



קרן קיימת לישראל (קק"ל) - אגף המדען הראשי

מחקר מספר 1940 (קול קורא מס' קק/19/12814, 2020)

סיכום מדעי, שנה שלישית מתוך שלוש (דו"ח מסכם)

פיתוח מתודולוגיה לקליטת נגר והחדרתו לתווך סלעי סדוק וקארסטי באזור ההר

תמיר קמאי, המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי – מכון וולקני

שותפים למחקר:

אפרת פרבר (יועצת חיצונית)

ינאי עמיעז, רשות המים, אגף תכנון

נדב אמיר, רשות המים, השירות ההידרולוגי

יונתן גנות, אונ' בר-אילן

אליהו ולדמן, סטודנט (אונ' בר-אילן)

טלי הורוביץ, המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי – מכון וולקני

עידו ניצן, המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי – מכון וולקני

עילי אגיב, המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי – מכון וולקני

תקציר מנהלים

תהליכי פיתוח ובניה מפחיתים את החלחול מפני השטח וגורמים לעליה בשכיחות שיטפונות והצפות. על כך יש להוסיף את מגמת שינויי האקלים, המקצינה את תכונת האירועים הסופתיים באזורנו, שמתאפיינים במשך זמן קצר, במרחב מצומצם יחסית ובעוצמות גבוהות. כיום באזור ההר בכלל וירושלים בפרט, מקודמות מספר רב של תוכניות בניה, אשר מתחייבות לבצע החדרת נגר בשטחי התוכניות. חלק מתוכניות אלה נמצאות כבר בשלבי תכנון מתקדמים ואף לכדי הפקדת תכניות, דוגמת: מכללות צה"ל, רכס לבן, משואות יצחק, מקב"ת, סנסן ב-2, מע"ר, היער האנגלי ועוד. מדובר בתוכניות בינוי רבות המשתרעות על שטחי הזנה רגישים ומשמעותיים של אקוויפר ההר, הנמצאים לרוב בסמוך למעיינות רבים וחשובים באזור. על אף קידומם הסטטוטורי של תוכניות אלו והתחייבותם של המתכננים לבצע בניה משמרת נגר, אין כיום מתודה מוגדרת ומתקני החדרה מותאמים לאזור ההר שמאופיין בשכבת קרקע יחסית רדודה ולא מוליכה עם סלעים באופי סדוק וקארסטי מתחתם. מחקר זה מיועד לתת מענה ישומי על ידי תכנון מתקני חלחול/החדרת נגר מותאמים לסלע קארסטי, זאת על מנת להשלים תכנון לפני מועד תחילת ביצוע של התוכניות הרלוונטיות. הפיתוח נעשה בראיה עתידית להטמעת מתקנים להחדרת נגר במרחב התכנון במטרה להשתלב ולסייע לגופים כגון רשויות ניקוז ורשויות מקומיות בשני אופנים עיקריים: (א') כתוספת במתקנים לריסון שיטפונות כדוגמת מאגרי גיא ומאגרי צד, בכך שמתקני ההחדרה יאפשרו את שחרור נפח המאגר וריקונו לטובת מילוי חוזר של המאגר באירועי שיטפון; ו-(ב') כפתרון קצה באלמנטים תכנוניים במרחב העירוני, בשטחים שמאפשרים זאת, כגון גינות ציבוריות, גני משחקים, מגרשי חניה ופארקים. במחקר זה התמקדנו בפיתוח מתודולוגיה להחדרת מי נגר בהר לסלע קארסטי, שכולל מתקן להחדרת מי נגר לתת הקרקע ואיתו גם פרוטוקול הנחיות מפורט לתכנון וביצוע ההתקנה והתחזוקה. אלה יותאמו לקליטת הנגר מפני השטח ולהחדרתו לתת הקרקע בתווך סלעי סדוק וקארסטי, האופייני לאזורי ההר, על מנת לצמצם את תופעת השיטפונות וההצפות, להגביר את המילוי החוזר לתת הקרקע, ובכך להקטין את הפגיעה הפוטנציאלית למערכת האקו-הידרולוגית הטבעית כתוצאה מבינוי ופיתוח אורבני, ולאפשר המשך הזנת מי תהום ואספקת מים למעיינות. תוצרי המחקר יציגו מתקן הכולל שרשרת אלמנטים של איסוף, טיוב והחדרת נגר, בהיבטים של שימור לאורך זמן רב. כמו כן, המחקר יזהה מה הם הפרמטרים הדומיננטיים עליהם יש לתת דגש במתקני ההחדרה, וכן יפתח כלים יישומיים לבחינת יכולת חידור / חלחול המים בכל מתקן לאחר התקנתו.

בשנה הראשונה למחקר, עסקנו ב: (א') סקירת ספרות בכלל ופתרונות קיימים לנגר בארץ בפרט, (ב') מציאת אתרים קיימים לניסויי החדרה, (ג') פיתוח מודל פיזיקלי לתיאור ההחדרה והמים בחלקים השונים במערכת, ו-(ד') הגדרת המתודה הכללית שאליה אנו מכוונים את המחקר בראיה עתידית שאותה אנו מבינים כמתאימה לאיסוף והחדרת נגר באזור זה. בשנה השנייה התמקדנו ב: (א') הקמת התשתית הפיזית באתר כרמית, (ב') תכנון והקמת מערך ניטור משלב סינון הנגר וזרימתו אל קדח ההחדרה, במהלך זרימת המים מפני השטח אל תת הקרקע, (ג') מבחני החדרת נגר במערכות הקיימות, ו-(ד') המשך פיתוח ופרסום המודל הפיזיקלי, כולל הקוד שלו (בפורמט קוד פתוח) ופרסום בעיתון מדעי. בשנה השלישית, המערכת פעלה באופן מלא, לאיסוף נתונים בזמן סופות טבעיות. כמו כן, השלמנו מבחני החדרה בחלק מהקידוחים.

Executive summary

Development and construction processes reduce infiltration, leading to increase in the frequency of floods. Additionally, the trend of climate change is exacerbating the characteristic of storm events in our region, characterized by short duration, relatively limited space, and at high intensities. Today, in the mountain area in general and Jerusalem in particular, a large number of construction plans are being promoted, which commit to introducing runoff into the areas of the plans. These plans cover sensitive areas that serve significant feeds of the mountain aquifer, which are often located near many important springs. Despite the statutory promotion of these plans and the commitment of the planners to carry out runoff construction, there is currently no defined method and installation facilities adapted to the mountain area, which is characterized by a relatively shallow, non-conductive soil layer with cracked rocks and karst below them. This research is intended to provide an applied response by planning runoff/introduction facilities adapted to karst rock, in order to complete the planning before the start of the relevant plans. The development is conducted with a future vision for implementing runoff facilities in the area in order to integrate and assist entities and authorities in two main directions: (a) as an addition to flood control facilities such as gully reservoirs and side reservoirs, in that the insertion facilities will allow the release of the reservoir volume and its emptying in favor of refilling the reservoir in flood events; and (b) as a final solution in planning elements in the urban area, in areas that allow this, such as public gardens, playgrounds, parking lots and parks.

In this study we focused on the development of a methodology for the introduction of mountain runoff into karstic rock, which includes a facility for the introduction of runoff into the subsoil and with it a detailed protocol of instructions for planning and performing the installation and maintenance. These will be adapted to the absorption of runoff from the surface and its introduction into the subsoil in the midst of cracked and karst rocks, which is typical of the mountain areas, in order to reduce the phenomenon of floods and flooding, increase the refilling of the subsoil, thus reducing the potential damage to the natural eco-hydrological system as a result of construction and urban development, and allowing continued Groundwater feeding and water supply to springs. The research results will present a facility that includes a chain of elements of collection, reclamation and introduction of runoff, in aspects of long-term preservation. Also, the research will identify what are the dominant parameters that should be emphasized in the introduction facilities, and will also develop practical tools to examine the water penetration / seepage capacity in each facility after its installation.

דו"ח שנתי לשנה האחרונה (השלישית) בלבד

שנת המחקר השלישית והאחרונה התמקדה בהמשך ניטור ושקלול נתונים לקביעת מתודולוגיה. משימות המחקר היו: (א) **ניטור ומעקב של מערך הניסוי** גם בתנאים טבעיים (גשמים עם חידור ונגר עילי) ובניסויי החדרה (בין גשמים, על ידי החדרה יזומה של מים); (ב) **סיום פיתוח המתודה**, גיבוש פרוטוקול ומתן המלצות לתכנון וביצוע מערך איסוף והחדרת נגר באקוויפר קארסטי; ו-(ג) **הצגת הממצאים לגופים רלוונטיים**, דוגמת רשות המים, משרד השיכון, מנהל התכנון ועוד. בכללי, שנה זו באה להשלים את המחקר. בעוד שבשנים הקודמות הושקעו משאבים רבים בהקמת מערך הניסוי בכלל ואתר ההחדרה של נגר טבעי בוואדי כרמית בפרט, השנה האחרונה התמקדה בהפעלת מערכים אלה לאיסוף נתונים שבעזרתם ובעזרת הנתונים משנים קודמות נעשתה האנליזה הכוללת. דו"ח זה לא תמקד בנתונים מהשנה האחרונה, אלא בכלל הנתונים משנות המחקר, על מנת לתת תמונה רחבה והבנות כוללות.

