

אליאב שטול-טראורנג

המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי – מרכז וולקני, בי"ס פורטר ללימודי סביבה, אוניברסיטת תל-אביב, החוג לגאוגרפיה וסביבת האדם, אוניברסיטת תל-אביב

עידו אביאני

אקופיס מזרח תיכון

דרור אבישר

החוג לגאוגרפיה וסביבת האדם, אוניברסיטת תל-אביב

נרית ברנשטיין

המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי – מרכז וולקני



הקמת מאגר מים בסרי-לנקה (Morana Reservoir Project), ספטמבר 2014. מצוקת המים המחריפה באזורים נרחבים בעולם מחייבת פיתוח כלים לניהול מושכל של המשאב | צילום: Mahinda Rajapaksa

מדן המים – מדד אקולוגי לניהול משאב המים ולחיסכון בו

[סקירות](#)

גיליון קיץ 2015 / כרך 6(2)

29 ביוני, 2015

ציטוט מומלץ

שטול-טראורנג א, אביאני ע, אבישר ד וברנשטיין נ. 2015. מדן המים – מדד אקולוגי לניהול משאב המים ולחיסכון בו. *אקולוגיה וסביבה* 6(2): 86–93.

על קצה המזלג

- משאב המים הוא משאב במחסור באזורים צחיחים וצחיחים למחצה, כגון ישראל.
- מדן המים הוא מדד לאומדן כמות המים הגלומה בכל פעילות אנושית או מוצר.
- השימוש במדד הולך ותופס את מקומו כמדד חשוב להערכת השפעת האדם על הסביבה, לצד מדדים כדוגמת מדן סביבתי ומדן הפחמן.
- המאמר מספק הצגה ראשונית, מקיפה וביקורתית של הגישה, מסביר את שיטת החישוב שהמדד נבנה לפיה, וסוקר את הנעשה בנושא במסגרת מדינתית או אזורית ובתחומים של עסקים, תעשייה וחקלאות.
- הרחבת השימוש במדד בישראל עשויה לשפר את תהליכי קבלת ההחלטות בתחום ניהול משאבי המים, לייעל את השימוש במשאב ולהאיץ שיקום מקורות מים פגועים.

המערכת

תקציר

בעשורים האחרונים החמירו גידול האוכלוסייה ופעילות האדם את בעיית המחסור במים בעולם. כתוצאה מכך, גברה המודעות בצורך לניהול מיטבי של משאב המים, ופורסמו מחקרים רבים המעודדים ניהול בר-קיימא של משאב זה. אחת מהשיטות שהתפתחו בשנים אלה היא שיטת 'מִדְרֵךְ המים' (water footprint) המאפשרת כימות של השפעת פעילות האדם על מקורות המים, איתור נקודות שקיים בהן פוטנציאל לחיסכון במים, והבנה טובה יותר של ההשפעות הסביבתיות של פעילות האדם על מקורות המים. מדרך המים מצטרף למדדים אקולוגיים אחרים, כגון מדרך הפחמן ומדרך סביבתי (המכונה גם מדרך אקולוגי), שפותחו כדי לאפשר הבנה טובה יותר של השפעת האדם על הסביבה ועל משאבי הטבע, ומתוך ניסיון למזער את הנזקים הנגרמים להם עקב פעילות האדם. שיטת מדרך המים מאפשרת ביצוע "חשבונאות מים" למדינות, לאזורים גאוגרפיים, לעסקים ולתעשייה, לשירותים, לחקלאות, למוצרי צריכה ואפילו לאדם בודד. נוסף על מדידת השימוש במים שפירים, מדרך המים מאפשר אומדן של שימוש במי גשם (בחקלאות) והשפעתו של זיהום מקורות מים, תוך שימוש בממד אחיד. בשנים האחרונות בוצעו מחקרים רבים בעזרת שיטת מדרך המים. אחד המחקרים הראה כי כ-92% מצריכת המים של האנושות משמשת לחקלאות. הבנת היקף השימוש במים בחקלאות במדינה או באגן ניקוז מסוים בעזרת שיטת מדרך המים יכולה להיות שלב ראשוני בדרך לגיבוש מדיניות שתאפשר צמצום שימוש ומניעת זיהום במקורות מים. מבקרים של שיטת מדרך המים טוענים כי השיטה פשטנית מדי ואינה מביאה בחשבון את זמינות המים, ועקב כך אינה נותנת כלים מספקים להתמודדות עם בעיות ניהול משאב המים. מפתחי השיטה טוענים מנגד, כי השיטה היא כלי אחד מבין רבים, המאפשר הבנה בסיסית של היקף השימוש במים בהשקעה מועטה יחסית של משאבי זמן וכסף. במאמר זה מוצגות שיטת מדרך המים והפתחותה, ונידונות דרכי יישום של סוגים שונים של מדרך המים ברחבי העולם.

