

## מנגנוני החידור למי תהום והערכת המילוי החוזר במסלע קרבונטי בכרמל

### סיור בכנס אי"ל

#### יובל ארבל, אוניברסיטת חיפה

#### תוכנית הסיור:

8:30-9:30 - בחניון כניסה לנחל אורן – הקדמה כללית וקצרה על הגאולוגיה והידרולוגיה של הכרמל; מטרות המחקר; התמקדות בניסויי הסמנים למערת אורנין.

9:45-10:15 - **תצפית מבית אורן** על אגן נחל אורן (30 דקות): התמצאות וסקירה של תחנות הניטור באגן: מהגשם, רטיבות הקרקע, המערות, המעינות, הקידוחים וזרימות האפיק; כמה מילים על שלבים בהתפתחות הנוף.

- שיקום היער אחרי שריפות, ד"ר נעמה טסלר, רשות הטבע והגנים;

10:15 - 11:15 - הליכה מסיבוב הכניסה לחוות משמר הכרמל עד **לעין אלון** (תחנה 3), ובריכת החדרת הסמנים (למי שמעוניין); - התמקדות בניסויי הסמנים למעיין.

11:15-12:15 - המשך הליכה במורד הנחל עד לתחנה ההידרומטרית במורד ה"אגם" (תחנה 4), הסבר על מדידות שם, איבודי התמסורת והקשר לחידור למי תהום ואירועי זיהומים בקידוח אורן – 5; - ניסוי הסמנים שם.

12:15-12:30 – סיכום

12:15-13:00 – ארוחת צהריים

#### הקדמה:

מטרת המחקר היתה להבין ולכמת את מנגנוני החידור ומרכיבי המילוי החוזר למי התהום. במהלך המחקר נבדקו קצבי החלחול, שינויים בשפיעה (ספיקה ו/או מפלס) ושינויים בתכונות המים במספר חלונות הידרולוגים וקני"מ מרחביים: מהגשם בפני השטח, הקרקע, טפטופי המערות, הנגר העילי, מעיינות שכבה ומי-התהום.

#### יעדי המחקר:

- הערכת החידור למי התהום ביחידות מסלע שונות וצומח אופייניות לכרמל, ובתגובה להתפלגות הגשמים לאורך השנה.

- הגדרת תנאי הסף והמתאם בין כמויות הגשם, ורטיבות הקרקע לשינויים בדרכי החידור ובמידת החידור למי-תהום -

- הבנת מנגנוני החלחול השונים בתוך הקרסטי

- הערכת מהירות חלחול למי תהום, בליתולוגיות ומורפולוגיות שונות ובתנאים הידרולוגים שונים במסלע קרבונטי.

**גאולוגיה:** הכרמל הינו בלוק אנטיקלינלי נטוי למערב ודרום מערב המוגבל בפאתו הצפון מזרחית בהעתק הכרמל-יגור, בפאתו הדרום-מזרחית הוא נוחת אל מתחת לסינקלינת מנשה וממערב הוא מכוסה בסלעי כורכר וחולות פלייסטוקניים לכרמל שתי יחידות סטרוקטורליות מרכזיות: 'הכרמל הגבוה' – לאורך ציר הקמר חיפה-עוספיה-מוחרקה; ו'הכרמל הנמוך', לאורך ציר הקמר זכרון יעקב-עופר. הכרמל הורם החל מהאוליגוקן ועד הפליוקן ע"י העתק הכרמל (בין ושש, 1980; שגב ושש, 2009), ובמהלך הפליסטוקן שיעור ההרמה היה קטן (משיח, 2010). הכרמל גם

חצוי שתי וערב ע"י מערכות שבירה צפופות היוצרות שינויים חדים בליתופאציאס (שגב ושש, 2009).

בלוק הר הכרמל בנוי בעיקר מסלעי משקע ימיים מגיל אלביאן עד טורון וביניהם יחידות של סלעים פירוקלסטיים בסיסיים (ה"טוף") – מחזורים וולקנו-סדימנטריים (שגב ושש, 2009). המסלע קרבונטי וכולל סלעים חדירים מחבורת יהודה כגון גיר, דולומיט וסלעים חדירים פחות כגון קירטון וחואר מהקנומן והטורון (קרץ 1959, קשאי, 1966). להלן תיאור של השכבות העיקריות הנחשפות באגן נחל אורן.

**אקלים:** ממוצע הגשם הרב-שנתי בתחנת בית אורן מ-1950 עד 2004 הוא 685 מ"מ/שנה. בתקופת המחקר 2004-2009 כמויות הגשם השנתיות היו 480-631 מ"מ/שנה – כלומר 70%-90% מהממוצע. שיעור ההתאיידות הפוטנציאלי השנתי מוערך בכ-1,600-1,500 מ"מ/שנה.

### הידרולוגיה :

התפתחות הנגר העילי מוגבלת כתוצאה מחלחול מרבית מי הגשם אל הקרקע והמסלע החדירים. אירועי זרימה מתפתחים כאמור רק אחרי כמויות סף מצטברות העולות על 120-150 מ"מ גשם, בתלות בצפיפות אירועי הגשם. בממוצע מתרחשים 1-2 אירועי זרימה בשנה ובשנים גשומות מהממוצע עד 7-8 שטפונות. מאידך, קיימות שנים שחונות בהן אין זרימות כלל. לרוב ספיקות השיא נמוכות מ-1 מ"ק/שני. שיעור הנגר העילי הממוצע הרב-שנתי נמוך ומגיע ל-0.3% אך עשוי להגיע בשנים ברוכות עד 4% (חורף 2001-02). (Wittenberg et al, 2007).

לעומת זאת, נפח הזרימה הכולל בחורף 2001/02 היה 840,000 מ"ק, ו-1 > מלמ"ק בחורפים של 1991/92 ו-1968/69. כאשר מגיעות זרימות אלה אל מישור החוף, הן גורמות לנזקי הצפה לישובי המרזבה או/אובדות אל הים. אירוע השיא בשנים האחרונות מה-12.2001-7-4 התקבל לאחר סופת גשם של 160 מ"מ. ספיקות השיא שנמדדו היו 12 מ"ק/שני בתחנת האגם, 17 מ"ק/שני בתחנת הגשר וכ-11 מ"ק/שני בתחנת הבוסתן. תקופת החזרה המוערכת של אירוע מסדר גודל זה היא 15 שנה. שיעור הנגר העילי הסופתי הגיע בסופה זו ל-14.5% ונפח הזרימה הסופתי כ-0.6 מלמ"ק. שנת 1991/2 עם 1200 מ"מ גשם הניבה 6 אירועי זרימה בנפח כולל של כמיליון מ"ק, וספיקת שיא של 20 מ"ק שניה. מפלס באר נחל אורן 5 עלה באותה שנה בכ-2.5 מ'. ספיקות השיא הסגוליות באגני ניקוז קטנים בכרמל (0.4-0.6 קמ"ר) עשויים להגיע לכדי 10 מ"ק/שניה/קמ"ר (גרתי וחובי, 1999).

