

אלון רימר

המעבדה לחקר הכנרת, חקר ימים
ואגמים לישראל

מאמר זה עבר שיפוט עמיתים

ציטוט מומלץ

רימר א. 2017. אגן ההיקוות של
הכינרת – עקרונות לשמירת יציבות
הידרולוגית. *אקולוגיה וסביבה* 8(4):
20–30.



רכס החרמון תורם כ-75% מכמות המים באגן הכינרת. לפיכך, להערכת כמות הגשם על הרכס חשיבות רבה בהערכות ובמודלים של כמויות המים באגן | צילום:
ורנר אקרס

אגן ההיקוות של הכינרת – עקרונות לשמירת יציבות הידרולוגית

9 בדצמבר, 2017

גיליון חורף 2017 / כרך 8(4) / ניהול משק המים

[סקירות](#)

תקציר

אגן ההיקוות של הכינרת ("האגן") היה עד לפני שנים ספורות ספק מים עיקרי למערכת הארצית, ומצב המים בו נמדד באופן רציף וסדיר במשך עשרות שנים (גשם, התאדות, ספיקת מעיינות וזרימה בנחלים, מפלסי מי תהום, מפלסי מאגרים וצריכה מקומית). מדידות אלה מאפשרות לבחון בפירוט את מצב המים באגן, שנמצא בימים אלה בגירעון המים הגדול ביותר מאז החלו המדידות. בשנים 1976–2009 זרמו מהאגן לכינרת כ-630 מיליון מ"ק לשנה (מלמ"ש), ואילו בשנים 2009–2016 נכנסו לכינרת רק כ-500 מלמ"ש. מטרת המאמר הנוכחי היא לבחון את מאזן המים השנתי של אגן הכינרת, וכן להציג את הדרכים להערכה ולכימות של מאזן כזה בעבר, בהווה ובתחזיות לעתיד דרך סקירת הנתונים הקיימים. בשנים האחרונות אנו עדים להפחתה מסוימת בכמות הגשם על האגן, ולהפחתה בזרימה לכינרת כתוצאה מכך. למרות זאת הורחבה שאיבת מי התהום באגן בכ-30 מלמ"ש, ומגמה זו נמצאת במגמת עלייה בימים אלה. יש המצדיקים את הרחבת השאיבה הזו בטענה בעייתית כי מי תהום המופקים מבארות עמוקות מוסיפים (ולא גורעים – כמתבקש לפי משוואת מאזן מים פשוטה) לכמות המים הטבעיים באגן. חישוב רב-שנתי המבוסס על מגמות בזמן של מים זמינים בכינרת ועל הגדלת שאיבת מי התהום באגן ההיקוות, מראה כי כמויות המים באגן פוחתות בקביעות בשיעור ממוצע של כ-8 מלמ"ש. המשך המגמה הנוכחית יביא בעוד כ-15 שנים בלבד להפחתת כמות המים

הזמינים בכ-120 מל"ש נוספים, והיא תעמוד אז על כ-150 מל"ש בלבד. במקרה כזה, אם נניח שאיבת מים מינימלית הכרחית של אותם 150 מל"ש מן האגם עצמו (הפחתה ניכרת לעומת 440 מל"ש בשנים 1976–2009), ברור כי זהו מצב של תחילת גירעון קבוע במאזן המים של הכינרת, ותחילת תהליך רב-שנתי של ייבוש האגם.

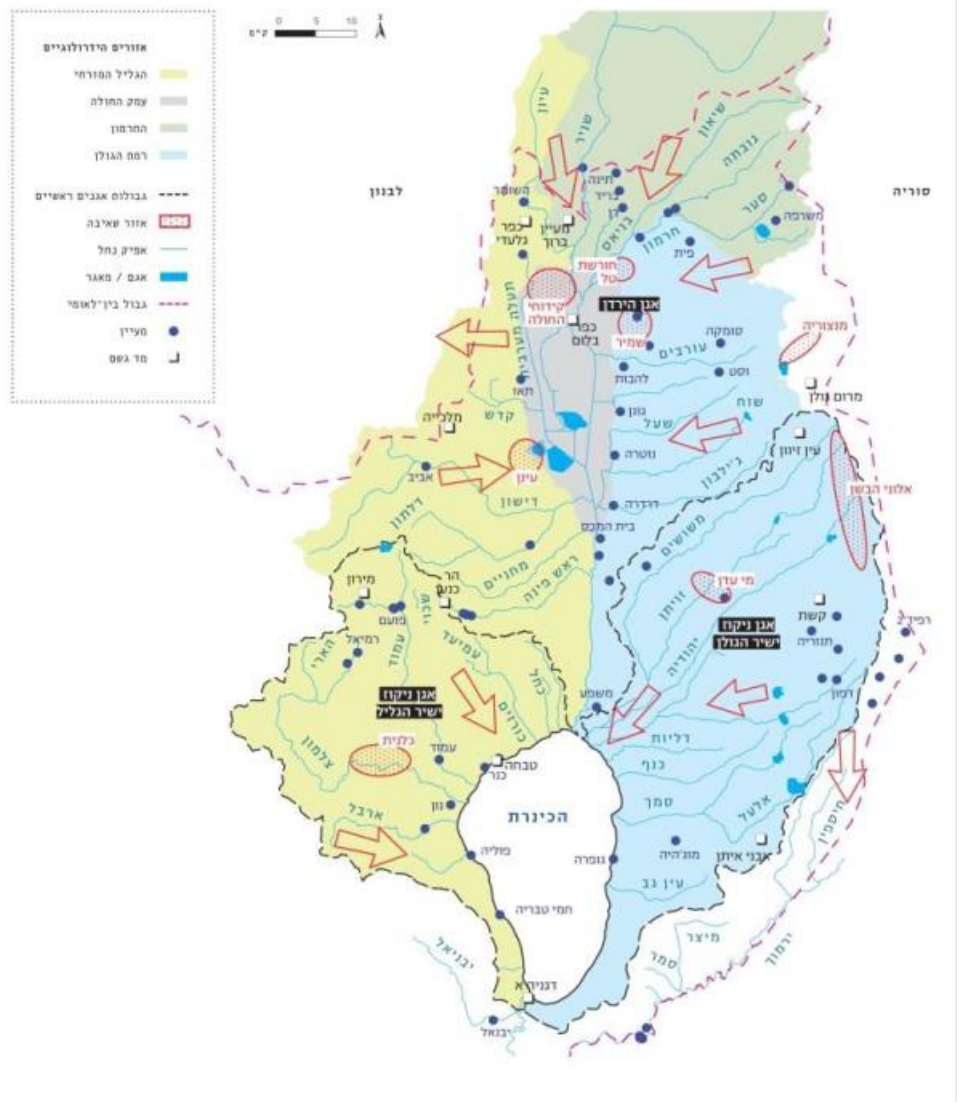
"חיזוי הוא עניין מסובך מאוד, בעיקר בכל הקשור לעתיד" – הפיזיקאי נילס בוהר

