

השהיית זרימה באגמים בכניסה לגשרים ולמעבירי מים

מס' חוזה 4500010396 מ-13.05.2009

פברואר 2011

**הוכן ע"י: משרד מ.מ. (1997) מהנדסים יועצים 'דרוס'
אינג' משה צ'וברוצקי, דר' לאוניד גריניס, דר' אורי צדקה
עבור: מעצ – החברה הלאומית לדרכים בישראל בע"מ**

תיעוד / תעודת זהות של הפרויקט

מס' הדו"ח : 4500010396	
שם הדו"ח : מחקר/פיתוח : "השהיית זרימה באגמים בכניסה לגשרים ולמעברי מים" – דוח סופי של מחקר מעבדתי	תאריך הגשת הדו"ח : 30.10.2010
שם המחברים : אינג' משה צ'וברוצקי , ד"ר אורי צדקה , ד"ר לאוניד גריניס	מספור הדו"ח של גוף מבצע העבודה : דוח סופי-תוצאות והצעות על הנחיות מעצ בנושא
שם הגוף המבצע וכתובתו : מ.מ. (1997) מהנדסים יועצים "דרום" רח' הירדן 29 רמת גן 53222	מספר החוזה : 4500010396
סוג הדו"ח והתקופה אליה הוא מתייחס: דוח סופי , 15.09.09 - 30.12.10	
הערות נוספות כגון: מחקר / פיתוח : "השהיית זרימה באגמים בכניסה לגשרים ולמעברי מים" , שלב סופי ; קביעת נוסחאות חישוב , הצעת הנחיות מעצ , הצעת פרמטרים לקביעת חיוניות של מחקר מעבדתי , הבאת דוגמאות של פרויקטים בהם נעשה שימוש מוצלח בשיטה הנחקרת .	
תקציר :	
<p>1. מטרות : לקבוע נוסחאות הערכת מצב בכניסה לגשר / מעביר מים , היקף שינויי הספיקות הנכנסות אחרי השהיית זרימות כלפי הספיקות ההידרולוגיות המחושבת , הצעת הנחיות מעצ בנושא , הצעת המשך הטיפול המחקרי בנושא .</p> <p>2. ממצאים : א. סקר ספרותי לגילוי שיטות הערכה וחישוב הליכי ויסות – שלב א' , סקר מעבדתי סופי . ב. סקירת דוגמאות החישובים הילוך נגר עילי לפרויקטים אקטואליים של מעצ</p> <p>3. המלצות : א. המשך פיתוח הנושא לצרכים פרקטיים של מעצ ייעשה ע"י הערכה סופית וקביעת הנחיות לתכנון שהוצעו . ב. לתת הנחיות לביצוע ואחזקת המתקנים ולרבות סוללת כבישים באזורי כניסה לגשרים , להביא דוגמאות לתועלת המחקר בהקשר זה , להמליץ על קריטריונים של מתקנים הידראוליים להם חיוני לבצע בדיקות מעבדתיות במסגרת התכנון</p>	
מילות מפתח :	
סווג תפוצה (של הדו"ח) :	סווג תפוצה (של עמוד זה) :
	מס' עמודים : 127

זכויות יוצרים והסרת אחריות

זכויות יוצרים

- (1) זכויות היוצרים בדו"ח זה שייכות באופן בלעדי לחברה הלאומית לדרכים בישראל בע"מ (להלן: "החברה"). למען הסר כל ספק, זכויות יוצרים אלו חולשות, בין השאר, על ניסוח, עימוד, עריכה, תמליל, תמונות, איורים, שרטוטים, מפות, גרפיקה וכל מידע אחר הכלול בדו"ח זה.
- (2) אין לבצע שום שינוי או עיבוד בדו"ח זה, אין לשעתק את כולו או חלקו ואין לשלבו בשום מאגר מידע אחר לרבות שילובו מכל סיבה שהיא באתרי אינטרנט, בחומר מודפס, מאמרים, הוראות שימוש ומפרטים שאינם של החברה ושאינם מיועדים לשימוש עבור מיזמים של החברה. כמו כן, אין להעתיק, להפיץ, לשדר או לפרסם את הדו"ח, כולו או חלקו, להשכירו או לסחור בו בכל דרך. כל זאת כאמור למעט, אם ניתן לכך אישור, מראש ובכתב, מאת החברה.

הגבלת אחריות

בשום מקרה לא תחול על החברה אחריות בגין כל נזק ישיר או עקיף העלול להיגרם למשתמש ו/או לצד ג' כלשהו עקב השימוש בדו"ח זה וכולל, בין היתר אך מבלי לגרוע מן האמור, נזק מקרי, מיוחד או תוצאתי, או כל נזק אחר מכל סוג ומין; לרבות אך ללא הגבלה, כל נזק כספי או נזקי לגופו או לרכושו של המשתמש ו/או של צד ג', הנובעים או קשורים בכל דרך שהיא לשימוש בדו"ח זה.

שונות

תוכנו של דו"ח זה משקף את דעות מחבריו בלבד בדבר העובדות הנתונים הממצאים המסקנות והלקחים המובאים בו. תוכן הדו"ח איננו משקף בהכרח את ההשקפות או המדיניות הרשמית של החברה. אין לראות בדו"ח זה כשלעצמו תקן, מפרט או הנחייה מחייבת. הדו"ח אינו מיועד לצרכי מכרז ואין לראות בו אישור למוצר או טכנולוגיה מכל סוג שהוא. אין לראות בדו"ח זה עידוד או פרסומת לרכישת מוצר או טכנולוגיה מכל סוג שהוא. אזכורם של שמות יצרנים/ספקים/קבלנים בדו"ח זה נעשה ממניע חיוניות לתוכן הדו"ח בלבד.

תוכן עניינים

1.	מבוא	2
1.1	אקטואליות הנושא לישראל, השתייכות הנושא	2
1.2	תועלת כלכלית מניצול תופעת השהיה בהקמת מבני מעצ	3
2.	מטודולוגיית המחקר	3
2.1	כללי	3
2.2	מטודולוגיה מפורטת לבדיקות מעבדתיות	4
2.3	בדיקה מעבדתית	4
2.4	ההידרוגרפים הנמדדים במציאות הניתנים לבדיקות מעבדה	8
2.5	תוצאות הבדיקה המעבדתית	9
2.5.1	הפרמטרים המשתנים	9
2.5.2	מסקנות החשובות שהתקבלו ממחקר מעבדתי	9
3.	תוצאות המחקר המעבדתי	9
3.1	נוסחה מומלצת להערכת הילוך נגר עפ"י מסקנות המחקר	9
3.1.1	מקדמי תיקון של צורת המאגר	10
3.1.2	ריכוז ההמלצות של המחקר המעבדתי	11
3.1.3	סיכום	12
3.2	דוגמאות מחושבות	13
3.2.1	כללי	13
3.2.2	החישובים המקבילים לבדיקה המעבדתית	13
3.2.3	תוצאות החישובים המקבילים	14
3.2.4	ניתוח התוצאות	23
3.2.5	השוואה עם החישובים לפי המלצות מעבדתיות	24
3.3	סיכום המחקר השהיית זרימה באגמים	25
4.	קריטריונים להצעת הנחיות מעצ	26
4.1	השהיית זרימה	26
4.2	ההנחיות לשלבי תכנון ראשוניים	26
4.3	ההנחיות לשלבי תכנון מוקדם ומפורט	26

רשימת איורים

- איור 1. תופעת השהיה בכניסה לגשר של כביש 5720..... 3
- איור 2. שרטוט מאגר מס' 1..... 6
- איור 3. מודל מעבדתי למאגר מס' 1..... 7
- איור 4. השוואה בין הידרוגרף אמיתי לבין הידרוגרף עבור המודל (הידרוגרף מס' 1) ביחידות ספיקה מ"ק/שניה..... 8
- איור 5. השוואה בין הידרוגרף אמיתי לבין הידרוגרף עבור המודל (הידרוגרף מס' 1) ביחידות ספיקה ליטר/דקה..... 8
- איור 6. הידרוגרף ארוך ומתון (הידרוגרף 2)..... 9
- איור 7. שטח הצפה המעורך ע"פ שיטת הידרוגרף עבור נחל אלכסנדר במעלה גשר כביש 5720..... 14
- איור 8. השתנות ספיקה ומפלס המים בנחל אלכסנדר כפונקציה של הזמן המחושבים לפי שיטת הידרוגרף..... 15
- איור 9. צירים הידראוליים של נחל אלכסנדר המחושבים ע"פ שתי שיטות והשוואתם עם מפלס הגשר של כביש 5720..... 16
- איור 10. שטח הצפה המעורך ע"פ שיטת הידרוגרף עבור נחל סכר במעלה גשר כביש 40..... 17
- איור 11. צירים הידראוליים של נחל סכר המחושבים ע"פ שתי שיטות והשוואתם עם מפלס הגשר של כביש 40..... 18
- איור 12. שטח הצפה המעורך ע"פ שיטת הידרוגרף עבור נחל חרוד במעלה גשר כביש 90..... 19
- איור 13. הידרוגרף תכן בנחל חרוד..... 20
- איור 14. צירים הידראוליים של נחל חרוד המחושבים ע"פ שתי שיטות והשוואה עם מפלס הגשר של כביש 90..... 21
- איור 15. תרשים זרימה נחל נטוף מאגר טרומן..... 23

רשימת טבלאות

- טבלה 1. טבלת הנתונים שהתקבלו עבור מודל מס' 1..... 10
- טבלה 2. מקדמי תיקון של צורת המאגר..... 11
- טבלה 3. מקדמי תיקון לנוסחת "קוצ'רין" עפ"י צורת המאגר ואופיו של הידרוגרף נכנס..... 12
- טבלה 4. תוצאות חישוב נחל נטוף מאגר טרומן..... 22
- טבלה 5. ריכוז תוצאות לחישובים המקבילים..... 24

רשימת סמלים וקיצורים

k - מקדם תיקון של צורת המאגר

Q_{out} - ספיקה מכסימלית היוצאת ממאגר

Q_r - ספיקה מכסימלית של הידרוגרף

V_r - נפח גאות

V_{st} - נפח המאגר

רשימת נספחים

נספח 1. דו"ח מעבדתי סופי

נספח 2. המלצות להנחיות לתכנון בכניסה לגשרים ולמעברי מים



תקציר

מטרות : לקבוע נוסחאות הערכת מצב בכניסה לגשר / מעביר מים , היקף שינויי הספיקות הנכנסות אחרי השהיית זרימות כלפי הספיקות ההידרולוגיות המחושבת, הצעת הנחיות מעצ בנושא, הצעת המשך הטיפול המחקרי בנושא .

ממצאים : א. סקר ספרותי לגילוי שיטות הערכה וחישוב הליכי ויסות – שלב א', סקר מעבדתי סופי .
 ב. סקירת דוגמאות החישובים הילוך נגר עילי לפרויקטים אקטואליים של מעצ

המלצות : א. המשך פיתוח הנושא לצרכים פרקטיים של מעצ ייעשה ע"י הערכה סופית וקביעת הנחיות לתכנון שהוצעו .
 ב. לתת הנחיות לביצוע ואחזקת המתקנים ולרבות סוללת כבישים באזורי כניסה לגשרים, להביא דוגמאות לתועלת המחקר בהקשר זה, להמליץ על קריטריונים של מתקנים הידראוליים להם חיוני לבצע בדיקות מעבדתיות במסגרת התכנון



1. מבוא

1.1. אקטואליות הנושא לישראל, השתייכות הנושא

כבר במהלך ביצוע העבודה הודענו לוועדת היגוי כי התחלנו להשתמש בהמלצותינו הראשוניות לטובת פרויקטים של מעצ הקשורים עם הנושא. עם תחילת עבודתנו גם רכבת ישראל הביעה התעניינות וביקשה לקבל מידע על תוצאות ביניים.

תופעת השהית זרימות עקב היווצרות פשטי הצפה במעלה זרימות בגשרים או במעברי מים מתקיימת מבלי שאנחנו מתכננים אותה באופן ספציפי. אם למשל, גובה הגשר 3 מ', אז ברור כי צפויה במקום זה הצפת שטחים עם מפלס מים מרבי תואם ל-3 המטרים גובה שלעיל. אורך זמן של ההצפה נמשך כזמן השיטפון ורום המרבי הולך וקטן עד אפס עם סיום השיטפון. שטחי ההצפות (פשטי הצפה) במקרים רבים גדולים בהרבה מרוחב האפיק הקבוע לזרימות הרגילות, נפחי הגאוויות משתווים כמותית עם הנפחים ההידרולוגיים המחושבים לשיטפונות. תכן.

נושא ההשהיה אינו שייך להידרולוגיה ולהידראוליקה, אלא לשניהם וביניהם תהליך ההשהיה מתבצע בזרימה מבוקרת שבין :

- אפיק הזרימה
- "ספל" המאגר (עם הקיבול שלו וצורתו)
- מתקנים להורדת זרימה גרוויטציונית (אוטומטית) המתפקדים בזמן שיטפונות לפרקי זמן מתוכננים.
- פרמטרים המשתנים בזמן ההשהיה : ספיקות הידרולוגיות המגיעות עם הזרימות אל המאגרים, ספיקות מתקנים להורדת מים, נפחי השיטפונות ונפחי קיבול המאגרים. כל ההשתנויות מתרחשות במקביל ובו זמנית – דבר שגורם לקשיים בהבנת התהליכים המורכבים הנ"ל.
- נציין, כי בספרות העולמית אי אפשר כמעט למצוא הסברים על תהליכי תכנון הקשורים עם תופעת ההשהיה.

מטרתנו להתניע תכנון המנצל את תופעת השהית נגר עילי ועל ידי כך להגיע לתכנון המתקנים, אשר יהיו קטנים יותר וזולים יותר. אם כן המחקר – פיתוח שיטה נועד להפוך תכנון הידראולי של גשרים ומעברי מים לרמת תכנון גבוהה יותר ויעילה יותר. אין מדובר פה בשיטה חדשה אלא בחידוש גישה תכנונית הלא מנוצלת כראוי.

ניסינו להעלות מחדש ולרענן את המודעות בנושא ותוך כדי זה לדייק במספר פרמטרים הנדרשים לתכנון ולהכניסם לשימוש מקובל במעצ.



1.2. תועלת כלכלית מניצול תופעת השהיה בהקמת מבני מעצ

התועלת היא באפשרות להקטין פתחי גשרים ומעבירי מים ע"י הפעלת חישוב הידראולוגי/הידרולוגי נכון שמתחשב עם תופעת השהיית זרימה במקרים והיא קיימת.

לצורך זה המתכנן צריך לגלות את קיום התופעה במקרים ספציפיים וזה על ידי הערכת מצב טופוגרפי ותכנוני נתון.

כאמור לעיל לא מדובר בהמלצה ליצור מאגרים (אם כי גם זה אינו פסול), אלא, ראשית כל, בניצול פשטי הצפה, אשר רוצה או לא רוצה מתרחשים בכניסה לגשרים ולמעבירי המים.

דוגמה לניצול תכנוני בחודשי קיץ 2010.

בקיץ 2010 הושלם דוח הידרולוגי ותכנון ניקוז לכביש 5720 -גישה לכפר ויתקין, בו אודות לניצול פרמטרים המחקר עבור חישוב השהיית זרימה בנחל אלכסנדר, תוכנן גשר קטן וזול בהרבה מאשר היה אילו לא השתמשנו בשיטה המדוברת.



איור 1. תופעת השהיה בכניסה לגשר של כביש 5720

עפ"י הערכת מצב התגלה תופעת השהיה בכניסה לגשר קיים מתרחשת פשט הצפה נרחב, לפיו הספיקה ההידרולוגית 223 מ"ק/שנייה אשר לפיה נדרשת הגבהת הגשר הוקטנה עד 190 מ"ק/שנייה לפי התאפשר לחסוך בביצוע ההגבהה. חיסכון הכספי – 1.4 מיליון ₪ להגבהת הגשר לא כולל התייקרות על חשבון הגבהת המיסעה.

2. מתודולוגיית המחקר

2.1. כללי

העבודה נעשתה ב-2 מישורים מתודולוגיים:

חלק המחקרי - סקר ספרותי ומעבדה הידראולית בסקר הספרותי נלמד על מה שנעשה בעולם. ע"י בדיקות במעבדה נמצאו כללים חשובים ופרמטרים לחישוב מאגרים בתנאים הידרולוגיים (הידרוגרפים) וטופוגרפיים (שיפועי פני שטח) שונים.

חלק פיתוחי – חישובים לפרויקטים קונקרטיים, כתיבת המלצות תכנון ראשוניות. בחישובים לתכנון נמצא עד כמה יש התאמה בין תוצאות החישובים לפי הפרמטרים המומלצים במחקר לבין תוצאות שהתקבלו בשיטות חישוב אחרות.

2.2. מתודולוגיה מפורטת לבדיקות מעבדתיות

המתודולוגיה הובאה בדוח סופי של מחקר מעבדתי, מאי 2010. בעבודה הנ"ל מובאים פרקים כמו "מידול הידראולי", "סוגי מתקני השהיה", "אופן ביצוע הניסויים", "פרמטרים שימדדו", "ההידרוגרפים הנמדדים במציאות הניתנים לבדיקות מעבדה", "תוצאות ניסויים מעבדתיים (ל-3 מודלים), "מסקנות", "מקורות" (מידע).
- בחינת התוצאות התבססה על נוסחת קצירין הידועה, בה נערך מקדם K שמשתנה כתוצאה מהשפעת מימדי המאגר- צורתו, שיפועיו, כ"ד.

$$(1) \quad Q_{out} = (1 - k V_{st} / V_r) Q_r$$

$$(2) \quad V_{st} = \frac{V_r (1 - Q_{out} / Q_r)}{k}$$

נוסחת קוצ'ירין המקורית אינה כוללת את המקדם k, אלא הוכנסה על ידינו לצורך המחקר. לצורך הבדיקה הועברו למדענים תוכניות איגום במעלה נחל נטוף כולל רקע טופוגרפי, תכנון סוללות ומתקני חצייה ברמת דיוק גבוה ומספקת ליצירת מודלים. התוכניות לוו בחישובים הידראוליים / השהיית זרימה לתנאים שונים.
פרמטרים משתנים היו: צורות איגום: קומפקטי, ארוך, שיפועי תחתית מ-1% עד 0.2% כאשר שאר התנאים שווים.

2.3. בדיקה מעבדתית

במחקר זה משתמשים בשיטה הנפוצה ביותר, ובודקים השפעת פרמטר אחד כלשהו בתנאי שהמשתנים האחרים נשארים קבועים. הדבר מאפשר לדעת באופן מלא את השפעת כל גורם פיזיקאלי על התנהגות המודל כאשר כל הפרמטרים הפיזיקאליים משתנים.

תאור המודלים. צורת האגם, לדוגמה "ארוך וצר" או בצורה אחרת כמו "קומפקטי מרוכז" ליד הגשר משפיע באופן משמעותי על היקף ההשהיה והקטנת ספיקות תכן במתקן חצייה.
בתוכנה HYDROROUT צורת האגמים מתבטאת ב-2 מידות: יחס אורך/רוחב ושיפועי המדרונות בממוצע. גישה זו סותרת חישובים לפי שיטות חישוב אחרות (כמו נוסחת קוצ'ירין), הינה גסה מדי, דורשת בדיקה נוספת לצורכי תכנון מבוסס של מתקני חציית מי שיטפונות.

תהליך מחקר מעבדתי.

שלב 1 פיתוח וייצור מודלים:



פותחו ונוצרו שלושה מתקנים בצורות ונפחים שונים (model) שמאפשרים בדיקות, שיתנו אינדיקציה לגבי גודל האגם ויחסו לגודל המברץ, קנ"מ אחד או שונה.

גודל אגם מרבי 8,000,000 מ"ק, ספיקת מברץ בעומד מרבי-100 מ"ק/שנייה לערך.

שלב 2 ביצוע ניסויים מעבדתיים:

בדיקת השפעת פרמטרים של צורות האגמים. ייבחנו אגמים עם טופוגרפיה שונה וגשרים עם פתחים שונים מבחינת תופעת ההשהיה המתאפשרת-הקטנת ספיקת תכן לבניית גשרים קטנים יותר. המלצות על שיטות חישוב לפי צורת האגמים שנבחנו בבדיקה.

מודלים הידראוליים מייצגים לבדיקה הניסויים לפי בקשת המזמין.

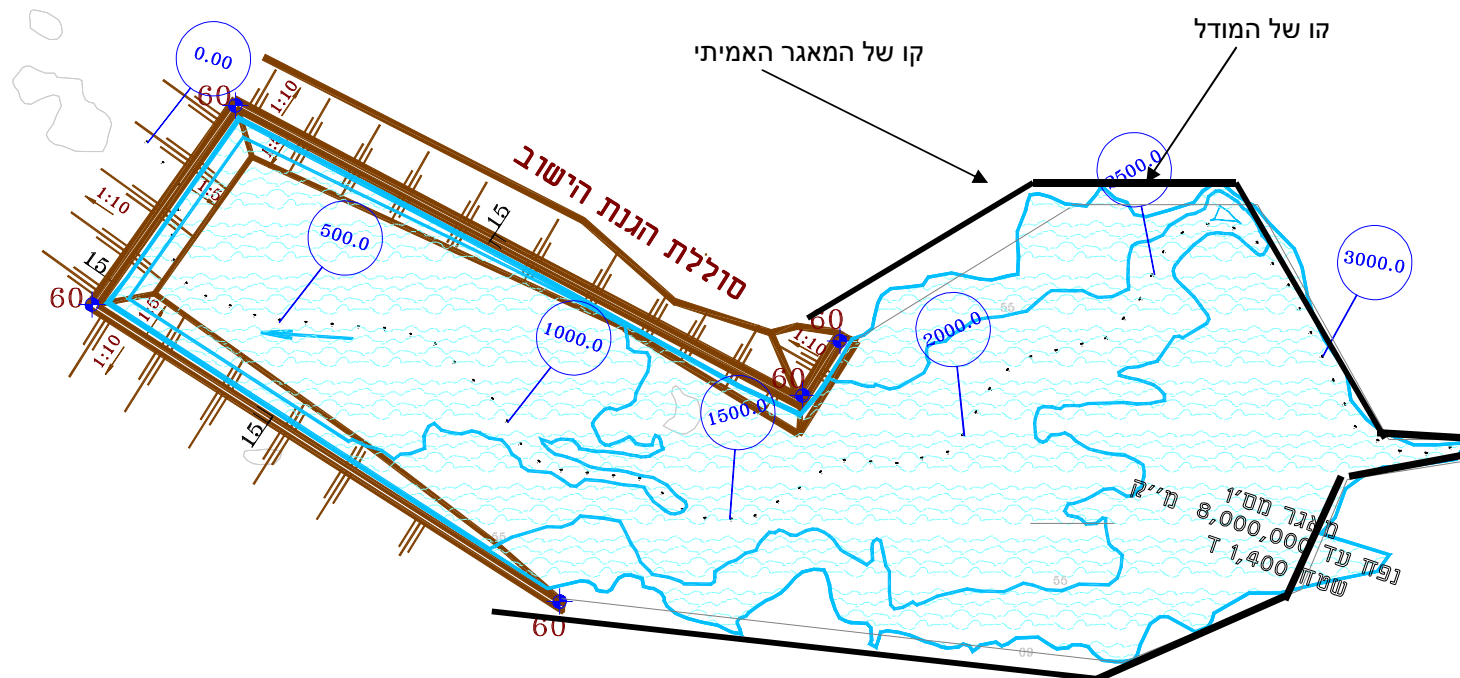
בחרנו שלושה מאגרים שונים מנחל נטוף: מאגר מס' 1, מאגר מס' 3, מאגר מס' 4.

על סמך נתונים בנינו מודלים. מאגרים אלו מתוארים בסעיפים הבאים.

שימוש במודלים מעבדתיים הוא אחד הפתרונות לבדיקת העברת מי שיטפון דרך תעלות וגשרים. השימוש במודלים מעבדתיים יעיל כאשר רוב הפרמטרים לא מוגדרים באופן מדויק, לכן החישובים ההידראוליים התאורטיים לא מתאימים. מודלים פיזיקאליים מאפשרים באופן פשוט לשנות את הפרמטרים של מאגרי מים כדי לבדוק את ההשפעה של זרימת המים העוברים דרכם.

המודל הפיסיקאלי מאפשר לבדוק את האפיונים של האב טיפוס ולקבל קונסטרוקציה יותר מדויקת של מאגרים.

להלן השרטוט והמודל המעבדתי שנועדו לברר את השפעת הפרמטרים השונים, על השהיית הזרימה במאגרים.



איור 2. שרטוט מאגר מסי 1

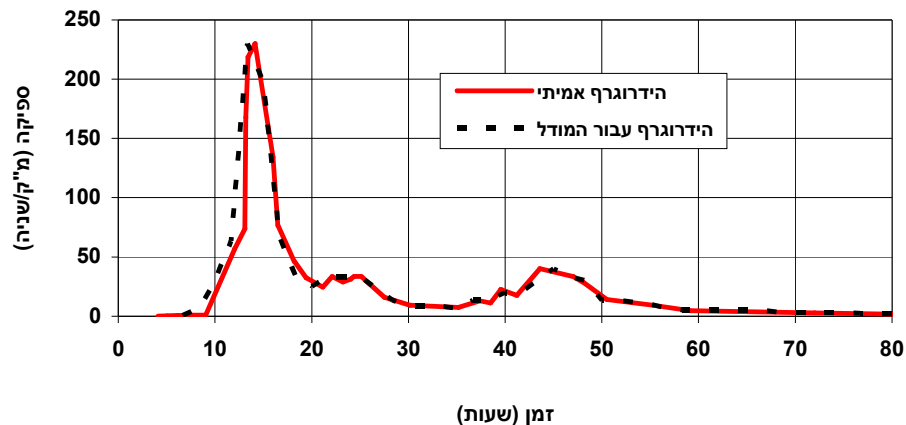


איור 3. מודל מעבדתי למאגר מס' 1

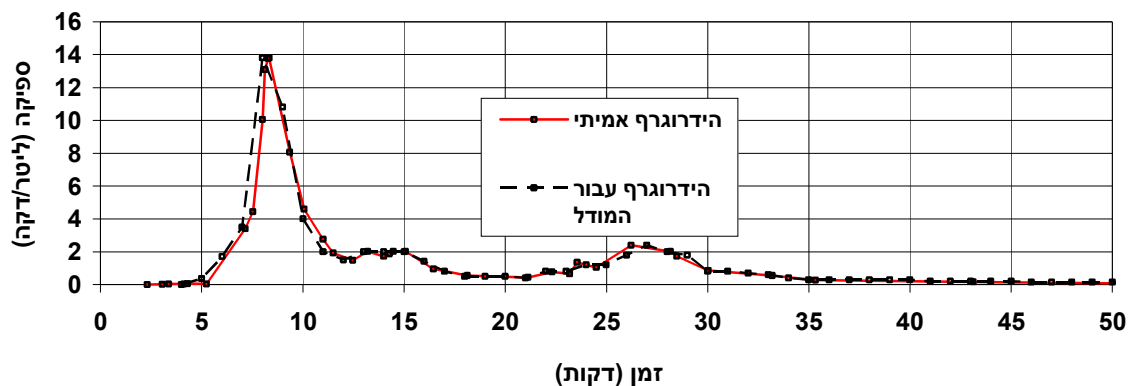
כתובת : רחוב יוני נתניהו 6 אור יהודה בנין פירמידה קומה 2
 כתובת למשלוח מכתבים : ת.ד 1021 אור יהודה
 טל" : 03-7355444 פקס : 03-7355454 www.pwd.co.il

2.4. ההידרוגרפים הנמדדים במציאות הניתנים לבדיקות מעבדה

בהמשך נתון הידרוגרף "קצר וחד" (הידרוגרף מס' 1) הנמדד במציאות בשטח. הספיקה המכסימלית 230 מ"ק/שנייה, נפח גאות 1% 8,000,000 מ"ק. באיור זה גם נתון גרף של הידרוגרף שנשתמש לבדיקות מודלים במעבדה. באיור 4 שני ההידרוגרפים מתוארים בסקאלות הבאות: ספיקה במ"ק/שנייה, זמן בשעות. באיור 5 נתונים אותם ההידרוגרפים אבל בסקאלות אחרות: ספיקה נתונה בליטר/דקה, זמן נתון בדקות. אנו רואים שצורתם זהה אך קנ"מ אחר, לפי אנליזה ממדית. בהידרוגרף שבאיור 4 נשתמש בבדיקות מודלים במעבדה. באיור 6 נתון הידרוגרף "ארוך ומתון" (הידרוגרף מס' 2) הנמדד במציאות בשטח. ספיקה מכסימלית שווה ל 160 מ"ק/שנייה, נפח גאות 1% 17,000,000 מ"ק. באיור - שני ההידרוגרפים מתוארים בסקאלות הבאות: ספיקה במ"ק/שנייה, זמן בשעות.

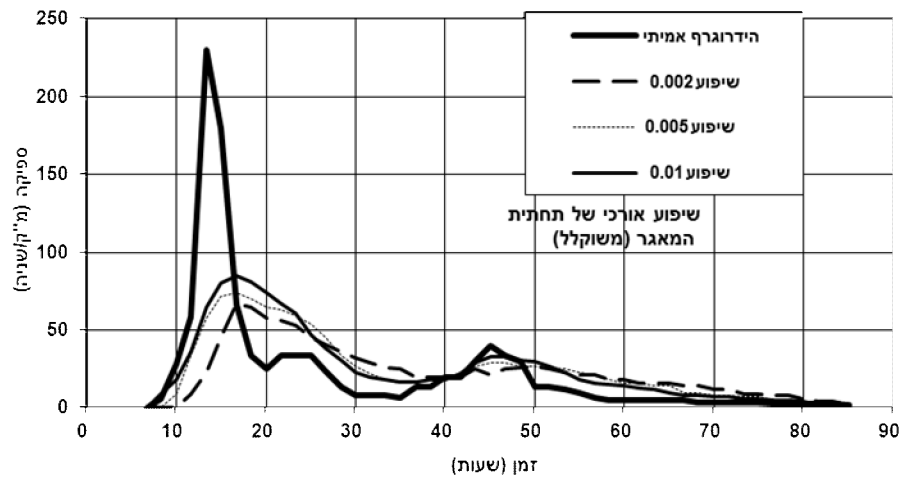


איור 4. השוואה בין הידרוגרף אמיתי לבין הידרוגרף עבור המודל (הידרוגרף מס' 1) ביחידות ספיקה מ"ק/שנייה



איור 5. השוואה בין הידרוגרף אמיתי לבין הידרוגרף עבור המודל (הידרוגרף מס' 1) ביחידות ספיקה ליטר/דקה

השייה עבור מברצ 4'5 מ' (מאגר מס' 1, הידרוגרף מס' 1)



איור 6. הידרוגרף ארוך ומתון (הידרוגרף 2)

2.5. תוצאות הבדיקה המעבדתית

הבדיקה נעשתה לפי שלושת המודלים שבדוח הסופי (ראה דוח מעבדתי סופי מאי 2010), התקבלו תוצאות הבדיקה כדוגמת הידרוגרף שלעיל. באותו אופן נבחן הידרוגרף-2.

2.5.1. הפרמטרים המשתנים

הפרמטרים המשתנים הנם שיפוע תחתית המאגר, הידרוגרף נכנס, גודל המברץ, צורת המאגר (מודל-1, מודל 2, מודל 3-).

2.5.2. מסקנות החשובות שהתקבלו ממחקר מעבדתי

קיבלנו תוצאות ניסיוניות: כאשר שיפוע תחתית המאגר גדול יותר אז הספיקה היוצאת מהמאגר גם גדולה יותר. גודל שטח המברץ משפיע על הספיקה היוצאת מהמאגר. הספיקה היוצאת גדולה יותר עבור מאגר צר יותר, אפילו אם נפח המאגר זהה. קיבלנו מקדם של צורת המאגר, שמאפשר לתכנן מאגרים באופן מדויק. למשל השוואה בין מודל מס' 1 לבין מודל מס' 3 עבור הידרוגרף מס' 1 ומברץ 3*3 מ', מקדם צורת המאגר משתנה מ-2.77 (ספיקה 57 מ"ק/שנייה) ל-2.03 (ספיקה 85 מ"ק/שנייה). מכאן נובע שעבור מאגר צר מקדם התיקון קטן יותר, וספיקה היוצאת מהמאגר גדולה יותר. קיבלנו משוואה לחישוב הספיקה המכסימלית היוצאת מהמאגר. קיבלנו יחסים בין המודלים, שמאפשרים לבצע תכנון מאגרים באופן מדויק יותר.

3. תוצאות המחקר המעבדתי

3.1. נוסחה מומלצת להערכת הילוך נגר עפ"י מסקנות המחקר

להלן לדוגמא טבלת הנתונים שהתקבלו עבור מודל מס' 1 (מאגר מס' 1), כאשר באותה צורה נראות תוצאות לכל שאר המודלים, ראה בדוח סופי מעבדתי מ-05.2010.



טבלה 1. טבלת הנתונים שהתקבלו עבור מודל מס' 1

(טבלה 4.1 של דוח מעבדתי עבור מודל מס' 1)

סוג הידרוגרף עבור מברצים שונים	שיפוע	ספיקה שיא הנכנסת (1%) מ"ק/שנייה	נפח גאות (1%) מ"ק	ספיקה שיא היוצאת (1%) מ"ק/שנייה	הפרש בין ספיקת שיא הנכנסת לבין ספיקת היוצאת %
הידרוגרף מס' 1 מברץ 3*3	0.002	230	8,000,000	57	75.2
	0.005	230	8,000,000	67	70.8
	0.01	230	8,000,000	72	68.6
הידרוגרף מס' 1 מברץ 4*5	0.002	230	8,000,000	67	70.8
	0.005	230	8,000,000	74	67.8
	0.01	230	8,000,000	85	63
הידרוגרף מס' 2 מברץ 3*3	0.002	160	17,000,000	70	56.2
	0.005	160	17,000,000	76	52.5
	0.01	160	17,000,000	80	48.7
הידרוגרף מס' 2 מברץ 4*5	0.002	160	17,000,000	80	50
	0.005	160	17,000,000	80	50
	0.01	160	17,000,000	94	41.2

3.1.1. מקדמי תיקון של צורת המאגר

על סמך הנתונים שלעיל התקבלו מקדמי תיקון של צורת המאגר, לדוגמא להלן למודל מס' 1

טבלה 2. מקדמי תיקון של צורת המאגר

(טבלה 4.2 של דוח מעבדתי עבור מודל מס' 1)

מקדם תיקון של צורת המאגר	נפח המאגר מ"ק	ספיקה שיא היוצאת (1%) מ"ק/שנייה	נפח גאות (1%) מ"ק	ספיקה שיא הנכנסת (1%) מ"ק/שנייה	שיפוע	סוג הידרוגרף עבור מברצים שונים
k	V_{st}	Q_{out}	V_r	Q_r		
2.77	2500000	57	8,000,000	230	0.002	הידרוגרף מס' 1 מברץ 3*3
2.45	2300000	67	8,000,000	230	0.005	
2.36	2100000	72	8,000,000	230	0.01	
2.33	2600000	67	8,000,000	230	0.002	הידרוגרף מס' 1 מברץ 4*5
2.31	1980000	74	8,000,000	230	0.005	
2.13	1690000	85	8,000,000	230	0.01	
1.56	5500000	70	17,000,000	160	0.002	הידרוגרף מס' 2 מברץ 3*3
1.55	4400000	76	17,000,000	160	0.005	
1.55	3800000	80	17,000,000	160	0.01	
1.41	5000000	80	17,000,000	160	0.002	הידרוגרף מס' 2 מברץ 4*5
1.37	4230000	88	17,000,000	160	0.005	
1.37	3360000	94	17,000,000	160	0.01	

3.1.2. ריכוז ההמלצות של המחקר המעבדתי

נזכיר כי המטרה הייתה למצוא את המקדמים שהכנסנו אותם אל תוך נוסחת "קוצ'רין" הידועה :

$$V_{st} = \frac{V_r (1 - Q_{out} / Q_r)}{k} \quad (2) \quad (\text{ראה פרק 4 בדוח מעבדתי})$$

 V_{st} - נפח המאגר, V_r - נפח גאות, Q_{out} - ספיקה מכסימלית היוצאת ממאגר,

 Q_r - ספיקה מכסימלית של הידרוגרף, k - מקדם תיקון של צורת המאגר.



טבלה 3. מקדמי תיקון לנוסחת "קוצ'רין" עפ"י צורת המאגר ואופיו של הידרוגרף נכנס

טיב המאגר	הידרוגרף "קצר וחד" (הידרוגרף מס' 1 בדוח המעבדתי) עם ספיקה מרבית		הידרוגרף "ארוך ומתון" (הידרוגרף מס' 2 בדוח המעבדתי) עם נפח גיאות מרבי	
	הגבלת ספיקה נכנסת ע"י מברץ תחתון יותר מ- 50% (מברץ 3X3 בדוח מעבדתי)	הגבלת ספיקה נכנסת ע"י מברץ תחתון פחות מ- 50% (מברץ 5X4 בדוח מעבדתי)	הגבלת ספיקה נכנסת ע"י מברץ תחתון יותר מ- 50% (מברץ 3X3 בדוח מעבדתי)	הגבלת ספיקה נכנסת ע"י מברץ תחתון פחות מ- 50% (מברץ 5X4 בדוח מעבדתי)
"בינוני" (מודל-1 בדוח המעבדתי) עם יחס אורך/רוחב מפי 3 עד פי 4.5	* 2.77-2.36	* 2.33 – 2.13	* 1.58 – 1.55	* 1.41 – 1.37
"קומפקטי" (מודל-2 בדוח המעבדתי) עם יחס אורך/רוחב פחות מפי 3	* 2.56 – 2.2	* 2.08- 1.73	* 1.55 - 1.43	* 1.32 – 1.22
"ארוך" (מודל-3 בדוח המעבדתי) עם יחס אורך/רוחב יותר מפי 4.5	* 2.03 – 1.89	* 1.89 – 1.53	* 1.38 – 1.34	* 1.22 – 1.19

* בטבלה הנ"ל מקדם לפי שיפוע אורכי של המאגר :

- למודל מס' 3 עם שיפוע אורכי 0.05 עד 0.01 ,

- למודל מס' 2 עם שיפוע אורכי 0.01 – 0.025 ,

- למודל מס' 1 עם שיפוע אורכי 0.002 - 0.01 .

הערה : במקרים של שיפועים שונים ניתן להשתמש באקסטרפולציה .