**אקוות הקנומן-טורון בכרמל** בנוי סלעי גיר דולומיט וקרטון (חבורת יהודה). אקווה זו נחלקה בעבר לשתי יחידות משנה: תחתונה מגיל קנומן תחתון (דולומיט יגור) ועליונה מגיל קנומן-עליון וטורון הבנויה גיר וקרטון. בין שתי יחידות אלו חוצצות יחידות קירטוניות, וכן חוארים וטופים. בנוסף, מקובל היה לחלק את אקוות האגן המערבי באופן מרחבי לתת-אגנים שהגדול ביניהם הוא תת-אגן אורן-טירה (בוטבול ושכנאי 1979). מאידך, הסידוק האינטנסיבי יוצר קשר הידראולי מלא בין השכבות האקוויפריות השונות ותתי-האגנים (Guttman, 1998).

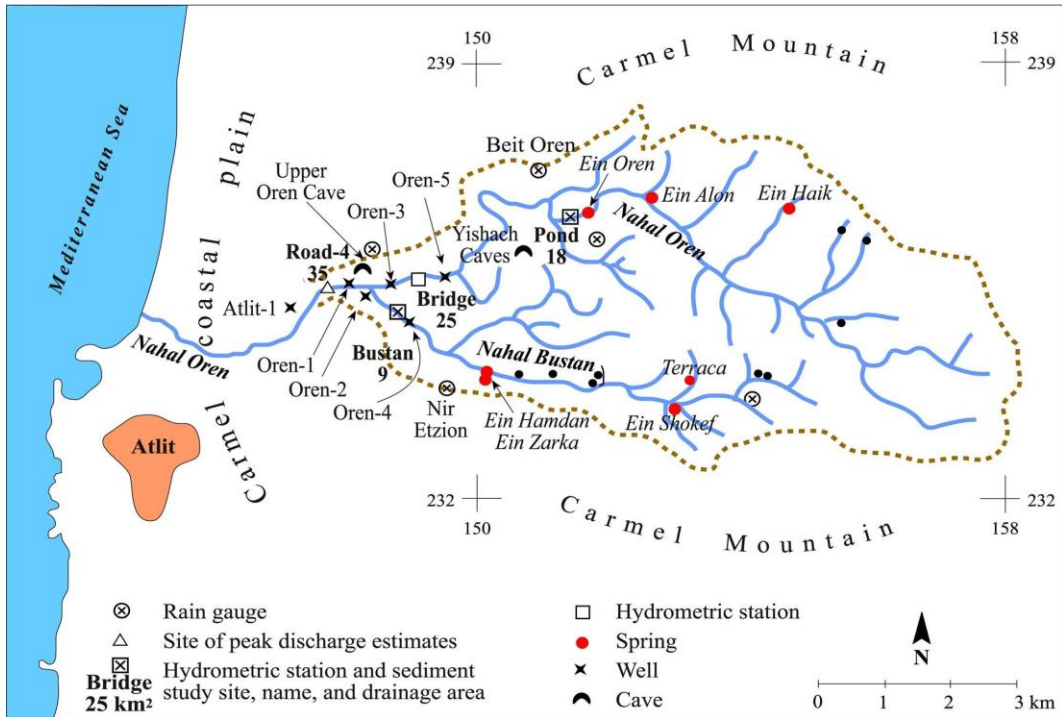
אקווה זו מאופיינת באיכות מים גבוהה: כ-70% מהמים הנשאבים הם במליחות נמוכה מ-250 מ"ג כלוריד לליטר, וזאת למרות שהמליחות המקסימלית באגן עלתה מ-230 מגכ"ל כלוריד בשנות ה-50 ל-400 מגכ"ל בסוף שנות השמונים (נציבות המים, 2004). מהאנליזות הראשונות, בשנים 1935-

1937 ועד שנות ה-50 המליחות בקידוחים בפתחת נחל אורן, היתה 140 עד-180 מג"ל ובסמוך לאזורי ההעשרה הייתה מליחות מי התהום 110 מג"ל (קידוח אורן-5; בוטבול ושכנאי, 1979). רמת החנקות הינה סביב 30 מג"ל, ובמגמת עליה. סך הכל מופעלות כ-25 בארות שעומקן 40-180 מ', וסך "פוטנציאל השאיבה" מכל האגן המערבי הוערך ל-21 מלמ"ק (תה"ל, 2007); אם כי, שאיבה בסדרי גודל אלו בעבר גרמה להמלחת הבארות, ולכן בשנים האחרונות סך השאיבה באגן הופחת לפחות מ-10 מלמ"ק בשנה. הספיקות של בארות נחל אורן הינן בתחום של 150-350 מ"ק/שעה. מבחני טרנסמיסיביות בבארות נחל אורן הניבו ערכים של 37,000 מ<sup>2</sup>/יום. השאיבה השנתית הממוצעת עמדה על כ-12 מלמ"ק בשנות ה-60, 15-16 מלמ"ק בשנות ה-70 וה-80 והצטמצמה שוב לכדי 11 מלמ"ק בשנות ה-90 לאחר הבצורות של השנים 1991-1989 (Guttman, 1998). בשל האוגר המוגבל של האקוה, תה"ל (2007) ואסף (2009), ממליצים להגביל את השאיבה בקידוחי נחל אורן ל-7 מלמ"ק בשנה ולפזרה לאורך כל השנה, ובכך להימנע מעליה במליחות.

#### מעריך המחקר:

המחקר נערך באגן נחל אורן (36 קמ"ר) לאורך 4 עונות הידרולוגיות 2004-08. אתרי הניטור כללו 9 תחנות גשם באגן וסביבתו, 4 פרופילים של רטיבות קרקע, 15 טפטופי מערות בשני אתרים בגיר מוחרקה (מערת אורנין) ודולומיט יגור (מערות יישח), 7 מעיינות, 3 תחנות הידרומטריות (נגר עילי) ו-6 קידוחים אל אקוויפר מי התהום של הקנומן-טורון בכרמל במוצא אגן נחל אורן. הניטור והדיגום על בסיס שבועי כלל, מוליכות חשמלית (EC), יונים עיקריים וטמפרטורה. בשני מקבצי טפטופי מערות נערך ניטור רציף של הספיקה באמצעות Tipping Buckets ובשני מעיינות ניטור רציף של מפלס המים, הטמפרטורה והמוליכות החשמלית באמצעות CTD-Diver. ניטור רטיבות הקרקע היה רציף לכל משך העונה. נערכו 5 ניסויים בעוקבים הפלורוצנטים Uranine ו-Naphtionate<sup>1</sup> ועם ברומיד (NaBr) במספר אתרים בפני השטח מעל לטפטופי המערה, במעלה לנביעות, ובאפיק הנחל אל מי התהום (הקידוחים מורד האגן). הניסויים אפשרו את חישוב מהירויות הזרימה בחלקים הקרסטיים הבלתי-רוויים של האקוויפר. הניסויים נערכו בתנאי גשם, ו/או שיטפון טבעיים בכדי לא לגרום לשינוי במנגנוני החידור ובקצב החידור.