הקדמה

החל בשנת 2005 החלה בהדרגה פעולתם של מתקני ההתפלה הגדולים על חוף הים התיכון. בשנים הבאות יספקו מתקני ההתפלה כ-600 מיליון מ"ק לשנה (מל"ש) למערכת המים הארצית, שכמעט שאינה מוגבלת כיום באספקת מים. עם זאת, באזורים נרחבים בצפון (הגליל, הגולן, עמק כנרות, בקעת בית שאן) אספקת המים נשענת על מקורות מים מן הטבע, שכמותם הולכת ופוחתת בהדרגה. אגן ההיקוות של הכינרת (להלן "האגן") היה עד לפני שנים ספורות ספק מים עיקרי למערכת הארצית. ככזה, מצב המים באגן נמדד באופן רציף וסדיר במשך עשרות שנים (גשם, התאדות, ספיקת מעיינות וזרימה בנחלים, מפלסי מי תהום, מפלסי מאגרים, וצריכה מקומית). מדידות אלה מאפשרות לבחון בפירוט את מצב המים באגן, שנמצא בימים אלה בגירעון המים הגדול ביותר מאז החלו המדידות.

שטח האגן הוא 2,730 קמ"ר, ומתוכם שטח האגם 165 קמ"ר. מקור המים העיקרי של הכינרת הוא אגן הירדן העליון, ששטחו כ-1,600 קמ"ר (920 קמ"ר בשטח ישראל). החלק המשלים הוא אגן הניקוז הישיר, הכולל את השטח המנקז לכינרת כמה עשרות נחלים ששטחם 577 קמ"ר בחלק הדרומי של רמת הגולן מצפון-מזרח לאגם, ו-388 קמ"ר בהרי הגליל המזרחי (איור 1).

איור 1. המערכת ההידרולוגית של אגן ההיקוות של הכינרת, בחלוקה לאגני משנה: החרמון, רמת הגולן, הגליל המזרחי, ועמק החולה. המפה כוללת אפיקי נחלים, מעיינות ראשיים, מאגרים, תחנות נבחרות למדידת גשם ואזורי שאיבת מי תהום. החיצים מתארים כיווני זרימה משוערים של מי תהום ברחבי האגן.



איור 1

המערכת ההידרולוגית של אגן ההיקוות של הכינרת, בחלוקה לאגני משנה: החרמון, רמת הגולן, הגליל המזרחי, ועמק החולה

המפה כוללת אפיקי נחלים, מעיינות ראשיים, מאגרים, תחנות נבחרות למדידת גשם ואזורי שאיבת מי תהום. החיצים מתארים כיווני זרימה משוערים של מי תהום ברחבי האגן.

בשנים 1976–2009 סיפק האגן בממוצע 811 מל"ש^[29] (זה נפח המים המוערך לניצול שנתי ברחבי האגן כולו), ש-634 מל"ש מהם נכנסו לכינרת (טבלה 1). הנפח הנוותר, 182 מל"ש, נצרך במעלה אגן ההיקוות בשאיבה ממקורות מים עיליים בישראל (98 מל"ש) ובלבנון (20 מל"ש). בשאיבת מי תהום בגליל המזרחי, בגולן ובעמק החולה (49 מל"ש) ובהטיית מים מלוחים למוביל המלוח (15 מל"ש). שלא כמו ממוצעים אלה, מנתוני מאזני המים לשנים 2009–2016 עולה כי בשנים אלה נכנסו לכינרת רק 500 מל"ש^[13] (טבלה 1). בהפחתת 240 מל"ש התאדות שנתיים מתקבלים כ-260 מל"ש מים זמינים בלבד. בשנים 2009–2011 נצרכו בשאיבה ממקורות מים עיליים בחלק הישראלי של האגן רק כ-70 מל"ש כתוצאה ממדיניות קיצוצים של רשות המים, אך בשנים האחרונות שאיבה זו חוזרת להיות גדולה מ-90 מל"ש, כפי שהיה בעבר. שאיבת מי התהום באגן ההיקוות של הכינרת גוברת באופן קבוע, וב-20 השנים האחרונות עלתה מכ-55 לכ-85 מל"ש^[7].

טבלה 1. כניסת מים מאגן ההיקוות לכינרת בשנים 1976–2009 [92]
לעומת 2009–2016

מקור מים לכינרת	2009–1976 [29]	2016–2009 [13]
הירדן הצפוני	434	334
נגר עילי מאגן הניקוז הישיר	70	43
שפיעת מעיינות והעשרה	60	60
גשם ישיר על האגם	70	63
סך הכול	634	500

טבלה 1
כניסת מים מאגן ההיקוות לכינרת בשנים 1976–2009 [29] לעומת 2009–2016

בעקבות ההפחתה בגשמים וגידול הצריכה בשנים האחרונות חלה ירידה בכמות המים באגן, וכמובן גם ירידה גדולה (למעלה מ-100 מלמ"ש) בכמות המים המתנקזת לכינרת. למרות זאת, דו"ח מפורט העוסק בהערכת כמויות המים הנמנעות מהכינרת עקב שימושי האדם [14] קובע שניצול המים במעלה אגן ההיקוות של הכינרת דווקא הולך וקטן עם השנים, ודו"ח אחר [4] מציע ששאיבה מאקוות עמוקות באצבע הגליל ובצפון רמת הגולן עשויה **להוסיף מים** למערכת הארצית, מאחר שהן אינן חלק ממאזן המים הידוע עד כה באגן ההיקוות של הכינרת.

מטרת המאמר הנוכחי היא לבחון את מאזן המים האגני השנתי עבור אגן ההיקוות של הכינרת (לא כולל מאזני המים של האגם עצמו) דרך סקירת הנתונים. נציג כאן חישוב כללי של המאזן בעבר ובהווה ותחזיות לעתיד. נסביר מדוע המשך המגמה הנוכחית של הרחבת שאיבות מי התהום יוביל בתוך מספר שנים למאזן מים שלילי באגם (כניסת המים השנתית קטנה מיציאת המים) ולנסיגה קבועה במפלס הכינרת.



מפל התנור בשמורת נחל עיון. הטיית מקורות הנחל בלבנון גורמת להתייבשות המפל מדי קיץ לאורך עשרות שנים. מים הנשאבים מנחל דן אפשרו שיקום של המערכת האקולוגית של הנחל / צילום: ורנר אקרט

גיאוגרפיה ונתונים הידרולוגיים

אגן ההיקוות של הכינרת כולל ארבע יחידות הידרולוגיות הנבדלות זו מזו בכמות המשקעים, ביחסי גשם-נגר, ובצריכת המים המקומית (איור 1): (1) קרסט היורה של הר חרמון; (2) בזלת רמת הגולן; (3) קרסט הקנומן-טורון של הרי הגליל המזרחי; (4) אדמות הסחף של עמק החולה.