זבוא – ניהול השימושים השונים במשאב המים

בעשורים האחרונים החמירו גידול האוכלוסין ופעילות האדם את בעיית המחסור במים בעולם. כ-80% מאוכלוסיית העולם חשופה לרמת סיכון גבוהה מבחינת ביטחון זמינות המים, ומקורות המים הטבעיים מצטמצמים עקב שינויים בשימושי קרקע, תהליכי עיור ותיעוש ומיזמים רחבי היקף להסתת מים, כגון סכרים ותעלות [49]. נוסף על כך, שינוי האקלים צפוי להגביר את הלחץ על זמינות משאבי המים. אזורים מסוימים בעולם צפויים לאבד כ-20% ממשאבי המים המתחדשים שלהם עם כל מעלה (צלזיוס) של התחממות [21]. סכנות אלה לביטחון זמינות המים כוללות שני היבטים קשורים: כמות ואיכות [34]. כדי להתמודד עם בעיית המחסור הגובר במים נערכים בשנים האחרונות מחקרים רבים בתחום "ניהול משאבי המים" (water resources management), המעודדים ניהול בר-קיימא של מערכות אקולוגיות מימיות (aquatic) ומשאבי מים תוך שילוב מחקר וידע מתחומים שונים [38].

העלייה במודעות לחשיבותו של החיסכון במים הובילה להכרה בצורך להבנה ולכימות מעמיקים יותר של אופן השימוש במשאב זה. אחת התובנות החשובות בעשורים האחרונים היא כי השימוש הקיומי במים הוא לא רק השימוש הישיר בנוזל המים, דהיינו לשתייה, למקלחת, להדחת אסלה וכן הלאה, אלא גם המים הגלומים במוצרים ובשירותים שאנו צורכים על בסיס יום-יומי. לדוגמה, כוס האספרסו שאנו שותים בבוקר מכילה אמנם כ-200 מ"ל של נוזל, אולם כמות המים הגלומה בפועל בכוס זו קרובה ל-140 ליטר! אלה המים שנצרכו בתהליכי הגידול, העיבוד, האריזה וההובלה של הקפה, והם מכונים **מים וירטואליים** (virtual water, או מים מדומים). המושג מים וירטואליים, שטבע החוקר הבריטי Tony Allan בתחילת שנות ה-90, בא להמחיש שהרוב המוחלט של המים בעולם נצרכים לא בצורתם הגולמית, הנוזלית, אלא כמוצרים וכשירותים שאנו רוכשים או משתמשים בהם, ושהמים נצרכו לייצורם, כדוגמת פירות, ירקות, דגנים, סוכרים, שמנים, בגדים, מוצרי אלקטרוניקה או חשמל [10]. מטרת סקירה זו היא להציג את שיטת מדרך המים (water footprint), התפתחותה, ביקורת כלפיה ויישומיה השונים.

התפתחות המושג התאורטי: ממסחר עולמי במים וירטואליים למִדְרֵךְ מים

בעולם הגלובלי שאנו חיים בו כיום, המקיים מסחר בין-לאומי רחב היקף של מוצרים ותוצרת חקלאית, מתקיים בד בבד גם סחר במים וירטואליים. נפח הסחר העולמי השנתי במים בין השנים 1996-2005 מוערך ב-2,320 מיליארד מ"ק בשנה, שהם כ-25% מצריכת המים העולמית. מתוך נפח זה, כ-76% מהסחר העולמי במים הוא בצורת יבול חקלאי, והיתר מתחלק בצורה שווה בין סחר במוצרים מן החי ומן התעשייה [32]. מנתוני הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה [2] ומהערכות גלובליות למים הגלומים

בגידולים שונים^[40], אפשר ללמוד כי בשנת 2013 ייצאה ישראל בין היתר 245,618 טונות תפוחי אדמה שגלומים בהם כ-60.6 מל"ק מים, ו-160,787 טונות פלפל שהם כ-60.9 מל"ק מים. לעומת זאת, בשנת 2013 הוערכה כמות החיטה המיובאת (כ-98.5% מהחיטה הנצרכת לשנה בישראל) בכ-850,000 טונות^[3] שהם כ-1,500 מל"ק מים וירטואליים – כהיקף צריכת המים השנתית של כלל המשק הישראלי. ישראל היא גורם קטן בשוק סחר המים העולמי, אך בדומה לרוב המדינות באזורים צחיחים למחצה, הביטחון בזמינות המים והביטחון התזונתי הנגזר ממנו תלוי במידה רבה ביבוא של מים וירטואליים. עתיד משבר המים העולמי ופתרונות האפשריים תלויים במידה רבה בסחר עולמי במים וירטואליים ובמעבר מים מארצות ברוכות מים לארצות צחיחות וצחיחות למחצה^[9,8].

די להצליח לאמוד את כמות המים הגלומה בכל מוצר, פותחה שיטת מדריך המים, המכונה לעיתים גם 'טביעת רגל מימית'^[31]. מדריך המים הוא חלק מרשת מדריך המים (Water Footprint Network) שהיא חלק ממשפחת כלי המדריך הכוללת את המדדים האקולוגיים המוכרים יותר: מדריך סביבתי (המכונה לעיתים מדריך אקולוגי, ecological footprint) ומדריך הפחמן^[24] (carbon footprint). מדריך המים נועד ליצור מדד כולל ואחיד למדידת כמות המים הגלומים במוצרים ובשירותים שאנו צורכים. המדד מאפשר אומדן טוב יותר של כמות המים שאנו משתמשים בה, ולפיכך איתור מקומות שיש בהם פוטנציאל לחיסכון במים.