3.1.3 סיכום

עלינו לסכם כי לפי הנתונים שהתקבלו לעיל :

א. צורת המאגר האופטימלית מבחינת כושר השהיה היא צורה "בינונית" מודל – 1 עם יחס

אורך/רוחב מפי 4.5 עד פי 3 .

ב. צורת המאגר הכי לא יעילה להשהיה – "ארוך וצר" – מודל 3 .



- ג. מאגר "קומפקטי" – מודל 2 אינו יעיל ביותר, אלא מבחינה זאת נמצא בין הבינוני לבין הארוך וצר.
- ד. השפעת שיפוע אורכי של המאגר בתנאי הידרוגרף קצר וחד – עד 20% לערך, בתנאי הידרוגרף מתון וארוך השפעת השיפוע – עד כ-8% מרבי.

3.2. דוגמאות מחושבות

3.2.1. כללי

נעשו 3 חישובים/הערכות HEC RAS ל- 3 אזורים אקלימים:

- אזור מישור החוף - נחל אלכסנדר בחצייתו עם כביש 5720.
- אזור הר הנגב הצפוני - נחל סכר בחצייה עם כביש 40.
- אזור הגליל התחתון - נחל חרוד בחצייה עם כביש 90 בסמוך לצומת בית שאן.
- בנוסף לכך נעשה חישוב למקרה שעבר קודם לכן בדיקה מעבדתית - נחל נטוף מאגר טרומן – מודל מס' 1.

מטרה העקרונית של ההערכות הנ"ל – לבדוק את התוצאות של הבדיקה המעבדתית על ידי השוואת התוצאות בין חישובים ישירים המומלצים כתוצאת המחקר המעבדתי ובחישובים המקבילים לפי שיטות אחרות.

3.2.2. החישובים המקבילים לבדיקה המעבדתית

החישובים המקבילים לבדיקה המעבדתית הם חישובי HEC RAS לפי זרימה יציבה (STEADY)

וזרימה לא יציבה (UNSTEADY).

שיטה המייצגת את הזרימה היציבה היא חישוב הידראולי לפי ספיקת התכן. הזרימה הלא יציבה מיוצגת על ידי חישוב באמצעות הידרוגרף המבטא את השתנות הספיקה בנחל במהלך השיטפון.

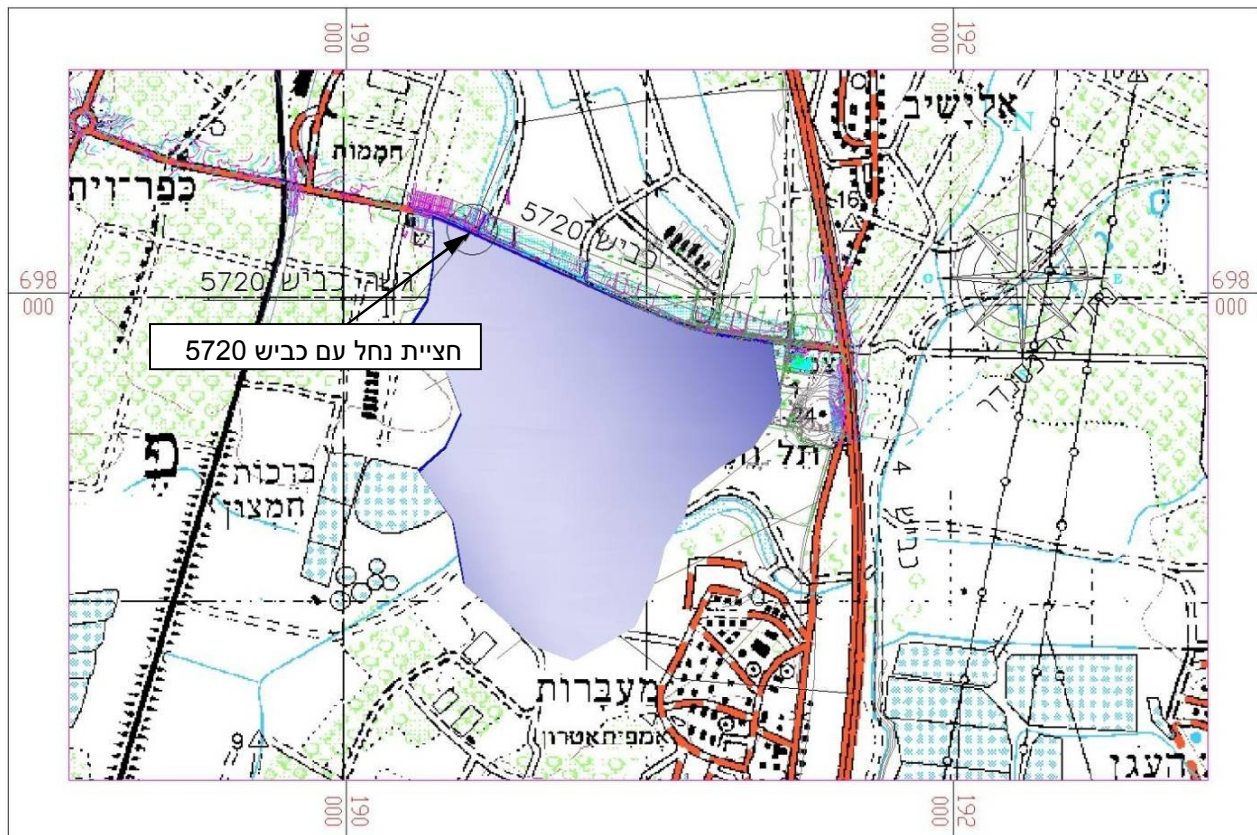
שיטות אלו מאפשרות להעריך רום פני המים בכל נקודה ונקודה במרחב אפיק הנחל בתנאי גיאומטריה של ע"מ להגן על הכבישים בזמן שטפונות ע"י התאמת גובה הגשרים עם רום המים המרבי.

שוני בין שתי השיטות הוא בגישה ליחס בין ספיקת שיא לזמן בנחל בזמן הגיאומטריה. חישוב לפי ספיקת תכן קבועה הוא יותר פשוט ומתבסס על הנחה שספיקת שיא היא (כביכול) אכן קבועה בזמן ללא התייחסות לתנאים טופוגרפיים.

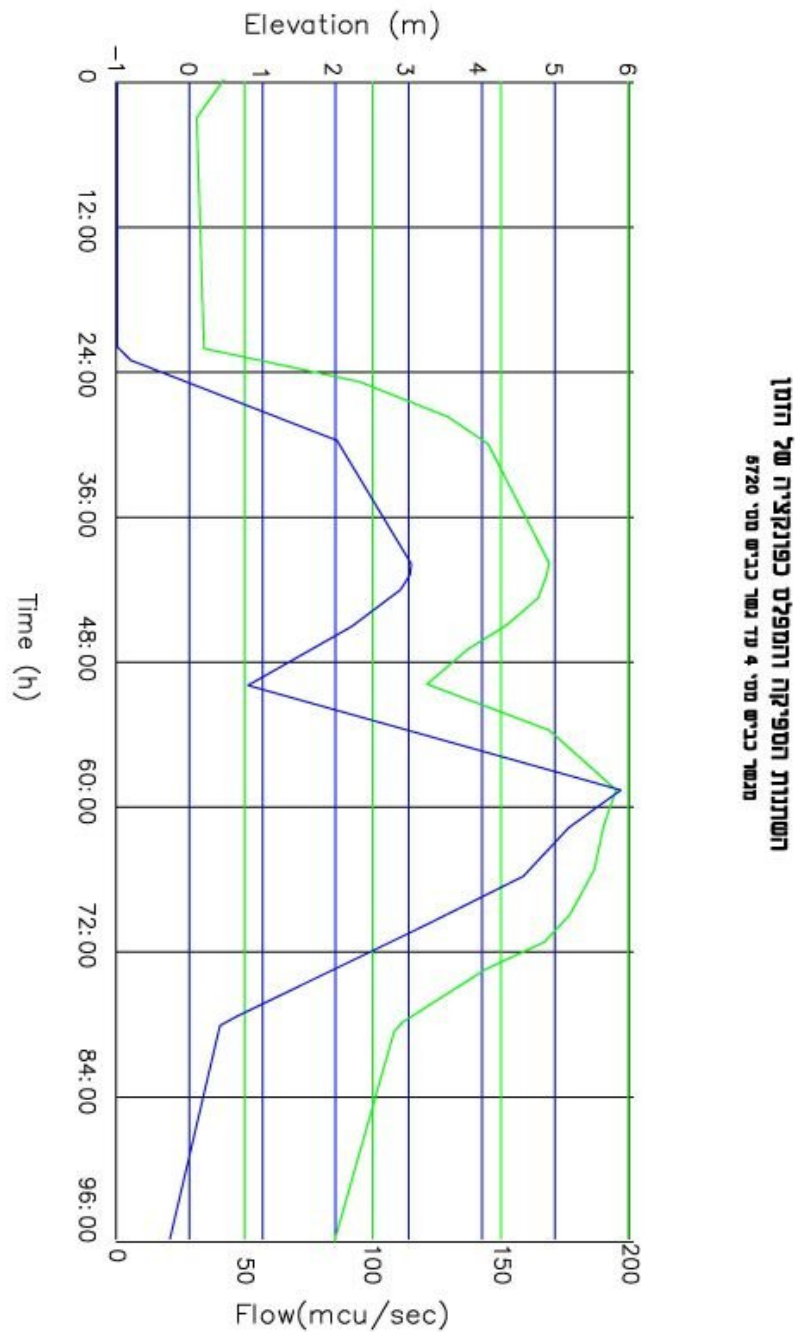
שיטת ההידרוגרף מניחה שספיקה מתפרסת בזמן הגיאומטריה וספיקת שיא מופיעה בפרק זמן קצר יחסית. ההנחה הזאת מובילה להשערה שמים בזרימתם יכולים להתפרס גם במרחב אפיק הנחל ולנקודת פגישה עם הגשר מגיעה ספיקה נמוכה יותר מספיקת השיא הפוטנציאלית. דבר זה נכון במיוחד במקרים של אפיק רחב ומתון וששטח הצפה הוא גדול. חישוב זה אמור להקל על תכנון הגשרים בכך שניתן להנמיך אותם בצורה משמעותית.

השאלה העומדת לפנינו היא האם ניתן לאמץ שיטת ההידרוגרף בתנאי הארץ הנוכחים.

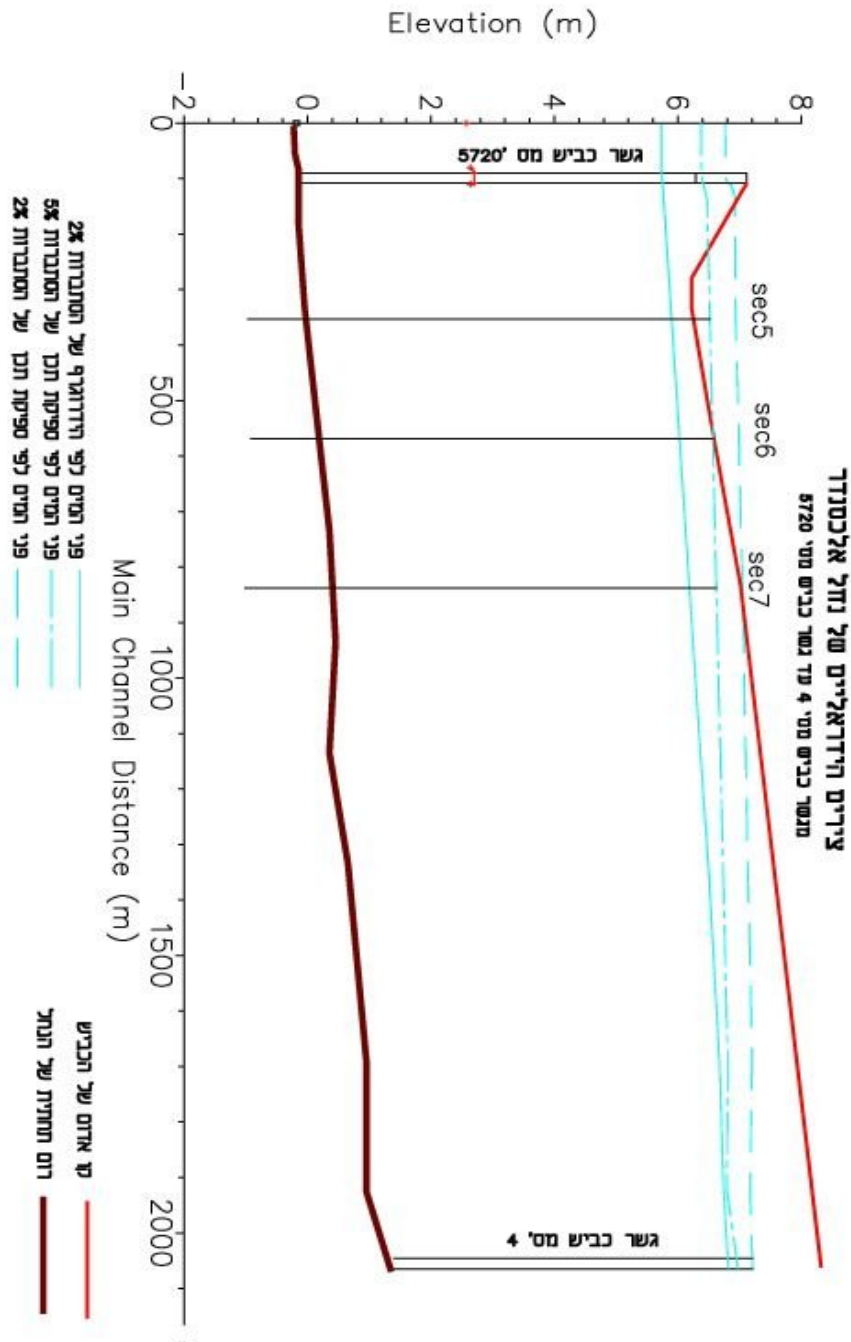
חציית נחל אלכסנדר עם כביש 5720



אזור 7. שטח הצפה המעורר ע"פ שיטת הידרוגרף עבור נחל אלכסנדר במעלה גשר כביש 5720



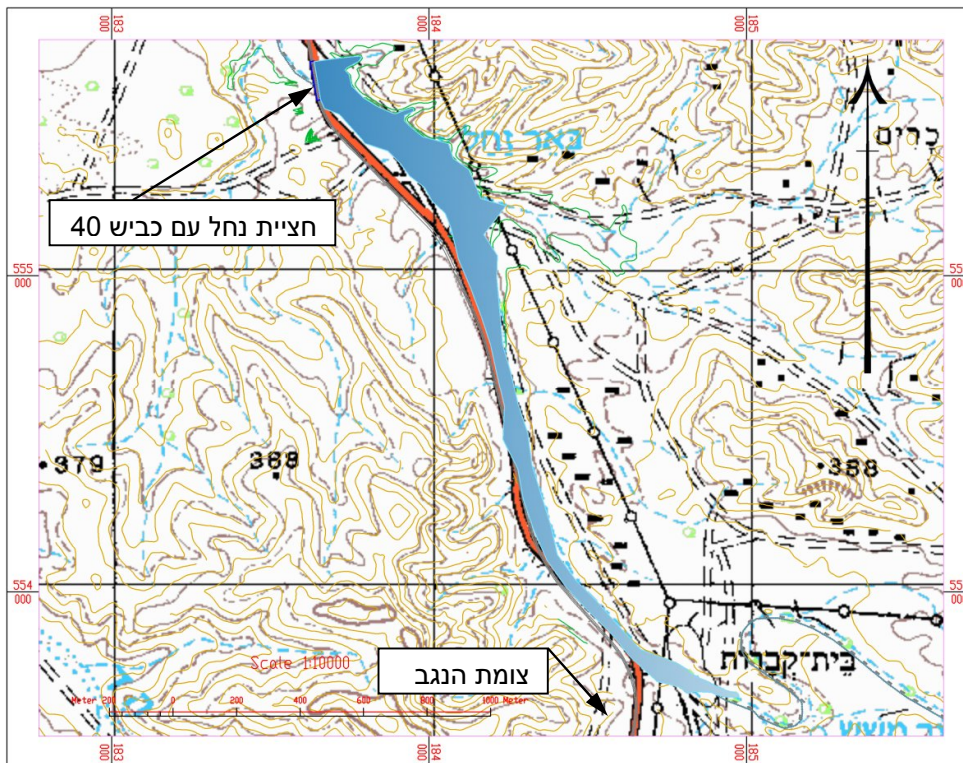
איור 8. השתנות ספיקה ומפלס המים בנחל אלכסנדר כפונקציה של הזמן המחושבים לפי שיטת הידרוגרף



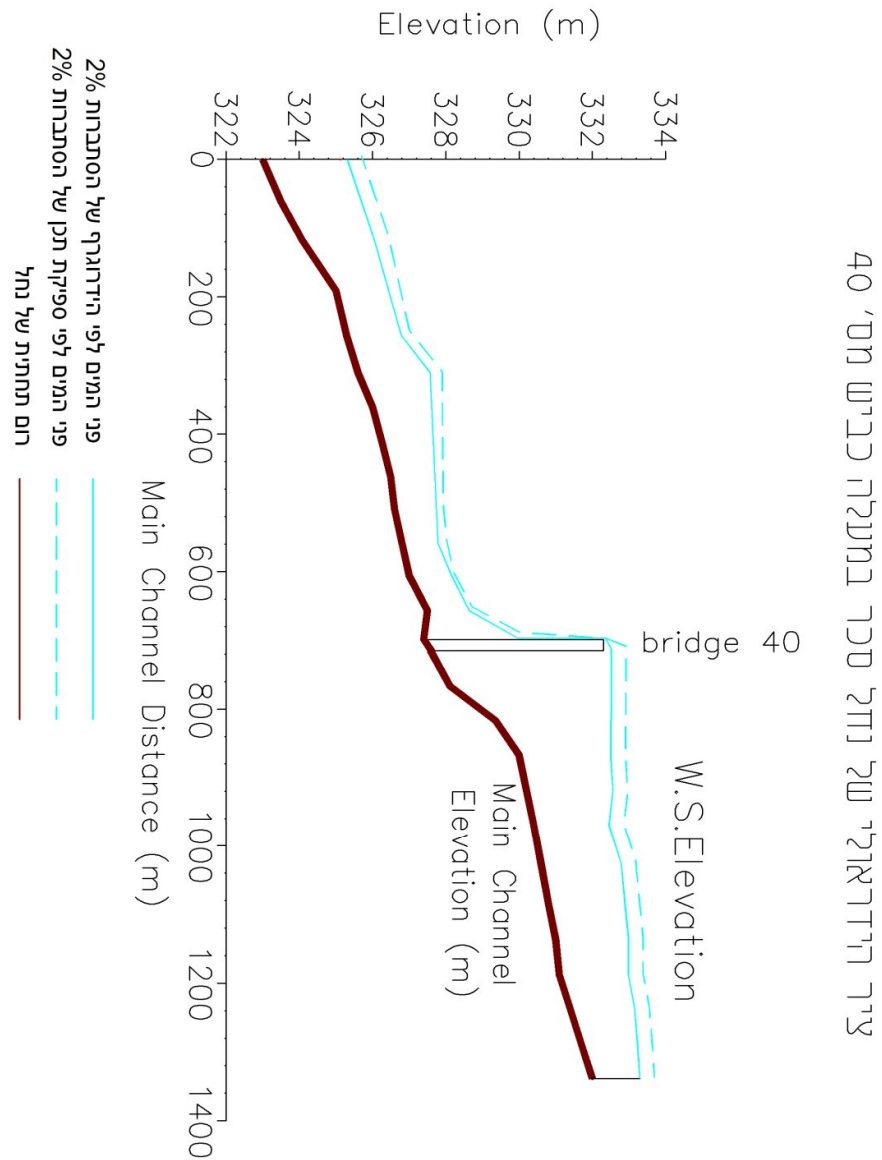
איור 9. צירים הידראוליים של נחל אלכסנדר המחושבים ע"פ שתי שיטות והשוואתם עם מפלס הגשר של כביש 5720

חציית נחל סכר עם כביש 40

נחל סכר העובר באזור הר הנגב הצפוני ומישורי הנגב המערביים חוצה את כביש 40 ב-נ.צ.
 555,598/183,651 צפונית לצומת הנגב ודרומית לרמת בקע. הנחל זורם בסביבה הררית וגדות הנחל
 תלולים. ניתוח הידראולי נעשה עבור מרחק של כ-3 ק"מ (סה"כ 30 חתכים) החל מאזור בית קברות סמוך
 לצומת נגב (חתך 43) ועד לגשר החוצה כביש 40 (חתך 13). תוצאות של בדיקות הידראוליות מוצגות
 בנספחים (ראה נספחים 3,4) ובאיורים הנמצאים מטה (איורים 9,10).



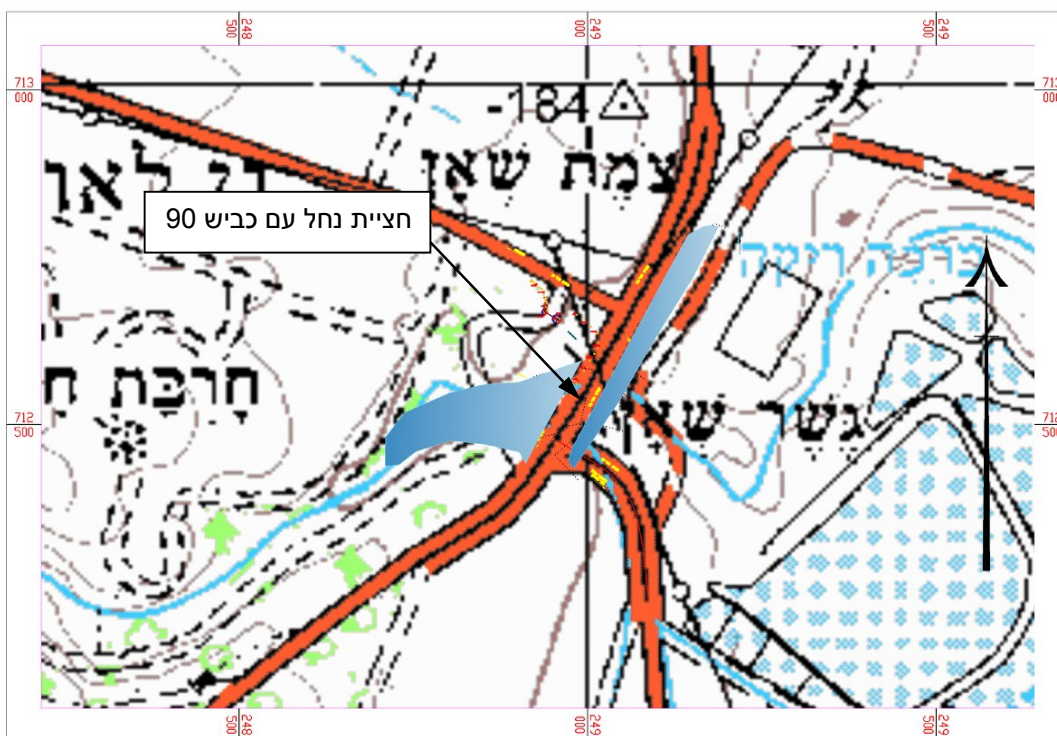
איור 10. שטח הצפה המעורך ע"פ שיטת הידרוגרף עבור נחל סכר במעלה גשר כביש 40



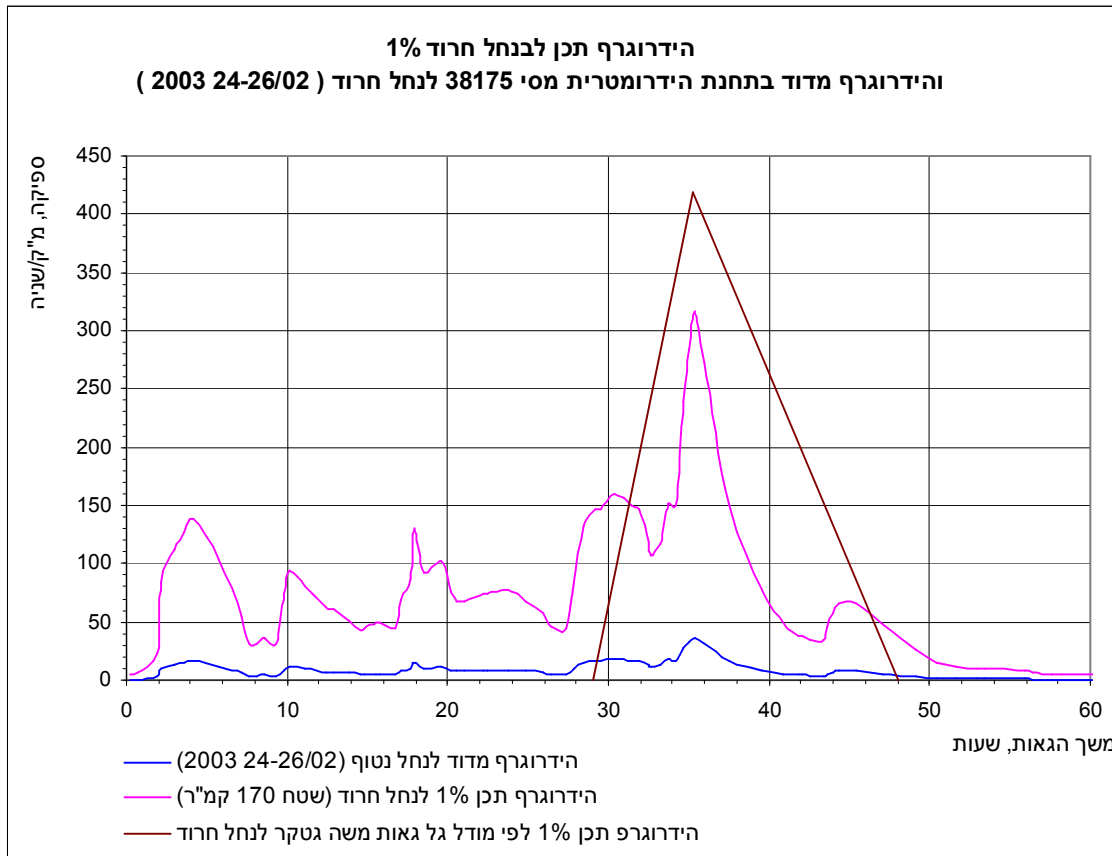
איור 11. צירים הידראוליים של נחל סכר המחושבים ע"פ שתי שיטות והשוואתם עם מפלס הגשר של כביש 40

חציית נחל חרוד עם כביש 90

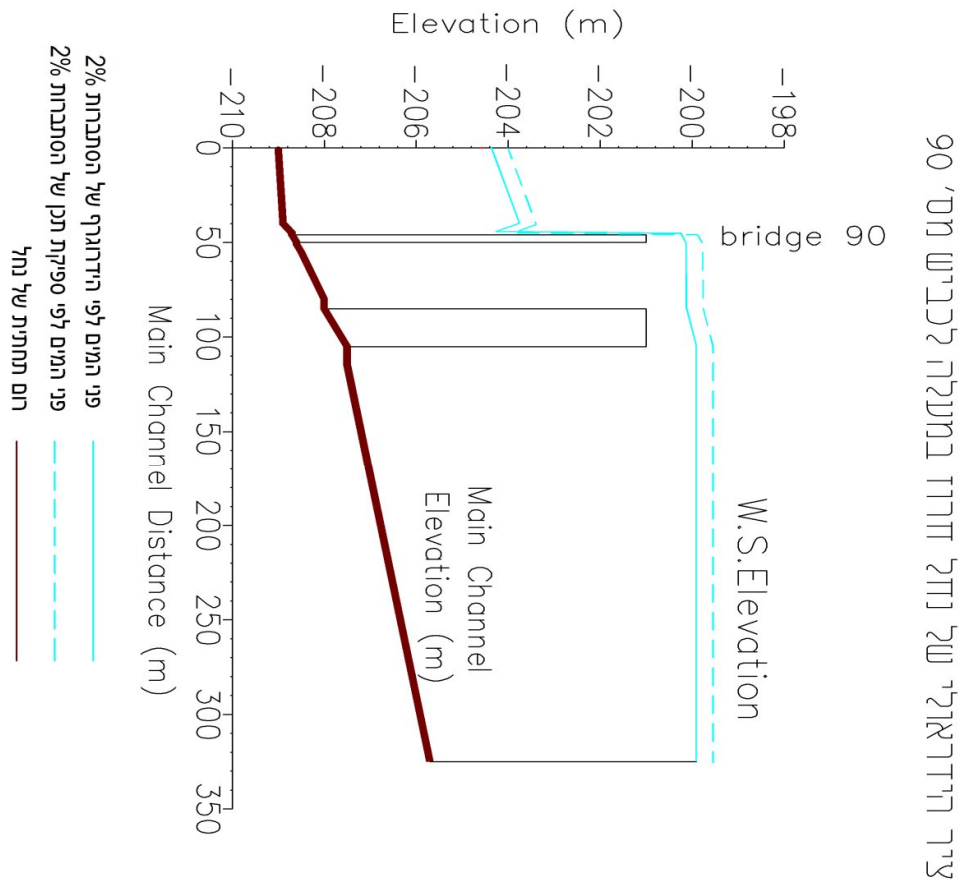
נחל חרוד הוא נחל באזור הגליל הנשפך אל הירדן. הוא חוצה הכביש 90 ב-נ.צ. 248,974 / 712,561. דרומית מצומת שאן. בהמשך הוא חוצה את דרך עפר סמוכה. הנחל זורם בסביבה הררית מתונה וגדותיו גבוהים יחסית. ניתוח הידראולי נעשה עבור מרחק של כ-0.5 ק"מ (סה"כ 10 חתכים) וכולל חציות עם שני הכבישים. תוצאות של בדיקות הידראוליות מוצגות בנספחים (ראה נספחים 5,6) ובאיורים הנמצאים מטה (איורים 11,12).



איור 12. שטח הצפה המעורר ע"פ שיטת הידרוגרף עבור נחל חרוד במעלה גשר כביש 90



איור 13. הידרוגרף תכן בנחל חרוד



איור 14. צירים הידראוליים של נחל חרוד המחושבים ע"פ שתי שיטות והשוואה עם מפלס הגשר של כביש 90



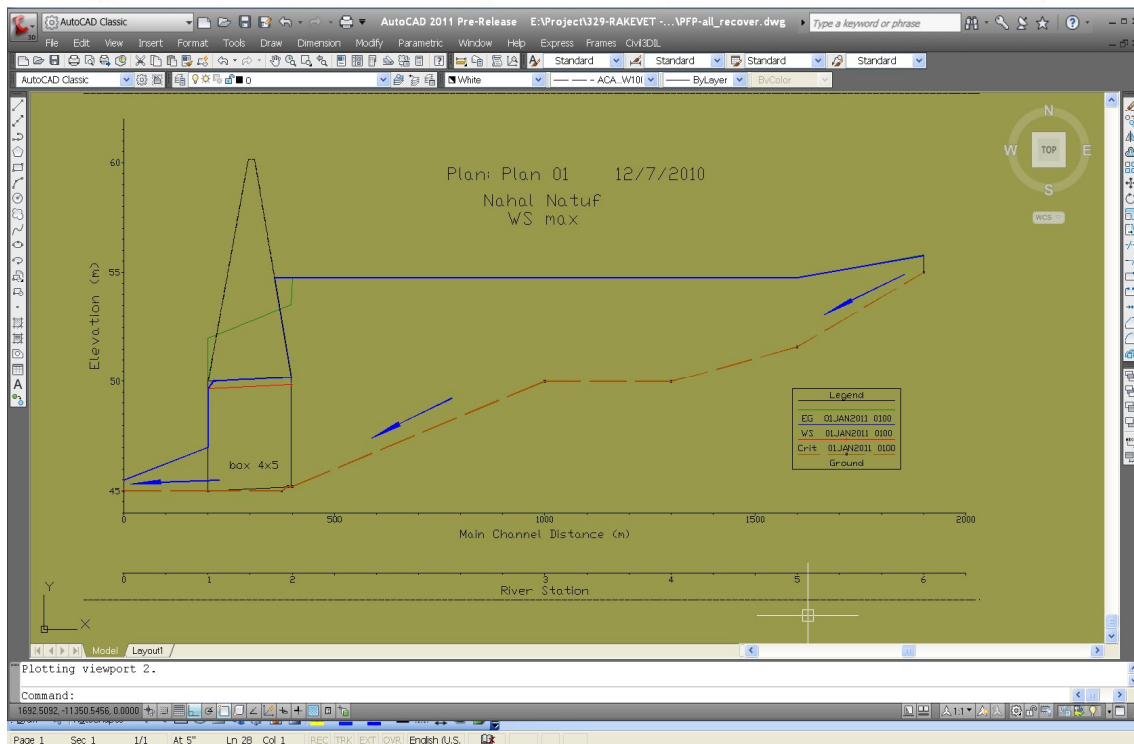
נחל נטוף מאגר טרומן

(החישוב מקביל לבדיקה מעבדתית – מודל 1)

לצורך החישובים המקבילים השתמשנו באותם הנתונים לפיהם נעשתה הבדיקה המעבדתית כולל - באותו ההידרוגרף חד וצר עם נפח 8 מיליון מ"ק כמו בבדיקה המעבדתית (ראה לעיל). החישוב נעשה על גבי החתכים כולל חתך לאורך הסכר עם המברץ התחתון – בצורה של מעביר מים 4X5 מ. להלן טבלת התוצאות והתרשים לחישוב.

טבלה 4. תוצאות חישוב נחל נטוף מאגר טרומן

Froude # Chl	Top Width (m)	Flow Area (m2)	Vel Chnl (m/s)	E.G. Slope (m/m)	E.G. Elev (m)	Crit W.S. (m)	W.S. Elev (m)	Min Ch El (m)	Q Total (m3/s)	Profile	River st.
0.7	457.48	222.63	1.36	0	55.5		55.5	55	230	Max WS	6
0.14	239.15	255.19	0.46	0.000234	53.08		53.07	51.61	116.41	Max WS	5
0.02	340.59	917.84	0.12	0.000005	53.05		53.05	50	114.17	Max WS	4
0.02	440.04	1296.45	0.09	0.000002	53.05		53.05	50	111.25	Max WS	3
0	389.26	2637.92	0.04	0	53.05		53.05	45.2	105.08	Max WS	2
									Culvert		1.5
0.02	615.96	629.48	0.06	0.000004	46.05		46.05	45	38.46	Max WS	1
0.03	960.44	367.27	0.06	0.000016	45.39	45.04	45.39	45	22.44	Max WS	0



איור 15. תרשים זרימה נחל נטוף מאגר טרומן

3.2.4. ניתוח התוצאות

להלן נעשתה השוואה בין תוצאות של בדיקות מעבדתית לבין החישובים המקבילים, נתוני ההשוואה מרוכזים בטבלה 5.

ניתן לראות שלכל המקרים ולפי שתי השיטות הני"ל הספיקה המחושבת והן המתקבלת במעבדה אכן הולכת וקטנה לאחר ההשהיה לפני חציית הכביש (או סכר).

יחד עם זאת רמת ההשפעה של ההשהיה מבחינה כמותית – שונה לשתי השיטות, יש שוני גם מאזור לאזור. נתבונן בכל מקרה במפורט:

אזור מישור החוף (עי"פ דוגמא של נחל אלכסנדר)

בגלל גודל אזור התפרסות המים (שטח מישורי בלי שיפועים חדים ושיפוע הנחל כמעט אפסי) הקטנת ספיקה במעלה גשר כפונקציה של הזמן מביאה להנמכה מפלס המים בכניסה לגשר.

חישוב ציר הידראולי לפי ספיקת תכן דורש החלפת גשר בחציית כביש 5720 כאשר רום פני המים מחושב כ-6.86 מ'. לעומת זאת, חישוב לפי שיטת הידרוגרף לא דורש החלפת גשר ורום פני המים עומד על 5.75 מ'. הירידה המשמעותית נובעת מ מילוי השקעים מסביב לנחל.

אזור נגב (נחל סכר)

שיפועים של השטח יותר חדים והשפעה על העברה לשיטת הידרוגרף לא משמעותית. לאומת זאת,

שספיקה יורדת מ-220 (זרימה לא יציבה (UNSTEADY) מ"קש ל-189 מ"קש, מפלס המים יורד רק ל-332.55 מ, הפרש של 23 ס"מ לעומת ספיקת תכן.



אזור עמק הירדן (נחל חרוד)

נחל עובר באפיק יחסית עמוק ושטח הצפה קטן. לעומת שינוי בספיקה, מפלס פני המים המחושב לפי שתי שיטות כמעט זהה בגלל אי הערמות המים מעבר לפני כביש 90 – גלישת העודפים .

אזור שפלה – מאגר טרומן נחל נטוף

נצפתה לשתי השיטות הורדת ספיקה מ-230 מ"ק/שנייה עד כ-30-50 מ"ק/שנייה – ירידה דרסטית בגלל נפח המאגר כמחצית נפח הגיאות ושיפועים זניחים לאורך הזרימה .

טבלה 5. ריכוז תוצאות לחישובים המקבילים

מפלס מים בכניסה לגשר	ספיקה (מ"ק\שנייה)					% אגירת מי גיאות	נפח אגירת מים במעלה החציה, מיליון מ"ק	נפח גיאות 2%	אזור	שם הנחל והכביש	מס' סידורי
	לא יציבה			יציבה							
לא יציבה	יציבה	שינוי	סוף	התחלה	תכן						
5.75	6.86	41	194	235	232	21	4,500	21	מישור החוף	אלכסנדר, 5720	1
332.55	332.78	59	220	248	248	39	0.580	1.5	הנגב	סכר 40	2
-199.91	-199.89	22	318	319	320	2	0.220	11	עמק הירדן	חרוד 90	3
55.5	55	192	38	230	230	47	8.0	17	שפלה	נטוף	4 בדיקה מקבילה למודל 1

3.2.5. השוואה עם החישובים לפי המלצות מעבדתיות

נחל אלכסנדר חוצה כביש 5720 לפי נוסחת קוצ'רין ולפי הפרמטרים המקובלים

ראה פרק 3.1.1 לעיל, אגם בכניסה לגשר הוא אגם "קומפקטי" עם יחס אורך/רוחב 1.2/1.0 לערך, שיפוע האפיק פחות מ-0.01, מברץ תחתון-גשר מעצ עם מגבלת זרימה פחות מ-50%, הידרוגרף מתון. לפי הפרמטרים הנ"ל מקדם לנוסחת קוצ'רין 1.32 :

על פי הנתונים הנ"ל היקף הילוך נגר בגשר מעצ (ראה נוסחאות 2,1). עפ"י כך הספיקה היוצאת 138

מ"ק/שנייה בלבד, ההפרש $323 - 138 = 94$ מ"ק/שנייה או -40% לערך – לבדיקה המעבדתית ! לפי

החישובים המקבילים הורדת הספיקה היא ב-41 מ"ק/שנייה

או-16%, סטייה – +24% לטובת הבדיקה המעבדתית .

