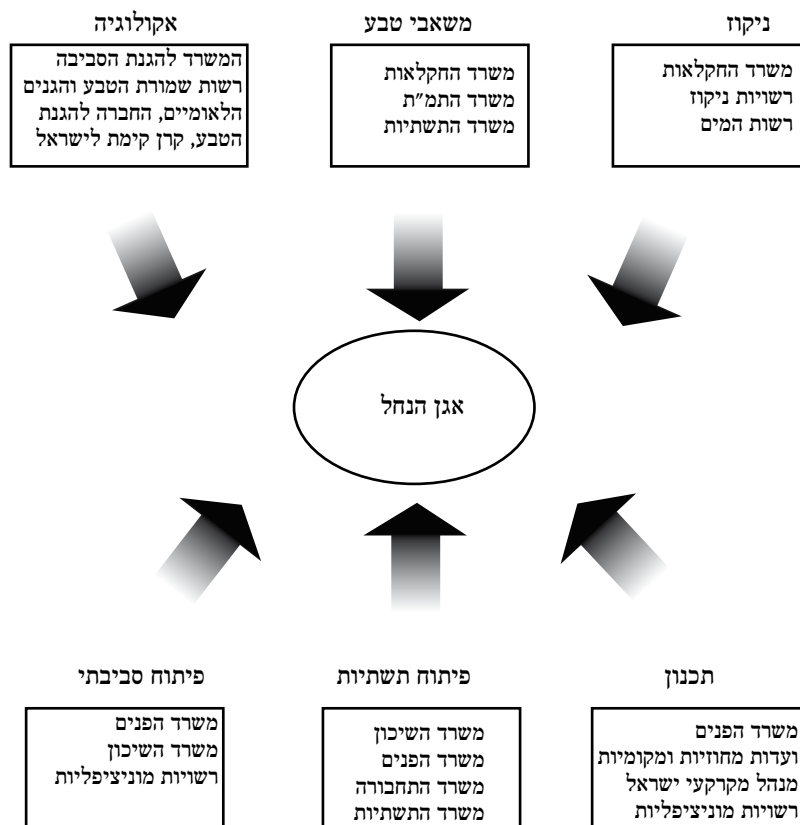
משרד החקלאות - אחריות על ניקוז מי שיטפונות, הספקה מים לחקלאות, שימור קרקע.

משרד התשתיות - אחריות לנושא המים באמצעות

הם למעשה ביזור פעילות של המדינה לביצוע על ידי האזור. תקציב הרשויות בא ממקורות גבייה מרשויות מוניציפאליות, מתקציבי משרדי החקלאות והתשתיות ומגיוס כספים ממקורות נוספים.

6.2 מדיניות ממשלתית וציבורית

המדיניות של הגופים והארגונים בנושא הנחלים, הוא חלק מרכזי ביכולת להתוות מטרות ויעדים ניהוליים ברורים. המדיניות הממשלתית והציבורית בארץ ובעולם בנושא הנחלים עברה שינויים רבים במהלך השנים וגם כיום היא משתנה מדי פעם.



תרשים 2. מיפוי סכמטי של הנושאים והגופים העיקריים הפועלים בסביבת נחל

משרד הבריאות - אחריות למניעת זיהום מזיק לאדם, מתממשת בשיתוף רשויות הניקוז ורשויות הנחל.

משרד הפנים - אחריות על בינוי ופיתוח על גדות נחלים, טיפול בביוב ביתי. ארגונים:

הקרן הקיימת לישראל - פועלת בעיקר בנושא של שיקום אפיק הנחל וייעור הגדות, כמו כן גם בפעילות הקשורה לשמירת הקרקע באמצעות ייעור (באישור שר החקלאות). נציגים של קק"ל משתתפים בוועדות לתכנון ובנייה וועדות בנושא ביוב.

רשות שמורות הטבע והגנים הלאומיים - פיתוח ותפעול שמורות טבע בסביבות נחלים. מדור לניטור נחלים הוקם בשנות ה-70 במימון נציבות המים. פעילות המדור כוללת ניטור איכות המים בנחלים, איתור מוקדי זיהום, מעקב אחרי מתקני טיהור שפכים ותקינות של מאגרי קולחים, סקירת מצב נחל ואגנו. פעילות זו כוללת בעיקר איסוף

נציבות המים, שבימים אלו הוחלפה ברשות מים חדשה עם סמכויות נוספות. רשות המים ממונה על ביצוע ואכיפת חוק המים ועל ניהול ענייני המים במדינה. ניטור ההידרולוגי של נחלים מבוצע על ידי השירות ההידרולוגי, וכן הערכה כמותית של מים זמינים. משרד התשתיות ורשות המים עוקבים אחרי איכות המים בנחלים, מבצעים בדיקות הנדסיות ואיתור מוקדי זיהום, בשיתוף עם רשות שמורת הטבע והמשרד לאיכות הסביבה.

המשרד להגנת הסביבה - אחריות למניעת זיהום נחלים בנושאים של איכות מים, פסולת, מניעת זיהום מביוב ושפכים תעשייתיים. אחריות לשימור, שיקום ופיתוח סביבתי של הנחלים.

משרד התחבורה - אחריות על מעברי תחבורה מעל הנחל באמצעות גשרים.

משרד התיירות - אחריות על פיתוח אתרי תיירות ונופש על בסיס נחלים.

משרד האוצר - אחריות על תקצוב פיתוח תשתיות ניקוז ותחזוקתם ובקרה על ההוצאות לכך.

נתונים והגברת מודעות.

