



ההידרולוגיה של מעין קארסטי עירוני - מעיין הגיחון, ירושלים

רונית בן-עמי עמיאל, עמוס פרומקין, תמיר גרודק
המחלקה לגיאוגרפיה, האוניברסיטה העברית, ירושלים



מבוא

מעייין הגיחון נובע במדרון המזרחי של גבעת עיר דוד, מדרום להר הבית בירושלים. כיום המעיין נובע כ-3 מ' מתחת למפלס הקרקע של נחל קדרון, המפריד בין עיר דוד לבין רכס הר הזיתים!¹ מעייין זה הינו מעייין קארסטי המהווה מקור מים יחיד בעל שפיעה איתנה באזור.² ספיכת הבסיס (דהיינו הספיכה שאינה תלויה ישירות במשקעים) של מעייין הגיחון הינה 0.025 מ"ק לשניה. חשיבותו הרבה של המעיין מוזכרת בספרות מחקרית ענפה אשר עוסקת בעיקר בממצאים הארכיאולוגיים בעיר דוד וסביבתה בתקופות שונות, אולם רק מעט ידוע על התנהגות המעיין מבחינה הידרו-גיאולוגית. סביב המעיין התפתחה לאורך השנים היסטוריה של התיישבות אשר נמשכת עד עתה. מאז תחילת ההתיישבות במקום בתקופה הכנענית (במאה ה-18 לפנה"ס), נותבו המים אל מוקדים שונים בעיר לשימוש אוכלוסייתה, דבר שמשקף גם במהלך תקופת הבית הראשון.³ כיום המעיין נמצא בתוך מטרופולין ההולכת וגדלה. לכן, עולה החשיבות של ניטור מעייין הגיחון, כמעייין קארסטי עירוני, כתורמה להבנה המעמיקה אודות ההידרו-גיאולוגיה של מעיינות קארסטיים.

מחקר זה בוחן את ההתנהגות ההידרולוגית של מעייין הגיחון, כמעייין קארסטי באזור עירוני, וזאת משני היבטים עיקריים: ההתנהגות ההידרולוגית והשפעת המרחב העירוני על התנהגות המעיין. המחקר כולל (א) בחינה של ספרות ומחקרים היסטוריים; (ב) איסוף נתונים הידרולוגיים היסטוריים; (ג) ניטור המעיין מבחינה כימית ובקטריאלית בשנה ההידרולוגית 2004/05; (ד) ניטור רציף וברזולוציה גבוהה של ספיכה, טמפרטורה ומוליכות חשמלית בשנה ההידרולוגית 2004/05. המאמר הנוכחי מציג חלק ממצאי המחקר.

רקע מחקרי

הקארסט הינו שטח בעל ההידרולוגיה וגיאומורפולוגיה ייחודיים הנוצר בעקבות שילוב של סלע מסיס ונקביות משנית מפותחת. קיימת ספרות מחקרית ענפה בתחומים הקשורים להידרולוגיה של זרימה עילית והידרולוגיה של מי תהום, אולם התחום המחקרי העוסק בזרימה באקוויפר קארסטי קשה יותר למחקר בגלל הזרימה תת קרקעית הנסתר (פלטון וקורנס 1994: 100). הבנת התהליכים ההידרולוגיים

1 לחל קדרון התמלא בסחיף נחלים ואדמת חורבות (שפכי פצילות עירונית) במהלך תקופת ההתיישבות במקום על כן גובה המעיין ביחס לקרקעית הנחל השתנה. בעבר המעיין נבע במדרון מעל נחל קדרון.

2 המעיין הקרוב ביותר לאזור המחקר הוא מעייין מי נפתוח הנמצא כ-6 ק"מ מצפון-מערב למעיין הגיחון.

3 בתקופת הבית השני החל פרויקט יבוא מים לירושלים מאזור הר חי ברון באמצעות אמות מים.

הכימיים הפועלים על שטח קארסטי מחייבת איסוף נתוני שטח, לרוב במערות ו/או במעיינות קארסטיים.

התכונות ההידראוליות של מעיינות קארסטיים קשורות בתנועת המים בתוך שבין פני הקרקע לבין פני מי התהום. תוך זה מאופיין בסדקים מורחבים בהמסה וכן במחילות המסה. על כן מערכת קארסטיות מהוות נתיב הולכה מועדף של מי גשם בתוך הבלתי רווי אל עבר מי תהום. מבחינה הידרו-גיאולוגית, ניתן להציג מערכת קארסטית בהפשטה כהרב של צינורות וסדקים עם מוליכות הידראולית גבוהה ($K > 10 \text{ m/sec}$) בהשוואה לסלעי הסביבה בעלי מוליכות הידראולית הנמוכה בסדר גודל אחד לפחות (גרסו ו'יאנין 2002: 608). רוב זרימת מי התהום באגנים קארסטיים מתנקזת דרך צינורות המסה לנקודת יציאה במעיין. כמות המים הנובעת מושפעת מהגשם, שטח המילוי החוזר האפקטיבי, מוליכות הידראולית של הסלע וכן נתאים הידרו-גיאולוגיים מקומיים המכתיבים גם את מקום הנביעה.

הסדקים המורחבים ומחילות ההמסה של האקוויפר הקארסטי מאפשרים מעבר מהיר של המים דרך התווך עם סינון טבעי מועט. מבנה זה של המערכת הופך אותה לאקוויפר רגיש במיוחד הן לשינויים טבעיים והן להשפעות חיצוניות, כגון השפעות אנתרופוגניות (כלומר, מעשי ידי אדם) של זיהום. על כן, עולה החשיבות של ניטור מעייין ברזולוציה גבוהה היכולה לעקוב אחר השינויים המהירים במערכת.

