

מעיינות נקבה בארץ ישראל ובהרי ירושלים: היבטים פיזיים, גאוגרפיים ואנושיים

עזריאל יחזקאל¹ ועמוס פרומקין²

1. המכון לארכאולוגיה, האוניברסיטה העברית, ירושלים
2. המכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית, ירושלים

(azriel.ye@gmail.com)

למעלה מ-190 מעיינות נקבה פותחו במהלך ההיסטוריה בארץ ישראל, כאשר רובם המוחלט מצוי בתחומי שדרת ההר. מעיינות נקבה כרוכים בקשר הדוק עם פיתוח חקלאות שלחין, עיצוב הנוף וביסוס ההתיישבות בהר כנראה החל מתקופת הברזל ב'. במחקר זה מוצגת תמונה רגיונלית ומקיפה לתופעת מעיינות הנקבה בארץ ישראל ובפרט בהרי ירושלים, תוך שימוש בכלי מחקר מתקדמים כדוגמת גאוגרפיה חישובית ומרחבית (GIS). הרי ירושלים הם תא השטח בעל הצפיפות הגבוהה ביותר של מעיינות נקבה בשדרת ההר (n=69), ובו גם קבוצת מדגם גדולה של מעיינות ללא נקבה (n=61). על ידי בניית מאגר נתונים המכיל 21 מדדים שונים עבור כל מעיין וניתוחו בכלים סטטיסטיים, נעשה ניסיון להבין מהם הקריטריונים בגינם בחר האדם בעבר לפתח נקבה למעיין כזה ולא אחר. המדדים שנבחנו מתחלקים לשלוש קבוצות: מדדים גאולוגיים-גאומורפולוגיים (תצורה, חבורת קרקע, נטייה גאולוגית-דיפ), מדדים פיזיים והידרולוגיים (משקעים, מפנה, שיפוע המדרון וכו') ומדדים מרחביים (הפרשי גובה מקו הרכס / קו האפיק, פוטנציאל השלחין, מרחק מירושלים וכו').

תוצאות המחקר מצביעות על הקרבה לעיר העתיקה של ירושלים כגורם מרכזי בהחלטה לפתח נקבה במעיין. בנוסף, מבין התצורות האקוויקלודיות, עליהן נובעים מעיינות בהרי ירושלים, תופעת מעיינות הנקבה נפוצה ביותר במעיינות מתצורת מוצא. המחקר גם מדגיש את שלל היתרונות הפיזיים והאנושיים במעלה האגנים שורק רפאים וכסלון, דבר העולה בקנה אחד עם הרקורד הארכאולוגי באזורים אלו. מילות מפתח: מעיינות נקבה, הרי ירושלים, גאווהידרולוגיה, שדרת ההר המרכזי.

Spring Tunnels in Ancient Israel and the Jerusalem Hills: Physical, Geographical and Human Aspects

Azriel Yechezkel, Institute of Archaeology, The Hebrew University of Jerusalem;
Amos Frumkin, Institute of Earth Science, The Hebrew University of Jerusalem

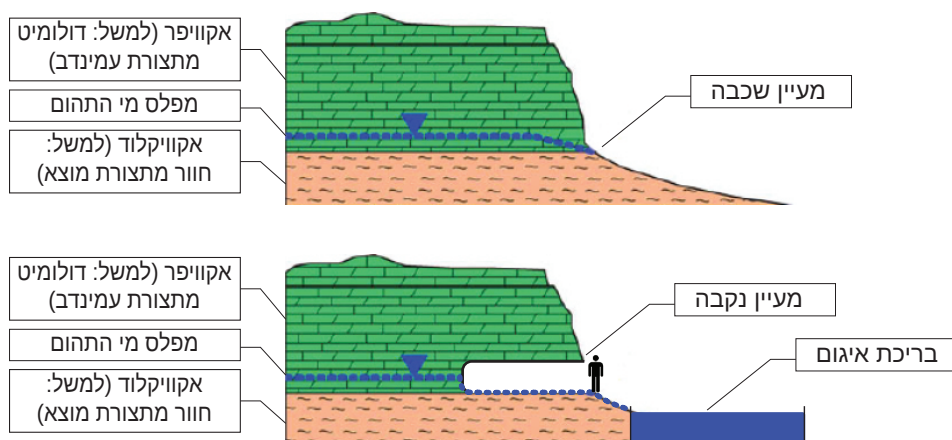
Over 190 Spring Tunnels were built in the Land of Israel in the course of history. The majority of these tunnels are located within Israel's central mountain range and especially in the Jerusalem hills. The phenomenon probably dates back to the Iron Age II (2700 years BP) and is closely associated with the development of irrigated farming systems, landscape design and the establishment of agricultural settlements. This study presents a comprehensive picture of this phenomenon, by using advanced research tools such as GIS, and is based on the statistical comparison of 21 different parameters for two kinds of springs in the Jerusalem hills: 69 with tunnels and 61 without tunnels. The selected parameters are divided into three categories: Geological-geomorphological characteristics (formation, soil group, dip), physical-hydrological (slope, precipitation, discharge etc.) and spatial characteristics (elevation differences with nearest ridge/stream channel, distance from Jerusalem, etc.).

The results of this study underline the spatial aspects of the phenomenon, especially the connection between the Old City of Jerusalem and the spring tunnels in its vicinity. The study also highlights the physical advantages of the eastern sections of the Soreq, Refaim and Kesalon river basins, which explains the archaeological record of these areas. **Keywords:** spring tunnels, Jerusalem hills, geohydrology, Israel's central mountain range.

רקע

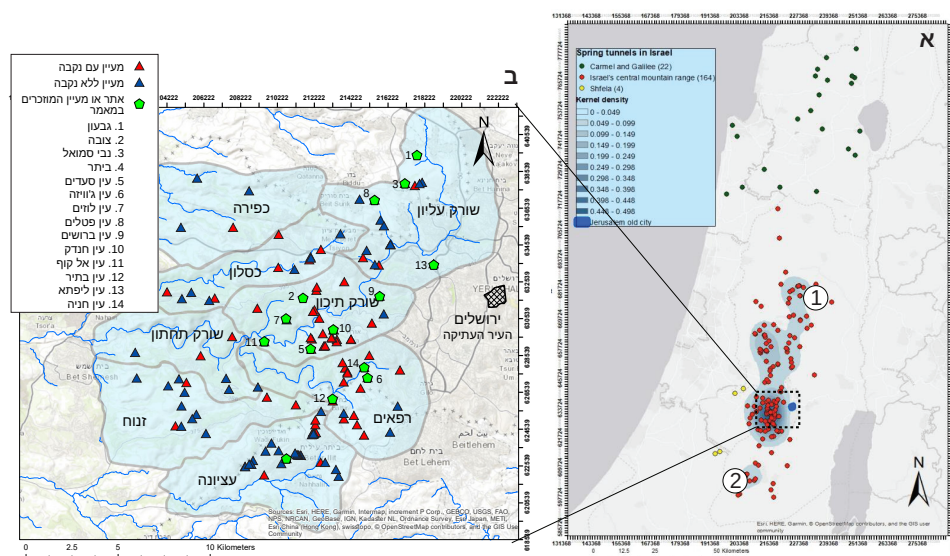
תנאים סביבתיים רבים הקשו על האדם בבואו להתיישב בשדרת ההר של ארץ ישראל לאורך ההיסטוריה: מחסור חמור במקורות מים, איתנים ויציבים; אקלים ים-תיכוני, צחיח למחצה; שינויים אקלימיים ותנודות עונתיות ושנתיות בכמות המשקעים. תנאים אלו עודדו את ההתיישבות סמוך למקורות המים היחידים הזמינים בהר – מעיינות השכבה. דא עקא, לרבים ממעיינות אלו אוגר קטן בשל טופוגרפיה תלולה ומילוי חוזר מוגבל (Peleg et al. 2012: 770). ירידה בנפח המשקעים השנתי השפיעה ישירות על הספיקה של המעיינות הללו וגם על ההתיישבות הנסמכת עליה.

הגדלת ספיקת מעיינות השכבה באופן מלאכותי נעשתה על ידי חציבה או חפירה תת-אופקית של חללים מן המעיין שבפני השטח אל תוך התווך התת-קרקעי הרווי במים. באמצעות חללים כאלו גדלה ספיקת המעיין, ויותר מים התנקזו לפני השטח (רון 1977). למתקן זה, על סוגיו השונים, ניתן השם "מעין נקבה" (איורים 1, 12). במקרים רבים היוו מעיינות הנקבה ספק ראשי למערכות שלחין שבאמצעותן ניתן היה לגדל באזור ההר ירקות ויבול חד-שנתי לאורך כל השנה.



איור 1: חתך סכמתי השוואתי בין מעיין שכבה למעיין נקבה. ספיקת המעיין גדלה על ידי חציבה/חפירה מלאכותית של חלל תת-קרקעי אופקי מן המעיין בפני השטח, אל תוך הסלע הרווי מים. במוצא הנקבה נחפרה לעיתים בריכת איגום לאיסוף המים ששימשו לחקלאות שלחין ולמחייה.

אורכם של מעיינות הנקבה בארץ נע בין מטרים בודדים ל-233 מ' (עין מור ורון 2013). חלקם חפורים באדמה, בנויים ומקורים – חלקם חצובים בסלע האם, ובחלקם ניתן לראות שילוב של השניים. במעיינות נקבה רבים ניתן לזהות מספר שלבי התפתחות המעידים על שימוש ארוך וממושך בידי האדם. בארץ ישראל, ככל הידוע לנו עד כה, פותחו למעלה מ-190 מעיינות נקבה, רובם באזור שדרת ההר המרכזי, עם ריכוז יוצא דופן בהרי ירושלים (איור 2). לתופעה זו השפעה גדולה על ביסוס ההתיישבות הכפרית, על הסביבה, ועל עיצוב הנוף החקלאי בהר לאורך ההיסטוריה.



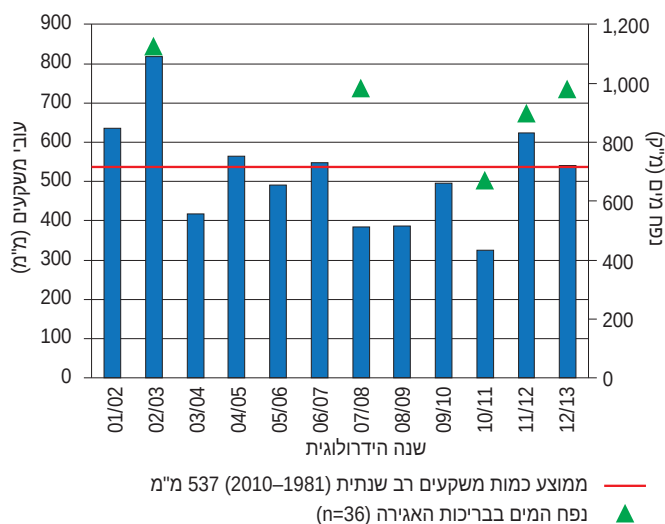
איור 2: א) פיזור מעיינות הנקבה שנמצאו בארץ עד עתה (n=191) עם מפת צפיפות (Kernel density). רובם מצויים בשדרת ההר המרכזי, כאשר קיימים ריכוזים של מעיינות נקבה בסמוך לשכם (1) וחברון (2). בולט הריכוז יוצא הדופן של מעיינות נקבה ממערב לירושלים. ב) אזור המחקר – הרי ירושלים, בחלוקה לאגני ניקוז ועם סימון האתרים והמעיינות המוזכרים במאמר. בהיעדר נחל מרכזי, הוגדר תא השטח הצפון מערבי כאגן נחל כפירה והוא מורכב ממספר ערוצים. מעיינות עם נקבה מסומנים באדום, ומעיינות שכבה ללא נקבה בכחול

עד עתה, נחקרה תופעת מעיינות הנקבה משתי בחינות – ארכאולוגית וגאוגרפית: הארכאולוגית עסקה בעיקר באתרים ממוקדים ובשאלת תיארוך מערכות המים. בשלושה אתרים, המצויים כולם בתחום הרי ירושלים נמצאו עדויות לקיומם של מעיינות נקבה בתקופה הברזל ב' (כ-2,700 שנים טרם זמננו): בגבעון המקראית (Yechezkel 1961; Pritchard 2002; Frumkin 2016), בסמוך לקיבוץ צובה (Gibson 2009), ובעין ג'וויזה שבאגן נחל רפאים (Ein Mor and Ron 2016). מעיינות נקבה רבים פותחו בתקופה הרומית ביזנטית כחלק ממערכות מים עירוניות ובמימון שלטוני (פרומקין 2013; פלג וגרינפלד תשס"ו; Mazar 2002; Patrich and Amit 2008; עמית ונגר 2008; Bull 1965, 2002), או כחלק ממערכות שלחין כפריות ומקומיות (יחזקאל ואחרים 2019; זיסו ווייס Baramki 1934; Baramki and Avi-Yonah 1934; Clermont-Gannau 1982; Guérin 1874). מעיינות נקבה פותחו כנראה גם בתקופה הצלבנית (Benvenisti 1982: 152), ובמהלך המאה ה-19 (De Vaux and Steve 1950: 46; Gibson 1991; Gibson and Kloner 1989).