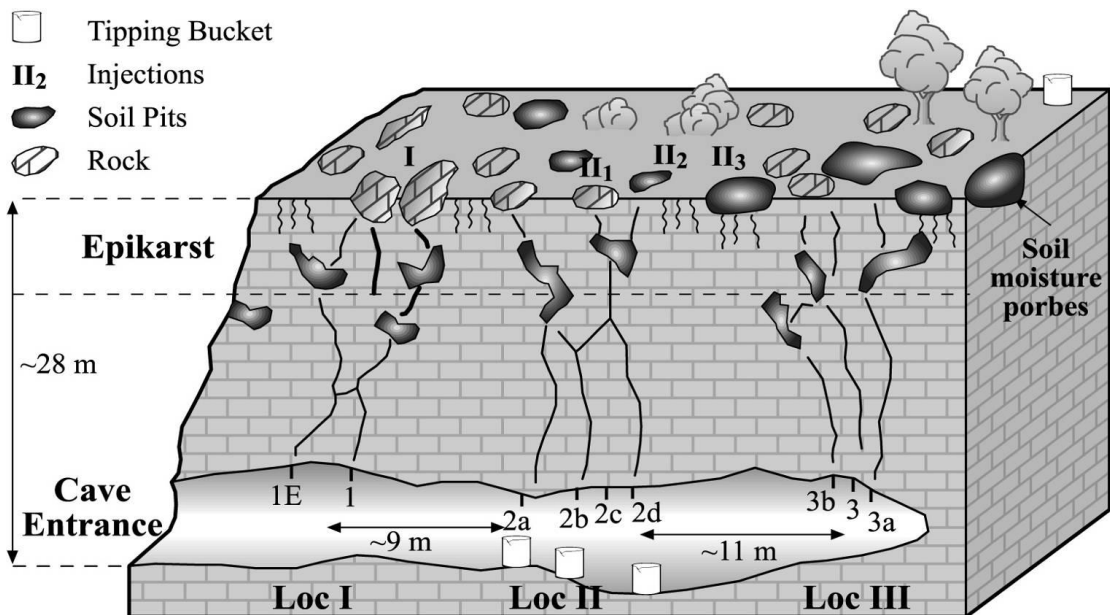
<sup>1</sup> העוקב הפלואורצנטי Uranine (Sodium-Fluorescein; C<sub>20</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>Na<sub>2</sub>), עובר עירור באורך-גל 491 nm ומקסימום החזר (Emission) ב-512 nm. יתרונותיו: מסיסות גבוהה (מעל 450 גר' לליטר), ויכולת זיהוי בריכוזים נמוכים במיוחד (עד 0.002 mg/m<sup>3</sup>). כמו כן, האוראנין מתפרק בסביבת מחמצנים חזקים, ומתפרק בתוך שעות ספורות עם חשיפתו לאור. רעילות: רק מריכוזים של 1000 מ"ג לליטר או יותר. (Flury and Wai, 2003; Kass, 1998). העוקב הפלואורצנטי Naphtionate (C<sub>10</sub>H<sub>8</sub>NSO<sub>3</sub>Na) עירור באורך-גל 320 nm ומקסימום החזר ב-420 nm. יתרונות: מסיסות גבוהה 250 g/L, רגישות לאור נמוכה יחסית וספיחתו לסלע וקרקע נמוכה ביותר. חסרונות: החזר באורך גל חופף לחומרים אורגניים טבעיים, ויכולת זיהוי נמוכה יחסית לאוראנין. ה-Naphtionate מאושר לשימוש לניסויים הדרולוגיים באזורי הזנה של מי תהום (מגל, 2006; Magal et al., 2008; Kass, 1998; Leibundgut and Wernli, 1988).



**איור 1:** אגן נחל אורן, המעיינות ותחנות הניטור

**תחנה 1 - פתחת נחל אורן - טיפוסים הידרולוגים של טפטופי מערות**

בשני האתרים: מערת אורנין ומערות וצנרי יישח הוגדרו 4 טיפוסים הידרולוגים של טפטופי מערות: 'רב-שנתיים', 'עונתיים', 'פוסט-סופתיים' ו'טפטופי עודפים', המשקפים, בהבדלים ביניהם, את מנגנוני הזרימה באפי-קרסט ובאזור המעבר בתוך הקרסטי הבלתי-רווי. שינויים בספיקת הטפטופים ובמליחותם משקפים את תרומת מנגנוני הדחיקה, והחידור בנתיבים מועדפים, בתנאי רוויה שונים.