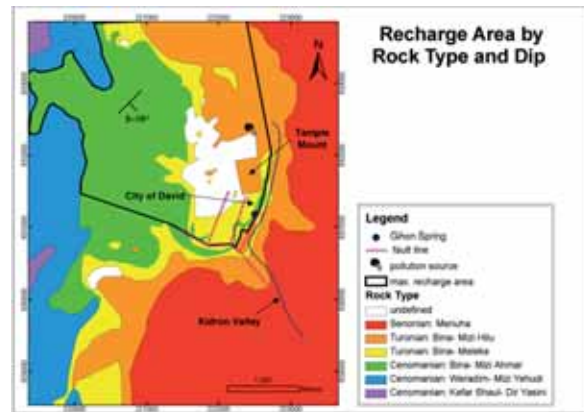
רוב הפעילות האנתרופוגנית המשפיעה על מי התהום מגיעה מאזורים עירוניים ו/או חקלאיים. העיור גורם לשינוי המאפיינים של האגן בו נבנתה העיר, כגון שינוי בשימוש קרקע. שינויים אלו משפיעים על ההידרולוגיה של האגן מבחינת קצבי חילחול, תדירות חילחול, דפוס המילוי החוזר של האקוויפר ואיכות מי התהום. לדוגמא, סלילת כבישים ובנית בניינים ומגרשי חניה מגדילה את שיעור האזורים שחדירתם פחותה (לזרו 1990). כמו כן, תיעול מי נגר אל מחוץ לעיר, למניעת הצפות של תשתיות עירוניות הינה שיטה הגורעת חילחול המים והעשרת מי תהום. אך, העיר יכולה גם לתרום למי התהום: השקיה של פארקים יכולה להעשיר מי תהום ויבוא מים לערים מגביר את המילוי החוזר. באזור עירוני נמצא כי קיימת דליפה למי תהום ממערכות שונות המספקות את צורכי העיר, כגון: מערכת אספקת מים, ביוב ובורות ספיגה. באנגליה, דליפה של 25% נחשבת לסבירה (ברט ואח' 1999: 3084). דליפות אלו גורמות לשינוי באיכות מי התהום וכן לשינוי בתנאי ההעשרה.

זיהוי מדויק של אזור ההעשרה ומהלך הזרימה בתוך הקארסטי אינו פשוט בסביבה עירונית, אולם על ידי מעקב רציף וברזולוציה גבוהה אחר ספיכת מעייין וההרכב הכימי

של המים, ניתן להוסיף נידבך חשוב לידע שקיים עד כה על מעיינות קארסטיים.

אזור המחקר

מעיין הגיחון נובע במערה פריאטית⁴ השוכנת על גדתו המערבית של נחל קדרון ב"ש 22,2500/631175, בתצורת בינה (חבורת יהודה) מגיל טורון, שעובייה באזור ירושלים מעל 100 מ'. התצורה מתחלקת לשלושה פרטים: בבסיס מיזי אחמר, במרכז מלכה ובחלק העליון מיזי חילו. שני הפרטים התחתונים מהווים את תשתית הסלע של גבעת עיר דוד (ראו איור 1). מעיין הגיחון נובע כ- 15 מ' מתחת לקו המגע בין המלכה והמיזי אחמר.



איור 1 - מפה גיאולוגית של אזור מחקר מעיין הגיחון עם תיחום שטח המילוי החוזר המסתכם ל- 7.5 קמ"ר.

המסה קארסטית בעיר דוד נמצאה במערכות המים הקדומות כדוגמת פיר ורון (פרומקין ואח' 2003: 171; פרומקין ושימרון 2006: 229) "הפיר הניסיוני" המצוי באזור הכניסה למערכת פיר ורון. ההמסה הקארסטית האינטנסיבית מתאפשרת הודות לתכונות ההידראוליות של הסלע הקרבונטי. פרט המיזי אחמר הוא סלע

4 מועד מעיין הגיחון הינה מערה פריאטית, משמעה היא נוצרה בעבר באזור הריו של האקוויפר כאשר מפלס מי התהום האזוריים היה גבוה יותר.

דולומיטי קשה וצפוף עם נקבוביות ממוצעת של 2.64% וחדירות ראשונית ממוצעת של 0.13 md. המלכה הנמצא מעליו, הינו סלע גירני עם שפע מאובנים על כן מאופיין בתכונות ההידראוליות הרבה יותר גבוהות: נקבוביות ממוצעת של 30.2% וחדירות ממוצעת של 135 md. הנקבוביות נוצרה בעיקר כתוצאה מהמסת שברי מאובנים המהווים כ- 30% מנפח הסלע (גיל 1997: 8 ו-גיל ושילה 1982: 33). תהליכים קארסטיים הנפוצים בהרי יהודה, משנים את ערכי החדירות הראשונית. זרימת מים בסדקים ובמישורי שיכוב מגבירה את המסת הסלע עד כדי יצירת מחילות ומערות (פרומקין ופישהנדלר 2005: 463). על כן, המסה קארסטית יכולה לשנות את חדירות הסלע באופן דראסטי.

כמות הגשם הרב שנתית הממוצעת לתקופה שבין 1961-1990 היתה 553 מ"מ, ובשנת המחקר 2004/05 ירדו 565.4 מ"מ גשם. הטמפרטורה השנתית הממוצעת באזור ירושלים היא 17.1°C. חודש אוגוסט הוא בדרך כלל החודש החם ביותר עם טמפרטורה ממוצעת של 24°C. ממוצע הטמפרטורות בחורף הוא 10°C (גולדריץ 1998: 116-80).

מערך איסוף הנתונים

שיטות מחקר שדה

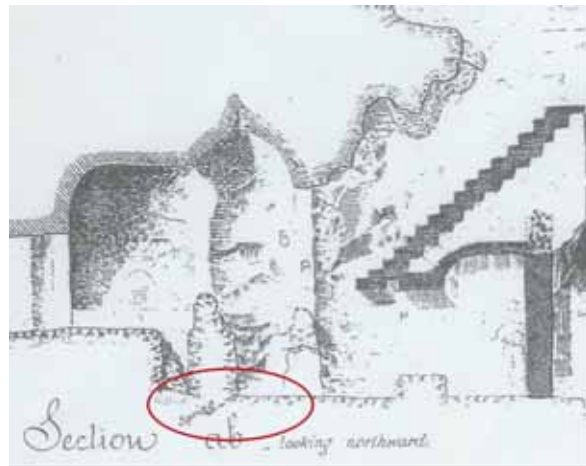
ספיקת המעיין נרשמה אחת לדקה בעזרת מד רום מסוג Druck Sensor שהותקן מתחת למדרגות היורדות למעיין.⁵ בקרבת מד הרום הותקן מד רציף של מוליכות חשמלית וטמפרטורה Solinst Level Logger.⁶ המדידה נרשמה אחת ל- 15 דקות. ערכי pH של המים נמדדו באופן מדגמי ולא רציף, בנקודות זמן נבחרות ובמהלך סופות בעזרת Sentron 1001 pH-System.⁷

נערכו 19 אנליזות כימיות של מי מעיין הגיחון שכללו: יסודות, אניונים ומומסים ו-6 אנליזות בקטריאליות אשר כללו צריכת חמצן ביולוגית, אמוניה, חנקן, בורון ודטררגנטים אניונים. לשם בדיקת בטיחות השימוש לשתיה נבחנו בקטריות מקבוצת הקוליפורם אשר הן יחסית קלות לאבחון ונותנות תוצאות ברורות אודות בטיחות

5 נתוני רום המים הוכנסו לחישוב הספיקה בעזרת נוסחת נוסחת מגלש מלבני של (Kindsvater-Carter JSC, 1980).

