

הערכות לספיקת מים בנחלי אכזב בישראל

דו"ח מסכם

**מוגש להנהלת ענף הקרקע,
משרד החקלאות ופיתוח הכפר והקרן הקימת לישראל**

**חי כהן ויונתן לרון
אוניברסיטת בן גוריון בנגב
המחלקה לגאוגרפיה ופיתוח סביבתי**

יולי 2005

תקציר

חישוב ספיקות מים בנחלי אכזב בארץ מלווה בד"כ בשיעורי שגיאה גדולים הנובעים משימוש בשיטות עקיפות. בשיטות העקיפות מהירות הזרימה אינה נמדדת ישירות אלא מתקבלת באופן עקיף בהליך הכולל הערכה לחספוס. השגיאות בהערכת ספיקות בנחלי אכזב שיטפוניים עשויות להגיע לעשרות אחוזים ובמפלסי זרימה גבוהים עשויות להיות אף גדולות יותר.

בנחל רחף המיצג נחלים חלוקיים תלולים יחסית (~2%), החישוב לספיקה המתקבל על בסיס הערכה לחספוס לפי המשוואה של Limerinos נמצא מדויק יותר בהשוואה ל 4 שיטות מקובלות. התקבלו ההערכות הקרובות ביותר להערכות המבוססות על מהירויות זרימה (מהירות-מצוף). ההערכה לחספוס בשיטה זו משתנה בהתאם לשינוי ברדיוס ההידראולי ותלויה במאון מיצג גס (d_{84}) לחלוקים בתשתית. בנחלים כדוגמת הרחף מקדם החספוס קטן באופן ניכר עם העליה בעומק ותלוי בעיקר במאפני התשתית החלוקית, במיוחד בחלוקים הגסים. בהשוואה לנפחי זרימה מדודים המתקבלים ממאגר במורד הרחף בשיטת Limerinos, התקבלה ההערכה המדויקת ביותר בשיטפון מלא-שירטונות (גדול בקני"מ שנת). ההתאמה פחות טובה בארוע מסדר גודל "ביניים" כנראה מפני שהחישובים רגישים יותר לתרומה מקומית ו/או לאי דיוקים חישוביים שונים. יתכן שהערכה לספיקה בעומק זרימה נמוך יחסית צריכה להתבצע בשיטות נפרדות.

בנחלים רחף ואשתמוע החלוקיים הערכות לספיקה המבוססות על מדידת מהירות גבוהות משמעותית מההערכות המתקבלות בשיטות העקיפות המקובלות. תצפיות הפוכות התקבלו בנחלים סכר, בשור ושיקמה, המאופיינים במרכיב חולי ניכר בתשתית, בהם ההערכות המבוססות על מדידות מהירות נמוכות יחסית. נראה כי בנחלים חלוקיים רצוי להשתמש מקדמי חספוס נמוכים מהמקובל עד כה וההפך בנחלים בעלי מרכיב חולי בולט. חספוס גבוה בתשתית חולית עשוי לנבוע ממבנים מורפולוגיים בתשתית (כגון גלונים ודיונות), מורפולוגיות של "חתירה ומילוי" ומעבר בין קטעי תשתית חוליים וחלוקיים. כנראה שמקדמי חספוס גבוהים יחסית מתאימים לנחלים בעלי שיפוע נמוך יחסית.

שגיאות בהערכת ממדי השיטפונות עשויות לגרום לטעויות נלוות בביצוע מאזני מים ולשגיאות בחיזוי ההידרולוגי המבוצע כרקע לתכנון הנדסי (כגון גשרים ומאגרים). שיטות הערכה מוכללות לנחלים מטיפוסים שונים מגדילות את שיעורי השגיאה. לנחלים מטיפוסים שונים רצוי להתאים שיטות הערכה נפרדות. בסיס נתוני מהירויות הזרימה מנחלי אכזב בארץ מצמוצם ביותר ורק הגדלתו באופן משמעותי תאפשר קבלת הערכות לספיקה ברמת אמינות גבוהה.

תודות: לשרות ההידרולוגי והתחנה לחקר הסחף על שהעמידו לרשותנו נתונים ומידע, ליוליה אלכסנדרוב ומרק פאול על שיתוף הפעולה בניתוח נתוני נחל אשתמוע, לשירלי קריספל על המדידות בנחל סכר. תודה מיוחדת לאודי גלילי ולאן וולין שהעמידו לרשותנו נתוני מהירות נדירים באיכותם. תודה לכל הסטודנטים שעזרו בעבודות השדה.

תוכן

4	1. מבוא
4	1.1 הערכת ספיקות מים בנחלי אכזב
6	1.2 מדידת זרימות בדרום הארץ
7	1.3 אתרי המדידה בנחלים הנכללים בדו"ח
8	2. הערכות לספיקת מים בנחל רחף
8	2.1 מדידות הידרומטריות בנחל רחף
9	2.2 השוואת נתוני הידרוגרפים בנחל רחף לנתוני נפח ממאגר במורד
10	2.3 מדידת מהירויות זרימה בנחל רחף
14	2.4 השוואת הערכות לספיקת מים בנחל רחף
14	2.3.1 שיטפון 29/10/2004
16	2.3.2 שיטפון 22/11/2004
17	3. הערכות לספיקת מים בנחל אשתמוע
18	4. הערכות לספיקת מים בנחל סכר
19	5. הערכות לספיקת מים בתחנת בשור, רעים
20	6. הערכות לספיקת מים בתחנת שיקמה, ברור-חיל
21	7. דיון מסכם
24	ביבליוגרפיה
26	נספחים

1. מבוא

מטרת המחקר הנוכחי הינה לבדוק את איכות ההערכות לספיקת מים בנחלי אכזב בדרום הארץ (ובעולם בכלל), להעריך את ממדי השגיאות, להציע שיפורים ראשוניים ולהטוות כוונים להמשך המחקר.

בראשית הדו"ח מוצגת הבעייתיות והמגבלות בהערכת ספיקות מים בנחלי אכזב, מצורפת סקירה קצרה למדידת זרימות בנחלי אכזב בדרום הארץ עד כה ומוצגים הנחלים אשר בנתוניהם נעשה שימוש בדו"ח. אנליזה רחבה להערכת ספיקות בנחל רחף הנה ה case-study המרכזי בדו"ח. אנליזות נוספות בוצעו לנתוני זרימות מאתרי מדידה בנחלים אשתמוע, סכר, בשור ושיקמה. בדיון המסכם רוכזו ההשערות, ההערכות, המסקנות, וההמלצות שגובשו. בסיום הדו"ח מוצגות הצעות להמשך המחקר. לדו"ח מצורף נספח טכני המכיל כלים כמותיים לביצוע הערכות הידרולוגיות.

1.1 הערכת ספיקות מים בנחלי אכזב

הערכת ספיקות מים בנחלי אכזב כרוכה באי דיוקים ניכרים. העדר זרימה קבועה (steady-flow) מקשה על כיוול התחנות ההידרומטריות. חוסר היציבות בזרימות ובתדירותן אינו מאפשר יצירת עקומי רום-ספיקה אמינים. קיימות שיטות רבות למדידה ולחישוב ספיקות. ההבדלים ברמת הדיוק המושגת בשיטות השונות גדולים.

במדידה במד-זרימה מגשר ניתן להעריך את הספיקה באופן מדויק (טווח שגיאה 2-5%), השיטה נהוגה בעיקר בנחלי איתן (שיטת מהירות-שטח). ספיקת המים (Q) מתקבלת מ:

$$(1.1) \quad Q = A v$$

כאשר A מיצג שטח חתך רטוב ו- v מהירות ממוצעת בחתך המתקבלת ממיצוע מרחבי של מדידות במד-זרימה בחתך הזורם (Gordon et al., 1992). ההשתנות המהירה של הידרוגרף שיטפון בנחל אכזב אינה מאפשרת ביצוע מדידות מהירות רבות בזרימה קבועה ולפיכך מקשה על המיצוע. השימוש בשיטה בנחלי אכזב מצומצם ביותר.

מזרמים ומבנים הנדסיים מכוילים (flumes and weirs) בנחלים מאפשרים קבלת הערכות מדויקות מאוד לזרימה. מבנים הנדסיים המכוילים מאפשרים חישוב ספיקות בהתבסס על מדידת עומק בלבד ללא צורך במדידת מהירות (Ward and Elliot, 1995) בהתבסס על יצירת זרימה קריטית.

שיטות אוטומטיות המבוססות על טכנולוגיה מתקדמת ויקרה (שיטות אולטראסוניות ואלקטרומגטיות) מאפשרות מדידה ישירה של מהירות זרימה ממוצעת בחדך (Herschly, 1995). הניסיון בהפעלת מכשור מתקדם למדידת זרימות בנחלי אכזב מועט. ישום השיטות המתקדמות באתרי מדידה לא אידאליים בסביבות נחליות שיטפוניות, בהן הפרמטרים ההידראוליים והמורפולוגיים אינם קבועים, כרוך בקשיים רבים. תפקוד חלק מהמכשירים המתקדמים נפגע בזרימות עכורות (שיעורי רחופת גבוהים) המאפיינות שיטפונות בנחלים באזורים צחיחים. מטעמים כלכליים, הנכונות להשקיע באמצעי מדידה בנחלי אכזב בד"כ קטנה יותר מאשר בנחלי איתן.

ההערכות המקובלות לחישוב ספיקות בנחלי אכזב מתבצעות בד"כ בשיטות עקיפות. השיטות מבוססות במקרים רבים על נוסחת מנינג (Manning) והן משמשות לביצוע הערכות בנחלי אכזב רבים בארץ ובעולם.

נוסחת מנינג (גרסת שיפוע-שטח):

$$(1.2) \quad Q = (1/n)AR^{2/3}S^{1/2}$$

כאשר R רדיוס הידראולי המתקבל ממנת שטח חתך רטוב והקף הרטוב, n מקדם חספוס, S - שיפוע האנרגיה שקירובו מתקבל משיפוע פני המים או כקירוב פחות מדויק משיפוע הפרופיל של הנחל.