רכס החרמון

שטחו כ-783 קמ"ר. בנוי משכבת אבן גיר קרסטית שעובייה מעל 2,000 מטר. הגשם והשלג (מעל 1,300 מ"מ בממוצע שנתי) מזינים את שלושת מקורות המים הראשיים של הירדן – הנחלים דן, שניר וחרמון ^[24,5] – שתורמים בממוצע רב-שנתי (1979–2007) 116,250 ו-116 מלמ"ש, בהתאמה. כמויות המים שנמדדו ב-10 השנים האחרונות נמוכות בהרבה, 170 בדן, 62 בשניר ו-93 מלמ"ש בחרמון, כ-67% בלבד מהכמות ב-1979–2007.

רמת הגולן

שטחה כ-1,160 קמ"ר. משתפלת מרום 1,200 מטר מעל פני הים בקצה הצפוני (מגדל שמש), עד רום של 350 מטר בקצה הדרומי (מבוא חמה). ממוצע המשקעים השנתי נע בין 1,200 מ"מ בצפון עד פחות מ-500 מ"מ בדרום. מבחינה הידרולוגית לרמה שלושה חלקים: (1) אזור צפוני (כ-350 קמ"ר) בין נחל סער-חרמון לנחל גילבון ([איור 1](#)) המתנקז לנהר הירדן. תרומת המים העיקרית של אזור זה היא שפיעת "מעיינות הדופן" ^[6] (כ-30 מלמ"ש), עם תוספת מים המגיעים לירדן בנגר עילי. (2) אזור דרומי (כ-577 קמ"ר) בין נחל משושים בצפון לנהר הירמון בדרום, המתנקז ברובו ישירות לכינרת דרך נחלי הגולן (משושים: 24 מלמ"ש, יהודיה: 17 מלמ"ש, דליות: 13 מלמ"ש, סמך: 6.7 מלמ"ש). (3) השטח הנותר מתנקז מזרחה ודרומה, אל נהרות הרוקאד והירמון שמחוץ לאגן ההיקוות של הכינרת.

הגליל המזרחי

שטחו כ-445 קמ"ר. הנחלים העיקריים התורמים מים לירדן הם עיון ודישון, שתורמים ביחד כ-10.5 מלמ"ש, ואחרים המתנקזים ישירות לכינרת: נחל עמוד (כ-1.0 מלמ"ש), צלמון וארבל. מקורות מי התהום העיקריים באזור הם מעיינות עין, בדרום מערב עמק החולה, ומעיין תאו, כ-5 ק"מ צפונית לעינן. לפני 1960 מעיין עינן היה מקור המים העיקרי ממערב לירדן, כ-20 מלמ"ש ^[15], ומעיין התאו תרם כ-4.5 מלמ"ש ^[11]. משנת 1962 גרם ניצול מוגבר של האקווה בבארות עינן לירידה בשפיעת המעינות. כיום התרומה השנתית של כל מעיינות הגליל המזרחי היא רק 6 מלמ"ש.

עמק החולה

שטחו כ-177 קמ"ר. מנקז נגר עילי ומי תהום מהאקוות בחרמון בצפון, בגליל העליון ממערב וברמת הגולן ממזרח ^[1,21,23]. כמות המשקעים השנתית בעמק משתנה בין 400 מ"מ בדרום ל-700 מ"מ בצפון. הנחלים דן, חרמון ושניר מתחברים ליד שדה נחמיה ליצירת נהר הירדן, החוצה את העמק לאורך 21 ק"מ מצפון לדרום. תרומת העמק לנגר עילי ולזרימה בירדן נחשבת זניחה. כמות מים גדולה יחסית נצרכת בעמק לחקלאות ולשימור ערכי טבע (האגמון ושמורת החולה).



קידוח שמיר. מים בטמפרטורה של 47 מעלות צלזיוס פורצים מקידוח ארטזי (שאינו מצריך שאיבה). הקידוח נעשה לעומק של 1,400 מטר אל תוך שכבות מתקופת היורה / צילום: ורנר אקרט

מאזן מים אגני

נסח משוואה כללית של מאזן מים אגני. בהמשך נבחן כיצד מצבים שונים באים לידי ביטוי במשוואה כזו:

$$\Delta S / \Delta t = [R - E(S_1)] - [Q(S_1, S_2) + P] + Q_B$$

צד שמאל של המשוואה מציין את שינוי כמות המים באגן $\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2$ על פני פרק זמן נתון Δt (יחידות נפח לשטח; ΔS_1 כמות בפני הקרקע ו- ΔS_2 מי תהום). בצד ימין (נפח לשטח לזמן), נמצאים R , כמות הגשם על האגן; E , שיעור ההתאדות הממשית; Q , סכום כמויות המים המתנקזות לכינרת במוצא התחתון של האגן (מים עיליים + מי תהום); P , המבטא את כמות המים הנשאבת בתחום האגן; ו- Q_B המציין מעבר מי תהום (האגן מוגדר גיאוגרפית כך שמים עיליים אינם יכולים לעבור מאגן לאגן) לאגנים שכנים שאינם אגם הכינרת (חיובי או שלילי). באגן שנמצא במצב יציב מבחינת כמויות המים שבו, נמצא כי $\Delta S = 0$, באגן שחוזה התייבשות $\Delta S < 0$, ובהרטה $\Delta S > 0$ במשך הזמן, וכך גם סכום האיברים בצד ימין של המשוואה, בהתאמה. באנלוגיה, ניתן להתייחס למשוואה כאילו היא מתארת חשבון בנק של עובד שכיר, כאשר ΔS שינוי כמות הכסף בחשבון; R המשכורת הנכנסת; E מיסים; Q הוצאות קבועות (תלויות בכמות הכסף בבנק); P הוצאות נוספות (בלתי תלויות); Q_B העברות קבועות לחשבון וממנו.

נבחן להלן את המאזן ההידרולוגי במספר תהליכים אפשריים בהנחה שהמצב ההתחלתי של המערכת קבוע ויציב (גשם, התאדות, שאיבה וכמות המים באגן).

