

השפעת כמות המשקעים השנתית על מעיינות השכבה בהרי ירושלים

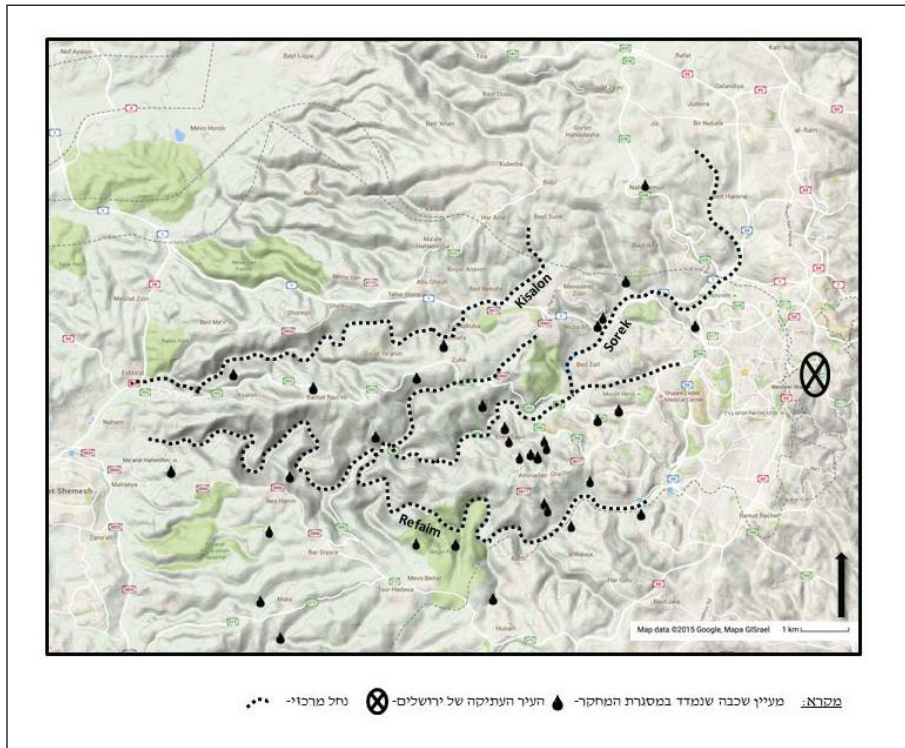
עזריאל יחזקאל ועמוס פרומקין

רקע

מעיינות שכבה נפוצים מאוד בשדרת ההר המרכזית בישראל, וכשמם כן הם – מעיינות הנובעים במגע שבין שכבות – אקוויפריט ואקוויקלודית. פרמטרים רבים משפיעים על כמות המים הנובעת במעיינות אלו ועל איכותם. ביניהם ניתן למנות את כמות המשקעים, את משרעת הגשמים ואת תפוסת המשקעים. גורמים נוספים המשפיעים על המעיינות הם אחוז החידור (המושפע מרטיבות הקרקע, אידי ודיות, נגר עילי ועוד), גודל אזור המילוי החוזר, עומק האזור הוואדוסי, מאפייני הקרקע והסלע, היבטים גיאולוגיים וגאומורפולוגיים (כמו שברים וקארסט) ועוד. מעיינות השכבה הם גם הבסיס להתיישבות הכפרית-חקלאית בשדרת ההר, שכן באזור האקלים הים תיכוני זהו מקור המים היציב היחידי (Frumkin 2002: 23) עליו יכל האדם להתבסס בבואו להקים מקומות יישוב. מסיבה זו לרבים ממעיינות השכבה בנה האדם במהלך ההיסטוריה בריכות אגירה שמטרתן העיקרית איסוף המים וויסות השימוש בהם לצרכיו השונים קרי, חקלאות שלחין (רון 1977: 231), מחייה ותעשייה. במחקר זה בחנו את רגישות מעיינות השכבה לשינוי בכמות המשקעים השנתית. בהיעדר הידרוגרפים ארוכי משך למספר רב של מעיינות, השתמשנו, כמדד לספיקה, במפלס המים בסוף החורף של 36 ברכות אגירה לאורך תקופת זמן של 10 שנים. זאת מאחר ובימינו רובם המוחלט של מעיינות השכבה משמשים לפנאי ולנופש ולא מתבצעת מהם שאיבה. לכן מפלס המים בבריכה מייצג את מאזן המים של המעיין – ספיקה פחות אידי וחלחול. בשל ריבוי המעיינות בשטח זה, התמקדנו באזור הרי ירושלים (איור 1).