נוסחת מנינג (גרסת העבר שיפוע):

$$(1.3) \quad K = (1/n)AR^{2/3}$$

$$(1.4) \quad Q = KS^{1/2}$$

כאשר K מציין העבר (conveyance).

שיטות העבר שיפוע ושיפוע שטח (slope-area) הן השיטות העקיפות המקובלות בארץ. השיטות העקיפות פחות מדויקות ומתקבלות שגיאות בשיעור 10-30% באתרי מדידה יציבים ונוחים מבחינה הידראולית (Herschly, 1995). השגיאות גבוהות יותר באתרי מדידה בלתי-אידאליים. חוסר הדיוק נובע בעיקר מהעדר נתונים מדודים של מהירות זרימה, המחושבת באופן עקיף באמצעות הערכה למקדמי חספוס כגון Manning, Chezy או Darcy-Weisbach (Chow, 1959). מקדמי החספוס מתקבלים בד"כ מטבלאות מתאימות. הערכה מדויקת יותר מתקבלת ע"י התייחסות למקדם החספוס כמשתנה מורכב הכולל סדרת תיקונים למקדם החספוס (שיטת-

(Cowan). הערכת מקדם חספוס מורכב (n) כוללת ביטוי לטקסטורת התשתית (n_b), מידת הרגולריות של חתך הרוחב (n_1), השתנות חתך הרוחב במורד (n_2), מכשולים (n_3), צמחיה (n_4) ונפתוליות (m) (Arcement and Schneider, 1989):

$$(1.5) \quad n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m$$

הפרמטרים מתקבלים מהערכות איכותיות, כמותיות-למחצה או ממשוואות אמפיריות. באתרי מדידה בעלי נוף מורכב מתאימים מקדמי חספוס נפרדים לקטעי אפיק ופשט הומגניים. שיטה מקובלת להערכת חספוס מבוססת על אוסף תמונות של נחלים בעלי אפיון של תשתית, גדות וצמחייה הניתנים להתאמה לנחל בעל מורפולוגיה ותכונות הידראוליות דומות (Barnes, 1967; Hicks and Mason, 1991). האיפיונים נקבעים באתרים שנמדדת בהם מהירות מים בשיטות הידרומטריות מקובלות בצירוף פרמטרים הידראוליים ומורפולוגיים שונים. קיימים מעט (אם בכלל) קבצי תמונות מלווים ברקע הידראולי להערכת חספוס עבור נחלי אכזב.

1.2 מדידת זרימות בדרום הארץ

מדידות הידרומטריות בנגב מתקיימות מאז 1935 (נחל צין שנקרא אז ואדי פוקרה). השרות ההידרולוגי החל את מדידותיו בנגב בתקופת המנדט הבריטי בשנות ה-40 של המאה הקודמת ופרס במהלך השנים כמות מרשימה של תחנות הידרומטריות (גרנבוים 2002). לנחלים בדרום הארץ קיימות מספר סדרות נתונים שמשכן למעלה מ-50 שנה (שנציס ואחרים 1997). מדידות הידרומטריות באזורים יבשים בעולם אינן נפוצות ומאופיינות בסדרות נתונים קצרות. פיזור וצפיפות התחנות ההידרומטריות במרחבים מדבריים בד"כ נמוכים מאוד. בעולם קיים יצוג הידרולוגי מרחבי חסר לסביבה המדברית, המדברית-למחצה ולחה-למחצה, המאופיינים בהתרחשות אקראית בזמן ובמרחב של אירועי זרימה. לפיכך, מערכת המדידה ההידרומטרית בנחלי אכזב בארץ הנה מהמקיפות והחשובות ביותר בהשוואה לאזורים יבשים בעולם.

בסיס נתוני הזרימות של נחלי אכזב בארץ מבוסס על הערכות עקיפות למהירות זרימה ולכן שיעור השגיאות גבוה. חלק ניכר מהתחנות ההידרומטריות ממוקם באתרים בלתי אידאליים מבחינה הידראולית. אילוצים סטרוקטורליים וטקטוניים במזרח הנגב, בערבה ובמדבר יהודה גורמים למיעוט קטעי נחל המתאימים למדידות. לרוב נמדד בכל נחל מפלס הזרימה בחתך אחד בלבד. באתרי מדידה רבים מתרחשים תהליכי חתירה והשקעה חזקים הפוגעים באמינות עקומי רום-ספיקה המבוססים על הנחה של חתך קבוע. קשה לעדכן את מדידת החתכים הקבועים בגלל

השינויים הדחופים. לפיכך, רמת האמינות של בסיס הנתונים ההידרולוגיים של נחלי אכזב בארץ (ובעולם) נמוכה בהשוואה למקובל בתחנות הידרומטריות בנחלי איתן.

1.3 אתרי המדידה בנחלים הנכללים בדו"ח

האנליזות בדו"ח בוצעו על בסיס נתונים הידרומטרים מ-5 אתרי מדידה בנחלי אכזב מטיפוסים שונים שמתבצעת בהם מדידה הידרומטרית (טבלה 1.1).

הcase-study המרכזי המוצג בדו"ח מבוסס על נתוני התחנה במורד נחל רחף. באזור התחנה נחל רחף תלול יחסית (שיפוע 0.017), רחב יחסית (30 מ') וחלוקי. אתר המדידה מיצג היטב אתרים נחלים רחבים יחסית בקטעי נחלים במורד אגן הניקוז בדרום בקעת הירדן, בקע ים המלח והערבה.

האתרים הנוספים שנתוניהם שולבו במחקר הנוכחי: (א) התחנה בנחל אשתמוע הזורם לבקעת ב"ש מהר חברון בקטע חלוקי אלוביאלי בעל גדות לסיות. התחנה ממוקמת בשולי בקעת באר שבע ומיצגת היטב קטעי נחל דומים באפיקים הזורמים מהרי יהודה לצפון הנגב ולשפלה. (ב) נחל סכר, אפיק חלוקי-חולי טיפוסי למרכז הנגב. (ג) אתר המדידה בשור-רעים מצוי בקטע חולי-חלוקי. האתר ממוקם במורד אגן הבשור ומיצג נחלים גדולים יחסית בצפון מערב הנגב. (ד) האתר בנחל שיקמה ממוקם בדרום מישור החוף ומיצג נחלי אכזב בעלי תשתית חולית המאפיינת חלק מנחלי האכזב המנקזים מערבה לעבר מישור החוף.

טבלה 1.1: הנחלים שנתוניהם נכללים באנליזות במחקר הנוכחי.

נחל/אתר	מאפיינים	שיפוע	רוחב אפיק מ'	הידרומטריה
רחף	חלוקי תלול	0.017	30	מדידת עומק אוטומטית ב-2 חתכים בפירוט עיתי גבוה, חתך קבוע, תחנה סטנדרטית (שרות הידרולוגי), מדי רום מקסימלי (תחל"ס), נתוני מהירות מצוף, מאגר מנוטר במורד.
אשתמוע	חלוקי	0.0075	6	מדידת עומק אוטומטית במס' חתכים בפירוט עיתי גבוה, חתך קבוע, נתוני מהירות מצוף.
סכר	חלוקי-חולי	0.008	6	מדידת עומק אוטומטית ב-3 חתכים בפירוט עיתי גבוה, חתך קבוע, נתוני מהירות מצוף.
בשור-רעים	חולי-חלוקי	0.0015	37	תחנה סטנדרטית (שרות הידרולוגי), מדידות מהירות מפורטות (מד זרימה), נתוני מהירות מצוף.
שיקמה, ברור-חיל	חולי	0.0057	18	תחנה סטנדרטית (שרות הידרולוגי), מדידות מהירות מפורטות (מד זרימה). נתוני מהירות מצוף

בנחלים רחף, אשתמוע וסכר ממוקמות תחנות הידרומטריות משוכללות בהם קיים חתך בטון קבוע ומתבצעת מדידת עומקים בפירוט עיתי גבוה בחיפוי לחץ ב-2 חתכים לפחות. בשלושת הנחלים מתבצעות מדידות מהירות מצוף מעת לעת. באתרים רחף, בשור ושיקמה קיימת תחנה סטנדרטית מהסוג המאפיין את רוב התחנות ההידרומטרית בנחלי אכזב בארץ. מדידת עומק מתבצעת במצוף מפלס בחתך אחד ומתבצעות מדידות מהירות מצוף מעת לעת. ב-2 האתרים השרות ההידרולוגי ביצע מדידות מהירות מדויקות בעזרת מד זרימה (שיטת מהירות-שטח). מדידות כה מדויקות למהירות זרימה כמעט ואינן מתבצעות בנחלי אכזב שיטפוניים בעולם ולכן מדובר בקובץ נתונים יחודי (הנתונים באדיבות השרות ההידרולוגי).