זדרך המים מורכב מעצם הגדרתו משלושה סוגי מים שונים:

- 'מים כחולים' – מים שפירים שמקורם בנהרות, באקוות ובאגמים;
- 'מים ירוקים' – מי גשם שהתאדו ישירות מפני העלווה או שנקלטו משכבת הקרקע העליונה, ונפלטו מהצמח בתהליך הדיות – היבט זה רלוונטי רק לגידולים חקלאיים;
- 'מים אפורים' – כמות המים הנדרשת כדי לדלל מזהמים שמקורם בפעילות האדם, לרמה שתשאיר את מקורות המים באיכות ראוייה לשימוש (הכוונה אינה למושג הקשור לשימוש חוזר במים). רכיב זה של מדריך המים הנוגע לזיהום, הוא אחד מהחידושים החשובים שקבעה שיטת מדריך המים, מכיוון שכך אפשר לראשונה להתייחס לנוזל הנגרם מזיהום מקורות מים במונחים של שימוש במים^[31].

סוגים של מדריך המים

שיטת מדריך המים מאפשרת מידול של סוגים שונים של מדריך המים בהתאם למטרות המחקר. בחלק זה נסקור את השימוש במדריך המים למדינות ולאזורים גאוגרפיים, לתעשייה ולעסקים ולחקלאות. השיטה עצמה עומדת החישוב השונות לכל סוג מדריך מפורטות במדריך מדריך המים^[31] (The Water Footprint Assessment Manual) ושימשו במחקרים הנוכחים להלן. נוסף על כך, פורסם מדריך נפרד לחישוב מדריך המים האפורים^[22]. במסגרת מאמר זה נדון בקצרה בשיטת חישוב מדריך המים של החקלאות.

זדרך מים של מדינות ואזורים גאוגרפיים

מדריך המים של מדינה או אזור, מוגדר כסך נפח המים הנצרכים מהפעילויות השונות המתבצעות בתחום השטח הנבדק – במגזר הפרטי, העסקי והחקלאי. חלק המים שמיובא ומיוצא כסחורות שונות מוגדר כמים וירטואליים. מדריך המים הוא סך השימוש במים בגבולות המדינה בתוספת להפרש בין כמות המים המיוצאת והמיובאת. רמת הפירוט של מדריך המים בקשר לשימושי המים השונים, ונפח הרכיבים השונים (השקיה, גשם וזיהום), תקבע את שימושיות המחקר ואת מידת התועלת ממנו. מחקרים על מדריך המים נערכו כבר במספר מדינות בעולם, כגון סין^[26], אנגליה^[20], איטליה^[12] וספרד^[6]. כמו כן, פורסמו מחקרים המתמקדים ביחידות מדיניות או ממשלתיות קטנות יותר, כגון מדינת קליפורניה^[23] או מחוזות מסוימים באינדונזיה^[13], ואפילו ברמה של עיר^[33].

מים, כידוע, אינם מתחשבים בגבולות מדיניים. לכל גוף מים – נהר, אגם או אקווא – יש אגן ניקוז שכולל את כלל השטח שהגשמים מתנקזים ממנו ונאספים בתוכו. לפיכך, יש יתרון בניהול מקורות מים על פי אגני ניקוז, מכיוון שפעילות במעלה האגן – למשל בירוא יערות – משפיעה על אזורים מרוחקים גאוגרפית במורד – כגון שיטפונות כתוצאה מעלייה בנגר עילי. מחקר על מדריך המים של אגן ניקוז מאפשר לתאר את שלל התהליכים המשפיעים על האגם, הנהר או האקווא^[35]. מדריך המים של אגן ניקוז ימדוד את סך נפח המים שיצאו מאגן הניקוז כתוצאה מפעילות האדם, וכן יאמוד את כמות המים הנחוצה לדילול המזהמים שנוספו לאגן הניקוז בעקבות פעילות האדם, כך שאיכות המים הנוותרים תעמוד בתקן המקובל (ראו סעיף מדריך המים בחקלאות)^[31]. ישנן מספר דוגמאות למחקרי מדריך מים של אגני ניקוז מרחבי העולם, כגון הנהר הצהוב בסין^[52] או נהר הגואדאלקבייר בספרד^[17]. מחקר על מדריך המים של מדינה, מחוז או אגן ניקוז, מאפשר לזהות את מוקדי השימוש הגדולים ביותר ולעזור במיקוד מחקרים פרטניים שיעזרו להגביר את החיסכון במים ולהפחית את מדריך המים. קביעה של מדריך המים המרבי המותר לאגן ניקוז מסוים היא דוגמה לצעד אחד מני רבים הדרושים לניהול נכון ומקיים של אגני ניקוז^[30].