שיטת המחקר

בשנת 2003 ובשנת 2008, כחלק מהוצאת מהדורות שונות לספר טיולים בשם "מעיינות בהר" (יחזקאל 2003; יחזקאל ויחזקאל 2008), ביצענו תיעוד וצילום של בריכות האגירה של מעיינות השכבה בהרי ירושלים בחודשים מרץ-מאי (עם תום עונת הגשמים). בשנים 2011–2013, כחלק מעבודת המוסמך שהוגשה בחוג לגיאוגרפיה באוניברסיטה העברית, ביצענו שוב תיעוד של בריכות האגירה באותם חודשים שצוינו לעיל. בשנת 2013 נעשו גם מדידות של ספיקה, גודל הבריכה (אורך, רוחב ונפח) וגובה המים בבריכה. כמו כן צילמנו את מפלס המים בבריכה יחד עם קנה מידה טבול במים ('לאטה'). על סמך הצילומים של בריכות האגירה שנעשו בשנת 2013 עם קנה המידה הטבול במים (איור 2), שחזרנו את גובה מפלס המים בבריכות גם בשנים 2003, 2008, 2011 ו-2012 (על פי מאגר התמונות של השנים הנ"ל). מנתונים אלה חישבנו את הספיקה של כל מעיין בניכוי האובדנים (חלחול ואידוי).



איור 1: מפת אזור המחקר – הרי ירושלים



בשנים 2003–2013 תועדו 57 מעיינות ובריכות אגירה וצולמו למעלה מ-3000 תמונות. מתוך 57 מעיינות ובריכות שתועדו במהלך השנים, נעשה במחקר זה שימוש ב-36 מעיינות בלבד. זאת מאחר וזיהינו שאיבה בחלק מהמעיינות (דבר העלול להטות את נתוני מפלס המים) או שטיב התמונות לא מאפשר לזהות את מפלס המים בצורה מדויקת. בעין לימון ובעין מוצא, בשל מחסור אקראי בתמונות לשנת

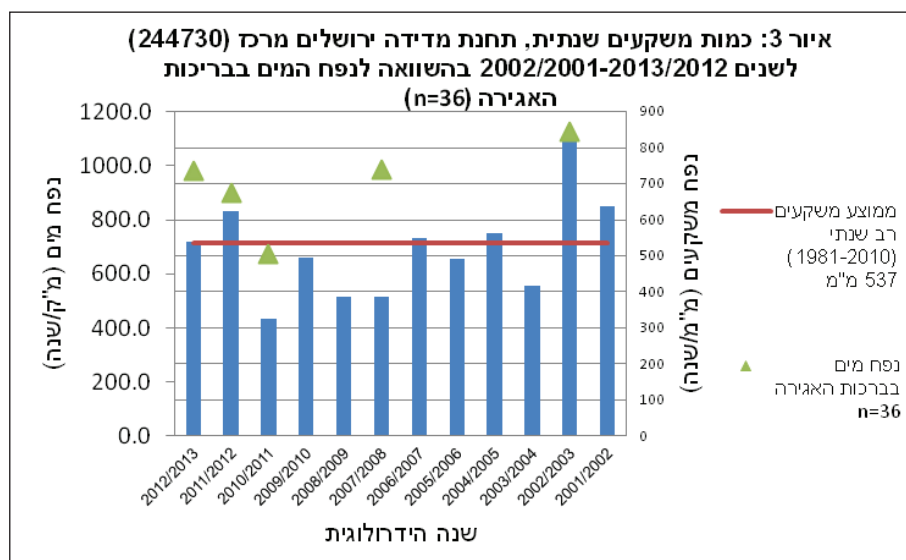
איור 2: הדגמת שיטת המחקר (עין מוצא). בשנת 2013, כחלק ממדידות נפח הבריכות ותיעוד המעיינות, צולם מפלס המים בבריכות האגירה בעזרת קנה מידה (לאטה) טבול במים. לאחר מכן השווינו את מפלס המים בבריכות (על סמך מאגר התמונות) של השנים 2003, 2008, 2011, 2012 למאגר התמונות משנה זו. כך חישובו נפח מים לכל בריכה ובריכה ברצף השנים הנ"ל. צילום: עזריאל יחזקאל

2011, התבססנו על סקר מעיינות שנערך מטעם רשות הטבע והגנים (כהן ופיימן 2011), ובו תמונות מתוארכות של בריכות האגירה הללו.