- **רצף של שנים יבשות מהממוצע (R קטן), השאיבה בתחום האגן (P) נשארת קבועה:** במקרה כזה התוצאה תהיה ירידה בכמות המים באגן $\Delta(S_1 + S_2) < 0$ (בהתאדות $E(S_1)$ ובכמות המים $Q(S_1, S_2)$ שזורמת לאגן. לאחר מספר שנים שחונות תגיע המערכת האגנית למצב יציב חדש שבו מפלס מי התהום (S_2), ההתאדות (E) והספיקה המתנקזת לאגן (Q) קטנים יותר מהמצב הקבוע ההתחלתי. באנלוגיה לעיל, זה יהיה מצב חשבון הבנק של השכיר שלנו אם תהיה ירידה במשכורתו.
- **יציבות בכמות הגשם השנתית וגידול בכמות המים הנשאבת (P) לצורכי חקלאות ממקורות מים עיליים (נחלים ומאגרים עונתיים מלאכותיים):** במקרה כזה הגידול ב- P שווה מיידית להפחתה בספיקה המתנקזת (Q),

כי המים שנשאבים להשקיה אינם זורמים בנחלים. נוסף על כך, כמות המים בפני שטח האגן (S_1) תפחת בעיקר בגלל הגדלת השטח החקלאי המאדה בקיץ. באקולוגיה, זה יהיה מצב חשבון הבנק של השכיר שלנו אם יגדיל את ההוצאות הנוספות במזומן.

- **יציבות בכמות הגשם השנתית וגידול בכמות המים הנשאבת (P) לצורכי חקלאות ממקורות מים תת-קרקעיים:** כמו במקרה הקודם, תחול הגברה בהתאדות מהשטחים החקלאיים אולם ההפחתה המיידית ב-Q תהיה קטנה באופן משמעותי מכמות המים הנשאבים, ותגדל בהדרגה עד הערך P רק לאחר מספר שנים. מצב זה אנלוגי להגדלת ההוצאות על ידי לקיחת אשראי לשנים רבות לעתיד לבוא. **להפקת מי תהום יתרון פרקטי על פני הפקת מים עיליים, מאחר שההשפעה הסביבתית של ההפקה על כמויות המים הטבעיים מתאחרת, לעיתים בסדר גודל של מספר שנים, אך ברור שהיא תפחית עם הזמן את כמות המים באגן.**
- **יציבות בכמות הגשם השנתית ותוספת בכמות המים הנשאבת ממי תהום (P) המופנית ישירות לנחלים לצורך הגדלה מיידית של הספיקה המתנקזת לאגן (Q) ללא שימוש חקלאי:** במקרה כזה Q גדל באופן מידי ללא שינוי משמעותי בהתאדות בפני הקרקע, אולם על פני פרק זמן ארוך תחול הפחתה בכמות מי התהום באגן (S_2) בשיעור המשתווה לתוספת השאיבה (P). מצב זה אנלוגי לחוסר במזומנים לצורך הוצאות שוטפות חיוניות, שבגינו השכיר לוקח כסף באשראי לטווח ארוך.

המשך ניחוס כל אחד מהתהליכים האלה (א-ד) להידרולוגיה של אגן ההיקוות של הכינרת.

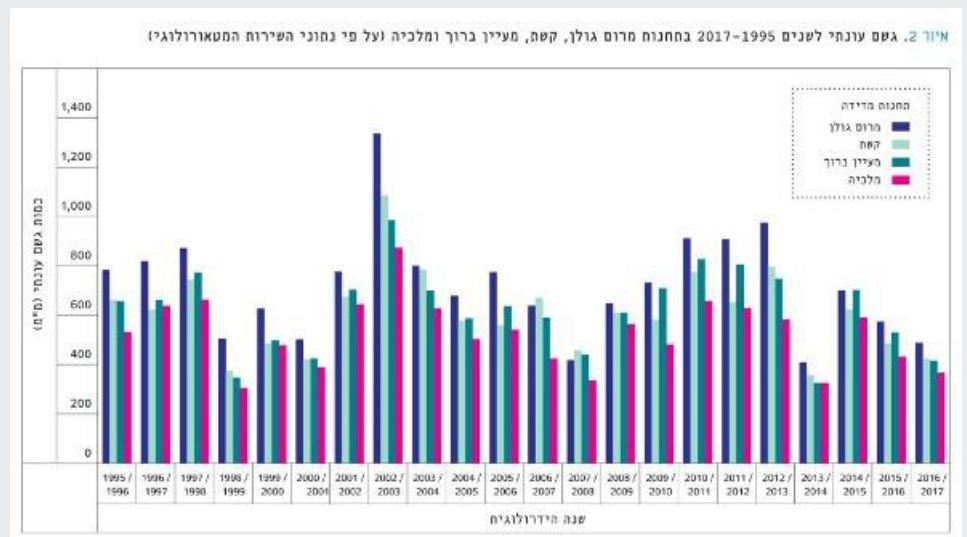
תוני גשם – בחינת תהליך א

במסמך של רשות המים ^[17] נכתב כי "בשנים האחרונות ניכרת מגמה של ירידה בהיצע המים הטבעיים בישראל, ומגמה זו נובעת מ-(א) הפחתה בכמות המשקעים וב(ב) שינוי משמעותי בפירוס אירועי הגשם ובעוצמתם". שתי טענות אלה נועדו להסביר גם את תקופת היובש הנוכחית (2014–2017) המתאפיינת במיעוט זרימה בנחלים ובהפחתה בהעשרת מי תהום.

עניין (א) מצוי במחלוקת מסוימת. דו"ח השירות המטאורולוגי ^[8] שמסקנותיו מבוססות על נתונים משנת 1921 (!) ועד 2014 קובע שלא נמצאה מגמת שינוי בכמות המשקעים בישראל, ובאזור הגליל העליון ועמק הירדן בפרט. עם זאת, בשל השונות הגבוהה של סדרת הגשם השנתית בישראל, הוצע ^[22] שיש מגמת הפחתת גשמים שאיננה מובהקת סטטיסטית, בשיעור קטן מ-2.5 מ"מ לשנה.

על פי הטענות ל-(ב) ניתן להבחין כי יש פחות ימי גשם בעונה, מספר הימים היבשים גדל, אך עוצמת אירועי הגשם גבוהה יותר מבעבר. לפיכך, השתנו מאפייני מחזורי ההרטבה והייבוש של הקרקע, ויותר מי גשם מתאדים על חשבון זרימה פוחתת בנחלים וירידה בהעשרת האקוות. כדי לתת תוקף מדעי לטענה זו יש להוכיח כי: א. השינויים במופע הגשם (ימים ופריסה) הם אכן בכיוון שצוין לעיל; ב. נוסף על כך, הייתה הפחתה בזרימה בנחלים ובהעשרת מי תהום. במחקר היחיד שבחן את שני השלבים באמצעות מודל הידרולוגי של אגן החרמון ^[26], לא נמצאו הוכחות לכך ששינוי קטן ומובהק סטטיסטית במופע הגשם בלבד (ללא שינוי בכמות) אכן משנה במידה מובהקת את הזרימה בנחלים ואת עוצמת ההעשרה.