מערך הבדיקות והניסויים שבוצעו במהלך שנות המחקר

מבחני החדרה יזומים

אפיון התכונות ההידראוליות של התווך הבלתי-רווי באקוויפר הקרסטי התבצע באמצעות מבחני החדרה יזומים בקידוחי תצפית צרי-קוטר בירושלים. במסגרת המחקר נערכו מבחני החדרה בשני קידוחי המחקר הממוקמים במערב ירושלים בין השכונות עין כרם, קריית היובל וקריית מנחם. קידוחים אלו, אשר שייכים למשרד הביטחון, נקדחו במסגרת פרויקט בינוי עתידי של קמפוס המכללות של צה"ל במטרה להבין קשרים הידרולוגיים בתת הקרקע. במסגרת הפרויקט בוצעו ארבעה קידוחים-1, 2, ו-3 בתחומי הכפר השוודי, וקידוח 4 בסמוך לדרך כרמית כ-150 מ' מצפון מזרח לכפר השוודי. במחקר זה השתמשנו בקידוח מס' 2 (כפר השוודי) שפוגש בפני השטח את המסלע הקירטוני של תצורת כפר שאול ובעומק את סלעי הגיר והדולומיט של תצורת עמינדב (איור 1), וקידוח מס' 4 (כרמית) שפוגש בפני השטח וכן בעומק רק את תצורת עמינדב ובסיסו בא במגע עם גג תצורת מוצא החווארית (איור 2). בכל אחד מהקידוחים מותקן במרכז צינור בעל רדיוס קטן מרדיוס הקדיחה, ואת המרווח ממלא חומר גרנולרי מוליך. בעומקים המקבילים לסלעי הקירטון של תצורת כפר שאול הצינור אטום למעבר מים, ובעומקים המקבילים לתצורת עמינדב הצינור מנוקב (צינור פרפורציה) ומאפשר מעבר מים מהצינור לתווך.

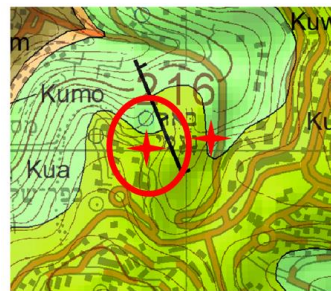
במהלך כל מבחן מוזרמים מים אל תוך הקידוח בספיקות מבוקרות, כאשר כל ספיקה נמשכת פרק זמן מסוים בשאיפה להתייצבות המפלס, ולאחר מכן מועלת לספיקה גבוהה יותר. השתנות המפלסים כפונקציה של הספיקות העולות מאפשרת לקבל בכל שינוי את המוליכות ההידראולית השקולה שתחת המפלס. לעומת תווך הומוגני שבו המוליכות ההידראולית אינה משתנה במרחב, התווך הקרסטי הטרוגני ועל כן סביר שערכי המוליכות ההידראולית המתקבלים ישתנו עם העלייה במפלס. קבלת ערכי מוליכות הידראולית בהתאם לאורך המקטע האנכי עליו חושבה

מסייעת בבחינת ההטרוגניות של התווך. המוליכות ההידראולית המחושבת על סמך מפלס המים הגבוה ביותר במבחן ההחדרה היא זו שמשקפת במידה המירבית את המוליכות ההידראולית השקולה של התווך הסובב את הקידוח. בנוסף, ניתוח איכותי של השתנות עליות במפלס בספיקות העולות, תוך השוואה לחללים המדווחים בדוחות הקידוחים, יסייע בהבנת משמעותם ההידראולית בהיבט תרומתם להחדרה.

שני שלבים מרכיבים את מבחן ההחדרה:

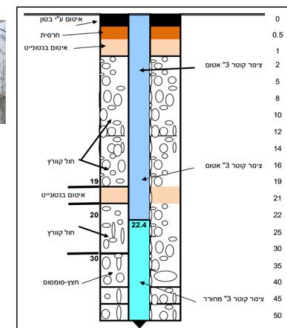
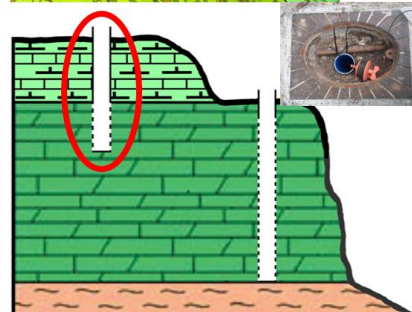
1. שלב הזרמת המים: שלב זה עשוי לכלול כמה מקטעים בזמן, כאשר בכל מקטע מוזרמת ספיקה קבועה הגבוהה מזו שקדמה לה. בראשית כל מקטע, בשל קושי טכני להתייבב על הספיקה הרצויה, התקבל זמן ביניים עד להתייבבות. בשלב זה הציפייה שכל עליית ספיקה תלווה בעליית מפלס בקידוח, שתלך ותתמתן עד להתייבבות או קרוב להתייבבות.
2. שלב דעיכת המפלס: שלב פסיבי שמתחיל ברגע שהופסקה הזרמת המים ומסתיים כאשר הקידוח מתרוקן ממים.

במשך שני השלבים נטר עומד המים בקידוח. וכמתבקש, הספיקה וכמות המים המצטברת נמדדו בשלב הזרמת המים בלבד.

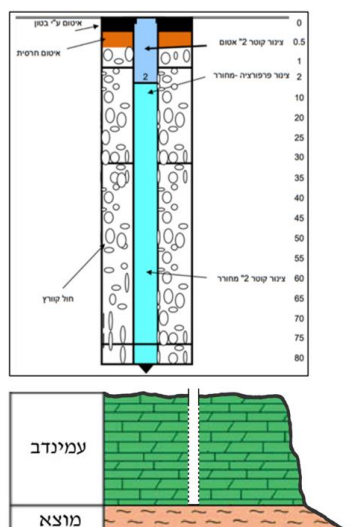


נתוני הקידוח 2 – הכפר השוודי

- עומק-50 מ'
- קוטר קדיחה- 6 צול (16 ס"מ)
- קוטר צינור- 3 צול (8 ס"מ)
- תצורה בפני השטח- כפר שאול
- מסננות פתוחות- תצורת עמינדב
- תצורה בבסיס הקידוח- עמינדב



איור 1. נתונים טכניים, מיקום וחתך של קידוח מס' 2 בכפר השוודי.



נתוני הקידוח (קידוח תצפית)

- עומק-80 מ'.
- קוטר קדיחה- 4 צול (10.5 ס"מ)
- קוטר צינור- 2 צול (5.3 ס"מ)
- מסננות פתוחות- תצורת עמינדב
- תצורה בבסיס הקידוח- מוצא

מערכת הניטור

- מדי לחץ במכלי הסינון למדידת המפלסים.
- 2 מדי ספיקה- למים המוחדרים ולמים העודפים.
- חיישן עומד בבסיס הקידוח למדידת מפלס המים.
- מד גשם להשלמת התמונה ההידרולוגית המלאה.
- כלל הנתונים מנוטרים ומשודרים באופן רציף.

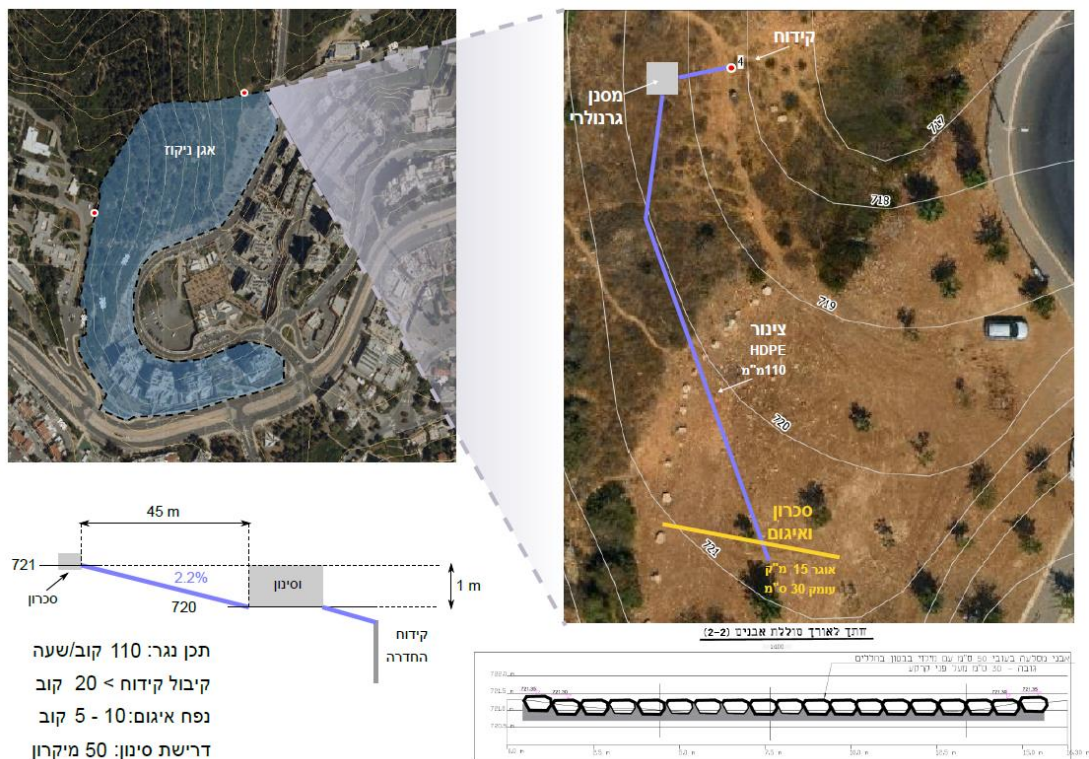


איור 2. נתונים טכניים וחתך קידוח מס' 4 בכרמית, עם מערך הניטור ומכלי הסינון לאיסוף והחדרת הנגר.