מבחינה גאוגרפית עסק בנושא בעיקר צבי רון כחלק ממחקריו הרבים אודות חקלאות ההר הקדומה (רון 1968, 1977; Ron 1985, 1992). בין היתר הגדיר רון את הסוגים השונים של מעיינות הנקבה, היחס בין מתקני הנקבה למתקני האיוגום ופיזור המים, היחס בין חקלאות שלחין לחקלאות בעל ועוד.

נכון לכתיבת שורות אלו, טרם נעשה מחקר כמותי רגיונלי המשלב בין שתי זוויות המחקר – הארכאולוגית והגאוגרפית, בעזרת כלי מחקר מודרניים (כדוגמת גאוגרפיה חישובית ומרחבית

– GIS). בנוסף, האקלים בתקופתנו מתאפיין בתנודות בנפח המשקעים השנתי (איור 3), דבר שגרם להתייבשות חלק ממעיינות ההר (למשל: יחזקאל ופרומקין 2019: כך זה) נתון המדגיש את החשיבות בחקר תופעת מעיינות הנקבה.



איור 3: נפח משקעים שנתי לשנים 2001/2002–2012/2013 בתחנת ירושלים מרכז (244731), נפח המים שנמדד בבריכות אגירה ל-36 מעיינות שכבה בהרי ירושלים בתקופה זו, וממוצע המשקעים הרב-שנתי בירושלים (לשנים 1981–2010). ניתן לראות כי בתקופה זו היה רצף של שנים שחונות, דבר שהשפיע באופן ישיר על ספיקת מעיינות השכבה בהרי ירושלים (ראה למשל שנת 2010/2011). להרחבה ראה יחזקאל ופרומקין 2019: כך זה.

המטרה העיקרית של מחקר זה היתה לבחון את המדדים המבחינים בין מעיינות עם נקבה, לאלו שלא פותחה להם נקבה במהלך ההיסטוריה. מתוך הבחנה זו, ניתן להסיק על מערכת השיקולים של האדם בעבר בבואו לפתח מעיין נקבה כמקור מים יציב לביסוס ההתיישבות / עבור פיתוח חקלאות שלחין. מטרה נוספת של מחקר זה, היתה הבנת המערך היישובי/חקלאי סביב עיר מרכזית, כמו גם על התנאים הסביבתיים-אקלימיים באזור המחקר בעבר. וכמטרה אחרונה, לבחון האם ניתן להסיק מניסיון האדם בעבר לימינו אנו, בנושא פתרונות מים באזורים הרריים.

אזור המחקר

אזור המחקר מצוי בתחום הרי ירושלים (איור 2). גודלו 450 קמ"ר בקירוב והוא משתרע מירושלים במזרח עד לגבעות השפלה במערב, מיובליו העליונים של נחל שורק ונבי סמואל בצפון ועד ליובליו של נחל עצינונה ואזור ביתר בדרום. מבחינה גאומורפולוגית ניתן לתאר את הרי ירושלים כמישור גידוע מורם, שבו התחתרו לעומק ניכר מספר נחלים מרכזיים (Frumkin 1992; Wdowinski and Zilberman 1997; Bar et al. 2006). נחלים אלו יצרו שבע שלוחות מרכזיות הפרוסות בציר מזרח-מערב לאורך קו רכס בגובה אחד למדי עד לנחיתתן בשיפוע חריף מערבה.

הרי ירושלים בנויים מסלעי חבורת יהודה שעיקרם גיר ודולומיט מגיל קנומן-טורון וחלקם מגיל אלביאן (איור 4א; Flexer et al. 1989). על פי החלוקה של בונה וביידא (1977: 37) שלוש היחידות ההידרולוגיות העיקריות של חבורת יהודה החשופים בהרי ירושלים הן:

1. יחידה תחתונה – אקוויפר תחתון, מגיל אלביאן, יחידה זו מצויה מעל האקוויקלוד הרגיונלי (תצורת קטנה ותצורות עמוקות יותר), והיא כוללת את התצורות כפירה, גבעת יערים, שורק וכסלון. עובי היחידה נע בין 400–500 מ' והמוליכות ההידראולית משתנה בהתאם לתצורה ולסוג הסלע. בתצורת גבעת יערים, קארסט מפותח ומוליכות ההידראולית גבוהה, ואילו בתצורת שורק שכבות של חוור, מוליכות ההידראולית נמוכה ונובעים בה מעיינות שכבה.
2. יחידה תיכונה – אקוויטרד, מגיל קנומן תיכון, כוללת את תצורות בית מאיר מוצא. עובייה הכולל בין 60–90 מ' והיא מורכבת מדולומיט דק גביש עם שכבות חווריות עבות. לחלק ניכר ביחידה זו מוליכות ההידראולית נמוכה, מה שגורם לחציצה בין שתי יחידות האקוויפר. על גבי תצורות אלו נובעים מעיינות רבים.
3. יחידה עליונה – אקוויפר עליון, מגיל קנומן עליון-טורון, כוללת את תצורות עמינדב, כפר שאול, ורדים ובינה. עובייה הכולל של היחידה נע בין 250–350 מ' והמוליכות ההידראולית בינונית עד גבוהה בהתאם לתצורת הסלע. סלעי הדולומיט באקוויפר זה (תצורת עמינדב וורדים) בעלי מוליכות גבוהה מאוד בשל קארסט מפותח. תצורת כפר שאול החוורית פוגמת במוליכות ההידראולית של היחידה וברציפות האקוויפר, ומצויים בה מספר מעיינות שכבה.

תא שטח זה נבחר לשמש כמקרה מבחן מאחר וזהו האזור בעל הצפיפות הגבוהה ביותר של מעיינות נקבה (n=69) (איור 2א) ובו גם קבוצה גדולה של מעיינות שלא פותחה להם נקבה (n=61) (איור 2ב). מכאן שקיים מדגם גדול לשתי קבוצות המעיינות – עם ובלי נקבה. בנוסף, באזור הרי ירושלים, לפחות מתקופת הברונזה התיכונה (פאוסט תשס"ח) ועד היום, התקיימה התיישבות כפרית ענפה עם עיר מרכזית אחת והיא ירושלים. מסיבות אלו, באמצעות ניתוח דגם הפיזור של מעיינות הנקבה בהרי ירושלים, ניתן לבחון גם את ההשפעה של עיר ראשה על פיתוח העורף הכפרי שסביבה, בהתאם לתנאים הפיזיים גאוגרפיים במרחב.

שיטות

במחקר זה הוגדר 'מעין נקבה' כחלל תת-קרקעי, מוארך מעשה ידי אדם, וסגור משלושה כיוונים. ניתן להיכנס לתוכו לעומק ארבעה מטרים ויותר, ומטרתו הגדלה של ספיקת נביעה. הגדרה זו כוללת נקבות חצובות, נקבות בנויות ומקורות, וגם נקבות שבעת עבודת המחקר נמצאו יבשות ממים. לעומת זאת, 'מעין ללא נקבה' הוא כל נביעה טבעית שלא נעשה בה פיתוח בידי אדם על מנת להגדיל את הספיקה. הגדרה זו כוללת גם מעיינות ששימשו לשלחין, תועלו ונוקזו ואף נבנו עבורם ברכות איגום אך אין להם נקבה, למשל, עין פטלים או רוב מעיינות ואדי פוכין. כמו גם מעיינות הנובעים בתוך חללים טבעיים כמו עין חזיר, או עין לוזים בהר איתן, שזוהה בטעות כמעין נקבה (ראה מרקוס 1993: 87).

מעיינות רבים מסומנים במפות שונות בנות ימינו, אך בשטח לא קיים להם זכר מעיינות נקבה להם קיים תיעוד היסטורי/מילולי – הוכנסו למאגר הנתונים (למשל: עין ברושים. ראה מרקוס 1993: 78).

κ 

איור 4: א) עמודה סטרטיגרפית של טור הסלעים החשוף בהרי ירושלים. מעיינות שכבה נובעים מעל שכבות של חוור/חרסית כמו למשל בחילופי השכבות בתצורת שורק, מעל תצורת מוצא, בתצורת כפר שאול וכו'. **ב)** התפלגות מעיינות עם נקבה לפי אגני ניקוז ולפי תצורה גאולוגית בנביעה. **ג)** התפלגות מעיינות ללא נקבה לפי אגני ניקוז ותצורה גאולוגית בנביעה.

מעיינות שכבה ללא נקבה המסומנים במפה אך התייבשו עם השנים, או שהעדויות בשטח כיום מסתכמות בצמחייה הידרופילית ללא תיעוד היסטורי/מילולי – לא הוכנסו למאגר הנתונים (למשל: עין חלילים ועין הדום). ייתכן וזו הסיבה שקבוצת המדגם של מעיינות ללא נקבה (n=61) קטנה מזו עם נקבה (n=69).

בשלב הראשון של המחקר, נעשה סקר שדה רגלי לזיהוי סוג המעיין (עם נקבה או בלי) כמו גם לאיסוף נתוני מיקום בעזרת GPS. לגבי מספר קטן של מעיינות שכיום לא נגוישים מסיבות ביטחוניות/פוליטיות (n=5), נלקחו נתונים מספרות המחקר בנושא (למשל: סקרי נוף: מרקוס 1993). השערת המחקר היתה שלאורך ההיסטוריה, עבור כל מעיין בחר האדם האם לפתח נקבה ואם לאו. מסיבה זו, גם במקרים של מעיינות הסמוכים זה לזה, כל נביעה קיבלה ערך משל עצמה. כך למשל, זוג הנביעות/נקבות של עיינות חינדק מופיעות כשני ערכים (על אף שהן מזינות בריכת איגום אחת). ובצורה דומה, ששת המעיינות של פיקיה וזעבוב, הנובעים מתוך מחשוף של תצורת בית מאיר, מופיעים כשישה ערכים שונים.

בשלב השני, בעזרת ניתוח מרחבי (ArcMAP), השוו שתי קבוצות המעיינות על פי עשרים ואחד מדדים משלוש קטגוריות:

- 1. מדדים גאולוגיים-גאומורפולוגיים: תצורה גאולוגית בנביעה, נטיית השכבה הגאולוגית (Dip) וחוברת הקרקע (על פי דן ורז 1970).
- 2. מדדים פיזיים והידרולוגיים: מפנה, שיפוע פני השטח, משקעים וספיקה (עבור האחרון – נתונים חלקיים בלבד).
- 3. מדדים מרחביים: פיזור במרחב-קווי אורך ורוחב, פיזור בהרי ירושלים על פי אגני ניקוז עיליים, מרחק מהעיר העתיקה של ירושלים – בקו אווירי ובשעות הליכה, התאמה לאחוז מדרגות העיבוד בתא השטח, גובה מעל פני הים, הפרש גובה אנכי מקו הרכס הסמוך, הפרש גובה אנכי לאפיק הסמוך בטווח של 100, 300 ו-500 מ' ופוטנציאל השלחין התאורטי (בדונם) בטווחים אלו.

המובהקות הסטטיסטית של המדדים הנבדקים נבחנה באמצעות רגרסיה לוגיסטית (בתוכנת Jmp). בטבלה 1 מופיעים נתונים נבחרים וניתוח סטטיסטי לכלל המדדים המספריים (חציון, ממוצע סטיית תקן, מובהקות וכו'). במאמר גופו מוצגים בפרוטרוט רק מדדים מובהקים, או כאלו השופכים אור חדש על תופעת מעיינות הנקבה.

טבלה 1: ריכוז נתונים נבחרים (ממוצע, סטיית תקן, רבעונים וערכי קצה) ונתונים סטטיסטים למדדים הנומריים.