6 מוליכות חשמלית (EC) הינה היכולת להעביר זרם חשמלי על ידי מים. חלק מהמרכיבים המומסים במים הם בעלי מטען חשמלי קרי הם עבור יוניזציה. ככל שריכוז המלחים המומקים המומסים גבוה יותר, כך המוליכות החשמלית גבוהה יותר. מודד זה מציב על ידי המומקים המומסים במים.

7 ערך ה-pH מתאר את ריכוזי יוני המימן במים. הרמה נקבעת בדרך כלל עפ"י היחסים שבין יוני הקרבונט, ביקרבוט ודו-תחמוצת הפחמן. ה-pH משפיע על טעם המים ומידת האגרסיביות שלהם (פרידלר וגרין 2001).



איור 2 - חתך אורך במעיין הגיחון וסביבתו לפי ונסאן, 1911.

עיבוד הנתונים

הנתונים הרציפים של מעיין הגיחון וכן נתוני המשקעים עובדו בעזרת תוכנת MATLAB שהותאמה לרזולוציה הגבוהה של הנתונים והוכנו הידרוגרפים וכמוגרפים להצגת הנתונים. מעקב אחר התנהגות מעיין נעשית בעזרת הידרוגרף, שהינו עקום המציין את ספיקת המעיין כפונקציה של הזמן. צירופם הגרפי של נתוני הרכיבים הפיזיקאליים/ הכימיים במים (להלן כמוגרף), יכול להוסיף להבנת התנהגות המעיין. הנתונים הגיאולוגיים של אזור המחקר מופו בעזרת תוכנת Arc Info, GIS להצגת אזור המחקר וגבולות שטח המילוי החוזר של המעיין.

חשיפת הנביעה

עבודת ניקוי מערת המעיין מפסולת וסחף בוצעה בכדי לחשוף את הנביעה של מעיין הגיחון. בשנת 1911 חשף ונסאן לראשונה את נקודת הנביעה. בשרטוטיו צייר ונסאן תעלה ולידה ציין (במהדורה האנגלית של ספרו) את המילה spring (ראו איור 2). שטח זה התמלא מנאז 1911 בפסולת וחומר סחף רב וכוסה לבלי היכר. ניקוי מערת המעיין נעשה תוך שימוש בשרטוטי ונסאן ודוחות מחפירותיו. הניקוי בוצע ונוהל על ידי כותבת שורות אלו בהשתתפות צוות היחידה לחקר מערות באוניברסיטה העברית (להלן המלח"מ) ומתנדבים. החפירה דרשה עבודה בתוך מים (בטמפרטורה של כ- 19°C), בבור צר ועמוק, בסיוע ציוד חפירה, תאורה תת-מימית, משאבות חשמליות ואמצעי צלילה. החומר הוצא במהלך העבודה נאסף לתוך שקים למטרת סינון ובדיקה על ידי הארכיאולוגים של האתר: רוני רייך ואלי שוקרון. העבודה הסתיימה בהגעה לסלע האם וחשיפת מוצא הנביעה.

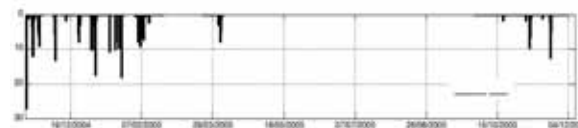
תוצאות

נתוני ניטור

על פי שנתוני השרות ההידרולוגי הספיקה היומית הממוצעת של מעיין הגיחון הינה 1,644 מ"ק והספיקה הרב שנתית הממוצעת עומדת על כ- 600,000 מ"ק. לשם השוואה, מעיין מי נפתוח, שנוכר לעיל, הוא בעל ספיקה שנתית ממוצעת של 125,000 מ"ק. על פי נתונים חודשיים אלו ניכר כי המשקעים משפיעים באופן ניכר על המעיין ומעלים את ספיקת שיא ההידרוגרף, המתקבל לרוב בחודשים פברואר ומרץ. העונה הגשומה מתחילה להשפיע על המעיין כחודש לאחר תחילת המשקעים. ההשפעה מסתיימת סביב חודש יוני לאחר סיום המשקעים כאשר שפיעת המעיין דועכת לספיקה חודשית ממוצעת של כ- 35-40 אלף מ"ק. נתונים אלו מציינים מעיין בעל שתי מגמות זרימה: זרימת בסיס שאינה תלויה בגשם ושפיעה הנוספת מעל לזרימת הבסיס. הזרימה הנוספת מעל לזרימת הבסיס הינה בעלת משך קצר. אחרי חודש יוני אפקט המשקעים מאוד קטן והמעין חוזר לנפחים הבסיסיים. מסקנות אלו נלמדות

מנתוני השרות ההידרולוגי בעלי רזולוציית מדידה נמוכה בהשוואה למחקר הנוכחי. בזכות המדידות ברזולוציה גבוהה של המחקר הנוכחי מקבלים מידע מדויק יותר אודות ההידרולוגיה של המעיין.

בתום העונה היבשה של קיץ 2004 (תחילת חודש נובמבר), עמדה ספיקת המעיין (קרי ספיקת הבסיס) על 0.025 מ"ק לשנייה. ספיקת השיא נרשמה בחודש פברואר ועמדה על 0.164 מ"ק לשנייה. עם סיום השנה ההידרולוגית 2004/05 חזרה הספיקה לערך דומה בתחילת חודש נובמבר - 0.031 מ"ק לשנייה. איור 3 מציג את הנתונים הרציפים שנמדדו במהלך המחקר אל מול נתוני הגשם של השרות המטאורולוגי. הספיקה השנתית לשנת 2004/05 המחושבת מתוך נתוני הספיקה הדקתיים הינה 1.9 מליון מ"ק. ספיקה זו חושבה ע"פ סכום של הספיקות החודשיות הממוצעות. ניתן להסביר את ההבדל בין נתוני המחקר הנוכחי לבין נתוני השרות ההידרולוגי בבחירת מיקום מדידה שונה, בשימוש במכשירי מדידה שונים ובוואריאביליות הגבוהה של נתוני מעיינות קארסטיים היוצרים לעיתים שינוי משמעותי בנתונים.