איסוף והחדרת נגר טבעי

במסגרת המחקר הוקמה מערכת פיילוט לאיסוף, סינון והחדרת מי נגר בכרמית. איסוף הנגר תוכנן מהערוץ עצמו, מעבר עם צינור תת קרקעי אל המסננים שנמצאים מעל אזור ההחדרה (איור 3) ומשם לקידוח. לצורך איסוף הנגר, נבנה סכר בערוץ (איור 4 – חלק עליון), שבבסיסו מותקן קולטן אשר מעביר את המים באמצעות צינור תת קרקעי אל מכלי הסינון הגרנולרי (איור 4 – חלק אמצעי). חשוב לציין שהסינון מתבצע באופן פאסיבי על ידי כח הכבידה, ללא צורך במקור כוח (משאבה). לאחר הסינון, המים מוחדרים אל הקידוח שנמצא בסמוך (איור 4 – חלק תחתון). מסלול המים מתואר באיור 5.

מערכת הפיילוט באתר כרמית הוקמה שמטרה להוות מערכת ראשונית ומחקרית לבחינת איסוף, סינון והחדרת נגר באזור הררי ואל תווך קרסטי. על כן, כמערכת תומכת ומשלימה למערכת המים, באתר קיימת מערכת ניטור אשר אוגרת את כלל הנתונים ומשדרת אותם לפי צורך. מכשירי המדידה באתר כוללים (i): חיישני לחץ במערכת הסינון למעקב על עומד (גובה) המים בכל מיכל-מסנן, לטובת מעקב אחר תפקוד המסננים ועומס המים במערכת, (ii) מדי מים: מד אחד בין המסננים לקידוח, לקבלת הספיקה וכמות המים ומד נוסף למדידת מים עודפים במידה ומערכת הסינון תגיע לקיבולת מקסימלית (iii), (iii) overflow חיישן לחץ בבסיס הקידוח לקבלת עומד המים באירועי החדרה, ו-(iv) מד גשם, להשלמת התמונה ההידרולוגית הכללית שמאפשרת מאזן מים בכלל המערכת (איורים 2 עד 5).



איור 3. האתר בכרמית, משמאל למעלה אגן הניקוז של ואדי כרמיית, עם ההגדלה של אזור איסוף הנגר (עם מיקום הסכרון, הצינור התת קרקעי, אזור הסינון וההחדרה). מצד שמאל למטה, החתך המרחבי של המערכת שהוקמה, עם הפרשי הגובה.



איור 4. אתר כרמית



מסלול המים באתר

1. איסוף הנגר מהערוץ הסמוך מתבצע באמצעות סכר וקולטן בבסיסו, וממנו המים מועברים לעבר המערכת בצינור תת קרקעי.
2. סינון המים מתבצע גרביטציונית באמצעות מכלי סינון המכילים מדיום גרנולרי.
3. החדרת מי הנגר באמצעות הקידוח.

איור 5. אתר וואדי כרמית על מרכיביו השונים, ומסלול איסוף, סינון והחדרת מי הנגר.