ממד משתנה	קו אורך (רשת ישראל חדשה)		קו רוחב (רשת ישראל חדשה)		מרחק אווירי מירושלים (מ')		טווח הליכה מירושלים (בשעות)	
סוג מעיין	עם נקבה (n=69)	ללא נקבה (n=61)	עם נקבה (n=69)	ללא נקבה (n=61)	עם נקבה (n=69)	ללא נקבה (n=61)	עם נקבה (n=69)	ללא נקבה (n=61)
ממוצע	629098.59	628012.16	212603.99	210460.61	9862.89	12737.96	2.33	3.04
סטיית תקן	3672.56	5262.30	2946.69	4025.45	2975.90	3725.61	0.73	0.90
רביעון ראשון	626173.00	625793.00	212069.50	213465.50	8294.88	9797.03	1.89	2.34
חציון	629287.00	625793.00	212751.00	210713.00	9144.33	13127.94	2.18	3.17
רביעון שלישי	631709.00	623197.50	214295.00	206968.50	11645.72	15676.35	2.80	3.71
ערך מינימלי	622050.00	621974.00	204219.00	202496.00	3240.04	5558.99	0.77	1.28
ערך מקסימלי	637887.00	638167.00	218698.00	218073.00	18182.38	19397.28	4.22	4.79
ChiSquare model	1.91		11.68302		21.61009			22.29378
P-Value model	0.16670		*0.0006		*0001.>			*0001.>
Misclassification	0.36920		0.33080		0.26150			0.26920

ממד משתנה		הפרש גובה אנכי לאפיק בטווח 100 מ' (מ')		הפרש גובה אנכי לאפיק בטווח 300 מ' (מ')		הפרש גובה אנכי לאפיק בטווח 500 מ' (מ')		פוטנציאל שלחין בטווח 100 מ' (דונם)	
סוג מעיין	עם נקבה (n=69)	ללא נקבה (n=61)	עם נקבה (n=69)	ללא נקבה (n=61)	עם נקבה (n=69)	ללא נקבה (n=61)	עם נקבה (n=69)	ללא נקבה (n=61)	עם נקבה (n=69)
ממוצע	23.10	15.43	53.09	32.92	75.52	47.93	11.33	9.84	11.33
סטיית תקן	14.05	9.95	33.82	21.08	44.71	31.09	4.15	4.46	4.15
רביעון ראשון	13.00	8.00	27.00	16.50	42.50	25.00	8.35	5.86	8.35
חציון	20.00	13.00	45.00	28.00	68.00	35.00	11.78	9.24	11.78
רביעון שלישי	30.00	20.00	74.00	48.00	100.00	72.50	14.34	13.71	14.34
ערך מינימלי	1.00	4.00	4.00	7.00	9.00	14.00	2.75	2.01	2.75
ערך מקסימלי	60.00	45.00	172.00	95.00	235.00	143.00	18.26	18.72	18.26
ChiSquare model	12.53020		16.33601		16.28747		3.86604		
P-Value model	*0.0004		*0001.>		*0001.>		*0.0493		
Misclassification	0.37690		0.35380		0.34620		0.43080		
ממד משתנה		פוטנציאל שלחין בטווח 300 מ' (דונם)		פוטנציאל שלחין בטווח 500 מ' (דונם)		נטיית השכבה הגאולוגית (Dip)		מפנה (מעלות)	
סוג מעיין	עם נקבה (n=69)	ללא נקבה (n=61)	עם נקבה (n=69)	ללא נקבה (n=61)	עם נקבה (n=69)	ללא נקבה (n=61)	עם נקבה (n=69)	ללא נקבה (n=61)	עם נקבה (n=69)
ממוצע	80.47	61.62	201.1038	141.39	4.43	4.86	221.93	225.40	221.93
סטיית תקן	42.40	33.92	113.22065	94.19	3.29	3.11	112.55	94.44	112.55
רביעון ראשון	47.89	32.59	122.0631699	72.79	2.08	3.03	109.94	158.56	109.94
חציון	69.00	51.63	169.449649	122.71	3.17	4.40	263.25	246.09	263.25
רביעון שלישי	115.04	93.72	272.1448381	168.16	6.04	5.82	322.04	304.39	322.04
ערך מינימלי	17.97	12.05	51.84379444	44.18	0.33	0.27	2.55	5.68	2.55
ערך מקסימלי	178.12	139.50	627.1484561	509.74	17.72	17.56	359.58	355.37	359.58
ChiSquare model	7.61324		10.67008		0.58064		0.03642		
P-Value model	*0.0058		*0.0011		0.44610		0.84860		
Misclassification	0.41540		0.35380		0.47690		0.46920		
ממד משתנה		נפח משקעים שנתי (מ"מ)		גובה מעל פני הים (מ')		שיפוע קרקע (מעלות)		הפרש גובה מקור רכס (מ')	
סוג מעיין	עם נקבה (n=69)	ללא נקבה (n=61)	עם נקבה (n=69)	ללא נקבה (n=61)	עם נקבה (n=69)	ללא נקבה (n=61)	עם נקבה (n=69)	ללא נקבה (n=61)	עם נקבה (n=69)
ממוצע	584.96	592.54059	657.03	632.81967	13.77	11.63	117.48	120.49	117.48
סטיית תקן	31.52	36.90	81.85	105.02	6.32	6.38	54.60	51.07	54.60
רביעון ראשון	560.30	568.94	580.00	692.00	9.07	6.11	70.70	84.10	70.70
חציון	587.06	595.83	675.00	625.00	13.28	10.44	105.30	118.00	105.30
רביעון שלישי	598.79	610.93	716.00	571.00	17.60	14.52	156.20	152.95	156.20
ערך מינימלי	510.43	499.00	445.00	340.00	0.04	0.88	14.50	45.70	14.50
ערך מקסימלי	688.08	712.62	870.00	897.00	30.48	25.35	285.00	263.00	285.00
ChiSquare model	1.61202		2.19168		3.69451		0.10618		
P-Value model	0.20420		0.13880		0.05460		0.74450		
Misclassification	0.38460		0.44620		0.39230		0.45380		

תוצאות

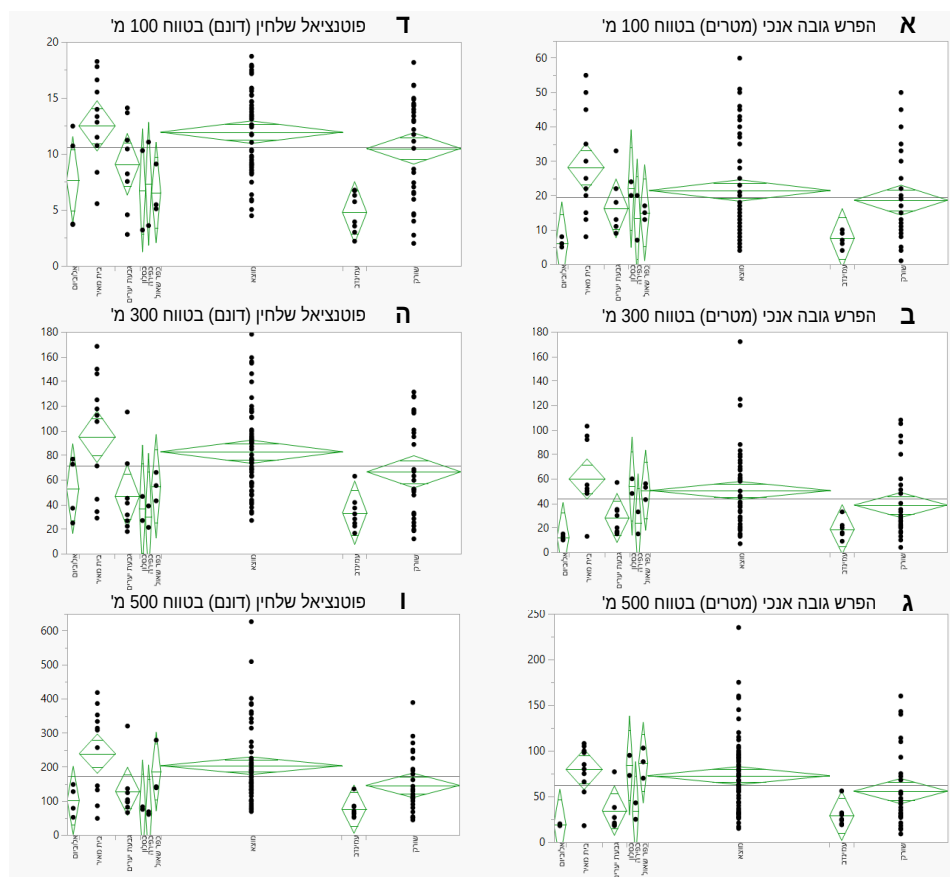
תצורה גאולוגית בנביעה

לתצורה הגאולוגית השפעה רבה על אחוז החידור של כמות המשקעים, אופי החלחול באקוויפר השעון ובהתאמה על הספיקה של מעיין השכבה (להרחבה ראה Peleg and Gvirtzman 2010; יחזקאל ופרומקין 2019: כרך זה). כאמור, הנחת היסוד היא שנקבות רבות פותחו כדי להגדיל את הספיקה או/ו כתגובה לירידה בספיקה של המעיין. על כן סביר שלמעיינות בעלי אקוויפר קארסטי, למשל כאלו הנובעים על תצורת מוצא הניזונים מתצורת עמינדב הקרסטית שמעליה, ספיקה תודתית ולא יציבה – נמצא ברבים מהם נקבה.

בטבלה 2 ניתן להבחין כי קיימות מספר תצורות בהן אין מעיינות נקבה (כסלון, כפירה) או מספר מועט של מעיינות נקבה (עמינדב, אלובים). ייתכן וניתן להסביר נתונים אלו בעובדה שתצורות אלו חשופות בהרי ירושלים רק באגנים המרוחקים מהעיר ירושלים (להלן) כמו באגנים כפירה, עציונה וכסלון (איור 34-ג), זאת מסיבות גאולוגיות-גאומורפולוגיות.

טבלה 2: פילוח מעיינות נקבה ומעיינות ללא נקבה על פי תצורה גאולוגית בנביעה

תצורה	סך המעיינות בתצורה זו	מעיינות עם נקבה			מעיינות ללא נקבה		
		מספר המעיינות	אחוז מכלל המעיינות הנקבה	אחוז מכלל המעיינות (n=130) בתצורה זו	מספר המעיינות	אחוז מכלל המעיינות ללא נקבה	אחוז מכלל המעיינות (n=130) בתצורה זו
אלוביום	4	1	0.01	0.25	3	0.05	0.75
בית מאיר	12	5	0.07	0.42	7	0.11	0.58
גבעת יערים	8	3	0.04	0.38	5	0.08	0.63
כסלון	2	0	0.00	0.00	2	0.03	1.00
כפירה	2	0	0.00	0.00	2	0.03	1.00
כפר שאול	3	2	0.03	0.67	1	0.02	0.33
מוצא	60	36	0.52	0.60	24	0.39	0.40
עמינדב	8	1	0.01	0.13	7	0.11	0.88
שורק	31	21	0.30	0.68	10	0.16	0.32
סך הכול	130	69			61	1	



איור 5: בצד ימין: התפלגות כלל המעיינות במחקר (n=130) לפי תצורה גאולוגית ובהתאמה: (א) הפרש הגובה מקו האפיק בטווח 100 מ' (ב) הפרש הגובה מקו האפיק בטווח 300 מ' (ג) הפרש הגובה מקו האפיק בטווח 500 מ'. בצד שמאל: התפלגות כלל המעיינות במחקר (n=130) לפי תצורה גאולוגית ובהתאמה: (ד) פוטנציאל השלחין בדונם בטווח של 100 מ' (ה) פוטנציאל השלחין בדונם בטווח של 300 מ' (ו) פוטנציאל השלחין בדונם בטווח של 500 מ'. ניתן לראות כי מעיינות בתצורת מוצא נובעים בהפרש ניכר מסביבתם. בהתאמה, ובאופן תאורטי, פוטנציאל השלחין של מעיינות בתצורה זו גדול.

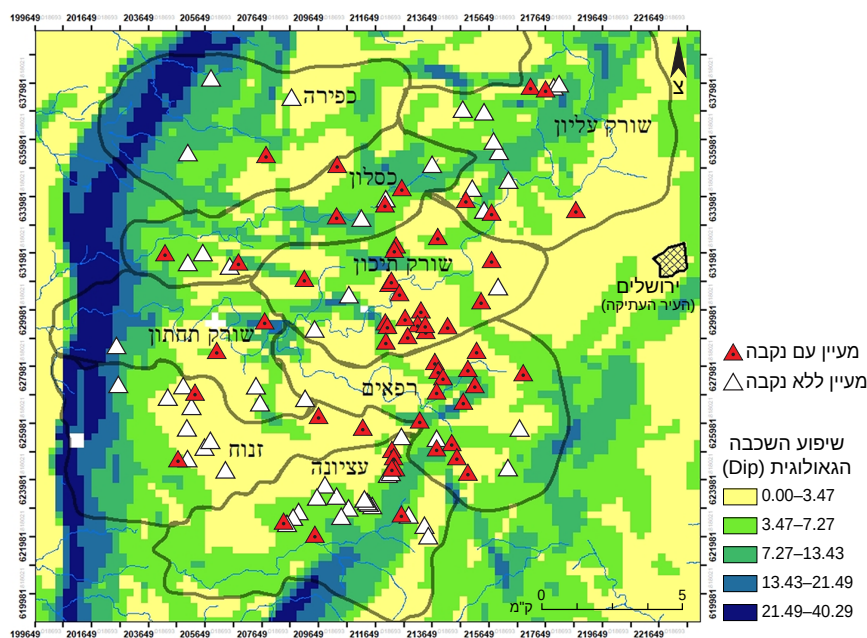
שתי התצורות בהן נובעים מרב המעיינות הן תצורות מוצא ושורק, ובהן גם מצויים מרב מעיינות הנקבה. בתצורת מוצא נובעים 60 מעיינות ול-36 מהם פיתחו נקבה (60% מכלל המעיינות בתצורה). בתצורת שורק נובעים 31 מעיינות ול-21 מהם פיתחו נקבה (67% מכלל המעיינות בתצורה).

כאשר בוחנים את התפלגות כלל המעיינות לפי תצורה גאולוגית, ובהתאמה להפרש הגובה מקו האפיק ולפוטנציאל השלחין (להלן) ניתן להבחין כי רוב המעיינות בתצורת מוצא נובעים בהפרש גובה ניכר מקו האפיק ולהם פוטנציאל שלחין גדול (איור 5).