חזור לעניין הפחתה בכמות הגשם. בדו"ח מחקר ^[9] קובעים המחברים כי במזרח הגולן אכן נמצאה מגמת הפחתה מובהקת בגשמים בין השנים 1975–2010. הפחתה בגשם באגן נמצאה ב-40 שנות מדידה (1970–2011) ^[3] בשיעור של כ-2.7, 3.8 ו-2 מ"מ לשנה בתחנות מדידת הגשם במרום גולן, בכפר גלעדי ובמירון, בהתאמה. קצב הפחתה דומה בגשמים ב-20 השנים האחרונות (1995–2016, כ-2 מ"מ לשנה) מייצג את ממוצע התחנות מרום גולן, קשת (במרכז רמת הגולן), מעיין ברוך ומלכיה ^(איוור 2). הסטטיסטיקה ארוכת הטווח של מספר תחנות מדידת גשם בצפון רמת הגולן, בגליל המזרחי ובעמק החולה משקפת היטב גם את מצב המשקעים על החרמון ^[20, 25, 27, 30].



איור 2

גשם עונתי לשנים 1995–2017 בתחנות מרום גולן, קשת, מעיין ברוך ומלכיה (על פי נתוני השירות המטאורולוגי)

למרות מגמת ההפחתה הכללית בגשמים, מן הראוי לשים לב להשוואה בין שני רצפים של שש שנים: 1995–2001 לעומת 2010–2016 (טבלה 2). שני הרצפים התאפיינו בשלוש שנים ברוכות גשמים שלאחריהן שלוש שנים שחונות. ממוצע הגשם של הרצף השני גבוה מזה של הראשון, הן בשנים ברוכות הגשמים הן בשנים השחונות. לעומת זאת, כמות המים הזמינים (כניסת מים לכינרת [Q], פחות התאדות מהאגם [ראו איור 3 אצל גבעתי וטל בגליון זה]) בשנים השחונות בין 2013 ל-2016 נמוכה ב-56 מלמ"ק מזו של 1998–2001 (טבלה 2). במילים אחרות – **משבר המים בשנים 2014–2016, כפי שבא לידי ביטוי בכמות מים זמינים נמוכה ביותר בכינרת, גדול בהרבה מזה של סוף שנות ה-90, אף על פי שכמות הגשמים בשנים האחרונות הייתה גדולה יותר**. ממצא זה אינו עולה בקנה אחד עם שתי הטענות שלעיל – ירידה בכמות הגשם ושינוי מופע הגשם, וסביר יותר להניח שגורמים נוספים הביאו להפחתת כמות המים באגן ולירידה בכמות המים הזמינים.

טבלה 2. ממוצעי גשם עונתי בארבע תחנות מייצגות (על פי נתוני השירות המטאורולוגי), ומים זמינים בכינרת (כניסת מים פחות התאדות) עבור שני רצפים של שש שנים שהתאפיינו בשלוש שנים ברוכות גשמים שלאחריהן שלוש שנים שחונות: 1995–2001 לעומת 2010–2016 [13]

שנים	מים זמינים (מלמ"ק)	ממוצע גשם (מ"מ)	קשת (מ"מ)	מלכיה (מ"מ)	מרום גולן (מ"מ)	מעין ברוך (מ"מ)
1998–1995	415	705	679	613	828	700
2001–1998	140	448	429	392	547	424
2013–2010	440	776	745	626	936	797
2016–2013	84	506	490	451	563	521

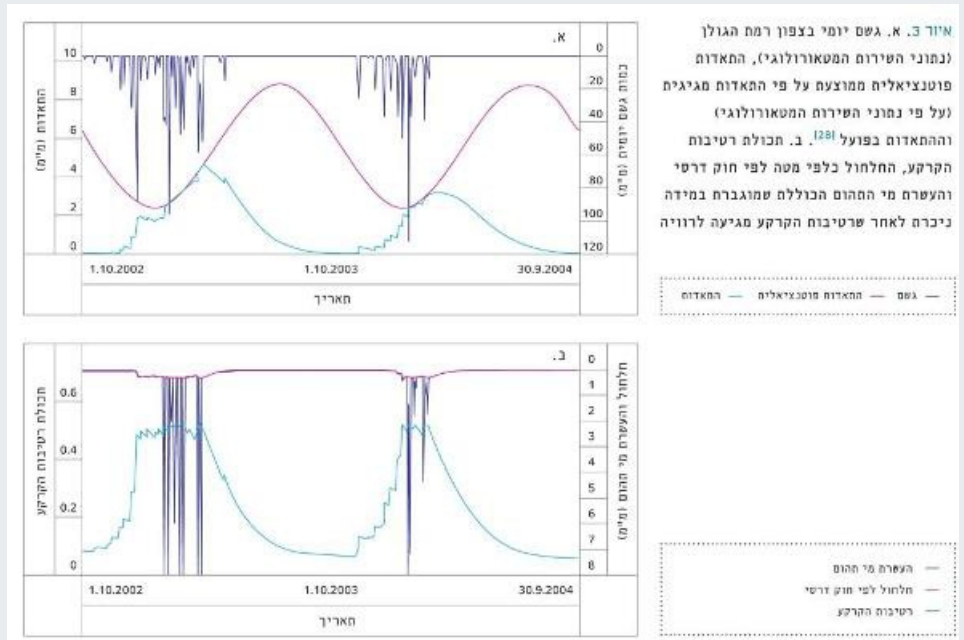
טבלה 2

ממוצעי גשם עונתי בארבע תחנות מייצגות (על פי נתוני השירות המטאורולוגי), ומים זמינים בכינרת (כניסת מים פחות התאדות) עבור שני רצפים של שש שנים שהתאפיינו בשלוש שנים ברוכות גשמים שלאחריהן שלוש שנים שחונות: 1995–2001 לעומת 2010–2016 [13]

התאדות, חלחול ושינוי כמות המים בפני הקרקע – בחינת תהליכים ב-ו-ג

השפעת ההתאדות על כמות המים באגן תיבחן דרך ניתוח התהליכים הטבעיים בפני הקרקע במהלך שתי עונות גשמים עוקבות – האחת גשומה מאוד (2002/03; כ-1,150 מ"מ בצפון הגולן) והשנייה גשומה פחות (2003/04; כ-690 מ"מ בצפון הגולן). לצורך זה השתמשנו במודל מתימטי-הידרולוגי יומי [24, 2] שמדמה את התנהגות שכבת הקרקע העליונה כתוצאה מגשם