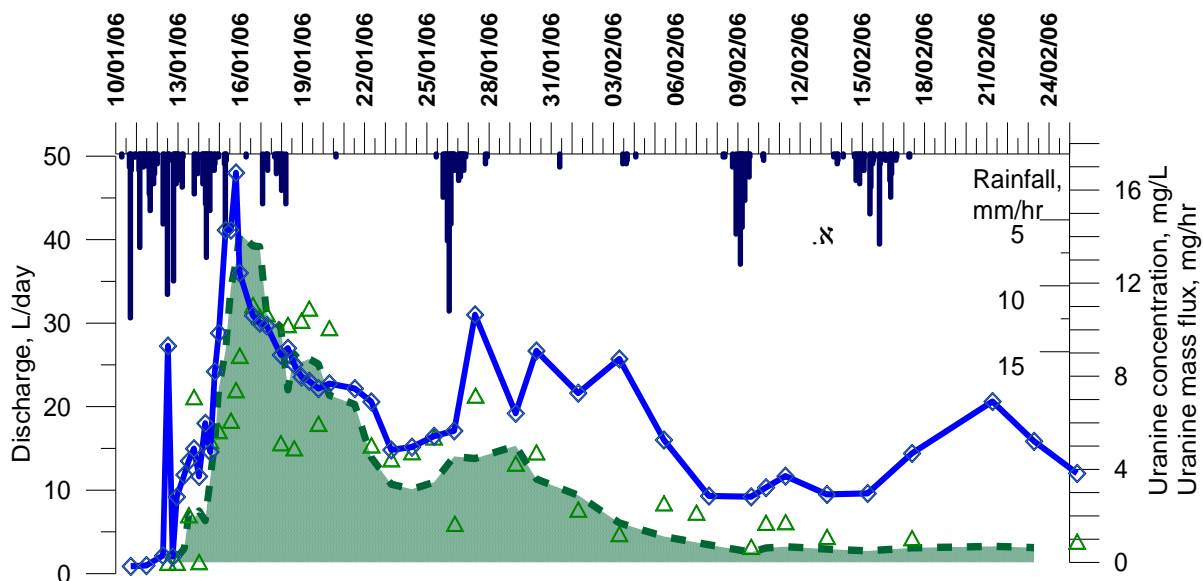


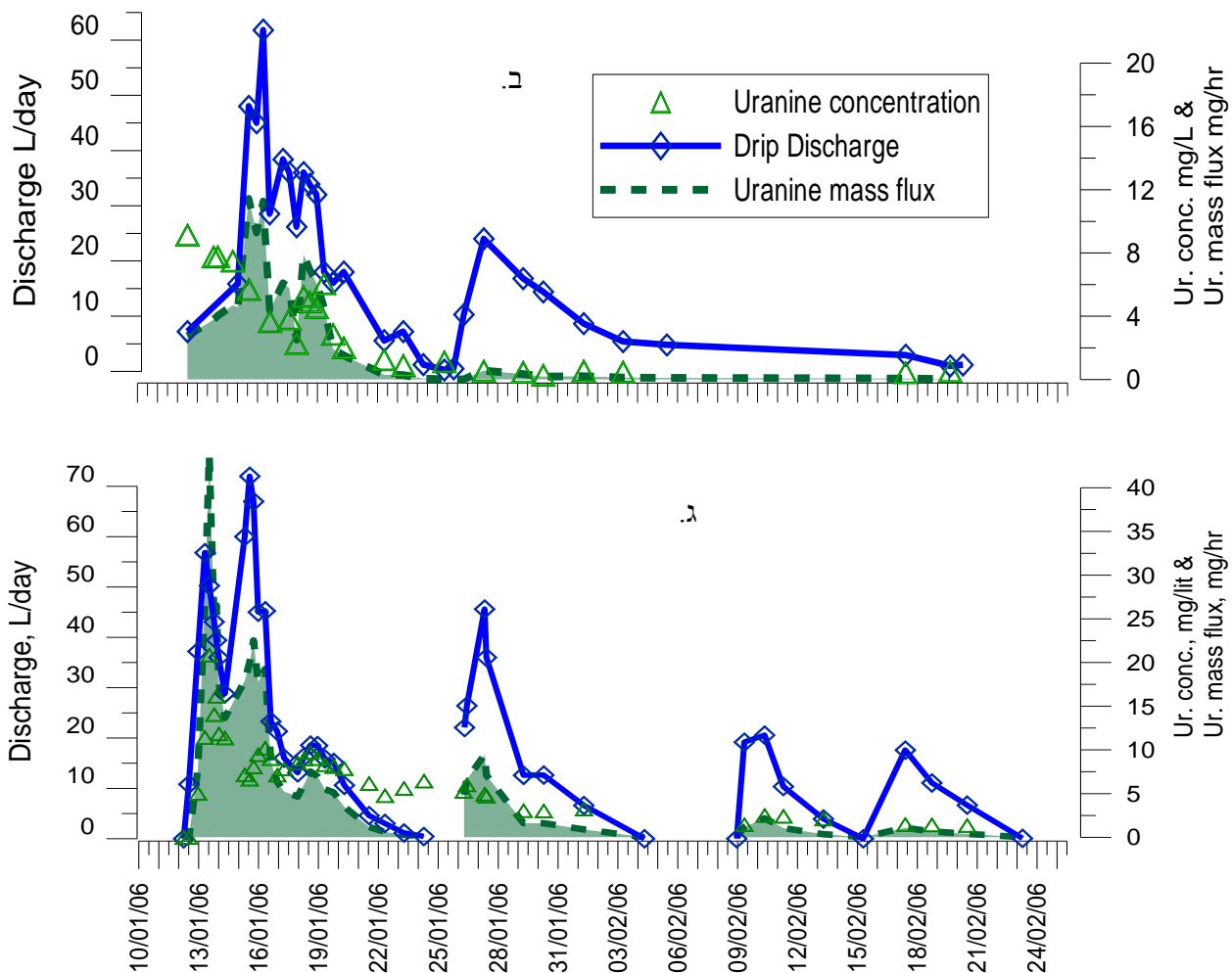
**איור 2:** שרטוט סכמטי של מערת אורנין: מיקום הטפטופים, מכשירי הניטור ואתרי החדרת הסמנים.

הטפטופים הרב-שנתיים מנקזים בעיקר את החלחול האיטי בסדקים הקטנים והתווך הנקבובי. עם זאת, ספיקתם וריכוזי הכלוריד שלהם מגיבים בתנודות לאחר אירועי גשם. שיעור (%) ונפח המים החדשים' בטפטופים השונים חושבו באמצעות הפרדת הידרוגרפים ב-EMMA על בסיס ריכוזי הכלוריד לאורך העונה, והמוליכות החשמלית בניסוי ההמטרה. בטפטופים הרב-שנתיים תרומת המים החדשים הגיעה ל-15-30% מנפח המים העונתי. לעומתם, בטפטופים העונתיים והפוסט-סופתיים שעור המים החדשים הגיע ל-70%. טפטופי-עודפים התחילו מאוחר בעונה לאחר שהניקוז מאזור ההזנה של הטפטופים הסמוכים להם עבר את יכולת הספיקה המרבית שלהם. בניסוי ההמטרה בכל הטפטופים המהירים - העונתיים, הפוסט-סופתיים וטפטופי העודפים, לפחות 50% מסך נפח המים בשבוע שלאחר ההמטרה היו 'מים חדשים', ובטפטופים הרב-שנתיים היו המים החדשים רק 26-33%.

ניתוח עקומי דעיכת הספיקה בטפטופים העונתיים והרב-שנתיים הוכיח שבדומה לדעיכה של שפיעת מעיינות קרסטיים - דעיכת ההידרוגרף מתרחשת ב-2-3 קבועי דעיכה המשקפים את מנגנוני החלחול בתווך הבלתי-רווי: דעיכה מהירה בתחילה (ימים עד שבועות ספורים) הנובעת מדעיכת מנגנון-הבוכנה (pulse-through) ומניקוז החידור המהיר בנתיבים מועדפים, ודעיכה איטית של מספר חודשים בהמשך המנקזת את רשת הסדקים הקטנים והתווך הנקבובי בחלחול איטי יותר. מקדמי הדעיכה של הטפטופים הפוסט-סופתיים וטפטופי העודפים היו קטנים מ-10 ימים, ובד"כ נמצא רק מקדם יחיד לדעיכתם.