שיפוע השכבה הגאולוגית (Dip)

רון (1977) הראה שקיים מתאם בין נטייה גאולוגית (Dip) נמוכה לצפיפות הופעת מדרגות עיבוד. זאת בשל הקלות היחסית שבבניית מערכת מדרגות על שכבות אופקיות. מסקנה זו תקפה ביתר שאת בפיתוח מערכות שלחין בהן ההשקיה מתבצעת בהצפה ויש צורך לבנות מדרגות עיבוד מפולסות ביותר. באזורים בהם השכבות נטיות באופן חריף- כמו באזור הכפיפה המערבית, פיתוח של מערכות שלחין כרוך במאמצים רבים להתגבר על שני שיפועים – זה הטופוגרפי, וזה הגאולוגי.

על אף שמדד זה אינו מובהק סטטיסטית, ניתן להבחין בטבלה 1 שבאופן יחסי, מעיינות נקבה מצויים באזורים בהם השכבות פחות נטיות מאזורים בהם מצויים מעיינות ללא נקבה. ממוצע הנטייה עומד על 4.43° לעומת 4.86° , והחציון עומד על 3.17° לעומת 4.4° . באיור 6 נבחין כי קיים ריכוז גבוה של מעיינות נקבה במרחב נחל רפאים ושורק תיכון – באזורים המתאפיינים בנטייה נמוכה.



איור 6: פיזור מעיינות עם נקבה וללא נקבה בהרי ירושלים, ביחס לשיפוע השכבה הגאולוגית (Dip). שימו לב למקבץ מעיינות הנקבה באגנים רפאים ושורק תיכון ולשיפוע הנמוך באזור זה.

הידרולוגיה – ספיקת המעינות

למעיינות השכבה בהרי ירושלים לרוב ספיקה מצומצמת (כמה אלפי-עשרות אלפי מ"ק לשנה) בשל אזור מילוי חוזר מוגבל (כהן ופיימן 2011). בנוסף, מעיינות שכבה שונים מגיבים באופן שונה לשינויים בכמות המשקעים השנתית. קרי, יש מעיינות בעלי 'זיכרון' ארוך וכאלו עם 'זיכרון' קצר. מעיינות בעלי זיכרון ארוך מתאפיינים בספיקה יציבה גם במהלך תנודות רב שנתיות במשקעים (להרחבה בנושא ראה: יחזקאל ופרומקין 2019; כך זה; Peleg and Gvirtzman 2010; Peleg et al. 2012: 781). בהמשך להנחת היסוד של המחקר, סביר שלמעיינות עם זיכרון ארוך וספיקה גבוהה וסדירה, לא פותחה נקבה.

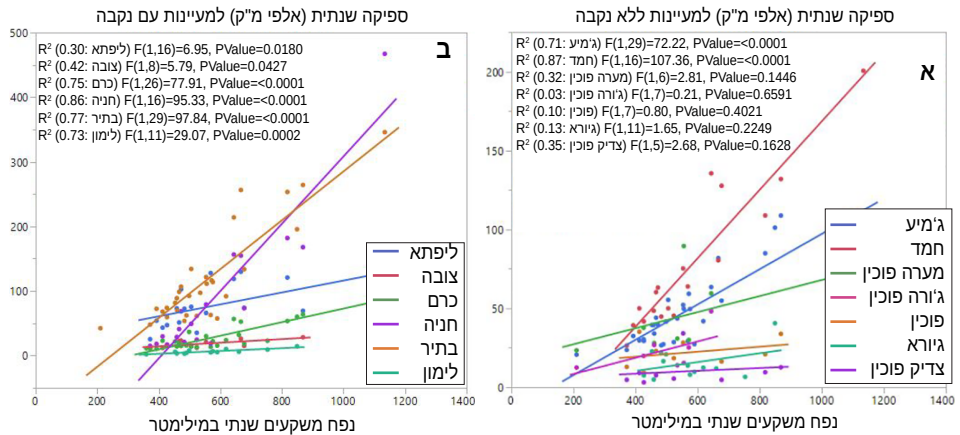
נתונים גולמיים של כלל מדידות הספיקה – מדידות שעתיות, חודשיות וסקר (אחת לחמש שנים) לקבוצה של 28 מעיינות שכבה בהרי ירושלים התקבלו מן השרות ההידרולוגי. לאחר עיבוד הנתונים, עלה שישנם רק שלושה עשר מעיינות שכבה בעלי רצף מדידות חודשיות עקביות וארוכות משך. לשישה מתוכם נקבה ולשבעה אין. מדידות חודשיות כומתו לנפח ספיקה שנתי (על פי שנה הידרולוגית), ואלו השווו לכמות המשקעים השנתית (השירות המטאורולוגי). התחנה הקרובה ביותר למעיינות השכבה בה דווחו נתוני משקעים רציפים ורלוונטיים למחקר נמצאת במרכז ירושלים (תחנה מספר 244730).

בטבלה 3 ניתן לראות שלא בוצעו מדידות ספיקה לכל המעינות (n=13) לאורך רצף שנים אחיד וארוך. מסיבה זו, השווה רצף מדידות הספיקה הארוך ביותר של כל מעיין – לנפח משקעים שנתי תואם (מסומן בצהוב בטבלה 3), ובתנאי שהוא מעל חמש שנים. סף זה נקבע שכן זהו טווח 'זיכרון' מאפיין של מעיינות שכבה רבים בהרי ירושלים (להרחבה ראה Peleg & Gvirtzman 2010). קרי – על ידי בחינת רצף של חמש שנים ניתן לזהות את היחס בין הספיקה השנתית לנפח המשקעים השנתי והמצטבר.

בטבלה 4 מובאים הספיקה הרב שנתית הממוצעת של המעינות השונים, יחד עם מקדם ההסבר בין נפח המשקעים השנתי לספיקה השנתית. באיור 7 מוצג באופן גרפי הקשר הלינארי בין השניים.

ניתן לראות שהספיקה השנתית הממוצעת של מעיינות עם נקבה נעה בין 6,000–117,000 מ"ק לשנה לעומת 15,000–65,000 מ"ק לשנה למעינות ללא נקבה. נתון מעניין הוא ששלושת המעינות בעלי הספיקה הגבוהה ביותר – ליפתא, חניה ובתיר הם מעיינות נקבה (72, 73 ו-117 אלפי מ"ק שנה בהתאמה).

כאשר בודקים קשר לינארי בין נפח משקעים שנתי לספיקה של אותה שנה – כלל מעיינות הנקבה (n=6) מראים מובהקות, לעומת שני מעיינות ללא נקבה בלבד. מכאן שלפחות בקבוצת מדגם זו, מעיינות הנקבה רגישים יותר לתנודות בכמות המשקעים השנתית. בולטת העובדה, שלספיקה השנתית של מעיינות ואדי פוכין (צדיק, פוכין, מערה פוכין וג'ורה פוכין) שלכולם אין נקבה, קשר חלש מאוד לנפח המשקעים השנתי באזור. יש לסייג תוצאות אלה, שכן בשל מוגבלות הנתונים, לא ניתן להשוות את ספיקת המעינות לרצף שנים אחיד.



איור 7: הקשר הלינארי בין נפח המשקעים השנתי- לספיקה שנתית ממוצעת של מעיינות ללא נקבה (א), ומעיינות עם נקבה (ב). משוואת הרגרסיה, מקדם ההסבר ומובהקות מופיעים בתוך האיורים.

טבלה 3: נתוני משקעים (מתוך אתר השירות המטאורולוגי) ונתוני ספיקה (באדיבות השירות ההידרולוגי) של מעיינות נקבה ומעיינות ללא נקבה בהרי ירושלים. רצף שנות מדידת הספיקה לכל מעין שנלקח לבדיקת התאמה לנפח המשקעים השנתי-מסומן בצהוב.

ספיקה (נפח שנתי באלפי מ"ק)												נפח משקעים (מ"מ)	שנה הידרולוגית מאוסקובר לספטמבר					
מעיינות שכבה ללא נקבה						מעיינות שכבה עם נקבה												
ג'ורא	צדיק	פוכין	ג'ורין פוכין	מערה פוכין	חמד	ג'מיע	לימון	בתיר	חניה	כרם	צובה	ליפתא						
										8.3			205.4	5	9	6	0	
										8.3			475.9	6	0	6		
5.0										3.3	15.6		447.3	6	1	6	2	
4.1										2.8			227.4	6	2	6	3	
5.0													689.2	6	3	6	4	
											36.2	106.5	675.7	6	4	6	5	
							2.1			11.4	11.9	62.4	359.4	6	5	6	6	
6.6							9.4			23.0	15.2	90.3	753.1	6	6	6	7	
11.9							6.0			172.8	32.1	27.7	53.5	660.1	6	7	6	8
8.0						49.6	6.8	113.9	95.6	22.3	18.7	69.2	575.4	6	8	6	9	
16.5						27.3	4.2	62.3	23.9	15.8	10.1		489.7	6	9	7	0	
9.8					21.6	27.4	5.4	57.6	45.9	15.5	17.9	91.5	589.7	7	0	7	1	
12.4					49.5	41.9	10.3	92.0	50.1	23.9	28.2	108.3	618.4	7	1	7	2	
22.8					34.9	39.5	5.9	81.9	49.2	21.7	19.1	119.9	453	7	2	7	3	
40.6					56.5	101.2	14.5	195.7		60.2		128.6	849.1	7	3	7	4	
20.9						41.7	7.9	92.6		36.7			498.4	7	4	7	5	
21.5					44.8	26.6	3.1	53.7	21.0	18.1		72.7	483	7	5	7	6	
13.7					63.9	29.2	5.0	62.9	18.8	13.7	20.4	127.9	568.4	7	6	7	7	
4.9					48.5	39.5	3.3	89.0	28.8	14.2	16.9	73.0	458.5	7	7	7	8	
7.5		9.4	3.2		41.7	29.4		59.6	17.2	14.9		47.2	426.7	7	8	7	9	
		20.9	9.5		108.9	84.9		253.4	182.0	53.6		120.9	817.7	7	9	8	0	
		28.3	34.2		75.3	52.2		121.7	79.2	30.2	21.0	66.1	553.5	8	0	8	1	
		23.1	7.6	36.8	60.3	44.1		98.7	41.1	19.0	22.3	51.4	466	8	1	8	2	
		33.9	12.7	47.8	132.0	108.8		264.2	167.9	63.8	28.4	69.5	868.3	8	2	8	3	
	70.3	35.2	9.1	37.3	50.0	29.7		68.1	29.8	23.1	11.9	43.3	412.2	8	3	8	4	
	30.9	18.5	5.5	24.2	45.4	28.6		61.4	24.7	13.1	12.2	35.4	523.2	8	4	8	5	
		13.0	4.8	14.9	26.5	23.7		48.1	15.1	12.0	11.1	25.5	371.7	8	5	8	6	
	20.0	16.3	4.7	21.3	127.7	54.9		133.7	73.4	18.7	15.1	74.1	677.2	8	6	8	7	

טבלה 4: ספיקה רב שנתית ממוצעת למעיינות נקבה ומעיינות ללא נקבה, מקדם הסבר בין נפח המשקעים השנתי לספיקה הממוצעת, ומובהקות (מבחן t). תוצאות עם מובהקות מודגשות ומסומנות בכוכבית

שם המעיין	תצורה גיאולוגית בנביעה	מספר שנות המדידה	ספיקה רב שנתית ממוצעת (אלפי מ"ק)	מקדם הסבר בין נפח משקעים שנתי לספיקה	מובהקות (מבחן t)	לרצף שנות המדידה
עם נקבה	ליפתא	כפר שאול	38	72.86	$R^2 = 0.3027$	*0.0180
	צובה	מוצא	35	23.08	$R^2 = 0.4201$	*0.0427
	כרם	מוצא	46	24.14	$R^2 = 0.7498$	*0.0001
	חניה	מוצא	34	73.00	$R^2 = 0.8563$	*0.0001
	בתיר	מוצא	31	117.79	$R^2 = 0.7714$	*0.0001
	לימון	שורק	13	6.45	$R^2 = 0.7255$	*0.0002
ללא נקבה	ג'מיץ	שורק	31	47.67	$R^2 = 0.7135$	*0.0001
	חמד	גבעת יערים	29	65.34	$R^2 = 0.8703$	*0.0001
	מערה פוכין	עמינדב	15	38.69	$R^2 = 0.3190$	0.1446
	ג'זרה פוכין	עמינדב	17	10.25	$R^2 = 0.0294$	0.6591
	פוכין	עמינדב	18	22.71	$R^2 = 0.1020$	0.4021
	ג'זרה	מוצא	16	15.18	$R^2 = 0.1307$	0.2249
	צדיק	עמינדב	12	25.42	$R^2 = 0.3487$	0.1628

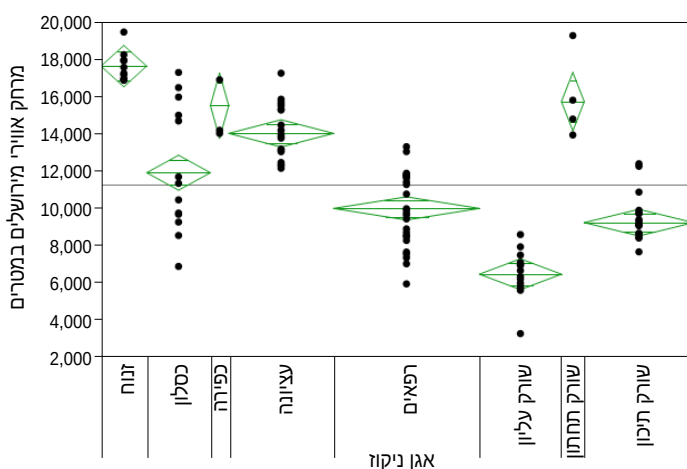
מיקום

ניתן לראות בטבלה 1 ובאיור 2 כי טווח קווי הרוחב והאורך בהם מופיעים מעיינות נקבה הוא מצומצם לעומת קווי הרוחב והאורך של מעיינות ללא נקבה. כלומר, מעיינות ללא נקבה מפוזרים על שטח גדול יותר ממעיינות הנקבה בהרי ירושלים. מבחינה סטטיסטית, המדד של קו הרוחב – מובהק.