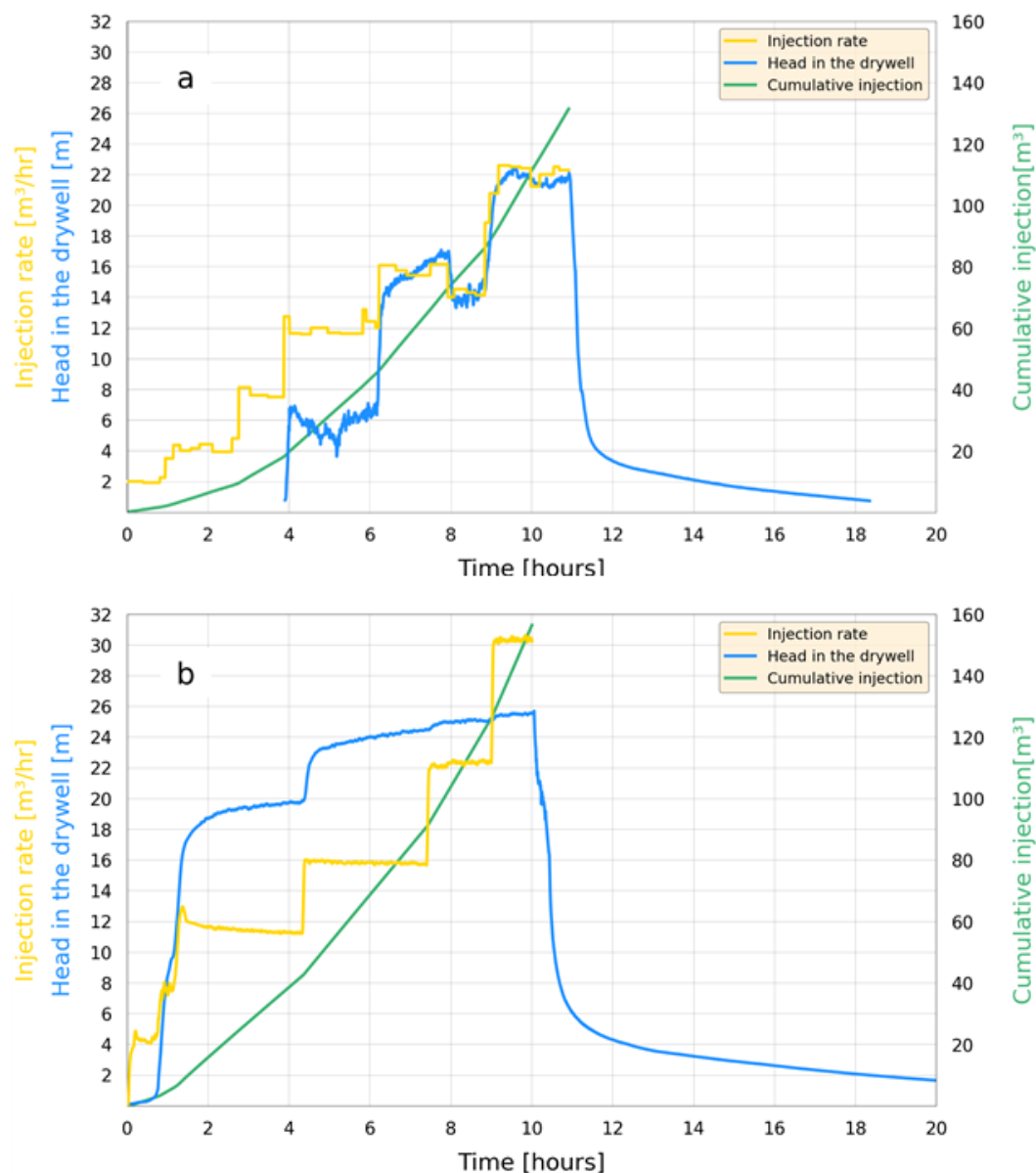
תוצאות – סיכום המחקר כולו

מבחני החדרה יזומים

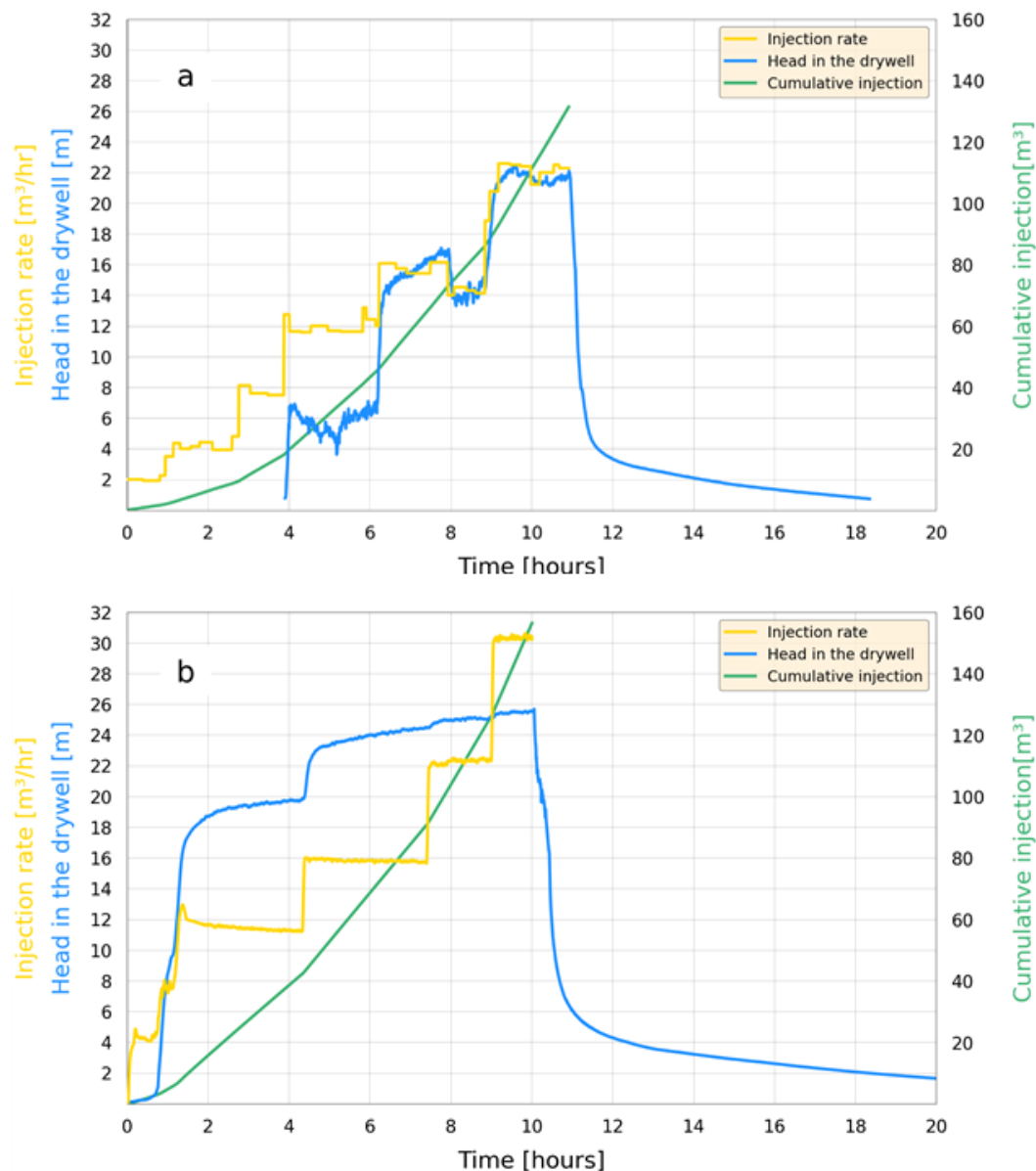
איורים 6 ו-7 מציגים את מבחני החדרה לקידוחים 4 ו-2, בהתאמה. בכל גרף התוצאות מוצגות על ידי הספיקות המדורגות העולות (קו כתום), עומד המים (כחול) בקידוח ונפח המים המצטבר שהוחדר (ירוק), שתואם לסכום הספיקות עם הזמן. ניתן לראות באיורים 6 ו-7 ששני הקידוחים הפגינו שוני רב ביכולת החידור לאורך המקטעים האנכיים השונים, דבר שהתבטא בהתנהגות לא עקבית של עליית העומד ביחס להגברת הספיקה, עדות להטרונגניות הגבוהה של התווך הקרסטי ולדומיננטיות החללים הקרסטיים בהולכת המים. בקידוח 4 במבחן ההחדרה הראשון (איור 1, 4-b) השעות הראשונות ספיקות מדורגות עולות עד לספיקה של 8 מ"ק"ש (מטר קוב לשעה) וספיקה מצטברת של 18 מ"ק לא העלו את המפלס מעבר ל-0.7 מ' (גובה הדייבר במבחן), לעומת זאת במקטעי הספיקה הבאים התקבלו עליות מפלס משמעותיות ביחס לספיקות העולות. במבחן ההחדרה השני בקידוח 4 (איור 6, b) מעט לאחר השעה הרביעית הגברת הספיקה ב-4.5 מ"ק"ש מ-11.5 ~ ל-16 ~ מ"ק"ש, העלתה את המפלס ב-5 מ' ~ מ-19.5 ~ ל-24.5 מ'. לעומת זאת הגברת הספיקה בכ-15 מ"ק"ש בשתי המדרגות לאחר מכן, גרמה לעליית מפלס של כ-1 מ' בלבד. בקידוח 2 (איור 7) ניתן לראות שהספיקה ההתחלתית הנמוכה של כ-2 מ"ק"ש גרמה לעליית מפלס משמעותית של 6-7 מ'. לעומת זאת הכפלת הספיקה לאחר מכן העלתה את המפלס בפחות מ-1 מ'.

לאחר סיום שלב ההחדרה, בשלב בו עומד המים דועך, ניתן לראות בכל המבחנים שהשינוי בקצב הדעיכה משתנה יחסית בחדות כאשר מפלס המים מגיע לגובה מסוים בקידוח. בקידוח 2 (איור 7) יש חזרתיות ברורה בין שני המבחנים, עם קצב ירידת מפלס שמשתנה בחדות מספר פעמים באופן דומה. בקידוח 4 (איור 6) לעומת זאת,

בעוד שניתן לשים לב לשינויים נקודתיים בקצב ירידת המפלס בפרק הזמן שיחסית קרוב לתחילת הדעיכה, לא מתקבלים שינויים חדים בקצב הדעיכה לאחר מכן. כמו כן, ניתן לראות ששינוי המפלס במהלך שלב הדעיכה שונה מהותית בין הקידוחים בקצב הדעיכה ובאופי (צורת) עקום העומד עם הזמן. ההתנהגות השונה של העומד במהלך הדעיכה מצביעה על אופי החידור השונה בין שני הקידוחים, ומעידה על ההטרוגניות של התווך הקרסטי.



איור 6. מבחני החדרה קידוח 4: ספיקת ההחדרה (כתום), עומד המים בקידוח (כחול) והכמות המצטברת שהוחדרה במהלך המבחן (ירוק). (a) מבחן ההחדרה שנערך ב-21 באוקטובר 2021. במבחן זה חיישן הלחץ מוקם 0.7 מ' מעל בסיס הקידוח ולכן אין נתוני עומד תחת מפלס זה. (b) מבחן ההחדרה שנערך ב-18 באפריל 2023.



איור 7. מבחני החדרה קידוח 2: ספיקת ההחדרה (כתום), עומד המים בקידוח (כחול) והכמות המצטברת שהוחדרה במהלך המבחן (ירוק). (a) מבחן ההחדרה שנערך ב-16 בדצמבר 2021. (b) מבחן ההחדרה שנערך ב-23 באפריל 2023.

טבלה 1 מסכמת את נתוני מבחני ההחדרה. בכל מקטע ספיקה, בחלקו האחרון כאשר מפלס המים בקידוח התייבב, נלקח הערך של הספיקה והעומד במקטע זה. לכל צמד ערכים אלה, חושבה המוליכות ההידראולית על ידי המודל האנליטי של גלובר להחדרה בקידוח יבש (משוואה 1). ערך מוליכות זה מייצג את התווך שנמצא מתחת למפלס המים.

חשוב לציין שהמודל של גלובר מניח שאין בקרבת בסיס הקידוח שכבה אטימה (שמקטינה את הגרדיאנט ההידראולי בהחדרה). כאמור מצב זה אינו מתקיים בקידוח 4, ולכן ערכי המוליכות ההידראולית של קידוח זה המוצגים בטבלה 1 יהיו נמוכים מערכם האמיתי.

טבלה 1

סיכום נתוני מבחני ההחדרה בחלק האחרון של כל מקטע ספיקה.

Drywell number	Drywell diameter [Zoll] 1	Injection test's date [dd: mm: yyyy]	Average duration [minutes]	Injection rate [m ³ /hr] 2,3			Head in the drywell [m] 2,4			Hydraulic Conductivity by Glover [m/day] Eq. (1) 5
				Average	Standard deviation	Range	Average	Standard deviation	Range	
4	4	21/10/2021	15	12.4	—	0.4	6.56	0.30	1.07	4.96
			15	16.2	—	—	16.73	0.13	0.57	1.20
			15	22.3	—	—	21.69	0.10	0.42	1.03
		18/10/2023	5	11.2	—	—	19.76	0.05	0.18	0.619
			5	15.7	—	—	24.46	0.03	0.09	0.586
			10	22.4	—	—	25.05	0.03	0.13	0.798
			10	30.4	—	—	25.51	0.04	0.13	1.05
2	6	16/12/2021	30	2.18	0.05	0.09	7.03	—	0.07	0.705
			30	3.93	0.11	0.25	7.89	—	0.03	1.04
			30	7.6	—	0.2	9.82	0.03	0.13	1.4
			30	16.2	1.1	3.0	14.98	0.08	0.52	1.36
		23/04/2023	5	2.16	—	—	5.80	—	—	0.983
			5	3.99	—	—	6.14	—	—	1.64
			10	8.0	—	0.2	9.15	—	0.11	1.6
			10	16.1	—	—	14.01	0.05	0.25	1.53
			20	23.7	—	—	17.58	0.06	0.45	1.50

1. צול שווה ל-2.634 ס"מ

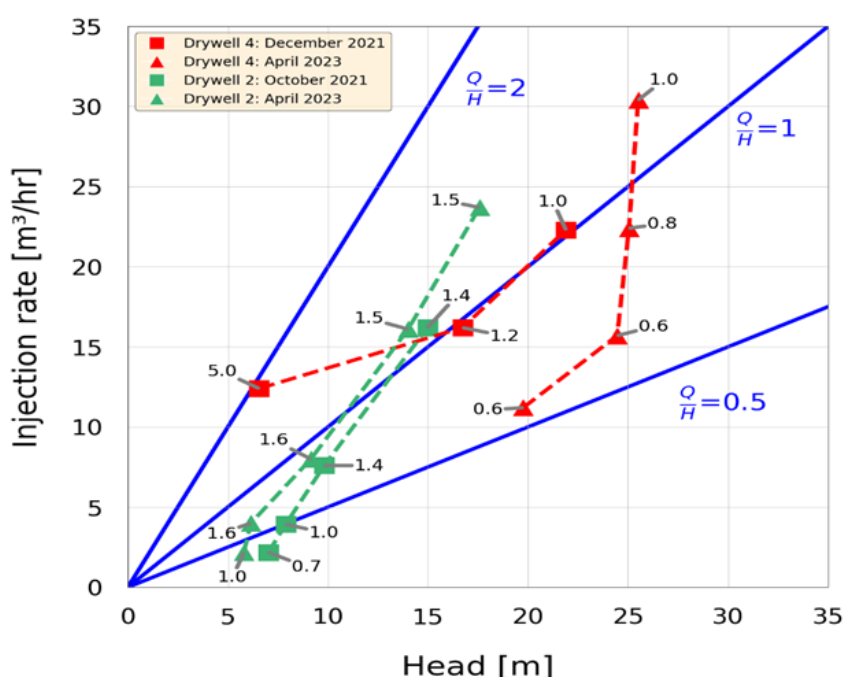
2. בתאים המסומנים בקו ערכי סטיית התקן או הטווח נמוכים משגיאת מכשירי המדידה.