מערכות אלה תלויות ובד"כ מזינות אחת את השנייה: רטיבות גבוהה יותר במערכת האיטית מאפשרת הזנה חלקית של מערכת החידור המהיר (הנתיבים המועדפים) בשלבי הדעיכה שלה, ודעיכתה מתארכת עד כדי מספר שבועות. לעומת זאת, לאחר אירוע גשם חריג ברטיבות ראשונית נמוכה, הדעיכה בספיקת הנתיבים המועדפים מהירה מאוד - שעות עד ימים, משמעיד על העדר הזנה עוקבת ורציפה של נתיבי החידור המהירים ממערכת הסדקים והמטריקס העוטפת.



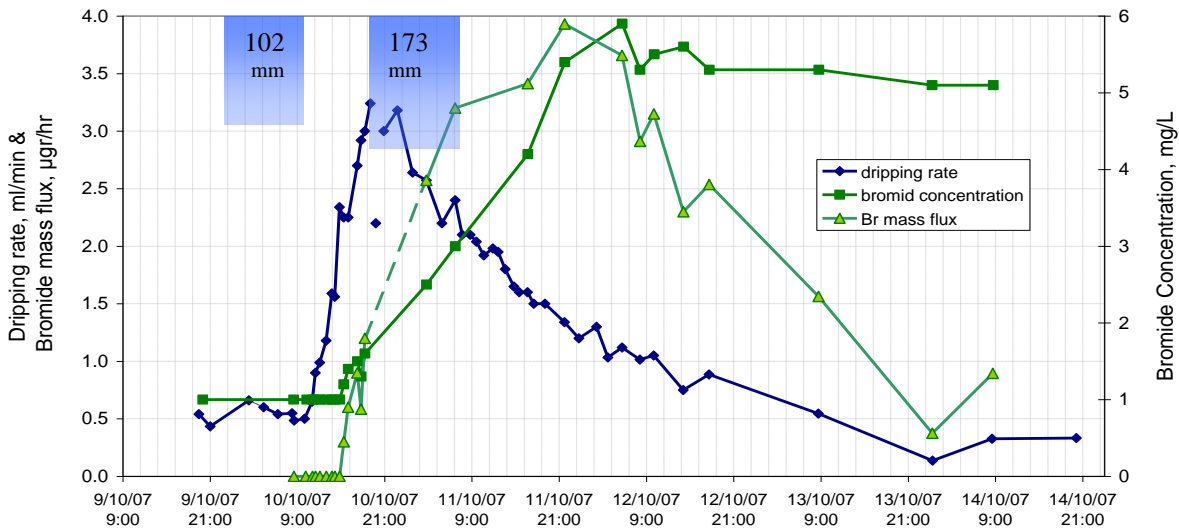


**איור 3:** הידרוגרפים ועקומי פריצה בטטופי המערה, בניסוי ההחדרת אוראנין בתנאי גשם טבעי, מערת אורנין, ינואר 2006. (א) גשם וטפטוף עונתי loc2b ; (ב) טפטוף עודפים loc2d ; (ג) טפטוף פוסט-סופתי loc2a. פריצת האוראנין בריכוז (מ"ג/לליטר) ובשטף (מ"ג/לשעה), והגשם (במ"מ/לשעה). סך השטח המסומן מתחת לעקומת השטף הוא מסת השייב של האוראנין.

### ניסוי הסמנים במערת אורנין:

**1. ניסוי בתנאי גשם טבעי - החדרת אורנין (צבען פולוצנטי) בתחתית 3 כיסי קרקע קרובים בפני השטח 28 מטר מעל המערה, שבוע לאחר אירוע גשם גדול שגרם לשפעול של כל הטפטופים וממש לפני אירוע גשם נוסף (120 מ"מ ב-10 ימים). ניטור אינטנסיבי של הנטיפים לאחר הזרקת האוראנין אפשר בניה של 'עקומת הפריצה' של הריכוז ושטף האוראנין, מדידה של זמני ההגעה וחישוב מהירויות החידור של העוקב (flow-through). מהירויות החידור המקסימאליות בתווך הבלתי-רווי שחושבו מניסוי זה היו 0.41-0.76 מ"שעה בטפטופים השונים, ומהירויות החידור הדומיננטיות- 0.22-0.41 מ"שעה. בהחדרה לפתח סדק תחת האזור הסדוק יותר נמצאו מהירויות חידור (מקסימאליות ודומיננטיות) גבוהות יותר.**

- מהירות התקדמות גל-הדחיקה (pulse-through), שנמדדה מזמן תחילת הטפטופים (או מהעליה בספיקה) בעקבות אירוע הגשם, היתה פי-1.4 מהירה יותר ממהירויות החידור המקסימאליות של הסמן בטפטופים השונים.



**איור 4:** עקומות הפריצה בניסוי ההמטרה, אוקטובר 2007: ספיקת הטפטופים, ריכוז הברומיד ושטף הברומיד (פריצת הסמן), בטפטוף הפוסט-סופתי. loc2a

2. ניסוי המטרה, שבו הומטרו ~190 מ"מ בשני ממטרים ממושכים בעוצמה של 15-20 מ"מ לשעה יום לאחר יום באוקטובר 2007 (לפני עונת הגשמים). המים המומטרים היו במליחות גבוהה יותר (1400 µS) מהמליחות במי הטפטופים (500-750 µS). המעקב אחר המים המומטרים משני הימים נערך באמצעות ה-EC, ועבור ההמטרה ביום השני (בתנאי הרטבה קודמת) באמצעות ברומיד שפוזר בפני השטח בתחילת ההמטרה. הניסוי עקב ברזולוציה גבוהה על תהליכי וקצב הגעת המים אל המערה באירוע "גשם" קיצוני.

ביום הראשון גם לאחר 81 מ"מ רצופים רק חלק מהטפטופים הגיבו. מרבית וכמעט כל המים החדשים "נספגו" להרטבה ומילוי החללים בתווך האפי-קרטס היבש מעל המערה. ביום השני תגובת כל הטפטופים היתה מהירה וחזקה הרבה יותר. מהירות הגעת הברומיד בטפטופים השונים היתה 3-6.5 מטר/לשעה - פי-10 מהר יותר ממהירות חידור הסמן בניסוי בגשם טבעי. התקדמות גל-הדחיקה היתה כ-11 מטר/שעה.

### תחנה 2 – תצפית מבית אורן –

תצפית על אגן נחל אורן ותחנות הניטור של המיקר התפתחות הנוף: שלבים בהתרוממות הכרמל - "מפלסי התיצבות" – שלבים בהרמה של הכרמל - מפלסי גידוד.