פיזור במרחב הרי ירושלים (על פי אגני ניקוז)

אזור המחקר חולק על סמך הגאומורפולוגיה לשמונה אגני ניקוז: ארבעה מתוכם הם אגני הנחלים רפאים, כסלון, זנוח ועציונה. תא השטח הצפון מערבי, שנקרא להלן כפירה, כולל את אגני הנחלים אילן, החמישה, יתלה וכפירה יחדיו, בשל תוואי מבותר, שטח קטן יחסית, ובהיעדר נחל מרכזי. אגן הניקוז של נחל שורק, חולק בגלל אורכו ושטחו הגדול, לשלושה חלקים דומים בשטחם: (1) נחל שורק עליון: מראש אגן הניקוז באזור נבי סמואל ועד קו רוחב 214 (רשת ישראל החדשה-אזור סכר בית זית של ימינו). (2) מקו רוחב 214 ועד מפגש נחלים שורק רפאים. (3) ממפגש נחלים שורק ורפאים ועד ליציאת הנחל מתחומי הרי ירושלים אל השפלה הגבוהה באזור בית שמש (איור 2).

באיור 4 ו-4 ניתן לראות כי 67% מכלל מעיינות הנקבה מרוכזים בשני אגני ניקוז: אגן נחל רפאים (n=24) ואגן נחל שורק תיכון (n=22). באגן נחל שורק תיכון יש רק שני מעיינות ללא נקבה (עין אל קוף ועין לוזים). מאידך, באגנים עציונה זנוח וכפירה, ישנם שישה מעיינות נקבה בלבד לעומת 31 מעיינות ללא נקבה. ניתן להבחין גם שהצפיפות של מעיינות הנקבה גבוהה בחלק המזרחי של מרבית אגני הניקוז – מהחלק המערבי. כאשר בוחנים סטטיסטית את התפלגות המרחק האווירי מירושלים (ראה בהמשך) אל כלל המעיינות במחקר על פי אגני ניקוז (n=130), ניתן לראות שהאגנים הקרובים ביותר לירושלים הם שורק עליון, שורק תיכון ורפאים (איור 8).



איור 8. התפלגות כלל המעיינות במחקר (n=130) לפי אגני ניקוז ובהתאמה למרחק האווירי מירושלים. ניתן לראות שהמעיינות הנזבצים באגנים שורק עליון, שורק תיכון ורפאים הם הקרובים ביותר לירושלים.

מרחק אווירי מירושלים

כאמור, מראשית התיישבות האדם באזור המחקר, התקיימה רק עיר מרכזית יחידה אחת במרחב-והיא ירושלים. לצורך בדיקת היחס בינה לתופעת מעיינות הנקבה, הוגדר פוליון המבוסס על גבולותיה של העיר העתיקה של ימינו. תא שטח מצומצם זה נבחר (מלבד הצורך במדידה אחידה באופן יחסי לכלל המעיינות) משתי סיבות: (1) גבולות הפוליון סמוכים מאוד לגלעינה הקדום של העיר מתקופות הברונזה והברזל (עיר דוד), (2) מימי הבית השני, ובמשך רוב ההיסטוריה, ירושלים שכנה ברובה בשטח זה. כרונולוגית, בהתאם לידוע לנו על זמנה של תופעת מעיינות הנקבה, נכון להתייחס אל העיר מתקופות אלו.

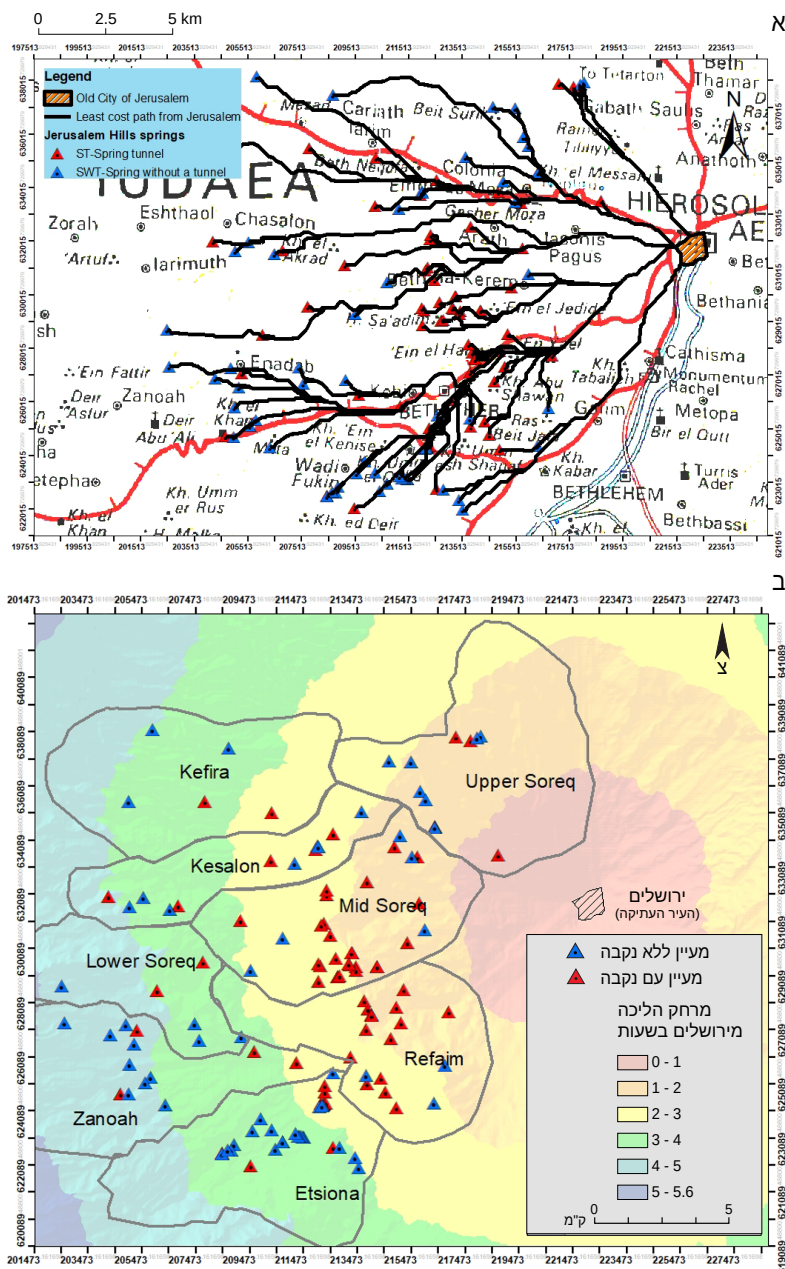
על ידי שימוש בפונקציית Near, בתוכנת ArcMap, נמדד המרחק האווירי מפוליון העיר העתיקה לכל אחד מהמעיינות ($n=130$). ניתן לראות בטבלה 1 כי ממוצע המרחק האווירי של מעיינות הנקבה מירושלים הוא 9.8 ק"מ לעומת 12.7 ק"מ של מעיינות ללא נקבה. גם הערכים המינימליים והמקסימליים מדגישים את הזיקה בין מעיינות נקבה לעיר העתיקה של ירושלים. מדד זה מובהק מבחינה סטטיסטית.

מרחק הליכה מירושלים בשעות

בשל טופוגרפיה תלולה באזור המחקר, נבחן מדד נוסף לבחינת היחס בין מעיינות הנקבה לירושלים העתיקה – זמן הליכה מהעיר אל המעיינות השונים. לשם מדידת מדד זה, נבנתה שכבת שיפועים באזור המחקר (Slope) בהסתמך על שכבה רסטריית של הטופוגרפיה (Dtm). לאחר מכן, הומרו ערכי השיפוע ב'עלות' (להרחבה בנושא ראה Pingel 2010), על פי מודל ההליכה שבנה טובלר בהתבססו על תצפיות אתנוגרפיות (Tobler 1993). מודל זה מניח קצב הליכה מקסימלי של 6 קמ"ש בשיפוע שלילי של 0.05, ובהתאמה, קצב ההליכה יורד כאשר השיפוע השלילי גדל, או כאשר השיפוע חיובי. בדומה למדידת טווח אווירי מירושלים, גם כאן נקודת המוצא היתה העיר העתיקה של ירושלים, כאשר לכל מעיין נוצרה דרך עם עלות מצטברת מינימלית (Least cost path) של השיפוע (איור 9א ו-9ב). ניתן לראות כי המודל יצר אלומות דרכים המתכנסות אל מספר צירים ראשיים היוצאים מהעיר העתיקה של ירושלים לצפון, מערב ודרום. מעניין גם שהמודל זיהה נכונה מספר קטעים קדומים בדרך גב ההר, מעלה רומאי באזור גבעת שאול, ודרך רומית נחל כסלון (Tsafir et al. 1994). בטבלה 1 נבחין כי באופן כללי כל המדדים מצביעים על הקרבה של מעיינות הנקבה אל העיר ירושלים, לעומת מעיינות ללא נקבה. כך למשל ממוצע זמן ההליכה מירושלים הוא 2.33 שעות עבור מעיינות עם נקבה לעומת שלוש שעות ומעלה עבור מעיינות ללא נקבה. גם מדד זה מובהק באופן סטטיסטי, ותואם את מדד המרחק האווירי (לעיל).

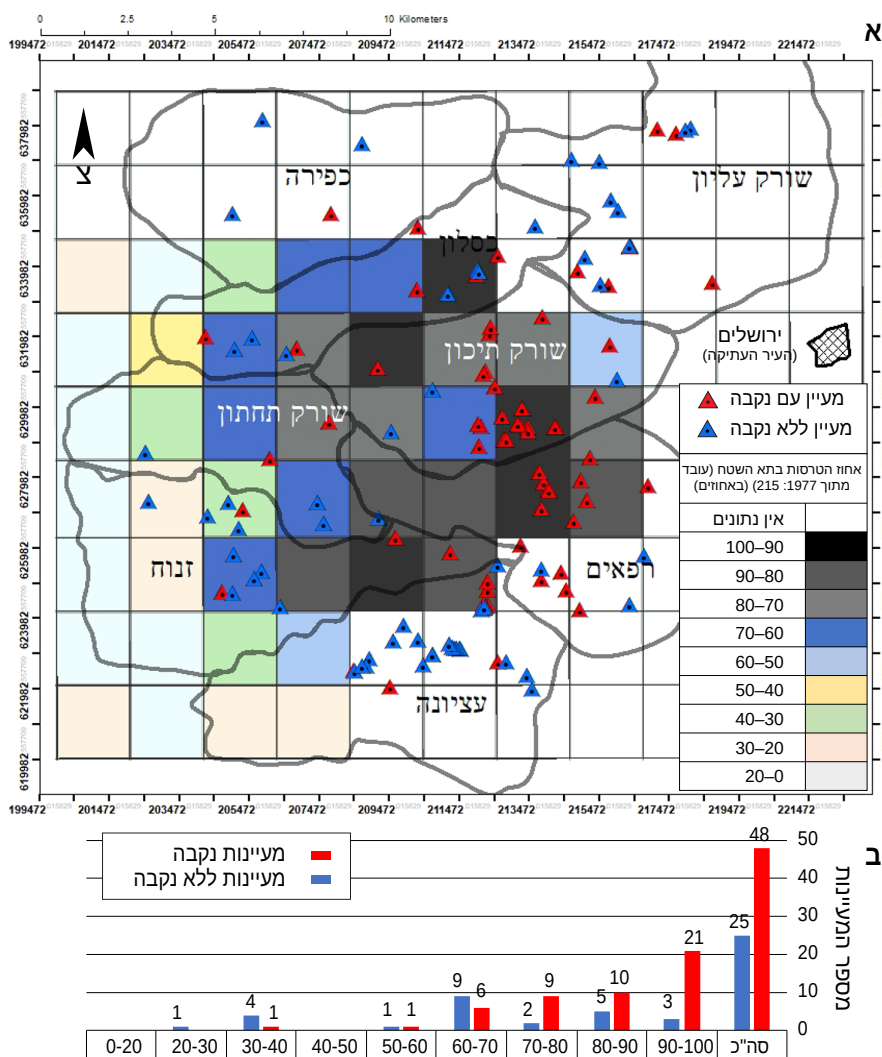
התאמה לאחוז מדרגות העיבוד בתא השטח

רון (1977), במסגרת מחקריו על חקלאות ההר הקדומה בישראל, עסק רבות באזור 'פרוזדור ירושלים'. תא שטח זה שונה מתחום המחקר הנוכחי (הרי ירושלים) – בעיקר בשוליים הצפוניים והדרומיים שמעבר לקו הירוק (איור 10). רון חילק את ה'פרוזדור' לשטחים בגודל 2.5×2.5 ק"מ ובחן את צפיפות מדרגות העיבוד בכל תא שטח. ניתן לראות שביחס לשטח המחקר הנוכחי, ב'פרוזדור ירושלים' מרוכזים מעיינות נקבה רבים (48 מתוך 69) לעומת מעיינות ללא נקבה (25 מתוך 61). בנוסף, ניתן להבחין באופן ברור שקיימת התאמה בין אחוז מדרגות העיבוד בתא השטח לבין מספר



איור 9: א. חישוב דרכים עם עלות מינימלית מצטברת של השיפוע (קוים שחורים), מכלל המעינות עם נקבה (משולש אדום) ומעינות ללא נקבה (משולש כחול), אל העיר העתיקה של ירושלים. רשת הדרכים שנוצרה, עולה בקנה אחד עם חלק מרשת הדרכים הרומאית באזור – המסומנת באדום (מפת הדרכים הרומית מבוססת על Tsafir et al. 1994). ב. פיזור מעיינות נקבה (משולש אדום) ומעינות ללא נקבה (משולש כחול) על פי מרחק הליכה מירושלים בשעות.