 3. רמת הדיוק של מד הספיקה ע"פ נתוני היצרן - $\pm 2\%$

 4. רמת הדיוק של הדייבר ע"פ נתוני היצרן - ± 0.025 מ'. עשויה להיות סטייה נוספת של מספר סנטימטרים במיקום הדייבר ביחס לבסיס הקידוח.

5. המוליכות ההידראולית מחושבת על בסיס ערכי הספיקה והעומד הממוצעים בסוף כל מקטע ספיקה.

נתוני העומד והספיקה מטבלה 1 מוצגים באיור 8 על פי מבחני ההחדרה השונים, ביחד עם הספיקה היחסית (קווים כחולים, Q/H) עבור יחסי ספיקה לעומד שונים. בנוסף, ערך המוליכות ההידראולית שחושב על בסיס העומד והספיקה מוצג בטקסט ליד כל נקודה. השיפוע בקווי הספיקה היחסית משתנה, כאשר שיפוע גבוה יותר מייצג ספיקה יחסית גבוהה יותר, מה שמעיד על יכולת החדרה גבוהה יותר, ולהפך. מיקום כל נקודה באיור 8 מצביע על הספיקה היחסית של הקידוח עד לאותו גובה. שיפוע הקו המקווקו המחבר בין כל הנקודות באותו המבחן, מעיד בצורה איכותית על הספיקה היחסית של המקטעים האנכיים הדיסקרטיים שהם האינטרוול שבין כל שני מפלסים, שנגדיר כאן כספיקה היחסית הדיסקרטית. הבדל משמעותי בשיפוע הספיקה היחסית הדיסקרטית בין מקטעים עוקבים, יעיד על שינוי ביכולת החידור של האינטרוול ביחס לאינטרוולים הקודמים, ויהווה אינדיקציה להטרוגניות במאפיינים ההידראוליים של התווך.



איור 8. קצב ההחדרה ביחס לעומד המים בסוף כל מקטע ספיקה (נקודות, תואם לערכים מטבלה 1) וקווי ספיקה יחסית (קווים כחולים). בסמוך לכל נקודה מצוין ערך המוליכות ההידראולית (מ"יום) שחושב בהתאם למיקום הנקודה.

איסוף והחדרת נגר טבעי

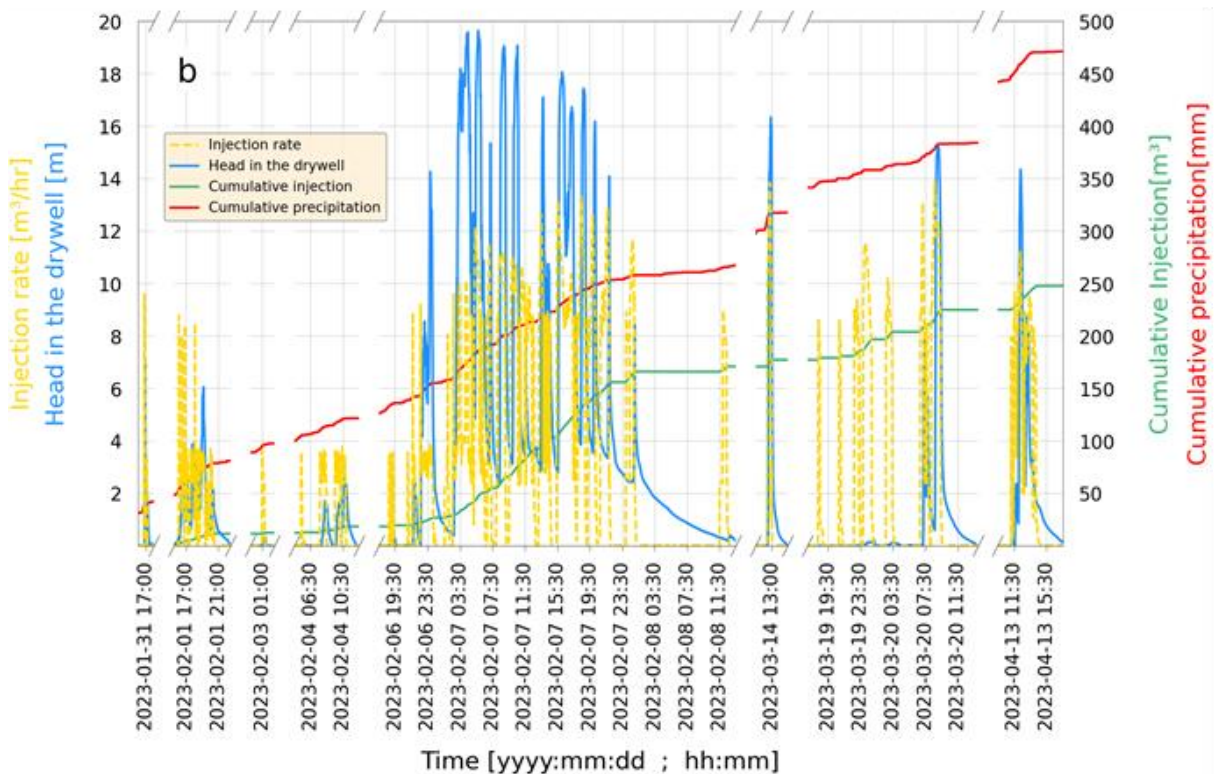
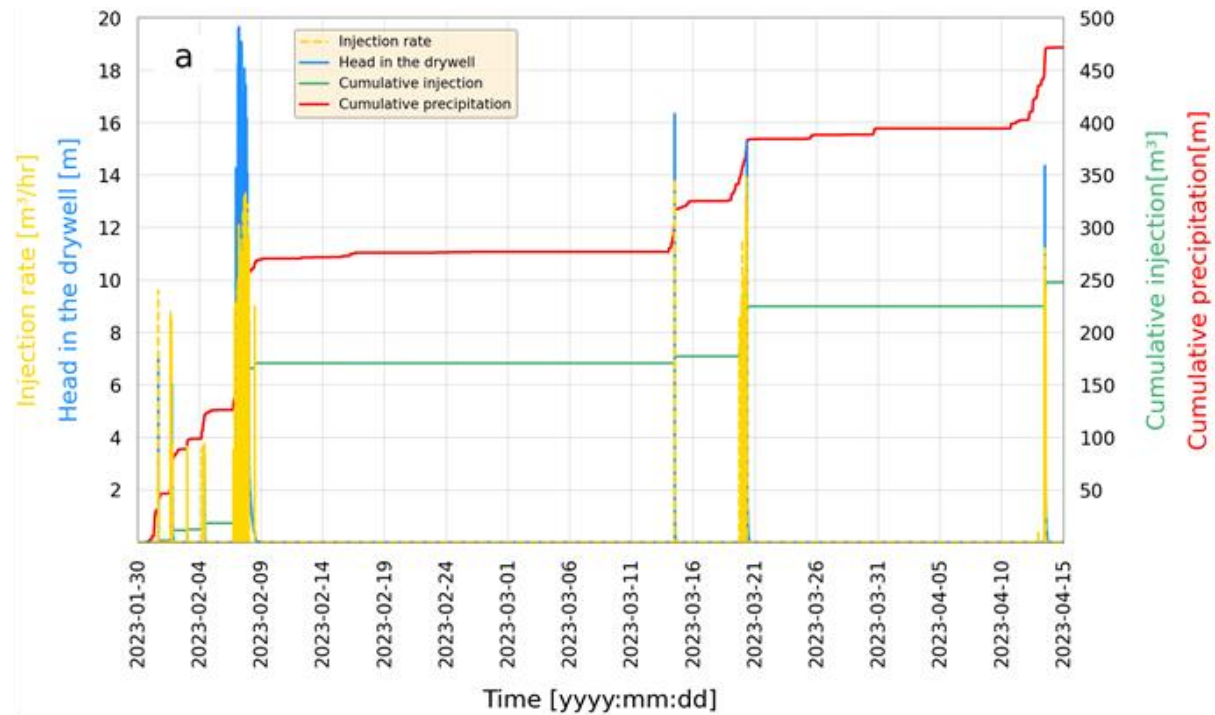
אתר החדרה המשמש כמערכת פיילוט להחדרת מי נגר, פעל בשני חורפים: חורף 2022-2023 וחורף 2023-2024. איורים 9 ו-10 מציגים את תוצאות החדרת הנגר במהלך חורפים 22/23 ו-23/24, בהתאמה. בכל אחד מהגרפים מוצגת הספיקה המוחדרת, עומד המים בקידוח, הספיקה המצטברת העונתית, וכמות המשקעים העונתית המצטברת.