- המיאנדר החתור בנחל אורן -
- בקעת אלון – התרחבות הערוץ בחשיפת ה' טוף הבלוי
- השתקמות היער אחרי השריפה - ד"ר נעמה טסלר, רשות הטבע והגנים;

### תחנה 3 - עין אלון:

המעין שופע (שפיעה 50-30 אלף מ"ק בשנה) מתצורת עוספיה במגע בין פרט גיר בית אורן לקרטון עוספיה (האטים יחסית); מיקום הנביעה בגדת נחל אורן במורד בקעת אלון בנקודת החיבור של

שני העתקים קטנים (שגב ושש, 2009). מחשופי הזנה אפשריים הם הטוף והאלוביום בבקעת אלון, גיר בית אורן מצפון ומערב (נטיית שכבות מזרחה מתאימה להזנה), ומשולי בקעת אלון שבו קיים מופע גירי של תצורת עוספיה.

ניסויי העוקבים, התנודות בשפיעתו והמליחות הנמוכה בעין אלון (עד 30 מגכ"ל ובממוצע - 42 מגכ"ל) מעידים על תרומתם הדומיננטית של מנגנוני חידור מהירים מהאפיק ומהמדרונות שמידת האיזוי בהם נמוכה. התגובה התנודתית של המעין לאירועי גשם מבחינת הספיקה, המוליכות החשמלית, והטמפרטורה מעידות על תרומה ממנגנוני חידור מועדפים ומהירים כבר באוקטובר-נובמבר, וזאת למרות שהקרקעות על המדרונות בעומק 5-20 ס"מ (מתחת לחזית ההרטבה) היו יבשות. תנודות דומות נמצאו גם במעיינות אחרים שנובעים באפיק או בגדת הנחלים באגן (עין-אורן, ועין-אום שוקף בנחל בוסתן). באירועי גשם אלו נמצאו גם סימני נגר מדרוני וזרימה באפיקים במעלה האגן, שחלחלו לתשתית האפיקים במורד ולא הגיעו אל מוצא האגן. התנודות במליחות נבביעות אלו בסתיו ותחילת החורף יכולות לנבוע ממקור זה.

בשתי הנביעות הקטנות יותר במדרונות הקירטוניים (עין חיק ומעיין הטרסה) לא היתה תגובה בספיקה או במליחות לגשמים הראשונים בעונה, ובד"כ שפילת ההידרוגרף שלהם מורכבת ממקדם דעיכה יחיד היינו, אין בדעיכתם עדות ברורה לחידור מהיר (*quick-flow*), למרות שגם בהם נמצאו שינויים ב-EC ובריכוז הכלוריד המעידים על שילוב מנגנוני דחיקת מים קודמים וחדירת מים חדשים'.

**ניסויי הסמנים בעין אלון** - בניסוי הראשון 10-16/1/2006 - העוקב Naphthionate הוחדר אל בריכה באפיק 75 מטר במעלה המעיין, ובנוסף הוחדר אוראנין ב-5 בורות סמוכים בקרקע במדרון 60 מ' במעלה המעיין. נרשמו 4 שיאים של חדירת העוקב מהאפיק למעיין. הופעת גל עכירות עם פריצת העוקב, והתנודות ב-EC, בריכוז ה-[Mg<sup>+2</sup>] והטמפרטורה, מעידים על חדירת מי השיטפון אל אקוויפר המעיין. עקומת פריצה רב-שיאית כפי שהתקבלה בניסוי אופיינית לאזורים קרסטיים בשל זרימה במספר נתיבים עם מוליכות הידראולית שונה או במנגנוני זרימה שונים. בנוסף, כיוון שאירוע הגשם היה ארוך (150 מ"מ ב-11 יום) והתאפיין בעוצמות גשם נמוכות, לא ניתן להגדיר נקודת זמן יחידה להחדרת הסמנים ולכן לא התאפשרה הערכת קצבי החלחול מעקומות הפריצה הנ"ל במודלים מקובלים של זרימה. קצבי החידור שחושבו מעקומת הפריצה בניסוי זה היו - 1.3-12 מ"מ/שעה, מהאפיק ומהירות חלחול מקסימלית של 1.7 מ"מ/שעה מהמדרונות. בניסוי נוסף מאותה נקודה באפיק במרץ 2007 עם הסמן אוראנין ובשיטפון קטן יותר, התקבלה עקומת פריצה עם שיא בודד, ממנה חושבה מהירות זרימה ממוצעת של 1.3 מ"מ/שעה.

#### **תחנה - 4 - תחנה הידרומטרית ואיבודי תמסורת :**

באגן נחל אורן שלוש תחנות הידרומטריות, שניים בנחל אורן : העילית במורד ה"אגם" והשנייה מעל המפגש עם נחל בוסתן, והשלישית על נחל בוסתן סמוך למפגש עם נחל אורן). חישוב מפלס-ספיקה בתחנה בעת הקמת התחנה הם על בסיס החתך של המגלש ושיפוע האפיק לפני ואחרי התחנה. בהמשך הכיול "מתחזק" ע"י מדידות מהירות בחתכים שמעט במעלה התחנות.

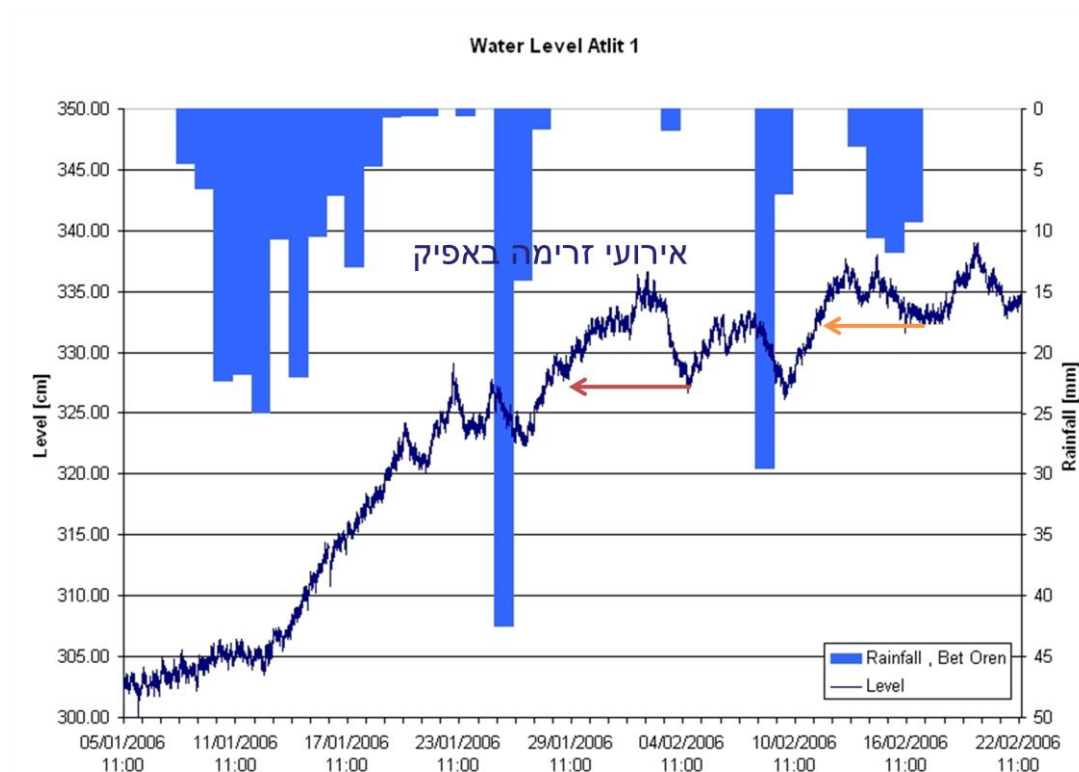
שטפונית בנחל מתחילים לאחר גשם מצטבר של 120-150 מ"מ גשם ולכן ברובם מתרחשים בחורף ובאביב ובתגובה לסופות גשם <45 מ"מ. נפחי הזרימה השנתיים הממוצעים בשנים 2001-2008