ומתנאים אטמוספיריים. המודל מחשב את שינויי הרטיבות של שכבת הקרקע העליונה, האידוי מפני הקרקע, חלחול למי תהום וזרימת נגר עילי. המשקעים חודרים לשכבת פני הקרקע העליונה ומעלים בה את תכולת הרטיבות. ההתאדות מפני הקרקע תלויה בתנאים אטמוספיריים הבאים לידי ביטוי במושג "התאדות פוטנציאלית" (התאדות מפני שטח רווי במים, [איור 3](#)) ובתכולת הרטיבות ^[28] של פני הקרקע. החלחול למי התהום גדל ככל שתכולת רטיבות שכבת הקרקע העליונה גדלה. אחרי ירידה של 230–300 מ"מ גשם ^[18] או של 400 מ"מ בנחלי החרמון ^[26], כאשר פרופיל הקרקע העליונה רווי, אין למים אפשרות להיספג בשכבת הקרקע העליונה, ונוצרים שני אפיקי ניקוז: 1. זרימת נגר עילי שגורמת לגאות בנחלים; 2. העשרה מהירה של מי התהום במנגנון שנקרא "זרימה מעדיפה" (preferential flow). מנגנון זה מאופיין בכך שבקרקע רוויה, סדקים גדולים בסביבה בזלתית (הגולן) או סביבה קרסטית (החרמון והגליל המזרחי), מתמלאים במים המחלחלים במהירות למי התהום.



איור 3

א. גשם יומי בצפון רמת הגולן (נתוני השירות המטאורולוגי), התאדות פוטנציאלית ממוצעת על פי התאדות מגיגית (על פי נתוני השירות המטאורולוגי) וההתאדות בפועל ^[28]. ב. תכולת רטיבות הקרקע, החלחול כלפי מטה לפי חוק דרסי והעשרת מי התהום הכוללת שמוגברת במידה ניכרת לאחר שרטיבות הקרקע מגיעה לרוויה

התוצאות המוצגות ב**טבלה 3** וב**איור 3** עבור רמת הגולן מראות את החלחול למי תהום ואת ההתאדות בפועל בשנת 2002/03 הגשומה (כ-579 מ"מ, 50% מהגשם) ובשנת 2003/04 הגשומה פחות (כ-424 מ"מ, 61% מכמות הגשם). ניתוח 30 עונות גשם (1975–2005) הביא לתוצאות הממוצעות הבאות (באחוזים): התאדות – 74 ± 10 ; העשרה למי תהום – 8 ± 2 ; נגר עילי – 18 ± 10 (השוו ל-70, 10 ו-20 בהתאמה שנמצאו במחקר אחר ^[19]).

המשמעות של שאיבה לצורכי חקלאות (תהליך ב או ג לעיל) היא גריעת מים מהנחלים או ממי התהום לצורך הגדלת השטח המושקה בקיץ. בשטחים חקלאיים מושקים מתקרבת **ההתאדות בקיץ בפועל** לערכי ההתאדות הפוטנציאלית ([איור 3](#), לפעמים מעל 6 מ"מ ליום), ובכך מגדילה את גירעון המים של האגן.

טבלה 3. גשם ותוצאות מודל של שכבת הקרקע העליונה - חלחול לפי חוק דרסי, העשרת מי תהום, התאדות פוטנציאלית והתאדות בפועל בשנת 2002/03 הגשומה ובשנת 2003/04 הגשומה פחות

שנה הידרולוגית	גשם (מ"מ)	חלחול לפי דרסי (מ"מ)	העשרת מי תהום (מ"מ)	התאדות פוטנציאלית (מ"מ)	התאדות בפועל (מ"מ)
2002/03	1,154	32	142	1,994	579
2003/04	690	20	70	1,994	424

טבלה 3

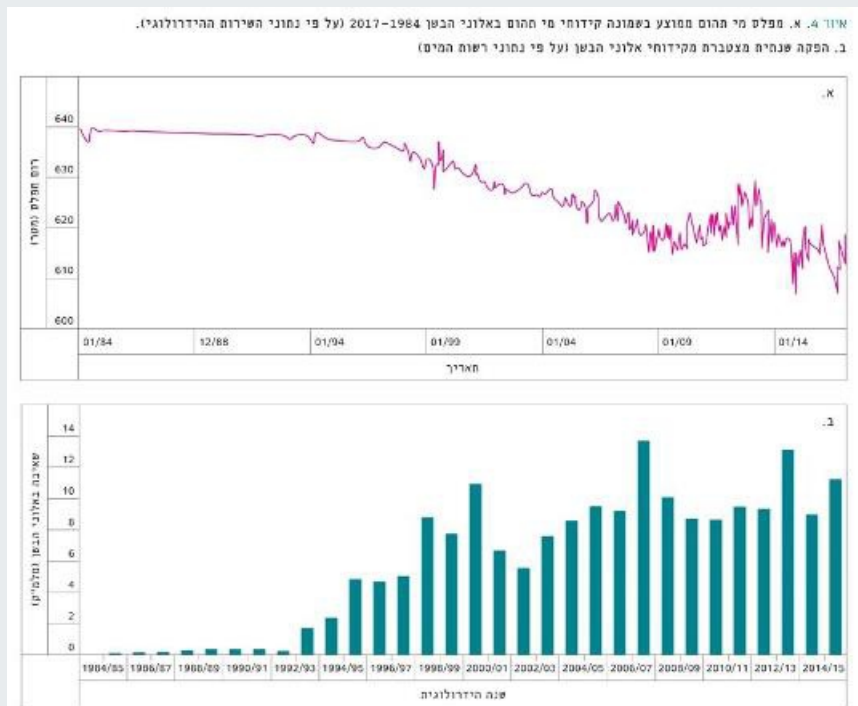
גשם ותוצאות מודל של שכבת הקרקע העליונה - חלחול לפי חוק דרסי, העשרת מי תהום, התאדות פוטנציאלית והתאדות בפועל בשנת 2002/03 הגשומה ובשנת 2003/04 הגשומה פחות

שפיעת מעיינות, הפקה ומפלסי מי התהום – בחינת תהליכים ג-ו-ד

חישוב והבנה של יחסים הידרולוגיים ארוכי טווח בין העשרת מי תהום מגשם, שפיעת מעיינות, הפקת מי תהום ושינוי מפלסי מי תהום מדוידים הם חיוניים לאמידת כמות המים בתת-הקרקע.