במהלך חורף 22/23 (איור 9), הייתה תקלה טכנית במד הספיקה באתר. הספיקות בעונה זו חושבו על בסיס עומד המים בכל אחד ממיכלי הסינון. נספח 1 מתאר את מערכת הסינון באתר ומפרט את אופן חישוב הספיקה.

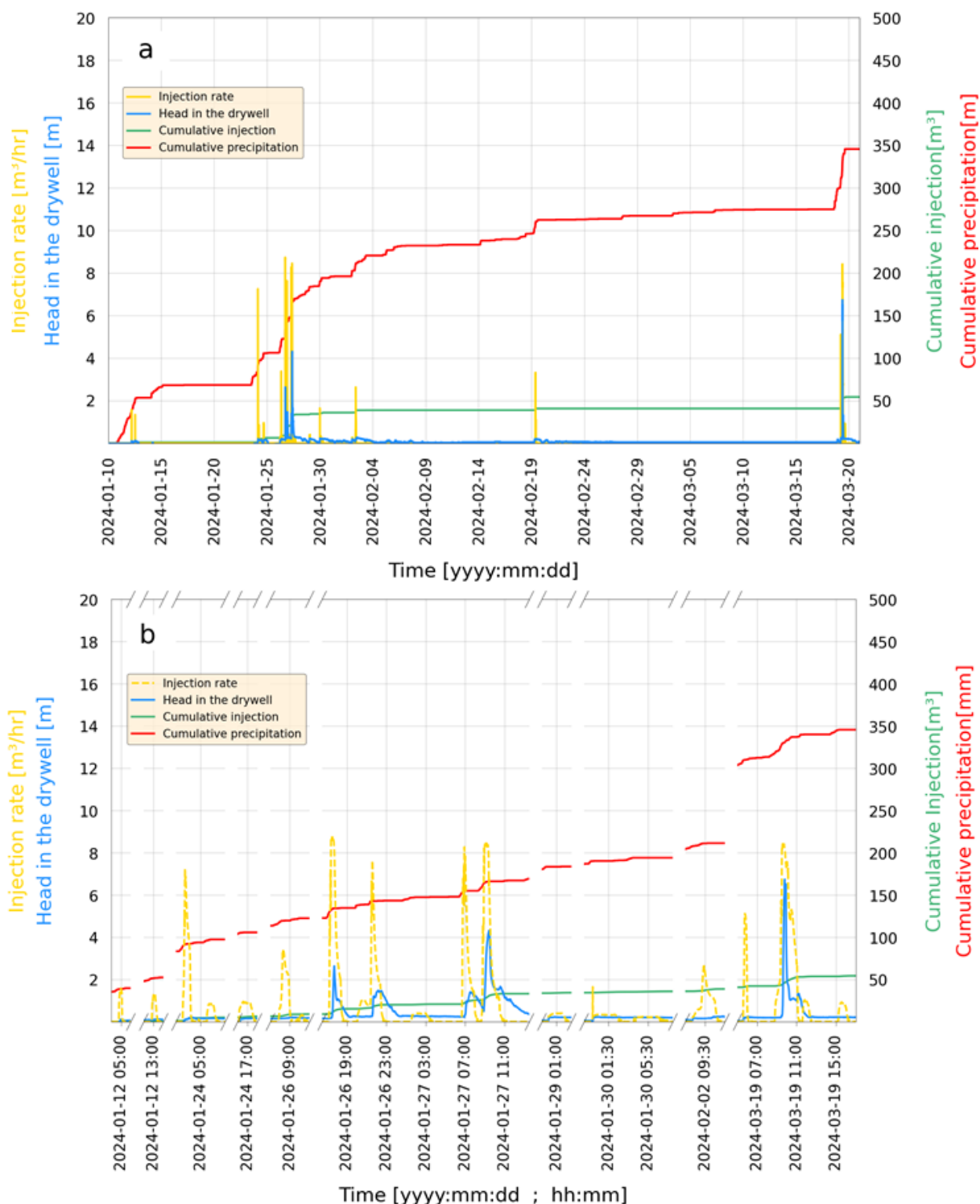
במהלך החורף הראשון (22/23, איור 9) כמות המשקעים שירדה על פני תקופת ההחדרה המדודה הייתה 470 מ"מ. באיור 9 a ניתן לראות שהעקום האדום המייצג את כמות המשקעים המצטברת העונתית עולה בעיקר בקפיצות מדורגות ויחסית בחדות. צורת התנהגות זו מעידה כי רוב הגשם התרכז על פני אירועים נקודתיים ופחות מתמשכים. הדוגמה הקיצונית והמרכזית היא אירוע הגשם שהתרחש בתאריכים 6-8 בפברואר. במשך סופה זו שכונתה "ברברה" ירדו על פני 45 שעות כ-140 מ"מ גשם. בחורף השני העוקב (23/24, איור 10) כמות המשקעים שירדה על פני תקופת ההחדרה המדודה הייתה 345 מ"מ. בניגוד לחורף הראשון, ניתן לראות שעקום כמות המשקעים עולה יחסית במתינות ובהדרגתיות. צורת התנהגות זו מעידה כי בחורף השני כמות המשקעים שירדה התפזרה על פני משכי זמן ארוכים יותר ופחות באירועים נקודתיים.

התמונה המשלימה לכמויות הגשם ולמשך ירידתן היא ספיקת ההחדרה (ספיקה וספיקה מצטברת) וכפועל יוצא מכך גם עומד המים בקידוח. בחורף הראשון (איור 9) חושבו באירועים רבים ספיקות החדרה סביב 10 מק"ש ואף למעלה מכך, וכן חושבה כמות מוחדרת כוללת בנפח של כ-250 מ"ק. נוסף לכך, בחורף זה התקבלו בקידוח לא מעט עליות מפלס גבוהות סביב גובה 15 מ' ואף יותר. לעומת החורף הראשון, בחורף השני (איור 10) התקבל מספר יחסית מצומצם של אירועי החדרה משמעותיים וגם בהם ספיקת ההחדרה הייתה סביב 8 מק"ש, וכן נמדדה החדרה כוללת בנפח של כ-55 מ"ק. כמו כן, במהלך החורף השני הופעת מפלסים משמעותיים של מטרים ספורים התקבלה מספר פעמים בלבד, כאשר באירוע אחד בלבד המפלס היה קרוב לגובה 7 מ', באירוע נוסף התקבל מפלס מעט מעל 4 מ', וביתר האירועים אף פחות מכך.

במהלך שתי העונות, במספר אירועי החדרה, ספיקות שהיו נמוכות מ-8 מק"ש חוללו עליות מפלס סביב גובה 2 מ'. התנהגות זו דומה יחסית לתגובת הקידוח במבחן ההחדרה השני (איור b6) שנערך באפריל 23 (בסוף חורף 22/23). הדמיון בתגובת הקידוח בין החדרת הנגר ומבחן החדרה זה, אל מול השוני בתגובת הקידוח במבחן שלפני חורף זה (איור a6), מחזק את ההבדל ביכולת ההחדרה בין החורף לקיץ בקידוח זה.



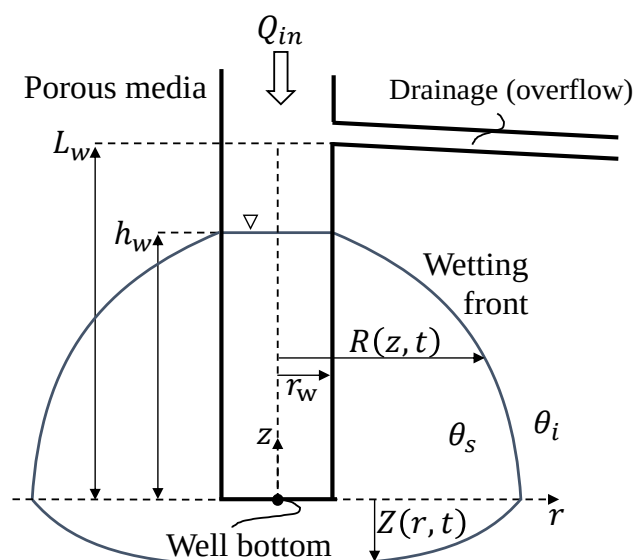
איור 9. החדרת נגר בחורף 2022-2023: (a) גרף רציף זמן של כל העונה, הכולל גם את משך הזמן שבין אירועי ההחדרה, ו-(b) גרף עם אי-רציפות בזמן הכולל את אירועי ההחדרה בלבד.



איור 10. החדרת נגר בחורף 2023-2024: (a) גרף רציף זמן של כל העונה, הכולל גם את משך הזמן שבין אירועי ההחדרה, ו-(b) גרף עם אי-רציפות בזמן הכולל את אירועי ההחדרה בלבד.

מודל פיזיקלי

במהלך המחקר פיתוחנו מודל פיזיקלי, המתבסס על הולכת מים רדיאלית מבאר/קידוח לתווך בלתי רווי. המודל התלת מימדי, מתקבל בפתרון מרחב דו ממדי ובהנחת סימטריה רדיאלית. איור 11 מציג תרשים סכמטי של פתרון המודל, לבאר בעלת עומק L_w ורדיוס r_w מוזרמים מים מלמעלה בספיקה קבועה של Q_{in} ולפרק זמן של T_{on} . במקביל לחידור המים מהבאר לקרקע, המים ממלאים את הבאר ומפלסם בבאר מגיע עד לגובה h_w אשר משתנה עם הזמן. מיקום חזית ההרטבה בקרקע מסומן על ידי R בכיוון הרדיאלי (האופקי) וב-Z מתחת לבסיס הבאר. המודל האנליטי מגביל את מפלס המים בבאר לעומקה בכך שהוא מגדיר ספיקת ניקוז (drainage) כשווה להפרש בין הספיקה הנכנסת לבאר לזו החודרת לקרקע $h_w = L_w$.