את מאגר הנתונים שנבנה מתייעוד המעיינות ובריכות האגירה הצלבנו עם נתוני כמות המשקעים השנתית (2013/2012–2003/2002). נתוני משקעים חודשיים נלקחו ועובדו מתוך אתר השירות המטאורולוגי (www.ims.gov.il), כאשר כמות הגשם השנתית חושבה על פי שנה הידרולוגית, המסכמת את המשקעים שירדו מחודש אוקטובר של שנה אחת, ועד סוף חודש ספטמבר של השנה שלאחריה. התחנה הקרובה ביותר למעיינות השכבה בהרי ירושלים בה דווחו נתונים רציפים רלוונטיים למחקר נמצאת במרכז ירושלים (תחנה מספר 244730).

ממצאים

באיור 3 ניתן לראות את כמות המשקעים השנתית לשנים ההידרולוגיות 2002/2001–2013/2012. ממוצע המשקעים הרב שנתי בירושלים (1981–2010) עומד על 537 מ"מ גשם. השנים 2002/2001–2003/2002 היו ברוכות משקעים וגבוהות בהרבה מהממוצע הרב שנתי. בשנת 2003/2002 הכילו בריכות האגירה של מעיינות השכבה בהרי ירושלים 1125 מ"ק מים. בשנת 2008/2007 כמות המשקעים השנתית הייתה 384 מ"מ ונפח המים בבריכות עמד על 983 מ"ק. שנת 2011/2010 הייתה שחונה ביותר (326 מ"מ גשם, שהם 60% מהממוצע הרב שנתי), ובנוסף סיימה רצף של ארבע שנים דלות משקעים. בשנה זו נפח המים בבריכות עמד על 671 מ"ק בלבד (ירידה של כ-40% משנת 2003/2002). בשנת



איור 3: כמות משקעים שנתית, תחנת מדידה ירושלים מרכז (244730) לשנים 2002/2001–2013/2012 בהשוואה לנפח המים בבריכות האגירה (n=36)

2012/2011 ירדו למעלה מ-600 מ"מ גשם ונפח המים בבריכות עלה משמעותית ל 898 מ"ק. שנת 2013/2012 הייתה אף היא מעל לממוצע עם 540 מ"מ גשם, ונפח המים בבריכות עלה ל-980 מ"ק.

כלל ממצאים אלו מעידים על הקשר בין כמות המשקעים השנתית לבין נפח המים בבריכות האגירה של מעיינות השכבה. עדות נוספת לקשר זה ניתן היה לראות בסקר שנעשה בתום עונת הגשמים של 2011/2010. בשנה זו, אשר הייתה שחונה ביותר (326 מ"מ גשם), תועדו תשע בריכות אגירה ריקות (איור 4) מתוך 36.



איור 4: בריכות אגירה ריקות בתום עונת הגשמים השחונה (326 מ"מ) של שנת 2011/2010. צילום: עזריאל יחזקאל

בשלב הבא ניסינו להעריך מהו "טווח הזיכרון" של מעיינות השכבה בהרי ירושלים. ובמילים אחרות, מכמה שנות משקעים ניזון מעיין השכבה. לצורך כך בדקנו את ההתאמה בין כמות המשקעים המצטברת, משנה הידרולוגית אחת ועד לעשר שנים אחורה, לבין נפח המים בבריכות האגירה.

בטבלה 1 ניתן לראות את מאגר הנתונים ששימש לניתוח הקשר הליניארי בין כמות המשקעים המצטברת לבין ספיקת המעיינות. המשתנה הבלתי תלוי הוגדר כסך נפח המשקעים המצטבר מכל שנת דגימה (2002/2003, 2007/2008, 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013) עד לטווח של עשר שנים אחורה. המשתנה התלוי הוגדר כנפח המים בבריכות האגירה ($n=36$) בכל שנת דגימה. לאחר שניתחנו את כלל ההצלבות האפשריות בין נפח המים במעיינות לסך כמות המשקעים המצטברת (1–10 שנים), העלנו את הנתונים בצורת גרפים מסוג Scatter XY (מפאת קוצר היריעה גרפים אלו אינם מצורפים בזאת) וריכזנו את כלל מקדמי ההסבר שהתקבלו בטבלה 2. ערכים המסומנים בכוכבית וברקע אפור התקבלו עם מובהקות סטטיסטית (מבחן t) קרי $P < 0.05$. למשל, מקדם ההסבר שהתקבל בין סך נפח המשקעים שנתיים אחורה לבין נפח המים במעיינות הוא 0.7 ללא מובהקות סטטיסטית ($P > 0.05$).