מעיינות הנקבה. בתאי שטח המכוסים ב-90%–100% מדרגות עיבוד, ישנם 21 מעיינות עם נקבה (43% ממעיינות הנקבה בפרוזדור) לעומת שלושה מעיינות בלבד ללא נקבה (12% מהמעיינות ללא נקבה בפרוזדור). בתאי שטח בהם קיים כיסוי של 70%–90% מדרגות עיבוד ישנם 19 מעיינות נקבה (40% ממעיינות הנקבה בפרוזדור) לעומת שבעה מעיינות ללא נקבה בלבד (28% מהמעיינות ללא נקבה בפרוזדור). נתון מעניין נוסף העולה מאיור 10 הוא שבאגני הניקוז של שורק תיכון ורפאים-רובם המוחלט של מעיינות הנקבה מרוכזים בשטחים בהם קיים כיסוי כמעט מלא של מדרגות עיבוד.

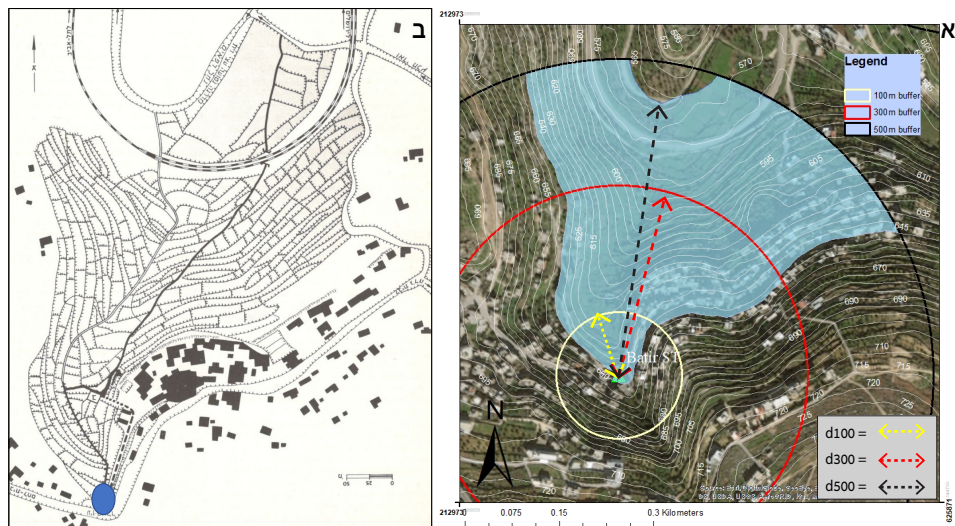


איור 10: פיזור מעיינות נקבה ומעיינות ללא נקבה ב'פרוזדור ירושלים' - ביחס לאחוז מדרגות העיבוד בתא השטח. מעובד על פי רון (1977). כל ריבוע במפה ב-2.5X2.5 ק"מ. ריבוע לבן - משמע אין מדידות. ניתן לראות כי קיים ריכוז של מעיינות נקבה בחלקים המזרחיים באגנים שורק תיכון ורפאים - באזורים בהם אחוז כיסוי מדרגות העיבוד גבוה ביותר.

הפרש גובה מהמעין אל קו האפיק בטווח של 100, 300 ו-500 מ'

הפרש הגובה מהנביעה אל האפיק מהווה מחוון לטופוגרפיה והמורפולוגיה בסביבת המעין ובנוסף מהווה אומדן מסוים לפוטנציאל ההשקיה והשלחין של המעין. זאת על בסיס ההנחה שלמעיינות הנובעים בהפרש ניכר מהאפיק – קיים פוטנציאל להקמת בית שלחין נרחב.

למעיינות הנובעים סמוך או בתוך ערוץ מסדר נמוך, המתנקזים לערוץ סמוך מסדר גבוה, קיימת מורכבות למדוד מדד זה בצורה אחידה. על מנת להתגבר על מורכבות זו, נמדד הפרש הגובה מכל מעין לנקודה הנמוכה ביותר בטווחים שונים – 100, 300 ו-500 מ' (איור 11א). כמובן, בהתאם לאופי הזרימה ההגיוני של מי נגר עילי, קרי בכיוון המורד. טווח של 100 מ' מייצג ספיקה של מעיינות קטנים בעלי ספיקה חלשה ובהתאמה בית שלחין קטן, ואילו טווח של 500 מ' מייצג מעיינות גדולים בעלי ספיקה איתנה ובהתאמה בית שלחין גדול. לדוגמה, בתי השלחין של המעיינות הגדולים בתיר וחינדק משתרעים למרחק של כ-500 מ' אווירי מהמעיינות (רון 1968; Ron 2002).



איור 11: א. מעין הנקבה של עין בתיר, הדגמת שיטת המדידה: הפרש גובה מהמעין לקו האפיק בטווחים של 100, 300 ו-500 מ', ומודל פוטנציאל השלחין בדונם בטווחים אלו. ב. שטח השלחין שהושקה בפועל ממעין בתיר (רון 1968 איור 6). ניתן לראות שבית השלחין משתרע עד למרחק של כ-500 מ' מהמעין. בנוסף, ניתן לראות שהמודל באיור 11א זיהה נכונה את רוב השטח המושקה בפועל בטווח זה, למעט האזור הבנוי במזרח הכפר, שיתכן והיה מושקה בעבר.

ניתן לראות בטבלה 1 כי בכל הטווחים, ביחס למעיינות ללא נקבה, מעיינות נקבה נובעים בהפרש גובה ניכר מעל קו האפיק (ותא השטח הסמוך). הדבר בא לידי ביטוי למשל בממוצע הפרש הגובה של כלל מעיינות הנקבה בטווח של 300 מ' (53 מ') לעומת מעיינות ללא נקבה (32 מ' בלבד).

פוטנציאל השלחין (בדונם) בטווח 100, 300 ו-500 מ' מהמעין

שיטת ההשקיה בשלחין מבוססת על הצפת שטח הגידולים, ועל כן ברובה מצויה בקרקע מפולסת. משמעות הדבר היא שמבחינה תאורטית, במידה וספיקת המעין גדולה מספיק – בית השלחין

יחל בקו הגובה של הנביעה/ברכת האיגום וישתרע מטה בהתאם לטופוגרפיה. מערכות השלחין בוואדי פוכין ובמיוחד המערכת בביתר (איור 11ב) מדגימות עיקרון זה. בכדי לבחון האם למעיינות נקבה פוטנציאל שלחין גדול יותר ממעיינות ללא נקבה, לכל מעיין במדגם הוגדרו שלושה פוליגונים, המוגבלים בקווי הגובה שמתחת לנביעה ובטווחים השונים שהוזכרו (100, 300 ו-500 מ') (איור 11א). ניתן לראות בטבלה 1 כי למעיינות עם נקבה פוטנציאל שלחין גדול יותר ממעיינות ללא נקבה, שלושת הטווחים נמצאו מובהקים.

דיון ומסקנות

במחקר רגיונלי זה נבחנו 21 מדדים לקבוצה של 130 מעיינות בהרי ירושלים (69 מעיינות עם נקבה, 61 ללא נקבה) בניסיון להבין אילו קריטריונים הנחו את האדם בעבר בבואו לפתח נקבה למעיין שכבה. המדדים שנבחנו מתחלקים לשלושה: מדדים גאולוגיים-גאומורפולוגיים, מדדים פיזיים-הידרולוגיים ומדדים מרחביים. הדיון יתמקד במסד הפיזי של התופעה, ולאחריו בהיבט האנושי-מרחבי שלה.

היבטים פיזיים

גאולוגיה: מתוך 69 מעיינות הנקבה המצויים בהרי ירושלים, 36 נובעים על גבי תצורת מוצא. מחקרים קודמים הצביעו על קשר ברור בין נפח המשקעים השנתי לספיקה של מעיינות הנובעים על גבי תצורת מוצא, בשל קארסט מפותח באקוויפר המזין (להרחבה בנושא ראה: יחזקאל ופרומקין 2019; כך זה; Peleg et al. 2012: 781; Peleg and Gvirtzman 2010). בסקר שנערך ביולי 2018, נמצאו עשרה מעיינות נקבה יבשים, המצויים כולם בתצורה זו (איור 12). מכל הנאמר ניתן להסיק שמעיינות מתצורת מוצא רגישים ביותר לתנודות בנפח המשקעים השנתי והעונתי ועל כן לרבים מהם פותחה נקבה. יתרונות יחסיים נוספים שיש למעיינות הנובעים על גבי תצורה זו: (1) רובם נובעים בהפרש גובה ניכר מקו האפיק ולהם פוטנציאל שלחין גדול (איור 5). נתון זה הגיוני שכן מבין השכבות האקוויקלודיות בחבורת יהודה, תצורת מוצא יחסית צעירה ועל כן מחשופיה גבוהים באופן יחסי (איור 4). (2) לאור העובדה שרבות מהנקבות מתצורת מוצא סתומות כיום במפולות, נלמד שהסלע בו הם נחצבו פריך ונחצב בקלות. (3) בשל העובי הרב של שכבת החוור בהשוואה לאקוויקלודים אחרים בחבורת יהודה, חלחול המים מועט (סנה ואבני 2011). (4) מתוך 36 מעיינות נקבה מתצורת מוצא, 31 מצויים במרחבי נחל רפאים ושורק תיכון – האגנים הנגישים ביותר לירושלים (יידון בהמשך).

הידרולוגיה: מניתוח כלל נתוני הספיקה הזמינים למעיינות שכבה בהרי ירושלים, כל מעיינות הנקבה הראו התאמה לינארית ומובהקות לנפח המשקעים השנתי ($n=6$). זאת בשונה ממעיינות ללא נקבה ($n=7$), בה רק שני מעיינות הראו התאמה לינארית ומובהקות. נתון זה מדגיש את העובדה שנקבה היא פתרון הידרולוגי מיטבי למעיינות עם ספיקה תנודתית בעוד שלמעיינות איתנים לא היה צורך בפתרון נקבה. עדות לדבר נמצאת באזור ואדי פוכין. על אף שהאזור משופע במעיינות רבים (ובחקלאות שלחין משגשגת), רק למעיין אחד פותחה נקבה קצרה (8 מ'). ככל הנראה ספיקת המעיינות בוואדי פוכין איתנה ואינה מושפעת באופן מדי מתנודות בנפח המשקעים השנתי (טבלה 4).