2. הערכות לספיקת מים בנחל רחף

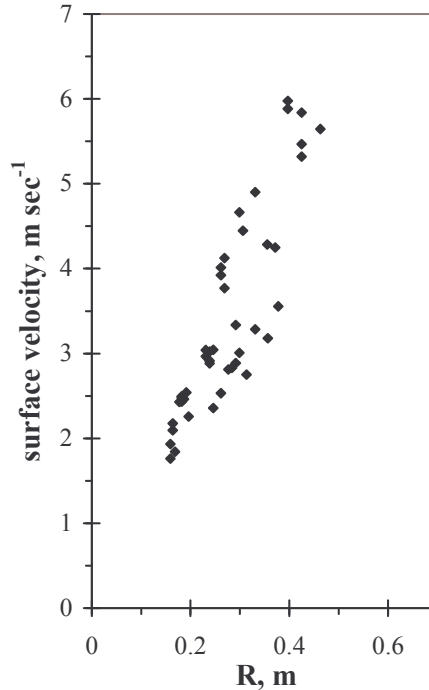
2.1 מדידות הידרומטריות בנחל רחף

במורד נחל רחף בדרום מדבר יהודה נמדדות זרימות ב-4 שיטות שונות. אתר המדידה ממוקם במורד האגן באפיק חלוקי רחב (Cohen and Laronne, 2005). השרות ההידרולוגי מנטר עומק זרימה מ-1991 במיקום אחד בתחנה סטנדרטית המכילה מצוף מחובר לרשם מכני, השיטה המקובלת ברוב התחנות ההידרומטריות בנגב מזה עשרות שנים (גרינבוים 2002). לאתר המדידה ברחף מאפיינים ומגבלות דומים לתחנות ההידרומטריות בנחלים חלוקיים נוספים בנגב. ב-1996 הוקמה ברחף תחנה הידרומטרית אוטומטית משוכללת. ניטור עומק מתבצע בחיפוי לחץ ב-3 מקומות (2 חתכים). מיקום עמודי המדידה מאפשר קבלת שיפועי אורך ורוחב של הזרימה. בנוסף, הוקם חתך בטון קבוע. המדידות מתבצעות בפירוט עיתי גבוה: מתקבלת קריאה כל 10 שניות הנרשמת כממוצע ל-30 שניות. בתחנה הותקנו מדי מקסימום המאפשרים קבלת הערכה לרום מקסימלי בשיטה הנהוגה בתחנה לחקר הסחף. מעת לעת נערכות ברחף מדידות מהירות בשיטת המצופים. ראוי לציין כי מדידות מהירות בנחלי הערבה וים המלח נדירות ביותר ולכן המדידות הכלולות בדו"ח מהוות בסיס נתונים ייחודי. במורד התחנה קיים בור כרייה גדול הקולט את כל יבול המים של אגן הניקוז. החל מעונת הגשמים הנוכחית התחנה לחקר הסחף מבצעת רישום אוטומטי לעומק מים במאגר (בור) רחף. בזכות מאפייני אתר המדידה וריכוז האמצעים למדידת זרימות הרחף הינו case study ראוי לבחינת רמת הדיוק של הערכות לספיקה בנגב. באתר ניתן להשוות בין הערכות לספיקות ונפחי מים המתקבלות בשיטות מדידה וחישוב שונות.

2.2 מדידת מהירות זרימה בנחל רחף

מהירויות זרימה נמדדו בנחל רחף בשיטת המצופים (איור 2.1). המהירויות שנמדדו גבוהות יחסית. הן נערכו במפלסי זרימה מקסימליים בטווח 0.35-0.85 מ' בזרימה תת קריטית. נצפתה עלייה ניכרת במהירות הזרימה עם העלייה במפלסים (והרדיוס ההידראולי). הקשר בין המהירות לרדיוס ההידראולי חזק יותר בתוך כל אירוע זרימה מאשר בין האירועים. ההבדלים בין האירועים כנראה מבטאים שינויים מורפולוגיים וטקסטורליים באפיק לאורך זמן. הרדיוס ההידראולי עודכן מארוע לארוע, אולם לא ניתן לאמוד את השינויים במהלך הארועים. ההנחה, שיש לה אחיזה רחבה בספרות לפיה בנחלים חלוקיים טבעיים אין הקטנה ניכרת במקדם החספוס עם העלייה במפלס הזרימה (Jarrett, 1985) הוכחה כבילתי נכונה לפי המדידות בנחל רחף. גם אם ייתכן שהערכה למהירות ממוצעת המחושבת לפי מהירות מצופים גבוהה יחסית, ניכר שלפחות עד רדיוס הידראולי ~0.5 מ' מתרחשת ירידה ניכרת במקדם החספוס.

המעבר ממהירות מצוף למהירות ממוצעת בחתך מתקבל באמצעות מקדם מצוף אמפירי שפותח ע"י התחנה לחקר הסחף (המידע, באדיבותם). המקדם כויל ע"י חוקרי התחנה באמצעות מספר יחסית רב של תצפיות מנחלים (נספח 1). המקדם רגיש לשינוי בחתך הזורם עם השינוי במפלס. המרת מהירויות המצופים ברחף הניבה מהירויות זרימה ממוצעת בטווח 1-3 מ'שני. נתונים אלה אינם מתאימים למהירויות המחושבות באופן עקיף בשיטה הנהוגה בשרות ההידרולוגי (שיפוע-שטח ו- n יחסית גבוה). בשיטה זו מתקבלות מהירויות נמוכות בהרבה: 0.5-1.5 מ'שני. באופן עקרוני מדידות עדיפות על חישוב עקיף. אולם, בשיטת המצופים המעבר ממהירות מצוף (המבטאת מהירות פני מים) למהירות ממוצעת בחתך מורכב ובמקרים רבים כרוך באי דיוקים ניכרים.



איור 2.1: מהירויות זרימה בפני המים (מצופים), נחל רחף. R מיצג רדיוס ההידראולי.

2.3 השוואת הערכות לספיקת מים בנחל רחף

הספיקה בנחלים רחף וקנאים מחושבת בשיטת העבר השיפוע המבוססת על נוסחת מנינג. מהירויות הזרימה שנצפו היו גבוהות מהערכות שהתקבלו בשיטות המקובלות ולכן חייבו בחינה מחודשת. נערכה השוואה בין מספר שיטות לחישוב זרימה.

מהערכה למקדם החספוס (n) שבוצעה על בסיס טבלאות (Chow 1959) התקבלו ערכים של 0.05 - 0.03 לזרימה מלאה שירטונות. מהערכות ל- n מורכב לפי שיטתו של Cowan, התקבלו הערכות דומות. טווח הערכים המוצע למקדם חספוס מתאים לביצוע הערכות מקורבות, אך במפלסי זרימה גבוהים מתקבלים הבדלים גדולים מאוד בין הספיקות המחושבות במקדמי חספוס 0.03 בהשוואה ל-0.05.

הערכת n קבוע עבור יצירת עקום רום ספיקה לתחנה הידרומטרית אינה מספקת בנחלים בהם מקדם החספוס משתנה עם עומק הזרימה. מדידות המהירות ברחף מוכיחות שהחספוס אינו קבוע במפלסים שונים. חשוב להשתמש ברחף ודומיו במקדם חספוס הרגיש לשינויים ברדיוס ההידראולי.

נבחנו מספר שיטות להערכת n. השיטות מפורטות בטבלה 2.1 וההשוואה מוצגת באיור 2.2. בכל שיטות החישוב העקיפות התקבלו ערכי n גבוהים יותר מהערכות המבוססות על מדידות מהירות מצוף. בשיטות של Jarrett ושל השרות ההידרולוגי מתקבלים ערכים גבוהים יחסית. בשיטה של Limerinos ובזו הנהוגה בתחנה לחקר הסחף (נספח 2) מתקבלות הערכות נמוכות יותר וקרובות יותר לנתוני מהירות מצוף מדודות.

עדיין לא קיימות מדידות המאפשרות לבחור באופן אמפירי מבוסס את השיטה המדויקת יותר. בחירת השיטה להערכת החספוס במחקר הנוכחי בוצעה על בסיס שיקולים מתודולוגיים תאורטיים. הספיקות בנחלים רחף וקנאים חושבו על בסיס הערכה לחספוס לפי שיטתו של Limerinos (טבלה 2.1). השיטה נבחרה על בסיס השיקולים הבאים:

(א) בסיס נתוני המהירות מבוסס על מהירויות מצופים. המעבר ממהירות מצוף למהירות ממוצעת בעייתי. טווח העומקים בהם נמדדו מהירויות המצופים קטן מכדי לשמש בסיס לעקום רום ספיקה מלא. לכן, אין מנוס אלא לחשב ספיקות ברחף ובקנאים בשיטה עקיפה כמקובל בנחלי אכזב.

(ב) המשוואה של Limerinos הניבה את הערכים הקרובים ביותר למהירויות המדודות.

(ג) השיטה רגישה לשינויים ברדיוס ההידראולי.

(ד) החספוס של נחל רחף תלוי בעיקר בטקסטורה של החלוקים בתשתית. השיטה של Limerinos רגישה לגודל הגרגר בתשתית. ברחף ובנחלים דומים המאונים הגבוהים של גדלי הגרגר בתשתית מושפעים יותר ע"י הזרימה. השיטה הנדונה היא אחת היחידות המעסיקה מאון גבוה (d_{84}) של גודל גרגר כאשר לרוב משתמשים בחציון (נספח 3).

הספיקות המחושבות במפלסים גבוהים לנחל רחף בשיטה המוצעת גבוהות באופן משמעותי בהשוואה להערכות בשיטת החישוב הנהוגה בשרות ההידרולוגי האחראי להערכות הרשמיות לזרימה בנגב. ההבדל בין הערכות הגבוהות והנמוכות לספיקת השיא ונפח הזרימה עשוי להיות גדול (איורים 2.3, 2.4 טבלה 2.2). השיטה הנהוגה בתחנה לחקר הסחף מספקת הערכות דומות ל-Limerinos במפלסי זרימות גבוהים יחסית ודומות להערכות השרות ההידרולוגי ובמפלסים הנמוכים יותר. במפלסים הנמוכים יחסית שיטת Limerinos מספקת הערכות גבוהות יחסית לספיקה (איור 2.3).