איור 3 - מעיין הגיחון בשנה ההידרולוגית 2004/05: ניטור רציף של ספיקה, טמפרטורה ומוליכות חשמלית אל מול נתוני משקעים.

על פי נתוני המחקר, המעיין מגיב לאירוע גשם במסגרת זמן של שעות עד ימים ספורים, ולא חודשים כפי שהובן עד כה. במהלך סופות באמצע נובמבר ובפברואר המעיין הגיב למשקעים תוך 3.5 ו- 88.8 שעות בהתאמה. משך הזמן בין שיא המשקעים ושיא ההידרוגרף היה 15 ו- 30.5 שעות בהתאמה.

המוליכות החשמלית הממוצעת של מעיין הגיחון עומדת על 1.540 mS/cm. בסוף העונה היבשה נרשמה מוליכות חשמלית מרבית של 2.390 mS/cm והמוליכות החשמלית המינימאלית נמדדה בחודש פברואר: 1.278 mS/cm. לאורך כל סופות הגשם נמדדה במעיין מגמת שינוי של המוליכות החשמלית בהתאם למהלך הסופה: לפני סופת גשם נרשמת יציבות במוליכות החשמלית אשר יורדת בתגובה למשקעים ועולה שוב למגמת התייבבות. הטמפרטורה במעיין יציבה יחסית לאורך השנה ונעה סביב 19°C. הטמפרטורה המינימאלית התקבלה בחודש פברואר (19.03°C).

המקסימאלית בחודש ספטמבר (19.42°C), בסוף העונה היבשה. לאחר אירוע גשם, יש לרוב ירידה בטמפרטורה של המעיין ואז עליה חזרה לערך ההתחלתי.

היונים המומסים העיקריים (וממוצעים) הם: סידן (103 מג"ל), נתרן (125 מג"ל), כלוריד (191 מג"ל) ו- ביי-קרבונט (245 מג"ל). לשם השוואה, הכלוריד הממוצע הנמדד במי נפתוח הינו 160 מג"ל. חומציות המים (pH) הממוצעת המדודה היא 7.14. באקוויפרים קארסטיים רמת החומציות המוכרת היא 7.8 pH. יש לציין כי כל ריכוזי החנקן (NO₃) שנמדדו במים היו מעל לערך התקן למי שתיה (שהוא עד 70 מג"ל) עם ממוצע העומד על 112.3 מג"ל. ריכוז בקטריות הקוליפורמים הצואתיים חורג הרבה מעל לתקן מי שתייה שהוא עד מושבה אחת ב-100 מילי ליטר מים. רק בשתי אנליזות, תוצאת הקוליפורמים עומדת בתקן למי שחיה בישראל שהינה עד 200 מושבות ב-100 מילי ליטר מים.

הנביעה

מטרתה של עבודת ניקוי החלל הקארסטי של הנביעה היתה בחינה מחודשת ומעמיקה של מעיין הגיחון כמעין פועם. היקף החלל שנחשף בניקוי הוא כ- 4 מ' ועומקו כ- 2 מ'. מתוך הבור הוצא חומר סחף בטווח גודלי גרגר משתנה: אבני חצץ, חול, סילט ואף חומר חרסיתי. כמו כן הוצאו מספר רב (יחסית לגודל הבור) של אבנים מסותתות. חלקן היו מונחות כמדרגות גישה מהצד המזרחי של חלל המעיין. להלן הממצאים העיקריים:

1. המעיין נובע מתוך סדק קארסטי מוארך הממוקם בפינה הדרום-מערבית של החלל בעומק של 129 ס"מ מתחת לסף המערבי (ראה איור 4). הסדק בעל רוחב של כ- 1.5 ס"מ לערך אך אורכו המלא אינו ידוע מאחר וכל האבנים (קטנות) בקרקעית חלל הנביעה טרם הוסרו.
2. ניכרת זרימה חזקה של מים מתוך סדק הנביעה. לא נמצאה עוד נביעה בבור החפירה.
3. חומר המילוי שהוצא מבור החפירה הכיל גם מרכיבים מודרניים (גולות, חלקי מתכת, גרעיני משמש) ולכן ניתן להסיק שבור המעיין נוקה כבר בעבר, ונסתם מחדש בפסולת.
4. הצד המזרחי של בור החפירה בנוי בבטון ומוסתר מלמעלה על ידי סלע המונח בחוזקה עליו. מטבע בערך של 100 מיל משנת 1927 שהתגלה דבוק אל הבטון משמש ככלי לתיארוך גיל מינימום לניקוי והנחת סף הבטון באתר המעיין.
5. בתחתית הסף המזרחי מצויים שני פתחי צינורות. אורך הצינורות הוא לפחות

דיון ומסקנות

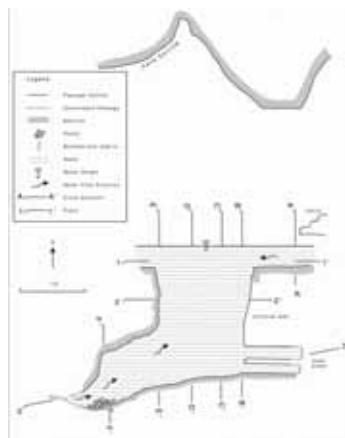
שטח מילוי חוזר

תיחום שטח מילוי חוזר¹⁰ מבוסס בהרבה על נטיית שכבות וטופוגרפיה. נטיית השכבות של סלעי חבורת יהודה בירושלים הינה דרום-מזרח והיא מכוונת את זרימת מי תהום אל עבר מעיין הגיחון. מעיין הגיחון נבע בעבר מעל מפלס הסלע (הקרקעית המקורית) של נחל קדרון ועל כן נחל קדרון נבחר כגבול מזרחי. על פי תפיסה זו הגבול הדרומי הינו השטח בקרבת המעיין מדרום.