עד שנת 1993 בערך היה קיים סטטוס קוו בניצול מי תהום באגן הכינרת. עיקר ההפקה ממי תהום נעשתה בקידוחי עינן (כ-20 מל"ש) ובקידוחי חזון וצומת גולני בגליל המזרחי (כ-20 מל"ש). הגברת השאיבה בקידוחי אלוני הבשן החלה ב-1993 (תהליך ג), מפחיתה כ-10 מל"ש ממאגר מי התהום. ב-2003 החלו לזרום מים כלואים (ארטזיים) מקידוח שמיר הראשון לאפיק הירדן (תהליך ד), ומשנת 2010 ועד 2012 בוצעו באזור שני קידוחים נוספים לאותה אקווה, שמזרימים את המים לגולן לשימוש חקלאי, ובעתיד הקרוב מתוכננת שם הפקה של כ-20 מל"ש נוספים (תהליך ג). מ-2006/07 החל בהדרגה תהליך של העשרת הזרימה בירדן מקידוחים עמוקים בצפון עמק החולה בשיעור של כ-20 מל"ש (תהליך ד), וסביר שמים אלה ייתפסו בעתיד הקרוב לצורך אספקת מים לחקלאות ולצריכה ביתית. השאיבה מקידוחי החולה עלתה ב-6 מל"ש החל בשנת 2008/09. בשנים האחרונות מתרחבת שאיבת מי התהום בגולן, שעתידה להגדיל במידה רבה את ניצול אקוות הבולת (תהליך ג).

נבחן את ההתאמה בין מועד הפקת מי התהום בבארות אלוני הבשן מאקוות הבולת במזרח הרמה לירידת המפלסים שם. מפלס קידוחי אלוני הבשן החל לרדת ב-1994 בד בבד עם הגברת השאיבה ל-10 מל"ש (איור 4). מאז 1994 ועד היום ירד מפלס מי התהום באלוני הבשן בכ-30 מטר. המפלס שנמדד באזור מי עדן במורד האקווה (איור 1) נמצא בירידה מתמשכת מאז תחילת המדידות ב-2004, בעיקר בגלל ירידת המפלס במעלה האקווה, באזור אלוני הבשן (גם במחקרים אחרים [6,12]). חיזוק להשערה זו ניתן למצוא במודל הידרוגיאולוגי [6], המראה כיצד משפיעה שאיבה במהלך עשר שנים באלוני הבשן על הירידה במפלסים באזור מי עדן.



איור 4

א. מפלס מי תהום ממוצע בשמונה קידוחי מי תהום באלוני הבשן 1984–2017(על פי נתוני השירות ההידרולוגי).
ב. הפקה שנתיית מצטברת מקידוחי אלוני הבשן (על פי נתוני רשות המים)

באזור אחר של האגן, בגליל המזרחי, הוגברה בעשור האחרון השאיבה מן האקווה המתנקזת לעבר המעיינות במערב הכינרת.

מודל מי תהום מפורט בזמן ובמרחב, הכולל את הגליל המזרחי ("מודל כלנית"^[10]), מראה כי הגדלת ההפקה תפחית את שפיעת המים במעיינות מערב הכינרת בהתאמה לכמות השאיבה שתתבצע בשנים הבאות. משך השינוי עד למצב יציב חדש הוא כ-30 שנה.

סיכום שאיבת מי התהום מהאגן משנת 2014 מראה עלייה של לפחות 30 מל"ש לעומת אמצע שנות ה-90^[7]. למרות מצב המים באגן ההיקוות מואצת בימים אלה מגמת העלייה בתנופה רבה.

דיון

עיקרון בסיסי של ניהול משאבי מים טבעיים הוא שמירה על יציבות הידרולוגית באגן. אם אנו מעוניינים בשמירה על אגן הכינרת ועל אגם הכינרת לטווח הארוך, ניצול המים באגן ההיקוות חייב לציית לכלל בסיסי של הפקה בהתאם למצאי המים הטבעיים. בשנים האחרונות אנו עדים להפחתה מסוימת בכמות הגשם על האגן. והנה, למרות שינויים אלה, המביאים לירידה בכמויות המים, הורחבה שאיבת מי התהום בכ-30 מל"ש, ומגמת ההפקה של מים נוספים לחקלאות וניצולם נמצאת **בעלייה, בניגוד להיגיון המנחה של שמירת יציבות הידרולוגית**. יש המצדיקים את הרחבת השאיבה הזו בטענה בעייתית כי מי תהום המופקים מבארות עמוקות דווקא מוסיפים (ולא גורעים – כמתבקש לפי משוואת מאזן המים 1 לעיל) לכמות המים הטבעיים באגן^[6]! יתרה מכך, על פי מודל מי תהום מרחבי חדש המתאר את תהליכי הזרימה אל עמק החולה וממנו^[1], יש למערכת זרימת מי התהום העמוקים בעמק החולה מוצא זרימה עיקרי מערבה אל עבר צפון רכס הרי נפתלי, שמשמעותו מים שיוצאים מתחום האגן לכיוון לבנון. אפשרות כזו היא יוצאת דופן במערכת ההידרולוגית הידועה לנו, שכן היא מבוססת על טענה שאיננה מוכחת, שלפיה כמות גדולה של מי תהום (40 מל"ש?) יוצאת מהאגן שלא דרך הזרימה לכינרת (Q_B לפי משוואה 1). על בסיס השערה זו ישנן כבר תוכניות הפקה נוספות, שנועדו לנצל את כמויות המים ש"הולכים לאיבוד"^[4], ולהרחיב עוד את שאיבת מי התהום מן האגן. למיטב הבנתי, יש לבדוק היטב את ההשערה **לפני** שמביאים אותה כבסיס תיאורטי לתוכניות הפקה.

בהסתמך על ההיסטוריה של המים הזמינים בכינרת, על מגמת ההפחתה בגשמים ועל הניצול המתגבר של מים במעלה אגן ההיקוות, ניתוח רב-שנתי מראה כי כמות המים הזמינים לכינרת תמשיך לפחות בשיעור ממוצע של כ-8 מל"ש ([ראו איור 3](#) **אצל גבעתי וטל בגיליון זה**). במקרה כזה, בתוך כ-15 שנים בלבד תפחת כמות המים הזמינים בכ-120 מל"ש נוספים, ותעמוד על כ-150 מל"ש בלבד. אם נניח שאיבת מים מינימלית הכרחית של אותם 150 מל"ש מן האגם עצמו (הפחתה ניכרת לעומת 440 מל"ש בשנים 1976–2009), ברור כי זהו מצב של תחילת גירעון קבוע במאזן המים של הכינרת, ותחילת תהליך רב-שנתי של ייבוש האגם.

כדי לשמור על מצב יציב של כמויות המים באגן ההיקוות של הכינרת אנו מחויבים כיום ל: (א) בנייה ויישום של תוכנית-אב ארוכת טווח שתעדיף הפקת מים מקומית בשיעור קבוע, ואספקת מים נוספת לאגן ממקורות חיצוניים בלבד; (ב) קביעת מדיניות של קווים אדומים שיבטיחו קיום מגבלות לכמויות המופקות בקידוחי הפקה, כדי לשמר שפיעה במעיינות לפחות ברמה הנוכחית; (ג) מעקב הידרולוגי תכוף וצפוף אחרי מפלסי מי התהום בקידוחים מייצגים באגן; (ד) הכנסת מודלים של מי תהום ונגר עילי ככלי עבודה קבוע לכל אזורי האגן; (ה) עריכת מאזני גשם, הפקה ושפיעה תקופתיים בעזרת הנתונים והמודלים, כדי שנוכל להתריע מבעוד מועד על ירידה משמעותית ומסוכנת בשפיעת מים טבעיים.