מדרך המים של אורז הוא 2,500 ליטרים לק"ג | צילום: Shubert Ciencia

זדרך מים של עסקים ותעשייה

שימוש במים שפירים הוא חלק בסיסי בפעילות של חברות רבות. לעתים זורמים שפכים ברמות טיהור שונות למקורות מים כתוצאה מפעילות תעשייתית, מזהמים מערכות אקולוגיות ופוגעים בהן. בעוד בעבר הלחץ להפחית את הפגיעה במקורות מים עקב פעילות של חברות ותעשיות שונות נבע מהציבור, כיום קיימת מודעות בחברות ליתרונות הגלומים בצמצום השימוש במים ובמינעת זיהום, ובהם חיסכון כלכלי, עמידה בתקנים ושיפור יחסי הציבור. יוזמות שונות, כמו של הארגון לשיתוף פעולה ולפיתוח כלכליים (OECD)^[44], ליצירת תקנים לניהול סביבתי כחלק מהאחריות התאגידית, מוסיפות תמריצים לחברות לבצע מחקרים על מדרך המים של שרשרות הייצור – כדי לזהות נקודות שאפשר להגביר בהן את החיסכון ולמנוע זיהום^[27]. מחקרים על מדרך המים שביצעו תאגידים בין-לאומיים, כגון קוקה קולה^[16] ונסטלה^[15], מראים את המגמה המשתנה בעולם העסקי. פועל יוצא מההכנסות הענקיות ומההשקעה רחבת ההיקף במחקר ובפיתוח הוא כי תאגידי הענק הללו הם שותפים חשובים לעידוד שימוש חסכוני ויעיל יותר במשאב המים.

נוסף על מחקרים שערכו תאגידים, גם בתחום העסקים והתעשייה קיים מגוון רחב של מחקרים, כדוגמת: מדרך המים של תיירות בספרד^[14], של ייצור חשמל הידרואלקטרי^[42] או ייצור דלק ביולוגי מאצות^[29]. מחקרים העוסקים בבחינת חלופות שונות בתוך תעשייה מסוימת יכולים לסייע ולעודד יזמים ועסקים לאמץ שיטות חסכוניות במים במטרה להקטין את מדרך המים.

מדרך המים של החקלאות

אף על פי שקיימים אזורים רבים בעולם שהנגישות בהם למים באיכות ראויה לשתייה היא מוגבלת, ההשלכה העיקרית של בעיית זמינות המים נוגעת לבטיחות ייצור המזון בחקלאות. כ-92% מצריכת המים של האנושות, כ-8,363 במיליארד מ"ק בשנה, נצרכים על-ידי המגזר החקלאי (7,404 לגידולים חקלאיים, 913 למרעה ו-46 לגידול חיות משק). כמות זו נצרכת ברובה כמי גשם בחקלאות בעל ולמרעה – כ-6,684 מיליארד מ"ק בשנה. מהיתר, 945 מיליארד מ"ק בשנה נצרכים כמי השקיה (פרט לכ-5% שבעלי החיים צורכים ישירות), והיתר נצרך כמים אפורים^[32]. כאמור, מים אפורים בהקשר זה מתייחסים לנפח המים הדרוש לדילול הזיהום שנגרם עקב פעילות החקלאות (מְדֻשָּׁנִים או מקוטלי חרקים ועשבים)^[22]. מספרים אלה מעידים על חשיבותה המכרעת של החקלאות לעתיד ביטחון הזמינות של המים. הגברת הצריכה מצד החקלאות תאיץ ותחריף את המשבר, בעוד הגברת יעילות השימוש במים בחקלאות תוכל למזער את המשבר ובה בעת גם לתמוך בשיקום המערכות האקולוגיות

המימיות [48]

עד חשוב לקראת שיפור יעילות השימוש במים בחקלאות (ובמגזרים האחרים) הוא ההבנה של היקף השימוש, או **חשבונאות מים** (water accounting). כאמור, שיטת מדרך המים פותחה בראש ובראשונה כדי לתת מענה למטרה זו, וליצור תקן עולמי אחיד לחישוב היקף השימוש במים [31]. בחקלאות, נוסף על מדידת היקף השימוש במים השקיה ממקורות מים עיליים או תת-קרקעיים (מדרך מים כחולים), שיטה זו גם מודדת את היקף השימוש במים גשם (מדרך מים ירוקים). חשיבות מדרך המים הירוקים נובעת מכך שכיום רוב החקלאות (כ-70%) בעולם היא עדיין חקלאות בעל. מי הגשם הם המשאב המתחדש האולטימטיבי, ועדיפים לשימוש ממי השקיה שמקורם במאגרים, שלעיתים קרובות קצב המילוי שלהם נמוך מקצב השימוש בהם. למרות זאת, רק חלק קטן ממי הגשם מנוצלים בצורה יעילה, ולכן פוטנציאל הגברת יעילות השימוש גבוה במיוחד באזורים שפחות המשקעים בהם גבוהה אך הניהול חקלאי לקוי (כגון בחלקים נרחבים באפריקה ובדרום-אמריקה). בכל מקרה, מי הגשם הם חלק בלתי נפרד ממאזן המים הכללי, ולכן יש חשיבות רבה להערכת מדרך המים הירוקים לצד מדרך המים הכחולים [5, 19].