ככדי לאשש את גודל שטח המילוי החוזר, מוכר במחקרים השימוש בנותבים.¹¹ במחקר זה לא הוחדרו נותבים מלאכותיים לתת-הקרקע אך נעשה שימוש בנותבים שנאספו באת אירוע זיהום המעיין. בחג השבועות תשס"ב (05/2002) התגלתה זרימה של מי ביוב גולמי במעיין הגיחון. זו היא ככל הנראה הפעם הראשונה בתולדות הנביעה שמי הגיחון כה מזוהמים. נמצאה דליפה משמעותית מצינור ליד מוזיאון רוקפלר בפינה הצפון-מזרחית של חומות העיר העתיקה. שבוע לאחר תיקון הצינור, חל שיפור משמעותי באיכות מי מעיין הגיחון. מי הביוב מהווים נותב המעייד כי הגבול הצפוני המינימאלי של שטח המילוי החוזר של מעיין הגיחון הוא באזור רחוב סולטאן סולימאן, במקביל לקו החומות הצפוניות של העיר העתיקה. שילוב ניתוח זה עם מפה סטרוקטורלית¹² (יצחקי וארקין 1964) מניב גבול צפוני של שטח המילוי החוזר. במפה ניכר ציר קמר מקומי החוצה את השטח מצפון לעיר העתיקה ממערב למזרח ובכך מהווה קו פרשת מים סטרוקטורלית מקומית. קו זה נמצא כ- 1000 מ' מצפון לעיר העתיקה ולנקודת הזיהום של המעיין. ממערב לעיר העתיקה לא ניתן למצוא במפה קו גבול גיאולוגי ברור התוחם את אזור המילוי החוזר. ניתן להניח כי שטח המילוי החוזר משתרע מערבה עד אזור המגע של פרט מיזי אחמר (ממנו נובע המעיין) עם פרט מיזי יהודי של תצורת ורדים, סביב אזור קריית הלאום. שטח המילוי החוזר בגבולות אלו מסתכם לכדי 7.5 קמ"ר (ראו איור 1). לביסוס ההצעה לעיל יש להכין מודל נומרי המתחשב בכלל המשתנים התורמים ומשפיעים על נפח המעיין.

70 ס"מ⁸ יתכן וצינורות אלו, העשויים פלדה, והוכנסו לתוך הסף על מנת לאפשר ניקוה של מי המעיין לכיוון מזרח, אך לא ברור לאיזו תקופה יש לשייך צינורות אלו.⁹ קוטרו החיצוני של הצינור העליון הוא 20 ס"מ וקוטר הצינור התחתון מוערך ב-14 ס"מ. הצינורות ממוקמים אחד מעל השני במרווח של 6 ס"מ, כאשר הצינור התחתון נושק לרצפת בור החפירה ולכן הצינור אינו עיגול שלם. הצינור העליון נמצא בעומק של 156 ס"מ מתחת לסף המזרחי.

6. השטח מתחת לגרם המדרגות המוביל למעיין לא נוקה כלל. בשאיבה שנערכה במרץ 2007 בזמן שיפוץ רצפת נקבת חזקיהו (לאחר סיום המחקר הנוכחי), נראה כי מתחת למדרגות התיישבו המים ושורב המים נובעים מן הסדק שנחשף במהלך המחקר.



תהליך החפירה וממצאי צולמו וערכו לסרט. כיום, נביעת המעיין חשופה בשטח שמתחת לגשר ברזל שמעל בור החפירה.

איור 4 - חתך מערת המעיין. מעיין הגיחון נובע מתוך סדק קארסטי (למטה משמאל) הנחשף במהלך ניקוי מערת המעיין.

8 הוכנס מוט ברזל לתוך הצינורות, וכעבור 70 ס"מ נתקל המוט בחומר מילוי דק גרור.

9 ארכיאולוג האתר, אלי שוקרון מצא שרידי של שני צינורות פלדה, בעלי קוטר דומה, בחפירות המגדל התחתון, מתחת לגרם המדרגות המוביל למעיין.

10 שטח מילוי חוזר הינו הגדרת השטח התורם מים למעיין. (במקור מים עילי מדובר ב"אגן היקוות").

11 נותב הינו חומר הנמצא באופן טבעי (כמו מומסים) או מלאכותי (כמו צבע מיוחד לאקויפר) בגוף המים בריכוז מספיק גבוה לאבחון.

12 הפקדיה של מפה סטרוקטורלית היא לתאר את המבנה הגיאולוגי באמצעות הטופוגרפיה של שכבת סלע מוסימת (גבירצמן, 2002: 106).

תגובת המעיין לאירועי העשרה

מגמת השינוי של הטמפרטורה של מי המעיין עוקבת כמעט במדויק אחר מגמת השינוי של המוליכות החשמלית של מי המעיין, ומציגה תמונת ראי למגמת השינוי של הספיקה. ירידת הטמפרטורה מציינת כנראה יציאה של מי גשם מהסופה הנוכחית דרך המעיין. נתוני הטמפרטורות הינן גבוהות מטמפרטורות האוויר שנמדדו באותו זמן, הן בתוך מערת המעיין והן מחוצה לה. תופעה זו קשורה לזמן שהות של המים באקוויפר וכן לגרדיאנט הגיאו-תרמלי של סלעי חבורת יהודה. המים המזינים את האקוויפר מתחממים תוך כדי תנועתם בקרקע כתוצאה ממגע עם סלעי הסביבה. לגוף המים שמזין את זרימת הבסיס של המעיין יש זמן שהות ארוך יותר בסלע ולכן מים אלו מגיעים לשיווי משקל תרמי וכימי עם הסלעים שסביבם. גוף המים המהווה את המרכיב המהיר בזרימת המעיין לרוב לא מגיע לשיווי משקל תרמי לכן הטמפרטורה המתקבלת נמוכה יותר. הירידה בטמפרטורת מי המעיין מצביעה כנראה על תוספת של מים מן הסופה הנוכחית. נתוני המוליכות החשמלית מאשרים ניתוח זה (ראו איור 5).