רשות העתיקות - פיתוח ושיקום אתרי עתיקות לאורך נחלים.

קרן שיקום מחצבות - הנה קרן ייעודית של מנהל מקרקעי ישראל, העוסקת בשיקום אתרי הכרייה. הנחלים משמשים כחלקם כאתרי כרייה של חלוקי נחל כחומר גלם לתעשיות הבנייה, ושיקומם נעשה באמצעות הקרן.

המנהלה לשיקום נחלי ישראל - אחראית על שיקום, שימור ופיתוח נחלים. מטרות המנהלה לשיקום נחלים הן: (1) קביעת מדיניות ועקרונות לקידום הנחלים ושיקומם, (2) הכנת תכניות אב ותכנון מפורט בהתאם למדיניות שהוגדרה, (3) ביצוע שיקום נחלים בהתאם לתכנון, (4) ניהול התחזוקה של הנחלים המשוקמים על ידי הקמת מסגרות מקומיות. בעקבות מטרות אלה, הוקמו מנהלות מקומיות לכל נחל על בסיס וולונטרי, בהשתתפות פעילה של הרשויות מקומיות ובעלי עניין אחרים. בין הכלים של המנהלה: (1) הכנת תכניות אב ותכניות סטטוטוריות הנגזרות מתכניות אב, לפי חוק התכנון והבנייה. (2) הכנת סקרים על צורכי הנחל (איכות וכמות מים, שיקום גדות הנחל, פארקים). (3) הכנת תכניות מפורטות לפיתוח מבוקר של מוקדים בעלי עניין לאורך הנחל, תוך שמירה על ערכי טבע ונחל. (4) הקצאת מים לשיקום הנחל. אופי פעילות המנהלה תלוי ביוזמה מלמטה (bottom up) חלק מן מהמנהלות התקשו בפעילותן בגלל היעדר סמכויות ומקורות תקציב על פי חוק.

רשויות הניקוז - הוקמו 11 רשויות ניקוז בעלות מעמד חוקי (על פי חוק הניקוז ומניעת שיטפונות, 1957). רשות הוא תאגיד של כל הרשויות המוניציפליות בתחומה ושלושה משרדי ממשלה (חקלאות, הגנת הסביבה, בריאות). הרשות פועלת בכפיפות למנכ"ל רשות המים (משרד התשתיות) והאגף לשימור קרקע וניקוז (משרד החקלאות). מטרות רשויות הניקוז הן: (1) קיום מערכת ניקוז אגנית מרחבית תקינה ומתפקדת, (2) מניעת נזקי שיטפונות, (3) מניעת מפגעי בריאות.

רשויות נחל - רשויות נחל מוקמות על פי חוק נחלים ומעיינות 1965. רשות נחל ירקון הוקמה ראשונה בשנת 1994, ובשנת 1998 הוקמה רשות שנייה - קישון. לאור הקמת רשויות הניקוז אשר פעלו גם בנושאים סביבתיים, החליט המשרד

להגנת הסביבה בשנת 2002, להעניק סמכויות של רשות נחל לשתי רשויות ניקוז שבלטו בפעילות הסביבתית: ירדן דרומי ושקמה-בשור. לאור הצלחת פעילות שתי רשויות הניקוז האלה, הוענקו סמכויות של רשות נחל לעוד שבע רשויות ניקוז בשנת 2006.

רשות נחל מטפלת באגן נחל בצורה הוליסטית. מעבר לתפקידי רשות ניקוז, תפקידי רשות נחל הם: (4) שיקום ושימור נחלים ושימור קרקע, (5) מניעת נזקי סחף, (6) מניעת נזק למי תהום, (7) מניעת המלחת קרקע, (8) שמירת הנוף ושמירת הקשר בין החלק העליון לבין החלק התחתון של הנחל, (9) שיקום נחל לצרכי קיט ונופש.

6.3. ההיבט המשפטי - סמכות ואחריות

היכולת לנהל את נושא הנחלים, תלויה במידה רבה בהיבט המשפטי. מה הם החוקים והתקנות בנושא הנחלים, ומי הם הגופים והארגונים האמונים על הפעלתם? כיום ישנם גופים רבים הפועלים בנחל, ולכל אחד מהם סמכויות מוגבלות ותחומי אחריות מוגבלים. להלן, נציין את החוקים העיקריים בנושא הנחלים:

א. חוק הניקוז ומניעת שיטפונות 1957 - חוק המטפל בעיקר בנושא ניקוז ומניעת שיטפונות, ועל פיו הוקמו רשויות הניקוז. זהו חוק מרכזי המהווה בסיס לפעולה בנחלים ומקנה לרשויות הניקוז סמכויות ואחריות.

ב. חוק המים 1959 - חוק הקובע שהמים הם קניין ציבורי והמדינה משמשת כנאמן שלו. החוק עוסק בכל הנושאים הקשורים למים - הפקה, הספקה, זיהום, וניהול משק המים.

ג. חוק הגנים הלאומים ושמורות הטבע 1963 - הוראות בנושאי נחלים ומעיינות בשמורות הטבע, מניעת זיהום, מניעת הטיית נחלים.

ד. חוק רשויות נחל ומעיינות 1965 - חוק המטפל בנחל וסביבתו בעיקר בנוגע לגדות נחלים ועוסק בשיקום ובפיתוח הנחלים. על פי חוק זה הוקמו שתי רשויות נחל (נחל ירקון ונחל קישון).