מדרך המים הכחולים ומדרך המים הירוקים מבוססים על תהליך האידוי-דיות (evapotranspiration) הכולל התאדות מים מפני העלוה והקרקע (אידוי) ודרך הפיוניות בעלים (דיות – החלק המשמעותי של צריכת המים). מדרך מים ירוקים מחשב רק את הגשם שנאגר בשכבת הקרקע העליונה. יתר מי הגשם שחלחלו לעומק או שהפכו לגז, נקווים ומובאים בחשבון כחלק מהמים הכחולים [31]. חישוב האידוי-דיות נעשה בעזרת המשוואה הפיזיקלית של Penman-Monteith, כפי שהוגדרה [11] במסמך FAO56. משוואה זו מעריכה את **האידוי-דיות הפוטנציאלי המחושב** (Reference Evapotranspiration – ET_0). האידוי-דיות של דשא תאורטי בגובה 12 מ"מ בתנאי השקיה מיטביים, שנקבע על-ידי הטמפרטורה, הרוח, הלחות והקרנה. למרבית הגידולים חקלאיים פותח מקדם גידול (Crop Coefficient – Kc) שהכפלתו באידוי-דיות המחושב נותנת את האידוי-דיות בתנאי האקלים הספציפיים [11]. מקדמי הגידול ניתנים גם הם ב-FAO56, אך בפועל הם משתנים בהתאם לסוגי האקלים והקרקע השונים, ולכן רק על ידי ניסוי ליזמטרים ושיטות אחרות המודדות אידוי-דיות, ניתן לפתח מקדמי גידול מקומיים מדויקים יותר [37]. מודלים כמו CROPWAT ו-AQUACROP שפותחו על-ידי האו"ם, מאפשרים לשלב מדדים נוספים כגון סוג הקרקע, תדירות השקיה ותדירות אירועי גשם להערכת אידוי-דיות. כיום עוסקת רוב חשבונאות המים בחקלאות בנפח הכולל של מי ההשקיה. לעומתה, מדרך המים לחקלאות מתמקד באידוי-דיות, מכיוון שעודפי מי השקיה והגשם מחלחלים או אזורים כנגר עילי וניתנים לשימוש חוזר [31].

חידוש חשוב נוסף בשיטת מדרך המים היא ההתייחסות למדרך המים האפורים. שיטת החישוב נועדה לספק אומדן ראשוני לכמות המים הדרושה כדי לדלל את המזהם הנבדק. את מדרך המים מחשבים על-ידי חלוקת כמות המזהם שמגיע למקור מים כתוצאה מהפעילות החקלאית (או כל פעילות אחרת) בהפרש שבין הריכוז המרבי המותר של המזהם על פי התקן לבין הריכוז הטבעי של המזהם בגוף המים הקולט את המזהם. לדוגמה, נניח שבעקבות פעילות חקלאית נשטפים 1,000 מ"ג זרחן לדונם לשנה לנחל הקרוב; כמו כן, נניח כי בנחל מותרים, לפי התקן, 1 מ"ג זרחן לליטר מים, ובמצבו הטבעי ריכוז הזרחן בו הוא 0 מ"ג לליטר – הרי שנדרשים כ-1,000 ליטר (מ"ק אחד) לשנה כדי לדלל את המזהם. בפועל, כמות המזהמים הנשטפים למים בעקבות פעילות חקלאית גדולה בהרבה, ולכן מדרך המים האפורים יכול להיות רכיב משמעותי ממדרך המים הכללי. מכיוון שזיהום שמקורו בחקלאות אינו נקודתי (non-point pollution), כאשר אין דרך למדוד ישירות את כמות המזהם המגיעה למים, יש צורך בהערכת האחוז מהדשן שנשטף מהקרקעות ומגיע למקורות המים בנגר וממים המחלחלים בקרקע. השיטה מאפשרת לחשב את מדרך המים האפורים לכל סוג מזהם, כל עוד קיים תקן לריכוז המרבי המותר במים הקולטים את המזהם. כמובן שלערך התקן יש השפעה מכרעת על התוצאה. המזהם שזקוק למידה הגבוהה ביותר של דילול יקבע את מדרך המים האפורים. חשוב לציין, כי הסיבה לשימוש בריכוז הטבעי של הנחל כבסיס לחישוב, ולא בריכוז המזהם בפועל בנקודה ספציפית לאורכו, מטרתה לאמוד את פוטנציאל הזיהום הכללי המותר מבלי שיוטה על-ידי זיהומים נקודתיים במעלה הנחל. באופן זה מחושב מדרך המים האפורים בצורה שווה לכל הגורמים המזהמים לאורך הנחל לפי מצבו הטבעי של הנחל או של מקור מים אחר [31, 22].

יתרון נוסף של שיטת מדרך המים היא השימוש **במדד יעילות השימוש במים**. המהפכה הירוקה ידועה בכך שהגדילה את היבולים בחישוב של כמות יבול לדונם. מדרך המים, לעומת זאת, מחשב את יעילות השימוש במים לפי כמות היבול (או לחלופין לפי כמות האנרגיה או הרווח הכלכלי) למ"ק מים. כתוצאה מכך, יעילות השימוש נגזרת לא מכמות יבול ליחידת שטח, אלא מכמות יבול לנפח מים, ולכן מעניקה יתרון לאסטרטגיות חקלאיות המפיקות יבול גבוה תוך ניצול של פחות מים. בצורה זאת, ניתן להשוות את יעילות השימוש במים של גידול מסוים באזורים שונים, ובכך לעודד חקלאות שמתאימה לאקלים או לסוג קרקע מסוימים [31].