תרומה עירונית

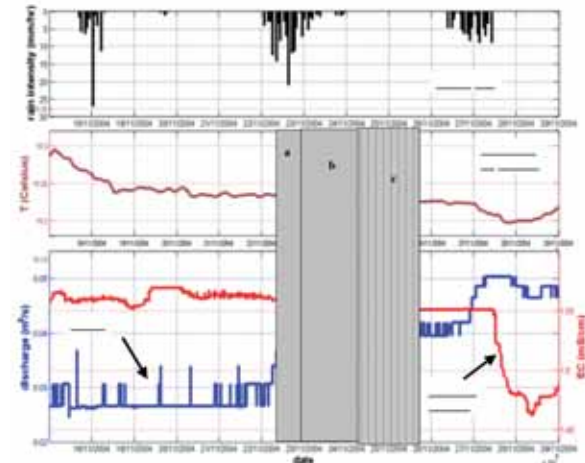
המוליכות החשמלית הממוצעת של מעיין הגיחון גבוהה יחסית למעינות הרי יהודה הממוקמים בשטחים פתוחים לדוגמה עין סעידה (0.855 mS/cm) ליד מושב עמידב ועין ביכורה (0.461 mS/cm) בסטף. עין יעל עם 0.530 mS/cm הינו דוגמא למעיין עירוני למחצה המזון משטח שעליו יושבת שכונה עירונית (גילה). מעיין הגיחון העירוני עדיין בולט במוליכות חשמלית גבוהה יותר. המוליכות החשמלית הגבוהה וריכוזי מומסים גבוהים יכולים להצביע על זיהום ממקור אנתרופוגני בשטח המילוי החוזר של המעיין. הזיהום קשור לפעילות האדם ולתשתיות לקויות. בשטח המילוי החוזר של מעיין הגיחון יושבות העיר העתיקה- בעלת תשתיות ישנות, וירושלים המודרנית שמחוץ לחומות- בעלת תשתיות חדשות יותר. שימושי הקרקע תורמים לחדידת מומסים לתת-הקרקע המגיעים עם זרימת מי הגשמים למעיין הגיחון.

במהלך חודש נובמבר 2005 נמדדו שלושה אירועי מוליכות חשמלית חריגה (מעל 2.0 mS/cm). בכל אירוע מחזור של 5 ימים בהם שיא המקסימום של המוליכות נרשם סביב חצות הלילה והמינימום בשעות הצהריים (ראו איור 6). תופעה כזו לא נצפתה באף תקופה אחרת לאורך שנת המחקר.



איור 6 - מוליכות חשמלית חריגה במעיין הגיחון בחודש נובמבר, 2005.

תופעה דומה של שינוי מחזורי במי תהום, נמצא בדרך כלל לאורך קו החוף. קיימות תנודות במפלס מי התהום כתוצאה מגאות ושפל הגורמים לחדירת מי מלח לאקוויפר (מאר 2006: 110). התנודות במפלס ובהרכב מי תהום יכולים אף להיות מושפעים מהחוף גם בפנים היבשה. כאשר לשון ימית חודרת ליבשה דרך נהר לדוגמא, ניתן לקבל תנודות קצרות מועד הנוצרות כתוצאה מדחיפת הגלים וכתוצאה מתנודות גאות ושפל (ווסטברוק ואח' 2005: 255). מעיין הגיחון הינו מעיין קארסטי עירוני הנובע מתוך מרחב אקוות החר חרוק וגבוה מכל השפעה ימית. לכן סביר לקשר את תופעת השינוי המחזורי של המוליכות החשמלית במעיין הגיחון לפעילות אנתרופוגנית בשטח המילוי החוזר (וואסקאז-סוני ואח' 2005: 526). לאור אירועי הזיהום של המעיין בשנת 2002 נלמד כי מעיין הגיחון הקארסטי רגיש מאוד לשינויים



איור 5 - מעיין הגיחון במהלך אירועי גשם בתחילת השנה ההידרולוגית: a- מים בגורם b- מי העשרה חדישים c- מים המתגנבים מנקבוי הסלע.

ההידרולוגי). בשנתן השרות ההידרולוגי משנת ה-1973/74 מעיין הגיחון מאופיין כמעין פועם. אך, במסגרת המחקר הנוכחי, המדידות הרציפות של ספיקת המעיין לא גילו פעימות. נתונים כמותיים אלו בצירוף תצפיות רבות בשטח מובילים למסקנה כי מעיין הגיחון כיום אינו מעיין פועם.

מעיין פועם הינו תופעה קארסטית מעניינת ונדירה. ב-1967 דווח כי ישנם רק 40-30 מעיינות פועמים בעולם (בוטאקי 1987). מעיין פועם נוצר כאשר קיים סיפון בתוך הנקובי המנקז את המים החוצה לנביעה. סיפון הינו צינור מכופף בצורה לא שווה עם רגל קצרה המחוברת למאגר המים התת-קרקעי ורגל ארוכה המוציאה את המים החוצה לנביעה. המים עולים בצינור בגלל הפרשי לחץ. כאשר המים מגיעים לשיא הכיפוף, כוח הכובד מושך אותם והם זורמים מטה לאזור הנביעה וכל המים במאגר מתרוקנים בפתאומיות (ראו איור 7). תופעה זו יכולה להיעצר אם כמות המים המסופקת למאגר גדולה מהנפח המקסימאלי של הסיפון. במקרה כזה, המעיין יהפך למעיין גלישה קארסטי גריל (בוטאקי 1987).

איור 7 - סכימה של מעיין פועם. כאשר גובה המים במערה עולה ל- H_2 כל המים במערה בין H_1 ל- H_2 פתאים יוצאים החוצה לנביעה, בעקבות עקרון הסיפון. כאשר המים מגיעים ל- H_1 יש שטף רב למערה נכנסות הפעימות (מתוך: בוטאקי, 1987).

ייתכן ותופעת הפעימות הופסקה בשל תוספת מים המגיעים לתת-הקרקע מתרומה עירונית. מתוך ההרכב הכימי של המעיין נמצא כי קיימת תרומה עירונית ברורה למעיין. המים המסופקים לעיר דרך צינורות תת-קרקעיים נאספים שוב בבורות ספיגה או צינורות ביוב. במקרים רבים, יבוא מים אלו מספק הזנה משמעותית למי התהום בגלל דליפות ממערכת הצינורות. כפי שכבר צויין לעיל, האיבודים מוערכים בעולם ב-25% ל-20 מהאספקה של המים (לרנר 2002: 145). מים אלה מחלחלים לתוך הנקובי ומצטרפים להעשרה הטבעית של מי התהום. העשרה זו יכולה ליצור מצב בו מתבטלים הפרשי הלחץ במאגר הגדול ובכך המעיין משתנה למעיין גלישה ללא פעימות. ככל שיעיר תפתח וצפיפות האוכלוסין תגדל, יובאו יותר מים לעיר, ובכך כמות ההעשרה למי התהום תגדל. תופעה זו יכולה להסביר את ההבדל בין תצפית ונסאן ב-1911 לעומת ממצאי המחקר הנוכחי. מתוך ממצאי החפירה לא ניתן להבין אם מעיין הגיחון היה מעיין בעל סיפון מאחר ולא נמצאה תעלת נביעה שלתוכה ניתן להחדיר סיב אופטי לבחינת פנים חלל הנביעה.