טבלה 2.1: שיטות לחישוב מקדם החספוס של מנינג שנבדקו במהלך המחקר.

method	equation	reference
E.R.S	$n = 0.027R^{-0.855}$, $n > 0.03$	Garti et al. 1998
Jarrett 1985	$n = 0.39S^{0.38} R^{-0.16}$	Jarrett 1985
Jarrett 1984	$n = 0.32S^{0.38} R^{-0.16}$	Greenbaum 1996
Limerinos 1970	$n = 0.1129R^{1/6} / [1.16 + 2.01 \log(R/d_{84})]$	Gordon et al. 1992
floats velocity	$n = (R^{2/3} S^{1/2}) v$	Herschy 1995
I.H.S	$n = 0.05$	I.H.S internal field report

n, Manning roughness coefficient,

R, hydraulic radius,

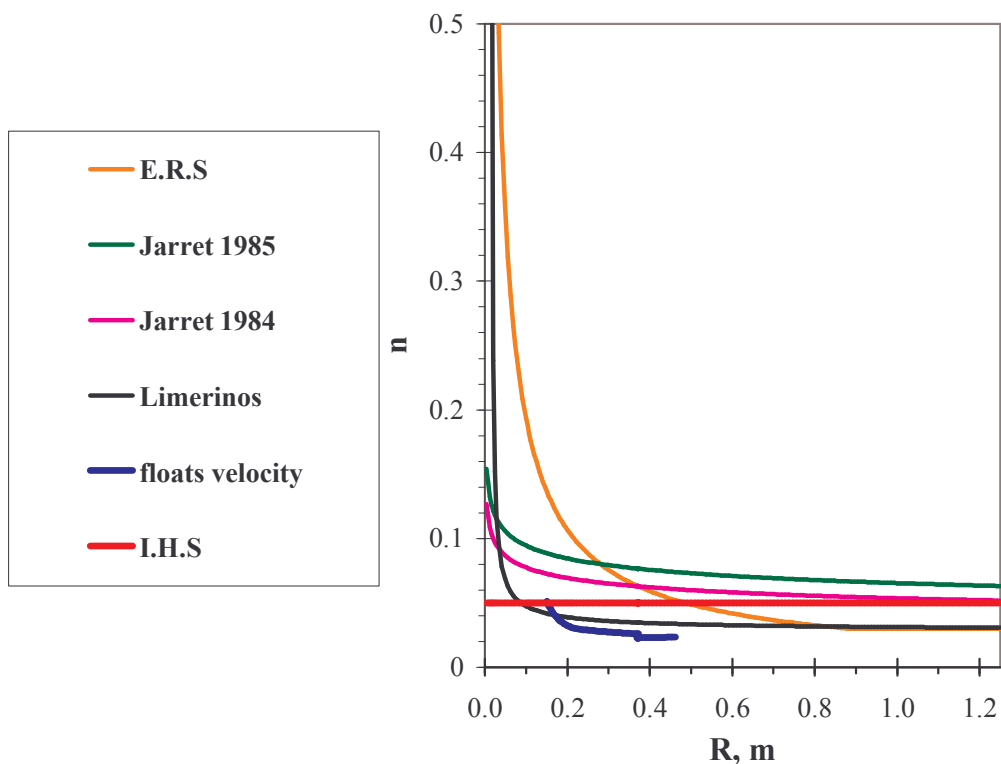
S, water slope,

d_{84} , 84 percentile of bed material

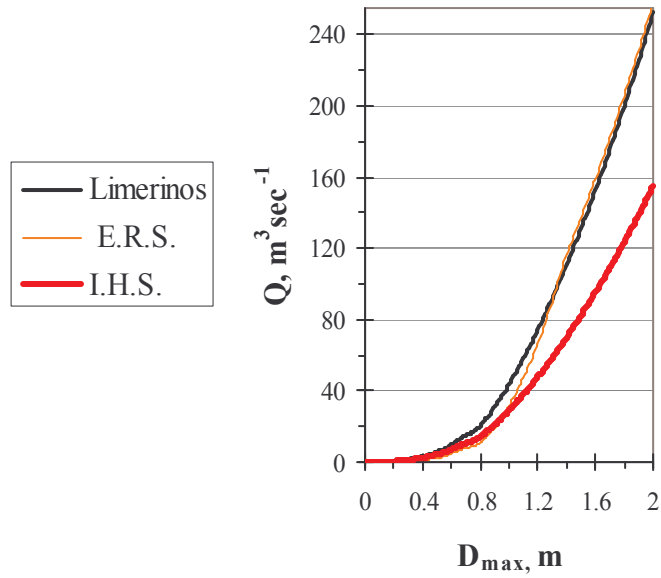
v cross sectional mean velocity. $v = v_f k$, k , float factor. v_f , float velocity

I.H.S denotes Israel Hydrological Service.

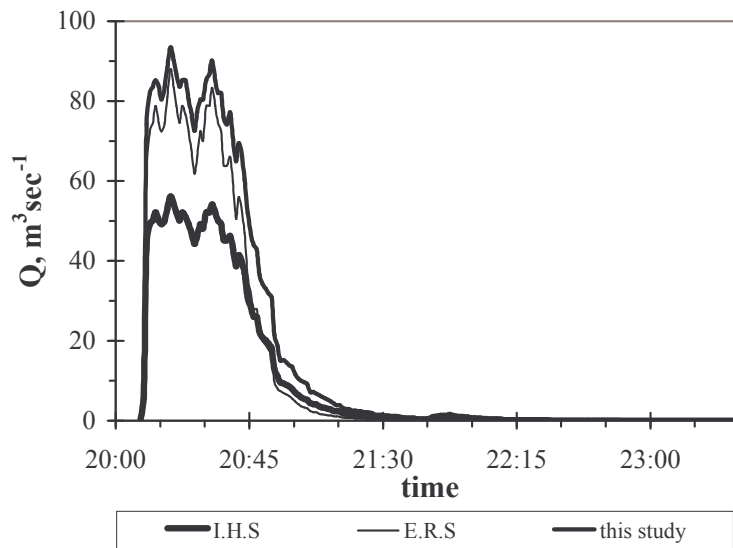
E.R.S denotes Erosion Research Station (Israel)



איור 2.2: השוואה בין שיטות שונות לחישוב מקדם חספוס של מנינג לחתך רוחב קבוע בנחל רחף. שיטות החישוב מפורטות בטבלה 2.1.



איור 2.3: השוואה בין עקומי רום-ספיקה לנחל רחף אשר חושבו בשיטות שונות (פירוט שיטות חישוב הספיקה בטבלה 2.1 ובפרק 1.1).



איור 2.4: דוגמא להשוואת שלוש שיטות לחישוב ספיקה (Q). מוצגים הידרוגרפים של ה-17/10/1997 מנחל רחף. הושו השיטות הנהוגות בשרות ההידרולוגי (I.H.S.), בתחנה לחקר הסחף (E.R.S.) ובמחקר הנוכחי. (this study)

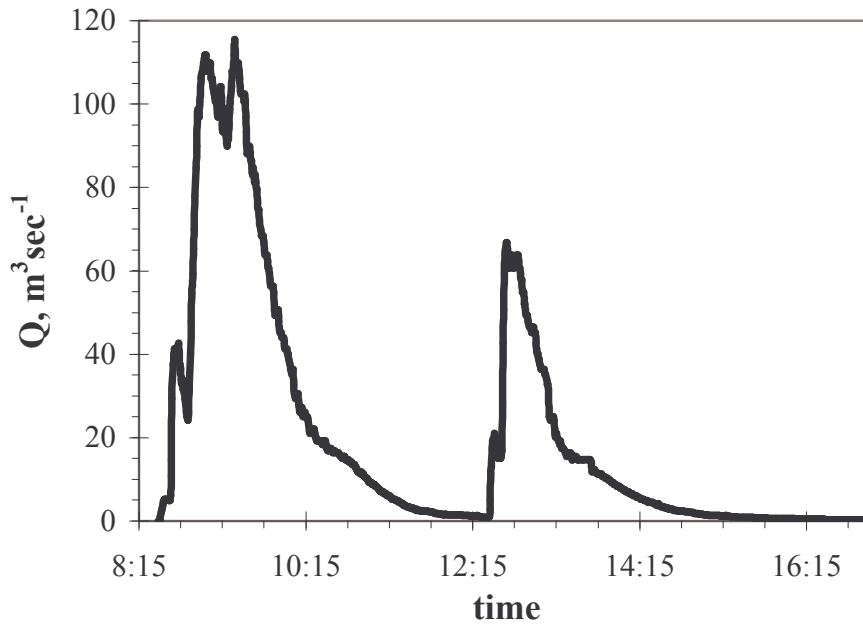
טבלה 2.2: השוואת ספיקות שיא (Q_{max} , מודגש) ונפחי זרימה (V) בנחל רחף המתקבלים בשיטת החישוב המבוססת על הערכות השרות ההידרולוגי (I.H.S.) למקדם חספוס ובשיטה במחקר הנוכחי (Limerinos). חשוב להדגיש שבהשוואה מופיעים נתונינו שחושבו לפי שיטת השרות ההידרולוגי ולא נתוני התחנה ההידרומטרית הסטנדרטית של השרות ברחף. ההשוואה נערכה לארועים מלאי-שירטונות בעלי זמן חזרה של פחות מ 1 לשנה (שיטפונות גדולים בקני"מ שנת) בשנים 1997-2002.

date	I.H.S. $Q_{max,3} \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ $V, \text{ m}^3 \cdot 10^6$	Limerinos $Q_{max,3} \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ $V, \text{ m}^3 \cdot 10^6$
15/05/1997	124 0.27	206 0.45
17/10/1997	56 0.12	93 0.20
18/10/1997	38 0.09	64 0.15
02/05/2001	62 0.21	98 0.32
29/03/2002	24 0.12	36 0.16