שנם מספר רב של מחקרי מדרך מים של חקלאות: ממחקרים ברמה העולמית [39, 40], לגידול מסוים באגן ניקוז ספציפי [43], לאוכל מן החי [28, 41], ואפילו למוצרי צריכה כמו פסטה ופיצה באיטליה [7] או חלב סויה [18]. ההתמקדות והפירוט של כל מחקר ספציפי תלויים במטרת המיזם. ככל שמספר המחקרים הזמינים בתחום זה יגדל, כך תגדל יכולת ההשוואה בין מדרך המים של גידולים באזורים שונים בעולם. מידע זה יכול לסייע לחוקרים ולקובעי מדיניות עולמית לכוון מדיניות שתעודד חקלאות וסחר עולמי בחקלאות תוך מזעור הפגיעה במשאבי המים.



שיקית שדות בנגב באמצעות קוץ / צילום: ברוריה קרני הדס

ביקורת על שיטת מדרך המים

הביקורת העיקרית על שיטת מדרך המים היא שהיא אינה מספקת אינדיקציה למקור המים. לדוגמה, מדרך המים של בננה הגדלה באזור צחיח למחצה יכול להיות קטן בהרבה משל בננה הגדלה באזור יערות הגשם, בעוד בראשון קיים משבר מים חמור ובשני לא קיים מחסור במים [25, 50]. לכן, הוגי מדרך המים מציינים את החשיבות במתן ההקשר של מקור המים. יתרה מכך, קיימת עדיפות לביצוע מחקרים באזורים שקיים בהם מחסור במים (hotspots) [31]. ביקורות נוספות טוענות שההבדל בין מדרך מים כחולים וירוקים אינו רלוונטי, מכיוון שבסוף כל המים הירוקים הופכים לכחולים [50]. חלק מהסיבות להפרדה זו כבר הוזכרו לעיל, אך הסיבה העיקרית היא הרצון לכלול את מי הגשם בחישובי חשבונאות המים, מכיוון שכיום בדרך כלל רק מי ההשקיה נכנסים לחישובי מאזן המים בגלל הקושי להערכת נפח מי הגשם שנצרכו על-ידי החקלאות [31]. ביקורת נוספת מושמעת באשר לשיטת חישוב מדרך המים האפורים. לטענת המבקרים, חישוב מדרך מים אפורים ככמות המים הנדרשת לדילול מזהמים פשוטני מדי, מכיוון שבקרקע ובמים מתקיימים תהליכים פיזיקליים וביולוגיים הגורמים לשינוי בריכוז המזהמים, כגון פירוק, שקיעה וספיחה, ולכן דילול המזהם אינו בהכרח פתרון מתאים עבור כלל המזהמים [50]. בתגובה טוענים מחברי השיטה כי מדרך המים לא נועד לתת פתרון כולל לתיעוד השפעת המזהמים. השיטות השונות לחישוב מדרך המים פשוטות יחסית, אך זו אחת מנקודות החוזק של השיטה – יצירת שיטה זולה וקלה לשימוש ולמתן הערכה בסיסית וראשונית להיקף שימושי המים השונים. בהתאם להערכה ראשונית זו, ניתן לבצע מחקרים מעמיקים המבוססים על מודלים מורכבים ועל מדידות בשטח. לרוע המזל, זמינות התקציבים וכוח האדם למחקרים מסוג זה מוגבלת, ולכן מחקרים רבים אינם מתפתחים מעבר לשלב חישוב מדרך המים. במצב זה עדיפה שיטת מדרך מים על החלופה, כלומר על אי-ביצוע של פעולות להערכת השפעת המזהמים [22, 31].

זדוך המים בישראל – מבט לעתיד

יימוש ביבוא מים וירטואליים כפתרון למשבר המים שפוקד את המזרח התיכון אינו רעיון חדש [9]. בפועל ישראל משתמשת בפתרון זה שנים רבות. כ-90% מצריכת המים הכללית של ישראל, כ-7,800 מלמ"ק מים בשנה, נצרכים בצורת מזון, ומתוכם כ-5,600 מלמ"ק בשנה מיובאים – בעיקר בצורת דגנים (3,200 מלמ"ק), בשר בקר (1,008 מלמ"ק), סוכרים (738 מלמ"ק) ושמינים (512 מלמ"ק). כמו כן, כ-500 מלמ"ק לשנה מיוצאים כתוצרת חקלאית [36]. בשנת 2001 נאמד היקף יבוא המים הווירטואליים לישראל ב-6,900 מלמ"ק בשנה לעומת יצוא של 380 מלמ"ק בשנה [51]. נוסף על כך, רשת מדרך המים פרסמה הערכות דומות על היקף המים הווירטואליים בישראל, כחלק ממסד הנתונים העולמי WaterSTAT – [32]. היקף היצוא של המים הווירטואליים, תוך סבסוד עלותם לחקלאים, העלה בשנים האחרונות את המודעות לחשיבות התמחור של משאב המים כך שיכלול את עלות

הפגיעה במערכות אקולוגיות [4]. מדרך המים הוא שיטה להערכת עלות זו. אף על פי כן, עדיין לא בוצע מחקר מדרך מים מקיף בישראל. לעומת זאת, נעשתה עבודת תזה על מדרך המים של עזה [46], ונוסף על כך פורסם מאמר על מדרך המים של הגדה המערבית [45]. במחקר חשוב נוסף שנעשה בארץ, הומרו מקדמי הגידול המשמשים חקלאים להכוונת השקיה מחישוב על בסיס התאדות מגיית, לחישוב על בסיס אידוי-דיות מחושב (על פי FAO56 [1]). מקדמי גידול אלה כוללים מקדמי שטיפת מלחים, ולכן אינם מתארים בדיוק את מדרך המים ומייצגים נפח מים שגדול מהאידוי-דיות. בעבודת תזה לתואר שני בוצע מחקר מדרך מים באזור עמק הירדן כמחקר חלוץ למחקר על מדרך המים של החקלאות כולה בישראל [47].