ה. חוק התכנון והבנייה 1965 - לחוק זה השפעה רבה בנושא בנייה ופיתוח על גדות נחלים וכן בנושא של זרימות לנחלים כתוצאה מבנייה נרחבת, המקטינה את חדירת המים לקרקע ומגבירה את הנגר העילי. כמו כן כלול בחוק

משפיעים בתכניותיהם על הנחלים:

- משרד הפנים - לשכת תכנון מקומית/אזורית/ מחוזית/ארצית, הכנה ואישור של תכניות מתאר אזוריות/ארציות, אישורי בנייה על גדות נחלים ובתחומי ההשפעה של הנחלים.
- רשויות מוניציפאליות - שימושי קרקע שונים על גדות נחלים, בינוי על גדות נחלים, שימושים חקלאיים, שימושים כשטח ציבורי פתוח - אזורי נופש וקייט.
- המנהלה לשיקום נחלי ישראל - תכניות-אב לשיקום נחלים.
- רשויות ניקוז - תכניות להסדרת הניקוז בנחלים.

6.4.3 תכניות מתאר והשפעתן על הנחלים

תכניות מתאר ארציות, מחוזיות ומקומיות, הן היישום של חשיבה תכנונית רחבה ומוסכמת של גופי התכנון ומוסדות המדינה, לכן השפעתן על נושא הנחלים רבה. תכניות אלה הן:

- תכניות מתאר ארציות - ת.מ.א. 22 - תכנית מתאר ארצית ליער וייעור. תכנית זו, שאושרה בפברואר 1995, כוללת תפיסה שצירי הנחלים עשויים להוות חיצ בין השטחים המבונים ולתת לחיצ זה משמעות ותוכן. גדות הנחל קיבלו מעמד סטטוטורי והוגדרו שטחים לנטיעות לאורך הנחל, "שטח נופש ירוק" המבוקש ביותר סמוך למרכזי אוכלוסייה.
- ת.מ.א. 34 - תכנית מתאר ארצית למשק המים (ב'), לביוב ולהתפלה (א'). מטרת התכנית הן "לגבש מסגרת להסדרת שימושי קרקע הקשורים למשק המים" וטיפול בתשתיות הקשורות לניצול יעיל לטווח ארוך של משאבי מים, כולל מי נחל.
- ת.מ.א. 35 - תכנית מתאר ארצית משולבת לבנייה, לפיתוח ולשימור. התכנית אושרה על ידי הממשלה בסוף שנת 2005, מטרתה "לתת מענה לצורכי הבנייה והפיתוח של המדינה תוך שמירה על השטחים הפתוחים ועל עתודות הקרקע לדורות הבאים. על פי מטרת העל ועקרונות התכנון העומדים בבסיסה, מבחינה תכנית בין חמישה סוגי מרקמים (אזורים מאפשרי פיתוח ואזורים מוטי שימור), בהם ניתן ביטוי ומענה תכנוני לצרכי הפיתוח של

זה אישור תכניות חצייה של נחלים במעבירי מים או בגשרים.

ו. חוקי ותקנות איכות הסביבה: 1974-1998 - איסור שפיכת זבל בנחלים ובגדות, איסור הזרמת ביוב לנחלים.

חוקים ותקנות הם דרך מרכזית לניסוח ויישום מדיניות של שיקום, שימור ופיתוח נחלים. חלק מן החוקים אינם מעודכנים ואינם משקפים את המדיניות הממשלתית והציבורית כיום. מספר הגופים בעלי סמכות חוקית לפעילות בתחום נחל הנו רב. פעילותם אינה מתואמת ומפוזרת גם בתוואי הנחל וגם בשטח אגן ההיקוות. פיזור תקציבים וסמכויות אינו תורם לשיקום ושיפור מצב הנחלים, ועיצוב מחודש של מערכת משפטית ומנהלית הנו בסיס לשיפור סביבה נחלית (קפלן, 2004).

6.4 תכנון

תכנון הוא פעולה האמורה לתת מענה לחשיבה לטווח ארוך בתפיסה בת-קיימא של ניהול. תכנון הוא כלי עיקרי של המערכת הניהולית בבואה לשקם ולשמר נחלים ומהווה בסיס לביצוע כל פעולה של שיקום, שימור ופיתוח בנחל. לתכנון היבטים רבים ומגוונים ולו השפעה רבה על ניהול נחלים.

6.4.1 מגמות תכנון

- מתכנון בהיבט אחד אל תכנון במכלול היבטים - בעבר התמקד התכנון בהיבט אחד, כגון הסדרת נחלים בהיבט ההנדסי. בשנים האחרונות עוסקים גופי התכנון במערכת הכוללת היבטי ניקוז, נוף, סביבה ואיכות חיים.
- מתכנון הסדרה הנדסית אל תכנון הסדרה ירוקה - שינוי במגמות התכנון: לא עוד נחלים ההופכים למובלי בטון סגורים, אלא נחלים השומרים על אופיים הטבעי.
- מתכנון נקודתי אל תכנון אזורי כולל - בעבר עסקו בתכנון קטעי נחלים, כיום המגמה היא תכנון כולל של נחל והאזור והכנת תכנית-אב לניקוז ולשיקום הנחל כולו או אגן ההיקוות כולו (קפלן, 2004).

6.4.2 גופים מתכננים

גופים רבים עוסקים בתכנון הנוגע לנחלים או

- פיתוח גדות נחלים כפארקים לשימושים ציבוריים, כמתחמי נופש ופנאי.
- פיתוח מיזמים עסקיים על גדות נחלים, בנייה למגורים, מסחר ושירותים.
- ביצוע הגנות על גדות במתקנים של בטון ואבן (באזורים מבונים).
- ביצוע של מובלים סגורים או פתוחים באזורים עירוניים.
- הגנה על מתקנים בקרבת הנחל.
- ביצוע מעבירי מים למעבר על גדות הנחל.