איור 11. איור של מרחב המודל, עם מיקום הבאר (רדיוס ועומק), מיקום חזית ההרטבה בקרקע (אופקית ואנכית), ומפלס המים בבאר. האיור הינו הדגמה לפתרון שמתקבל לאחר פרק זמן מסוים בזמן החדרת המים לבאר.

כתבנו את המודל למאמר שפורסם בספרות המקצועית:

Moreno, Z., A. Paster, and T. Kamai. A wetting-front model for vadose zone infiltration via drywells.

Water Resources Research: e2022WR033554.

<https://doi.org/10.1029/2022WR033554>

וכמו כן הנגשנו את פתרון המודל לתוכנות Python-I MATLAB:

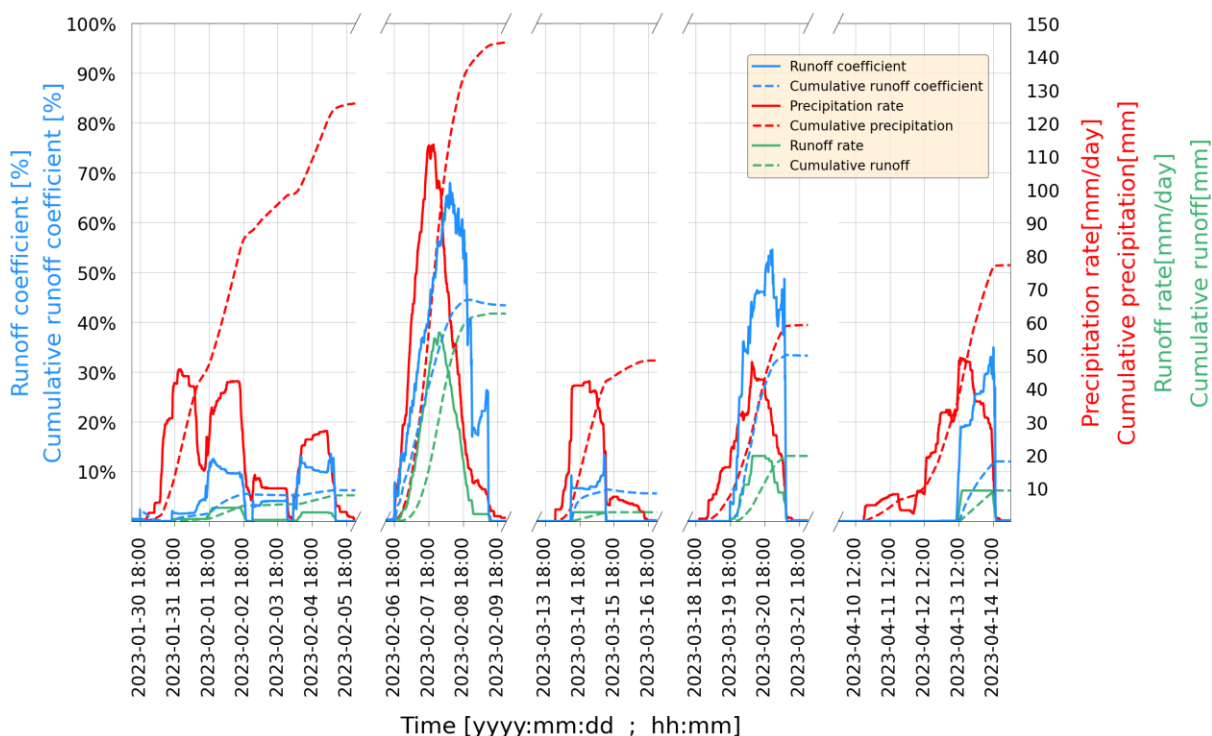
<https://github.com/dry-well-simulation>

מקדם נגר

לטובת תכנון החדרת נגר, יש חשיבות לדעת את מקדם נגר, שהוא היחס בין כמות הגשם לכמות הנגר שנוצרת ממנו. זה חשוב לפני ביצוע התכנית, על מנת להעריך את כמות הנגר אשר תשמש כרמת יחוס לבחינת חלופות תכנוניות ביחס למצב הקיים. על פי הנחיות מנהל התכנון, חישוב הנגר יעשה, באופן כללי, על פי הצעדים הבאים: (א') אתור אזור התכנון על גבי מפת חבורות הקרקע והתאמת מקדם נגר לכל חבורת קרקע לפי מפת חבורות הקרקעות של ישראל, ו-(ב') קביעת מקדמי הנגר לפי טבלת מקדמי נגר מרבי. חשוב להדגיש שמדובר במקדם קבוע לאזור.

בעזרת המדידות של הגשם והנגר באתר כרמית, הערכנו זמן תגובת אגן של כ-40 דקות (ממוצע מתחילת גשם עד תחילת נגר) וחישובו מקדמי נגר לאורך העונות על בסיס ממוצע של 24 השעות האחרונות (איור 12). מחישובים אלה מתקבלים מקדמי נגר שמחשובים על בסיס הגשם העיתי ומקדם נגר מצטבר, שחשוב על פי היחס בין כמויות הגשם והנגר המצטברים עד זמן זה.

תוצאות אלה מראות שמקדם הנגר משנה מאוד עם הזמן. במהלך סופה, המקדם נמוך בתחילתה ובסופה, בהתאמה לספיקת גשם נמוכה יחסית במקטעים אלו, אך גם לחלחול משמעותי בתחילת סופה. כמו כן, ניתן לראות שערכי מקדם הנגר שונים מאוד בין סופות.



איור 12. מקדם נגר עיתי ומצטבר לסופות גשם במהלך חורף.

דיון

המטרה העיקרית של עבודה זו בכלל, ושל עריכת מבחני ההחדרה בפרט, היא לבחון את יעילות ההחדרה של קידוחים יבשים בתווך קרסטי. הדרך שבחרנו היא להעריך עד כמה שניתן את המאפיינים ההידראוליים של התווך הקרסטי אשר משפיעים בצורה ישירה על ההחדרה. בתווך הקרסטי מצד אחד יש את הסלע עצמו שבצורתו הטהורה כמעט שאינו מוליך מים כלל, ומצד שני יש את מערכות הסידוק שמאפשרות הולכת מים ואת החללים הקרסטיים שיכולת ההולכה שלהם עשויה להיות גבוהה ביותר. ההופעה האקראית של מערכות הסידוק והחללים הקרסטיים מייצרת תווך הטרוגני שמאפייניו ההידראוליים משתנים תכופות על פני מרחקים קצרים יחסית. בעוד שבתווך הומוגני קיימת חוקיות ברורה בין קצב ההחדרה למפלס המים בקידוח, בתווך ההטרוגני לא קיימת חוקיות שכזו, ועשויה להתקבל התנהגות מגוונת של מפלס המים ביחס לקצבי החדרה שונים. לפיכך, ההטרוגניות הגבוהה של התווך הקרסטי מהווה אתגר משמעותי בהערכת קיבולת ההחדרה של קידוחים יבשים בתווך קרסטי.