בעולם צובר מדרך המים תאוצה במגזרים השונים, ומגניש ידע המאפשר קידום ניהול משאבי מים בצורה שמעודדת הגברה של יעילות השימוש ושיקום מקורות מים. בישראל, שיש בה משק מים מפותח ומתקדם, יש לקוות ששימוש במדד זה ובמדדים אקולוגיים נוספים יוטמע ויוכנס לשימוש על-ידי הרשויות השונות, המגזר העסקי, המגזר השלישי וגם במוסדות המחקר השונים. בצורה זו יובטחו המשך זמינות מים מיטבי למגזר החקלאי, הביתי והתעשייתי, כמו גם שיקום משמעותי של מקורות המים שניזוקו לאורך השנים, כגון אקוות החוף ונחלי החוף.



מדרך המים של סוכר (מקנה סוכר) הוא 1,780 ליטרים לק"ג [40] | צילום: Carsten ten Brink (cc BY-NC-SA 2.0)

מקורות

1. גלי, אייזנקוט א, פרס מ ולווינגרט ע. 2012. המרת מקדמי השקיה מגיית למקדמי השקיה מהתאדות מחושבת. *עלון הנוטע ס"ו* (מאי): 28–32.
2. הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה. 2014. לוח 9. [יצוא מוצרים חקלאיים נבחרים – כמויות](#). נלקח מאתר הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה
3. הרשות לתכנון ופיתוח החקלאות ההתיישבות והכפר. 2015. נוהל קבלת רישיונות ליבוא חיטה למאכל בגין קציר 2013. משרד החקלאות ופיתוח הכפר.
4. תגר ז. 2007. המחיר הציבורי של ייצוא מים וירטואליים. *הנדסת מים* 54: 18–26.

5. Aldaya MM, Allan JA, and Hoekstra AY. 2010. Strategic importance of green water in international crop trade. *Ecological Economics* **69**(4): 887-894.
6. Aldaya MM, Garrido A, Llamas MR, et al. 2010. Water footprint and virtual water trade in Spain. In: Garrido A and Llamas MR (Eds). *Water policy in Spain*. Leiden, the Netherlands: CRC Press.
7. Aldaya MM and Hoekstra AY. 2010. The water needed for Italians to eat pasta and pizza. *Agricultural Systems* **103**: 351-360.
8. Allan JA. 2003. Virtual water-the water, food, and trade nexus. Useful concept or misleading metaphor? *Water International* **28**(1): 106-113.
9. Allan JA. 2001 *The Middle East water question: Hydropolitics and the global economy*. London: I.B. Tauris.
10. Allan T. 2011. *Virtual water: Tackling the threat to our planet's most precious resource*. London: I.B. Tauris.
11. Allen RG, Pereira LS, Raes D, and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration -Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper* 56. Rome: FAO.
12. Antonelli M, Greco F, Sartori M, et al. 2014. *Water footprint of Italy*. Rome: World Wide Fund (WWF) Italy.
13. Bulsink F, Hoekstra AY, and Booij MJ. 2010. The water footprint of Indonesian provinces related to the consumption of crop products. *Hydrology and Earth System Sciences* **14**(1): 119-128.
14. Cazcarro I, Hoekstra AY, and Chóliz JS. 2014. The water footprint of tourism in Spain. *Tourism Management* **40**: 90-101.
15. Chapagain AK and Or S. 2010. [Water footprint of Nestlé's 'Bitesize Shredded Wheat'](#). World Wide Fund for Nature.
16. Coca Cola Europe. 2011. [Towards sustainable sugar sourcing in Europe water footprint sustainability assessment \(WFSA\)](#). Coca Cola Europe.
17. Dumont A, Salmoral G, and Llamas MR. 2013. The water footprint of a river basin with a special focus on groundwater: The case of Guadalquivir basin (Spain). *Water Resources and Industry* **1-2**: 60-76.
18. Ercin AE, Hoekstra AY, and Aldaya MM. 2012. The Water footprint of soy milk and soy burger and equivalent animal products. *Ecological Indicators* **18**: 392-402.
19. Falkenmark M and Rockström J. 2006. The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management* **132**(3): 129-132.
20. Feng K, Hubacek K, Minx J, et al. 2010. Spatially explicit analysis of water footprints in the UK. *Water* **3**(1): 47-63.