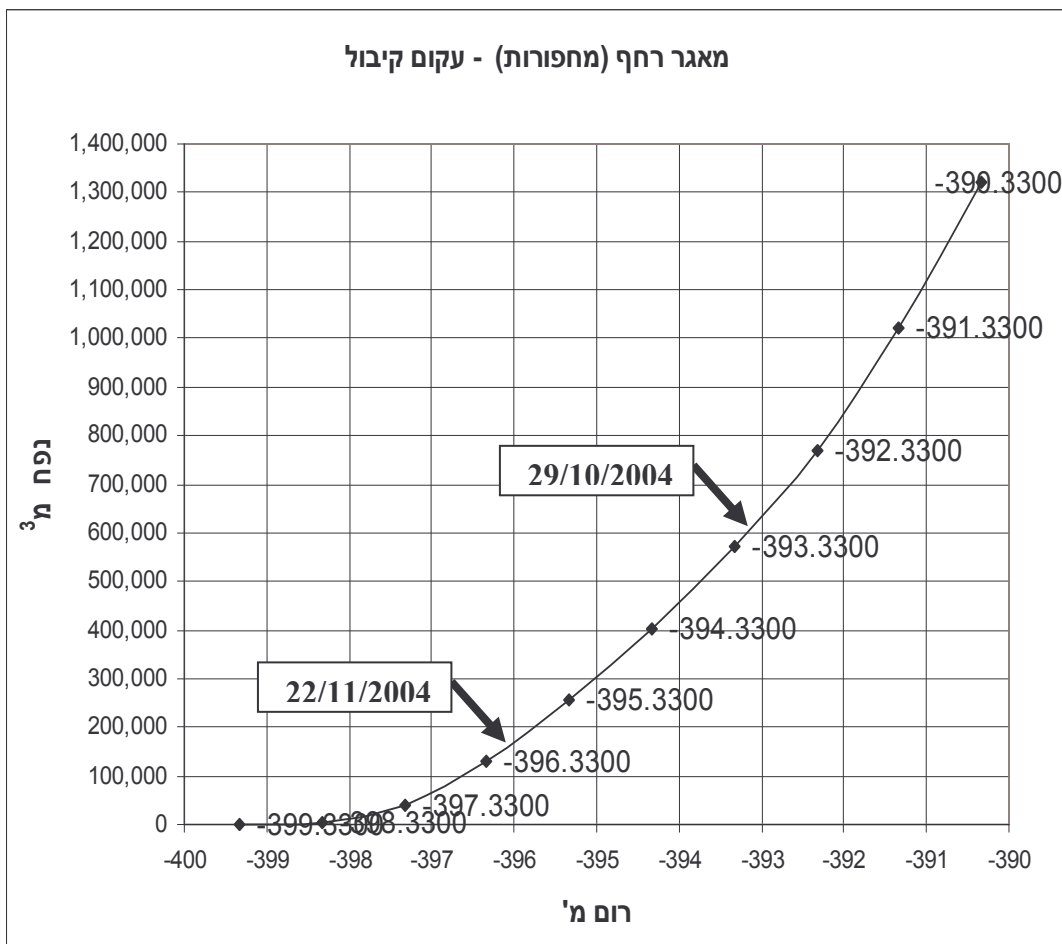
2.4 השוואת נתוני הידרוגרפים בנחל רחף לנתוני נפח ממאגר במורד.

2.4.1 שיטפון 29/10/2004

ב-29/10/2004 התרחשה בצפון הערבה ודרום מדבר יהודה סופת גשם חזקה במיוחד בעלת זמן חזרה גדול. בנחל רחף התרחש ארוע "מלא שירטונות". בתחנה בנחל רחף התקבל הידרוגרף (איור 2.4). ספיקת השיא ונפח הזרימה היו מהגדולים שהתקבלו באתר ב 15 השנים האחרונות. הספיקות חושבו לפי שיטתו של Limerinos. לפי הערכותנו ספיקת השיא 115 מ"ק/שניה, והנפח 0.62 מלמ"ק. ניתן להשוות את נפח הזרימה לנתוני מאגר רחף (בור הכריה) בו מבוצעות מדידות ע"י התחנה לחקר הסחף (איור 2.5). במאגר היתקבל נפח של 0.62 מלמ"ק כלומר התקבלה התאמה טובה. מבין השיטות המופיעות בטבלה 2.1 בשיטה של Limerinos התקבלה ההתאמה הטובה ביותר.



איור 2.4: הידרוגרף השיטפון ב-29/10/2004 בנחל רחף. כאשר Q-ספיקת המים לפי שיטת החישוב של Limerinos.



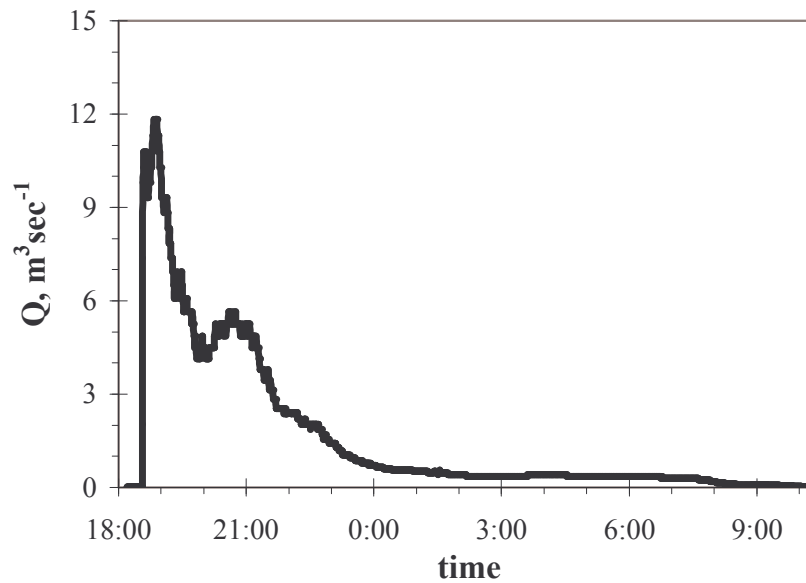
איור 2.5: עקום רום נפח למאגר רחף (באדיבות התחנה לחקר הסחף). המפלסים שהתקבלו ב-29/10/2004 וב-22/11/2004 מסומנים בחץ.

2.4.2 שיטפון, 22/11/2004

ב-22/11/2004 התרחש שיטפון קטן יותר מסדר גודל ביניים. הערכתנו לספיקת השיא: 12 מ"ק/שני והנפח 0.09 מלמ"ק (איור 2.6). במאגר נמדד נפח מים 0.16 מלמ"ק (איור 2.5). ההתאמה לנפח שהתקבל במאגר פחות טובה בהשוואה לארוע הקודם. התצפית מעניינת שכן דווקא באירוע קטן נצפה לנפח קטן יותר במאגר בהשוואה לנפח המחושב מהידרוגרף במעלה בגלל איבודי תמסורת יחסית גדולים.

צפוי שבזרימות קטנות יתקבלו הערכות פחות מדויקות. הערכה כמותית לזרימות בתחנה במפלסי זרימה רדודים יחסית ובמקדמי חספוס גדולים ומשתנים יותר, פחות מדויקת. באיור 2.2 ניתן להבחין שבכל השיטות המקדם משתנה באופן ניכר בתחום הרדיוסים ההידראוליים הנמוכים יחסית עד שמגיע לערך קבוע בקירוב ברדיוס הידראולי גבוה יחסית. במדידה ברדיוסים הידראוליים נמוכים קשה יותר להעריך את מקדם החספוס היות ובשלב זה ערכו דינמי ביותר. במאגרים מהסוג של בור רחף, שתשתיתם אינה חלקה וקיימים שינויים טופוגרפיים מקומיים, מדידת הנפח במפלסי איגום נמוכים פחות מדויקת. בסופה שחוללה את השיטפון התרחש גשם ניכר במזרח האגן בלבד (כהן ולרון, 2005). יתכן שמטחי גשם מקומיים גרמו לתרומת נגר מקומית למאגר בנפרד מהזרימה העיקרית באפיק הרחף. כל אחת מהסיבות המוזכרות עשויה לגרום לחוסר ההתאמה בין נפח-הידרוגרף ונפח-מאגר, אולם אין להוציא מכלל אפשרות שלזרימות במימדים שונים יש להתאים שיטות שונות לחישוב ולא לנקוט בשיטה בודדת וגורפת. להשערה מסוג זה מבוססת על הגיון הידרולוגי, היות וההתנהגות ההידראולית של הזרימה בתעלה במפלסים שונים משתנה. לאישוש ההשערה ולמציאת שיטת חישוב מתאימה דרושות מדידות נוספות.

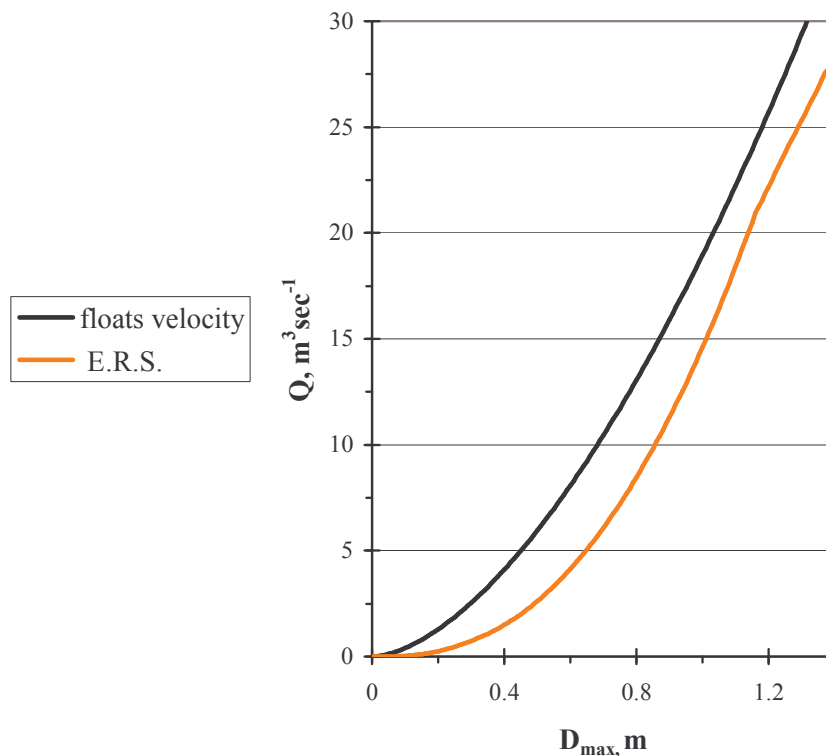
המדידה במאגר רחף החלה בסתיו האחרון. השוואת נפחי הידרוגרף ומאגר בוצעה במהלך שני שיטפונות בלבד. דרושות תצפיות דומות נוספות להרחבת בסיס ההשוואות.



איור 2.6: הידרוגרף השיטפון ב-22/12/2004 בנחל רחף. כאשר Q - ספיקת המים לפי שיטת החישוב של Limerinos.