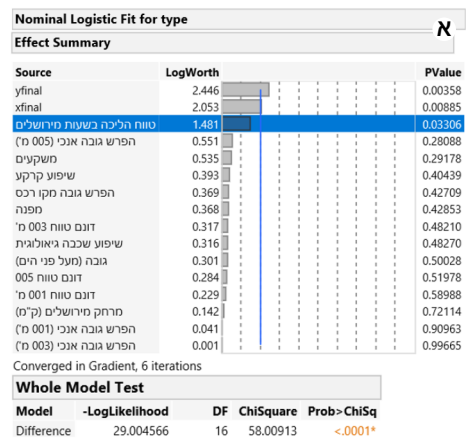
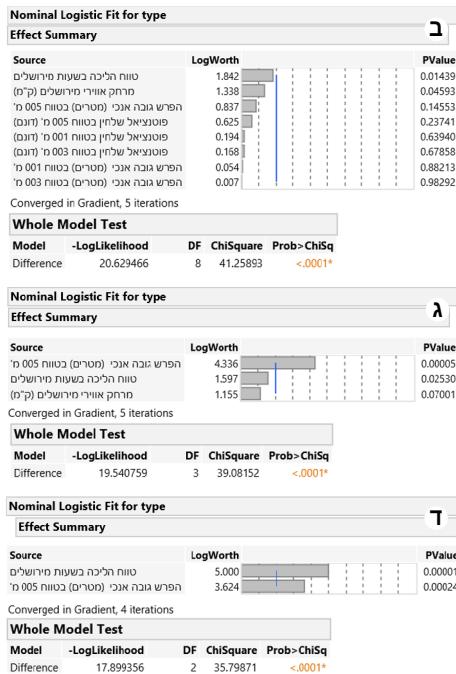
איור 12: מעיינות נקבה מתצורת מוצא שנמצאו יבשים בסקר שנערך ביולי 2018 בהרי ירושלים. א. עין דילבה, ב. עין שייח אחמד, ג. עין עש, ד. עין עמינדב מערב, ה. עין עמינדב מזרח, ו. עין חרת, ז. מעיין נקבה ללא שם (נ.צ. 629412/213445 רשת ישראל חדשה), ח. עין נעמה, ט. עין סעדים, י. עין אבו בסין. צילומים: עזריאל יחזקאל

ספיקת מעיינות שכבה באזורים הרריים באקלים ים-תיכוני מהווים סמנים ראשונים במעלה להרעה בכמות המשקעים. הימצאותם של נקבות למעיינות אלו מהווים עדות לאדפטציה של האדם לשינויים שכאלו. כך למשל, לנקבת עין סעדים (נ.צ. 628912/212024: רשת ישראל החדשה) מספר שלבי התפתחות והיא מתנקזת לשתי ברכות אגירה בנפח כולל של למעלה מ-100 מ"ק. נקבה זו יבשה

לחלוטין מזה מספר שנים, אך סביר שלפחות בעת פיתוחה זרמו בה מים. אם נקבל את הטענה/השערה שמערכת מים זו קשורה באתר הביזנטי הסמוך (רובין 2018: 77 ושם הפניות נוספות; Baramki and Avi-Yonah 1934; Meimaris 1986: 172), נוכל להסיק שהתקופה הביזנטית היתה לחה יותר מימינו. דבר העולה בקנה אחד עם מחקרים סביבתיים אחרים (Enzel et al. 2003: Fig 2a).

היבטים אנושיים-מרחביים

קרבה לירושלים: שלושה מדדים נומריים מובהקים (קו הרוחב, מרחק מירושלים אווירית, ומרחק מירושלים בשעות הליכה), וממד נוסף קטגורי (אגני הניקוז) מצביעים על זיקה חזקה בין מעיינות הנקבה לעיר המרכזית במרחב – ירושלים. כאשר מריצים גרסיה לוגיסטית מרובת מדדים, עם כלל המשתנים המרחביים יחד, מדד שעות ההליכה אל העיר, הוא הממד המובהק ביותר (איור 13).



איור 13: ארבעה מודלים של גרסיה לוגיסטית מרובת משתנים, בניסיון להגדיר את המשתנים המבדילים בין מעיין לו פיתחו נקבה, למעיין ללא נקבה. כלל המודלים נמצאו מובהקים (P-val מסומן בכוכבית ומודגש). ניתן להבחין שבכל המודלים, גם לאחר דילול משתנים, שני המשתנים החשובים ביותר הם טווח ההליכה מירושלים בשעות, והפרש הגובה מקו האפיק בטווח של 500 מ'

ניתן להסביר זאת באופן הבא. ההתיישבות בהרי ירושלים החלה בנאולית הקדם קרמי (Khalaily et al. 2007), אך כל עוד האוכלוסייה היתה מצומצמת וללא מוקד עירוני, הספיקה הטבעית של המעיינות היתה מספקת לקיום ולחקלאות מקומית. לאחר ייסוד העיר ירושלים בתקופת הברונזה התיכונה, אך בעיקר מתקופת הברזל ב' (Edelstein and Milevski 1994; Faust 2005; Gadot), עלה גם הצורך בעורף כפרי לסיפוק תצרוכת חקלאית טרייה לאוכלוסייה העירונית הגדלה. לתוצרת זו חיי מדף קצרים, וישנה חשיבות רבה בקרבה ובנגישות אל העיר. מסיבה זו הוקמו כפרים חקלאיים בראשי אגני שורק תיכון ורפאים בשל סמיכותם אל העיר, ובשל יתרונותיהם הפיזיים: ריכוז מעיינות, נטייה גאולוגית נמוכה ונחלים רחבים (איורים 2 ו-6).

עם הגידול באוכלוסייה הכפרית והעירונית במרחב, עלה גם הצורך בהגדלת מקורות המים למחייה וחקלאות שלחין, ועל כן פותחו נקבות למעיינות השכבה. ככל הידוע לנו כעת, ישנה התאמה מסוימת בין גילם של מעיינות הנקבה לתקופות בהן היתה עלייה בהתיישבות הכפרית בהרי ירושלים: תקופת הברזל ב', והתקופה הרומית והביזנטית (קלונר תשס"ג: 17). החקלאות האינטנסיבית שהתקיימה באגני שורק תיכון ורפאים עדיין ניכרת לעין בנוף הקיים. הן בצפיפות הגבוהה של מדרגות העיבוד (חקלאות בעל: איור 10), והן בצפיפות הגבוהה של מעיינות הנקבה (חקלאות שלחין). בשני אגנים אלו נמצאו 46 מעיינות נקבה שהם 66% ממעיינות הנקבה בהרי ירושלים.

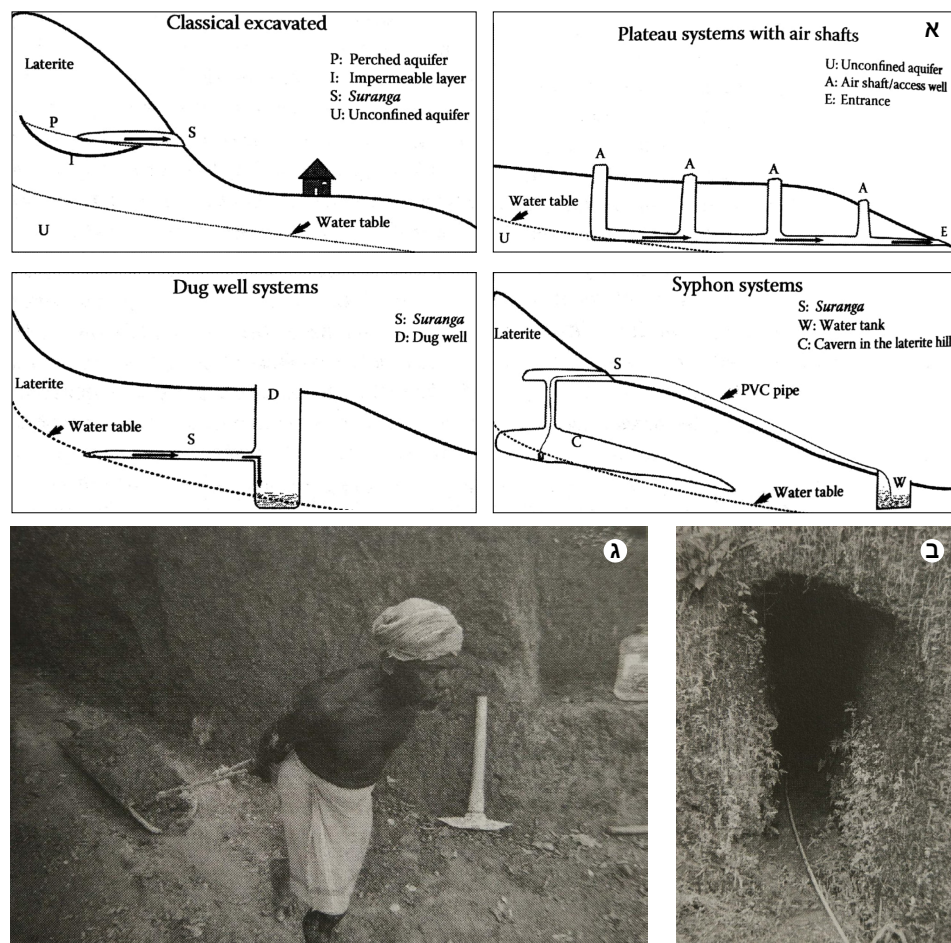
על סמך הנאמר, ייתכן וניתן להגדיר את המרחב הכפרי של הערים הקדומות בשרדרת ההר, על פי צפיפות מעיינות הנקבה שסביבן. ממבט ראשוני, באיור 2 ניתן להבחין בריכוז מעיינות נקבה סביב הערים שכם וחברון.

הפרש הגובה מקו האפיק: המדדים של הפרש הגובה מן המעיין אל קו האפיק בטווחים של 100, 300 ו-500 מ', ובהתאמה, פוטנציאל ההשקיה של המעיין בטווחים אלו נמצאו מובהקים. כלומר, סטטיסטית, נקבות פותחו למעיינות שנובעים בהפרש גובה משמעותי מסביבתם, והם בעלי פוטנציאל שלחין גדול יותר ממעיינות ללא נקבה. נתון זה ייתכן ומעיד שמעיינות נקבה קשורים בעיקר בחקלאות שלחין, ופחות כמקור מים למחייה.

ניתן לשקול, על סמך מחקר זה, לאושש את הנביעה של חלק ממעיינות ההר – אם לתיירות ואם לחקלאות שלחין מקומית – באמצעות פיתוח נקבות בנות ימינו. מדובר במתקן מים היסטורי, מקומי, לא מזהם, בר-קיימא, וללא השפעה כמעט על הנוף בשל היותו תת-קרקעי. גם ההשפעה על האקוויפר ממנו נובע המעיין (מכונה אקוויפר שעון) מוגבלת שכן מדובר במקור מים קטן ומוגבל, המתחדש תדיר בהתאם לנפח המשקעים השנתי. נראה שהתצורה המועדפת לפתח נקבה היא תצורת מוצא, ובמידה וקיים רצון גם לפתח חקלאות שלחין יש לשקול לפתח נקבות למעיינות הנובעים בהפרש גובה ניכר מקו האפיק.

הצעה זו, לפתח נקבות בנות ימינו, נתמכת מאזורים אחרים. החל מ-1900 ועד ימינו אנו, בחבלי המדינות של קרנאטקה וקרלה (Karnataka and Karla) המצויים בחלק הדרום מערבי של תת היבשת ההודית, פותחו מאות ואף אלפי Surangas (Crook et al. 2015, 2016). בדומה למעיינות הנקבה של ישראל, מדובר במנהרות מים תת-אופקיות, באורך ממוצע של 33 מ', המנקזות בין היתר אקוויפרים שעונים, להשקית בתי חווה מקומיים (איור 14). אמנם, בשונה מישראל האקלים שם טרופי, ומנהרות המים חפורות בתוך לטריט מגובש ולא בסלעי גיר, אך העיקרון ההידרולוגי והנתונים הטכניים דומים.

גם אם כיום מדינת ישראל לא זקוקה לפתרונות הידרולוגיים שכאלו, ייתכן ופתרונות כאלה רלבנטיים למדינות שכנות באזור הים התיכון, בעלות מאפיינים אקלימיים והידרולוגיים דומים ואוכלוסייה גדולה התלויה בחקלאות זעירה.



איור 14. א) סוגים שונים של נקבות Suranga בהודו לפי סוג מקור המים. הסוג הראשון (Classical) – הוא פיתוח מעיינות שכבה מאקוויפר שעון בדומה למעיינות הנקבה בארץ ישראל. ב) פתח של Suranga. ג) פיתוח של Suranga בימינו. מתוך: Crook et al. 2016: fig 24-2.3.5

סיכום

במחקר זה ננקטה לראשונה גישה רגיונלית כמותית בניסיון לבחון את הקריטריונים שבגינם בחר האדם לפתח נקבה למעיין שכבה בעבר. נבחנו 21 מדדים שונים לקבוצה של 130 מעיינות (69 עם נקבה, 61 ללא נקבה) הנובעים כולם בהרי ירושלים. נראה שהיתה קיימת העדפה לפתח מעיינות נקבה בתצורות גאולוגיות מסוימות (בעיקר מוצא), ולמעיינות הנובעים בהפרש ניכר מקו האפיק.

בנוסף מחקר זה מדגיש את יתרונותיהם של החלקים המזרחיים-עיליים של האגנים שורק תיכון ורפאים: מעיינות רבים, נחלים רחבים, שיפוע גאולוגי מתון, צפיפות מערכות של מדרגות עיבוד וגישה קרובה ונוחה לירושלים. נתונים אלו מסבירים מדוע כבר מהנאולית הקדם קרמי ב' היתה

קיימת התיישבות באזור זה, ולפחות מזמן ייסוד ירושלים בתקופת הברונזה התיכונה ובעיקר מתקופת הברזל ב', אזור זה היווה את העורף החקלאי של העיר. מן המחקר עלה שרוב מעיינות הנקבה מצויים בטווח הליכה של כשעתיים בלבד מהעיר העתיקה בירושלים. ייתכן והדבר קשור לעובדה שהתוצרת החקלאית של מעיינות הנקבה וחקלאות השלחין (בעיקר ירקות וחד-שנתיים) בעלת חיי מדף קצרים.