המקורות הכספיים:

- אגרות ניקוז - חיוב על פי חוק מרשויות מוניציפאליות ומנהל מקרקעי ישראל, לפי מפתח בית אב ודונם קרקע.
- מקורות ממשלתיים - תקציב המדינה (משרדי החקלאות, התשתיות, הגנת הסביבה).
- מקורות ציבוריים - הקרן הקיימת לישראל, רשויות מוניציפאליות.
- מקורות פרטיים - מפעלים, יזמים, חברות מפתחות.

אופני התשלום:

- תשלומים קבועים באמצעות אגרות שנתיות של המשתמשים ושל בעלי הקרקע.
- תשלומים חד-פעמיים בהשקעות בתשתיות ניקוזיות ונופיות.

6.5.1 סקירה על השקעות בתקציב להסדרת הנחלים בשנים 1984-2006

הנתונים נאספו מ-3 מקורות עיקריים: (1) נתוני מבקר המדינה, (2) דוחות כספיים חלקיים בשנים 1991-1996, (3) דוחות כספיים מלאים בשנים 1997-2006. הנתונים מוצגים בערכים נומינליים. ניתן לחלק את התקופה הנסקרת לשלוש תת-תקופות לפי השוני הניהולי ביניהן.

תקופה ראשונה: 1984-1990

עשרים ושש רשויות הניקוז נבנו על בסיס של רשויות מוניציפאליות והתפרסו על 40% משטח ישראל. רשויות הניקוז נוהלו בעיקר על ידי מועצות אזוריות והיקף התקציב לכל רשות ניקוז היה קטן ביותר. בשנים אלו הושקעו בתשתיות ניקוז בישראל כ- 3-4 מיליון ₪ לשנה. לשם השוואה, עלות ההסדרה של קטע בן 3 ק"מ במורד נחל לכיש בקרבת העיר אשדוד, נאמדת בערך כ- 8 מיליון ₪. מכאן מתברר שהתקציב השנתי הספיק

ישראל תוך הדגשת עקרון הרצף של השטחים הפתוחים, לרבות שטחי חיץ לאורך הנחלים ושמירה על ערכי טבע, חקלאות, נוף ומורשת". התכנית מייעדת את צירי הנחלים הראשיים כ"רצועת נחל" ומורה על הכנת תכניות מחוזיות לרצועת הנחל, שיעסקו בין היתר בשיקום הנחל ובתי גידול בו.

- ת.מ.א. 12 - תכנית מתאר ארצית לתיירות נותנת לצירי נחל: "...ייעוד אקטיבי ויוצק תכנית של מתן שירות נופש ופנאי, פעילות בשטח פתוח ובחיק הטבע..."

- ת.מ.א. 11 - תכנית לאיגום, החדרה וניצול מים עיליים.

- תכניות מתאר מחוזיות (כגון ת.מ.מ. 4/14 מחוז דרום, שינוי ת.מ.מ. 4/14/44 עורקי ניקוז).
- תכנית מתאר לניקוז ונחלים (תכניות מפורטות להסדרת ניקוז).
- תכניות מתאר מקומיות (לשכונות על גדות נחלים וכו').

6.4.4 גבולות התכנון

גבולות התכנון תלויים בגוף המתכנן. גבולות התכנון של רשויות הניקוז הם בעיקרם גבולות אגן הניקוז שמשמעותו כל מרחב התכנון, אך למעשה מרב התכנון מתבצע באפיקי הנחלים וגדותיהם. לרשות ניקוז השפעה על התכניות בכל מרחב התכנון. חוסר שיתוף פעולה בין הגופים המתכננים, מביא לקושי בתיאום בין תכניות פיתוח ושיקום באגן היקוות הנחל, כך שרוב הפעילות של רשויות הניקוז מתבצע למעשה ברצועת הנחל.

6.5 תקציבים

שיקום נחלים, הסדרת נחלים, פיתוח נחלים ותחזוקה סדירה של נחלים, דורשים משאבים כספיים גדולים. סוגיית התקצוב מהווה משאב יסודי ביכולת לנהל נחלים וסביבותיהם. הנחלים מוגדרים כמשאב טבע ציבורי, ולפיכך הכספים אמורים להגיע בעיקר ממקורות ציבוריים וממשלתיים.

ניתן להגדיר מספר מאפיינים של השימושים התקציביים:

- הסדרה של נחלים, כדי למנוע נזקי שיטפונות.
- שיקום סביבתי של נחלים, שנפגעו על ידי כרייה וזיהום במי ביוב ואשפה.

הרשות המוניציפאלית.

ד. הגדרה של מבנה הרשות, הכולל מליאה המורכבת מכל הרשויות המוניציפאליות אשר בתחום האגן ושלושה משרדי ממשלה, הנהלה המורכבת מנציגי רשויות מוניציפאליות בלבד, וצוות ניהולי.

ה. העברת הסמכות ואחריות לפעילות הניקוז מאחריות המדינה לתאגיד אזורי, הפועל על ידי הרשות המוניציפאלית.

ו. הגדרת מקורות מימון - מקורות מימון עצמיים על ידי גביית אגרות ניקוז מרשויות מוניציפאליות ומנהל מקרקעי ישראל, על פי מפתח של בתי אב ודונמים, ומקורות חיצוניים של משרד החקלאות ונציבות המים למימון הטיפול בנחלים ארציים.