3. הערכות לספיקת מים בנחל אשתמוע

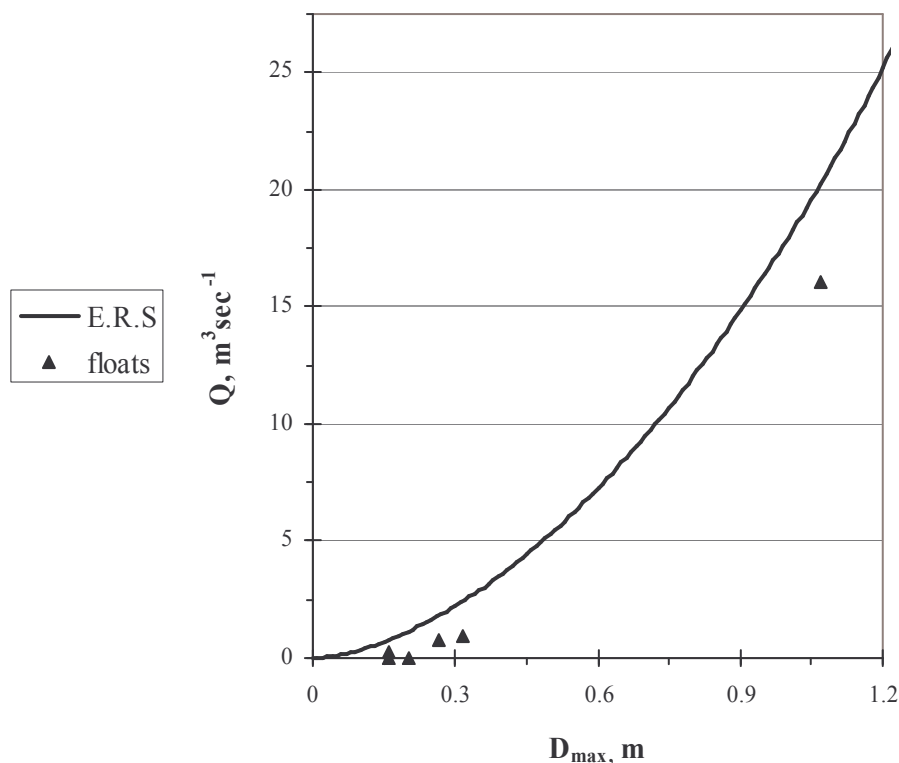
בתחנת המחקר בנחל אשתמוע מתבצעת מדידת אוטומטית של עומק זרימה בפירוט עיתי גבוה ובמס' חתכים (Alexandrov et al., 2003). התחנה פועלת במשך יותר מעשור ובוצעו מדידות מהירות מצוף רבות (85 מדידות!). הספיקה בנחל מחושבת לפי עקום רום ספיקה המבוסס על מהירות המצופים (איור 3.1). בהשוואה לעקום רום ספיקה שחושב בשיטה עקיפה (E.R.S), איור 3.1 מתקבלות ספיקות גבוהות יותר, כלומר המגמה דומה לממצאים ברחף. הספיקות נמצאו גבוהות למרות שלצורך ההשוואה נבחרה שיטה עקיפה הכוללת מקדמי חספוס נמוכים יחסית. בספיקה מלאת גדות (בעומק ~ 1.2 מ') בשיטת המצופים מתקבלות באשתמוע הערכות גבוהות בכ- 30% בהשוואה לשיטה העקיפה הנהוגה בתחל"ס ובזרימות קטנות יותר. ההבדלים בספיקות המחושבות גדולים עוד יותר. בשיטות עקיפות המעסיקות מקדמי חספוס גבוהים יותר (טבלה 2.1) מתקבלים הפרשים גדולים יותר.



איור 3.1: השוואה בין עקומי רום ספיקה לנחל אשתמוע בשיטת מהירות-מצוף ובשיטה העקיפה הנהוגה בתחל"ס. השיטות מפורטות בפרקים 1.1, 2.2 ובטבלה 2.1.

4. הערכות לספיקת מים בנחל סכר

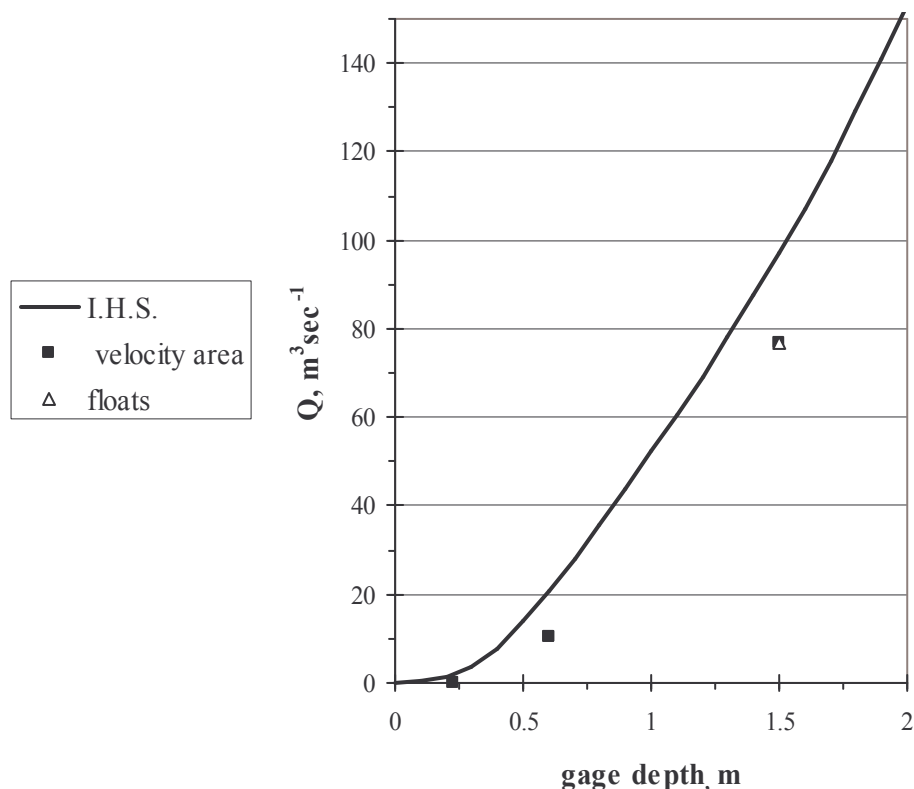
בתחנת המחקר בנחל סכר מתבצעת מדידת אוטומטית של עומק זרימה בפירוט עיתי גבוה ב- 3 חתכים. באיור 4.1 מוצג עקום רום ספיקה המבוסס על שיטה עקיפה שחושב באופן דומה לעקום המקביל לנחל אשתמוע (איור 3.1). המדידות מבוססות על חתך בטון אמצעי קבוע. כמות מדידות מהירות-מצוף בנחל סכר עדיין קטנה מכדי לבסס עקום רום-ספיקה מהימן. המעבר ממהירות מצוף למהירות ממוצעת בוצע לפי השיטה המוצגת בנספח 1. באיור 4.1 ניתן להבחין שהספיקות המחושבות על בסיס מהירויות המצוף נמוכות מההערכות העקיפות המתאימות. כלומר, בניגוד לנחלים רחף ואשתמוע החלוקיים, בנחל סכר בעל התשתית החלוקית-חולית מדידות המהירות מניבות הערכות נמוכות יחסית לספיקה. לביסוס הממצאים באתר הנדון דרושות מדידות נוספות.



איור 4.1: עקום רום-ספיקה לנחל סכר המבוסס על שיטת ההערכה עקיפה הנהוגה בתחל"ס. במקביל מוצגות הערכות נקודתיות לספיקה המבוססות על מהירות מצוף. השיטות מפורטות בפרקים 1.1, 2.2 ובטבלה 2.1.

5. הערכות לספיקת מים בתחנת בשור-רעים

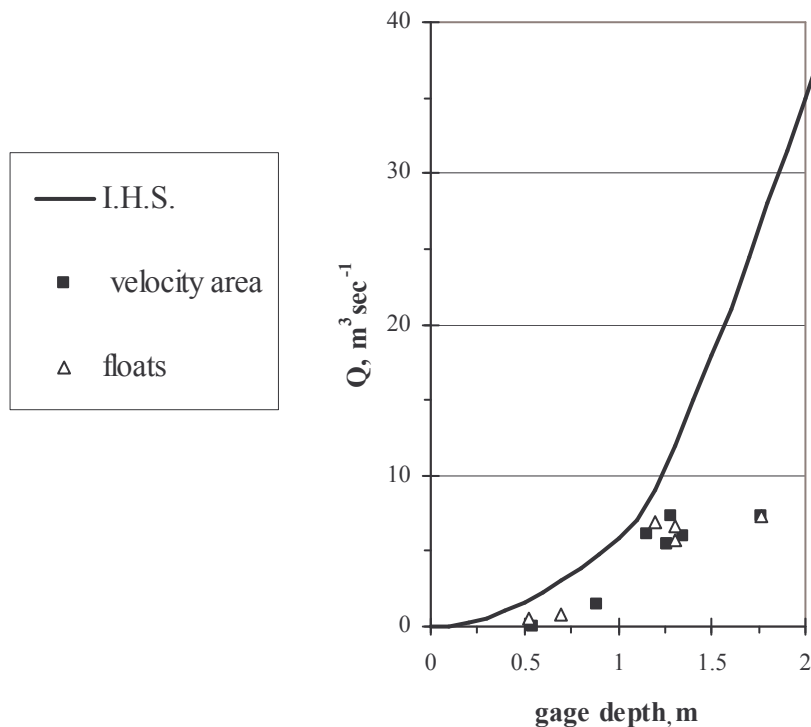
באתר בשור-רעים ממוקמת תחנה הידרומטרית סטנדרטית של השירות ההידרולוגי. באיור 5.1 מוצג עקום רום-ספיקה של השרות ההידרולוגיה המתבסס על שיטה עקיפה (שיטת שיפוע-שטח). באתר נערכות מעת לעת מדידות מהירות מדויקות במד-זרם (שיטת מהירות-שטח) ע"י השרות ההידרולוגי. המדידות מבוצעות במספר אנכים ע"י הורדת מד זרימה מכבל פלדה המתוח לרוחב האפיק. לאחר מיצוע מרחבי למהירויות בחתך הזורם מתקבלת מהירות ממוצעת. מדידות דומות נערכות בתחנות הידרומטריות רבות בעולם, אך הן נדירות בנחלי אכזב. בנוסף, נערכו באתר בשור רעים מדידות מהירות-מצוף. המעבר ממהירות מצוף למהירות זרימה ממוצעת בוצע בשיטה הנהוגה בשרות ההידרולוגי (נספח 4). בדומא לנחל סכר, בנחל הבשור החולי-חלוקי (בד"כ מעט חלוקים) ההערכות לספיקה המבוססות על מהירות מדודות נמוכות בהשוואה להערכות המתאימות לעקום הכיול המבוסס על שיטות עקיפות (איור 5.1). למרות מספרן הקטן של הנקודות באיור 5.1 המייצגות ספיקה המבוססת על מדידות במד זרימה, ערכן רב במיוחד ואמינותן גבוהה היות והן מבוססות על מספר רב של מדידות מהירות.