יש המנסים לקשר את אופי הזרימה בפעימות אל משמעות השם 'גיחון'. מעיין הגיחון מוזכר בתנ"ך כמעין בעיר דוד/ירושלים בהקשר להמלכת שלמה המלך (מלכים א' א) ובהקשר למפעל המים של המלך חזקיהו (דברי הימים ב' לב). הפרשנים מנסים להבין

בהרכב הכימי של מי ההעשרה. ייתכן ולאורך חודש נובמבר 2005 אירע זיהום אנתרופוגני מכוון שכפיית מי שופכין למערכת הקארסטית בקרבת המעיין. המעיין הגיב במהירות ולכן ניתן להסיק כי נקודת הזיהום נמצאת כנראה בקרבת המעיין. לא נלקחו אנליזות כימיות במהלך מחזורי השינוי החריף של המוליכות החשמלית על מנת לאשר טענה זו.

החנקה (NO_3) הינה יון ראשי במעיין הגיחון (101 מג"ל בממוצע). המקור הראשוני של חנקה במים הינו שפכים. ערך גבוה של חנקה, כפי שמתגלה במעיין הגיחון, נמצא אף במי התהום בקרבת כפרים ערביים-ישראליים. אלפי בורות ספיגה ביתיים פעלו במשך עשרות שנים בכפרים כגון כפר קאחס וכפר ברא (מצפון לראש העין) המצויים על סלעים קארסטיים של חברת יהודה. במי בארות סמוכות נמדד ריכוז חנקה של מעל 90 מג"ל, שמעיד כי התשטיפים דלפו והגיעו למי התהום. בשנת 1992 נחנכה בכפר ברא מערכת ביוב חדשה ומרבית השפכים נאספו וסולקו מהמקום. בתוך חודשים ספורים ירדו ריכוזי החנקה מתחת ל-30 מג"ל (גבירצמן 2002: 133). במחקר במעינות של סלוס (2001) נמצא כי ברוב המעינות ריכוז החנקה לא עלה על 32 מג"ל אך במעינות המנקזים כפרים, עין מצבב ועין אל בלד סורדא, היו ריכוזים כפולים-53, 69 מג"ל בהתאמה. במעיין הגיחון הריכוז הממוצע של החנקה הוא בערך פי 2 מזה שבעין מצבב. נתון זה מצטרף לבדיקות הבקטריאליות המעידות על פעילות אנושית על-קרקעית באזור המילוי החוזר העירוני של המעיין. יש ליחס את הריכוז הגבוה של החנקה במעיין הגיחון למערכת בורות ספיגה לא מתוחזקים באגן העיר העתיקה היושבת על שטח המילוי החוזר של המעיין.

פעילות מעיין הגיחון

בשנת 1909 הצטרף ונסאן לחפירות של משלחת פארקר ותיעד פעימות ברורות במעיין הגיחון, אחת לכמה שעות:

"... water emerges accompanied by loud echoing noise heard 1-2 min before the water rises and during the whole period of the strongest flow..."
 "... water rushed out unexpectedly every two or three hours, running for twelve or fifteen minutes at a time" (Vincent, 1911: 5 and 37).

מאז, אין תיאור מפורט על אופי כזה של זרימה. בשנות ה-1970 דווחו מספר מקרים בהם קבוצות מטיילים בנקבת חזקיהו (המוזן על ידי מעיין הגיחון) הרגישה שהמים עולים בצורה פתאומית. מתוך ביורים בנושא, הובן כי העלייה החדה במפלס המים נגרמה כתוצאה מסתימת פתח ניקוז המים בקצה הנקבה (תיק גיחון, השרות

את השם גיחון בעזרת ההקשה אל נהר הגיחון היוצא מעדן ו- "...הוא הסובב את כל ארץ כוש" (בראשית ב יג). רש"י ורד"ק מפרשים כי אין קשר ממשי טבעי בין מעיין הגיחון ונהר הגיחון. רש"י סבור שנהר הגיחון נקרא כך כי "הולך והומה והמייטו גדולה מאוד" ז"א שמדובר בנהר איתן עם זרימה חזקה. רד"ק מפרש ש"נקרא גיחון לשון יציאה מן..... וכן נקרא השילוח גיחון לפי שיוצאים ממנו פלגים רבים להשקות הגנות אשר בירושלים". מדברים אלה ניתן להבין כי בעיני פרשני ימי הביניים המונח 'גיחון' מתייחס לזרימת מים איתנה היוצאת (אולי מן הסלע) לשימוש האדם. לעומתם קושר בעל הבן יהודע' קשר ממשי בין שני מקורות מים אלו: מי מעיין הגיחון "באים מהגיחון היוצא מעדן על ידי מחילות תחת הקרקע ולכן נקרא הגיחון" (תאנה 2001). בין אם הפרשנות מתייחסת לקשר לנהר הגיחון או לאו, מקובל על פרשני המקרא המסורתיים שאופי הזרימה של הגיחון דומה לנהר איתן עם זרימה חזקה, ללא אזכור לזרימה בהפסקות/פעימות.

סיכום

מחקר מעיין הגיחון הינו מקרה מבחן להבנת תהליכים הידרו-גיאולוגיים הפועלים במערכת קארסטית המושפעת אף מתהליכים אנתרופוגניים. אקוויפרים קארסטיים הינם מקורות מים חשובים לאוכלוסיית העולם. יחד עם זאת הם בעלי רגישות גבוהה לזיהום עקב הסעה מהירה של מזהמים במערכת של מחילות ההמסה. שיטות אפקטיביות לניהול והגנת אקוויפרים קארסטיים מחייבות אפיון הולם של האופי ההידרו-גיאולוגי של המערכת. ניתן לעשות זאת על ידי ניתוח תגובות הידראוליות של מעיין בצרף תגובות פיזו-כימיות לאירועי העשרה. מעט מאוד מעיינות בעולם עוברים או עברו ניטור רציף ברזולוציה כה גבוהה כפי שנעשה במהלך המחקר שהוצג כאן על מעיין הגיחון. ניטור כזה מאפשר ללמוד בזמן אמת על התנהגות ומורכבות המערכת ותנועת הזורם בה.

שטח המילוי החוזר של המעיין משתרע על כ- 7.5 קמ"ר מצפון-מערב למעיין הגיחון. שטח זה כולל את אזור העיר העתיקה וכן חלק מן ההתפרסות המודרנית מחוץ לחומות. על פי ניתוח מגמות השינוי של הטמפרטורה והמוליכות החשמלית ביחס לספיקה בעת אירועי גשם, נמצא כי זמני התגובה של המעיין נעים בין שעות לימים. תגובה מהירה זו מעידה על זרימה בתוך מחילות המסה אשר מתאפיינות ביכולת סינון נמוך. איכות מי המעיין מושפעת ישירות מהפעילות העירונית, כך מעידים לדוגמה ריכוזי חנקן וקולירומים צואתיים גבוהים. מעיין הגיחון איננו כיום מעיין פועם ויתכן וניתן לקשור את הפסקת התופעה גם היא לתרומה עירונית.