נחל סכר חוצה כביש 40 לפי נוסחת קוצ'רין ולפי הפרמטרים המקובלים

ראה פרק 3.1.1 לעיל. אגם בכניסה לגשר הוא אגם "ארוך" עם יחס אורך/רוחב הרבה מעבר לפי 4.5

שיפוע האפיק כ-0.01, מברץ תחתון-גשר מעצ עם מגבלת זרימה פחות מ-50%, הידרוגרף חד. לפי

הפרמטרים הנ"ל מקדם לנוסחת קוצ'רין 1.22.

על פי הנתונים הנ"ל היקף הילוך נגר בגשר מעצ (ראה נוסחאות 1,2) עפ"י כך הספיקה היוצאת 123

מ"ק/שנייה בלבד, ההפרש $220 - 123 = 97$ מ"ק/שנייה או -57% לערך מהנכנסת – לפי הבדיקה

המעבדתית לפי החישובים המקבילים בהם הספיקה היוצאת קטנה מהנכנסת רק ב-59 מ"ק/שנייה או

27%, סטייה +30% לטובת המעבדה .



נחל חרוד חוצה כביש 90 לפי נוסחת קוצ'רין ולפי הפרמטרים המקובלים

ראה פרק 3.1.1 לעיל. אגם בכניסה לגשר הוא אגם " בינוני " עם יחס אורך /רוחב – פי 3 לערך, שיפוע האפיק קרוב ל- 0.01, מברץ תחתון-גשר מעצ עם מגבלת זרימה יותר מ-50%, הידרוגרף מתון. לפי הפרמטרים הנ"ל מקדם לנוסחת קוצ'רין 1.55 :

על פי הנתונים הנ"ל היקף הילוך נגר בגשר מעצ (ראה נוסחאות 1,2). עפ"י כך הספיקה היוצאת 138 מ"ק/שנייה בלבד, ההפרש $200-320 = 120$ מ"ק/שנייה או **37%- לערך !**

סיכום לגבי נחל חרוד :

השוואה עם חישובים המקבילים בהם הספיקה היוצאת קטנה מהנכנסת רק ב- 2 מ"ק/שנייה או 0.6% בלבד, זוהי סטייה חריגה של סדרי גודל, בגלל זה הניסוי – **נפסל על ידינו כאינו מתאים להשוואה**.

תוצאות של החישובים המקבילים לגבי מאגר טרומן (מודל מעבדתי – 1)

למחקר מעבדתי (מקדם לספיקה יוצאת -2.33) הורדת ספיקה עד 52 מ"ק /שנייה, לחישובים המקבילים – הורדת ספיקה – עד 38 מ"ק /שנייה.

סטייה בין השיטות כ- 33% כלפי התוצאה, סטייה – כ- 25% - לטובת החישובים !

3.3. סיכום המחקר השהיית זרימה באגמים

לאחר ההשוואה בין התוצאות שהתקבלו בבדיקת המעבדה לבין החישובים של הדוגמאות המייצגות להלן הסיכומים העקרוניים :

א. הסטייה בין תוצאות המעבדה לבין תוצאות החישובים * נעה בין 25% - עד 30% +, כאשר התוצאות שלפי החישובים נעים בין "+" ל- "-" כלפי המעבדה.

ב. לצורכי הערכות הראשוניות מומלץ להשתמש במקדמים שבטבלה 3 לספיקה יוצאת לפי נוסחת "קוצ'רין"

ג. למתקנים עם ספיקות תכן גדולות מ- 100 (בצפון הארץ) או 200 מ"ק/שנייה (בדרום), או במקרים של מתקנים הידראוליים מורכבים עם נתונים הידראוליים קיצוניים לשקול לערוך בדיקות מעבדה במסגרת התכנון ההידראולי.

הבדיקות יכללו : הערכת כושר ההולכה למעבירי מים, תעלות וגשרים, הערכת היקפים גרירת סחף ושקיעתו במתקנים ההידראוליים, תופעות הידראוליות אחרות

ד. מומלץ למעצ להמשיך את המחקר/פיתוח שיטה ולהאריך את סדרת הבדיקות המעבדתיות והחישובים המקבילים לפי מספר שיטות חישוב המקובלות כמו :
* HEC RAS - ו- HYDROROUT לצורכי השוואה וסיכום.



4. קריטריונים להצעת הנחיות מעצ

4.1. השהיית זרימה

מוצע ליצור הנחיות מעצ בנושאי השהיית זרימה בכניסה לגשרים, למעבירי מים, לראשי תעלות ניקוז ובמקומות אחרים מסוג זה (ראה נספח 2).

קריטריון הראשון להצעת ההנחיות :

סוללות כבישי מערכת בינעירונית לא יתוכננו כסוללות אזורי איגום של תהליך השהיית מי נגר עילי, כל ההגנות יעשו מעבר לגופן של הסוללות הנ"ל.

4.2. ההנחיות לשלבי תכנון ראשוניים

ההנחיות לשלבי תכנון ראשוניים כמו דוחות הידרולוגיה ותכנון ראשוני **יכללו :**

- איתור המקומות בהם מתרחשת השהיה בכניסה למתקני ניקוז - המתוכננים
- סימון של קו ההצפה במעלה המתקן בהתאם למפלס מים מרבי במעלה המתקן (כמו עומד "מניע" בכניסה למעבירי מים או/ו גשרים
- הערכת נפחי האגירה בתנאי המפלס הגבוה והשוואתם עם נפחי הגאוויות המחושבים עפ"י הנחיות מעצ הקיימות להערכת הדוחות ההידרולוגיים.
- על סמך הנתונים הראשוניים יש לשקול ולנמק את הכדאיות הכלכלית/הנדסית להמשיך ולחשב את ההשהיה בשלבי התכנון המפורטים יותר.

4.3. ההנחיות לשלבי תכנון מוקדם ומפורט

ההנחיות לשלבי תכנון מוקדם ומפורט יכללו דרישות: בנוסף להערכות שנעשו בשלב הראשוני, לחשב באופן פרטני יותר ובאמצעות השיטות המקובלות* את מימדי ההשהיה ואת יכולתה להקטין את ספיקות התכן במתקני חציה HEC RAS* ו- HYDROROUT.

מקורות

1. Ben-Zvi, A., (1993) Distribution of flood volumes beyond design discharges. Eng. Hydrol (ed. C.Y. Kuo), ASCE, San Francisco, CA USA, pp. 97-102.
2. Ben-Zvi, A., (1996) Prediction of rare inundation volumes of runoff. Proc. VII'th IAHR Int . Symp. Stochastic Hydraulics (eds. K. Tickle et al.), Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 349-356.
3. Dietrich K., (2000) Stormwater conveyance modeling and design, Heastad Press CT USA.
4. Ettema R., (2000) Hydraulic Modeling, Concept and Practice, ASCE
5. Hamill L., (2001) Understanding Hydraulics, Palgrave New York.
6. Iowa Stormwater Management (2008) Detention Storage Design, Version 2; December.
7. Li J. and McCorquodale A. (1999). "Modeling mixed flow in storm sewers". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 125, N. 11, 1170-1180.
8. Manuals and Report on Engineering Practice No. 97.
9. Mays L. W., (2001) Stormwater collection systems design handbook, McGraw-Hill.
10. McCuen R. H., (1998) Hydrologic Analysis and Design, Prentice Hall, New Jersey
11. Seybert T. A., (2006) Stormwater Management, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey
12. Shaw E.M., (1994) Hydrology in Practice, by Stanley Thomas Ltd.
13. Walski T.M., Bernard T. E., (2004) Computer Applications in Hydraulic Engineering. Heastad Press CT USA.
14. משה צ'וברוצקי (2009) מאגרי גיא מדריך ישראלי (כתב יד).
15. פושמן, א., לור, ה., (1995) מודל אופטימיזציה - סימולציה ככלי לתכנון ותפעול מאגרים בנגב, הנדסת מי, מס, 20 'עמודים 31-34.
16. שבנוב א.ד. (1977) "מאגרי גיא במשק החקלאי "הוצאה לאור" קולוס "מוסקווה 13 (Russian). "מטודולוגיה מלמדת לסטודנטים-לתכנון מערכות מאגרי גיא", מכון להידרוטכניקה ומילורציה, נובוצ'רקססק. 1970, פרופסורים: פדיצ'קין, אבטונומוב, וולקוב

נספחים

נספח 1

דו"ח סופי של מחקר מעבדתי

**” השהיית זרימה באגמים בכניסה
לגשרים ולמעברי מים ”**

מאי 2010

הוכן ע"י: ד"ר אורי צדקה

ד"ר לאוניד גריניס

תכנון והערכות הידראוליות: אינג' משה צ'וברוצקי

עבור: מ.מ (1997) מהנדסים יועצים 'דרוס'

תוכן העניינים

תקציר

פרק 1. מודלים ההידראוליים

1.1 מידול ההידראולי

1.2 אסטרטגיית המידול

1.3 מודל ההידראולי בסקאלות שונות (Distorted model)

1.4 השהיית זרימה של מי גשמים

1.4.1 סקירה של השהיית זרימה

1.4.2 סוגי מתקני השהייה

1.4.3 עקרונות מידול של מאגרי השהייה

1.4.4 תכן ראשוני למאגרי השהייה

פרק 2. מערכת ניסיונית מעבדתית

2.1 אופן פעולת המערכת המעבדתית

2.2 אופן הביצוע של הניסויים

2.3 הפרמטרים שימדדו

פרק 3. תיאור מודלים ההידראוליים לבדיקות ניסיונית

3.1 מבוא

3.2 מודל של מאגר מס' 1 (מודל מס' 1)

3.3 מודל של מאגר מס' 3 (מודל מס' 2)

3.4 מודל של מאגר מס' 4 (מודל מס' 3)

3.5 ההידרוגרפים הנמדדים במציאות הניתנים לבדיקות מעבדה

פרק 4. תוצאות בדיקה מעבדה עבור מודלים ההידראוליים

4.1 ניסויים ותוצאות מעבדתיים עבור מודל של מאגר מס' 1 (מודל מס' 1)

4.2 ניסויים מעבדתיים עבור מודל של מאגר מס' 3 (מודל מס' 2)

4.3 תוצאות ניסויים מעבדתיים מאגר מס' 4 (מודל מס' 3)

4.4 מסקנות

פרק 5. מקורות

תקציר

א. מטרת הבדיקה המעבדתית – לתת לחוקר פרמטרים להמשך הוצאת הנחיות תכנון למתכנני ניקוז. מדובר בפרמטרים שנכללים בנוסחאות להערכת היקף הקטנת ספיקות המחושות הידרולוגית עקב פשטי הצפה שנוצרו בכניסה למתקני חציית כבישים גשרים ומעברי מים.

ב. בחינת התוצאות התבססה על נוסחת קצ'רין הידועה, בה נערך מקדם K שמשתנה כתוצאה מהשפעת צורת המאגר.

$$V_{st} = \frac{V_r (1 - Q_{out} / Q_r)}{k}$$

V_{st} - נפח המאגר, V_r - נפח גאות, Q_{out} - ספיקה מכסימלית היוצאת ממאגר, Q_r - ספיקה מכסימלית של הידרוגרף, k - מקדם תיקון של צורת המאגר.

ג. לצורך הבדיקה הועברו למדענים תוכניות איגום במעלה נחל נטוף כולל רקע טופוגרפית, תכנון סוללות ומתקני חצייה ברמת דיוק גבוה ומספקת ליצירת מודלים. התוכניות נלוו בחישובים הידראוליים / השהיית זרימה לתנאים שונים.

פרמטרים המשתנים היו: צורות איגום: קומפקטי, ארוך, שיפועי תחתית מ-1% עד 0.2% עם שאר התנאים שווים.

ד. המשך עבודתנו אנו רואים כלימודי חומר שהתקבל יחד עם בדיקות אחרות של פרויקטים אשר נעשו ללא בדיקת מעבדה, אלא בחישובים.

כוונתנו, להתבסס על תוצאות המחקר ולהציע המשך פיתוח המחקר שיכלול: לימודי מקרים בנחלים שקמה, בשור ואחרים אשר מובאים במחקר ד"ר אריה בן צבי (ראה במראי מקום), או במילים אחרות תיעשה השוואת האירועים הנ"ל עם תוצאות המידול והמקדמים שהומלצו, מידול נוסף של ציוד מחושות ומתוכננות בתוכניות מעצ.

ה. עבודת המכללה שלהלן, אשר נעשתה ע"י ד"ר אורי צדקה וד"ר לאוניד גריניס בהשתתפות אינג' משה צ'וברוצקי (מטודולוגית המחקר ותכנון) כללה מספר רב של סכימות ותמונות של מודלים שנוצרו לצורך המחקר. נעשתה עבודה יסודית ומדויקת שמאפשרת המשך פיתוח שיטת תכנון נכונה הלוקחת בחשבון את תופעת השהיית זרימה כמשפיעה וחשובה על תכנון מעצ ואחרים.

1. מודלים הידראוליים

1.1. מידול הידראולי

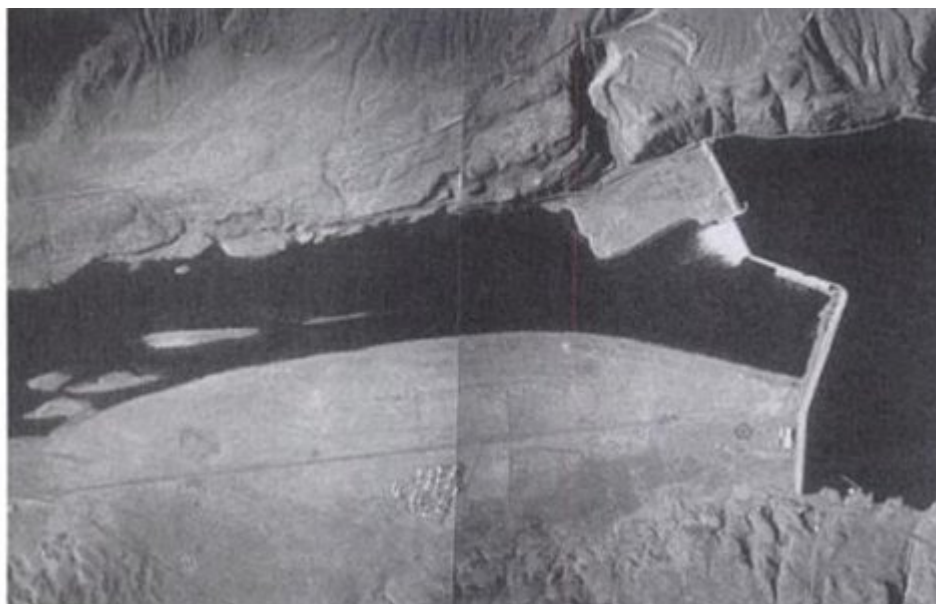
מידול הידראולי הינו סוג של מידול פיסקלי אשר משתמשים בו למחקר של תכן ובעיות תפעול בהנדסה הידראולית. השימוש במודלים של קני. מידה מאפשר לבחון בעיות זרימה במערכות הידראוליות אמיתיות. היתרון של מידול הידראולי הוא הפוטנציאל הטמון בדימוי מאפיינים רבים של זרימה מסובכת. באיור 1.1 ניתן לראות מודל הידראולי של נחל עם סכר. המודל נועד למציאת פילוג המהירויות אופטימאלי במורד הנחל.

קיימות בעיות רבות בהן ישנם מעט מאוד אפשרויות לפתרון, פרט למידול הידראולי, לביצוע תכן או לקבלת החלטות ביצועיות אשר כוללות עבודות הידראוליות מסובכות ויקרות. מצבים אלו נוצרים מסיבות מגוונות, לדוגמא, סיבוכיות גבוהה של הזרימה. במצבים הללו לא ניתן לחלץ פתרון אנליטי או לבצע הדמיה נומרית ונחוץ מידול הידראולי.

עקרונות ההקבלה אשר מהווים בסיס למידול הידראולי הינם פשוטים. למרות זאת קיום קושי בקביעת הקריטריון של פרמטרים הדרושים למידול. מגוון רחב מאוד של מצבים דינאמיים של הזרימה ניתנים למידול הידראולי. מעט מאוד מודלים מדמים בדיוק את תהליכי הזרימה במצב זרימה נתון. החיסרון במידול הוא בדרך כלל אי התאמות נקראות אפקטי סקאלה או אפקטי מעבדה.

המושגים הנ"ל באים לתאר את חוסר שביעות הרצון מאי התאמות בין המודל למציאות. אפקטי הסקאלה באים לידי ביטוי כאשר יחס בין אב-טיפוס למודל גדל, או, מספר התהליכים הפיסיים בזרימה אותם יש לדמות, גדל.

אפקטי המעבדה באים לידי ביטוי כאשר ישנה הגבלה במרחב המעבדה, וכמו-כן או העתקה לא מדויקת של תנאי שפה.



איור 1.1

1.2. אסטרטגיית המידול

אסטרטגיית המידול דורשת בהתחשב בדמיות, התקרבות או דיוק בסקאלת המודל, מערך המודל ושימוש המודל, יחד עם גישות שונות כגון הדמיה נומרית ועבודת שטח.

היחסים בין המודל לביצועים באב-טיפוס מוגדרים ע"י חוקי הדמיות ההידראולית.

מאחר וקיימים חוקים רבים והמודל לא יכול להיות כפוף לכולם בו זמנית, המודל לא יסקף

את הביצועים באופן מוחלט וייתכנו מספר אי-דיוקים הקשורים בקנ"מ. אי-דיוקים

אלו ניתן ליישב ע"י תיכון זהיר ביחס לקנ"מ דבר הדורש ידע בדמיות הידראולית.

ישנם שלושה סוגים מרכזיים של דמיות הידראולית שיש לקחת בחשבון:

דמיות גיאומטרית

דמיות גיאומטרית קיימת בין מודל לאב טיפוס כאשר קיים יחס קבוע בין קווים באב טיפוס לבין הקווים ההומולוגיים שבמודל. כדי לבנות את המודל של מעביר מים המתאים לאב טיפוס (prototype) נדרש שלכל נקודה על פני המודל או בשדה הזרימה שלו, מתאימה נקודה באב טיפוס או בשדה הזרימה שלו. נקודות אלה נקראות נקודות הומולוגיות.

$$L = L_p / L_m$$

כאשר: L קנה המידה הגיאומטרי, L_p - אורך אופייני של האב טיפוס, L_m - אורך אופייני של מודל.

יש להקפיד שכל הגדלים הפיזיקאליים יופיעו באנליזה הממדית.

יש להיזהר מלקחת גדלים פיזיקאליים מיותרים כגון גדלים שמתקבלים ממשתנים שכבר נלקחו בחשבון.

המודל מתוכנן כך שיהיה דומה פיזיקאלית לאב טיפוס.

דמיות קינמטית

בזרימות דומות מבחינה קינמטית בין יהיו קווי המסלול של החלקיקים דומים מבחינה גיאומטרית. בנוסף לכך יהיו פרקי הזמן הדרושים למעבר חלקיקי הזורם במסלולים הומולוגיים הנמצאים ביחס קבוע (בין האבטיפוס למודל) שהוא קנה המידה לזמנים. בזרימות כאלה יהיו גם יחסים קבועים בין המהירויות והתאוצות בנקודות הומולוגיות (בין האבטיפוס למודל).

$$L_v = V_p / V_m$$

כאשר: L_v קנה המידה למהירות, V_p - מהירות באב טיפוס, V_m - מהירות במודל.

דמיות דינאמית

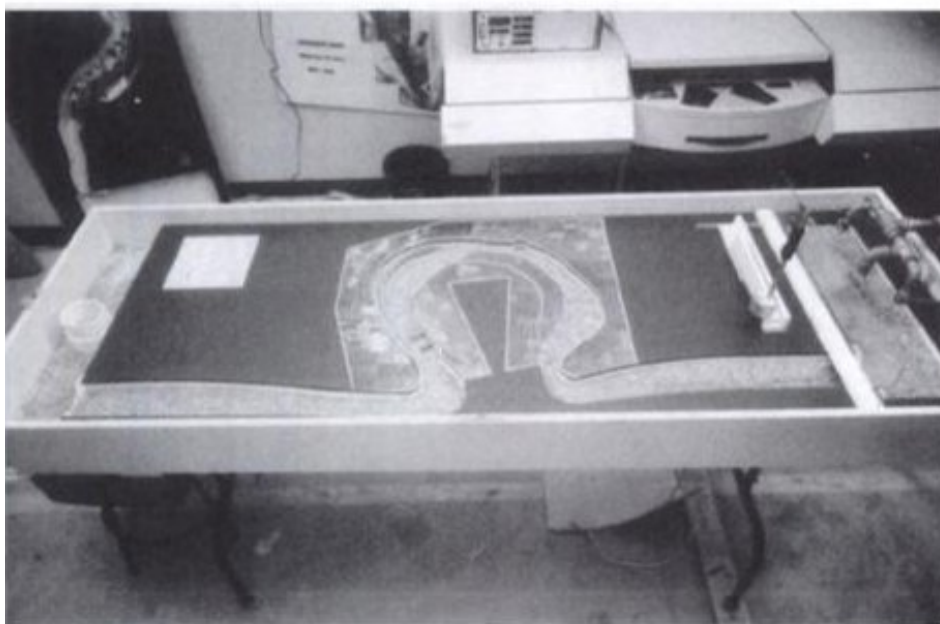
אם בנוסף לדמיות הקינמטית (בין האבטיפוס למודל) יהיו גם כוחות הפועלים בזמנים הומולוגיים על נפחים ושטחים הומולוגיים נמצאים ביחס קבוע, אנו אומרים כי קיימת דמיות דינאמית בין המודל לבין האב טיפוס. במצב זה ניתן להגדיר קנה מידה לכוחות כלהלן:

$$L_F = F_p / F_m$$

כאשר: L_F - קנה מידה לכוחות, F_p - כוחות באב טיפוס, F_m - כוחות במודל.

1.3. מודל הידראולי בסקאלות שונות (Distorted model)

גישה שונה נדרשת לתיאור " מודלים שולחניים " או מיקרו- מודלים. ההנדסה ההידראולית תרצה להסיק תובנות ראשוניות כמותיות מוערכות של התהליכים העיקריים הקשורים במצבי הזרימה השונים. באיור 1.2 ניתן לראות מודל של נהר בסקאלה אופקית ואנכית של 1200:1 ו- 15000:1 בהתאמה. מודלים אלו (Distorted model) נפוצים למידול תופעות זרימה שונות.



איור 1.2

כאשר יש צורך לבנות מודל של שטחים גדולים עם מים רדודים נפוץ ביותר להשתמש במודלים שבהם סקאלה אנכית (y: 1) גדלה יותר מסקאלה אופקית (x: 1) המודל הזה נקרא – distorted model. על-ידי שימוש במודלים אלו ניתן לבצע מדידות בקלות ובדיוק רבים יותר. יחס בין סקאלות אנכיות ואופקיות של המודל פי 5 או פי 10 גדול בהתאמה. כדי להשתמש במודלים האלו יש צורך לשנות את חוקי היחסים בין הסקאלות. נקבל יחסי קנה מידה עבור מודל שאנו נבנה לפי דרישות בעבודה זו.

משיקולים טכניים נבחר קנה המידה של המודל לסקאלה האנכית $\frac{1}{y} = \frac{L_m}{L_p} = \frac{1}{100}$, ולסקאלה

האופקית $\frac{1}{x} = \frac{L_m}{L_p} = \frac{1}{1000}$. לפי קנה המידה הזה נקבל (כאשר האינדקס m מציין מודל, האינדקס p

מציין אב-טיפוס):

$$\frac{A_m}{A_p} = \frac{1}{xy} \quad , \quad \frac{A_m}{A_p} = \frac{1}{x^2} \quad \text{א. עבור שטח אופקי היטל על : חתך אנכי .}$$

$$\frac{V_m}{V_p} = \frac{1}{x^2 y} \quad \text{ב. יחסי נפח : .}$$

ג. מהירות זרימת המים בתוך המודל יחסית לאב טיפוס :

$$\frac{V_m}{V_p} = \frac{1}{y^{1/2}}$$

ד. סקאלה של זמן :

$$\frac{T_m}{T_p} = \frac{L_m}{L_p} \cdot \frac{V_p}{V_m} \quad \frac{1}{x} y^{1/2} = \frac{y^{1/2}}{x}$$

ה. ספיקת זרימה במודל יחסית לאב טיפוס :

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \frac{V_o L_m}{V_o L_p} \cdot \frac{T_p}{T_m} = \frac{1}{x^2 y} \cdot \frac{x}{y^{1/2}} \quad , \quad \frac{Q_m}{Q_p} = \frac{1}{xy^{3/2}}$$

שיפוע הקרקעית של המאגר :

$$i_m = i_p$$

מקדם החספוס (n) למאנינג :

$$\text{לפי נוסחת מאנינג} \quad V = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} \quad \text{ניתן לקבל את מקדם החספוס :}$$

$$\frac{1}{y^{1/2}} = \frac{n_p}{n_m} \left(\frac{1}{y}\right)^{2/3} \left(\frac{x}{y}\right)^{1/2} \quad \Longleftrightarrow \quad \frac{V_m}{V_p} = \frac{n_p}{n_m} \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{2/3} \left(\frac{J_m}{J_p}\right)^{1/2}$$

$$n_m = n_p \frac{x^{1/2}}{y^{2/3}} = 0.015 \frac{1000^{1/2}}{100^{2/3}} = 0.02 \quad \Longleftrightarrow \quad \frac{n_m}{n_p} = \frac{x^{1/2}}{y^{2/3}} \quad \text{מכאן נקבל :}$$

החספוס כמעט אותו חספוס שקיים במציאות.

ח. ספיקות מכסימליות (לפי ההידרוגרף הנמדד) באב טיפוס 230 מ"ק/שניה מכאן נקבל ספיקה מכסימלית במודל :

$$Q_m = Q_p \frac{1}{xy^{3/2}} = 230 \cdot \frac{1}{1000 \cdot 100^{3/2}} = 0.00023 m^3 / s \quad \Longleftrightarrow \quad \frac{Q_m}{Q_p} = \frac{1}{xy^{3/2}}$$

ט. הזמן המכסימלי שהגשם מתרחש (לפי הידרוגרף האמיתי) שווה 120 שעות, אז במודל נקבל:

$$T_m = T_p \frac{y^{1/2}}{x} = 120 \cdot 3600 \frac{100^{1/2}}{1000} = 4320s = 1,2hr \quad \Leftrightarrow T_m = T_p \frac{y^{1/2}}{x}$$

י. אורך המכסימלי של המאגר היא 2400 מ', אז אורך מכסימלי של המודל שווה:

$$L_m = \frac{L_p}{1000} = \frac{2400}{1000} = 2.4m \quad \Leftrightarrow \frac{L_m}{L_p} = \frac{1}{1000}$$

כ. גובה המכסימלי של המאגר היא 30 מ', אז גובה מכסימלי של המודל שווה:

$$L_m = L_p \frac{1}{100} = \frac{30}{100} = 0.3m, \quad \frac{1}{y} = \frac{L_m}{L_p} = \frac{1}{100}$$

רוחב של המאגר הוא 1200 מ' אז רוחב המכסימלי במודל שווה:

$$L_m = \frac{L_p}{1000} = \frac{1200}{1000} = 1,2m$$

אל סמך הנתונים האלה בונים מודל.

טבלה 1.1: יחסי קנ"מ עבור מודל, לפי פרוד

פרמטרים	יחידות	ממדים של המודל לפי חוק פרוד
אורך	m	L
שטח	m ²	L ²
נפח	m ³	L ³
מהירות	m/s	L ^{1/2}
ספיקה	m ³ /s	L ^{5/2}
זמן	s	L ^{1/2}
כוח	N	ρL ³
לחץ	Pa	ρL
צפיפות	kg/m ³	ρ
מקדם החספוס למאנינג	s/m ^{1/3}	L ^{1/6}

ע"מ לקבל פרמטר כלשהו מהטבלה עבור המודל יש לחלק את הפרמטר של אב- טיפוס למימד המתאים של הקנ"מ מהטבלה.

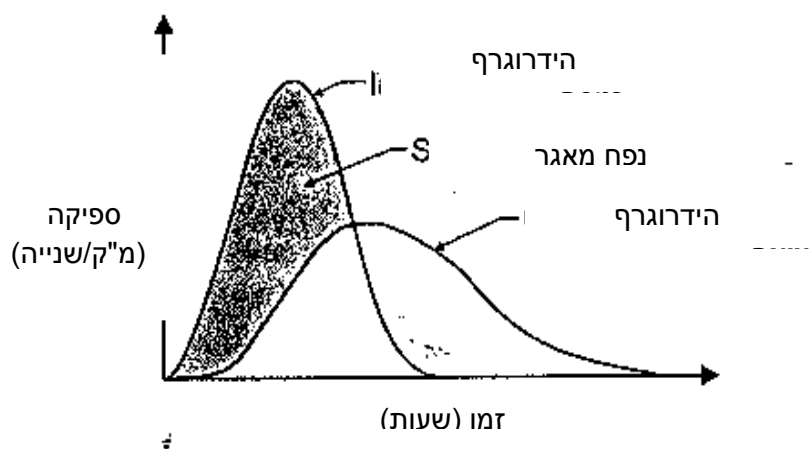
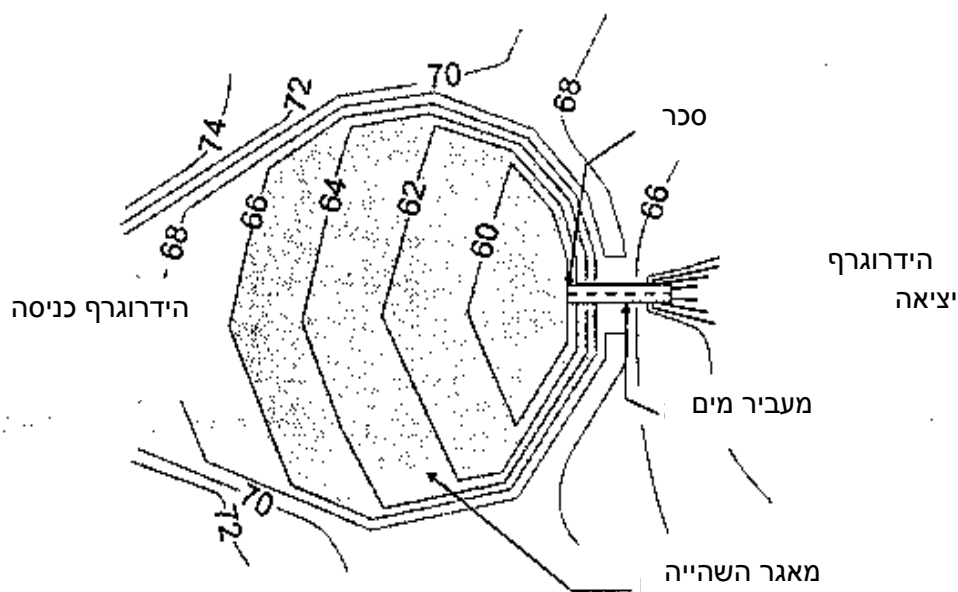
1.4. השהיית זרימה של מי גשמים

השהיית זרימה של מי גשמים הינה : אחסון זמני של תשטיף באגמים ו/או במיכלים תת קרקעיים ו/או בבריכות וכד' , עם המשך הזרימה באופן מבוקר אחרי ההשהיה ואז - במימדים אחרים ולרבות בספיקות קטנות מאלו שהיו לפני כניסת זרימה לאיגום וההשהיה .

השהיית הזרימה מתרחשת בדרך כלל בפיתוח שטח עקב יחס תשטיף גבוה הנגרם מאי חדירות משטח הזרימה כגון סכרים או כבישים רחובות וכד'. יחס תשטיף גבוה באזור מסוים בדרך כלל גורם להחמרת קצב השיטפון. אם ישנה השהייה של התשטיף במתקן אחסון ישנה אפשרות לשחרור של התשטיף במורד הזרם באופן מבוקר. במקרים רבים הדבר נעשה בכוונה על-מנת למנוע או למזער את תופעת השיטפון. השהיית מי גשמים הינה שיטה נפוצה באזורים שונים בעולם. בכבישים רבים התופעה מתרחשת מבלי לרצות או לא לרצות וזה בעקבות הצורה הטופוגרפית הקיימת במקום .

1.4.1. סקירה של השהיית זרימה

באזור 1.3 ניתן לראות את העיקרון הבסיסי של אנליזת השהיית הזרימה. הידרוגרף כניסה (Inflow Hydrograph) מתוך מספר מקורות מובלים אל אזור איסוף במקרה זה בריכת השהייה. התשטיף משוחרר לאחר מכן מ באופן מבוקר בקצב איטי יותר דרך מעביר מים. התוצאה הינה של הידרוגרף יציאה מתוך הבריכה (Outflow Hydrograph), בעל שיא נמוך יותר מאשר הידרוגרף הכניסה.



איור 1.3

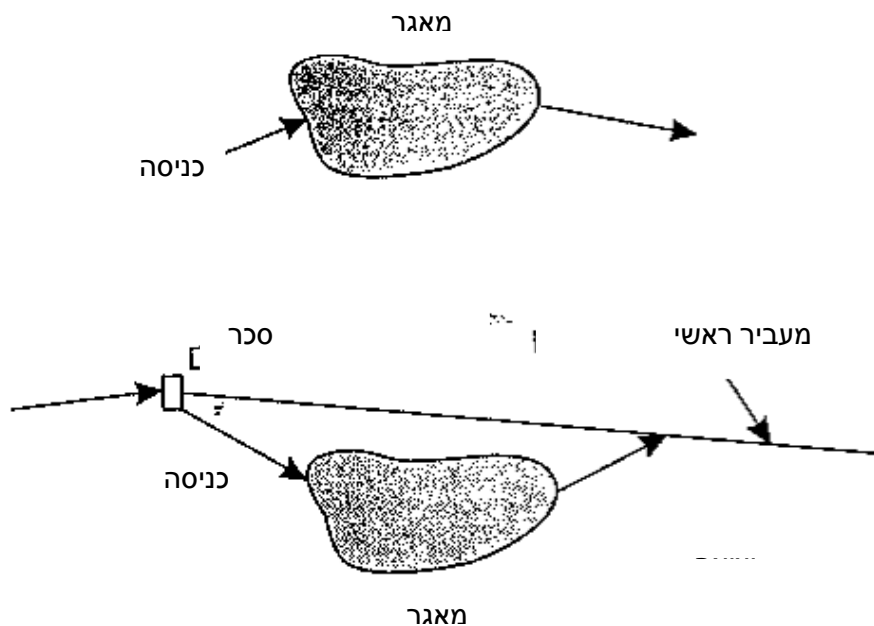
1.4.2. סוגי מתקני השהייה

קיימים מתקני השהייה שונים. ניתן למיין אותם לפי התנהגותם בתקופת היובש (יבשים או רטובים) ולפי מבנה מתקן ההשהייה (בטור או במקביל לקו הניקוז). לכל אחד מהם יש את היתרונות שלו וחסרונות שלו ביחס למספר נושאים.

השהייה טורית מול מקבילית

ברכיכות השהייה טוריות (On-line) נבדלות מבריכות השהייה מקביליות (Off-line) על בסיס מיקומן ביחס לקו הניקוז הראשי. בריכת השהייה טורית נמצאת לאורך קו הניקוז וכל התשטיפ עובר דרכה. בריכת השהייה מקבילית ממוקמת לצידו של קו הניקוז הראשי (מאגר צד-מושג ישראלי) והחלק הגדול מתוך התשטיפ עובר

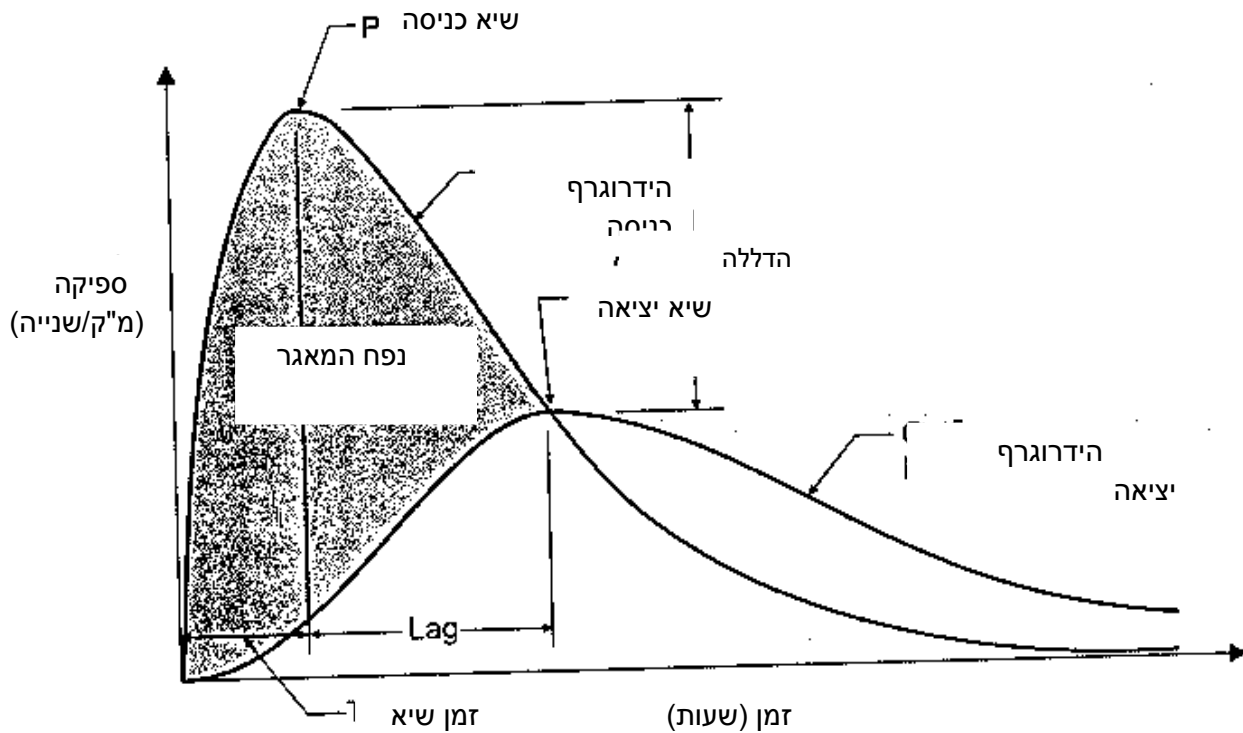
דרכה. היתרון הגדול בבריכה מקבילית הינו שמבנה היציאה יכול להיות קטן יותר, בחלק מן המקרים, נדרש נפח השהייה קטן יותר.
איור 1.4 מציג את תצורת ההשהיה של בריכות טוריות ומקביליות.