איור 5.1: עקום רום-ספיקה (עקום כיוול תחנה) לתחנת בשור רעים המבוסס על שיטת ההערכה עקיפה הנהוגה בשרות ההידרולוגי (שיפוע-שטח). במקביל מוצגות הערכות נקודתיות לספיקה המבוססות על מהירות הנמדדת במד זרימה (שיטת מהירות-שטח) ומהירות מצוף. השיטות מפורטות בפרק 1.1.

6. הערכות לספיקת מים בתחנת שיקמה, ברור-חייל

באתר שיקמה, ברור-חיל ממוקמת תחנה הידרומטרית סטנדרטית של השירות ההידרולוגי. באיור 6.1 מוצג עקום רום-ספיקה של השרות ההידרולוגיה המתבסס על שיטה עקיפה (שיטת שיפוע-שטח). באתר נערכות מעת לעת מדידות מהירות מדויקות במד-זרם (שיטת מהירות-שטח) עיני השרות ההידרולוגי. המדידות מבוצעות באופן דומה למדידות בתחנת בשור-רעים (פרק 5). בנוסף נערכו מדידות מהירות-מצוף. בדומה לנחלים סכר ובשור-רעים, באתר שיקמה ברור חייל החולי ההערכות לספיקה המבוססות על המהירות המדודות נמוכות מהערכות המבוססות על עקום הכיול שהתקבל בשיטות עקיפות (איור 6.1). מספר התצפיות רב בהשוואה למדידות בסכר ובבשור ולמעשה ניתן להניח ברמת סבירות גבוהה שהשיטה העקיפה שננקטה מניבה הערכת-יתר לספיקה. למעשה מ-2003 לתחנה קיים עקום כיוול חדש יותר, המבוסס גם על מדידות המהירות.



איור 6.1: עקום רום-ספיקה (עקום כיול תחנה) לתחנת שיקמה ברו-חייל המבוסס על שיטת ההערכה עקיפה הנהוגה בשרות ההידרולוגי (שיפוע-שטח). במקביל מוצגות הערכות נקודתיות לספיקה המבוססות על מהירות הנמדדת במד זרימה (שיטת מהירות-שטח) ומהירות מצוף. השיטות מפורטות בפרק 1.1.

7. דיון מסכם

בהערכות לספיקה ולנפחי זרימה המתקבלים בשיטות חישוב עקיפות בנחלי אכזב עשויות להתקבל שגיאות גדולות. הממצאים מהנחלים שנתוניהם נבחנו במחקר הנוכחי המאפיינים מגוון תנאי זרימה, מדגימים את הגודל הניכר של השגיאות. עלולות להתקבל שגיאות בשיעור של עשרות אחוזים בספיקת המים ואף בשיעור של למעלה מ-100%. בכדי לבסס את התצפיות דרושות מדידות נוספות באתרים שונים. אולם, די בממצאים בכדי להצדיק בחינה מקיפה של ההערכות לממדי השיטפונות שהתקבלו עד כה בנחלי אכזב בארץ. שגיאות בהערכת ממדי השיטפונות יכולות לגרום לטעויות נלוות בביצוע מאזני מים ולשגיאות בחיזוי ההידרולוגי המבוצע כרקע לתיכנון הנדסי (גשרים, מאגרים וכד').

בשיטות חישוב עקיפות להערכת ספיקה מתקבלות שגיאות בשיעורים שונים. לעיתים קיימות שיטות המניבות שיעורי שגיאה נמוכים יותר בהשוואה לשיטות הנהגות עד כה. השיטה של Limerinos נמצאה מתאימה יותר להערכת ספיקות בנחל רחף בהשוואה לשיטות אחרות. בנחלי אכזב חלוקיים באזורים צחיחים אופי התשתית הוא הגורם המשפיע ביותר על החספוס. חלוקים גסים יותר בתשתית החלוקית משפיעים יותר על הזרימה. לכן, יש יתרון לשיטות הכוללות מאון

גבוהה יחסית ליצוג התשתית (בשיטת Limerinos ה- d_{84} מיצג את התשתית). בנחלים מטיפוס זה מקדם החספוס קטן באופן ניכר עם העליה ברדיוס ההידראולי ולכן חשוב להשתמש בשיטות להערכת חספוס ו/או מקדמי מצוף למהירות זרימה הרגישים לשינוי ברדיוס ההידראולי. בספרות קיימות שיטות רבות מסוג זה וחלק מהן הועסקו באנליזות במחקר הנוכחי (פירוט בטבלה 2.1). לא מומלץ להשתמש במקדם חספוס קבוע (למשל למפלס מלא גדות) להערכת ספיקות במפלסי זרימה שונים בנחלי אכזב שיטפוניים חלוקיים.

בנחלים החלוקיים (רחף ואשתמוע) הערכות לספיקה המבוססות על מדידות מהירות גבוהות יחסית להערכות מקובלות בשיטות עקיפות. בנחלים חלוקיים, כאשר לא קיימות מדידות מהירות מספקות ואין מנוס משימוש בשיטות עקיפות, מומלץ להשתמש במקדמי חספוס נמוכים יחסית למקובל עד כה. מנגד, בנחלים בעלי מרכיב בולט של חול (סכר, בשור-רעים ושיקמה-ברור חייל) הערכות לספיקה המבוססות על מדידות מהירות נמוכות יחסית להערכות מקובלות בשיטות עקיפות. ממצע זה אינו צפוי היות ותשתית חולית מאופיינת בחספוס קטן יותר ולפחות בחלק מהשיטות נעשה שימוש באותן הערכות לחספוס שהעסקנו לנחלים החלוקיים. יתכן שבנחלים אלה יצירת מורפולוגיות בתשתית חולית (גלונים, דיונות, מורפולוגיות של "חתירה ומילוי" ומעברים בין תשתית חלוקית וחולית יוצרים חספוס גבוהה יחסית. באתרי המדידה בנחלים סכר, בשור ושיקמה שיפועי האפיק מתונים יותר בהשוואה לשיפוע ברחף ואשתמוע (טבלה 1.1). השיפועים הנמוכים יחסית הם גורם אפשרי נוסף לקבלת מקדמי חספוס (המבטאים למעשה התנגדות לזרימה) גבוהים יחסית. יתכן שבהערכות לספיקה בנחלים מתונים יחסית רצוי להעסיק מקדמי מצוף נמוכים יחסית ומקדמי חספוס גבוהים יחסית.

לנחלי אכזב מטיפוסים שונים רצוי להתאים שיטות שונות להערכת מהירות. ההכללות שבוצעו עד כה תרמו להגדלת שיעורי השגיאה ולהקטנת הסיסטמטיות במגמות ובסוגים של השגיאות. פיתוח שיטות לנחלים מטיפוסים שונים מחייב יצירת בסיסי נתוני זרימות גדולים מהקיימים. הגדלת בסיס נתוני זרימות בעתיד תאפשר יצירת מיון מפורט רלוונטי.

בכדי לשפר באופן משמעותי את איכות ההערכות ההידרולוגיות לשיטפונות אנו ממליצים:

- (1) להמשיך בסדרת המדידות המתבצעות בנחלים רחף, סכר ואשתמוע.
- (2) לרכז את אמצעי מדידה שונים באתרים נוספים לרחף (כדוגמת נחל אשתמוע) לשם השוואה בין השיטות.

- (3) לערוך השוואות בין נתוני תחנות ומאגרים מנוטרים במורד באתרים נוספים (כדוגמת נחל חימר).

(4) לבצע מדידת מהירות זרימה במצופים באתרי מדידה מטיפוסים נוספים או במדי מהירות מגשרים קיימים (כדוגמת גשר נחל פארן ונחל אשתמוע). ניתן לבצע מדידות מגשרים בנחלים שונים באמצעות מערכת יעודית נגרת (ע"י רכב) למדידת זרימות. בנוסף אנו מציעים להקים גשרים (או כבלי פלדה) בצירוף מערכת למדידת זרימות בשיטת מהירות-שטח (מד-זרם, "פצצות" הידראוליות ומערכת הרמה) למדידת זרימות באתרים נוספים (כדוגמת נחל אשתמוע).

(5) לתאר בפירוט את אתרי המדידה בהם מתבצעות הערכות ברמת אמינות גבוהה יחסית לספיקה. התאור מורכב מצילום, תאור תשתית הכולל התפלגות טקסטוראלית של התשתית, חתכי אורך ורוחב ותאור הצומח. מידע מנחלים ממגוון טיפוסים יוכל לשמש ליצירת אינדקס מצולם להערכות לחספוס באתרים דומים בלתי מדודים ו/או אתרים מדודים בעיתיים.

(6) להמשיך ולחפש אחר שיטה מתקדמת למדידה אוטומטית ורושמת של מהירות זרימה ממוצעת בנחלים שיטפוניים, בעלי משטר זרימות והסעת סחף אגרסיביים. בניסיונות שערכנו עד כה נמצא כי מיכשור אקוסטי משוכלל למדידת מהירות זרימה ממוצעות בחתך הזורם אינו יעיל למדידה בשיטפונות בנחלי אכזב בארץ בגלל רמות עכירות גבוהות. מכשור המותקן על תשתיות נחלים נוטה להקבר או להפגע בגלל שיעורי חתירה ומילוי גדולים. המכשור למדידת מהירות אוטומטית שניסינו עד כה מותקן בתשתיות נחלים (כמקובל בנחלי איתן בעולם). דרושה שיטה בה המכשור למדידת מהירות ממוצעת (ולא רק מהירות פני שטח – שיטה שכבר קיימת זה כעשור) מוצב בצידי או מעל האפיק. ישום שיטות מתקדמות למדידת זרימות בנחלי אכזב בארץ מחייב כיול והתאמה יחודיים ולפיכך כרוך בהשקעה גדולה. אם זאת, אנו מעריכים שלא יתקבלו הערכות ברמת אמינות גבוהה לספיקה בנחלי אכזב שיטפוניים ללא פיתוח שיטה אוטומטית מתקדמת למדידת מהירות זרימה ממוצעות בחתך הזורם.