בשנת 1997 הוקמו רשויות הניקוז, נערכו בחירות להנהלותיהן והוקמו צוותים ניהוליים. כמו כן הוכנו תכניות עבודה ותקציבים שנתיים. נתוני הביצוע של ההשקעות בתשתיות ניקוז בתקופה השלישית, נלקחו מדוחות כספיים מבוקרים. התוצאות מפתיעות - בשנת 1997, שהיא שנת ההקמה וההתארגנות, ביצעו רשויות הניקוז עבודות בעלות של 20 מליון ₪, בשנת 1998 בוצעו עבודות בעלות של כ-50 מליון ₪, ובשנים 2001-2002 התייצב היקף ההשקעות על 90 מליון ₪ לשנה. לאחר תקופה קצרה של צמיחה התחילו ההשקעות בניקוז לרדת, בעיקר עקב הפסקת התקצוב מאת נציבות המים. בסך הכול הושקעו בתקופה השלישית כ-600 מליון ₪.

סיכום הסקירה

בשנים 1984 - 1996 המדינה ניהלה את נושא תשתיות הניקוז, ורשויות הניקוז היו זרוע ביצועית בלבד במנגנונים של עובד אחד, ללא תקציבים כמעט, וניתן לומר שלא תפקדו כלל. המדינה לא הבינה את צורכי האזור, ופעלה בשיטת כיבוי שריפות רק במקרים של נזקי שיטפונות בפועל. את השינוי הדרמטי בהיקפי הביצוע בתשתיות הניקוז בישראל החל מ-1997, ניתן ליחס למספר משתנים מרכזיים, אך את הסיבה הראשית ניתן לייחס למשתנה העיקרי - הקמת רשויות ניקוז אזוריות אשר נוהלו על ידי האזור ולטובת האזור. בבחינה של פעילות רשויות הניקוז, מסתבר שהרשויות פעלו רבות ביזום תכניות להסדרת

רק לצרכים מיידיים. רוב התקציב הוצא להסדרת אזורים עירוניים ולשיקום נחלים ארציים, כמו נחל אלכסנדר ונחל הירקון-איילון. מקור התקציב היה מהקצאות משרד החקלאות ובשנים מסוימות מתקציב קק"ל. התקציבים חולקו בין רשויות הניקוז באורח בלתי שווה.

תקופה שנייה: 1991-1996

בחורף 1991/92 ירדו כמויות גשם גבוהות משמעותית מהממוצע הרב שנתי, בכל אזורי הארץ. השיטפונות גרמו לנזקים ישירים ועקיפים בערכים של מיליארד שקלים למשקי בית, עסקים ורכוש ציבורי. עיקר הנזקים נגרמו לאזוריים עירוניים הסמוכים לנחל, כגון נחל הירקון בתל אביב ורמת גן, נחל לכיש באשדוד, נחל קישון בקרית אתא וסביבתה ונחל באר שבע בבאר שבע. כמו כן נגרמו נזקים קשים לגשרים ומעברי מים ולמתקנים הבנויים על בסיס הנחל. אירועים אלו העלו על סדר היום הציבורי את נושא תשתיות הניקוז במדינה שהטיפול בהן הוזנח במשך שנים, בעיקר בשל הקצאה בלתי מספקת של משאבים ממשלתיים.

בשנים 1991-1996, בעקבות המודעות לנושא השיטפונות, הופנו כספים בהיקף גדול יותר בעיקר לאזורים שניזוקו בשיטפונות 1991/92. ההשקעות בתשתיות הניקוז גדלו מכ-4 מליון ₪ בשנת 1991 ל-15 מליון ₪ בשנת 1996, ובסך הכול הושקעו בתקופה זו כ-50 מליון ₪.

תקופה שלישית: 1997-2006

בעקבות דוח מבקרת המדינה, המנתח את הסיבות לנזקי שיטפונות 1991/92, הוחלט להקים צוות בין משרדי לבחון את הנושא, והצוות שכר חברת ייעוץ חיצונית כדי להכין תכנית לארגון מחודש של רשויות הניקוז. ההמלצות כללו מספר רב של שינויים מבניים וארגוניים, העיקריים שבהם:

א. הקמת 11 רשויות ניקוז אזוריות במקום 26 רשויות בעבר.

ב. השטח של כל רשות ניקוז מורכב משטחים של תחומי התנקזות ולא כבעבר משטחים של רשויות מוניציפאליות.

ג. הגדרה של נחלים ארציים באחריות ומימון המדינה, נחלים אזוריים באחריות ומימון רשות הניקוז האזורית, ניקוז ותיעול מקומי באחריות

מערכות פגועות במסגרת אגנית. "רשות אגן" הנה הצעה לגוף המתאם בין בעלי עניין בתחום אגני, שבכוחו לתאם בין אינטרסים של פיתוח לבין אלו של הסביבה ולהוביל למצב בר-קיימא של סביבה אגנית בישראל.

כיום מתגבשים ארבעה מרכיבים בסיסיים, לניהול אינטגרטיבי של נחלי אכזב באזורים צחיחים וצחיחים למחצה ואלו הם:

א. ניקוז - לאור האופי השיטפוני של נחלי האכזב, נושא טיפול בניקוז ומניעת שיטפונות מהווה מרכיב חשוב ביותר.