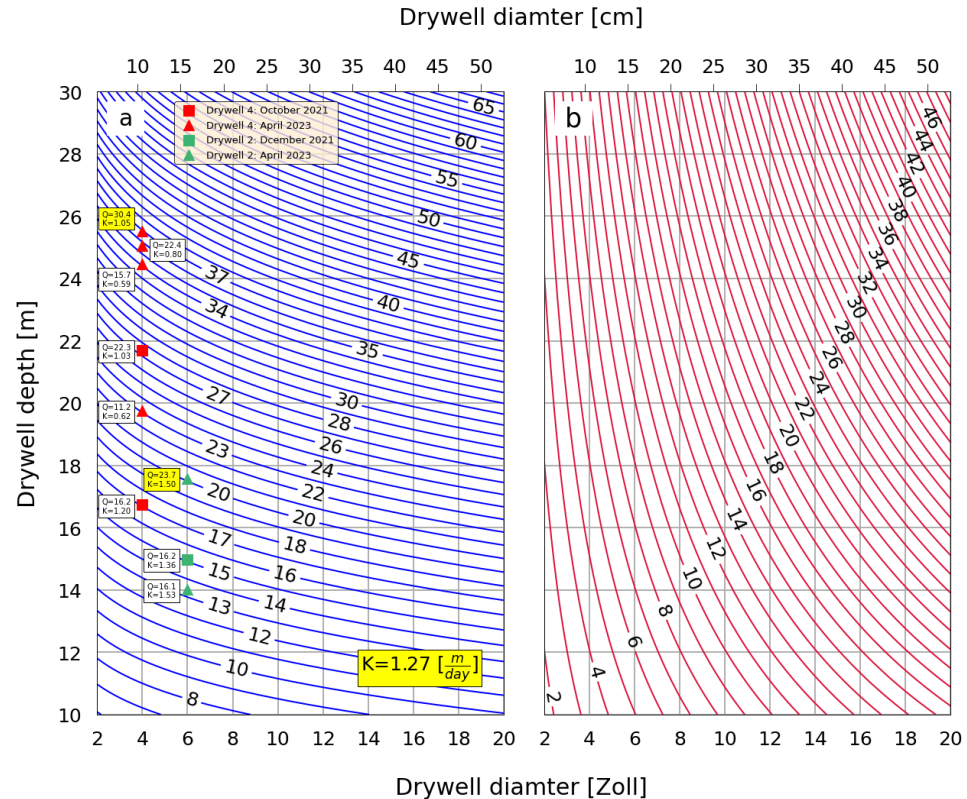
קיבולת ההחדרה תלויה בקוטר הקידוח, שמגדיל את שטח הפנים עם התווך, ולעומק הקידוח, שבנוסף להגדלת שטח הפנים מאפשר בניית עומד המים גדולה יותר ולחץ מים בהתאם. איור 8 a מציג קווים שווי ספיקה (עם ערכי מק"ש בטקסט על הקווים), כתלות בקוטר הקידוח ובגובה מפלס המים, ובהינתן ערך מוליכות הידראולית קבוע, שחושבו על ידי המודל של גלובר. ערך המוליכות ההידראולית שהוצב במודל (1.27 מ' ליום), נלקח כממוצע של שני ערכי המוליכות שהתקבלו במפלס הגבוה ביותר (במקטע הספיקה האחרון) בכל קידוח. על הגרף מסומנות נקודות ממבחני ההחדרה בהתאם למפלס המים שהתקבל בסוף כל מקטע ספיקה, וכן בהתאם לקוטר הקידוח. ליד כל נקודה מצוינים ערך הספיקה שהוחדרה תחת אותו מפלס וערך המוליכות ההידראולית שחושב. ניתן לראות שאין התאמה מדויקת בין הספיקות שהתקבלו במבחני ההחדרה ובין הספיקה התיאורטית בגרף הקונטורים, פער שלעיתים מגיע עד כדי מספר מטרים מעוקבים לשעה ואף יותר. למרות שפערים אלו מבטאים את הטרוגניות התווך וערכי המוליכות ההידראולית השונים בתוך הקידוחים וביניהם, התוצאות מראות שניתן לעשות הערכה די טובה ליכולת החידור של הקידוח על פני מקטעים אנכיים ארוכים יחסית על פי הערך ההידראולי הממוצע של התווך (שהתקבל כממוצע משני הקידוחים). בנוסף, ניתן לייחס את התצפית ביחס לערך הממוצע לשינויים במוליכות של המקטעים, כאשר אם הספיקה הנצפית קטנה מהערך התיאורטי, המוליכות ההידראולית קטנה גם היא מערך המוליכות הממוצע שנבחר לכל גרף הקונטורים, ולהפך.

למעשה גרף הקונטורים של הספיקה (איור 13 a) מבטא את קיבולת ההחדרה של הקידוח (קצב ההחדרה של קידוח בקוטר מסוים ותחת עומד מסוים) החודר לתווך בעל מוליכות הידראולית מסוימת. מכאן שאם מניחים שהאופי ההידראולי של שהתווך נשאר קבוע או דומה, עם מוליכות ההידראולית ידועה, ניתן לקבל מהגרף את ממדי הקידוח הרצויים על מנת להחדיר ספיקה מסוימת. הגרף מאפשר לערוך ניתוח רגישות לבחינת מידת ההשפעה והדומיננטיות של קוטר הקידוח ושל העומק/עומד המים. ניתן לראות בגרף שלכל תוספת 1 מ' עומד בקידוח השפעה משמעותית גבוהה יותר ביחס לתוספת של 1 צול בקוטר הקידוח. בתווך הקרסטי, בשל ההטרוגניות הגבוהה ודומיננטיות החללים הקרסטיים בהולכת המים, המצב מורכב יותר. כך למשל, כאשר הקידוח

פוגש מוליך קרסטי משמעותי אז כמעט ואין משמעות לקוטר הקידוח מכיוון שרובה המוחלט של זרימת המים תתרחש דרך המוליך ולא דרך יתר שטח הפנים של הקידוח, אך מנגד לעומד המים כן תהיה השפעה בשל לחץ עמודת המים שמעל. אם כך, במידה ונניח שההסתברות לפגוש מוליך קרסטי במרחב הלטרלי דומה לזו שבמרחב הוורטיקלי, אז שטח הפנים של הקידוח הוא זה שיקבע את ההסתברות שהקידוח יפגע במוליך קרסטי.

איור 13 b מציג קווים שווי שטח פנים של הקידוח (עם ערכי מ"ר בטקסט על הקווים) כתלות בקוטר ובעומק הקידוח על אותו מרחב וטווחים של גרף הקונטורים של הספיקה (איור 13 a). לעומת גרף הקונטורים של הספיקה, ניתן לראות בגרף הקונטורים של שטח הפנים שהקוטר דומיננטי יותר ביחס לעומד, כלומר תוספת 1 צול בקוטר מגדילה את שטח הפנים הרבה יותר מאשר תוספת של 1 מ' לעומד. עניין נוסף שצריך לתת עליו את הדעת הוא שהקוטר מעלה את ההסתברות האופקית לפגוע במוליכים קרסטיים, אך מאחר ומדובר על קטרים בסדר גודל של עשרות סנטימטרים, אם הקידוח יפגע בכמה מוליכים קרסטיים קרובים יחסית, סיכוי סביר שהמוליכים יהיו מקושרים ביניהם ויתפקדו כמערכת קרסטית אחת בעלת גורם מגביל, כך שבמובן מסוים הם יהיו שקולים למוליך אחד. לעומת זאת, לעומק הקידוח אמנם סבירות נמוכה יותר לפגיעה במוליך קרסטי, אך בשל סיכוי גבוה יותר למרחקים ארוכים בין המוליכים, כל מוליך יהיה בעל פוטנציאל חידור משלו שלא תלוי במוליכים האחרים. כך לדוגמה ניתן לראות באופן ברור במבחן ההחדרה השני בקידוח, באזור גובה 25 מ' עמודת המים פוגשת מוליך או אזור קרסטי המפגין יכולת חידור גבוהה ביותר על אף שהמוליכים והתווך שתחתיו כבר החדירו 90 מ"ק במשך כ- 7.5 שעות.

לאור האמור לעיל ניתן לראות שלהרחבת הקידוח ולהעמקתו מידת השפעה שונה על קיבולת ההחדרה. לקוטר יתרון בכך שהוא מגדיל יותר את שטח הפנים ולכן גם את ההסתברות לפגיעה במוליכים קרסטיים, אך מוליכים קרובים אחד לשני עשויים לתפקד כמוליך אחד. לעומק הקידוח חיסרון בכך שהוא מגדיל פחות את שטח הפנים ולכן גם את הסיכוי לפגוע במוליכים קרסטיים, עם זאת בשל הסיכוי למרחקים גדולים בין המוליכים, סבירות גבוהה יותר שכל המוליכים יתפקדו עצמאית ולא יגבילו אחד את השני. ובנוסף, לעומק הקידוח יתרון בכך שהוא מאריך את עמודת המים בקידוח, שבתורה מגדילה לינארית את עומד הלחץ בכל אחד מהמוליכים הקרסטיים, ולכן מעלה משמעותית את קיבולת ההחדרה. כמובן שמחקר המשך שייבחן מספר רב של קידוחים בתווך הקרסטי, עם טווח משמעותי של קטרי קידוח ייתן תשובות מבוססות ומדויקות יותר.



איור 13. (a) קווי שווי קצב החדרה (כחול) עם ערכי ספיקה (מק"ש, על הקווים) כתלות בקוטר ובעומק הקידוח על פי המודל של גלבר (למוליכות הידראולית של 1.27 מ' ליום), עם התוצאות ממבחני ההחדרה (נקודות). ליד כל נקודה (במלבנים קטנים) מצוינים ערך הספיקה שהוחדרה (מק"ש) תחת אותו מפלס, וערך המוליכות ההידראולית שחושב (מ"יום). (b) קווי שווי שטח פנים של הקידוח (אדום) עם ערכי שטח (מ"ר, על הקווים) כתלות בקוטר ובעומק הקידוח (הציר האנכי תואם לציר האנכי של הגרף השמאלי).

סיכום

לאחר הקמת מערך החדרה במערכת בכרמית, ערכנו מבחני החדרה יזומים ואספנו נתוני החדרת נגר טבעי. במקביל, פיתחנו מודל פיזיקלי לתיאור המערכת בצורה פשטנית, שמאפשר פיתרון יחסית פשוט שנגיש ופתוח לקהל. פרסמנו את החומר בכנסים, את המודל פרסמנו בספרות המקצועית ושאר החומר בהכנה לפרסום.

מערכת הפיילוט הראתה שניתן להעריך את יכולת החדרת הקידוח במחני החדרה מתאימים, מה שמאפשר להעריך את יכולת ההחדרה של קידוח לאחר פיתוחו ולתכנן את חידור הנגר בהתאם לכך. בנוסף, נתנו כלים הנדסיים, אם במודל ואם בגרף תכנוני (איור 13), לתכנון קידוח. למרות זאת, הראינו שהסתמכות על מקדם נגר קבוע, כפי שנהוג, מהווה בעיה. אמנם זה נושא שמנהל התכנון יצטרך לתת עליו את הדעת בהמשך, אבל להערכתנו כדאי להתייחס למקדם גבוה ולא ממוצע עונתי, כיוון שקיבולת קידוח נקבעת בארועי הגשם עצמם ואין לה כמעט משמעות בהיבט העונתי, פרט לכמות הכוללת העונתית שניתן להחדיר.