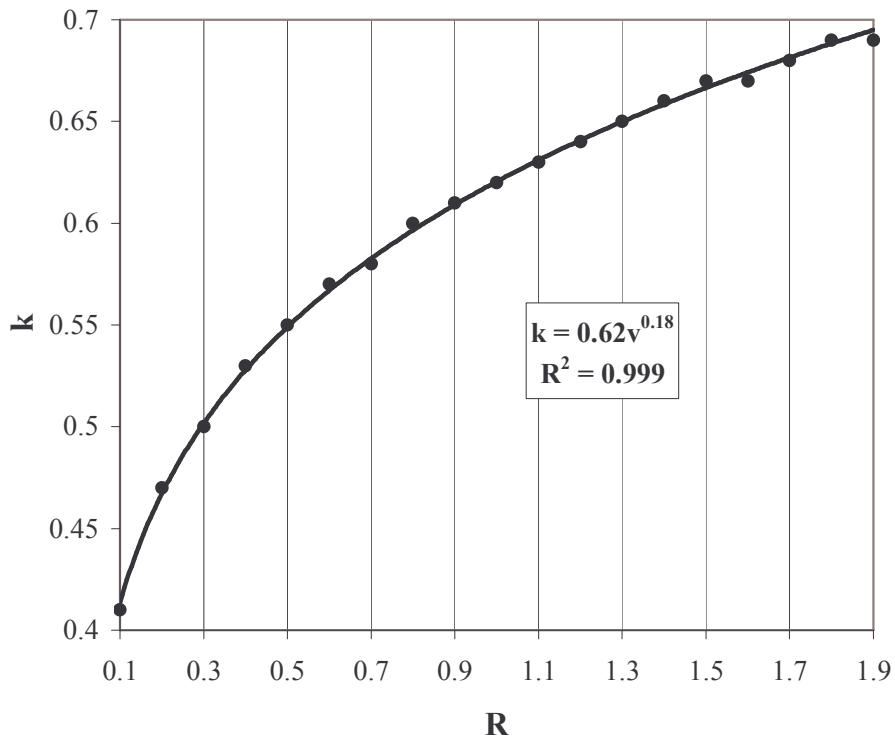
ביבליוגרפיה

- גרינבאום, נ. 1996. שטפונות עבר (paleofloods) בנחלים הגדולים של הנגב המרכזי. חיבור לשם קבלת תואר דוקטור לפילוסופיה. האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- גרינבוים י. 2002. סקירה היסטורית של התחנות ההידרומטריות למדידת הזרימה בנחלי הנגב והערבה. השרות ההידרולוגי, נציבות המים, משרד התשתיות הלאומיות.
- גרינבוים י. 2000. אגן הבשור, סקירה היסטורית של התחנות ההידרומטריות למדידת שיטפונות. השרות ההידרולוגי, נציבות המים, משרד התשתיות הלאומיות.
- גרת ר., מ. גטקר, וש. ארבל. 1998. קביעת ספיקת שיא גל הגאות בתעלות ניקוז ובאפיקים טבעיים של נחלים בישראל (יישומים ופיתוחים בשיטת העבר – שיפוע). דו"ח מיוחד מס' 62 M-, התחנה לחקר הסחף, האגף לשימור קרקע וניקוז, משרד החקלאות ופיתוח הכפר. 30 עמ'.
- כהן ח. וי. לרון. 2005. סקר שיטפונות וסחף, דרום מדבר יהודה. סיכום שלוש שנות מחקר, מוגש לרשות ניקוז ים המלח. אוניברסיטת בן גוריון בנגב. 29 עמ'.
- שנציס א., ל. מאירוביץ, ל. ינוביץ, ו. חביץ, וא. בן-צבי, 1997, מערכת נתוני הגאוויות בנגב. דו"ח הידרו/97/2 השרות ההידרולוגי, נציבות המים, משרד החקלאות. 79 עמ'.
- Alexandrov, Y., Laronne, J.B. and Reid, I., 2003. Suspended sediment concentration and its variation with water discharge in a dryland ephemeral channel, northern Negev, Israel. *Journal of Arid Environments*, 53: 73-84.
- Arcement, G.J. and Schneider, V.R. 1989. Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. U.S Geological Survey Water - Supply Paper 2339.
- Barnes, H.H., 1967. Roughness characteristics of natural channels. U.S. Geological Survey Water - Supply Paper 1849.
- Chow, V.T., 1959. *Open-Channel Hydrology*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Cohen H. and J.B. Laronne. 2005. High rates of sediment transport by flashfloods in the Southern Judean Desert, Israel. *Hydrological Processes*, 19, 1687-1702.

- Gordon, N.D., McMahon, T.A. and Brian, L.F., 1992. Stream Hydrology, An Introduction for Ecologists. Wiley & Sons, Chichester.
- Herschy, R.W., 1995. Streamflow Measurement. E & FN Spon, an imprint of Chapman & Hall, London.
- Hicks, D.M. and Mason, P.D., 1991. Roughness Characteristics of New Zealand Rivers, New Zealand DSIR Marine and Freshwater Survey, Wellington NZ.
- Jarrett, R.D., 1985. Determination of roughness coefficients for streams in Colorado. Water-resources Investigations, Report 85-4004, U.S. Geological Survey, Lakewood, Colorado.
- Ward, A.D. and Elliot, W.J. (Editors), 1995. Environmental Hydrology. Lewis Publishers, New York, 462 pp.

נספחים

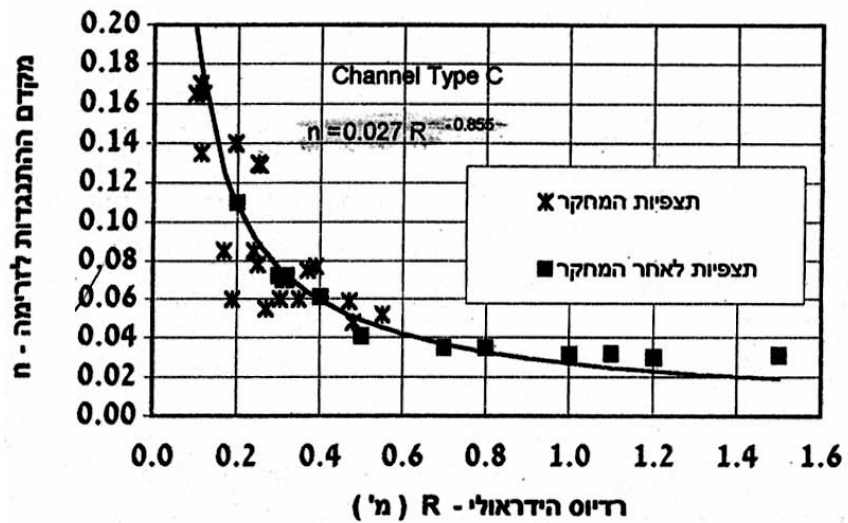
1. מקדם מצוף לחישוב מהירות זרימה ממוצעת, התחנה לחקר הסחף.



v - מהירות מצוף, k - מקדם מצוף, R - רדיוס הידראולי.

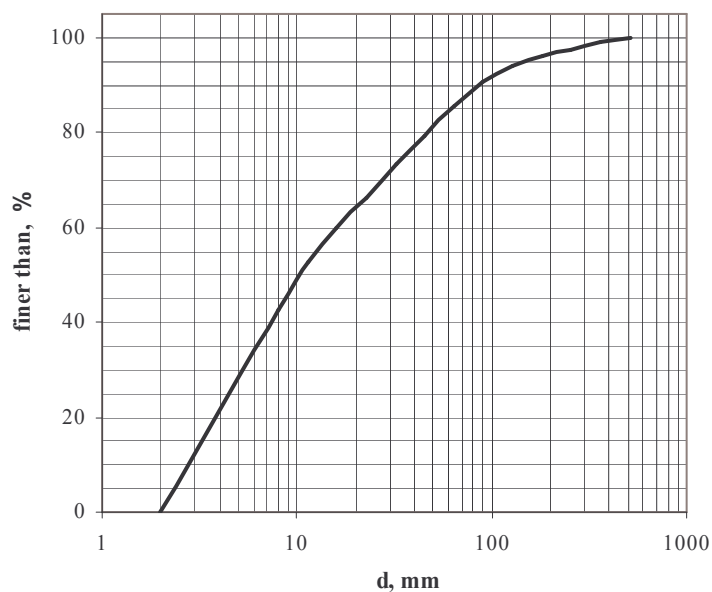
2. שיטה אמפירית להערכת מקדם חספוס לנחלי אכזב טבעיים, תחל"ס.

הקשר בין מקדם ההתנגדות לזרימה לבין הרדיוס
ההידראולי בתעלות ביקוז אופיניות לטיפוס C



הערה: תצפיות לאחר המחקר (בתעלה) הינם תצפיות מנחלים טבעיים.

3. התפלגות גודל חלוקים באפיק נחל רחף.



דגימת תשתית נחל רחף בוצעה בשיטת Wolman-count.

התקבלו (במ"מ):

$$d_{50}=10$$

$$d_{84}=60$$

כאשר d_x מציינ גודל גרגר ו-x המאון הרלוונטי לסחף קטן מהמאון הנתון.

4. מקדם מצוף לחישוב מהירות זרימה ממוצעת, השרות ההידרולוגי.

טבלה מקדם ϕ (תאורטי)			
עומק ממוצע, מ'			מצב הזרימה
>1.0	1.0-5.0	<5.0	
0.55-0.67	0.68-0.77	0.78-0.79	נהר – זרימה יציבה
0.43-0.54	0.55-0.65	0.66-0.70	נחל – זרימה יציבה
-----	0.43-0.60	0.61-0.66	נחל – זרימה לא יציבה