נראה שהאדם בעבר הכיר היטב את סביבתו הפיזית-הידרולוגית-טופוגרפית-אקלימית. ייתכן ואפשר ללמוד מניסיון העבר, וייתכן ונכון לפתח גם בימינו מתקני מים שכאלו. נציין, שבתת-היבשת ההודית, החל משנת 1900, פותחו מאות ואף אלפי Surangas. אלו מנהרות מים תת-אופקיות באורך כמה עשרות מ', המזכירות את מעיינות הנקבה שהתברכה בהם ארץ ישראל. ולסיום, מחקר זה מדגיש את החשיבות במחקר רגיונלי של מפעלי מים קדומים ובבחינה כמותית רב-ממדית שלהם.

תודות

מחקר זה בוצע בסיוע קרן רינג מבית הספר ללימודי סביבה, והתאפשר הודות למענק מחקר מטעם קרן רות עמירן למחקרים במכון לארכאולוגיה, האוניברסיטה העברית בירושלים. ברצוננו להודות לפרופסור עוזי ליבר על הסיוע וההכוונה בלימודי המחקר (של ע"י). תודה לד"ר אורי דוידוביץ' על שחלק עמנו מניסיונו הרב במחקר רגיונלי. תודה למסייעים בעבודת השדה: יואב נגב, מאיר רוטר, עופר אשכנזי ובנימין טרופר. תודה למסייעים בעצה טובה ובמדידות השונות: פרופסור חיים גבירצמן, יואב רופא, אביה וידברג, חיים וידברג, ד"ר עידו וטל ורועי פורת. לד"ר שאול ציונית על הסיוע בניתוח הסטטיסטי ולד"ר מנחם וייס מהשירות ההידרולוגי על מדידות הספיקה. תודה מיוחדת למר עדי בן נון ולמר גיא קרן מהמעבדה לגאוגרפיה חישובית באוניברסיטה העברית, ולדניאל עין מור מרשות העתיקות על שיתוף הפעולה ותרומתו לחקר תופעת מעיינות הנקבה. תודה לד"ר נורית שטובר על הערותיה המועילות והבונות למאמר זה.

מקורות

בונה, י' וא' וביידא. 1977. מקורות המים וניצולם בשומרון ויהודה. *יהודה ושומרון – פרקים בגאוגרפיה יישובית* כרך א', 34–48.

דן, י' וצ' רז. 1970. *מפת חברות הקרקעות של ישראל בקנה מידה של 1:250,000*. ירושלים: משרד החקלאות.

השירות המטאורולוגי www.ims.gov.il

זיסו, ב' וד' וייס. 2008. עין קובי – דוח סופי. *חדשות ארכאולוגיות*, 120. רשות העתיקות, גיליון אלקטרוני (גישה: www.hadashot-esi.org.il/report_detail.aspx?id=703&mag_id=114). (15/12/2018)

יחזקאל, ע' וע' פרומקין. 2019. השפעת השינוי בכמות המשקעים השנתית על ספיקת 36 מעיינות שכבה בהרי ירושלים. *אופקים בגאוגרפיה*, 96, 4–26.

יחזקאל, ע', ב' טרופר, ב' לנגפורד, ר' פורת וע' פרומקין. 2019. מערכת המים הקדומה בעין פעור. *מחקרי ארץ יהודה*, ג', 135–153.

כהן, א' וד' פיימן. 2011. סקר מעיינות הרי ירושלים, ניתוח איכויות וכמויות מים על בסיס ממצאי הדיוגום לשנת 2011. ירושלים: רשות הטבע והגנים.

- מרקוס, מ' 1993. הרי ירושלים – סקר נוף ומסלולי טיול. ירושלים: רשות הטבע והגנים.
- סנה, ע' ו', אבני. 2011. מפה גאולוגית של ישראל 1:50,000, ירושלים גיליון II. המכון הגאולוגי.
- עין מור, ד' וצ' רון. 2013. גולת הכותרת: מעיין מנהרה ונקבה ממלכתי מתקופת הברזל באזור נחל רפאים. *חידושים בארכיאולוגיה של ירושלים וסביבותיה קובץ מחקרים*, ז, 85–109.
- עמית, ד' וא' נגר. 2008. סקר בחורבת בית תלם ובעינות תלם. ירושלים: רשות העתיקות מרחב ירושלים.
- פאוסט, א' תשס"ח. העורף החקלאי של ירושלים ומעמדה של העיר בתקופת המקרא. ארץ-ישראל: מחקרים בדיעת הארץ ועתיקותיה, כח, 165–172.
- פלג, י' וע' גרינפלד. תשס"ו. שתי נקבות מעיין בנויות מן התקופה הרומית באזור שכם. *מחקרי יהודה ושומרון* ט"ו, 161–168.
- פרומקין, ע' 2013. מערכות מים תת קרקעיות במעיינות הגדולים של שכם. במעבה ההר, קובץ שני, 141–151.
- קלונר, ע' תשס"ג. סקר ירושלים האזור הצפוני מערבי מבוא ומפתחות. ירושלים: רשות העתיקות.
- רובין, ר' 2018. סיפורים שסיפרו לי ההרים. ירושלים: הוצאת רסלינג.
- רון, צ' 1968. בתיר - הכפר ומערכות מדרגות השלחין. טבע וארץ, י' (חוברת ב'), 112–128.
- רון, צ' 1977. ניצול מעיינות לחקלאות שלחין בהרי יהודה. *יהודה ושומרון - פרקים בגיאוגרפיה יישובית*, כרך א', 230–250.
- Bar, O., E. Zilberman, Z. Gvirtzman., and S. Feinstein. 2006. *Geological Survey of Israel, Jerusalem*. Reconstruction of the uplift stages of the mountain backbone in central Israel. Jerusalem: The Ministry Of National Infrastructures.
- Baramki, D. C. 1934. An Early Christian Basilica at 'Ein Hanniya. *QDAP*, 3, 113–117.
- Baramki, D. C., and M. Avi-Yonah. 1934. An Early Christian Church at Khirbat' Asida. *QDAP*, 3, 17–19.
- Benvenisti, M. 1982. Bovaria-babriyya: A Frankish Residue on the Map of Palestine. In: J. Prawer, B. Z. Kedar, H. E. Mayer and R. C. Smail (eds.), *Outremer: Studies in the History of the Crusading Kingdom of Jerusalem*, 130–152, Jerusalem: Yad Izhak Ben-Zvi Institute.
- Bull, R. J. 1965. Appendix 4. Water sources in the Vicinity. In: G. E. Wright (ed.), *Shechem, The Biography of a Biblical City*, 214–228. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Clermont-Ganneau, C. 1899. *Archaeological Researches in Palestine*, Vol. I. London: Palestine Exploration Fund.
- Crook, D., S. Tripathi, and R. T. Jones. 2015. An investigation into the age and origin of Suranga in the foothills of the Western Ghats of India. *Water History*, 7(3), 253–270.
- Crook, D., S. Tripathi, and R. T. Jones. 2016. Traditional Methods of Groundwater Abstraction and Recharge along the Windward Side of the Foothills of the Western Ghats of India. In: E. D. Angelakis et al. (eds). *Underground Aqueducts Handbook*, 415–425, New York: Senior Acquisitions Editor (CRC Press) Taylor & Francis Group.

De Vaux, R., and A. M. Steve. 1950. *Fouilles a Qaryet El-'enab Abu gosh*. Palestine. Paris: Gabalda et Cie éditeurs.

Edelstein, G., and I. Milevski. 1994. The Rural Settlement of Jerusalem Re-evaluated: Surveys and Excavations in the Reph'aim Valley and Mevasseret Yerushalayim. *Palestine Exploration Quarterly*, 126(1), 2–23.

Ein Mor, D., and Z. Ron. 2016. 'Ain Joweizeh': An Iron Age Royal Rock-Cut Spring System in the Nahal Refa'im Valley. *Tel Aviv*, 43, 98–131.

Enzel, Y., R. Bookman, D. Sharon, H. Gvirtzman, U. Dayan, B. Ziv, and M. Stein. 2003. Late Holocene climates of the Near East deduced from Dead Sea level variations and modern regional winter rainfall. *Quaternary Research*, 60(3), 263–273.

Faust, A. 2005. The Settlement of Jerusalem's Western Hill and the City's Status in Iron Age II Revisited. *Zeitschrift des Deutschen Palästina-Vereins*, 121(2), 97–118.

Flexer, A., A. Gilat, F. Hirsch, A. Honigstein, A. Rosenfeld, and T. Rueffer. 1989. Late Cretaceous evolution of the Judean Mountains as indicated by ostracodes. *Terra Nova*, 1(4), 349–358.

Frumkin, A. 1992. Karst origin of the upper erosion surface in the northern Judean Mountains, Israel. *Journal of Earth Sciences*, 41, 169–176.

Frumkin, A. 2002. The hydrogeology of Israel and the problem of water supply in antiquity. *Journal of Roman Archaeology-Supplementary Series*, 46, 21–24.

Gadot, Y. 2015. In the Valley of the King: Jerusalem's Rural Hinterland in the 8th-4th Centuries BCE. *Tel Aviv*, 42(1), 3–26.

Gibson, S. 1991. Sataf 1989. *Excavations and Surveys in Israel 1991*, 10, 27–28.

Gibson, S. 2009. The Suba water system as a clay-production plant in the Iron Age II. In: J. Aviram et al. (eds.). *Eretz Israel*, 29, 45–55. Jerusalem: The Israel Exploration Society.

Gibson, S. and Kloner, A. 1989. Sataf 1987. *Excavations and Surveys in Israel 1988/89*, 7–8, 161–162.

Guérin, V. 1874. *Description géographique, historique et archéologique de la Palestine* (Vol. 4). Paris: Imprimerie nationale.

Khalaily, H., O. Bar-Yosef, O. Barzilai, E. Boaretto, F. Bocquentin, A. Eirikh-Rose, Z. Greenhut, A. N. Goring-Morris, G. Le Dosseur, O. Marder, L. Sapir-Hen, and M. Yizhaq. 2007. Excavations at Motza in the Judean Hills and the early Pre-Pottery Neolithic B in the southern Levant. *Paléorient*, 33(2), 5–37.

Mazar, A. 2002. A Survey of the Aqueducts to Jerusalem. *Journal of Roman Archaeology-Supplementary Series*, 46, 210–242.

Meimaris, Y. E. 1986. *Sacred names, saints, martyrs and church officials in the Greek inscriptions and papyri pertaining to the Christian Church of Palestine (Vol. 2)*. Greece: National Hellenic Research Foundation, Centre for Greek and Roman Antiquity.

Patrich, J., and D. Amit. 2002. The aqueducts of Israel: an introduction. *Journal of Roman Archaeology-Supplementary Series*, 46, 9–20.

Peleg, N., and H. Gvirtzman. 2010. Groundwater flow modeling of two levels perched karstic leaking aquifers as a tool for estimating recharge and hydraulic parameters. *Journal of Hydrology*, 388, 13–27.

Peleg, N., E. Morin, H. Gvirtzman, and Y. Enzel. 2012. Rainfall, spring discharge and past human occupancy in the eastern Mediterranean. *Climatic Change*, 112, 769–789.

Pingel, T. J. 2010. Modeling slope as a contributor to route selection in mountainous areas. *Cartography and Geographic Information Science*, 37(2), 137–148.

Pritchard, J. B. 1961. *The Water System of Gibeon*. Philadelphia: The University Museum.

Ron, Z. Y. D. 1985. Development and management of irrigation systems in mountain regions of the Holy Land. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 10(2), 149–169.

Ron, Z. Y. D. 1992. Qanat systems and Spring flow tunnels. *Les eaux caches – Etudes géographiques sur les galeries drainantes souterraines reunies par les soins de Daniel Ballande*, 19, 33–54, Publications du Departement de Geographie de l'universite de Paris-Sorbonne.

Ron, Z. 2002. The big Dam in the Ein Khandak Irrigation System – The "Western Wall" (Wailing Wall) of the Agricultural Terraces. *Annual Conference of the Israeli Geographical Association, December 2002*.

Tsafrir, Y., L. Di Segni, and J. Green. 1994. *Tabula Imperii Romani Iudaea-Palestina: Eretz Israel in the Hellenistic, Roman and Byzantine periods; maps and gazetteer*. Jerusalem: The Israel Academy of Sciences and Humanities.

Tobler, W. 1993. *Three presentations on geographical analysis and modeling*. NCGIA.

Wdowinski, S., and E. Zilberman. 1997. Systematic analyses of the large-scale topography and structure across the Dead Sea Rift. *Tectonics*, 16(3), 409–424.

Yechezkel, A., and A. Frumkin. 2016. Spring tunnels (Niqba'): The Jerusalem hills perspective. In: E. D. Angelakis et al. (eds.), *Underground Aqueducts Handbook*, 151–172. New York: Senior Acquisitions Editor (CRC Press) Taylor & Francis Group.