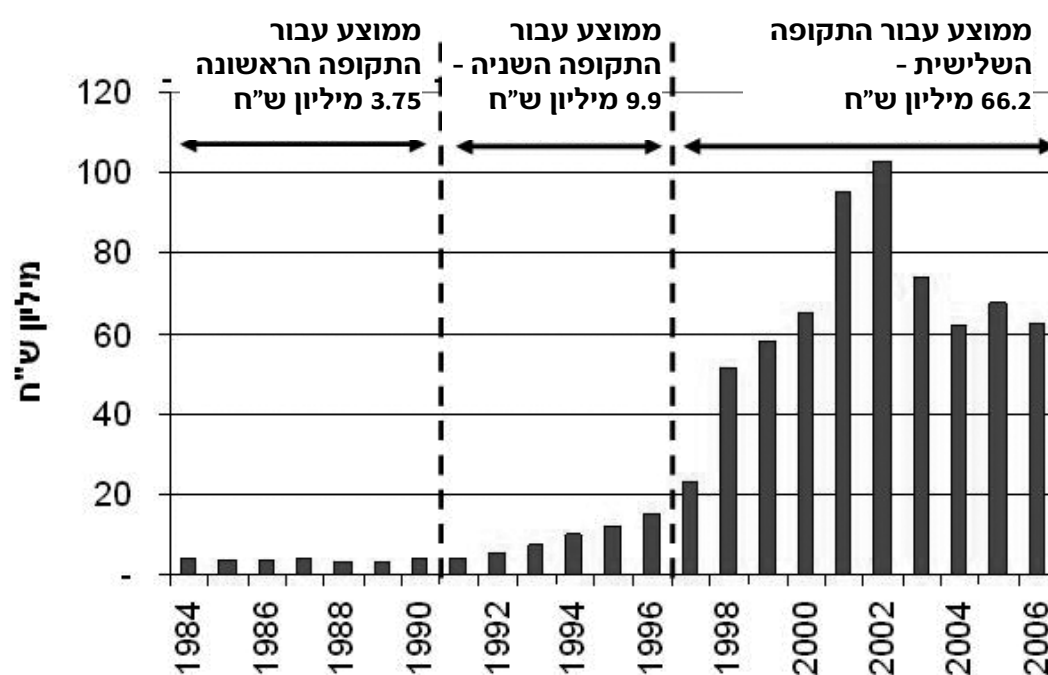
ב. סביבה - לנחל אכזב באזור צחיח פוטנציאל נופי ייחודי, בשל זרימות המים לתקופות קצרות בתנאים של אי וודאות בזמן ובגודל. הוא מהווה מקור חיים למערכת אקולוגית מיוחדת, שמתפתחת באפיק עצמו, בפשט ההצפה ובטרסות גבוהות יותר. האקוסיסטמה הנחלית מושפעת על ידי פעולות אנוש באגן הניקוז כולו ובאפיק הנחל בפרט, וכדי לשמר אותה נדרשת התייחסות לאגן כולו ותיקון עוולות. על כן שיקום מחצבות ומניעת הקמה של מחצבות חדשות באפיקי הנחלים, הנה מטרה חשובה של ניהול סביבתי. נוסף לכך, הנחל משמש לעתים כמקום להזרמת שפכים ולשפיכת פסולת וגם בהם יש לטפל כראוי.

הניקוז באזורים שניזוקו בעבר משיטפונות, הכינו תכניות אב לניקוז, העלו את רמת המודעות לצורך בשיקום נחלים ופעלו רבות לגיוס התקציבים הנדרשים מגורמי ממשלה ואחרים. נוצרה אף תחרות בין הרשויות על גיוס תקציבים מהמדינה (תרשים 3).

7. מודל אופטימלי לניהול אגני בישראל

ניהול אינטגרטיבי של אגני ניקוז מבוסס על גישה מערכתית-כוללנית, המטפלת בנחל כביחידה אקולוגית שלמה. ניהול בתפיסה כוללת דורש: (1) ידע פיזיוגרפי ואקולוגי לגבי אגן ניקוז, (2) תיאום ושיתוף פעולה בין בעלי עניין, (3) מערכת משפטית התומכת בגישה, (4) מערכת מוסדית המתאמת את הפעילות בתחום, (5) ניטור מצב סביבתי באגן הניקוז לפני ואחרי ביצוע התכניות. כיום מספר הארגונים והגופים בעלי עניין בנחל ובסביבותיו - גדול, ויכולתם לשתף פעולה או לתאם את הפעולות ביניהם - קטנה.

נחוצה מערכת ניהולית אינטגרטיבית שבכוחה להוות בסיס לשיתוף פעולה והסכמות בין הגופים השונים, ומערכת מרכזית אשר תרכז, תתאם ותוביל את הפיתוח הרב-תחומי, השימור הסביבתי ושיקום



תרשים 3: סיכום השקעות בתשתיות הניקוז

ג. שימור קרקע - בשל האופי של משטר הגשמים באזורים צחיחים, וכן הזרימות השיטפוניות, אזורים צחיחים וצחיחים למחצה הנם האזורים הסחופים ביותר על פני כדור הארץ. לכן נושא שימור קרקע מהווה סוגיה בעלת חשיבות מיוחדת באגני ניקוז בישראל.

ד. ניהול משאבי מים - מים באזורים צחיחים הנם משאב יקר ערך, ונושא שימור וניצול מים עיליים מהווה אתגר גדול. איגום מים עיליים עשוי לתרום רבות לאיכות חיים של תושבי האזור, כמקור של מים לחקלאות, וכמקור תיירותי.