איור 1.4

1.4.3. עקרונות מידול מאגרי השהייה

דרישות תכן של בריכות השהייה כוללות את הערכת כל התשטיף מתוך הידרוגרף, בניגוד לידיעת הנקודה מכסימלית בלבד בגרף לתכן מערכות ניקוז שיטפונות.
איור 1.5 מציג את עקרונות הבסיסיים להשהיית הזרימה מתוך הידרוגרף.



איור 1.5

הידרוגרף הכניסה מייצג את התשטיפ של קו פרשת המים. התכונה העיקרית שלו להציג את הנקודה המקסימאלית של הספיקה והזמן מתחילת השיטפון. השטח מתחת להידרוגרף מייצג את הנפח הכללי של התשטיפ הנובע מאירוע השיטפון. הידרוגרף היציאה מייצג את הספיקה ממאגר ההשהיה. הפחתת שיא הספיקה הנובע מאירוע שיטפון ונגרם ע"י מאגר ההשהיה או מאגר אכסון זמני. עם הפחתת שיא הספיקה מגיע גם פיגור בזמן הגעת השיא. שלושת המקרים הבאים באים לסכם את היחס בין יחס ספיקת הכניסה, יחס ספיקת היציאה, אחסון ועליית מפלס המים עבור מרווח זמן בעת אירוע שיטפון:

- אם ספיקת הכניסה הממוצעת גדולה יותר מספיקת היציאה הממוצעת במרווח זמן, הנפח של המים המאוכסנים במאגר עולה במרווח הזמן ומפלס המים עולה.
- אם ספיקת הכניסה הממוצעת שווה לספיקת היציאה הממוצעת במרווח זמן, הנפח של המים המאוכסנים במאגר אינו עולה במרווח הזמן ומפלס המים נשאר קבוע.
- אם ספיקת הכניסה הממוצעת קטנה יותר מספיקת היציאה הממוצעת במרווח זמן, הנפח של המים המאוכסנים במאגר יורד במרווח הזמן ומפלס המים יורד.

עקרון זה יכול לשמש לבדיקת תקפות של חישובי הניתוב, ההצדקה שלהם. לפני זמן נקודת ההצלבה (נקודת המפלט של שני ההידרוגרפים), ספיקת הכניסה גבוהה מספיקת היציאה ונפח המים במאגר גדל. אחרי זמן ההצלבה, הנפח קטן מכיוון שספיקת היציאה גדולה יותר מספיקת הכניסה. לכן הנפח המרבי במאגר מתרחש בזמן נקודת הצטלבות של שני ההידרוגרפים.

1.4.4. תכן ראשוני למאגרי השהייה

קיימות מספר שיטות עבור הערכת נפחי השהייה. היחס בין נפח האחסון ליחס נפח התשטיפ ויחס בין הנקודות המקסימאליות של הידרוגרף היציאה להידרוגרף הכניסה הם הבסיס לרוב השיטות. נקודה מקסימלית של הידרוגרף יציאה נקרא pre-development, נקודה מקסימלית של הידרוגרף הכניסה נקרא post – development, ראה איור 1.6.

הוצעו ונמצאות בשימוש מספר שיטות לחישוב נפחי השהייה.

- שיטת ה-Rational hydrograph.

מבוססת על ההפרש בין יחס ספיקות מקסימאלי של הידרוגרף היציאה להידרוגרף הכניסה וזמן הריכוז (Tc - ראה טבלה 1.2) הגעת הידרוגרף היציאה לנקודה המקסימאלית.

- שיטת ה-Wycoff and Singh.

שיטה לביצוע תכן הידרולוגי ראשוני של מאגרי השהייה. השיטה פותחה על בסיס ניסיוני של מודל.

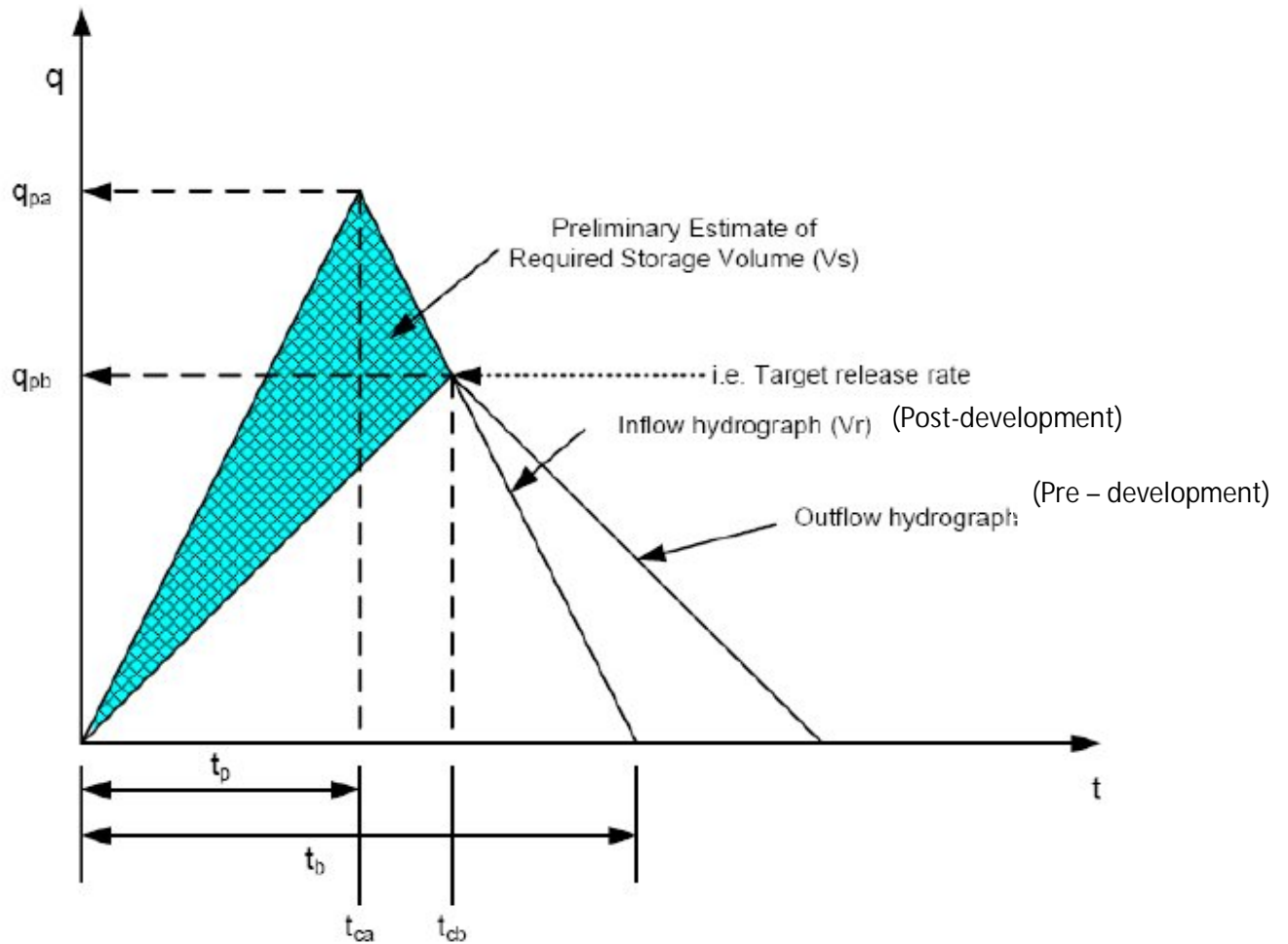
- שיטת ה-NRCS TR55.

שימוש בשיטה לקביעת נפח התשטיפ, ספיקה מקסימאלית וזמן ההגעה לספיקה המקסימאלית בהידרוגרף.

- שיטת ה-Low-impact hydrology (LID).

השיטה הזאת מבוססת על קביעת נפח האחסון הדרושה להפחתת נפח התשטיפ של הידרוגרף הכניסה לרמות של הידרוגרף היציאה.

באיור 1.6 ניתן לראות את התיאור הסכמתי של השיטות הנ"ל.



איור 1.6

בטבלה מספר 1.2 נתונות נוסחאות החישוב עבור מאגרי מים בשיטות השונות.

בטבלה מספר 1.3 נתונים כוחות השולטים בתכן מודלים הידראוליים. לפי השוואה בין הכוחות בוחרים מודל עבור זרימה בתעלות פתוחות, גשרים וסכרים. המודל בנוי לפי כוח הכובד (מס' פרוד).

טבלה 1.2

Parameter	Symbol	Units
Drainage Area	A_m	Acres
Runoff depth – before	Q_b	Inches
Runoff depth – after	Q_a	Inches
Peak discharge – before	Q_{pb}	ft ³ /sec
Peak discharge – after	Q_{pa}	ft ³ /sec
Discharge ratio ¹	α	
Time of concentration - before	t_{cb}	hours
Time of Concentration - after	t_{ca}	hours
Time to peak - before	t_{pb}	hours
Time to peak - after	t_{pa}	hours
Storage volume/runoff volume	R_v	
Hydrograph time base - after	T_b	hours
Time ratio ²	γ	
¹ $\alpha = Q_{pb}/Q_{pa}$ ² $\gamma = t_{pb}/t_{pa}$ or t_{cb}/t_{ca} (where $t_p = t_c$) ³ V_s = volume of storage in inches ⁴ $R_v = V_s/Q_a$ (Note: $Q = V_r$ in inches) ⁵ $V_{st} = V_s A_m / 12$ [=] acre-ft		

Method		Computational Form
1	Rational hydrograph	$V_{st} = .08264 t_{cb} (q_{pa} - q_{pb})$
2	Wycoff and Singh	$V_s = 1.29 Q_a (1 - \alpha)^{0.753} (T_b / t_{pa})^{-0.411}$
3	NRCS TR55 (Type II)	$R_v = 0.682 - 1.43 \alpha + 1.64 \alpha^2 - 0.805 \alpha^3$
4	LID Hydrologic method	$V_s = Q_a - Q_b$

(מקור: מתוך 1998 McCuen)

טבלה 1.3: כוחות שולטים בתכן מודלים הידראולי

מציבים בהם הכוחות דומיננטיים	כוחות ופרמטרים חסרי מימד
זרימה בתעלות פתוחות, גשרים וסכרים	$Fr = V / (gL)^{1/2}$ (כוח הכובד (מס' פרוד)
זרימה צמיגה בצנרת	$Re = \rho LV / \mu$ (כוחות צמיגות (מס' ריינולדס)
זרימה במערכות סגורות	$E = V / (2\Delta P / \rho)^{1/2}$ (כוחות לחץ (מס' אוילר)

על בסיס המובא קודם כאמור נוסחאות ושיטות החישוב השונות לתכן מאגרי השהייה, יתוכננו מודלי ניסוי מעבדתיים שבעזרתם נחקור פרמטרים שונים של מאגרי השהייה. מתוך ניסויים אלו יוסקו מסקנות לבניית מאגרי השהייה אופטימאליים לשיטפונות מי גשמים.

2. מערכת ניסיונית מעבדתית

2.1. אופן פעולה המערכת המעבדתית

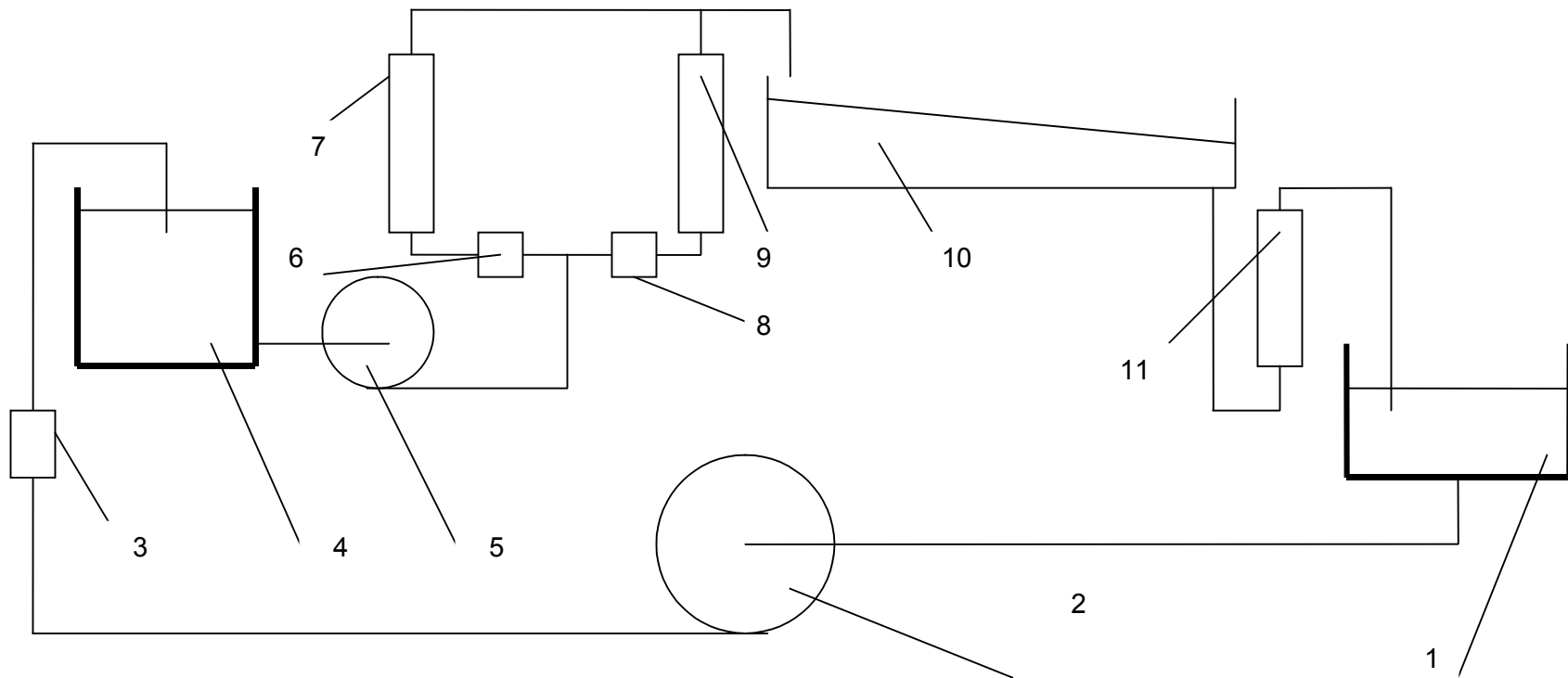
באיור 2.1 מתוארת מערכת מעבדתית המורכבת מהחלקים הבאים:

1. מיכל מים מס' 1
2. משאבה מס' 1
3. ברז וויסות מס' 1
4. מיכל מים מס' 2
5. משאבה מס' 2
6. ברז וויסות מס' 2
7. מד ספיקה מס' 2
8. ברז וויסות מס' 3
9. מד ספיקה מס' 3
10. מודל של המאגר
11. מד ספיקה מס' 3

אופן פעולה המערכת :

משאבה 2 שואבת מים ממכל 1 ומזרימה אותם דרך צינורות סניקה, דרך ברז וויסות 3 מגיעים לתוך מיכל 4 בנפח הנדרש לפי ההידרוגרף הנתון. ממכל 4 המים זורמים ע"י משאבה 5 דרך ברזים 6 או 8 ודרך מד ספיקה 7 או 9 למאגר. ברז וויסות 3 מיועד למילוי כמות המים בתוך המיכל מס' 4. משאבה מס' 2 מיועדת להספקת מים בתוך המודל של המאגר. ברזים 6 או 8 מיועדים לווסת ספיקה הנכנסת למאגר מים (מודל) לפי ההידרוגרף הנתון לניסוי מסוים.

מד ספיקה 7 או 9 מיועדים למדידת ספיקת המים הנכנסים במערכת. במיכל 4 נבנה מד-גובה כדי לחשב את נפח המים הנכנסים למערכת. המים יוצאים מהמערכת נמדדים ע"י מד ספיקה 3. כאשר יש צורך להוסיף מים בתוך המיכל 4 מפעילים משאבה 2 ומוסיפים מים במיכל 4. מפלס המים בתוך מאגר נמדד ע"י מד-גובה שהותקן בתוך המודל של המאגר.



איור 2.1

2.2. אופן ביצוע את הניסויים

במחקר זה משתמשים בשיטה הנפוצה ביותר, ובדקים השפעת פרמטר אחד כלשהו בתנאי שהמשתנים האחרים נשארים קבועים. הדבר מאפשר לדעת באופן מלא את השפעת כל גורם פיזיקאלי על התנהגות המודל כאשר כל הפרמטרים הפיזיקאליים משתנים.

א. הניסויים מתבצעים באופן הבא: ראשית מבצעים ניסוי על המודל הנתון (אחד משלושה מאגרים הנתונים) ואת כל הניסויים האחרים נשווה עם תוצאות ביחס למודלים האחרים שנבדקים.

בכל ניסוי נמדדים הפרמטרים הבאים:

- ספיקת מים נכנסים לתוך המאגר (לפי הידרוגרף הנבחר)

- ספיקת מים ביציאה מהמאגר

- מפלס המים ביציאה מהמאגר (ליד הסכר)

- שיפוע משוקלל של קרקעית המודל

- נפח המים הנכנס למאגר

ב. הניסויים הבאים מתבצעים על המודל החדש.

ג. כל ניסוי מתבצע באותם תנאים של ספיקת המים וגם באותה טמפרטורה, כאשר משנים פרמטר אחד כלשהוא.

ד. אחרי ביצוע הניסוי משרטטים גרפים המאפיינים את הזרימה דרך המודל.

ה. אחרי סיום הניסויים, נשווה את התוצאות בין המודלים.

2.3. פרמטרים שימדדו

בבדיקת זרימות עבור המודל במעבדה נשתמש במכשירי מדידה שונים.

למדידת הספיקה הזורמת במודל נשתמש במד ספיקה (flow meter) בסקאלות שונות המתאימות עבור כניסה למאגר ויציאה ממנה.

את מפלס המים במאגר נמדוד ע"י מד גובה.

את נפח המים הנכנס למאגר נמדוד ע"י מדידת נפח של מיכל 4 ממנו מים נכנסים למאגר.

בנוסף למדידות יבוצעו צילומים של המודלים.

3. תיאור מודלים הידראוליים לבדיקות ניסיונית

3.1. מבוא

בדיקת מעבדה עבור מחקר "השהיית זרימה באגמים בכניסה לגשרים ולמעברי מים"

מטרת המחקר:

לגלות מקדמים ונוסחאות לחישוב ותכנון הידראולי של גשרים בהם מי נגר עילי עוברים אחרי השהייה כמו במאגרי השהייה או באגמים בעלי גדלים וצורות שונים בקרבת גשרים ומעברי מים החוצים כבישים בינעירוניים .

צורת האגם, לדוגמא "ארוך וצר" או בצורה אחרת כמו "קומפקטי מרוכז" ליד הגשר משפיע באופן משמעותי על היקף ההשהייה והקטנת ספיקות תכן במתקן חציה. בתוכנה HYDROROUT צורת האגמים מתבטאת ב- 2 מידות : יחס אורך/רוחב ושיפועי המדרונות בממוצע . גישה זו הינה גסה מדי ולא מאפשרת תכנון מבוסס של המתקנים ההידראוליים .
תוכנית מחקר מפורטת :
שלב 1 פיתוח וייצור מודלים :

פיתוח וייצור שלושה מתקנים בצורות ונפחים שונים (model) שמאפשרים בדיקות, שיתנו אינדיקציה לגבי גודל האגם ויחסו לגודל המברץ , קנ"מ אחיד או שונה .
גודל אגם מרבי 8,000,000 מ"ק , ספיקת מברץ בעומד מרבי-100 מ"ק/שנייה לערך .
שלב 2 ביצוע ניסויים מעבדתיים :

בדיקת השפעת פרמטרים של צורות האגמים . ייבחנו אגמים עם טופוגרפיה שונה וגשרים עם פתחים שונים מבחינת תופעת ההשהייה המתאפשרת-הקטנת ספיקת תכן לבניית גשרים קטנים יותר .
המלצות על שיטות חישוב לפי צורות האגמים שנבחנו בבדיקה .
מודלים הידראוליים מייצגים לבדיקה הניסויים לפי בקשת המזמין .
בחרנו שלושה מאגרים שונים מנחל נטוף : מאגר מס' 1, מאגר מס' 3, מאגר מס' 4 .
על סמך נתונים בנינו מודלים . מאגרים אלו מתוארים בסעיפים הבאים .
שימוש במודלים מעבדתיים זה אחד הפתרונות לבדיקת העברת מי שיטפון דרך תעלות וגשרים . השימוש במודלים מעבדתיים יעיל כאשר רוב הפרמטרים לא מוגדרים באופן מדויק, לכן והחשובים ההידראוליים התאורטיים לא מתאימים . מודלים פיזיקאליים מאפשרים באופן פשוט לשנות את הפרמטרים של מאגרי מים כדי לבדוק את ההשפעה של זרימת המים העוברים דרכם . המודל הפיסיקאלי מאפשר לבדוק את האפיונים של האב טיפוס ולקבל קונסטרוקציה יותר מדויקת של מאגרים .

3.2. מודל של מאגר מס' 1 (מודל מס' 1)

באיור 3.1 נתון גיליון של מאגר מס' 1 בנחל נטוף . באיור זה גם נציג צורה של מודל מעבדה שעליו עשינו את כל הניסויים עבור מאגר מס' 1 . עשינו מודל בקנ"מ עבור אורך ורוחב 1:1000 , הקנ"מ עבור גובה שווה 1:100 . בטבלא 3.1 מוצגים נתונים לבדיקת ניסוי מאגר מס' 1 . בניסויים אלה משתנה שיפוע תחתית המאגר, מידות של מברצים כמו-כן השתמשנו בהידרוגרפים שונים . הידרוגרף מס' 1 הוא "קצר וחד" שבנפח גאות 1% שווה 8,000,000 מ"ק, הידרוגרף מס' 2 הוא "ארוך ומתון" נפח גאות 1% שווה 17,000,000 מ"ק.

טבלה 3.1 נתונים לבדיקת ניסויי מאגר מס' 1

מברץ 4*5 מ'			מברץ 3*3 מ'			נתון
0.01	0.005	0.002	0.01	0.005	0.002	הידרוגרף מס' 1, נפח 8,000,000 מ"ק, שיפוע תחתית המאגר.
0.01	0.005	0.002	0.01	0.005	0.002	הידרוגרף מס' 2, נפח 17,000,000 מ"ק, שיפוע תחתית המאגר.

באיורים 3.2, ו-3.3 נתון מודל של מאגר מס' 1 (מודל מס' 1). באיור 3.4 מתואר לוח בקרה שבעזרתו ניתן לווסת את ספיקת המים הנכנסים לתוך המאגר. בלוח זה יש שני מדי ספיקה בסקאלות שונות, כדי למדוד את ספיקת המים באופן מדויק. וויסות מים מבצע ע"י ברז מחט. באיור 3.5 נתון מיכל מס' 4 שמיועד למדידת נפח המים הנכנסים למאגר. מיכל לאגירת מים במערכת מוצג באיור 3.6, ממנו ע"י משאבה מס' 1 מים מגיעים למיכל מס' 4 בזמן הנתון ובכמות הנדרשת.

באיורים 3.7, ו-3.8 נתונה משאבה שבעזרתה מעבירים מים ממיכל מס' 4 לתוך המאגר של המודל. באיורים 3.9 ו-3.10 מוצג פתח יציאה (מברץ) ממאגר. ע"י מודל הזה ניתן לבצע את כל הניסויים הנדרשים, כדי לברר את השפעת הפרמטרים השונים, על השהיית הזרימה במאגרים.

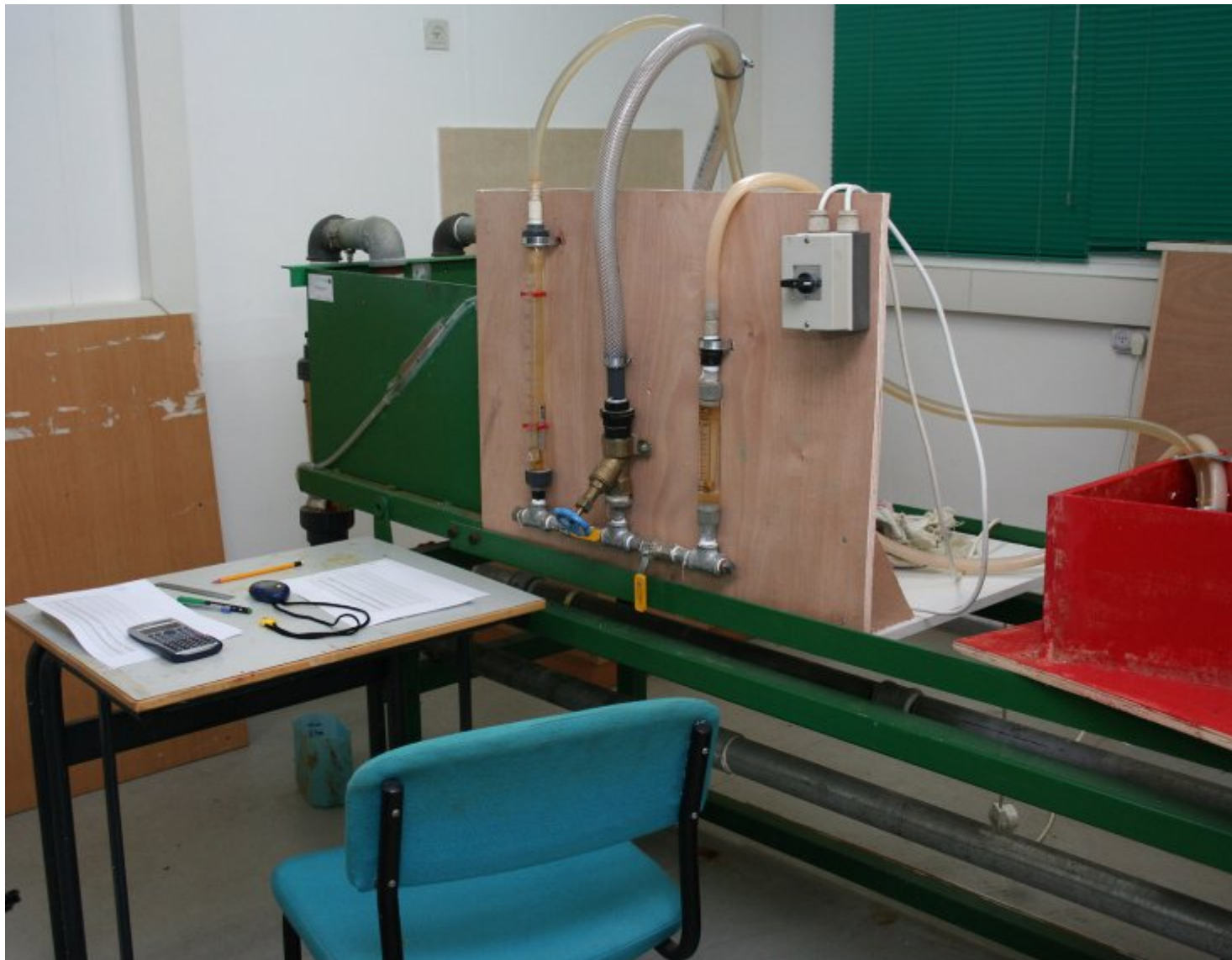




איור 3.2



איור 3.3





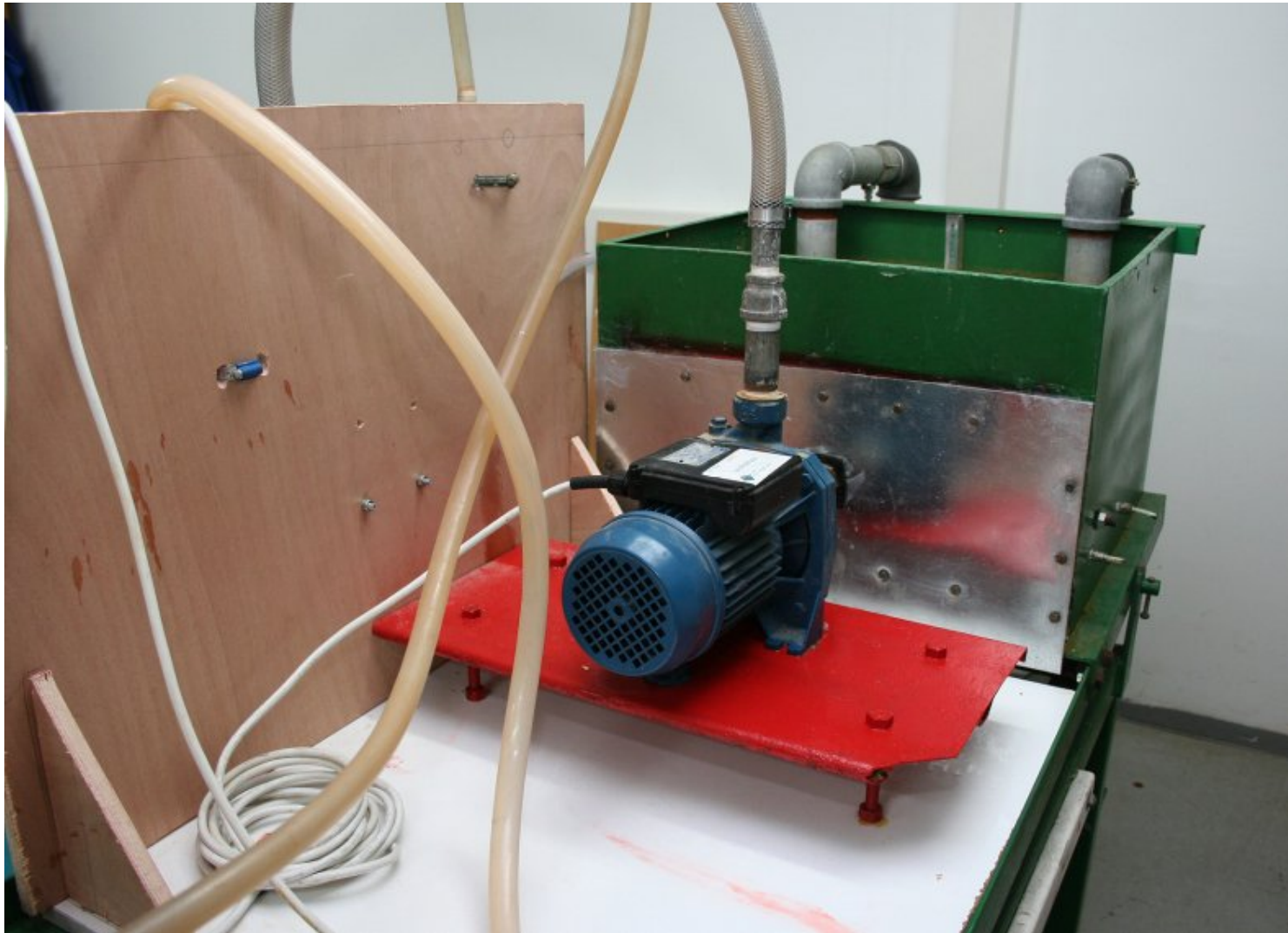
איור 3.5



איור 3.6



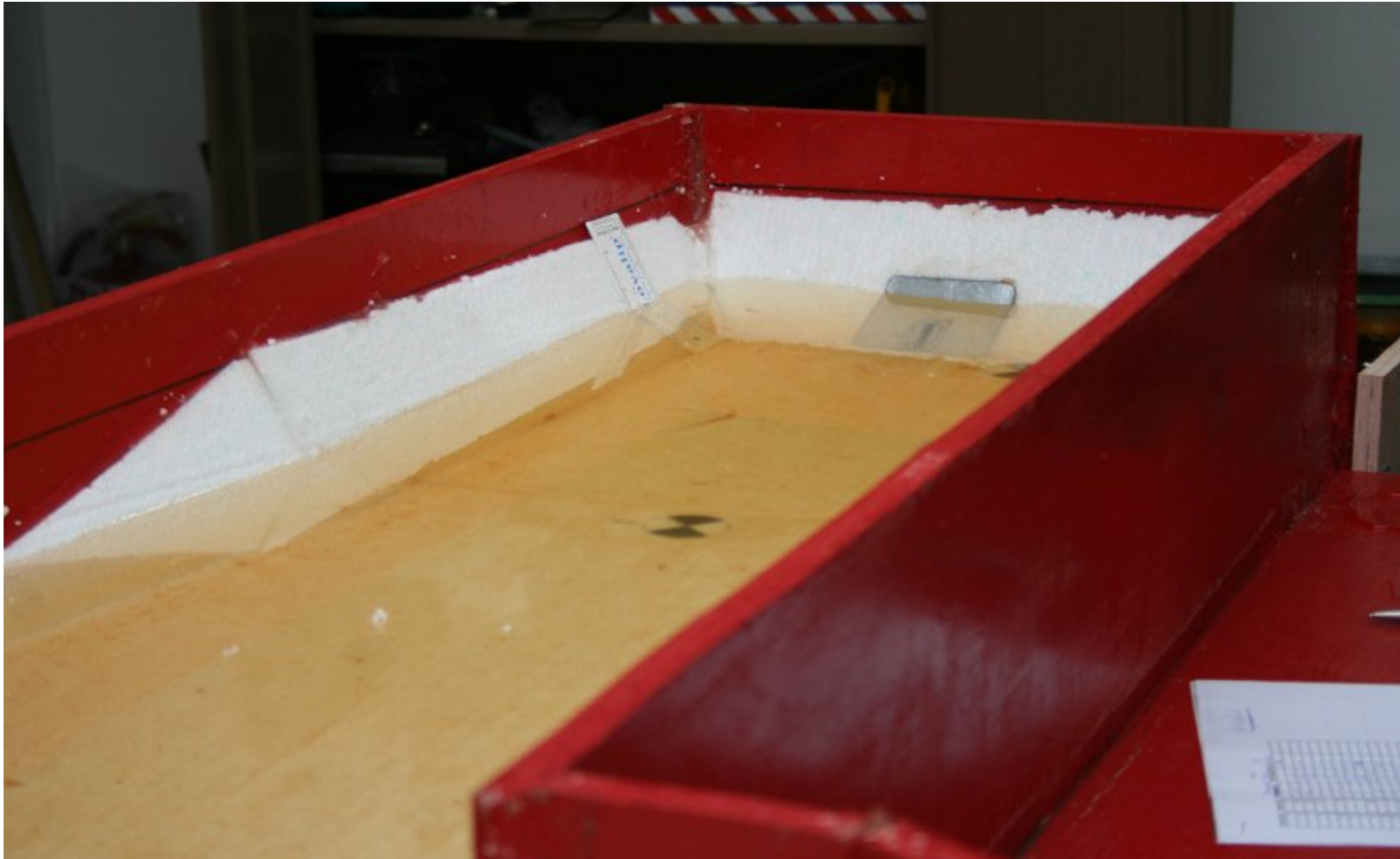
איור 3.7



איור 3.8



איור 3.9



איור 3.10

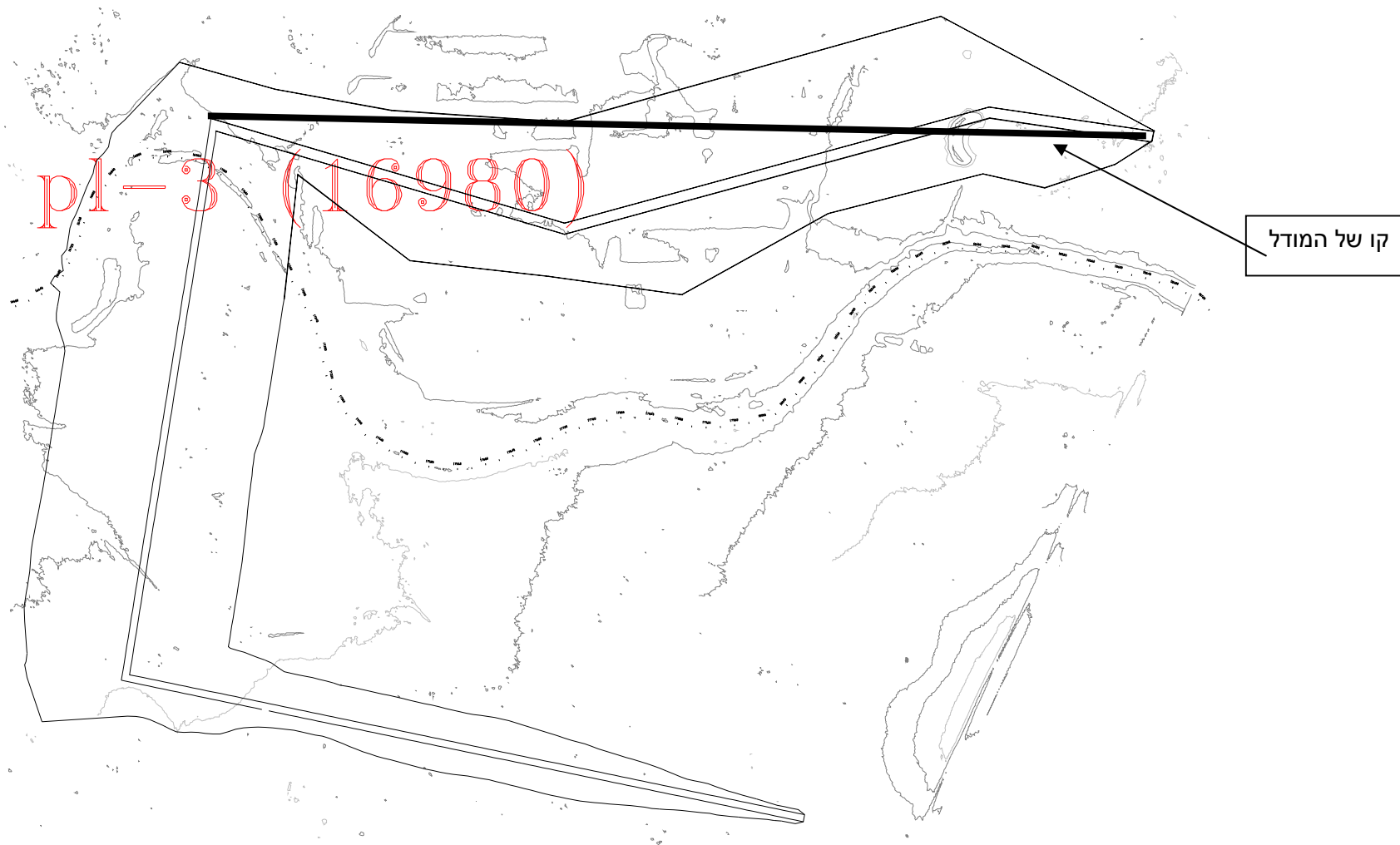
3.3. מודל של מאגר מס' 3 (מודל מס' 2)

באיור 3.11 נתון גיליון של מאגר מס' 3 בנחל נטוף. באיור זה גם נציג צורה של מודל מעבדה שעליו עשינו כל הניסויים עבור מאגר מס' 3. עשינו מודל בקני"מ עבור אורך ורוחב 1:1000, הקני"מ עבור גובה שווה 1:100. בטבלא 3.2 נציגים נתונים לבדיקת ניסוי מאגר מס' 3. בניסויים אלה משתנה שיפוע תחתית המאגר, מידותיהם של מברצים וכמו-כן השתמשנו בהידרוגרפים שונים. הידרוגרף מס' 1 הוא "קצר וחד" שבנפח גאות 1% שווה 8,000,000 מ"ק, הידרוגרף מס' 2 הוא "ארוך ומתון" נפח גאות 1% שווה 17,000,000 מ"ק.