21. Field CB, Barros VR, Dokken DJ, et al. 2014. Climate Change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
22. Franke NA, Boyacioglu H, and Hoekstra AY. 2013. Grey water footprint accounting: Tier 1 Supporting guidelines. Value of Water Research Report Series 65. Delft, the Netherlands: UNESCO-IHE.
23. Fulton J, Cooley H, and Gleick PH. 2012. California's water footprint. Oakland, CA: Pacific Institute.
24. Galli A, Wiedmann T, Ercin E, et al. 2012. Integrating ecological, carbon and water footprint into a "footprint family" of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet. *Ecological Indicators* **16**: 100-112.
25. Gawel E and Bernsen D. 2011. What is wrong with virtual water trading? *UFZ-Diskussionspapiere* 1/2011.
26. Ge L, Xie G, Zhang C, et al. 2011. An evaluation of China's water footprint. *Water Resources Management* **25**(10): 2633-2647.
27. Gerbens-Leenes PW and Hoekstra AY. 2008. Business water footprint accounting. Value of Water Research Report Series 27. Delft, the Netherlands: UNESCO-IHE.
28. Gerbens-Leenes PW, Mekonnen MM, and Hoekstra AY. 2013. The water footprint of poultry, pork and beef: A comparative study in different countries and production systems. *Water Resources and Industry* **1-2**: 25-36.
29. Gerbens-Leenes PW, Xu L, De Vries GJ, and Hoekstra AY. 2014. The blue water footprint and land use of biofuels from algae. *Water Resources Research* **50**(11): 8549-8563.
30. Hoekstra AY. 2011. The global dimension of water governance: Why the river basin approach is no longer sufficient and why cooperative action at global level is needed. *Water* **3**(1): 21-46.
31. Hoekstra AY, Chapagain AK, Aldaya MM, and Mekonnen MM. 2011. The water footprint assessment manual: Setting the global standard. London: Earthscan.
32. Hoekstra AY and Mekonnen MM. 2012. The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **109**(9): 3232-3237.
33. Hoff H, Döll P, Fader M, et al. 2014. Water footprints of cities – Indicators for sustainable consumption and production. *Hydrology and Earth System Sciences* **18**(1): 213-226.
34. Howard G and Bartram J. 2003. Domestic water quantity, Service level and health. Geneva: World Health Organization.
35. Jaspers FGW. 2003. Institutional arrangements for integrated river basin management. *Water Policy* **5**: 77-90.

36. Kislev Y. 2011. The water economy of Israel. Policy Program Paper No. 2011.15. Jerusalem: Taub Center.
37. Lazzara P and Gianfranco R. 2010. The crop coefficient (Kc) values of the major crops grown under Mediterranean climate. *Italian Journal of Agrometeorology* **15**(2): 25-40.
38. Maia R and Luis SP. 2013. Water resources management in an interdisciplinary a/nd changing context. *Water Resources Management* **29**(2): 211-216.
39. Mekonnen MM and Hoekstra AY. 2011. National water footprint accounts: The green, blue and grey water footprint of production and consumption. Value of Water Research Report Series 50. Delft, the Netherlands: UNESCO-IHE.
40. Mekonnen MM and Hoekstra AY. 2011. The Green, Blue and Grey Water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences* **15**(5): 1577-1600.
41. Mekonnen MM and Hoekstra AY. 2012. A global assessment of the water footprint of farm animal products. *Ecosystems* **15**(3): 401-415.
42. Mekonnen MM and Hoekstra AY. 2012. The blue water footprint of electricity from Hydropower. *Hydrology and Earth System Sciences* **16**(1): 179-187.
43. Mekonnen MM, Hoekstra AY, and Becht R. 2012. Mitigating the water footprint of export cut flowers from the Lake Naivasha Basin, Kenya. *Water Resources Management* **26**(13): 3725-3742.
44. Morgera E. 2015. An environmental outlook on the OECD guidelines for multinational enterprises: Comparative advantage, legitimacy, and outstanding questions in the lead up to the 2006 review. *Georgetown International Environmental Law Review* **18**: 751.
45. Nazer DW, Siebel MA, Van der Zaag P, et al. 2008. Water footprint of the Palestinians in the West Bank. *Journal of the American Water Resources Association* **44**(2): 449-458.
46. Recanatì F. 2013. Trading off food security and environmental impacts : The water footprint of food production in the Gaza Strip (M.A. Thesis). Milano: Politecnico Di Milano.
47. Shtull-Trauring E. 2015. The water footprint of agricultural crops in the Jordan Valley (M.A. Thesis). Tel Aviv: Tel Aviv University.
48. Viala E. 2008. Water for food, water for life a comprehensive assessment of water management in agriculture. *Irrigation and Drainage Systems* **22**(1): 127-129.
49. Vörösmarty CJ, McIntyre PB, Gessner MO, et al. 2010. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature* **467**: 555-561.
50. Wichelns D. 2011. Assessing water footprints will not be helpful in improving water management or ensuring food security. *International Journal of Water Resources Development* **27**(3): 607-619.

51. Yegnes-Botzer A. 2001. Virtual water export from Israel: Quantities, driving forces and consequences (M.A. Thesis). IHE Delft, the Netherlands.
52. Zhuo L, Mekonnen MM, and Hoekstra AY. 2014. Sensitivity and uncertainty in crop water footprint accounting: A case study for the Yellow River basin. *Hydrology and Earth System Sciences* **18**(6): 2219-2234.