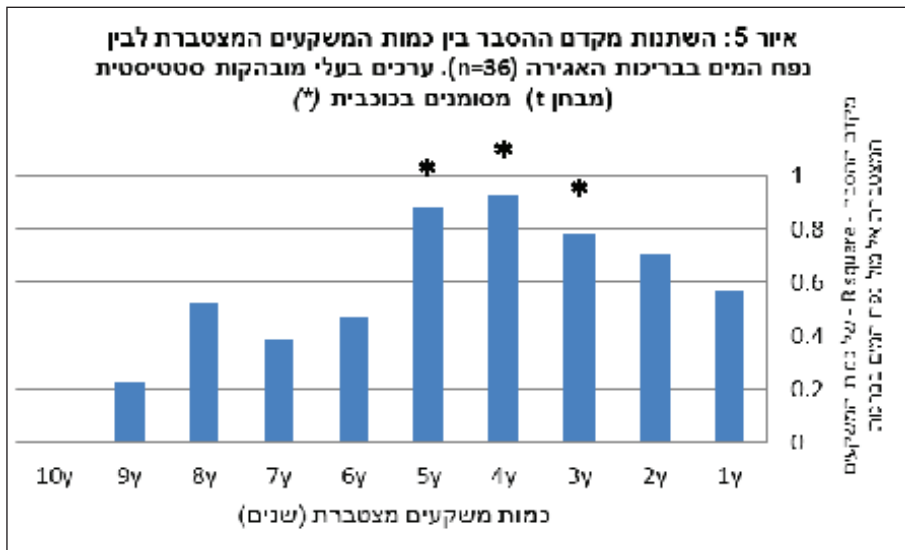
טבלה 1: מאגר הנתונים ששימש לניתוח הקשר הלינארי בין כמות המשקעים המצטברת (10-1 שנים) לבין נפח המים בברכות האגירה (n=36)

המשתנה התלוי: נפח המים בברכות, n=36 (מ"ק)											המשתנה הבלתי תלוי: כמות המשקעים השנתית המצטברת (מ"מ) משנת הדגימה אחורה	
שנת דגימה	Year 1	Year 2	Year 3	Year 4	Year 5	Year 6	Year 7	Year 8	Year 9	Year 10		
2002/2003	1125.25	1454	1947	2368	2578	3038	3610	4144	4700	5126		
2007/2008	983.34	385	933	1425	1989	2407	3225	3861	4353	4774		
2010/2011	671.50	326	821	1208	1593	2141	2633	3198	3615	4434		
2011/2012	898.93	625	951	1445	1833	2218	2766	3258	3822	4240		
2012/2013	980.02	540	1165	1491	1986	2373	2758	3306	3798	4362		

טבלה 2: הפרמטרים הסטטיסטיים שהתקבלו: מקדם ההסבר (R²), ומובהקות (P-value). מבחינת הקשר הלינארי בין סך כמות המשקעים המצטברת (10-1 שנים אחורה) לבין נפח המים בבריכות האגירה (n=36). ערכים בעלי מובהקות מסומנים בכוכבית וברקע אפור

פרמטרים סטטיסטיים של הקשר הלינארי בין כמות המשקעים המצטברת לבין נפח המים בבריכות האגירה		
P-value	R square	כמות המשקעים המצטברת (שנים)
0.14	0.56	year 1
0.07	0.7	year 2
0.046	*0.78	year 3
0.0083	*0.92	year 4
0.018	*0.88	year 5
0.2	0.47	year 6
0.25	0.39	year 7
0.17	0.51	year 8
0.41	0.22	year 9
0.9	0.006	year 10

ניתן לראות (טבלה 2, איור 5) כי מקדם ההסבר בין כמות המשקעים המצטברת לבין נפח המים בבריכות האגירה עולה עד לטווח של חמש שנים, כאשר מובהקות סטטיסטית (מבחן t) מתקבלת אל מול כמות המשקעים המצטברת משלוש שנים אחורה ($R^2=0.78$, $P = 0.046$) ועד חמש שנים אחורה ($R^2=0.88$, $P = 0.018$). לאחר חמש שנים יורד מקדם ההסבר בצורה משמעותית, ולאחר עשר שנים מתקבלים ערכים נמוכים מאוד ($R^2=0.006$, $P = 0.9$). יש בכך להעיד ש"טווח הזיכרון" של מעיינות השכבה הוא עד חמש שנים, קרי, שמים הנובעים במעיינות השכבה הם תמהיל של חמש שנות משקעים.