טבלא 3.2 נתונים לבדיקת ניסויי מאגר מס' 3

מברץ 4*5 מ'			מברץ 3*3 מ'			נתון
0.025	0.015	0.01	0.025	0.015	0.01	הידרוגרף מס' 1, נפח 8,000,000 מ"ק, שיפוע תחתית המאגר.
0.025	0.015	0.01	0.025	0.015	0.01	הידרוגרף מס' 2, נפח 17,000,000 מ"ק, שיפוע תחתית המאגר.

באיורים 3.12, ו-3.13 נתון מודל של מאגר מס' 3 (מודל מס' 2). צורת המודל בדיוק זהה לצורה מאגר הנתון לבדיקה. באיור 3.14 רואים את החתכים לרוחב של פרופיל המאגר. מאגר בנוי לפי פרופיל מאגר מציאותי. מאגר מס' 3 הוא מאגר קטן מאשר מאגר מס' 1. נפח מאגר זה הוא 4,000,000 מ"ק. באיור 3.15 נתונה תמונה של מברץ במאגר. במודל זה משתמשים באותם מברצים שבמודל מס' 1. שימוש באות מברצים עוזר לנו להבין את השפעת צורת המאגר ונפחו על השהייה זרימה.



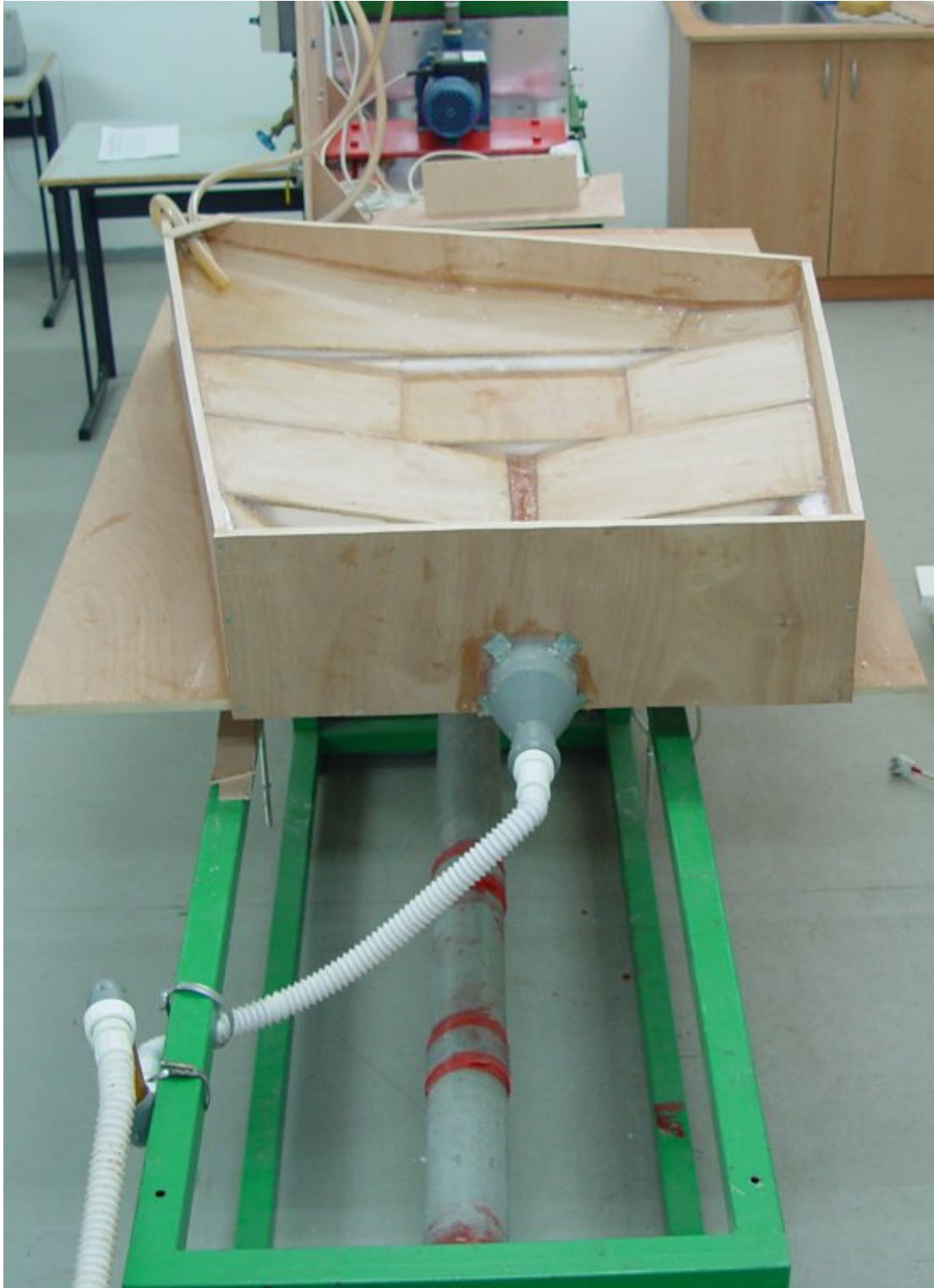
איור 3.11



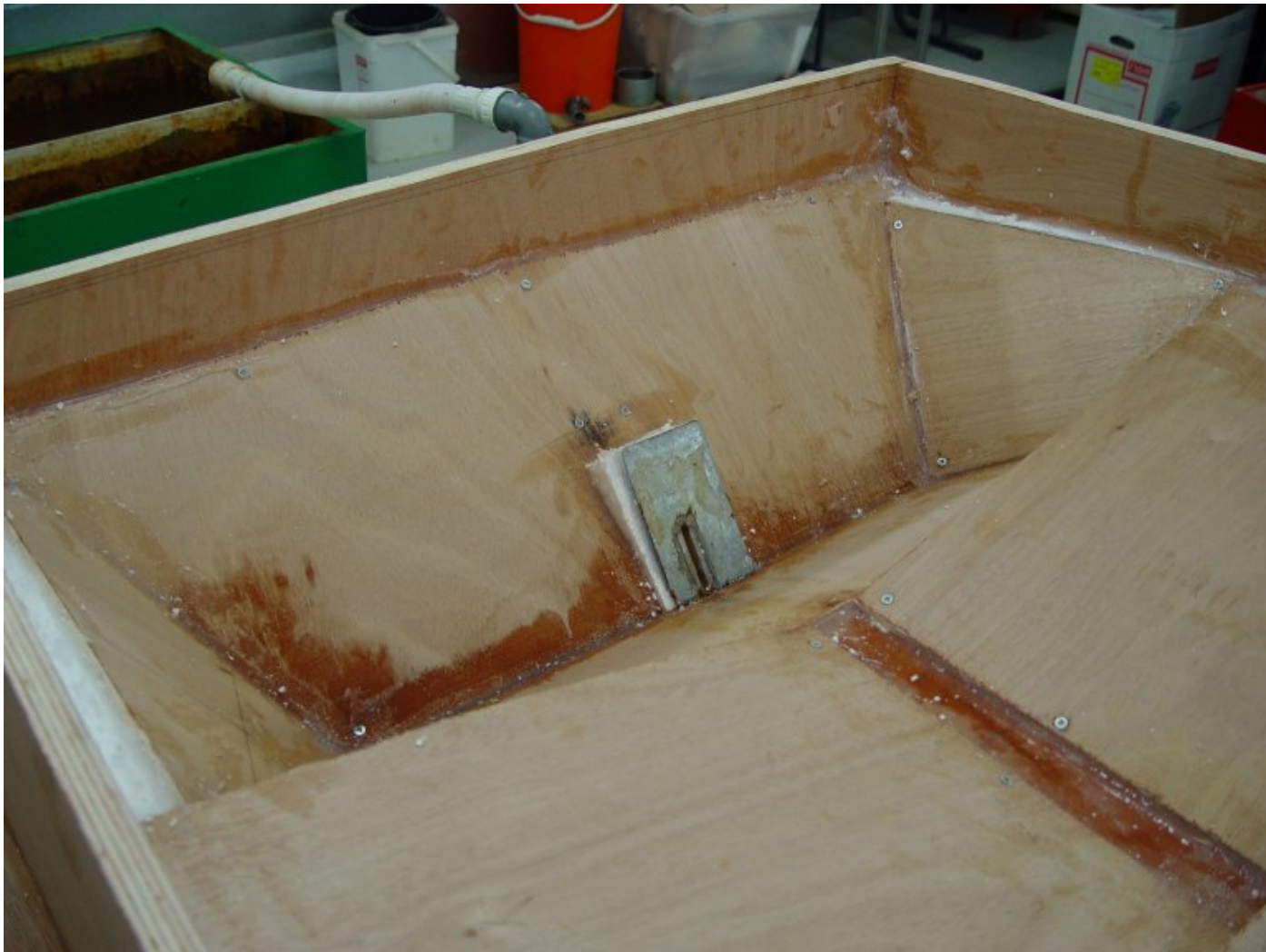
איור 3.12



איור 3.13



איור 3.14



איור 3.15

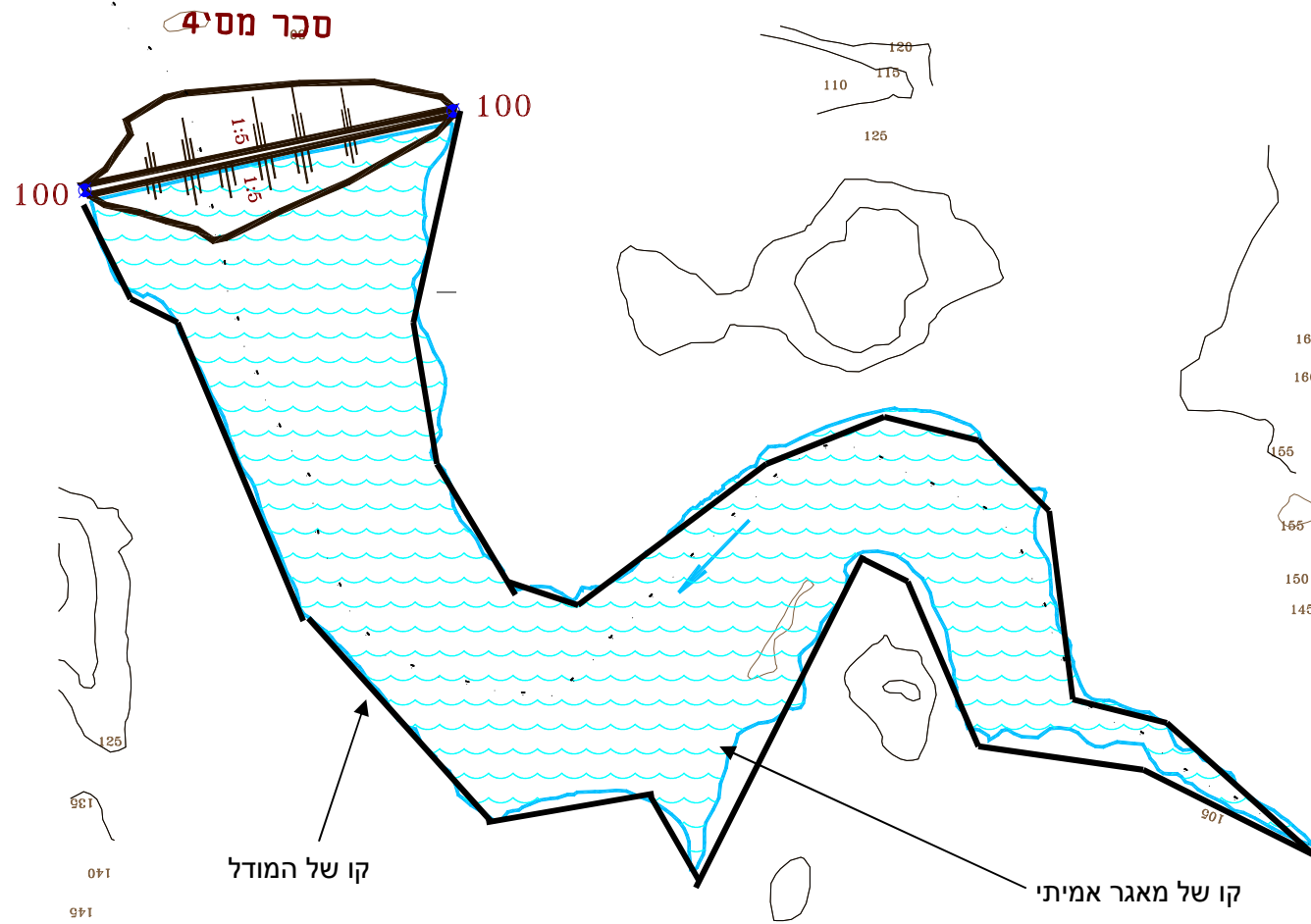
3.4. מודל של מאגר מס' 4 (מודל מס' 3)

באיור 3.16 נתון מאגר מס' 4 שנציג לבדיקה מעבדתית. מאגר זה הוא ארוך וצר ו"א צורה שלו שונה ממאגרים שבדקנו קודם. בחירת צורות של מאגרים שונים נותנת אפשרות לבדוק באופן מלא את השפעת כל הפרמטרים של מאגרים על השהייה זרימה, וכמו-כן מאפשרת קבלת המלצות לתכנון מאגרים אחרים. באיורים 3.17, 3.18 ו-3.19 נתונים תמונות של מודל מס' 3 (מאגר מס' 4). מהתמונות רואים את צורת המאגר וניתן להשוות אתו עם צורתו שנתון בגיליון (איור 3.16).

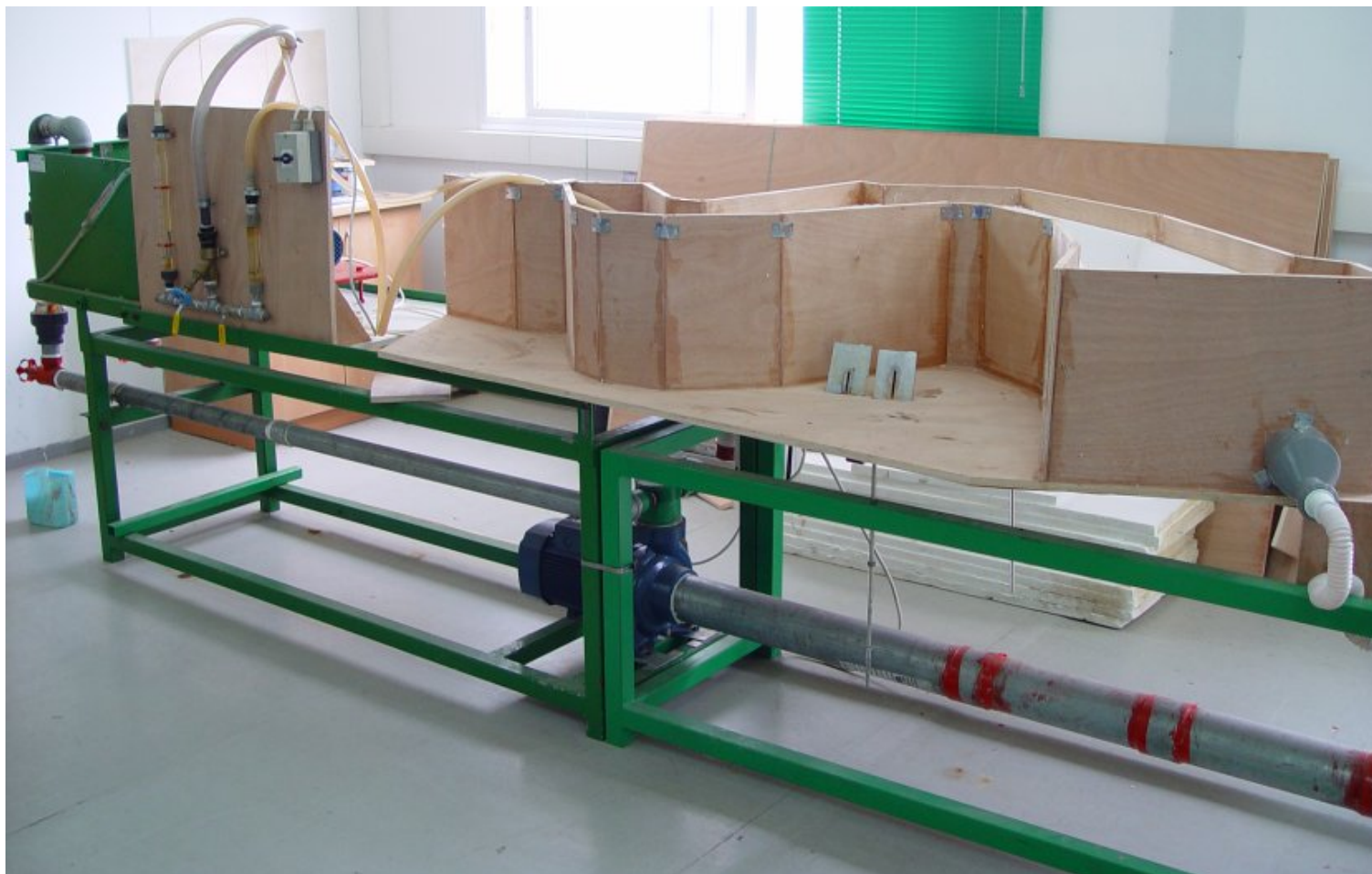
טבלה 3.3 נתונים לבדיקת ניסויי מאגר מס' 4

מברץ 4*5 מ'			מברץ 3*3 מ'			נתון
0.015	0.01	0.05	0.015	0.01	0.05	הידרוגרף מס' 1, נפח 8,000,000 מ"ק, שיפוע תחתית המאגר.
0.015	0.01	0.05	0.015	0.01	0.05	הידרוגרף מס' 2, נפח 17,000,000 מ"ק, שיפוע תחתית המאגר.

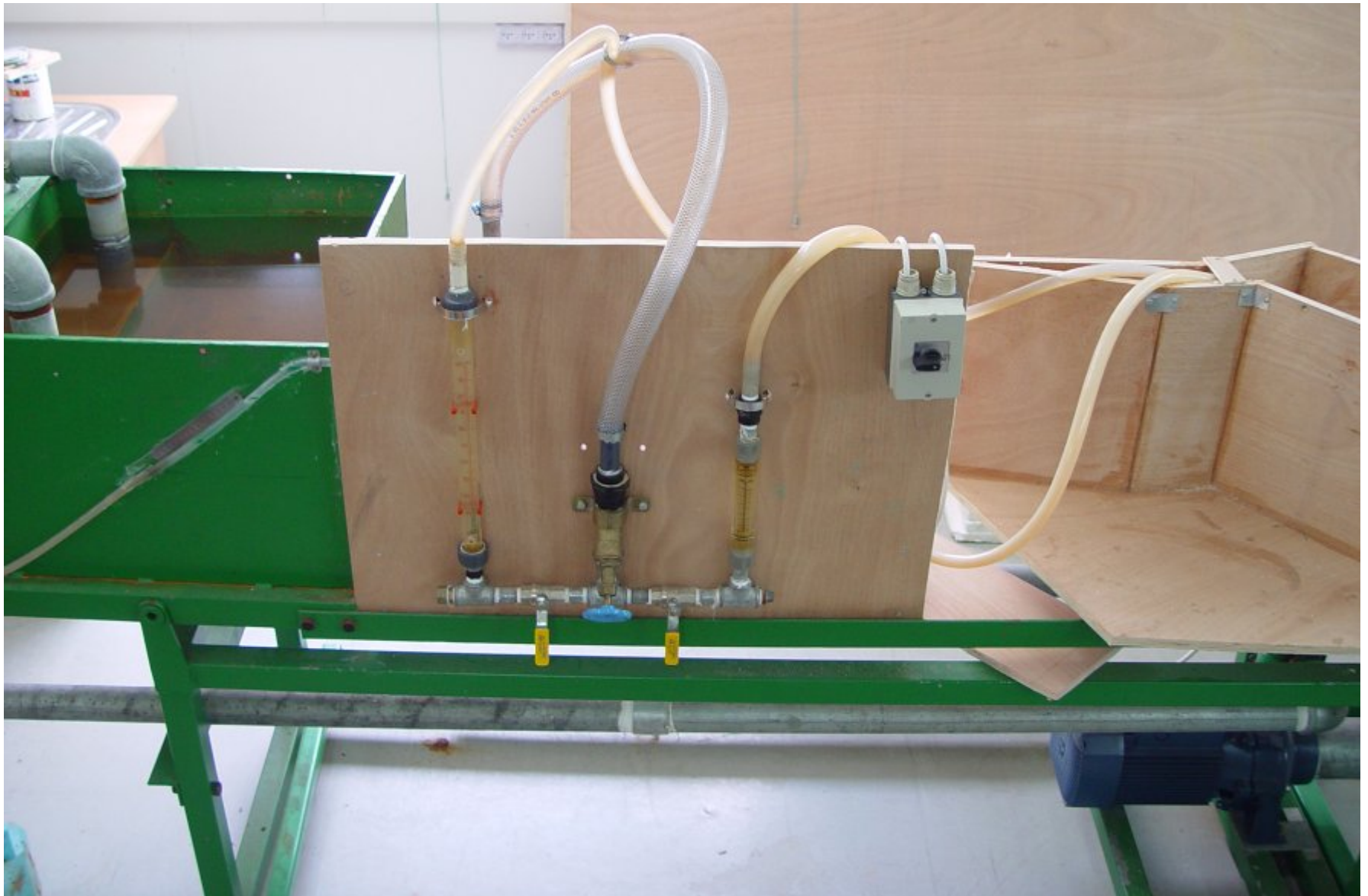
בטבלה 3.3 מוצגים נתונים לבדיקת ניסויי מאגר מס' 3. מטבלה זו רואים ששיפועים במאגר זה שונים משיפועים במודלים הקודמים. ההידרוגרפים שהשתמשנו בבדיקות הם זהים. שימוש בהידרוגרפים ומברצים זהים מאפשר קבלת החלטות עבור בנייה ותכנון מאגרים.



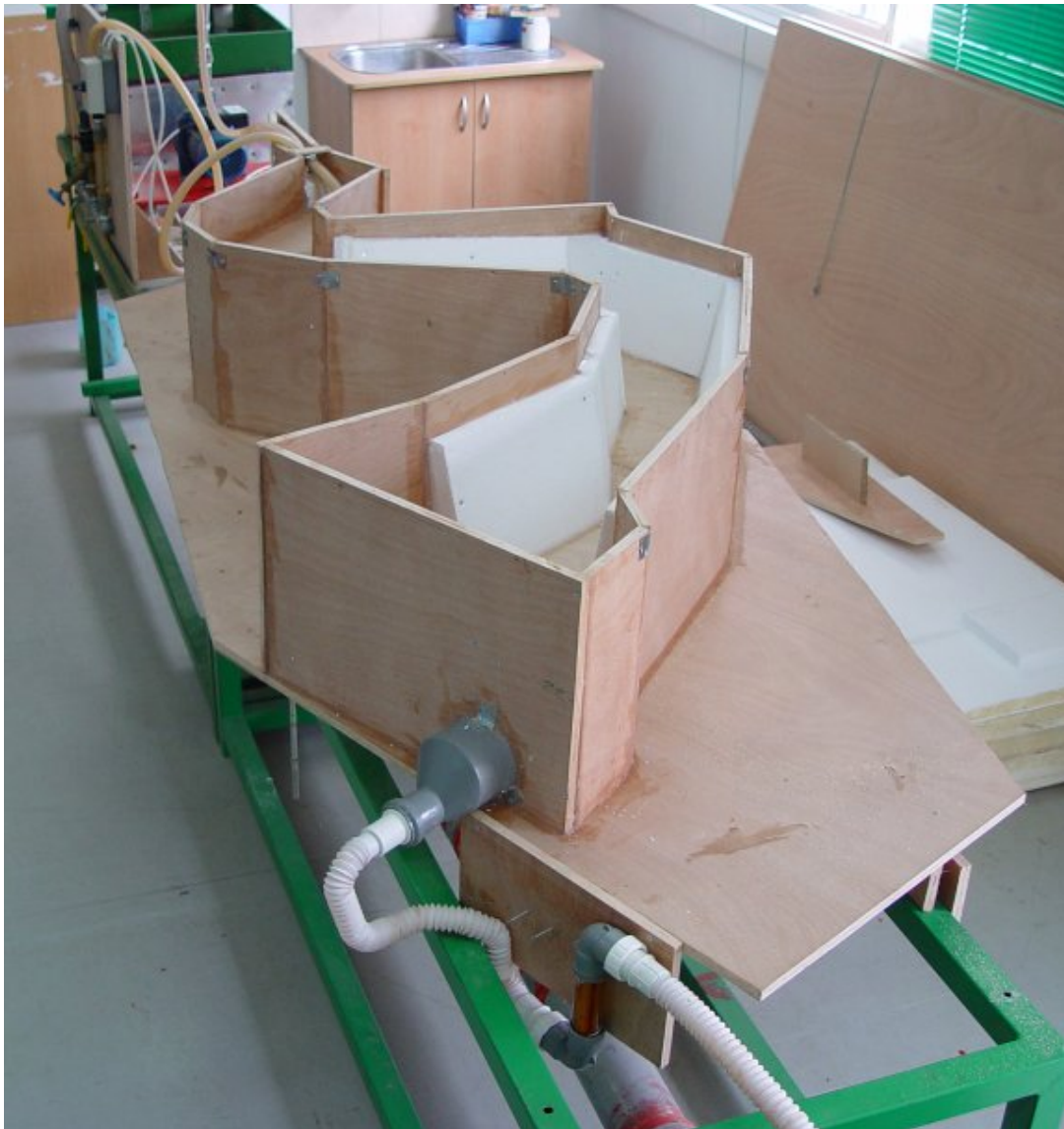
איור 3.16



איור 3.17



איור 3.18



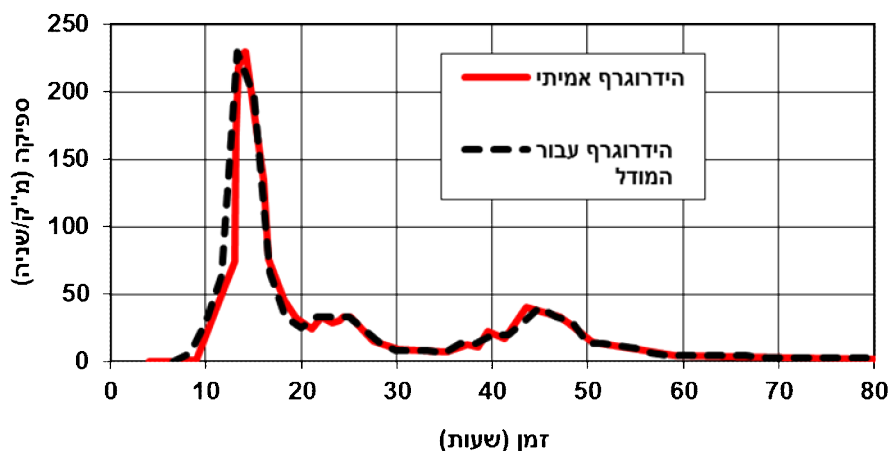
איור 3.19

3.5. ההידרוגרפים הנמדדים במציאות הניתנים לבדיקות מעבדה

באיור 3.20 נתון הידרוגרף "קצר וחד" (הידרוגרף מס' 1) הנמדד במציאות בשטח. הספיקה המכסימלית 230 מ"ק/שנייה, נפח גאות 1% 8,000,000 מ"ק. באיור זה גם נתון גרף של הידרוגרף שנשתמש לבדיקות מודלים במעבדה. באיור 3.20 שני ההידרוגרפים מתוארים בסקאלות הבאות : ספיקה במ"ק/שנייה, זמן בשעות. באיור 3.21 נתונים אותם הידרוגרפים אבל בסקאלות אחרות : ספיקה נתונה בליטר/דקה, זמן נתון בדקות. אנו רואים שצורתם זהה אך קנ"מ אחר, לפי אנליזה ממדית. בהידרוגרף שבאיור 3.21 נשתמש בבדיקות מודלים במעבדה. באיור 3.22 נתון הידרוגרף "ארוך ומתון" (הידרוגרף מס' 2) הנמדד במציאות בשטח.

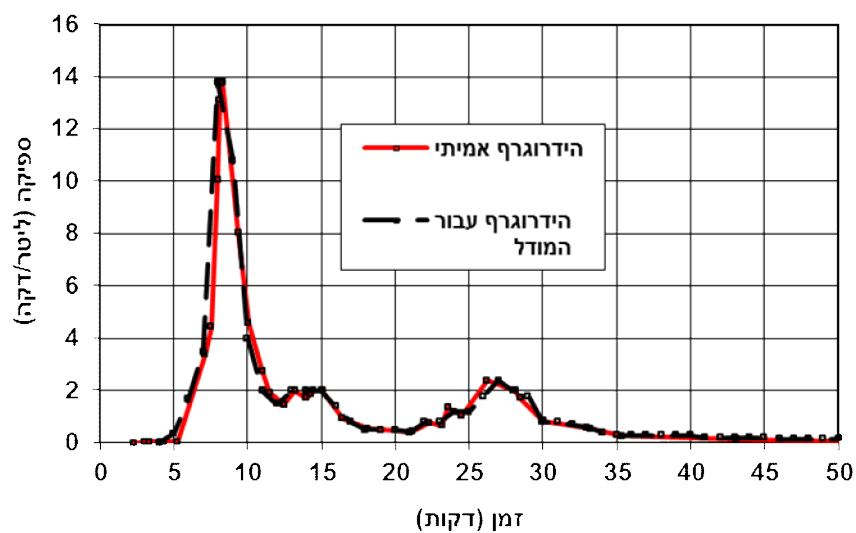
ספיקה המכסימלית שווה ל 160 מ"ק/שנייה, נפח גאות 1% 17,000,000 מ"ק. באיור 3.22 שני ההידרוגרפים מתוארים בסקאלות הבאות : ספיקה במ"ק/שנייה, זמן בשעות. באיור 3.23 נתונים אותם הידרוגרפים אבל בסקאלות אחרות : ספיקה נתונה בליטר/דקה, זמן נתון בדקות. אנו רואים שצורתם זהה אך קנ"מ אחר שקיבלנו לפי אנליזה ממדית. בהידרוגרף שבאיור 3.213 נשתמש בבדיקות מודלים במעבדה. במיוחד בחרנו שני הידרוגרפים שצורתם שונה וגם נפח גאות שונה. ההידרוגרפים אלה נפוצים בארץ, מה שמאפשר קבלת מידע לתכנון מאגרים בתנאים של גשמים שונים.

השוואה בין הידרורף אמיתי לבין הידרוגרף עבור המודל
(הידרוגרף מס' 1)



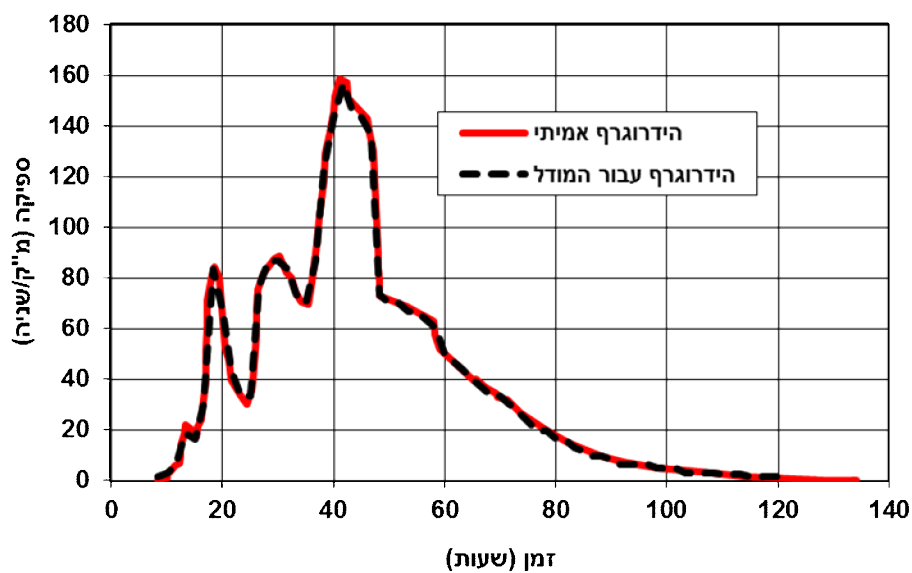
איור 3.20

השוואה בין הידרורף אמיתי לבין הידרורף עבור המודל
(הידרורף מס' 1)



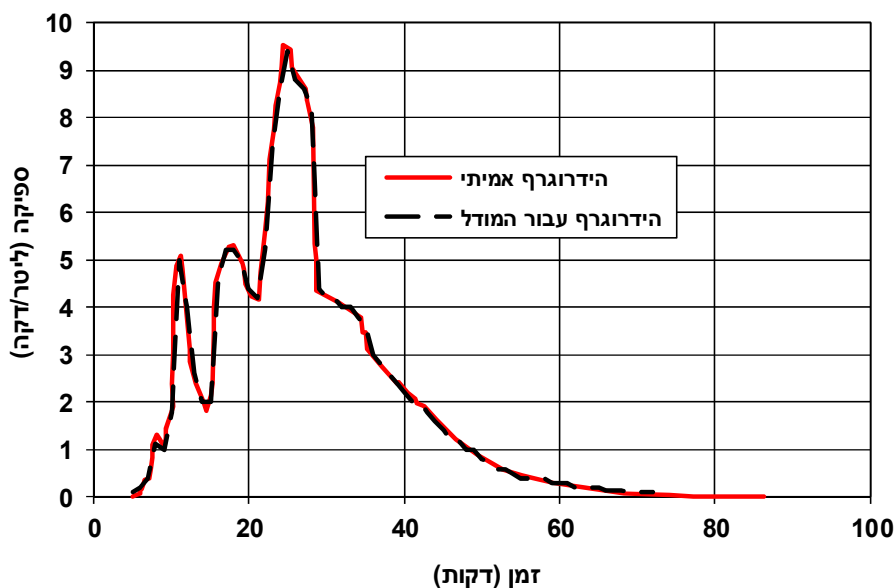
איור 3.21

השוואה בין הידרורף אמיתי לבין הידרורף עבור המודל
(הידרורף מס' 2)



איור 3.22

השוואה בין הידרוגרף אמיתי לבין הידרוגרף עבור המודל
(הידרוגרף מס' 2)



איור 3.23

4. תוצאות בדיקה מעבדה עבור מודלים הידראוליים

4.1. ניסויים ותוצאות מעבדתיים עבור מודל של מאגר מס' 1 (מודל מס' 1)

באיור 4.1 ו-4.2 מתואר גרף של הידרוגרף מס' 1, ז"א מתוארת ספיקת המים הנכסים למודל של המאגר ושלוש גרפים של יציאת המים מהמאגר בתנאים שונים. באיור 4.1 מברץ הוא 3×3 מ', באיור 4.2 מברץ שווה 4×5 מ'. בכל איור מתוארים גרפים עבור שיפוע שונה אורכי של תחתית המאגר. במודל מס' 1 השיפועים שווים 0.002, 0.005, 0.01.

באיור 4.3 נתון הידרוגרף מס' 2 וגם שלושה גרפים לזרימת המים מהמאגר. ניסויים מתבצעים עבור שיפועים שונים של תחתית המאגר. בניסוי זה השתמשנו במברץ 3×3 מ'.

הניסוי עבור מברץ 4×5 מ' מתואר באיור 4.4. בניסוי זה השתמשנו בהידרוגרף 2.

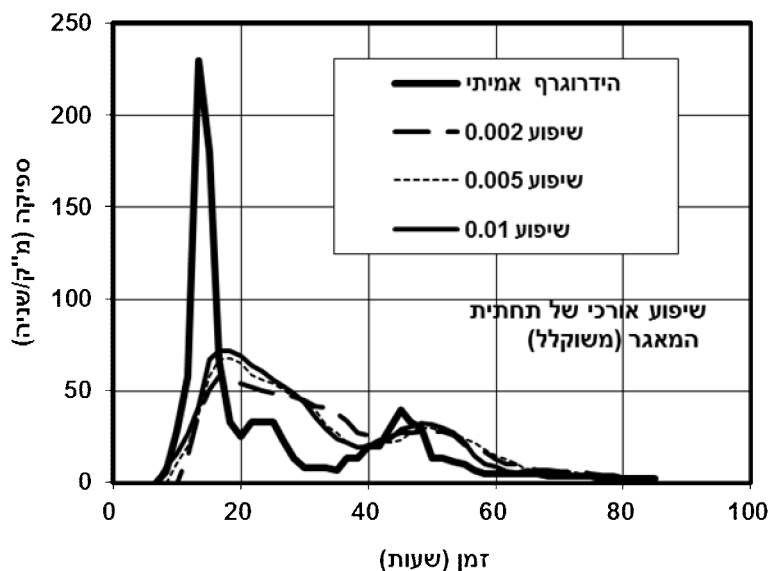
תוצאות של הניסויים עבור מודל מס' 1 ניתן לראות בטבלה 4.1.

אנליזה של התוצאות של הניסויים עבור מודל מס' 1 מאפשרת לקבל מספר מסקנות.