מעיין הגיחון היווה בעבר מקור המים העיקרי לתושבי האזור. כיום, המים זורמים בנקבת חזקיהו ורובם מתווספים למערכת הניקוז והביוב של נחל קדרון. כמות המים הנובעת במעיין הגיחון אינה מבטלת. למרות ההתפתחות העירונית וסתימת אזרי חילחול והעשרה בבניה וסלילה, מעיין הגיחון זורם בצורה איתנה. הקשר המובהק שהתגלה בין הפעילות העירונית על פני שטח המילוי החוזר לבין איכות המים במעיין מאפשר להניח כי העיר תמשיך להשפיע בעתיד על המעיין הן מבחינה איכותית והן מבחינה כמותית. יתכן כי ספיקות המעיין יגדלו בעתיד בזכות עלייה כמותית באיבודים ממערכת האספקה העירונית. יש לחשוב על מעיין הגיחון כמקור מים נוסף בירושלים שניתן לנצל גם מעבר לצרכים תיירותיים, גם אם לא כמקור מי שתייה.

Fisher, 'Interaction between shallow groundwater, saline surface water and contaminant discharge at a seasonally and tidally forced estuarine boundary', Journal of Hydrology, 302, pp. 255-269.

1911 נסאן

L.H. Vincent, Underground Jerusalem: Discoveries on the Hill of Ophel (1909-11), London.

1964 יצחקי וארקין

י' יצחקי, ו- י' ארקין, ירושלים - בית שמש: מפה סטרוקטורלית (1:50,000), המכון הגיאולוגי: ירושלים.

1990 לזרו

T.R. Lazaro, Urban Hydrology- a Multidisciplinary Perspective, Co., Lancaster, PA.

2002 לרנר

Lerner, D.N. 2002. "Identifying and quantifying urban recharge: a review", Hydrogeology Journal, 10: 143-152.

2006 מאו ואח'

X. Mao, P. Enot, D.A. Barry, L. Li, A. Binley and D-S. Jeng, 'Tidal influence on behaviour of a coastal aquifer adjacent to a low-relief estuary', Journal of Hydrology, 327, Iss. 1-2, pp. 110-127.

2001 סלוס

מ. סלוס, השפעת העיור של רמאללה על איכות מי התהום בקרבתה, חיבור לשם לשם קבלת תואר מוסמך למדעי החקלאות, רחובות, האוניברסיטה העברית.

1994 פלטון וקורנס

G.K. Felton, and J.C. Currens, 'Peak flow rate and recession curve characteristics of a karst spring in the inner bluegrass, Central Kentucky', Journal of Hydrology, 162, Iss. 1-2, pp. 99-118.

2005 פרומקין ופישהנדלר

A. Frumkin and I. Fischhendler, 'Morphometry and distribution of isolated caves as a guide for phreatic and confined paleohydrological conditions', Geomorphology, 67, pp. 457-471.

2006 פרומקין ושימרון

A. Frumkin and A. Shimron, Tunnel engineering in the Iron Age: geoarcheology

ביבליוגרפיה

1987 בונאקי

O. Bonacci, Karst Hydrology: With Special Reference to the Dinaric Karst, Germany.

1999 ברט ואח'

M.H. Barret, K.M. Hiscock, S.Pedley, D.N. Lerner, J.H. Tellam. And M.J. French, 'Marker species for identifying urban groundwater recharge sources: a review and case study in Nottingham, UK', Water Research, 33, pp. 3083-3097.

2002 גבירצמן

גבירצמן, משאבי המים בישראל, ירושלים.

1998 גולדרייך

י. גולדרייך, האקלים בישראל: תצפיות חקר ויישום, רמת גן.

1997 גיל

D. Gill, 'The Geology of the City of David and its Ancient Subterranean Waterworks', Qedem, 35, Monographs of Institution of Archeology, Hebrew University of Jerusalem, IV, pp. 1-28.

1982 גיל ושלילה

D. Gill, and Y. Shiloh, 'Subterranean Water Supply Systems of the City of David: Utilization of a Natural Karstic System', Israel Geological Society 1982 Annual Meeting.

1980 גרסו וג'יאנין

D.A. Grasso, and P-Y. Jeannin, 'A global experimental system approach of Karst Springs' hydrographs and chemographs', Ground Water, 40, Iss. 6, pp. 608-618.

2005 וואסקאז-סוני ואח'

E. Vazquez-Sune, E.X. Sanchez-Vila and J. Carrera, 'Introductory review of specific factors influencing urban groundwater, an emerging branch of hydrogeology, with reference to Barcelona, Spain', Hydrogeology Journal, 13, pp. 522-533.

2005 ווסטברוק ואח'

S.J. Westbrook, J.L. Rayner, G.B. Davis, T.P. Clement, P.L. Bjerg, and S.J.

of the Siloam Tunnel, Jerusalem', Journal of Archaeological Science, 33, pp. 227-237.

פרומקין ואח' 2003

A. Frumkin, A. Shimron and J. Rosenbaum, 'Radiometric Dating of the Siloam Tunnel, Jerusalem', Nature, 425, pp. 169-171.

פרידלר וגרין 2001

ע. פרידלר ו- מ. גרין, ניתוח נתוני איכות המים עבור עמותת אזרחים למען הסביבה בגליל, תוכנית ממ"ק - מחקר מדעי בשיתוף הקהילה מרכז ציפורי: יער ירושלים.

שנתוני השרות ההידרולוגי

משרד החקלאות: נציבות המים - מחלקה לחקר מקורות המים, שנתון הידרולוגי לישראל: -1999/2000 1973/74, ירושלים.

תאנה 2001

ב' תאנה, מעיין השילוח בעיר דוד, ירושלים.

תוד 1959

D.K. Todd, Ground Water Hydrology (1st ed.), Japan

תיק גיחון

השרות ההידרולוגי, תיק גיחון - התכתביות

ISO (1980). International Organization of Standards, ISO 1438/1-1980[E]. Water flow measurement in open channels using weirs and venturi flumes - Part 1: Thin plate weirs, 1980. Available from Global Engineering Documents at <http://global.ihs.com>