משמעות הדבר, שהארגון אשר יעסוק בניהול האינטגרטיבי בישראל, יהיה בעל סמכויות בארבעת התחומים הללו. האפשרויות הן, להקים ארגון חדש בעל סמכויות בתחומים אלו או לחלופין להעניק סמכויות נוספות לארגון קיים בעל סמכויות חלקיות. האפשרות הראשונה מורכבת ומסובכת, הקמה של ארגון חדש דורשת חקיקה ראשית ותהליכים ארגוניים ארוכים. האפשרות השנייה פשוטה יותר ומשמעותה לבחור ארגון קיים בעל סמכויות מרכזיות ולבחון את האפשרות להוסיף לו סמכויות. הארגון היחידי הקיים ובעל סמכויות של ניהול אגני הניקוז, שתפקידו ניהול נושא הניקוז בנחלים.

בתרשים 4 מתואר המבנה האופטימלי לדעתנו. רשות האגן תוקם על בסיס רשות ניקוז קיימת על פי חוק הניקוז תחת משרד החקלאות (מסומן בעיגול) ויתווספו לה שלוש סמכויות נוספות (מסומן בריבוע) על פי חוקים קיימים: רשות נחל על פי חוק רשות נחל תחת המשרד להגנת הסביבה, רשות שימור קרקע על פי חוק שימור קרקע תחת משרד החקלאות, רשות מים עיליים על פי חוק המים תחת משרד התשתיות. רשות האגן תפעל בתאום ובקרה מול משרדי הממשלה, ארגונים סביבתיים ורשויות מוניציפאליות. כן תפעל לביצוע מחקרים מול האקדמיה ומכוני המחקר וכמובן תעסוק בתכנון וביצוע ופיקוח של פרויקטים של שיקום, פיתוח ושימור באגן הנחל בהיבטיו השונים.

מראי מקומות

קפלן, מ' (2004). נחלי ישראל - מדיניות ועקרונות תכנון. המשרד לאיכות הסביבה, ירושלים.

Adler, R.W. (1995). Addressing barriers to watershed protection. *Environmental Law*, 25(4): 973-1106.

Adams, D.A. (1993). *Renewable Resource Policy: The Legal Institutional Foundation*. Island Press, Washington, D.C., USA.

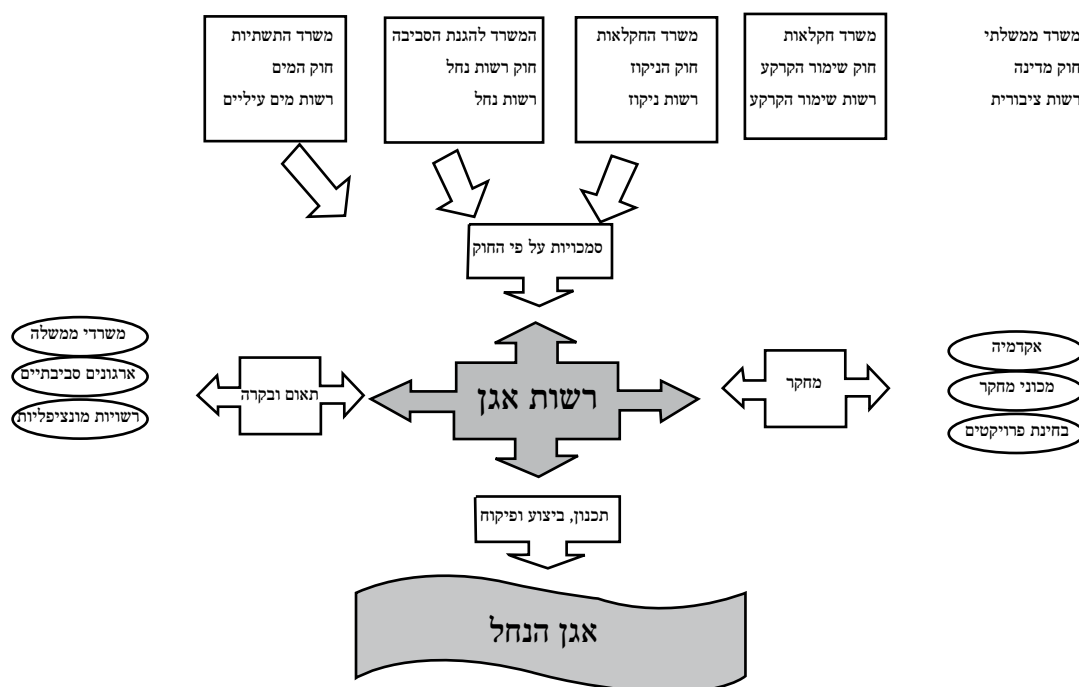
ג. שימור קרקע - בשל האופי של משטר הגשמים באזורים צחיחים, וכן הזרימות השיטפוניות, אזורים צחיחים וצחיחים למחצה הנם האזורים הסחופים ביותר על פני כדור הארץ. לכן נושא שימור קרקע מהווה סוגיה בעלת חשיבות מיוחדת באגני ניקוז בישראל.

ד. ניהול משאבי מים - מים באזורים צחיחים הנם משאב יקר ערך, ונושא שימור וניצול מים עיליים מהווה אתגר גדול. איגום מים עיליים עשוי לתרום רבות לאיכות חיים של תושבי האזור, כמקור של מים לחקלאות, וכמקור תיירותי.