עמדו על 344,000 מ"ק בשנה, עם מקסימום שנתי של 850,000 מ"ק ב-02-2001. חשובי 'אבודי-תמסורת' הארועיים הניבו ערכים מכסימליים של 63,000 מ"ק בשטפון בעל ספיקת שיא של 6.2 מ"ק/שניה ונפח של 221,000 מ"ק – כ-28%. שיעור (%) אבודי התמסורת גדלים עם הקטנת נפח השטפון ומגיעים ל-100% עבור שטפונות שנפחם קטן מ-6700 מ"ק.

בקידוחים למי התהום במוצא האגן נמצאו תנודות מפלס ברורות תוך יממה לאחר השטפון באפיק. התרומה הישירה של מי השטפון לעליות מפלס מי התהום הוכחה בניסוי, עם הופעת הסמן הפלורסנטי במי התהום בקידוח אורן-5, הנמצאים בעומק של 103 מ' מתחת לנקודת הטמנת הסמן באפיק נחל אורן. מזמן הופעת הסמן במי התהום 16-26 שעות לאחר השטפון, חושבה מהירות חלחול מקסימאלית של 4-6 מטר/שעה מהאפיק הסלעי אל מי התהום. בניסוי נמצאו שני שיאים וביניהם דעיכה בריכוז הסמן; עקומות הפריצה הרב-שיאיות אופייניות לאזורים קרסטיים בשל זרימה במספר נתיבים עם מוליכות הידרואולית שונה. ממודל הזרימה של עקומת הפריצה חושבה מהירות זרימה ממוצעת של 1.4-1.8 מטר לשעה. מהירות חידור זו אפשרית כנראה בשל תנועה לאורך איזור סידוק אינטנסיבי הקשור להעתק הנמצא בסמיכות לבאר.

עלית המפלס בקידוחים לאחר האירוע הנ"ל שוות ערך לנפח של --240-260 אלף מ"ק מילוי חוזר. באמצעות EMMA של השינויים בריכוזי הכלוריד והסולפט בדגימות מהקידוח, חושבו המים החדשים (מי השיטפון) בזמן עקומת הפריצה לכ-3-4% שהם 8,000-10,500 מ"ק, פחות מחישוב איבודי התמסורת באמצעות מאזן המים הארועי.



**איור 5:** שינויי המפלס בקידוח התצפית 'עתלית-1', בפתחת נחל אורן, חורף 2006: לאחר כל אירוע גשם היוצר זרימה במורד הנחל נרשמה עלייה משמעותית ומהירה במפלס, ולאחריה ירידה קטנה (השתפלות) למפלס חדש גבוה יותר מהמפלס לפני האירוע.

## הערכת המילוי החוזר באמצעות מאזן הכלוריד -

מאזן כלוריד - הערכת מידת החידור למי תהום (שארית המים מהאידיוי והדיות שהצליחה לחלחל אל תת-הקרקע), ע"י היחס בין ריכוזי הכלוריד בטפטופי מערות והמעיינות לבין ריכוזם בגשם (בתוספת שקיעה ולכידת אבק ואירוסולים).

$$\text{Recharge (mm)} = \{ \text{Precipitation} - \text{Runoff} \}_{(\text{mm})} \times [\text{Cl}^-]_{\text{Atmospheric input}} / ([\text{Cl}^-]_{\text{Ground Water}} - [\text{Cl}^-]_{\text{rock}})$$

- ריכוז הכלוריד בגשמים כולל שטיפת אבק בכרמל 21 מג"ל כלוריד, (ממוצע של 40 דגימות לאורך שלוש שנים מכל חודשי הגשם ומ-7 תחנות). במי הגשם נמצא הבדל מובהק בין 4 התחנות המזרחיות והגבוהות יותר עם ממוצע של 13 מ"ג כלוריד לליטר לבין הקבוצה המערבית עם 18 מ"ג כלוריד לליטר

שיטת מאזן הכלוריד רגישה להערכת הבדלים במילוי החוזר בין אזורים שונים באגן מבחינת הליתולוגיה וכיסוי הצומח. בהשוואה בין מקבצי טפטופים באזורים שונים באותו מסלע, התקבל ריכוז כלוריד גבוה יותר כאשר כיסוי הצומח על פני השטח היה עצי וצפוף יותר ובשל אידיוי ודיות גבוהים יותר באזורים המיוערים, המילוי החוזר מצטמצם. עם זאת, מאזן הכלוריד אינו משקף את השנה האחרונה בלבד אלא ממצע מספר שנים. למרות הבדלים ניכרים בשפיעת המעיינות וספיקת הטפטופים בשנות המחקר השונות לא נמצאו הבדלים ניכרים בממוצע ריכוז הכלוריד המשוקלל.

הערכת ה-CMB בנביעות ומקבצי הטפטופים כוללת גם את החידור המקומי הבלתי-ישיר שהערכתו בדרך כלל נגרעת במדידות ישירות בפרופילי הקרקע. בעוד הערכת החידור מקרקעות הרנדזינה שווה 3-7% מהגשם הממוצע באגן הערכת המילוי החוזר בנביעות באזורי הקרטון הגיעה ל-17-21%.