מבט אל הכינרת מעל מצוק הארבל | צילום: עמיר אלוני, בפייסבוק: Amir Aloni Aerial photography

מקורות

1. באב"ד א, בורג א ואדר א. 2017. מאזן מים עבור המערכת ההידרוגיאולוגית בעמק החולה. תקציר עבור כנס האגודה הישראלית למשאבי מים. 24-25 במאי 2017; עכו.
2. בן יונה מ. 2017. מודל גשם – נגר יומי בגישת המערכת (system approach) עבור נחלי דרום רמת הגולן (עבודת גמר לתואר מוסמך). המכללה האקדמית תל-חי (בדפוס).
3. גבעתי ע ועצמון ב. 2013. מגמות בשפיעת מעיינות בצפון הארץ, דו"ח הידרולוגי 07/2013. ירושלים, ISSN-0334-3367.
4. גוטמן י, ברגר ד, בורג א וגב י. 2012. אקוויפרים ומערכות הזרימה של מי התהום באצבע הגליל – הצבת מודל קונספטואלי ומודל תאים. דו"ח מכון גיאולוגי GSI/25/2011. ירושלים. דו"ח חברת מקורות מס' 1582.
5. גלעד ד ושוורץ ש. 1978. הידרוגיאולוגיה של אקוויפרי מקורות הירדן. דו"ח הידרו 1978/5. ירושלים.
6. דפני א. 2002. ההידרוגיאולוגיה של האקוויפר הבזלתי בגולן (עבודת גמר לתואר מוסמך). ירושלים: האוניברסיטה העברית בירושלים.
7. השירות ההידרולוגי. 2014. נתונים רב-שנתיים באגן הכנרת. בתוך: מצב מקורות המים 2014..
8. השירות המטאורולוגי. 2015. שינויים אקלימיים בישראל, ממצאי השירות המטאורולוגי.
9. זיו ב, סערני ה, אלפרט פ ואחרים. 2011. תנודות ומגמות בטמפרטורה, בעומס חום ובמשקעים בישראל ב-30 השנים האחרונות – האם עדות לשינוי אקלימי? בחינה קלימטולוגית-סינופטית. דו"ח מסכם, מוגש למדען הראשי המשרד להגנת הסביבה.

10. יחיאלי י, שליב ג, וולמן ס ואחרים. 2011. מודל תלת-ממדי של אגן כלנית (אגן פוליה-טבחה), דו"ח מספר GSI/38/2011. ירושלים.
11. מיכלסון ח וגולדשטוף י. 1974. הגיאודידרולוגיה של אקוויפר הקנומן בגליל העליון והמרכזי. תל-אביב: תה"ל. דו"ח מס' 01/74/71.
12. מיכלסון ח. 2009. חוות דעת בעניין הזיהום הבקטריאלי שהופיע בעין סלוקייה בחודש פברואר 2009. הוגש למי עדן ייצור (2007) בע"מ.
13. מקורות. 2009–2016. מאזני המים, המלח והחום של הכנרת, יח' אגן ההיקוות, חבל ירדן, אתר ספיר.
14. ספיר ג ושגיא ע. 2014. הערכת כמויות המים הנמנעות מהכנרת עקב שימושי האדם באגן ההיקוות DHV MED בע"מ, דו"ח מסכם.
15. קדרון י. 1972. שדה עינן – ניצול אקוויפר הקנומן. תל-אביב: תה"ל. דו"ח מס' HR/72/117.
16. רימר א. 2017. הצפון מתייבש – מה חלקה של שאיבת מי תהום בירידה של שפיעת מעיינות בצפון הארץ? *אקולוגיה וסביבה* **8**(2): 68–69.
17. רשות המים. נובמבר 2010. תכנית חירום להתמודדות עם משבר המים בישראל בשנים 2011–2012.
18. Ben-Zvi A. 1988. Enhancement of runoff from a small watershed by cloud seeding. *Journal of Hydrology* **101**(1-4): 291-303.
19. Dafny ES, Gvirtzman H, Burg A, and Fleischer LC. 2003. The Hydrogeology of the Golan Basalt Aquifer, Israel. *Israel Journal of Earth Sciences* **52**(3): 139-153.
20. Gur D, Bar-Matthews M, and Sass E. 2003. Hydrochemistry of the main Jordan River sources: Dan, Banias, and Kezinim springs, north Hula Valley, Israel. *Israel Journal of Earth Sciences* **52**: 155-178.
21. Litaor MI, Eshel G, Sade R, Rimmer A, and Shenker M. 2008. Hydrogeological characterization of an altered wetland. *Journal of Hydrology* **349**: 333-349.
22. Morin E. 2011. To know what we cannot know: Global mapping of minimal detectable absolute trends in annual precipitation. *Water Resources Research* **47**(7), doi: 10.1029/2010WR009798.
23. Neuman SP and Dasberg S. 1977. Peat hydrology in the Hula basin, Israel: II. Subsurface flow regime. *Journal of Hydrology* **32**: 241-256.
24. Rimmer A and Salingar Y. 2006. Modelling precipitation-streamflow processes in Karst basin: The case of the Jordan River sources, Israel. *Journal of Hydrology* **331**(3-4): 524-542.
25. Sade R, Samuels R, Salingar Y, et al. 2016. Water management in complex hydrological basin – Application of Water Evaluation and Planning Tool (WEAP) to the Lake Kinneret watershed, Israel. In: Borchardt D, Bogardi JJ, and Ibisch RB (Eds). Integrated Water Resources Management: Concept, Research and Implementation. Springer International Publishing.

26. Samuels R, Rimmer A, and Alpert P. 2009. Effect of extreme rainfall events on the water resources of the Jordan River. *Journal of Hydrology* **375**(3-4): 513-523.
27. Shamir E, Rimmer A, and Georgakakos KP. 2016. The use of an Orographic Precipitation Model to assess the precipitation spatial distribution in Lake Kinneret watershed. *Water* **8**(12): 591.
28. Thornthwaite CW and Mather JR. 1957. Introduction and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Publications In Climatology* **10**(3).
29. Weinberger G, Givati A, Livshitz Y, et al. 2012. The natural water resources between the Mediterranean Sea and the Jordan River. Jerusalem: Israeli Hydrological Service.
30. Ziv B, Shilo E, and Rimmer A. 2014. Meteorology. In: Zohary T, Sukenik A, Berman T, and Nishri A (Eds). Lake Kinneret – Ecology and Management. Springer.