- מטבלה 4.1 רואים שכאשר שיפוע תחתית המאגר הוא מ-0.002 עד-0.01 אז הספיקה היוצאת מהמאגר גדלה. תופעה זו ניתנת להבחנה בכל סוג של הידרוגרף ובכל סוג של מברץ. למשל עבור הידרוגרף מס' 1 ומברץ 3×3 מ', ספיקה גדלה ב-15 מ"ק/שנייה, כאשר השיפוע בתחום מ-0.002 עד-0.01.
- עבור אותו הידרוגרף ואותם שיפועים, גם כאשר המידות הברץ 4×5 מ' הספיקה גדלה ושווה ל-18 מ"ק/שנייה.
- ניתן לראות שעבור אותו הידרוגרף אך שטח המברץ אחר, יש הפרש בספיקות. הספיקה גדלה פי 1.2.

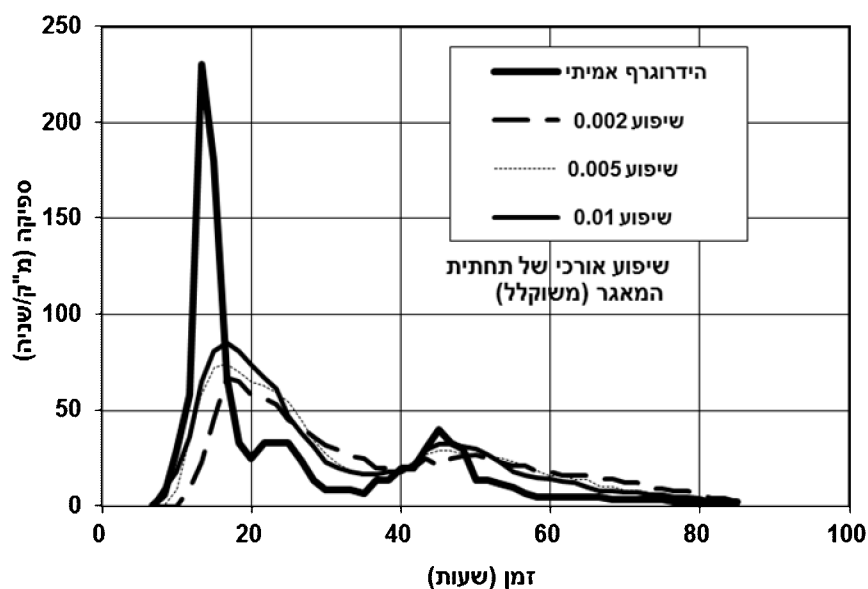
עבור הידרוגרף מס' 2 נבצע את אותה אנליזה. כאשר משתמשים במברץ 3×3 מ' הספיקה היוצאת ממאגר גדולה ב-10 מ"ק/שנייה לעומת ההידרוגרף מס' 1. תופעה זו נראית בכל סוג של מברץ. עבור הידרוגרף מס' 2 עם מברץ 4×5 מ' הספיקה גדלה ב-14 מ"ק/שנייה לעומת ההידרוגרף מס' 1, בתנאי ששיפוע בתחום מ-0.002 עד-0.01.

השייה עבור מברצ 3×3 מ' (מאגר מס' 1, הידרוגרף מס' 1)



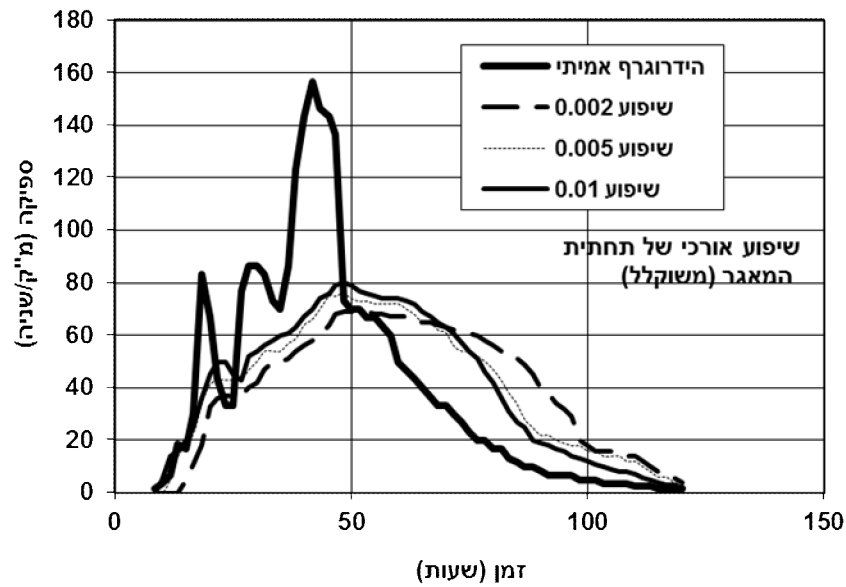
4.1 איור

השייה עבור מברצ 4×5 מ' (מאגר מס' 1, הידרוגרף מס' 1)



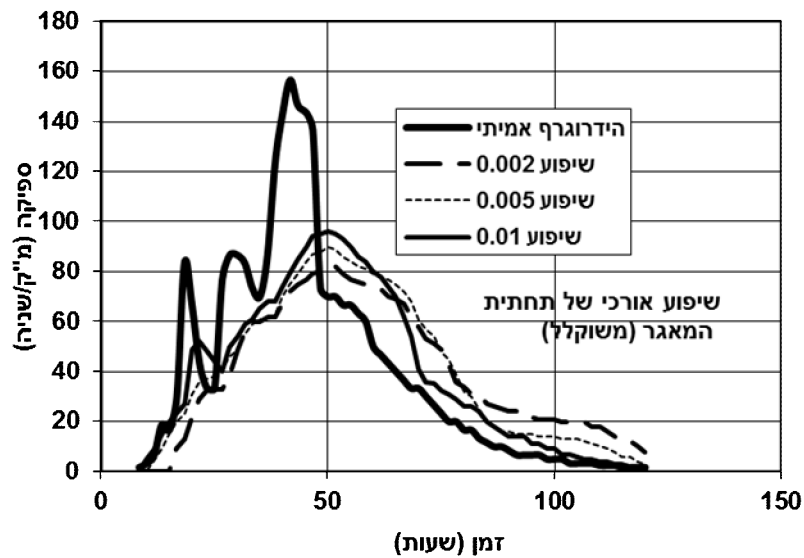
4.2 איור

השייה עבור מברץ 3*3 מ' (מאגר מס' 1, הידרוגרף מס' 2)



איור 4.3

השייה עבור מברץ 4*5 מ' (מאגר מס' 1, הידרוגרף מס' 2)



איור 4.4

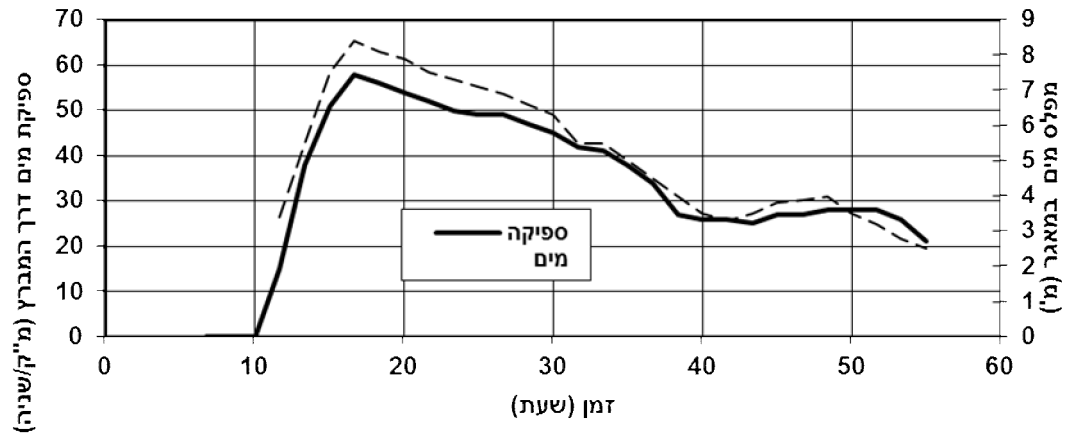
טבלה 4.1 (עבור מודל מס' 1)

סוג הידרוגרף עבור מברצים שונים	שיפוע	ספיקה שיא הנכנסת (1%) מ"ק/שנייה	נפח גאות (1%) מ"ק	ספיקה שיא היוצאת (1%) מ"ק/שנייה	הפרש בין ספיקת שיא הנכנסת לבין ספיקה היוצאת %	הפרש בין ספיקת שיא הנכנסת לבין ספיקה היוצאת מ"ק/שנייה
הידרוגרף מס' 1 מברץ 3*3	0.002	230	8,000,000	57	75.2	173
	0.005	230	8,000,000	67	70.8	163
	0.01	230	8,000,000	72	68.6	158
הידרוגרף מס' 1 מברץ 4*5	0.002	230	8,000,000	67	70.8	163
	0.005	230	8,000,000	74	67.8	156
	0.01	230	8,000,000	85	63	145
הידרוגרף מס' 2 מברץ 3*3	0.002	160	17,000,000	70	56.2	90
	0.005	160	17,000,000	76	52.5	84
	0.01	160	17,000,000	80	48.7	78
הידרוגרף מס' 2 מברץ 4*5	0.002	160	17,000,000	80	50	80
	0.005	160	17,000,000	88	45	72
	0.01	160	17,000,000	94	41.2	66

- מכאן ניתן לומר שהספיקה היוצאת ממאגר תלויה בשטח חתך של המברץ וגם בסוג של ההידרוגרף.
- ניתן להשוות יחסי ספיקה היוצאת באותם מברצים רק הידרוגרפים משתנים. מברץ 3*3 מ' עבור הידרוגרף מס' 2 ליחס להידרוגרף מס' 1, הוא – 1.18 85/72 עבור שיפוע 0.01.
- עבור מברץ 4*5 מ' יחס בין הספיקות עבור הידרוגרפים שונים שווה ל- 1.11 94/85.

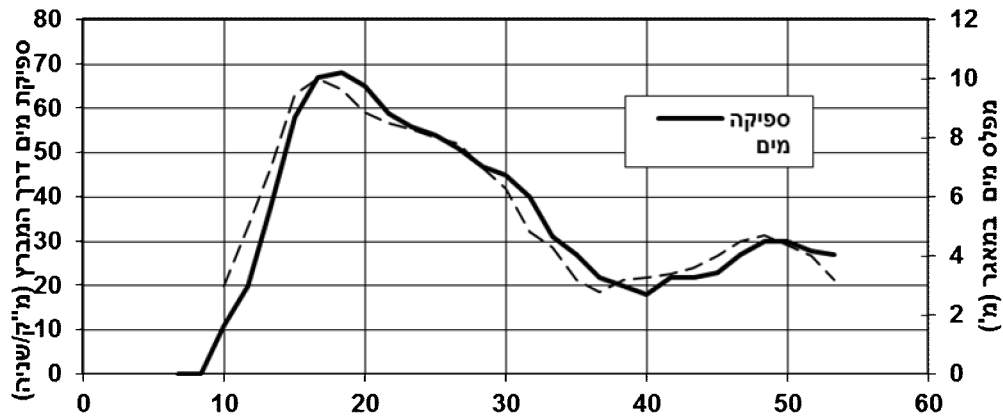
כדי לברר איך משתנה מפלס המים במאגר עשינו ניסויים שמתוארים להלן: באיורים מ-4.5 עד-4.10 מוצגים תוצאות ניסויים של שינוי ספיקת המים ומפלס במאגר כפונקציה של הזמן עבור הידרוגרף מס' 1.

שינוי ספיקת המים ומפלס במאגר מס' 1
(מברץ 3*3, שיפוע 0.002, הידרוגרף 1)

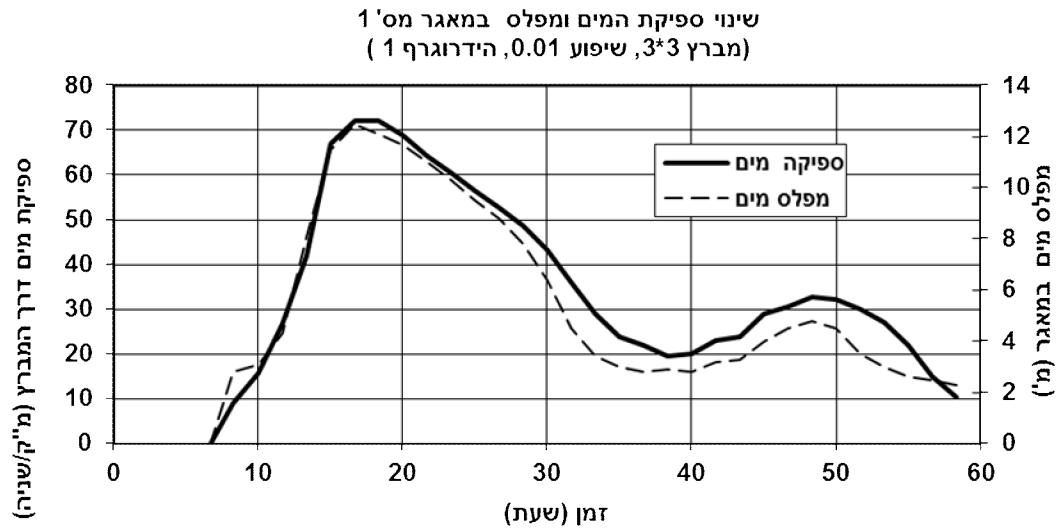


איור 4.5

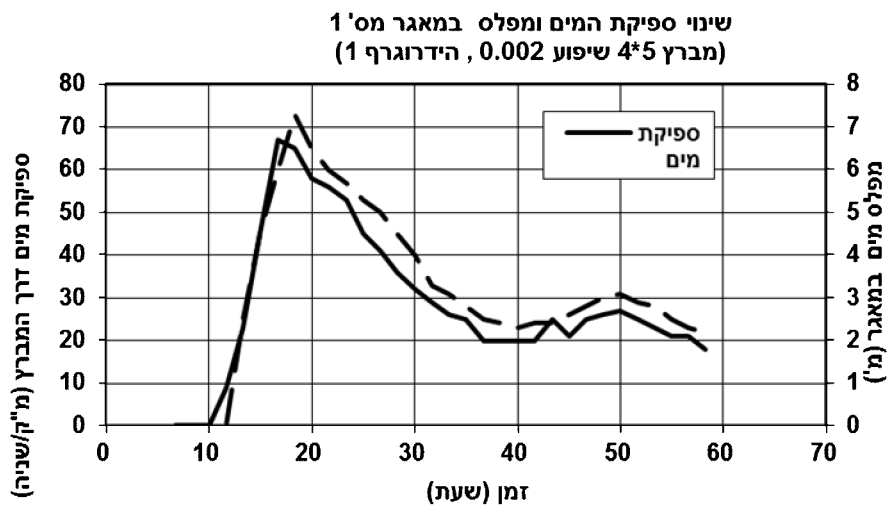
שינוי ספיקת המים ומפלס במאגר מס' 1
(מברץ 3*3, שיפוע 0.005, הידרוגרף 1)



איור 4.6

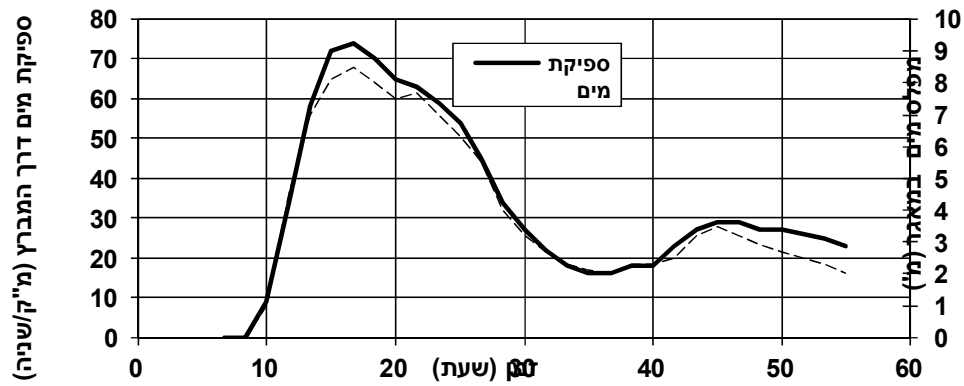


איור 4.7



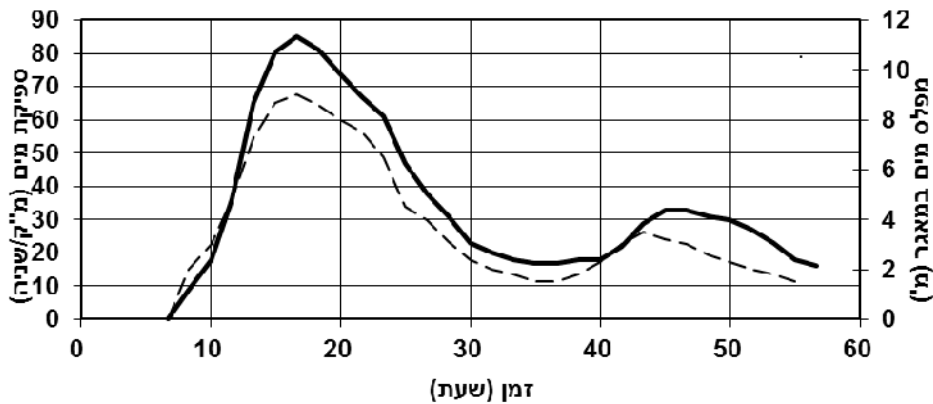
איור 4.8

שינוי ספיקת המים ומפלס במאגר מס' 1
(מברץ 4*5 שיפוע 0.005, הידרוגרף 1)



איור 4.9

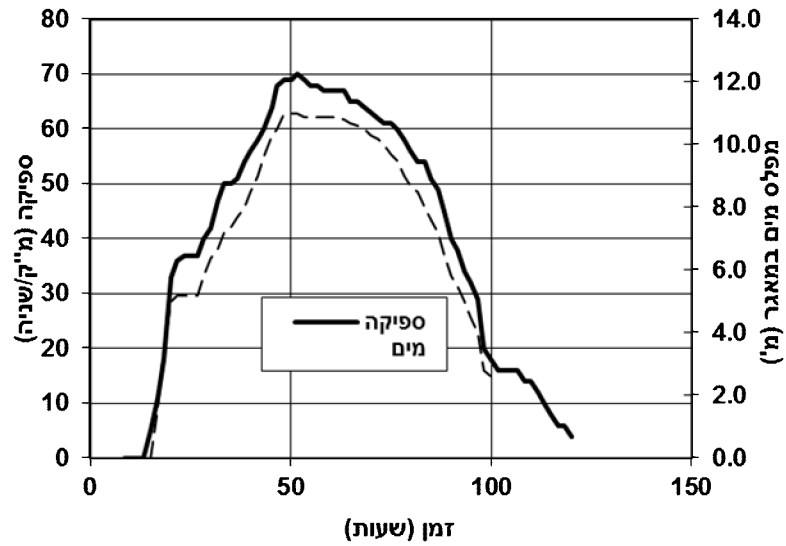
שינוי ספיקת המים ומפלס במאגר מס' 1
(מברץ 4*5 שיפוע 0.01, הידרוגרף 1)



איור 4.10

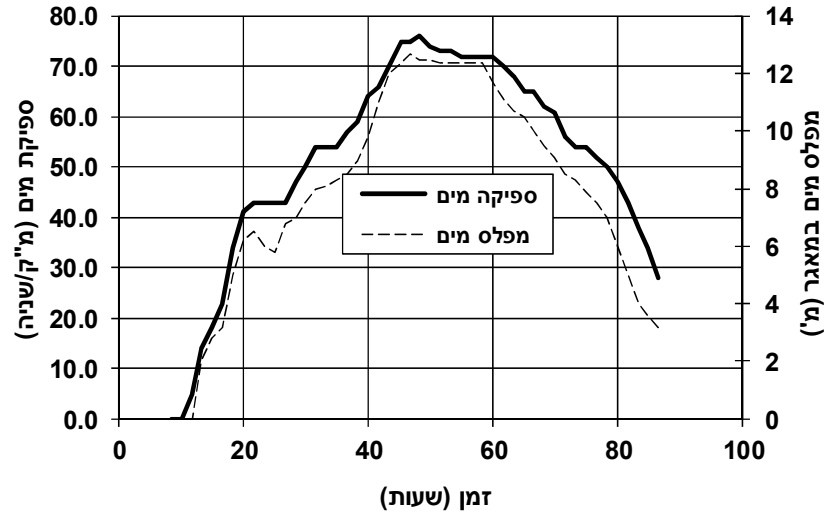
באיורים מ-4.11 עד-4.16 מוצגים ניסויים של שינוי ספיקת המים ומפלס במאגר כפונקציה של הזמן עבור הידרוגרף מס' 2.

שינוי ספיקת המים ומפלס במאגר מס' 1
(מברץ 3*3, שיפוע 0.002, הידרוגרף 2)



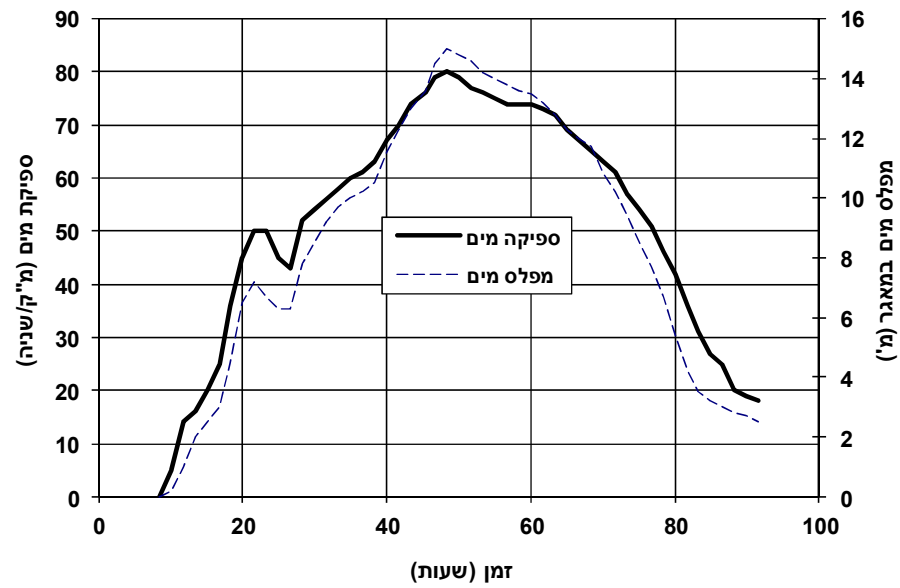
איור 4.11

שינוי ספיקת המים ומפלס במאגר מס' 1 (מברץ 3*3, שיפוע 0.005, הידרוגרף 2)



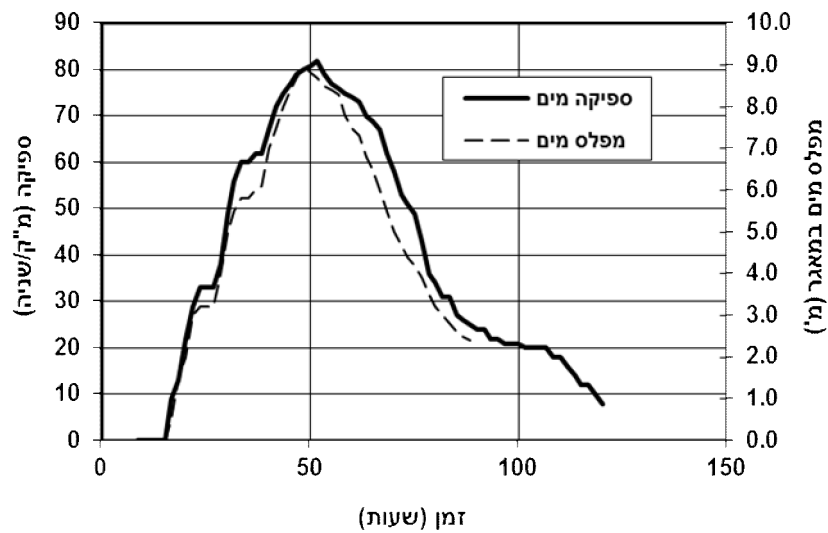
איור 4.12

שינוי ספיקת המים ומפלס במאגר מס' 1
(מברץ 3*3, שיפוע 0.01, הידרוגרף 2)



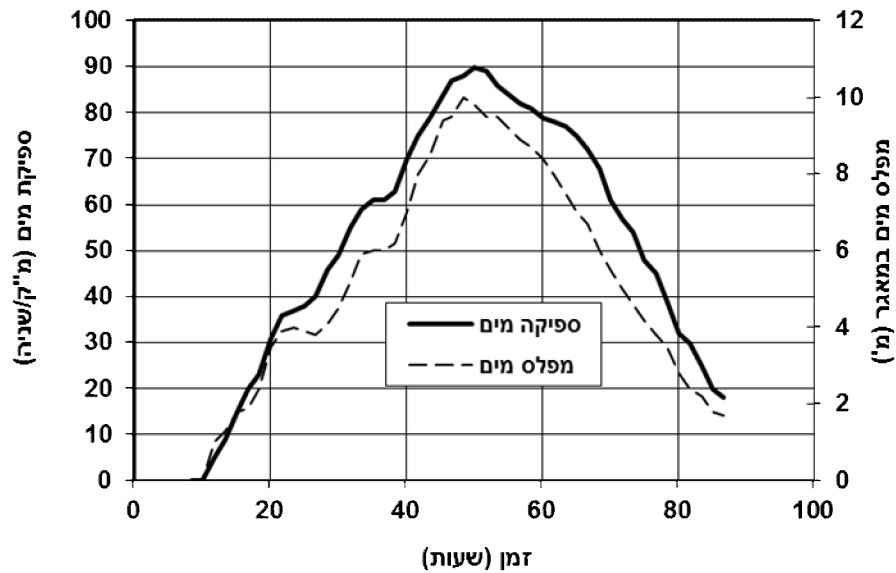
4.13 איור

שינוי ספיקת המים ומפלס במאגר מס' 1
(מברץ 4*5, שיפוע 0.002, הידרוגרף 2)



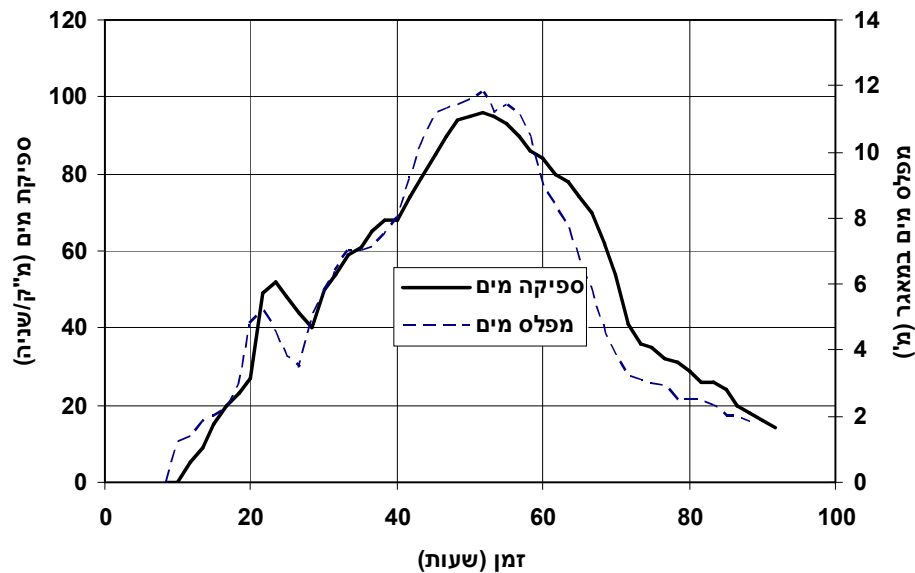
איור 4.14

שינוי ספיקת המים ומפלס במאגר מס' 1
(מברץ 4*5, שיפוע 0.005, הידרוגרף 2)



איור 4.15

שינוי ספיקת המים ומפלס במאגר מס' 1 (מברץ 4*5, שיפוע 0.01, הידרוגרף 2)



איור 4.16

מכל הניסויים עבור מודל מס' 1 שמתוארים באיורים מ- 4.5 עד 4.16 עבור מברצים שונים וגם ההידרוגרפים שונים, ניתן לראות שמפלס המים במאגר משתנה באותה צורה שמשתנה הספיקה שיוצאת מהמאגר.

מכאן אפשר לתאר את הזרימה כמו במעבירי מים. מעבירי המים שמשמשים להעביר מים מתחת לכבישים, יכולים להיות ארוכים או קצרים כתלות בכביש, ויכולים להיות במלבניים עגולים, וצורות אליפטיות. הניתוח ההידרולי של מעבירים מסובך עקב משטרי זרימה שונים ומסובכים. שני התנאים העיקריים שמסווגים הידרולית מעביר מים הם :

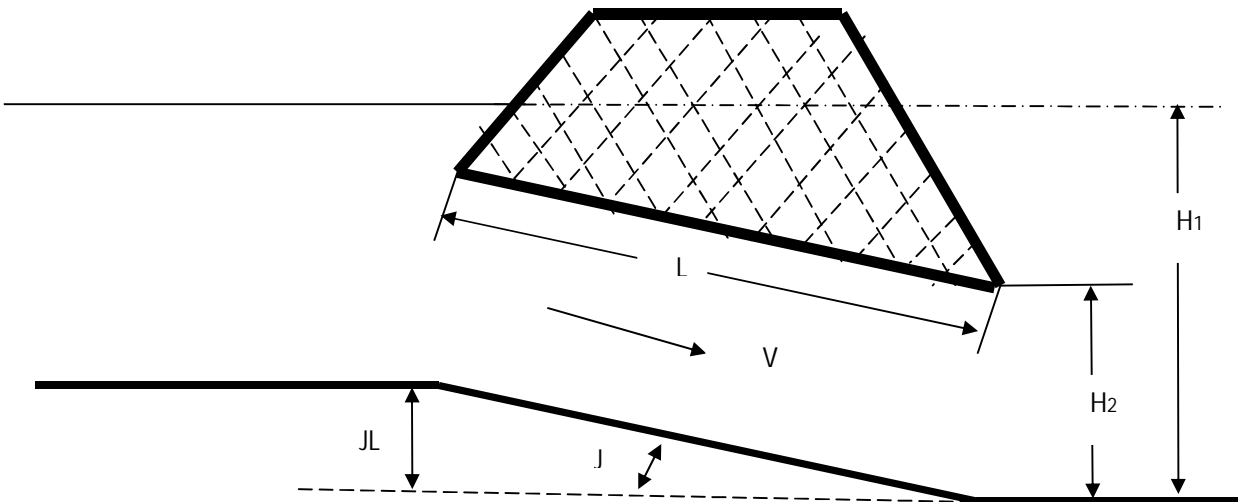
(א) תנאי: הכניסה למעביר טבולה. כאשר כניסת המעביר לגמרי טבולה $H_1 > 1.2H$

כאשר: H_1 - העומק מתחתית המעביר לקו של פני המים,

H - הוא מימד הגובה של המעביר

(ב) תנאי: הכניסה למעביר חופשית. כאשר כניסת המעביר איננה טבולה $H_1 < 1.2 H$.

סכימת חישוב של מעביר מים:



ממשוואת ברנולי ניתן לתאר קו העומד הכולל ע"י נוסחה הבאה:

$$H_1 - H_2 = h \quad (1)$$

h - ההפסדים ההידרוליים.

ההפסדים ההידראוליים ניתן להציג ע"י הנוסחאות הבאות:

$$h = h_e + h_f + h_o \quad (2)$$

כאן: $h_e = k_e \frac{V^2}{2g}$ - הפסדים הידראוליים בכניסה למעביר,

$$h_f = \frac{n^2 V^2 L}{R^{4/3}} \quad \text{הפסדים הידראוליים לאורך המעביר (מנוסחה של מאנינג),}$$

L - אורך המעביר, R - רדיוס ההידראולי, n - מקדם מאנינג.

$$h_o = K_o \frac{V^2}{2g}$$

הפסדים ההידראוליים ביציאה מהמעביר.

עבור מעבירי מים חישוב הספיקה מתבצע לפי נוסחה הבאה :

$$Q_{out} = A \sqrt{\frac{2g(H_1 - H_2)}{2gn^2L / R^{4/3} + k_e + k_o}} \quad (3)$$

חישוב המעביר מתבצע כמו קליחת נוזלים דרך פתחים לפי הנוסחה :

$$Q_{out} = C_d A \sqrt{2g(H_1 - H_2)} \quad (4)$$

כאן : C_d - מקדם של מעביר, תלוי בגיאומטריה שלו.

בהשוואה בין הנוסחאות 3 ו-4 ניתן לבטא את המקדם של המעביר בצורה הבאה :

$$C_d = \sqrt{\frac{1}{2gn^2L / R^{4/3} + k_e + k_o}} \quad (5)$$

כאן : $k_o = 1$, $k_e = 0.6$, $R = 0.75m$ (עבור מברץ 3*3 מ'), $R = 1.1m$ (עבור מברץ 4*5 מ').

מקדם של מעביר המחושב עבור מודל מס' 1 במברץ 3*3 מ' שווה ל- 0.6 .

מקדם של מעביר המחושב עבור מודל מס' 1 במברץ 4*5 מ' שווה ל- 0.43 .

עבור מאגרים הנתונים לבדיקת מקדם הספיקה של מעביר Cd משתנה בתווך מ-0.4 עד-0.6 לפי מקור[3].

לפי הנוסחה (4) ניתן לחשב את הספיקה המכסימלית שיוצאת מהמאגר .

כאשר הספיקה היוצאת ממאגר ידועה והספיקה המכסימלית הנכנסת למאגר וגם נפח הגאות של

ההידרוגרף ידועים, ניתן לחשב את נפח המאגר הנדרש . החישוב אפשר לבצע לפי נוסחה של קצ'רין או

אותה נוסחה שנתונה בטבלה 1.2 .

$$V_{st} = \frac{V_r (1 - Q_{out} / Q_r)}{k} \quad (6)$$

V_{st} - נפח המאגר, V_r - נפח גאות, Q_{out} - ספיקה מכסימלית היוצאת ממאגר,

Q_r - ספיקה מכסימלית של ההידרוגרף, k - מקדם תיקון של צורת המאגר.

עבור מודל מס' 1 מקדם תיקון של צורת המאגר המחושב נתון בטבלה 4.2 .

טבלה 4.2 (עבור מודל מס' 1)

מקדם תיקון של צורת המאגר k	נפח המאגר מ"ק V_{st}	ספיקה שיא היוצאת (1%) מ"ק/שנייה Q_{out}	נפח גאות (1%) מ"ק V_r	ספיקה שיא הנכנסת (1%) מ"ק/שנייה Q_r	שיפוע	סוג הידרוגרף עבור מברצים שונים
2.77	2500000	57	8,000,000	230	0.002	הידרוגרף מס' 1 מברץ 3*3
2.45	2300000	67	8,000,000	230	0.005	
2.36	2100000	72	8,000,000	230	0.01	
2.31	2600000	67	8,000,000	230	0.002	הידרוגרף מס' 1 מברץ 4*5
2.33	1980000	74	8,000,000	230	0.005	
2.13	1690000	85	8,000,000	230	0.01	
1.55	5500000	70	17,000,000	160	0.002	הידרוגרף מס' 2 מברץ 3*3
1.56	4400000	76	17,000,000	160	0.005	
1.55	3800000	80	17,000,000	160	0.01	
1.41	5000000	80	17,000,000	160	0.002	הידרוגרף מס' 2 מברץ 4*5
1.37	4230000	88	17,000,000	160	0.005	
1.37	3360000	94	17,000,000	160	0.01	

ניתן לקחת מקדם תיקון ממוצע. למשל עבור הידרוגרף מס' 1 ומברץ 3*3 מ' - $k = 2.52$.

עבור הידרוגרף מס' 1 ומברץ 4*5 מ', מקדם תיקון שווה $k = 2.26$.

$$\frac{2.52}{2.26} = 1.12 \text{ יחס בין המקדמים אלה שווה ל-}$$

עבור הידרוגרף מס' 2 ומברץ 3*3 מ', מקדם תיקון שווה ל- $k = 1.55$.

עבור הידרוגרף מס' 2 ומברץ 4*5 מ', מקדם תיקון שווה ל- $k = 1.38$.

$$\frac{1.55}{1.38} = 1.12 \text{ יחס בין המקדמים אלה שווה ל-} \cdot \text{מכאן נובע שיחס בהידרוגרפים שונים נשאר קבוע}$$

וכמעט שווה ליחסי ספיקות באותם תנאים.

בדיקת התאמת חישובים וניסויים שבוצעו מורה שההבדל הוא לא גדול מ-6%, ז"א שאפשר להשתמש בשיטת חישוב זו בתכנון מאגרים החדשים.

4.2. ניסויים מעבדתיים עבור מודל של מאגר מס' 3 (מודל מס' 2)

באיור 4.17 ו-4.18 מתואר גרף של הידרוגרף מס' 1, ז"א מתוארת ספיקת המים הנכסים למודל של המאגר ושלוש גרפים של יציאת המים מהמאגר בתנאים שונים. באיור 4.17 מברץ הוא

3*3 מ', באיור 4.18 מברץ שווה ל-4*5 מ'. בכל איור מתוארים גרפים עבור שיפוע אורכי של תחתית המאגר, שונה. במודל מס' 2 השיפועים שווים 0.01, 0.15, 0.025.

באיור 4.19 נתון הידרוגרף מס' 2 וגם שלושה גרפים לזרימת המים מהמאגר. ניסויים מתבצעים עבור שיפועים שונים של תחתית המאגר. בניסוי זה השתמשנו במברץ 3*3 מ'.

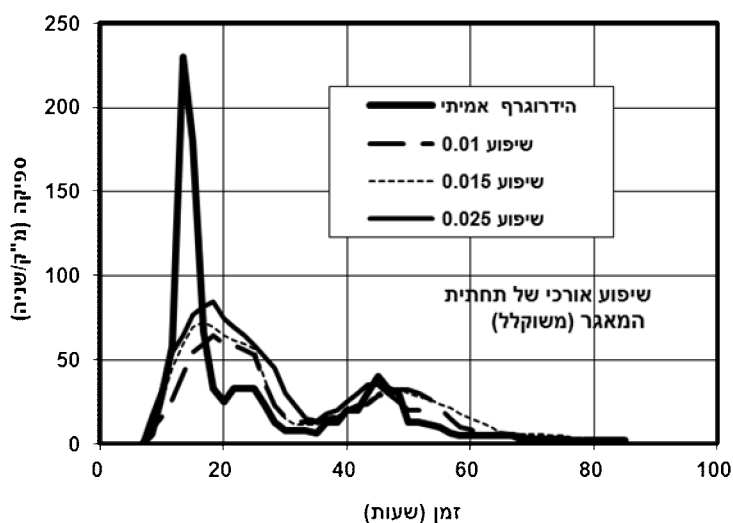
הניסוי עבור מברץ 4*5 מ' מתואר באיור 4.20. בניסוי זה השתמשו בהידרוגרף 2.