המילוי החוזר מאגן נחל אורן לאקוויפר הכרמל נערך מסיכום שקלול המילוי החוזר ממאזני הכלוריד ב"יחידות ההידרולוגיות", שהוגדרו על בסיס ליתולוגיה, קרקע, וצמחיה לצורך מודל החידור האגני (Kohn, 2008). הערך שחושב למילוי החוזר השנתי מחידור ישיר ומקומי (לא ישיר) לכל האגן לתקופת המחקר הינו  $123 \pm 7$  מ"מ. ביחד עם איבודי התמסורת, שחושבו באמצעות מאזני מים מתקבל מילוי חוזר שנתי ממוצע של 3.8-4.2 מלמ"ק/שנה - ערך דומה, אך גבוה מעט מממוצע השאיבה השנתית בשנים 1991-2006 בתת-אגן אורן-טירה - 3.7 מלמ"ק. בהתחשב בכך שמאזן הכלוריד התבצע עבור רצף של שנים שחונות יחסית, שבהן כמויות הגשם השנתיות היו 70-90% מהממוצע הרב-שנתי, הערכות אלה הינן שמרניות למדי ועשויות להיות גבוהות יותר באופן משמעותי ברצף שנים גשומות מהממוצע כפי שהיה למשל בין 2001-04. הערכה זו באמצעות מאזן הכלוריד האגני נמוכה מהערכת המילוי החוזר במודל החידור האגני - 4.5 מלמ"ק, למרות שלא נערכו באותם שנים. פער זה קשור, ככל הנראה, גם לכך שמודל החידור מחשב את החידור אל הסלע שהוא גבוה יותר מהמילוי החוזר.

**התפלגות המשקעים והחידור למי תהום:** להתפלגות הגשם בזמן יש השפעה מכריעה על מידת החידור לתת-הקרקע והמילוי החוזר. תחילת הספיקה העונתית בטפטופי המערות והנביעות החלה רק לאחר ערך סף הגדול מ-120 מ"מ גשם מצטבר, כתלות בהתפלגות הגשם בתחילת העונה. ערך

זה דומה לסף הדרוש להרטבה מלאה של הקרקע באגן וקבלת נגר אגני במוצא הנחלים. בחורף 2006-07 סף הגשם העונתי לתחילת טפטוף היה מעל 288 מ"מ (במערת אורנין) ועד 438 מ"מ במערות יישח כתוצאה מעצירת גשמים של 6 שבועות בנובמבר-דצמבר, בה חתכי הקרקע יבשו כמעט לחלוטין.

חידור ישיר או מקומי לעומק בתווך הבלתי-רווי מתרחש רק לאחר הרטבה (לפחות חלקית) של כיסי הקרקע, חללי האפי-קרסט והסדקים הראשיים בתווך הבלתי-רווי, כלומר רק לאחר הקטנה משמעותית של מתח היניקה לאורך נתיבי החידור. לעומתם, הנביעות בסמוך לאפיק נתרמות גם מאיבודי תמסורת במעלה האגן בגשמים הראשוניים בעונה, לפני הרטבה מלאה של התווך הבלתי-רווי.

### סיכום :

במהלך המחקר נוסו לראשונה ופותחו מספר שיטות מחקר הידרולוגיות :

1. חישוב מהירויות החידור בתווך הקרסטי הבלתי-רווי מניסוי סמנים מהמדורות או מאפיקי אכזב בתנאי גשם או שיטפון טבעיים ;
  - בתווך הבלתי רווי במסלע קרסטי וסדוק (בניסוי למערה) "קצבי חלחול מקסימלי" נעו בין 41-76 ס"מ בשעה, בטפטופים השונים. קצב החלחול האופייני (השכיח) 23-41 ס"מ בשעה, חולץ מהזמן לשיא עקומת הפריצה של שטף האוראנין.
  - קצבי החלחול למי תהום מניסוי החדרה באפיק נחל אורן נעו מ- 1.3 מטר לשעה ועד 6 מטר בשעה בחידור אנכי, בסמיכות לקו העתקה.
  - קצבי החלחול תלויים במידת הרטיבות של התווך בעת ההחדרה. ממצא זה נתמך גם בהתקצרות זמני הפיגור של שיאי ההידרו גרפים לאורך העונה ובסופות עוקבות.
  - ב"החדרה בתנאים טבעיים" באמצעות אירועי גשם/שיטפון תתכן עקומות פריצה רב שיאיות משטיפה לא מלאה, ודחיקה מאוחרת של שאריות העוקב. שיטות אלו יושמו בהמשך להערכת סיכונים וזיהוי של מקרות זיהום.

2. **מנגנוני החידור והחלחול** שנמצאו במחקר כללו: חידור מהיר של מים חדשים בנתיבים מועדפים, 'גל דחיקה' של מים קודמים, תנועה לטרלית, חלחול דיפוזי, ערבוב והשהיה בכיסי קרקע וחללים אפי-קרסטים והתנקזות של היחידות הנ"ל מהתווך הקרסטי הבלתי-רווי. בנוסף נמצאו עדויות ישירות לתרומת 'חידור לא ישיר' למי תהום – ע"י חלחול מאפיקים (איבודי תמסורת) – העדויות למנגנון הבוכנה (pulse through) בתווך הקרסטי הבלתי-רווי היו זמן הפיגור בין הגעת הסמנים והגעת מים חדשים לבין תחילת עליית ההידרוגרף בתגובה לאירוע הגשם או ההמטרה, ושיעור המים הקודמים' הגבוה יותר בעת עליית ההידרוגרפים עד לשיאם לעומת דעיכתם. הוכחה וכומתה דחיקת מים קודמים בחלחול בנתיבים מועדפים באפי הקרסט (ובתווך הבלתי רווי בסלע קרסטי, אחוז המים הקודמים גבוה יותר בטפטופים היציבים והאיטיים ובתחילת העונה. אך גם בטפטופים הפוסט סופתיים חלקה הגיע עד 30% מנפח הספיקה. מהירות גל דחיקת המים הקודמים גבוה יותר בטפטופים היציבים (הר"ש).

- חושב השינוי בתרומה היחסית והכמותית של מים חדשים ו'מים קודמים' ושל מנגנוני החידור השונים בתווך הקרסטי הבלתי-רווי לאורך העונה ובעקבות אירועי גשם באמצעות שיטות מקובלות להפרדת הידרוגרפים, בשילוב עם ניסוי הסמנים. סך התרומה מחידור מהיר בנתיבים מעודפים חושבה בשיטת מרכיבי הקצה לכדי 25-30% מסך הספיקה השנתית בנטיפים אלו לשנת 2005-06 ופחות מ- 5% ב- 2006-07, שנה שחונה יותר.

3. הערכה אזורית דטרמיניסטית של המילוי החוזר, משקלול של מאזני כלוריד בנביעות מקומיות וטפטופי מערות המשקפים יחידות הידרולוגיות שונות המאפיינות את סוגי המסלע, המורפולוגיה וכיסוי הצומח באזור הנחקר.

**מפעל ההתפלה בחדרה:**

**16:00 - 14:00**

- Located west of the city of Hadera, north of the Hadera stream, in north-central Israel.
  - A BOT project (Build, Operate & Transfer) for 25 years.
  - Construction began in June 2007. Water supply began in December 2009.
  - Production capacity was initially 100 MCM/year.
  - Subsequent to the expansion of the facility by the end of this year (2010), the plant will provide approximately 127 MCM/year.
- To date, the Hadera Plant is the largest SWRO in the world in operation.