איור 5: השתנות מקדם ההסבר בין כמות המשקעים המצטברת לבין נפח המים בבריכות האגירה ($n=36$). ערכים בעלי מובהקות סטטיסטית (מבחן t) מסומנים בכוכבית (*)

לסיכום

במחקר זה נעשה לראשונה ניסיון לבדוק את השפעת השינוי בכמות המשקעים השנתית על קבוצה גדולה של מעיינות שכבה ($n=36$), בתקופת זמן משמעותית (10 שנים) באזור גיאוגרפי וגיאולוגי הומוגני ומצומצם (הרי ירושלים). בנוסף, לראשונה נעשה שימוש במפלס המים בבריכות האגירה כאמצעי לאמוד את מאזן הספיקה של מעיינות השכבה. ניתן היה לראות כי כמות המשקעים השנתית משפיעה בצורה משמעותית על נפח המים בבריכות, ובהתאמה על ספיקת מעיינות השכבה. מהמחקר עלה כי די ברצף של ארבע שנים מעוטות משקעים כדי לגרום לירידה דרסטית בספיקה של חלק ממעיינות השכבה בהרי ירושלים עד לכדי הופעה של בריכות אגירה ריקות. עוד עלה כי "טווח הזיכרון" של מעיינות השכבה עומד על חמש שנים, קרי, מים הנובעים במעיינות הם תמהיל של חמש שנות משקעים. מסקנות אלו, של הרגישות הרבה של מעיינות שכבה לשנים שחונות,

ו"טווח זיכרון" של מעיינות שכבה בהרי ירושלים, עולות בקנה אחד עם מחקרים אחרים (פלג et al 2009 ; Peleg et al 2012).

מאחר ומעיינות השכבה ובריכות האגירה הם הבסיס ליישוב הכפרי חקלאי בשדרת ההר לאורך הדורות, ניתן לשער שתנודות היסטוריות בכמות המשקעים השנתית השפיעו לשלילה על יציבות היישוב, וייתכן אף על קיומו.

תודות

ברצוננו להודות לאלישיב וידברג על הסיוע בסקר ובמידות.

רשימת מקורות

- יחזקאל ע'. 2003. **מעיינות בהר**. ירושלים.
- יחזקאל ע' ויחזקאל ד'. 2008. **מעיינות בהר – מדריך למעיינות הרי ירושלים** מהדורה שניה. ירושלים.
- יחזקאל ע' ופרומקין ע'. 2017 (בהכנה). השפעת השינוי בכמות המשקעים השנתית על ספיקת מעיינות שכבה בהרי ירושלים, ישראל.
- כהן א' ופיין ד'. 2011. **סקר מעיינות הרי ירושלים, ניתוח איכויות וכמויות מים על בסיס ממצאי הדיגום לשנת 2011**. ירושלים: רשות הטבע והגנים.
- פלג נ' 2009. **מודלים הידרולוגיים למעיינות שעונים בהרי ירושלים ושומרון**. עבודת מוסמך, האוניברסיטה העברית. ירושלים.
- רון צ' 1977. ניצול מעיינות לחקלאות שלחין בהרי יהודה. בתוך א' שמואלי, ד' גרוסמן ור' זאבי, עורכים. **יהודה ושומרון פרקים בגיאוגרפיה יישובית א'**. ירושלים. עמ' 230–251.
- Frumkin, A. 2002. The hydrogeology of Israel and the problem of water supply in antiquity. In D. Amit J. Patrich Y. Hirschfeld, ED. *The Aqueducts of Israel*. Portsmouth: Rhode Island. 21-24.
- Peleg, N. Morin, E. Gvirtzman, H. and Enzel, Y. 2012. Rainfall, spring discharge and past human occupancy in the eastern Mediterranean. *Climatic Change* 112: 769-789.

רשימת טבלאות

- טבלה 1: מאגר הנתונים ששימש לניתוח הקשר הליניארי בין כמות המשקעים המצטברת (1–10 שנים) לבין נפח המים בבריכות האגירה ($n=36$).
- טבלה 2: הפרמטרים הסטטיסטיים שהתקבלו: מקדם ההסבר (R^2), ומובהקות (P -value) – מבחינת הקשר הליניארי בין סך כמות המשקעים המצטברת (1–10 שנים אחורה) לבין נפח המים בבריכות האגירה ($n=36$). ערכים בעלי מובהקות מסומנים בכוכבית וברקע אפור.

הערות סיום

1. המחקר המלא כלל פילוח והכרת המאפיינים השונים של מעיינות השכבה בהרי ירושלים: הפרש הגובה של הנביעה מקו הרכס והתצורה הגיאולוגית. לאחר מכן בחנו את השפעת השינוי בכמות המשקעים השנתית על הספיקה של מעיינות השכבה לפי מאפיינים אלו (ראה יחזקאל ופרומקין 2017). מפאת קוצר היריעה חלקים אלו של המחקר לא מתפרסמים כאן.