תוצאות של הניסויים עבור מודל מס' 2 ניתן לראות בטבלה 4.3.

אנליזה של התוצאות של הניסויים עבור מודל מס' 2 מאפשרת לקבל מספר מסקנות.

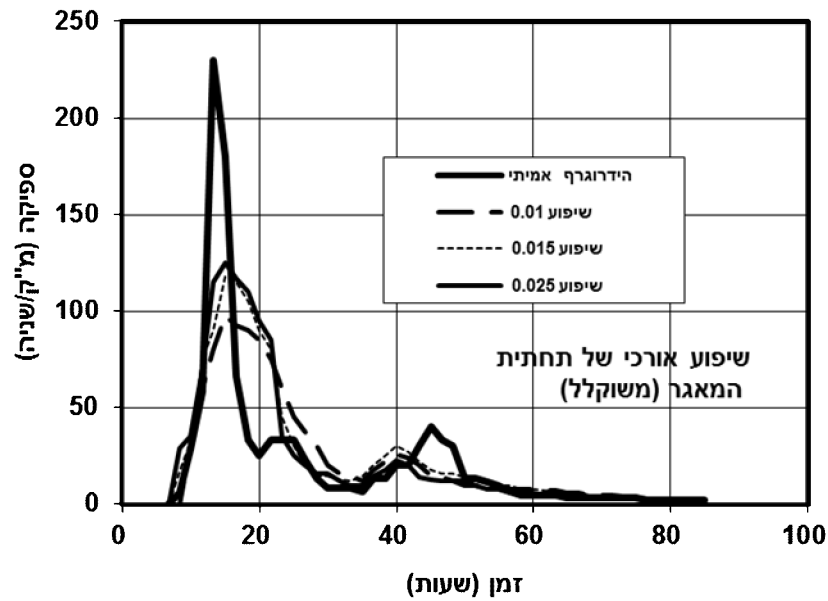
- מטבלה 4.3 רואים שכאשר שיפוע תחתית המאגר גודל מ-0.01 עד-0.025 אז ספיקה היוצאת ממאגר גדלה. תופעה זו ניתנת להבחנה בכל סוג של הידרוגרף ובכל סוג של מברץ. למשל עבור הידרוגרף מס' 1 ומברץ 3*3 מ', ושיפוע משתנה מ-0.01 עד 0.025 אז ההפרש בין הספיקות שווה ל- 20 מ"ק/שנייה.
- עבור אותו הידרוגרף ואותם שיפועים עם מברץ 4*5 מ' הפרש הספיקות שווה ל- 32 מ"ק/שנייה.
- ניתן לראות בכמה גדלה הספיקה באותו הידרוגרף כאשר רק שטח המברץ משתנה. בממוצע יחס זה שווה ל- 1.47 125/85.
- עבור הידרוגרף מס' 2 נבצע את אותה אנליזה. כאשר משתמשים במברץ 3*3 מ' הספיקה היוצאת מהמאגר גדלה. מה שמאפשר לראות תופעה זו בכל סוג של מברץ. למשל עבור הידרוגרף מס' 2 ומברץ 3*3 מ', הפרש הספיקות שווה ל- 8 = 93-85 לשיפוע תחתית גדול מ- 0.01 עד- 0.025.
- עבור הידרוגרף מס' 2 עם מברץ 4*5 מ' הפרש בין הספיקות שווה ל- 15 = 125-110, בתנאי ששיפוע התחתית בתחום מ- 0.01 עד-0.025.

השייה עבור מברץ 3*3 מ' (מאגר מס' 3, הידרוגרף 1)



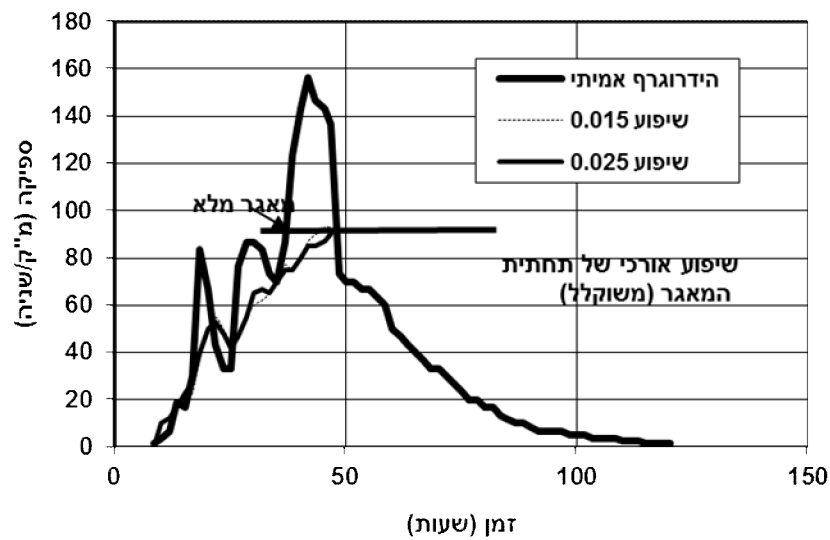
איור 4.17

השייה עבור מברצ 4*5 מ' (מאגר מס' 3, הידרוגרף 1)



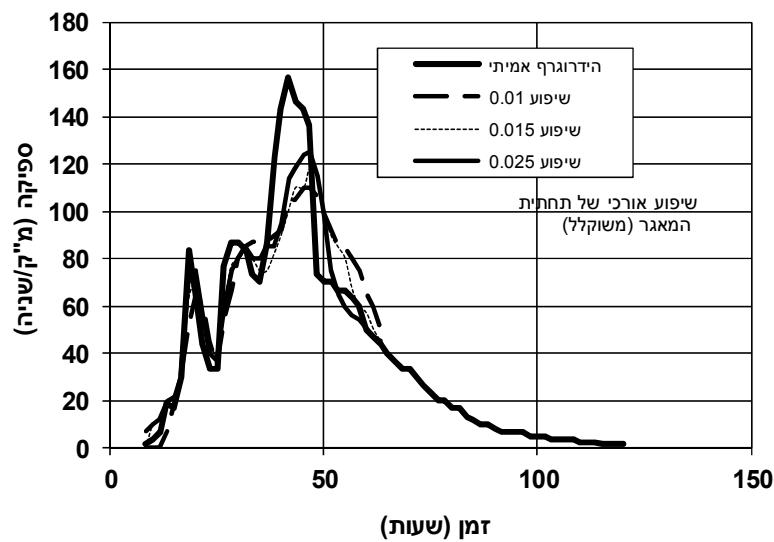
איור 4.18

השייה עבור מברצ 3*3 מ' (מאגר מס' 3, הידרוגרף 2)



איור 4.19

השייה עבור מברץ 4*5 מ' (מאגר מס' 3, הידרוגרף 2)



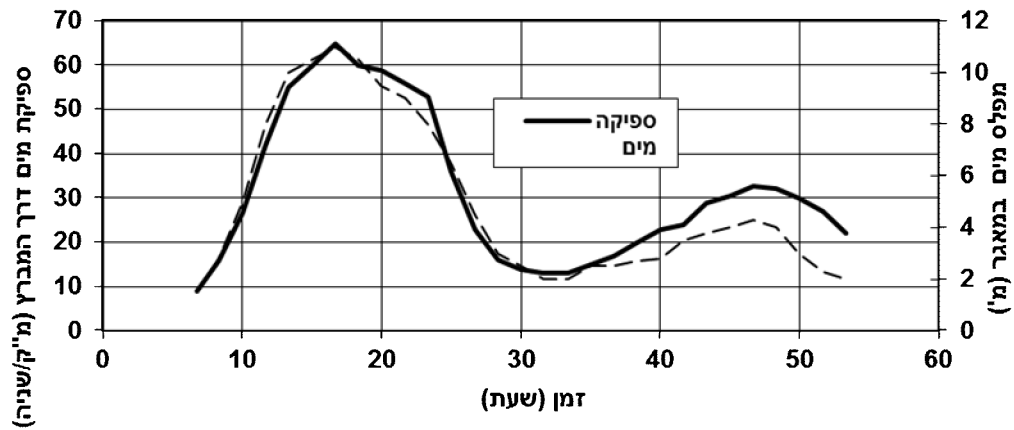
אחור 4.20

טבלה 4.3 (עבור מודל מס' 2)

סוג הידרוגרף עבור מברצים שונים	שיפוע	ספיקה שיא הנכנסת (1%) מ"ק/שנייה	נפח גאות (1%) מ"ק	ספיקה שיא היוצאת (1%) מ"ק/שנייה	הפרש בין ספיקת שיא הנכנסת לבין ספיקה היוצאת %
הידרוגרף מס' 1 מברץ 3*3	0.01	230	8,000,000	65	71.7
	0.015	230	8,000,000	72	68.6
	0.025	230	8,000,000	85	63
הידרוגרף מס' 1 מברץ 4*5	0.01	230	8,000,000	93	59.5
	0.015	230	8,000,000	118	48.6
	0.025	230	8,000,000	125	45.6
הידרוגרף מס' 2 מברץ 3*3	0.01	160	17,000,000	85	46.8
	0.015	160	17,000,000	90	43.7
	0.025	160	17,000,000	93	41.8
הידרוגרף מס' 2 מברץ 4*5	0.01	160	17,000,000	110	31.2
	0.015	160	17,000,000	118	26.2
	0.025	160	17,000,000	125	21.8

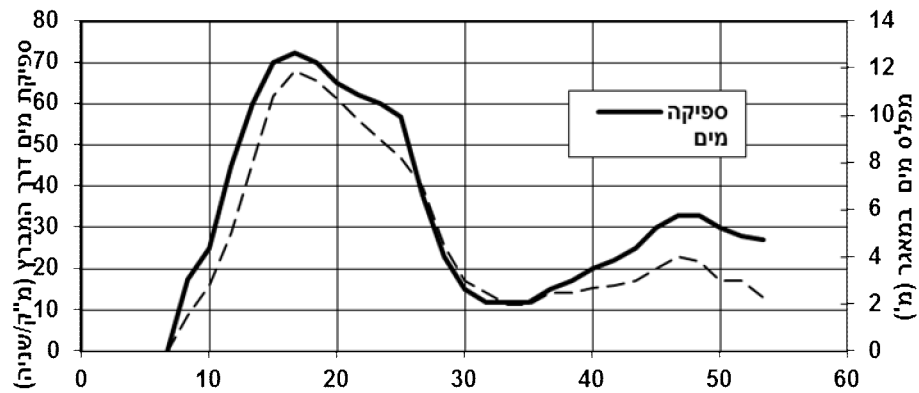
כדי לברר איך משתנה מפלס המים במאגר עשינו ניסויים שמתוארים להלן :

שינוי ספיקת המים ומפלס במאגר מס' 3
(מברץ 3*3, שיפוע 0.01, הידרוגרף 1)

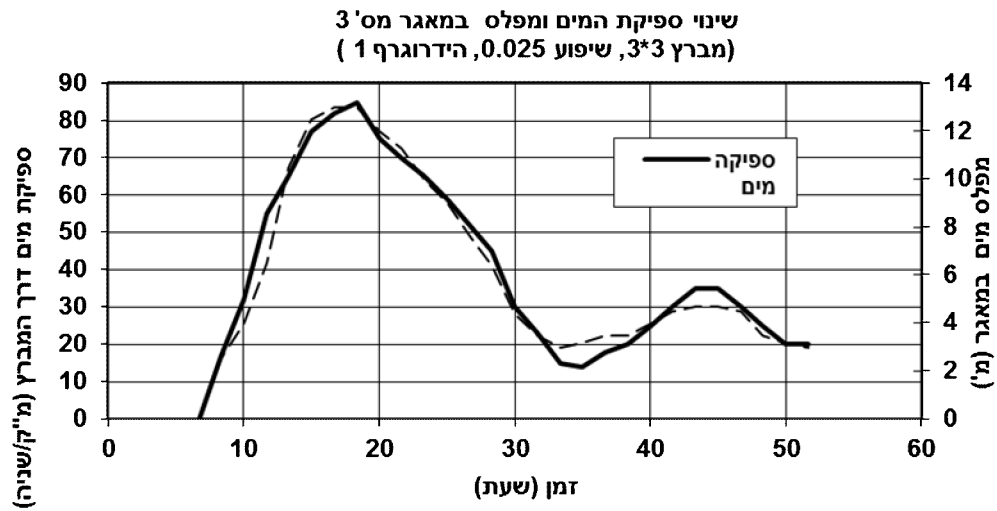


איור 4.21

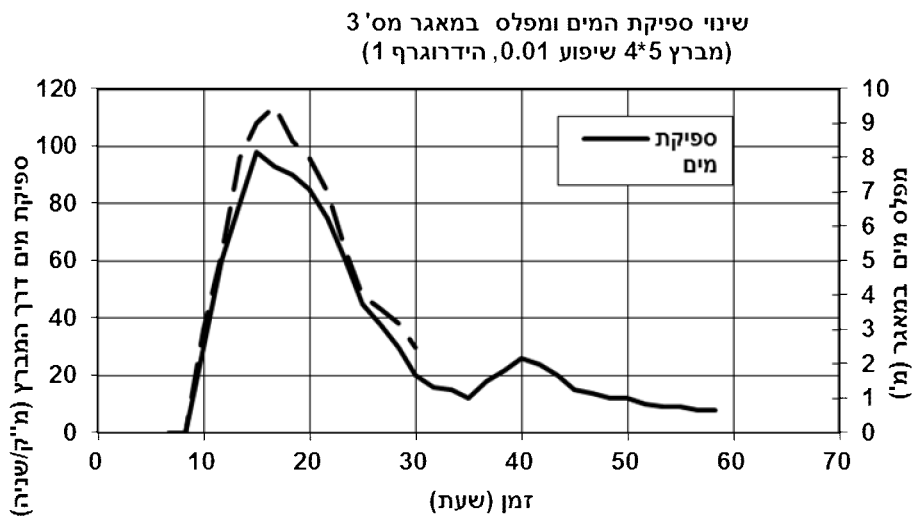
שינוי ספיקת המים ומפלס במאגר מס' 3
(מברץ 3*3, שיפוע 0.015, הידרוגרף 1)



איור 4.22

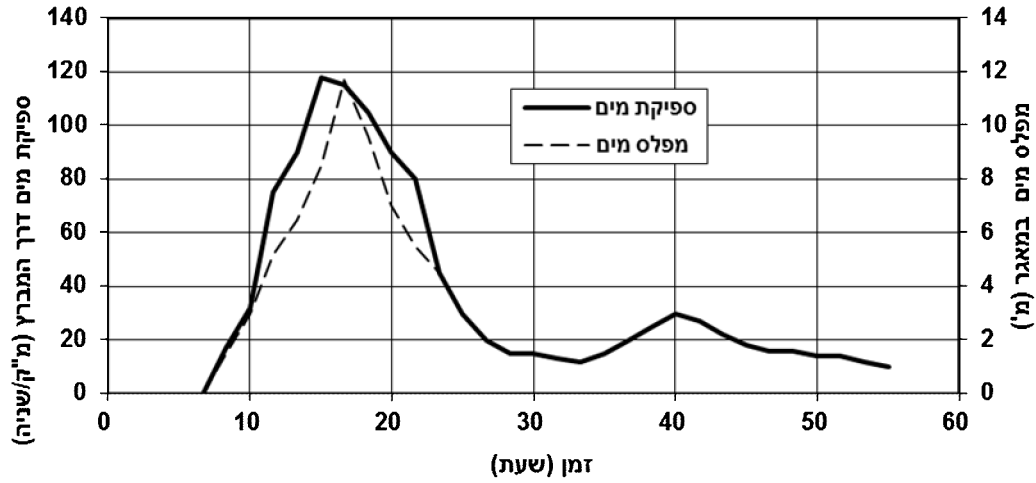


איור 4.23



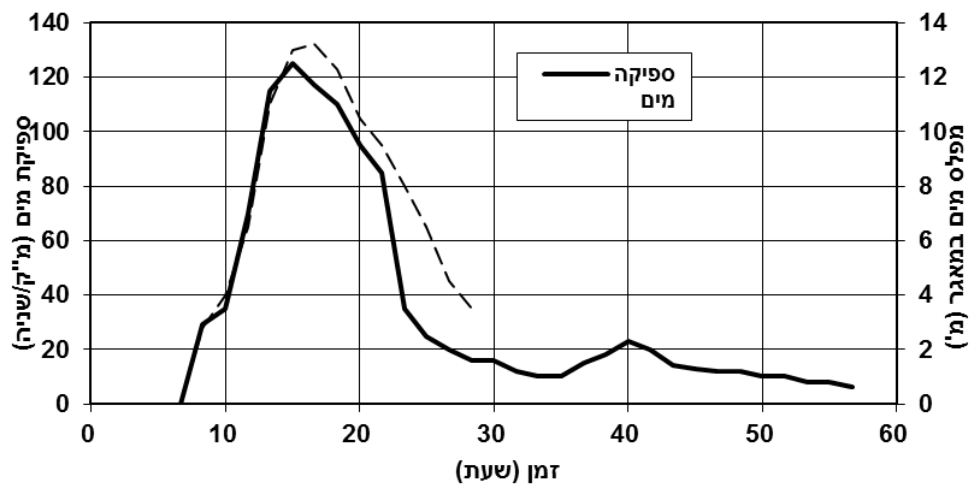
איור 4.24

שינוי ספיקת המים ומפלס במאגר מס' 3
(מברץ 4*5 שיפוע 0.015, הידרוגרף 1)



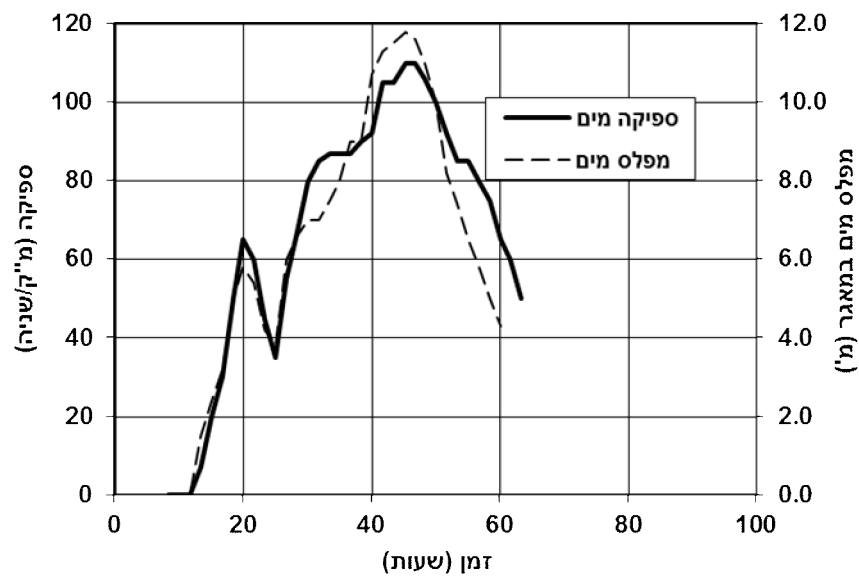
איור 4.25

שינוי ספיקת המים ומפלס במאגר מס' 3
(מברץ 4*5 שיפוע 0.025, הידרוגרף 1)



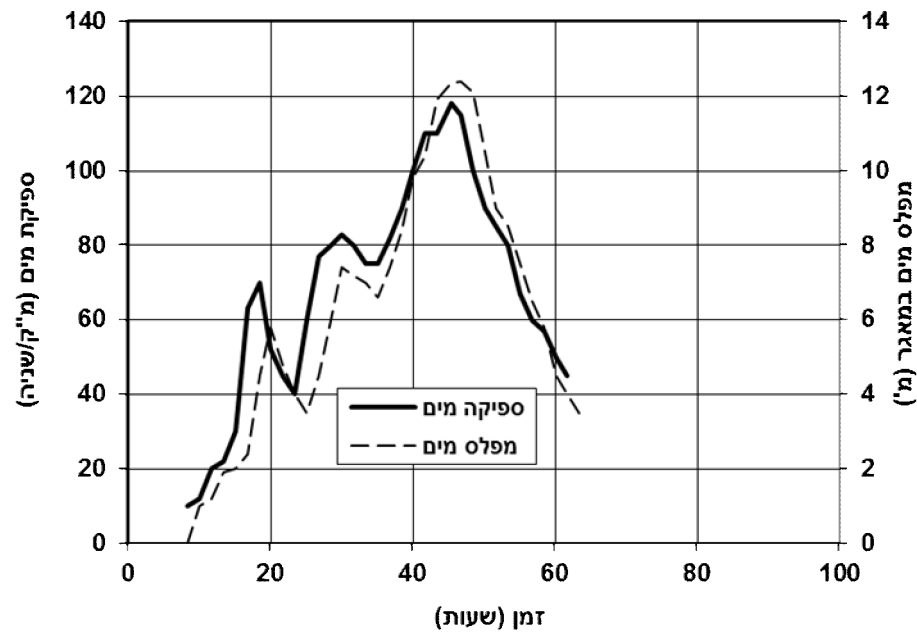
איור 4.26

שינוי ספיקת המים ומפלס במאגר מס' 3
(מברץ 4*5, שיפוע 0.01, הידרוגרף 2)



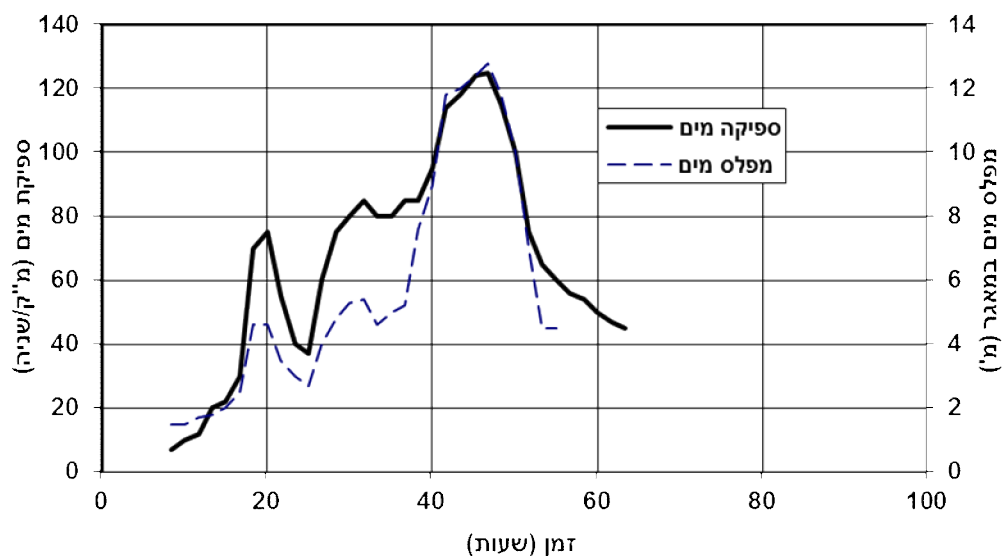
איור 4.27

שינוי ספיקת המים ומפלס במאגר מס' 3
(מברץ 4*5, שיפוע 0.015, הידרוגרף 2)



איור 4.28

שינוי ספיקת המים ומפלס במאגר מס' 3
(מברץ 4*5, שיפוע 0.025, הידרוגרף 2)



איור 4.29

עבור מודל מס' 2 (מאגר מס' 3) עשינו חישוב מקדם תיקון צורת המאגר. התוצאות מוצגים בטבלה מס' 4.4.

טבלה 4.4 (עבור מודל מס' 2)

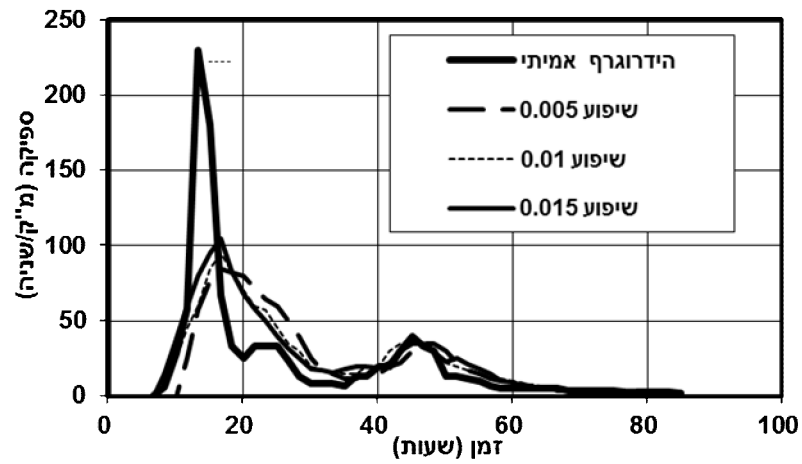
מקדם תיקון של מעביר k	נפח המאגר מ"ק V_{st}	ספיקה שיא היוצאת (1%) מ"ק/שנייה Q_{out}	נפח גאות (1%) מ"ק V_r	ספיקה שיא הנכנסת (1%) מ"ק/שנייה Q_r	שיפוע	סוג הידרוגרף עבור מברצים שונים
2.56	2210000	65	8,000,000	230	0.01	הידרוגרף מס' 1 מברץ 3*3
2.51	1700000	72	8,000,000	230	0.015	
2.2	1500000	85	8,000,000	230	0.025	
2.08	1270000	93	8,000,000	230	0.01	הידרוגרף מס' 1 מברץ 4*5
1.76	750000	118	8,000,000	230	0.015	
1.73	480000	125	8,000,000	230	0.025	
1.55	3000000	85	17,000,000	160	0.01	הידרוגרף מס' 2 מברץ 3*3
1.48	2830000	90	17,000,000	160	0.015	
1.43	2870000	93	17,000,000	160	0.025	
1.32	1500000	110	17,000,000	160	0.01	הידרוגרף מס' 2 מברץ 4*5
1.25	1250000	118	17,000,000	160	0.015	
1.22	764000	125	17,000,000	160	0.025	

ניתן לקחת מקדם תיקון ממוצע. למשל עבור הידרוגרף מס' 1 ומברץ 3×3 מ' - $k = 2.42$.
 עבור הידרוגרף מס' 1 ומברץ 4×5 מ', מקדם תיקון שווה $k = 1.86$. יחס בין המקדמים אלה שווה
 ל- $1.3 = \frac{2.42}{1.86}$. עבור הידרוגרף מס' 2 ומברץ 3×3 מ', מקדם תיקון שווה ל- $k = 1.49$.
 עבור הידרוגרף מס' 2 ומברץ 4×5 מ', מקדם תיקון שווה ל- $k = 1.26$. יחס בין המקדמים אלה שווה
 ל- $1.18 = \frac{1.49}{1.26}$. מכאן נובע שהיחס בהידרוגרפים שונים נשאר קבוע
 ושווה כמעט ליחסי הספיקות באותם תנאים. בדיקת התאמת החישובים והניסויים שבוצעו מורה
 שההבדל הוא לא גדול מ-6%.

4.3. תוצאות ניסויים מעבדתיים מאגר מס' 4 (מודל מס' 3)

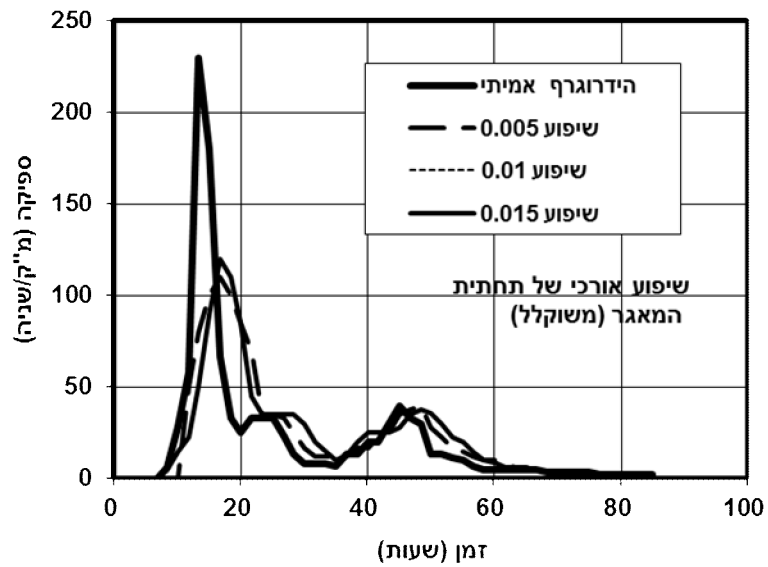
- באיור 4.30 ו-4.31 מתואר גרף של הידרוגרף מס' 1, ז"א מתוארת ספיקת המים הנכסים למודל של
 המאגר ושלוש גרפים של יציאת המים מהמאגר בתנאים שונים. באיור 4.30 מברץ הוא 3×3 מ', באיור 4.31
 מברץ שווה ל- 4×5 מ'. בכל איור מתוארים גרפים עבור שיפוע אורכי של תחתית המאגר, שונה. במודל מס'
 2 השיפועים שווים 0.005, 0.01, 0.015.
- באיור 4.32 נתון הידרוגרף מס' 2 וגם שלושה גרפים לזרימת המים מהמאגר. ניסויים מתבצעים עבור
 שיפועים שונים של תחתית המאגר. בניסוי זה השתמשנו במברץ 3×3 מ'.
 הניסוי עבור מברץ 4×5 מ' מתואר באיור 4.33. בניסוי זה השתמשו בהידרוגרף 2.
 תוצאות של הניסויים עבור מודל מס' 3 ניתן לראות בטבלה 4.5.
 אנליזה של התוצאות של הניסויים עבור מודל מס' 3 מאפשרת לקבל מספר מסקנות.
- מטבלה 4.5 רואים שכאשר שיפוע תחתית המאגר גדול מ-0.005 עד-0.015 אז ספיקה היוצאת
 ממאגר גדלה. תופעה זו ניתנת להבחנה בכל סוג של הידרוגרף ובכל סוג של מברץ. למשל עבור
 הידרוגרף מס' 1 ומברץ 3×3 מ', ושיפוע משתנה מ-0.005 עד
 0.015 אז ההפרש בין הספיקות שווה ל- 20 מ"ק/שנייה.
 - עבור אותו הידרוגרף ואותם שיפועים עם מברץ 4×5 מ' הפרש הספיקות שווה
 ל- 20 מ"ק/שנייה.
 - ניתן לראות בכמה גדלה הספיקה באותו הידרוגרף כאשר רק שטח המברץ משתנה.
 בממוצע יחס זה שווה ל- $1.41 = 120/85$.
 - עבור הידרוגרף מס' 2 נבצע את אותה אנליזה. כאשר משתמשים במברץ 3×3 מ' הספיקה היוצאת
 מהמאגר גדלה. מה שמאפשר לראות תופעה זו בכל סוג של מברץ. למשל עבור הידרוגרף מס' 2
 ומברץ 3×3 מ', הפרש הספיקות שווה ל- 10-100. לשיפוע תחתית גדול מ-0.05 עד-0.015.
 - עבור הידרוגרף מס' 2 עם מברץ 4×5 מ' הפרש בין הספיקות
 שווה ל- 25 = 125-100, בתנאי ששיפוע התחתית בתחום מ-0.005 עד-0.015.

השייה עבור מברצ 3*3 מ' (מאגר מס' 4)



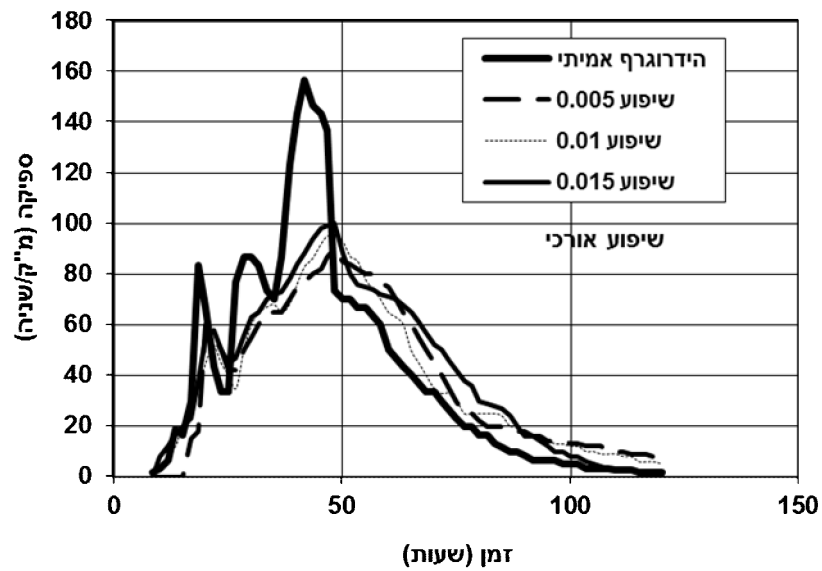
איור 4.30

השייה עבור מברצ 4*5 מ' (מאגר מס' 4)



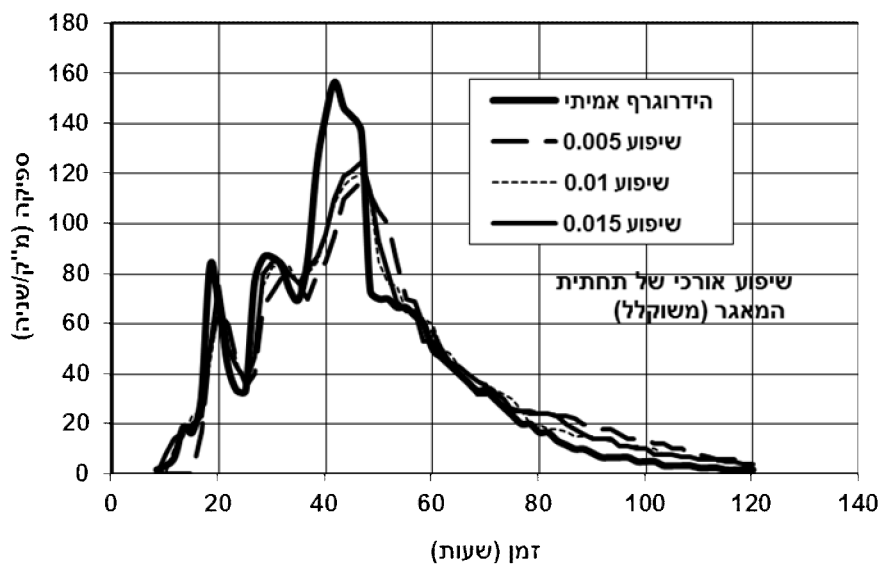
איור 4.31

השייה עבור מברץ 3*3 מ' (מאגר מס' 4)



איור 4.32

השייה עבור מברץ 4*5 מ' (מאגר מס' 4)

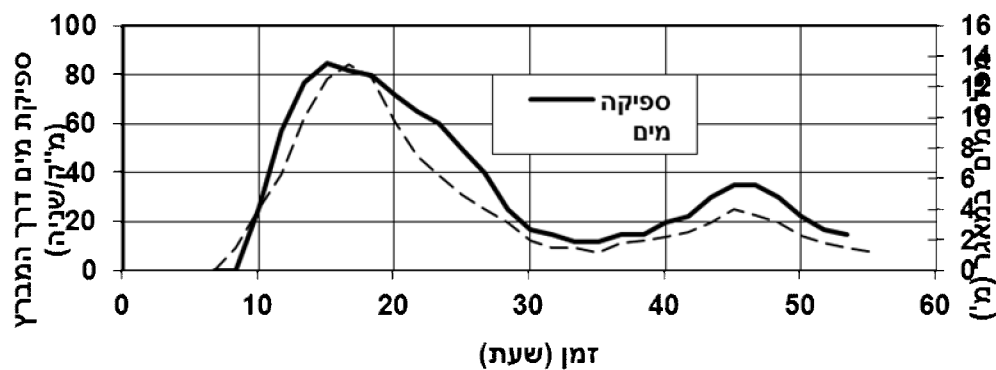


איור 4.33

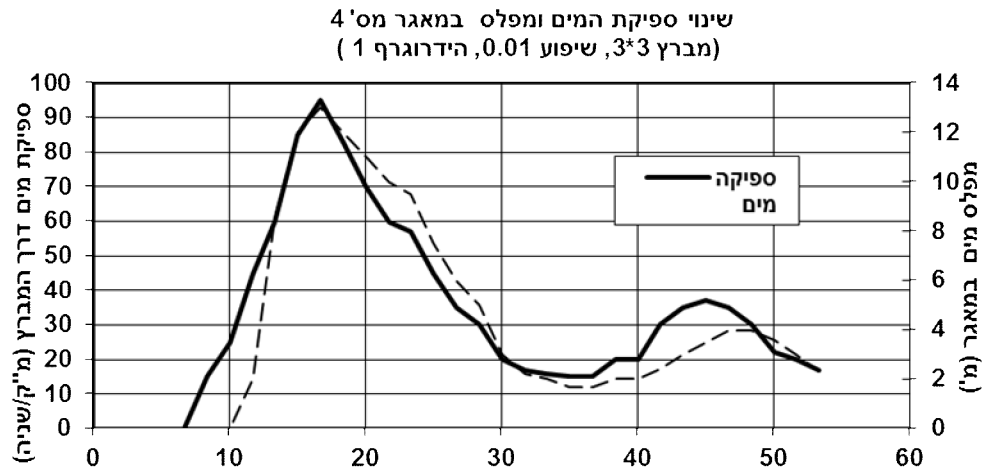
טבלה 4.5 (עבור מודל מס' 3)

סוג הידרוגרף עבור מברצים שונים	שיפוע	ספיקה שיא הנכנסת (1%) מ"ק/שנייה	נפח גאות (1%) מ"ק	ספיקה שיא היוצאת (1%) מ"ק/שנייה	הפרש בין ספיקת שיא הנכנסת לבין ספיקה היוצאת %	הפרש בין ספיקת שיא הנכנסת לבין ספיקה היוצאת מ"ק/שנייה
הידרוגרף מס' 1 מברץ 3*3	0.05	230	8,000,000	85	63	145
	0.01	230	8,000,000	95	58.6	135
	0.015	230	8,000,000	105	54.3	125
הידרוגרף מס' 1 מברץ 4*5	0.05	230	8,000,000	100	56.5	130
	0.01	230	8,000,000	110	52.2	120
	0.015	230	8,000,000	120	47.8	110
הידרוגרף מס' 2 מברץ 3*3	0.05	160	17,000,000	90	43.7	70
	0.01	160	17,000,000	95	40.6	65
	0.015	160	17,000,000	100	37.5	60
הידרוגרף מס' 2 מברץ 4*5	0.05	160	17,000,000	117	26.8	43
	0.01	160	17,000,000	120	25	40
	0.015	160	17,000,000	125	21.8	35