משמעות הדבר, שהארגון אשר יעסוק בניהול האינטגרטיבי בישראל, יהיה בעל סמכויות בארבעת התחומים הללו. האפשרויות הן, להקים ארגון חדש בעל סמכויות בתחומים אלו או לחלופין להעניק סמכויות נוספות לארגון קיים בעל סמכויות חלקיות. האפשרות הראשונה מורכבת ומסובכת, הקמה של ארגון חדש דורשת חקיקה ראשית ותהליכים ארגוניים ארוכים. האפשרות השנייה פשוטה יותר ומשמעותה לבחור ארגון קיים בעל סמכויות מרכזיות ולבחון את האפשרות להוסיף לו סמכויות. הארגון היחידי הקיים ובעל סמכויות של ניהול אגני הניקוז, שתפקידו ניהול נושא הניקוז בנחלים.

ניהול ניקוז - האחריות על הניקוז הוענקה לרשויות הניקוז על פי חוק הניקוז ומניעת שיטפונות משנת 1959, והמשרד הממשלתי המופקד על התחום הנו משרד החקלאות. הוספת סמכויות לרשויות הניקוז מהווה בסיס איתן להקמת רשות אגנית אינטגרטיבית, אך דורשת בחינה של מבנה החקיקה.

ניהול סביבה - חוק נחלים ומעיינות משנת 1965, באחריות המשרד לאיכות הסביבה, עניינו בניהול סביבתי של אגני נחלים. בארץ קיימות רק שתי רשויות נחל, רשות קישון ורשות ירקון. בחוק נחלים ומעיינות מצוין בפירוש, שניתן להעניק סמכויות של רשות נחל לרשויות ניקוז. לאור הפעילות הנמרצת של רשויות הניקוז בנושאי סביבה ודרישה של המשרד לאיכות הסביבה האמון על החוק, הוענק, בשלב ראשון, בשנת 2002 סמכויות לשתי רשויות ניקוז - ירדן דרומי ושקמה-בשור, ובשלב שני, בשנת 2006, לעוד שבע רשויות ניקוז. המשמעות הנה שרשויות הניקוז חייבות לשלב את ההיבט הסביבתי בפעילות הניקוזית.



תרשים 4. מבנה רשות אגן מוצע

Ballweber, J.A. (1995). Prospects for comprehensive, integrated watershed management under existing law. **Water Resources Update**, 100: 19-23.

Beaumont, P. (1989). **Environmental Management and Development in Drylands**. Routledge, London.

Brooks, K. N.; Ffolliott, D. F; Gregersen, H.M.; Thames, J. L. (1991). **Hydrology and the Management of Watersheds**. Iowa State University Press, Ames, IO.

Bulkley, J.W. (1995). Integrated Watershed Management: Past, Present and Future. **Water Resources Update**, 100: 7-18.

Burt, J.P. (1993). New water resources challengers. **Water Resources Update**, 93: 27-28.

Cairns, J. Jr. (1993). The economic basis for a partnership between human society and natural ecosystems. **Water Resources Update**, 93: 18-22.

Cobourn, J. (1999). Integrated watershed management on the Truckee River in Nevada. **J. Am. Water Resources Association**, 35(3): 623-632.

Committee on Watershed Management (1999).

New strategies for America's watersheds. National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C.

Funk, W.H. (1993). A water problem that continues to be rediscovered: nonpoint source pollution. **Water Resources Update**, 93: 9-12.

Gardiner, J.L. (1984). Sustainable development for river catchment. **J. Chartered Institution of Water and Environmental Management**, 8: 308-319.

Gardiner, J.L. (1996). The use of EIA in the delivering sustainable development through integrated water management. **European Water Pollution Control**, 6: 50-59.

Griffin, C.B. (1999). Watershed councils: an emerging form of public participation in natural resource management. **J. Am. Water Resource Association**, 35(3): 505-518.

Heaney, J.P. (1993). New Directions in water resource planning and Management. **Water Resources Update**, 93: 3 – 8.

Jewitt, G. (2002). Can integrated water resources management sustain the provision of ecosystem goods and services? **Physics and Chemistry of the Earth**, 27(11-22):

- 887-895.
- James, L.D. (1974). **Man and water**. University of Kentucky, Lexington, KY.
- Kenny, D.S. (1999). Historical and sociopolitical context of the western watersheds movement. **J. Am. Water Works Assoc.**, **35**(3): 493-503.
- Margerum, R.D. (1995). Integrated watershed management: comparing selected experiences in the U.S. and Australia. **Water Resources Update**, **100**: 36-47.
- Nelson, D. (1993). Water education in integrated watershed management. **Water Resources Update**, **93**: 34-37.
- Priscoli, J.D. (1998). Water and civilization: using history to reframe water policy debates and to build a new ecological realism. **Water Policy**, **1**: 623-636.
- Riebsame, W.E. (1996). Ending of range wars? **Environment**, **38**(4): 4-12.
- Ruhl, J.B. (1999). The (political) science of watershed management in the ecosystem age. **J. Am. Water Resources Association**, **35**(3): 519-526.
- Schneiders, A.; Verheyen, R. A. (1998). Concept of integrated water management illustrated for Flanders (Belgium). **Ecosystem Health**, **4**(4): 256-253.
- Schramm, J.J.; Rubin, K. (1995). The application of environmental management system (EMS) principles to watersheds. **Water Resources Update**, **100**: 33-38.
- Steel, B.S.; Weber, E. (2001). Ecosystem management, decentralization and public opinion. **Global Environmental Change**, **11**: 119-131.
- Wayland, R.H. (1993). Comprehensive watershed management: a view from EPA. **Water Resources Update**, **93**: 23-26.