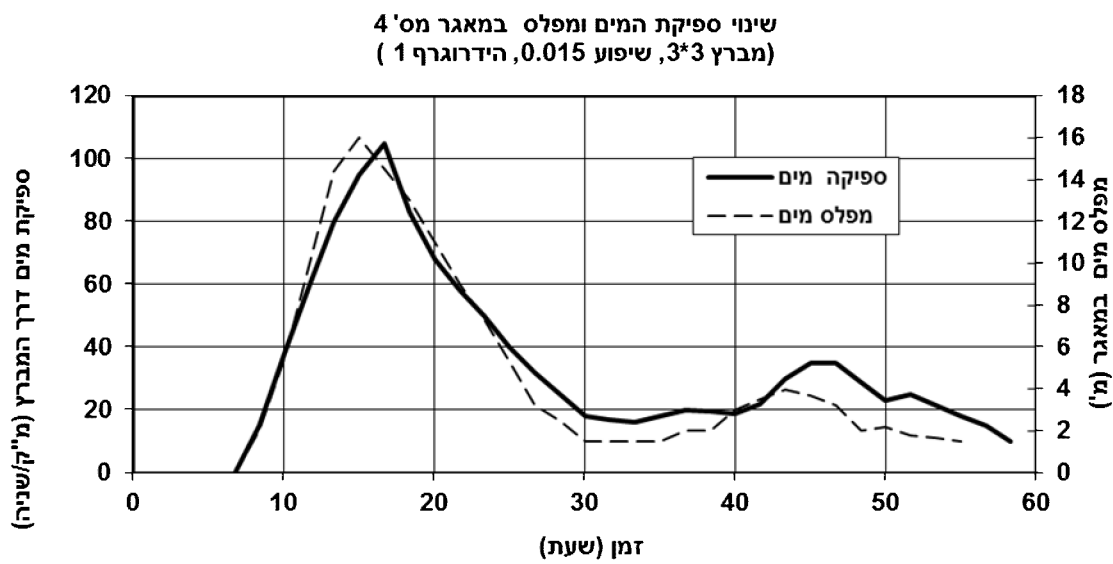
**שינוי ספיקת המים ומפלס במאגר מס' 4
(מברץ 3*3, שיפוע 0.005, הידרוגרף 1)**



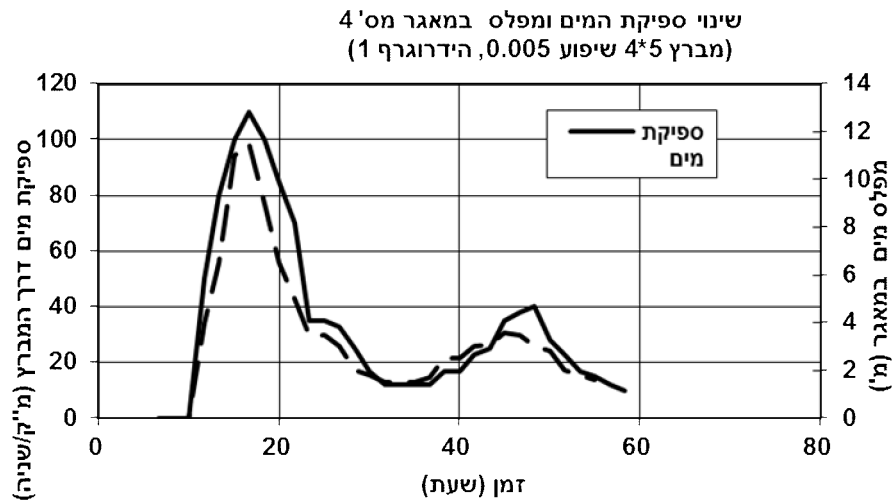
איור 4.34



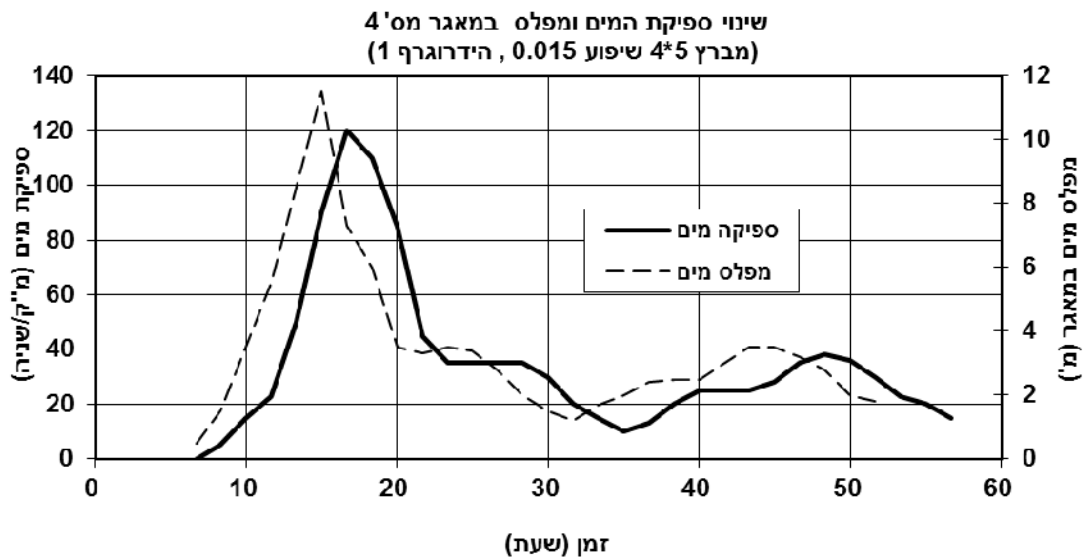
איור 4.35



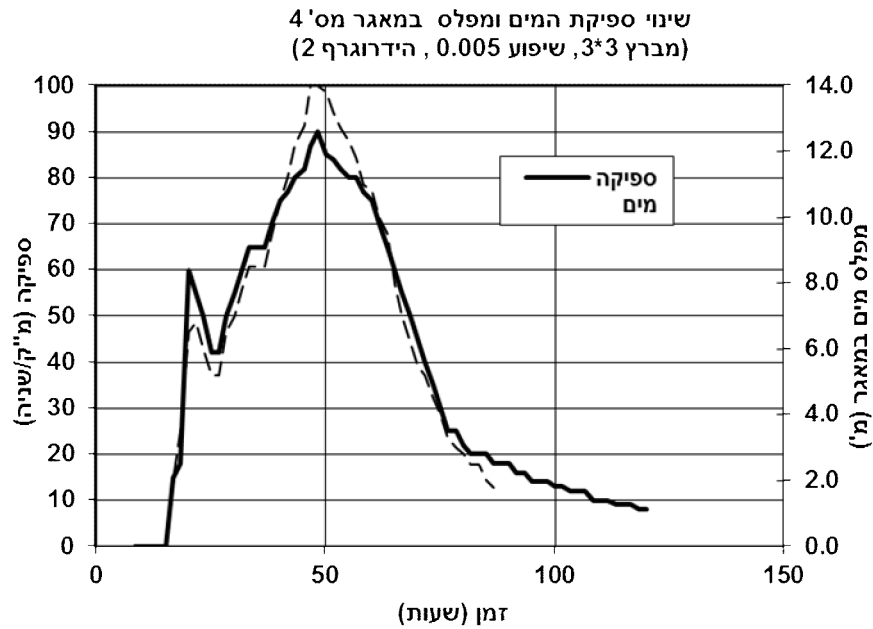
איור 4.36



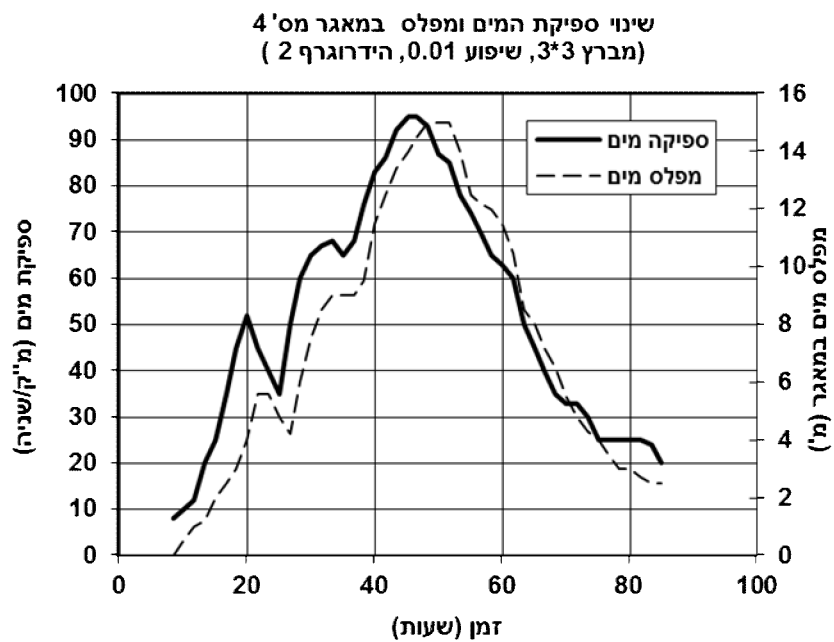
איור 4.37



איור 4.38

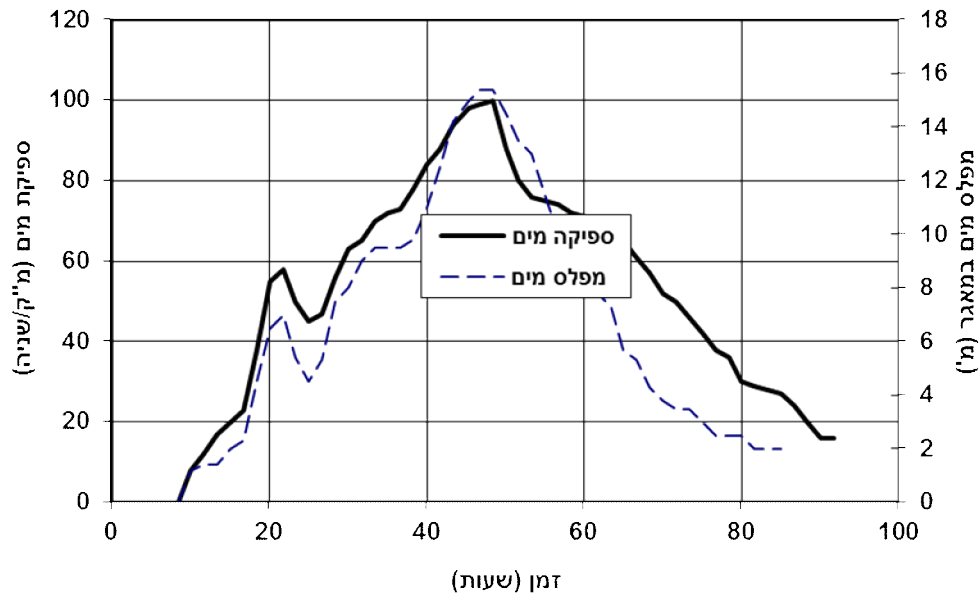


איור 4.39



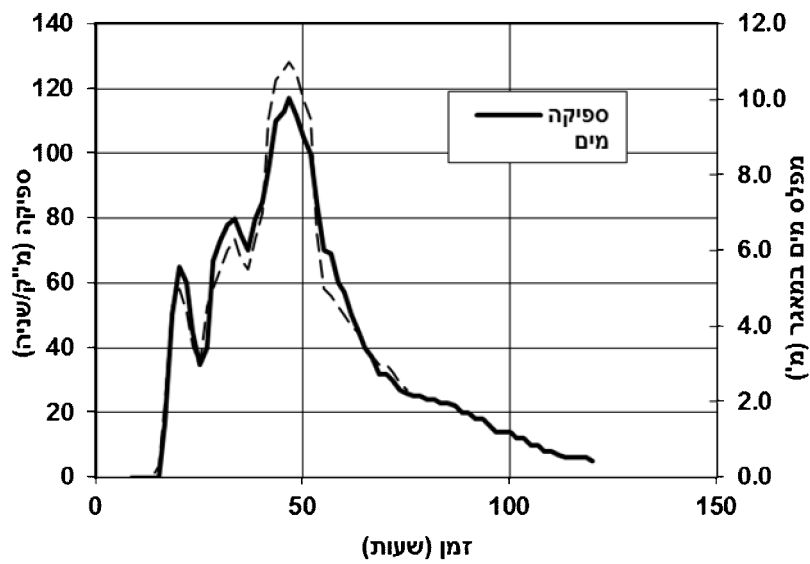
איור 4.40

שינוי ספיקת המים ומפלס במאגר מס' 4
(מברץ 3*3, שיפוע 0.015, הידרוגרף 2)



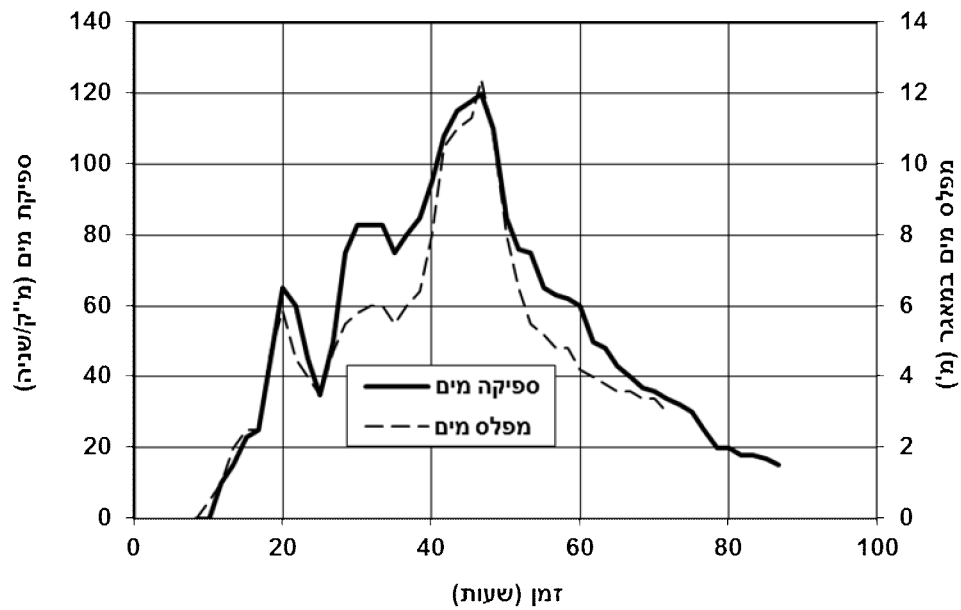
איור 4.41

שינוי ספיקת המים ומפלס במאגר מס' 4
(מברץ 4*5, שיפוע 0.005, הידרוגרף 2)



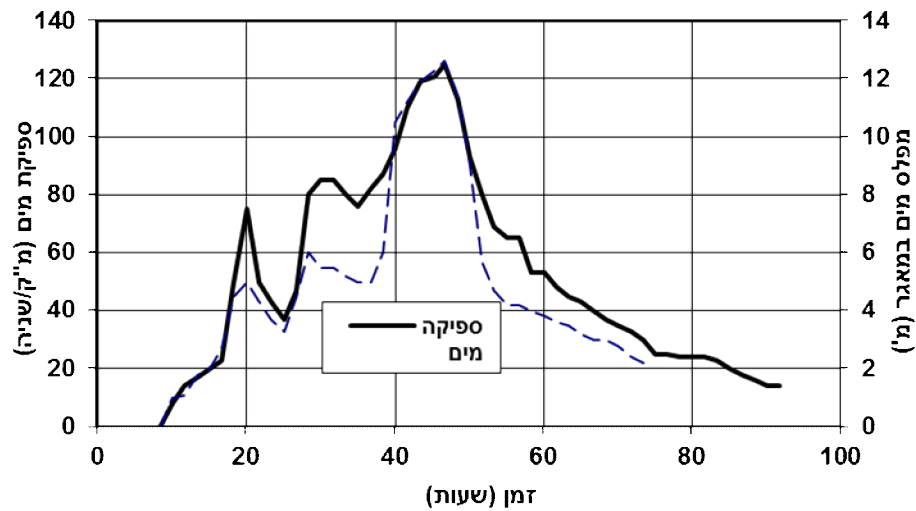
איור 4.42

שינוי ספיקת המים ומפלס במאגר מס' 4
(מברץ 4*5, שיפוע 0.01, הידרוגרף 2)



איור 4.43

שינוי ספיקת המים ומפלס במאגר מס' 4
(מברץ 4*5, שיפוע 0.015, הידרוגרף 2)



איור 4.44

טבלה 4.6 (עבור מודל מס' 3)

מקדם תיקון של מעביר k	נפח המאגר מ"ק V_{st}	ספיקה שיא היוצאת (1%) מ"ק/שנייה Q_{out}	נפח גאות (1%) מ"ק V_r	ספיקה שיא הנכנסת (1%) מ"ק/שנייה Q_r	שיפוע	סוג הידרוגרף עבור מברצים שונים
2.03	1990000	85	8,000,000	230	0.05	הידרוגרף מס' 1 מברץ 3*3
1.97	1490000	95	8,000,000	230	0.01	
1.89	1080000	105	8,000,000	230	0.015	
1.89	1400000	100	8,000,000	230	0.05	הידרוגרף מס' 1 מברץ 4*5
		110	8,000,000	230	0.01	
1.53	1630000	120	8,000,000	230	0.015	
1.38	3790000	90	17,000,000	160	0.05	הידרוגרף מס' 2 מברץ 3*3
1.34	3420000	95	17,000,000	160	0.01	
1.36	2510000	100	17,000,000	160	0.015	
1.19	2180000	117	17,000,000	160	0.05	הידרוגרף מס' 2 מברץ 4*5
1.22	1350000	120	17,000,000	160	0.01	
1.2	1000000	125	17,000,000	160	0.015	

ניתן לקחת מקדם תיקון ממוצע. למשל עבור הידרוגרף מס' 1 ומברץ 3*3 מ' - $k = 1.96$.
עבור הידרוגרף מס' 1 ומברץ 4*5 מ', מקדם תיקון שווה $k = 1.71$. יחס בין המקדמים אלה שווה

$$\text{ל-} \frac{1.96}{1.71} = 1.14. \text{ עבור הידרוגרף מס' 2 ומברץ 3*3 מ', מקדם תיקון שווה ל-} k = 1.36.$$

עבור הידרוגרף מס' 2 ומברץ 4*5 מ', מקדם תיקון שווה ל- $k = 1.2$. יחס בין המקדמים אלה שווה

$$\text{ל-} \frac{1.36}{1.2} = 1.14. \text{ מכאן נובע שהיחס בהידרוגרפים שונים נשאר קבוע ושווה}$$

כמעט ליחסי ספיקות באותם תנאים. בדיקת התאמת החישובים והניסויים שבוצעו מורה שההבדל הוא לא גדול מ-6%.

4.4 מסקנות

- עשינו שלושה מודלים של מאגרי מים בצורה ובנפח שונים.
- בוצעו מספר רב של ניסויים עבור המודלים הנתונים לבדיקה במעבדה, בתנאים שונים.
- השתמשנו בשני סוגי הידרוגרפים אמיתיים, הנמדדים בשטח, לביצוע ניסויים.

- קיבלנו תוצאות ניסיוניות: כאשר שיפוע תחתית המאגר גדול יותר אז הספיקה היוצאת מהמאגר גם גדולה יותר. גודל השטח המברץ משפיע על הספיקה היוצאת מהמאגר
- הספיקה היוצאת מהמאגר גדולה יותר עבור מאגר צר יותר, אפילו אם נפח המאגר זהה. מכאן נובע שהספיקה היוצאת מהמאגר תלויה בגובה מים בתוך המאגר.
- קיבלנו מקדם של צורת המאגר, שמאפשר לתכנן מאגרים באופן מדויק. למשל השווה בין מודל מס' 1 לבין מודל מס' 3 עבור הידרוגרף מס' 1 ומברץ 3×3 מ', מקדם צורת המאגר משתנה מ-
 ○ 2.77 (ספיקה 57 מ"ק/שנייה) ל – 2.03 (ספיקה 85 מ"ק/שנייה). מכאן נובע שעבור מאגר
 - צר מקדם התיקון קטן יותר, וספיקה היוצאת מהמאגר גדולה יותר.
- קיבלנו משוואה לחישוב הספיקה המכסימלית היוצאת מהמאגר.
- קיבלנו יחסים בין המודלים, שמאפשרים לבצע תכנון מאגרים באופן מדויק יותר.

מקורות

1. Ben-Zvi, A., (1993) Distribution of flood volumes beyond design discharges. Eng. Hydrol (ed. C.Y. Kuo), ASCE, San Francisco, CA USA, pp. 97-102.
2. Ben-Zvi, A., (1996) Prediction of rare inundation volumes of runoff. Proc. VII'th IAHR Int. Symp. Stochastic Hydraulics (eds. K. Tickle et al.), Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 349-356.
3. Dietrich K., (2000) Stormwater conveyance modeling and design, Heastad Press CT USA.
4. Ettema R., (2000) Hydraulic Modeling, Concept and Practice, ASCE
5. Hamill L., (2001) Understanding Hydraulics, Palgrave New York.
6. Iowa Stormwater Management (2008) Detention Storage Design, Version 2; December.
7. Li J. and McCorquodale A. (1999). "Modeling mixed flow in storm sewers". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 125, N. 11, 1170-1180.
8. Manuals and Report on Engineering Practice No. 97.
9. Mays L. W., (2001) Stormwater collection systems design handbook, McGraw-Hill.
10. McCuen R. H., (1998) Hydrologic Analysis and Design, Prentice Hall, New Jersey
11. Seybert T. A., (2006) Stormwater Management, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey
12. Shaw E.M., (1994) Hydrology in Practice, by Stanley Thomas Ltd.
13. Walski T.M., Bernard T. E., (2004) Computer Applications in Hydraulic Engineering. Heastad Press CT USA.
14. משה צ'וברוצקי (2009) מאגרי גיא מדריך ישראלי (כתב יד).
15. פושמן, א., לור, ה., (1995) מודל אופטימיזציה-סימולציה ככלי לתכנון ותפעול מאגרים בנגב, הנדסת מי, מס, 20 'עמודים 31-34.
16. שבנוב א.ד. (1977) "מאגרי גיא במשק החקלאי "הוצאה לאור" קולוס "מוסקווה 13 (Russian). "מטודולוגיה מלמדת לסטודנטים-לתכנון מערכות מאגרי גיא", מכון להידרוטכניקה ומילורציה, נובצ'רקססק. 1970, פרופסורים: פדיצ'קין, אבטונומוב, וולקוב



מ.מ. (1997) מהנדסים יועצים
"דרום"



M.M. CONSULTING ENGINEERS



"SOUTH"



פרויקט מס' 303

נספח 2

המלצות להנחיות לתכנון מאגרים בכניסה לגשרים ולמעברי מים

ינואר 2011

ערך : אינג' משה צ'וברוצקי

במסגרת מחקר "השהיית זרימה באגמים בכניסה לגשרים ולמעברי מים"

עבור : מעצ – החברה הלאומית לדרכים בישראל בע"מ

א. כללי :

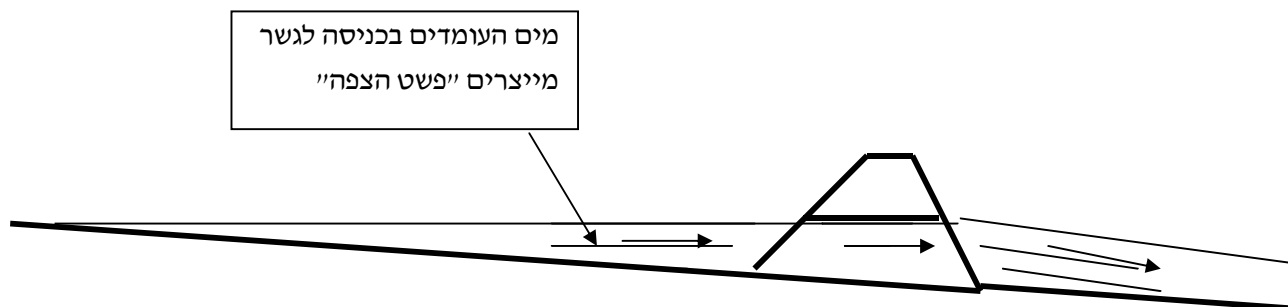
1. כביש חוצה נחל מהווה סכר לכל דבר שמגביל את הזרימה החופשית בנחל. גשר או מעביר מים מאפשר למים לזרום אבל בקצב איתי יחסית ועל כך גורם להתרוממות המפלס בכניסה לגשר – עומד מים בכניסה .
2. עומד המים בכניסה לגשר בהתאם לתנאים הטופוגרפיים יוצר פשט הצפה המהווה אגם מים זמני שמהשה את הזרימה ומקטין על כך את הספיקה במורד .
3. **מוצע להוציא הנחיות מעצ בנושא " השהיית זרימה בכניסה לגשרים, למעבירי מים, לראשי תעלות ניקוז ובמקומות אחרים מסוג זה " .**
ההנחיות יבטאו את דרישת מעצ לתכנן מתקני העברת מי נגר בהתחשב עם תופעת ויסות הנגר העילי הנובעת מצורה טופוגרפית קיימת במקום הפרויקט , בדרך כלל לא יכתיבו למתכנן לתכנן חפירות למאגרי מים ואמצי אגירה אחרים בכניסה לגשרים .
4. **הערכת הפרמטרים של השהיית זרימה והמקטינה את מימדי הגשרים ו/או מעבירי מים ייעשה על ידי מתכנן ניקוז .** הבסיס להערכות הנ"ל יהיה סקר הידרולוגי הכולל ספיקות תכן , נפחי גיאוויות והידרוגרפים עפ"י הנחיות מעצ להכנת סקרים הידרולוגיים .
5. **ההערכות והחישובים ייעשו בשלבים המוקדמים של תכנון , בתכנון המפורט ייעשו עדכונים על בסיס מדידות טופוגרפיות מדויקות .**

קריטריון הראשון להצעת ההנחיות :

סוללות כבישי מערכת בינעירונית לא יתוכננו כסוללות אזורי איגום של תהליך השהיית מי נגר עילי, כל ההגנות ייעשו מעבר לגופן של הסוללות הנ"ל .

ב. שלב תכנון ראשוני ומוקדם :

1. עם קבלת החומר הראשוני ממנהל הפרויקט או ממתכנן מוביל, **מתכנן ניקוז יאתר את המקומות בהם צפויה להתרחש תופעת השהיה בכניסה למעבירי מים וגשרים .** הערכת המצב תיעשה על בסיס חישובים הידראוליים רגילים בהם ייקבע עומד המים בכניסה לגשר המתאים לכושר ההולכה שלו .
2. **איתור התופעה שלעיל ייעשה בלימודי הרקע הטופוגרפי של מיקום הגשר ולרבות במעלה, מקום זה במקרים מסוימים מהווה פשט הצפה זמני המלווה את השיטפונות העזים .**

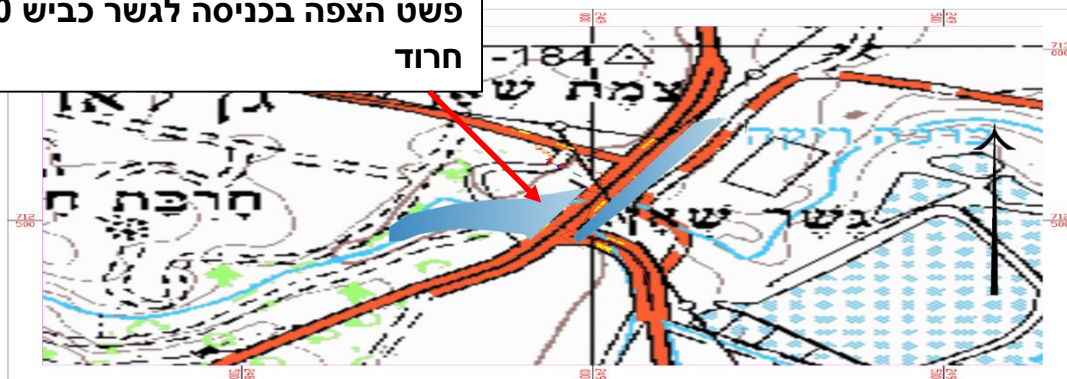


3. המתכנן יסמן את גבולות פשט ההצפה בהתאם לתנאים שלעיל ויעריך את נפחו הטופוגרפי של אגם ההצפה.

יוגדר טיב המאגר (צורת פשט הצפה) מבחינת יחס אורך/רוחב :

- א. מאגר "קומפקטי" עם יחס אורך /רוחב פחות מ- 3 ,
- ב. מאגר בינוני – עם יחס מ-3 עד 4.5 ,
- ג. מאגר ארוך וצר – עם יחס יותר מ- 4.5 , כאשר רוחב המאגר ייקבע כרוחב משוקלל של פני ההצפה בחתכים כל 100 מ' לאגמים ארוכים מ- 1 קמ', כל 40 מ' לאגמים קצרים יותר , אורך המאגר ייקבע כ- 85% מאורך פשט הצפה .

פשט הצפה בכניסה לגשר כביש 90-נחל חרוד



4. קביעת הידרוגרפים תכן תיעשה עפ"י הסקר ההידרולוגי שנעשה לפי הנחיות מעצ וכולל ספיקות התכן, נפחי הגיאומטריות והידרוגרפים למקומות מיעודים. לצורך המשך התכנון ייקבעו 2 הידרוגרפים : "חד וקצר" (הידרוגרף סתיו) ו"ארוך ומתון" (הידרוגרף חורף) , כאשר הראשון יהיה בעל ספיקת תכן והשני- בעל נפח תכן עם ספיקה קטנה יותר. למשל , אם להידרוגרף "חד וקצר" נקבעה ספיקת תכן נקבעה לפי 1% הסתברות אז להידרוגרף "ארוך ומתון" תקבעה ספיקה לפי 2% (או-5%) הסתברות לפי שיקול דעת ההידרולוג .

5. המתכנן יבדוק ויקבע כושר ההולכה של הגשר כמקביל את הספיקה הנכנסת :

- יותר מ- 50% וזה בתנאי זרימה עם עומד מים מרבי התואם לפני מיסעת הדרך מעל הגשר ,
- פחות מ- 50% בתנאים הנ"ל .

6. המתכנן ישווה בין נפח הגיאומטריות לבין הנפח הטופוגרפי , במקרה של התאמה ביניהם (החל

מ-15% של הנפח הטופוגרפי כלפי נפח הגיאות) המתכנן יעשה הערכה ראשונית של הספיקה המוקטנת עפ"י נוסחת קוצ'רין עם מקדמים המומלצת במחקר זה, או לפי כל שיטה אחרת העונה על דרישות וימליץ על המשך הבדיקה בשלב תכנון המפורט :

$$Q_{out} = (1 - k V_{st} / V_r) Q_r \quad \text{כאשר:}$$

V_{st} - נפח המאגר, V_r - נפח גאות, Q_{out} - ספיקה המוקטנת היוצאת ממאגר,

Q_r - ספיקה מכסימלית של הידרוגרף, k - מקדם תיקון של צורת המאגר עפ"י סעיף 3.1.2 שבמחקר

מקדמי תיקון לנוסחת "קוצ'רין" עפ"י צורת המאגר ואופיו של הידרוגרף נכנס

הידרוגרף "קצר וחד" (הידרוגרף מס' 1 בדוח המעבדתי) עם ספיקה מרבית		הידרוגרף "ארוך ומתון" (הידרוגרף מס' 2 בדוח המעבדתי) עם נפח גיאות מרבי		טיב המאגר
הגבלת ספיקה נכנסת ע"י מברץ תחתון פחות מ-50% (מברץ 3X3 בדוח מעבדתי)	הגבלת ספיקה נכנסת ע"י מברץ תחתון-יותר מ-50% (מברץ 5X4 בדוח מעבדתי)	הגבלת ספיקה נכנסת ע"י מברץ תחתון פחות מ-50% (מברץ 3X3 בדוח מעבדתי)	הגבלת ספיקה נכנסת ע"י מברץ תחתון יותר מ-50% (מברץ 5X4 בדוח מעבדתי)	
2.77-2.36 *	2.33-2.13 *	1.58-1.55 *	1.41-1.37 *	"בינוני" (מודל-1 בדוח המעבדתי) עם יחס אורך/רוחב מפי 3 עד פי 4.5
2.56-2.2 *	2.08-1.73 *	1.55-1.43 *	1.32-1.22 *	"קומפקטי" (מודל-2 בדוח המעבדתי) עם יחס אורך/רוחב פחות מפי 3
2.03-1.89 *	1.89-1.53 *	1.38-1.34 *	1.22-1.19 *	"ארוך" (מודל-3 בדוח המעבדתי) עם יחס אורך/רוחב יותר מפי 4.5

* בטבלה הנ"ל המקדמים משתנים לפי שיפוע אורכי של המאגר :

- למודל מס' 3 עם שיפוע אורכי 0.05 עד 0.01 ,
 - למודל מס' 2 עם שיפוע אורכי 0.01 – 0.025 ,
 - למודל מס' 1 עם שיפוע אורכי 0.002 - 0.01
- הערה :** במקרים של שיפועים שונים ניתן להשתמש באקסטפולציה .

ג. שלב תכנון מפורט :

1. **בשלב המפורט ייעשה עדכון הפרמטרים שנבדקו בשלב המוקדם וזה על בסיס מדידות טופוגרפיות מפורטות . יערכו ויעדכנו הפרמטרים שחושבו בשלב המוקדם במספר שיטות וביניהן :**
 - **שיטת קוצ'רין** (המוצעת לשלב המוקדם) עם מקדמים – לפי מחקר מעצ 2011 ,
 - **HYDROROUT** -
 - **HEC RAS** -
 - **שיטה אחרת** בתאום עם רפרנט מקצועי של מעצ .
2. **במקרים של מתקנים הידראוליים מורכבים עם פתחי זרימה שאינם אחידים לאורך הזרימה וספיקות תכן גדולות מ- 150 מ"ק/שנייה המתכנן ישתמש בשתי שיטות לפחות להערכת הספיקה המוקטנת .**
3. **במקרים דלעיל עם ספיקות תכן יותר מ- 250 מ"ק/שנייה יישקל צורך בבדיקה הידראולית מעבדתית .**

ד. אחזקת המאגרים בכניסה לגשרים

1. **אחזקת המאגרים בכניסה לגשרים מתחלקת :**
 - אחזקת שטחים- פשטי הצפה ,
 - אחזקת מבנים גשרים והסוללות הסמוכות .
 - אחזקת גשרים והסוללות תיעשה בהתאם לנוהלי מעצ .
2. **אחזקת שטחים- פשטי ההצפה בכניסה לגשרים כולל סוללות סמוכות , בין היתר תכלול עבודות נוספות הבאות :**
 - 2.1 **מעקב על עבודות בנייה בגבולות ההצפה ולרבות על עבודות העפר אשר נועדו לשנות את נפחי קיבולת ההצפה . במקרים של עבודות עפר מסיביות מעצ תדרוש מהיזם תוכניות ביצוע לבדיקה . מעצ תתנגד לכל עבודות עפר המשנות והמקטינות את נפחי הקיבולת בגבולות פשט ההצפה אשר יעלו על מספר אחוזים בודדים מנפח הקיבולת .**
 - 2.2 **מעצ תערוך סקרים גיאוטכניים לבדיקת יציבותן של סוללות הכבישים בקרבת גשרים מעליהן נשנות (עומדות) המים בזמן שיטפונות .**

מעצ תפעול בהתאם לסיכומי הסקרים שלעיל, תייצב את הסוללות בעבודות מילוי עפר או אבן ברגלי הסוללות, התקנת נקזי בוחן וכ"ד.

2.3 מעצ תקבל חוות דעת בטיחותית בהקשר לאמצעי הבטיחות הנדרשים באזור בו מתאפשרת עמידת מים בעומקים גדולים. מעצ תפעול בהתאם לסיכומי חוות הדעת.

ה. סקרי סיכונים

1. לצורך איתור מוקדם של בעיות הרס גשרים וקטעי כבישים לכל הגשרים עם ספיקות תכן גדולות יחסית במסגרת הטיפול ההתחלתי יש לבצע סקרי סיכונים סטנדרטיים ראשוניים.

הספיקות הגדולות שלעיל לפי אזורים :

- צפון הארץ, שפלה ומישור החוף – החל מ- 250 מ"ק/שנייה ,

- אזור הנגב והדרום – החל מ- 150 מ"ק/שנייה .

2. סקרי הסיכונים באזורי פשטי הצפה יטפלו במצבם של גשרים והסוללות הסמוכות אליהם בהתאם לדרישות אחזקת גשרים מעצ ולרבות אלו שצוינו בסעיף ד' דלעיל.

Flood Control Appearance for Reservoirs nearby to Bridges & Culvert Inlets

FEBRUARY 2011

**Prepared by: M.M. CONSULTING ENGINEERS
"SOUTH"**

**For: MA'ATZ – Israel National Roads Company –
INRC LTD.**

Record / "Identity Card" of the project

Report No. (of INRC):		
Date:	Report Name: Flood Control Appearance for Reservoirs nearby to Bridges & Culvert Inlets	
	Authors: Chobrutsky Misha Leonid Grinis Uri Tzdaka	
INRC Contract No.: 4500010396	Contractor (Name & Address): M.M. CONSULTING ENGINEERS "SOUTH" Yarden str.29 Ramat Gan.Israel	
Report Type & Project Period: 15.09-30.10.2010 Final report		
Additional Notes: Final consideration of factors for amount/regulation estimating . Proposition to MATZ : instructions for design & parameters of projects that actually need laboratory tests		
Abstract: <p>1. Objectives: To propose instructions for design in the theme .In connection with this aid to propose design formulas & also the actual parameters of projects that need laboratory test to proceed the design works.</p> <p>2. Findings: The results of the previous stages.</p> <p>3. Recommendations: - instructions for design in the theme</p> <ul style="list-style-type: none"> - parameters of projects which actually need - laboratory tests - Propositions for maintenance - Proposition to proceeding the theme of report 		
Key Words: Design Hydrograph , Regulation storage volume, regulation coefficient		
No. of Pages: 127	Classification of Current Page Distribution:	Classification of Report Distribution:

