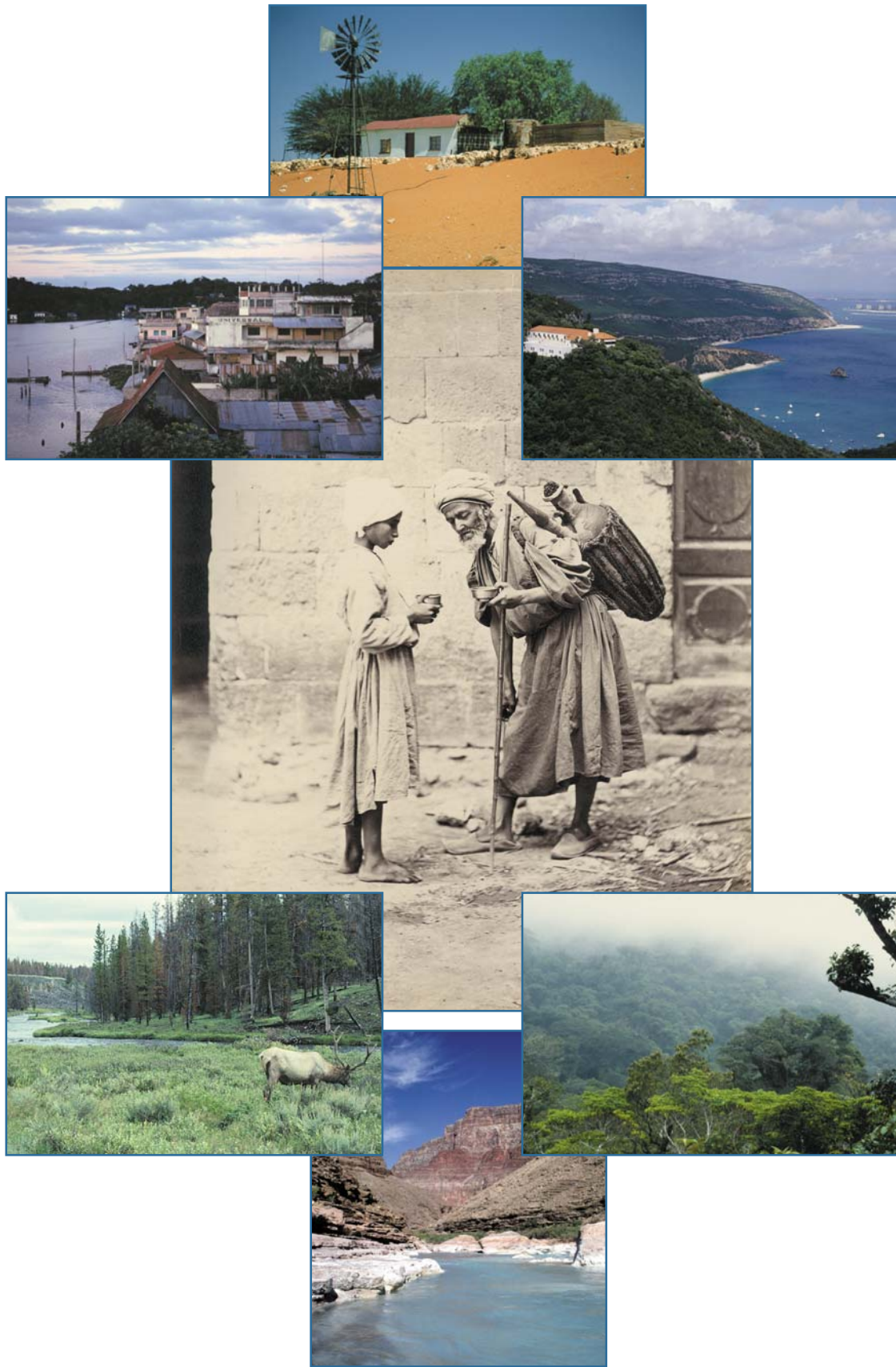


# מים בעולם משתנה



חורגם על ידי קמפוס טבע, אוניברסיטת תל-אביב (חורף 2005)

הופק על ידי החברה האקולוגית האמריקאית (אביב 2001)

# סוגיות באקולוגיה

החוברת פורסמה במקור ע"י החברה האקולוגית האמריקאית (2001) בסדרת החוברות סוגיות באקולוגיה. המהדורה העברית יצאה לאור על ידי קמפוס טבע באוניברסיטת תל-אביב (2005). כל הצילומים והאיורים לקוחים מהמהדורה באנגלית.

### חברי המערכת המדעית הישראלית:

**ד"ר יעל גבריאלי:** קמפוס טבע, אוניברסיטת תל-אביב  
**פרופ' תמר דיין:** המחלקה לזואולוגיה, אוניברסיטת תל-אביב  
**פרופ' דויד זלץ:** המחלקה לאקולוגיה מדברית ע"ש מרקו ולואיז מיטרני, המכון לחקר המדבר ע"ש יעקב בלאושטיין, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב  
**פרופ' יוסי לוי:** המחלקה לזואולוגיה, אוניברסיטת תל-אביב  
**פרופ' עוזי מוטרו:** המחלקה לאבולוציה, סיסטמטיקה ואקולוגיה, האוניברסיטה העברית בירושלים

### הוסיפו על ההיבט הישראלי:

**ד"ר אבי בורג:** האגף למשאבי טבע ומים, המכון הגיאולוגי לישראל  
**ד"ר שריג גפני:** המחלקה לזואולוגיה, אוניברסיטת תל-אביב

**עריכה:** ד"ר יעל גבריאלי וענת פלדמן  
**עריכה לשונית:** חיה וטנשטיין-מאייר  
**גרפיקה והבאה לדפוס:** סטודיו יריב סתיו  
**סייעו בהפקה:** סטודיו יריב סתיו ודפוס מקסם

### תודות

המהדורה האמריקאית יצאה לאור בסיוען של קרן Packard וקרן Pew.  
 המהדורה העברית יצאה לאור בסיוען קרן ברכה.

### לקבלת עותקים נוספים:

קמפוס טבע, אוניברסיטת תל-אביב, תל-אביב 69978  
 טלפון: 03-6405148, פקס: 03-6405253, דוא"ל [teva@tauex.tau.ac.il](mailto:teva@tauex.tau.ac.il)

ניתן להוריד קובץ PDF של החוברת מאתר קמפוס טבע [www.campusteva.tau.ac.il](http://www.campusteva.tau.ac.il)

# מים בעולם משתנה

נכתב במקור על ידי: Robert B. Jackson, Stephen R. Carpenter, Clifford N. Dahm, Diane M. McKnight, Robert J. Naiman, Sandra L. Postel, and Steven W. Running. הוסיפו על ההיבט הישראלי: אבי בורג, שריג גפני

## תקציר

לשימוש האדם. ■ יותר ממיליארד אנשים חסרים כיום גישה למי שתייה נקיים, ויותר משלושה מיליארד חסרים שירותים סניטריים בסיסיים. ■ בשל העובדה שאוכלוסיית האנושות תגדל מהר יותר מכל עלייה ביכולת האספקה של מים מתוקים, כמות המים המתוקים לאדם תקטן במאה הבאה. ■ שינוי האקלים יעצים את מחזור המים בטבע במאה הבאה, בעיקר על ידי הגברת הגשמים, קצבי האידוי ושכיחות הסערות, וישנה באופן משמעותי את מחזורי החומרים במערכות אקולוגיות יבשתיות המשפיעות על איכות המים. ■ לפחות 90 אחוזים מזרימת הנהרות בארצות הברית מושפעת באופן משמעותי מסכרים, ממאגרי מים, מהטיות זרימה ומשימוש לצורכי חקלאות המפריעים לזרימה הטבעית במורד.

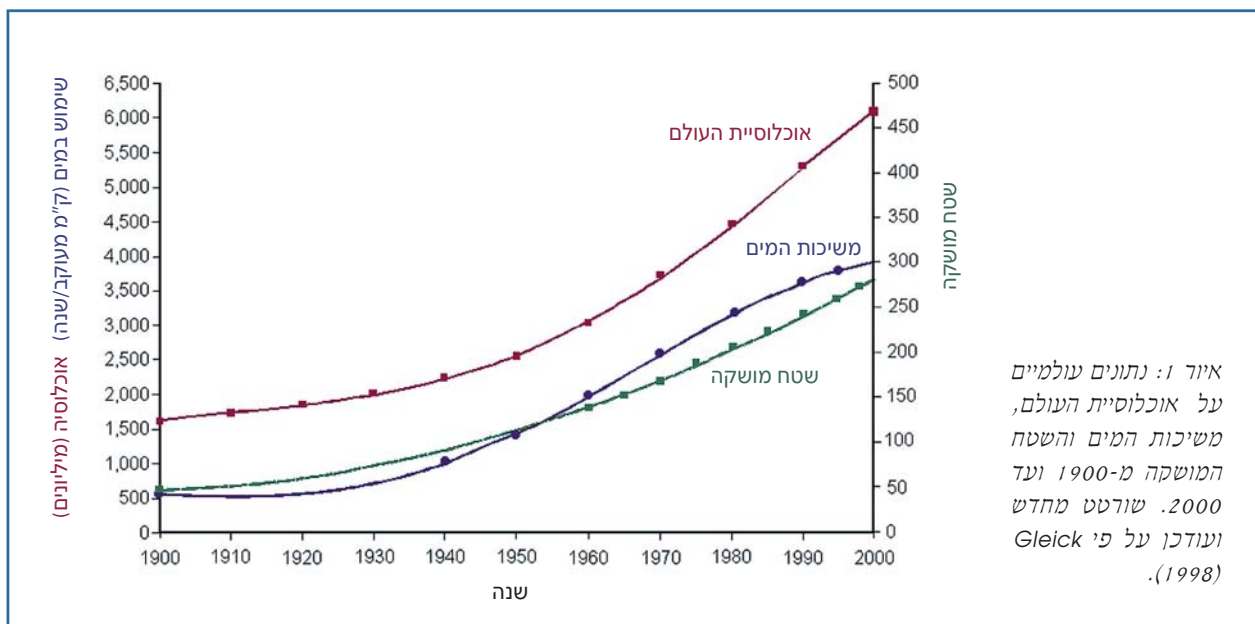
בקנה מידה עולמי, 20 אחוזים ממיני דגי המים המתוקים נמצאים בדרגות שונות של סכנת הכחדה או שכבר נעלמו, ומיני המים המתוקים מהווים עד 47 אחוזים מכלל בעלי החיים המצויים ברשימת המינים הנמצאים בסכנת הכחדה בארצות הברית.

דרישות הולכות וגדלות למשאבי המים המתוקים יוצרות צורך דחוף לקשור בין מחקר לבין ניהול משופר של משאבי המים, צורך שכבר בא לידי ביטוי בארצות הברית ובישראל במספר הצלחות של מדיניות משק המים.

החיים על היבשה ובאגמים, בנהרות ובשאר בתי הגידול הלחים על פני כדור הארץ תלויים לשם קיומם בהתחדשות מקורות המים המתוקים. המים המתוקים הם משאב המהווה רק חלק מזערי ממאגר המים העולמי. בני אדם מסתמכים על מים מתוקים לשתיה, להשקיה של גידולים חקלאיים, לתעשייה וכן לגידול דגה ועופות מים, לתחבורה, לבילוי ולסילוק פסולת.

כיום, כמות ואיכות המים המתוקים לסיפוק צורכי האדם מוגבלים כבר באזורים רבים בעולם. הפער בין היצע המים המתוקים והביקוש למים אלו יגדל במהלך המאה הבאה כתוצאה משינויי אקלים ומעלייה בצריכתם על ידי אוכלוסיית האדם הגדלה. לדוגמה, סביר להניח כי בשלושים השנים הבאות כמות המים הזורמים הזמינים לא תגדל מעבר ל-10 אחוזים, ואילו הצפי הוא כי אוכלוסיית כדור הארץ תגדל בשליש. אם בני האדם לא ישתמשו במים בצורה מושכלת יותר, ההשפעות של חוסר האיזון בין ההיצע לביקוש יפגעו בשירותים, שהמערכות האקולוגיות של מים מתוקים מספקות, יעלו את מספר המינים המימיים העומדים בפני הכחדה ויגרמו לקיטוע הולך וגדל של בתי גידול לחים, נהרות, נחלים ואסטוארים (אזור שפכי הנהרות לים שבהם מי הנהרות ומי הים מתערבבים).

על סמך העדויות המדעיות הקיימות היום, אפשר להסיק כי: ■ יותר ממחצית המים הזורמים הזמינים כבר מוקצים



## הקדמה

החיים על פני כדור הארץ תלויים בזרימה מתמדת של חומרים דרך האוויר, המים, הקרקע ומארגי המזון של הביוספירה. תנועת המים דרך המחזור ההידרולוגי (מחזור המים בטבע) היא הזרימה הגדולה מכולן, המספקת על פי הערכה 110,000 ק"מ מעוקב ( $\text{km}^3$ ) של מים ליבשה בכל שנה, בצורת גשם ושלג. עם זאת, מרבית המים שעל פני כדור הארץ הם מים מלוחים או מים שאצורים כקרחונים בקטבים, ורק חלק קטן הם מים מתוקים מתחדשים וזמינים לשימושי האדם. אנרגיית השמש היא המניעה את המחזור ההידרולוגי על ידי אידוי המים מפני שטח האוקיינוסים, האגמים, הנהרות, הקרקע והצמחים. אדי המים עולים לאטמוספירה, שם הם מתקררים, מתעבים ולבסוף יורדים כמשקעים. מחזוריות זו של אספקת המים המתוקים מקיימת את החיים ביבשה, בנהרות ובמערכות אקולוגיות של מים מתוקים על פני כדור הארץ.

התחדשות המים המתוקים מספקת שירותים רבים החיוניים לבריאות האדם ולרווחתו: מי שתייה, מים לייצור התעשייתי, להשקיה ולייצור דגים, עופות מים ומזונות מימיים נוספים. מים מתוקים מועילים בדרכים רבות גם בעת זרימתם באפיקי הזרימה הטבעיים שלהם: ויסות שיטפונות, תעבורה, בילוי, עיבוד פסולת, כוח הידרואלקטרי ובית גידול לצמחים ולבעלי חיים מימיים. חלק מהתועלות שאנו מפיקים ממים מתוקים כמו, למשל, השקיה או כוח הידרואלקטרי מושגות רק על ידי סכירת הזרימה הטבעית, הטייתה או יצירת שינוי משמעותי אחר בה. שינויים אלו מצמצמים או מונעים לעיתים קרובות תועלות אחרות המושגות על ידי זרימת המים המתוקים באפיקם, כגון: יצירת בתי גידול לחים מימיים או שימור איכות מים ראוייה לשימוש האדם.

התועלות האקולוגיות, החברתיות והכלכליות שמערכות מים מתוקים מספקות והערך החלופי שבין התועלת הצרכנית לתועלת של זרימת המים באפיקם ישתנו באופן דרמטי במאה הבאה. כבר במהלך מאה השנים האחרונות עלו באופן אקספוננציאלי כמויות המים בשימוש האדם בכל העולם וגדל השטח המצוי במשטר השקיה (איור 1). למרות הגידול העצום הזה בצריכה, הדרישות הבסיסיות למים של אנשים רבים בעולם עדיין אינן מסופקות. כיום, 1.1 מיליארד אנשים חסרים גישה למי שתייה נקיים, ו-2.8 מיליארד חסרים שירותים סניטריים בסיסיים. חסכים אלו גורמים לכ-250 מיליון מקרים של מחלות ולחמישה עד עשרה מיליון מקרי מוות מדי שנה. נוסף על כך, צרכים שאינם מסופקים כיום, מגבילים את יכולתנו להתאים את עצמנו לשינויים עתידיים באספקת המים ובפניזורם. מערכות רבות שקיימות כיום ומתוכננות לספק מים בתנאי אקלים יציבים יחסית, עלולות להתברר כבלתי כשירות להתאים את עצמן לשינויים עתידיים באקלים, בצריכה ובאוקולוסייה. בעוד שהראייה הגלובלית של ניצול המים חשובה על מנת להבטיח שימוש מים בר-קיימא, היא בלתי מספקת לאבטחת היציבות האזורית והמקומית. לכן, ממשק המים המתוקים באגני היקוות מסוימים, אזוריים או מקומיים, הוא בעל תפקיד מפתח לניהול משק מים בר-קיימא.

מטרת סקירה זו היא לתאר את המאפיינים המרכזיים של השינויים במחזור המים העולמי הנגרמים כתוצאה מפעילות האדם. השפעות הזיהום על זמינות מים ועל עלויות הטיהור נדונו בגיליונות אחרים של "סוגיות באקולוגיה" (שטרם פורסמו בעברית). בסקירה זו נתמקד בשינויים בהווה ובשינויים פוטנציאליים עתידיים במחזור המים אשר יכולים להיות משמעותיים במיוחד לתהליכים אקולוגיים. נתחיל בסקירה קצרה של מחזור המים העולמי, ובכלל זה מצבו כיום וההקשר ההיסטורי. בהמשך נבחן את שיעור השינוי הנגרם למחזור המים כיום כתוצאה מפעילות האדם ויכולת השפעתו בעתיד. שינויים אלו כוללים פעולות ישירות כמו, למשל, בניית סכרים והשפעות עקיפות כמו אלו הנגרמות על ידי שינויי אקלים כתוצאה מפעילות האדם. נבחן את הקצאות המים המתוקים בעולם על ידי האדם, ממקורות מתחדשים ושאינם מתחדשים. לסיכום, נדון בשינויים בשימוש במים אשר יהיו חשובים במיוחד בעתיד. נדגיש תהליכי התקדמות אחדים ונציע סדרי עדיפות למחקר, תוך הדגשת דוגמאות מארצות הברית ומישראל.

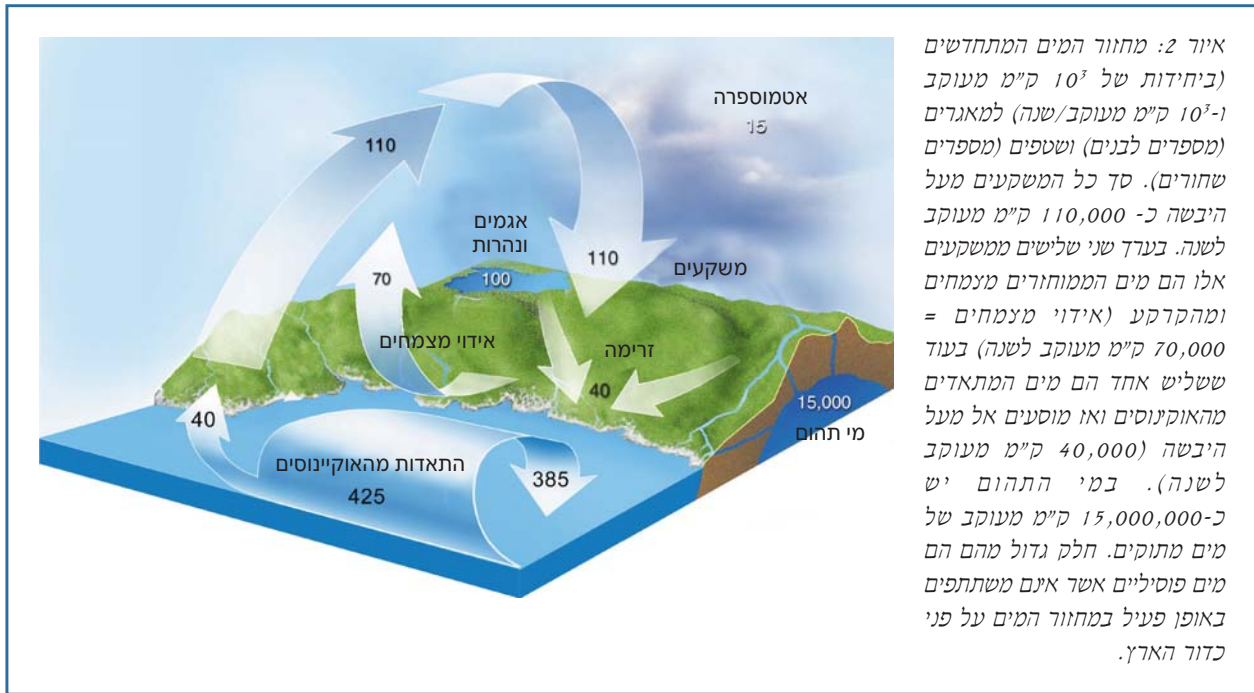
## מחזור המים העולמי

### מי פני-השטח

רוב כדור הארץ מכוסה במים – יותר ממיליארד ק"מ מעוקב. עם זאת, מרבית כמות המים הזאת אינה זמינה למערכות אקולוגיות יבשתיות או למערכות אקולוגיות של מים מתוקים. פחות משלושה אחוזים ממנה מתאימים לשתייה או להשקיית גידולים, ומתוך סך כל המים המתוקים הללו – שני שלישים לכודים בקרחונים ובכיפות הקרח בקטבים. כמות המים המתוקים בכל העולם, באגמים ובנהרות, היא 100,000 ק"מ מעוקב, פחות מ-1/10,000 מכלל כמות המים על פני כדור הארץ (איור 2).

לאדי המים שבאטמוספירה השפעה חשובה על האקלים ועל מחזור המים, אף-על-פי שרק 15,000 ק"מ מעוקב מהמים מצויים בדרך כלל באטמוספירה בכל זמן נתון. עם זאת, חלק מזערי זה חיוני לקיומה של הביוספירה. אדי מים הם הגז החשוב ביותר מבין הגזים המכונים גזי החממה [האחרים הם: דו-תחמוצת הפחמן ( $\text{CO}_2$ ), תחמוצת חנקן ( $\text{N}_2\text{O}$ , Nitrous Oxide) ומתאן ( $\text{CH}_4$ )], המחממים את כדור הארץ על ידי לכידת החום באטמוספירה. אדי המים תורמים בערך שני שלישים משיעור החימום שמספקים גזי החממה. ללא גזים אלו הטמפרטורה הממוצעת של פני כדור הארץ הייתה הרבה מתחת לנקודת הקיפאון, ובמרבית אזורי כדור הארץ היו חסרים מים במצב נוזלי. חשובה לא פחות לקיום החיים היא העובדה, כי המים האטמוספריים מתחלפים בממוצע כל עשרה ימים – אדי המים יורדים כמשקעים לאדמה, וחום השמש מאדה אספקה חדשה של אדי מים מהמאגרים הנוזליים שעל פני כדור הארץ.

אנרגיית השמש מאדה בדרך כלל כ-425,000 ק"מ מעוקב



נרחב של בתי גידול לחים ואזורי הצפה מקטין את יכולתם לקלוט את הזרימות הגבוהות האלו ומגביר את ההסעה של נוטריאנטים עודפים ושל מזהמים במי הנגר העילי לשפכי הנהרות ולאזורי חוף נוספים.

בעבר, אגם החולה שימש כמאגר שקלט את העכירות מאגן ההיקוות של הזרימות בנחלי הירדן. מאז ייבושו של האגם בשנות ה-50 של המאה הקודמת, קולטת הכנרת את עכירות האגן.

יותר ממחצית מבתי הגידול הלחים בארצות הברית כבר חוסלו בדרכים שונות: ניקוז, עבודות עפר, מילוי או עיבוד חקלאי.

בישראל, הנמצאת על גבול המדבר ומתאפיינת בחלוקה ברורה לעונה גשומה ולעונה יבשה, המצב דומה. למשל, מקווי מים עונתיים (שלוליות חורף) היו בעבר מרכיב נוף שכיח בארץ. ב-70 השנים האחרונות ירד מספרם של מקווי המים העונתיים בישראל בלמעלה מ-95 אחוזים.

המים הזמינים אינם מחולקים בעולם באופן שווה. שני שלישים מכל המשקעים יורדים באזורים הטרופיים (בין קו רוחב 30 צפון ו-30 דרום) כתוצאה מקרינת שמש גבוהה יותר ומהתאדות. האידיוי היומי מהאוקיינוסים נע בין 0.4 ס"מ בקו המשווה לפחות מ-0.1 ס"מ בקטבים. האזורים הטרופיים מתאפיינים בזרימת נגר עילי רבה יותר. כמחצית מהמשקעים שיוורדים ביערות הגשם הופכים לנגר עילי, בעוד שבמדבריות מיעוט המשקעים יחד עם קצב התאדות גבוה מצמצמים מאוד את זרימת מי הנגר. האמזונס, לשם דוגמה, מסיע 15 אחוזים מכלל המים בעולם החוזרים כנגר עילי לאוקיינוסים. בניגוד לכך, באגן הניקוז של נהר הקולורדו, שגודלו עשירית משל האמזונס, הזרימה העונתית של מי הנגר קטנה פי 300.

של מי אוקיינוסים מדי שנה. מרביתם של מים אלו מומטרים ישירות חזרה לאוקיינוסים, אבל כעשרה אחוזים מהגשמים יורדים על היבשה. אילו היה זה המקור היחיד לגשם, כמות המשקעים הממוצעת בפיזור שווה על כל השטח היבשתי הייתה רק 250 מילימטרים לשנה; ערך האופייני למדבריות ולאזורים צחיחים למחצה. מקור שני וגדול יותר של מים הנכנסים למחזור מגיע מאידיוי מים מהצמחים ומהקרקע. אדי המים ממקור זה יוצרים מערכת של היזון חוזר ישיר בין פני שטח היבשה וכן האקלים האזורי. המחזור של שאר החומרים, כגון: פחמן וחנקן (מעגלים ביו-גיאוכימיים) מצומד לשטף המים דרך דגמי הגידול של הצומח והפירוק המיקרוביאלי. צימוד זה יוצר מערכות משוב נוספות בין הצומח והאקלים. מקור שני זה של מחזור מים תורם שני שלישים מ-700 המילימטרים (ממוצע עולמי) של משקעים היורדים על פני היבשה בכל שנה. מחושבים יחד, שני מקורות מים אלה מסתכמים ב-110,000 ק"מ מעוקב של מים מתחדשים בכל שנה זמינים למערכות האקולוגיות ביבשה, במאגרי מים מתוקים ובנהרות (איור 2).

כמות הגשם היורדת על הקרקע גדולה מכמות המים המתאדה ממנה, ולכן העודף בשיעור 40,000 ק"מ מעוקב חוזר לאוקיינוסים, בעיקר דרך הנהרות והאקוויפרים התת-קרקעיים. בדרכם לים, חלק ממים אלה זמינים לשימוש האדם. הכמות הזמינה לאדם מושפעת מכמה גורמים: צורת המשקעים - גשם או שלג, עיתוי המשקעים ביחס לדגמים העונתיים של טמפרטורה ואור שמש והטופוגרפיה האזורית. לדוגמה, באזורים הרריים רבים מרבית המשקעים יורדים בצורת שלג בחורף, והפשרת השלגים באביב יוצרת זרימות שיא המציפות את מערכות הנהרות העיקריים. בחלק מהאזורים הטרופיים, גשמי המונסון ולא הפשרת שלגים יוצרים שיטפונות עונתיים. באזורים אחרים עודף משקעים מחלחל לאדמה וממלא מחדש את מאגר מי התהום או נאגר בבתי גידול לחים. אולם חיסול

עשויים להיות גדולים מאוד. לאמיתו של דבר, חלק גדול ממי התהום אינם מתחדשים על ידי מילוי חוזר מפני השטח. מים אלה מוגדרים כ"מים פוסיליים" (מאובנים), שריד לתנאים קדומים לחים יותר או למים שנמסו ממשטחי הקרח בתקופת הפליסטוקן ונאגרו במשך עשרות אלפי שנים. מאגר מים פוסיליים שיישאב, ילך ויתרוקן, מאחר שאיננו מתחדש או כמעט שאיננו מתחדש על ידי מילוי חוזר עכשווי.

ברחבי הנגב מצויים בתת-הקרקע מים פוסיליים בכמות גדולה. מים אלה הם שריד לתקופה היסטורית קדומה שבה ירד גשם רב באזור, והגשם מילא את מאגרי מי התהום העמוקים. המים הפוסיליים מנוצלים כיום בנגב ובערבה לצרכים מקומיים, בעיקר לחקלאות.

האבחנה בין מי תהום מתחדשים לאלו שאינם מתחדשים היא מהותית לניהול משק מים ולמדיניות המים. יותר משלושה רבעים ממי התהום לא מתחדשים; כלומר, תקופת הזמן הנדרשת לחידושם נפרשת על פני מאות שנים או יותר (איור 3). האקוויפר הגדול בעולם הוא, כנראה, אקוויפר המישורים הגדולים (אוגלאלה) במרכז ארצות הברית, המצוי מתחת לשטח בן חצי מיליון דונם. זמינות של טורבינות שאיבה ואנרגיה לא יקרה יחסית הביאו לקידוחם של כ-200,000 בארות לתוך האקוויפר מאז שנות ה-40 של המאה ה-20, וכך הפכה אוגלאלה למקור המים העיקרי לחמישית משטחי החקלאות של ארצות הברית. שיעור שטחי היבולים שהושקו

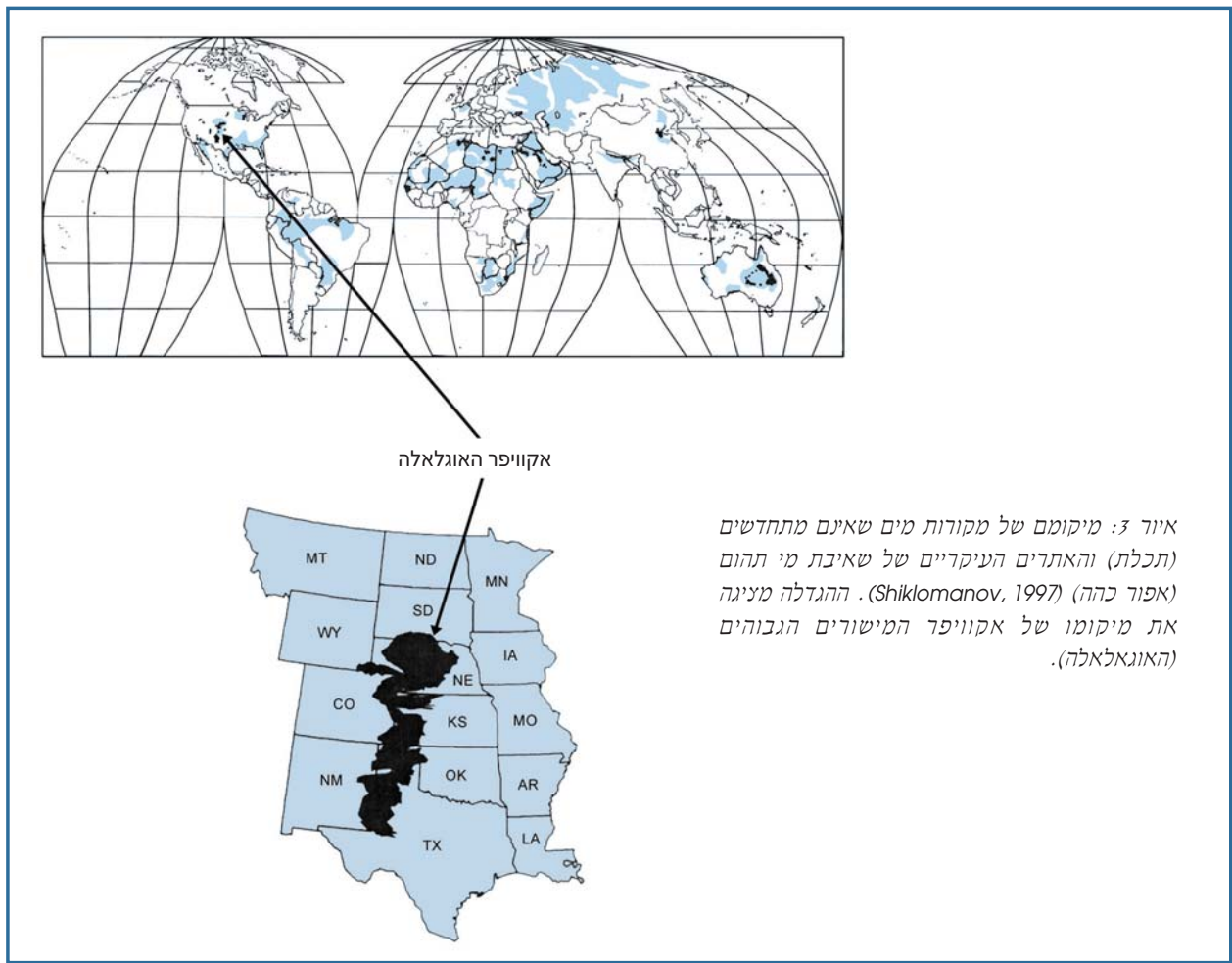
שונות דומה אפשר למצוא גם בקנה מידה של יבשות. הנגר הממוצע באוסטרליה הוא רק ארבעה ס"מ בשנה, נגר הקטן פי שמונה מהנגר בצפון אמריקה וקטן בכמה סדרי גודל מהנגר באמריקה הדרומית הטרופית. עקב כך ועקב הבדלים רבים נוספים זמינות המים המתוקים שונה ברחבי העולם.

### מי תהום

כ-99 אחוזים מכלל המים המתוקים במצב נזלי מצויים באקוויפרים תת-קרקעיים (איור 2), ולפחות רבע מאוכלוסיית העולם שואבת את מימיה ממאגרי מי תהום אלה. מקובל להניח, שיש איזון בין זרימות המים לתוך מי התהום לבין הזרימות המתנקזות מהם. אולם בפועל משאב מי התהום מנוצל ניצול יתר בכל העולם, וכך גם בישראל.

בממוצע רב-שנתי מנוצל משאב המים בישראל מעבר לפוטנציאל ההתחדשות שלו, מצב המביא לגרעון הולך וגדל במאגר זה ולירידה משמעותית במפלס המים באקוויפרים.

בדרך כלל, קצב החלפת המים במאגרים התת-קרקעיים הוא אטי יחסית למאגרי מים אחרים (אלה המצויים על פני השטח). זמן השהות של המים בתת-הקרקע עשוי להגיע למאות עד עשרות אלפי שנים, וההבדלים בין מאגרים תת-קרקעיים



את ביציהם מחימום יתר או מקפיאה. חילופים דינמיים של מי פני-שטח ומי תהום משנים את ריכוזי החמצן המומס והנוטריאנטים של הנחלים ומוהלים את ריכוזי המזהמים המומסים, כגון: חומרי הדברה ותרכובות אורגניות נדיפות. בגלל קשרים אלו הפיתוח של מי תהום או של מי פני השטח על ידי האדם משפיע פעמים רבות על כמות ועל איכות המים הללו.

בישראל שאיבת יתר מאקוויפר החר, שהזין בעבר את מקורות הירקון, גרמה לירידת מפלס מי התהום ולהתייבשות האחרונים. נחל הירקון מתוגבר כיום באופן מלאכותי על ידי מי קידוחים.

הקשרים בין מי פני-השטח ומי התהום חשובים במיוחד באזורים שבהם כמות המשקעים נמוכה (ראה מסגרת 1, טבלה 1, איור 4). אזורים צחיחים וצחיחים למחצה מהווים שליש משטח היבשה ואזור מחיה לחמישית מאוכלוסיית העולם. באזורים אלו, שבהם נמצאים חלק גדול מהאקוויפרים הגדולים של העולם, מי תהום הם מקור המים העיקרי לשתייה ולהשקיה. מילוי חוזר מוגבל הופך אקוויפרים אלו לפגיעים, במיוחד לשאיבת יתר של מי התהום. לדוגמה, הניצול של אקוויפר צפון הסהרה בשנות ה-90 של המאה ה-20 היה כמעט פי שניים מקצב המילוי החוזר שלו, וחלק גדול מהמעיינות הקשורים לאקוויפר זה התייבשו. לגבי מקורות מי תהום בלתי מתחדשים, קשה לדון בקצב שאיבה ראוי או ברקיימא מאחר שכל שאיבה היא שאיבת יתר. המצב הזה דומה למרבצי פחם ונפט. אחת השאלות החשובות שיש לשאול את החברה האנושית היא: מהו קצב השאיבה שיש להתיי, לאילו מטרות, ומי ישמור, אם בכלל, על הצרכים של הדורות הבאים? באקוויפר אוגלאלה, למשל, המים ייעלמו כנראה תוך זמן קצר של כמאה שנים.

## ניצול משאבי המים על ידי האדם

### משאבי מים מתחדשים בעולם

הגידול באוכלוסיית העולם ובצריכת המים ייצור לחץ נוסף על מקורות המים המתוקים במאה הקרובה. מחזור המים מאפשר כיום פי כמה וכמה יותר מים מהנדרש על מנת לקיים את אוכלוסיית העולם המונה שישה מיליארד איש (טבלה 2). עם זאת, הפיזור של מים אלו במרחב הגאוגרפי ובזמן אינו תואם את צורכי האנושות. שטפי הזרימה העצומים בנהרות שבאגני ההיקוות של האמזונס וקונגו-זאיר ובשורת הנהרות הבלתי מפותחים של צפון הטונדרה והטייגה באירואסיה ובצפון אמריקה הם ברובם בלתי זמינים לשימוש האדם, וכנראה יישארו כך גם בעתיד הנראה לעין. בנהרות מרוחקים אלו זורמת כחמישית מסך כל הזרימה העולמית של מים.

כמחצית מכלל כמות משאבי המים המתחדשים זורמת לים בצורת שיטפונות (טבלה 2). במערכות נהר מנוהלות של צפון אמריקה ואזורים רבים אחרים, מי השיטפונות של המסת השלגים באביב מוסטים למאגרים לשימוש מאוחר יותר. באזורים הטרופיים, חלק נכבד מהזרימה השנתית מתרחש

הגיע לשיא ב-1980 לערך ועמד על 56 מיליון דונם עם קצב שאיבה של 22,710 ק"מ מעוקב (6 טריליון גלונים) מים בכל שנה. מאז פחתה כמות השאיבה כתוצאה מדלדול מי התהום ומשינויים סוציו-אקונומיים באזור. בשנות ה-80 של המאה ה-20 בלבד ירד העובי הממוצע של אוגלאלה ביותר מחמישה אחוזים בכחמישית משטח השתרעותו.

לעומת האקוויפרים הפוסיליים, אקוויפרים מתחדשים תלויים במילוי חוזר המגיע מגשמי ההווה, ולכן הם רגישים לשינויים בכמות של מי המילוי החוזר ובאיכותם. לדוגמה, שאיבת מי תהום מהאקוויפר המספק חלק נכבד ממי השתייה של טקסס (אקוויפר אדוארדס) גדלה פי ארבעה מאז שנות ה-30 של המאה ה-20, וכיום היא עולה לעיתים על קצב המילוי החוזר השנתי.

גם בישראל גדולה שאיבת מי התהום מהאקוויפרים העיקריים (אקוויפר החוף ואקוויפר החר) מנפח המילוי החוזר.

עלייה בשאיבת המים גורמת לאקוויפרים להיות רגישים יותר לבצורות ולשינויים אחרים באקלים. דלדול מי התהום (באקוויפרים רדודים, לא באלו הגדולים של ישראל) עלול לגרום גם לצניחת הקרקע ולדחיסה של חול נקבובי, חצץ או סלע של האקוויפר, וכך עלול לצמצם באופן קבוע את היכולת לאגור מים. העמק המרכזי של קליפורניה איבד בדרך זו 25 ק"מ מעוקב של יכולת האגירה, קיבולת השווה ליותר מ-40 אחוזים מכלל הקיבולת במאגרים בארצות הברית שנבנו על ידי האדם.

תופעה אחרת הנובעת משאיבת יתר ומאפיינות, לדוגמה, את אקוויפר החוף בישראל היא התקדמות הפן הביני - אזור המגע בין מי התהום המתוקים לבין מי הים המלוחים - אל תוך היבשה. תופעה זו באה לידי ביטוי בהמלחה בלתי הפיכה של בארות. שאיבת יתר זו גורמת לשני נזקים נוספים: לירידה של מפלס המים, אשר דורשת השקעות אנרגטיות הולכות וגדלות של שאיבת מים מעומקים הולכים וגדלים, ולירידה באיכות המים בשל הפרת המצב הטבעי כניסתם של גופי מים באיכות שונה לאקוויפרים.

מי תהום מתחדשים ומים בפני השטח נבחנים, בדרך כלל, בנפרד, גם מדעית וגם משפטית. אולם כיום התייחסות זו משתנה לאור מחקרים בנחלים, בנהרות, במאגרים, בבתי גידול לחים ובשפכי נהרות, המצביעים על חשיבות יחסי הגומלין בין מי פני-השטח לבין מי התהום המתחדשים בכל הקשור לאספקת מים, לאיכות המים ולבתי הגידול המימיים. כאשר שאיבת המים עולה על קצב המילוי החוזר, התוצאה היא מפלסי מים נמוכים יותר. בקיץ, כאשר נדרש גובה מפלס גבוה כדי לקיים מינימום זרימה (זרימת בסיס) בנהרות ובנחלים, מפלסים נמוכים של מי תהום יכולים להוריד עוד יותר את קצב הזרימה הנמוך בלאו הכי, לצמצם את בתי הגידול העונתיים של הנחלים, להעלות את טמפרטורות המים בנחלים ולפגוע באיכות המים.

מינים של דגי שמך וסלמון, המאפיינים אזורים של מים קרים בעולם, בוחרים אזורים של נביעות מי התהום בתוך הנחלים כדי להתגבר על הטמפרטורות העונתיות הקיצוניות ולשמור

## מסגרת 1: הריו-גרנדה התיכון

גידול בביקוש למים יוצר ניגודים בין צורכי האדם ובין צורכי המערכות הטבעיות. אין מקום בעולם שבו השפעת האדם על המערכות האקולוגיות של נהרות ושל מישורי ההצפה שלהם גדולה יותר מאשר באזורים צחיחים וצחיחים למחצה. אגן ההיקוות של נהר הריו גרנדה התיכון במרכז ניו-מקסיקו בארצות הברית הוא אזור הנמצא בפיתוח מהיר והמקיים יותר ממחצית אוכלוסיית המדינה. השאיפה לאזן את צורכי המים, הביאה לפיתוח מאזן מים שקול וזהיר לאגן ההיקוות (טבלה 1), המתייחס לשונות השנתית, לאי-הוודאות לגבי המדידות ולצורכי מים שונים של האזור. המטרה של מאזן המים היא לסייע בעיצוב מדיניות מים נכונה.

ממשק המים כבר שינה באופן משמעותי את המערכת האקולוגית של מישור ההצפה (איור 4). סכרים ותעלות נהר מונעים את הצפות האביב. אזורי הגדות, שכעת מוגבלים על ידי מערכת בנויה של סוללות הגנה, אכלסו בעבר פסיפס של חברות צומח של צפצפות וערבות, כרי דשא לחים, ביצות ואגמים. השיטפונות האחרונים הגדולים שהיו עם ביסוס משמעותי של צפצפות התרחשו ב-1942, וכיום הצפצפות מצטמצמות ברוב האזורים. מחצית מבתי הגידול הלחים באזור ההיקוות נעלמו תוך 50 שנה. פלישתם של מינים זרים בעלי מערכות שורשים עמוקות, כגון: אשל סיני (*salt cedar, Tamarix chinensis*) ועץ השמן המכסיקי (*Russian-olive, Elaeagnus angustifolia*), שינו באופן דרמטי את הרכב חברת היער של הגדות. התחזית היא, כי ללא שינוי בממשק המים, מינים אקזוטיים ישתלטו על אזורי הגדות בתוך חצי מאה.

מאזן המים של הריו גרנדה התיכון משקף תמורות עכשוויות בהידרולוגיה, באקולוגיה של הגדות ובשאיבת מי התהום. הערכה של כלל היקף דלדול המים באגן ההיקוות הכרחית

לממשק המים שלו. עיקר צריכת המים ואבדן המים במערכת כולל שימושים עירוניים, השקיה, דיות מצמחים, אידוי מפני שטח ודליפה לאקוויפר. האבדן העיקרי – שליש מסך הכול – נגרם על ידי אידוי מפני השטח. אבדן זה גדול ביחס לערכים שהיו לפני הסכירה. גורם האבדן השני במעלה הוא הדיות מצמחי הגדה (135 עד 340 מיליון קו"ב (מ<sup>3</sup>) לשנה). ישנה אי-ודאות רבה ביחס להערכה זו בגלל השפעות בלתי ידועות של תנודות הנהר על הדיות והבדלים בקצב הדיות בין הצמחים המקומיים לזרים. חקלאות שלחין באזור הריו גרנדה התיכון אחראית לכ-20 אחוזים נוספים של אבדני מים, ואופי הגידולים, מזג האוויר וזמינות המים תורמים להבדלים השנתיים. הצריכה העירונית והאבדן נטו לאקוויפר דומים ומהווים יחד 20-25 אחוז מאבדני המים בריו גרנדה התיכון.

האבדן השנתי הממוצע מאוזן באופן חלקי על ידי מים מפרויקט סאן חואן-צ'אמה, מזרימה מייבילים באגן ומשחרור מי שופכין עירוניים. עם זאת, שאיבת המים כבר משתווה לכניסות בשנת מים ממוצעת. שימוש מוניציפלי במי סאן חואן-צ'אמה, בצורת מתמשכת והמשך גידול האוכלוסייה יגדילו את הלחץ על משאבי המים של פני השטח. לא נראה כי יהיו מקורות מים חדשים בעתיד הנראה לעין, ועל כן החיסכון במים יתחיל למלא תפקיד מרכזי במדיניות המים בעתיד.

מאזן מים זהיר ושקול, כפי שמתואר לעיל, חיוני בעיצוב מדיניות מים בת-קיימא. עבור הריו גרנדה התיכון, יש הכרח במדידות מדויקות ארוכות טווח זמן של שטפי מי הנגר, של האידוי מהצומח ומהקרקע, של מילוי חוזר נטו לאקוויפר ושל מפלסי מי התהום. לפעולות אגירה, לבקרת מינים אקזוטיים, לתכנון השימוש בקרקע ולחיסכון בצריכה החקלאית והעירונית יהיה תפקיד חשוב לעתיד בר-קיימא של משק המים באזור. לאזורים צחיחים וצחיחים למחצה אחרים בעולם, שבהם האיזון בין צרכים מגוונים למים יהיה אתגר קשה וחשוב, יש צורך דומה במידע בסיסי ובתכנון מים זהיר.

טבלה 1 - מקורות וצריכה ממוצעת שנתית מ-1972 ועד 1997 לדיו גרנדה התיכון (אגן היקוות של 64,000 קמ"ר בין אוטווי גייג' צפנית לסנטה פה וסכר אלפנט ביוט). נתוני הזרימה באוטווי גייג' - נקודת מדידת השטף לאורך של הריו גרנדה התיכון - מקיפים יותר ממאה שנה. תוספת מים מההטיה של הסאן חואן-צ'אמה החלה ב-1972 והעלתה את שטף הזרימה ב-70 מיליון קו"ב לשנה (הזרימה הממוצעת ללא מים אלו היתה כ-1400 מיליון קו"ב בשנה). מערכות מוניציפליות עיקריות באגן שואבות כיום מי תהום בקצב של 85 מיליון קו"ב בשנה. מקסימום הצריכה המותרת לאורך היא 500 מיליון קו"ב לשנה, וזאת כאשר הזרימה השנתית עולה על 1900 מיליון קו"ב לשנה, והיא מופחתת באופן מדורג עד ל-58 מיליון קו"ב לשנה בשנות בצורת חמורות (או כניסות המים למערכת הן 120 מיליון קו"ב לשנה באוטווי גייג').

מקור המים	אספקה (מיליון קו"ב לשנה)
השטף הממוצע של אוטווי הטיית סאן חואן-צ'אמה	1360 70

שימוש במים	משיכה (מיליון קו"ב לשנה)
אידוי מפני השטח	270
דיות מצמחי גדות	220
חקלאות שלחין	165
צריכה עירונית (מי תהום)	85
מילוי חוזר נטו	85





איור 4: צומח גדות שונה באזור הריו גרנדה התיכון דרומית לאלבקרקי, ניו מקסיקו: אתר בו חברת צפצפה משלשת היא הדומיננטית (מימין) ליד לוס לונאס ואתר בו המין הפולש אשל סיני דומיננטי (משמאל) באתר הטבע המוגן הלאומי סבילטה. ממשק מים, במיוחד בניית סכרים והפניית הנהר, שינו באופן ניכר את המערכת האקולוגית של מישור ההצפה. ההצפות הגדולות האחרונות עם התבססות משמעותית של הצפצפות היו ב-1942. פלישה על ידי מינים אקוטיים בעלי מערכות שורשים עמוקות, כגון: אשל סיני, הנראה כאן, ועץ השמן המכסיף שינו באופן דרמטי את הרכב היער של הגדות. ללא שינויים בממשק המים, מינים אקוטיים כנראה יהיו דומיננטים באזורי גדות באגן הריו גרנדה התיכון במחצית המאה הקרובה.

ברחבי העולם קיימים כ-40,000 סכרים גדולים שגוברים עולה על 15 מטרים, ומספר הסכרים הקטנים גדול פי 20. כל המאגרים בעולם יכולים להחזיק יחד 6,600 ק"מ מעוקב מים בכל שנה. כמות הרבה יותר קטנה מכך מגיעה לחקלאות, למפעלי התעשייה ולערים, משום שחלק מסכרים וממאגרים אלו מנוצלים גם לייצור חשמל, לוויסות שיטפונות ולשיפור התעבורה בנהרות.

לסיכום, לאחר שמוציאים מכלל חשבון את הנהרות המרוחקים ואת קיבולת המאגרים שמנוצלים למטרות אחרות מאשר אספקת מים, סך כל המים הזורמים הזמינים לשימוש האדם הם בערך 12,500 ק"מ מעוקב לשנה, שהם 31 אחוזים מסך כל הנגר העילי.

ראוי להדגיש כי בשנים האחרונות גוברת בקרב הקהילה המדעית ההכרה, שההשפעה הסביבתית השלילית של הקמת סכרים ומאגרים עולה לאין שיעור על התועלת שבהקמתם. הקמת הסכרים פוגעת בעיקרון החשוב של רציפות הנחלים (river continuum concept), וריסון השיטפונות פוגע בתפקוד האקולוגי המאוזן של מערכות הנחלים. לפיכך, מתנהלת בשנים האחרונות פעילות ענפה במגמה לפרק סכרים שהוקמו בעבר ולהשיב לקדמותו את משטר הזרימה הטבעי של הנחלים.

### שימוש האדם במים

אנשים משתמשים במים מתוקים/שפירים למטרות רבות. אנשים שואבים מים מערוצם הטבעי או מאגן היקוות שלהם לשלושה שימושים עיקריים: השקיה של גידולים חקלאיים, פעילויות תעשייתיות ומסחריות ושימושים ביתיים. במקרים רבים אפשר להשתמש במים יותר מפעם אחת לאחר שנשאבו. מים שנעשה בהם שימוש אך לא ממש נצרכו פיזית – להדחת כלים, לדוגמה – אפשר להשתמש בהם שנית, אף כי לעתים הדבר דורש טיפול נוסף. בניגוד לכך, כמחצית מהמים הנשאבים להשקיה מתאדים

בזמן שיטפונות המונסון. באסיה, לדוגמה, 80 אחוזים מהזרימה מתרחשת בין מאי לאוקטובר. אף כי מי שיטפונות אלו מספקים שירותים אקולוגיים מגוונים, ובכללם קיום בתי גידול לחים, הם אינם מהווים מקור שימושי להשקיה, לתעשייה ולצריכה ביתית, הדורשים אספקת מים בכמויות מבוקרות בזמנים מסוימים.

על כן, יש שתי קטגוריות של מי נגר זמינים לצורכי האדם: (1) מי תהום מתחדשים וזרימת הבסיס בנהרות – זרימה קבועה בנהרות שאיננה תלויה שיטפון. זוהי הזרימה שמספקים מקורות מים יציבים. כך לדוגמה, הירדן ניזון מזרימת בסיס ממעיינות הדן, הבניאס והחצבאני. (2) מי שיטפונות הנלכדים ונאגרים במאגרים.

זרימות הבסיס בנהרות ומי התהום המתחדשים מסתכמים בכ-27 אחוזים מסך כל זרימת מי הנגר העולמית מדי שנה. כל זמן שקצב צריכת המים אינו עולה על קצב המילוי החוזר על ידי גשמים, מקורות אלו יכולים לשמש משאב בר-קיימא. למרבה הצער, במקומות רבים, ובכללם אזורים חקלאיים חשובים רבים, מתקיימת בקביעות שאיבת יתר של מי התהום. נתונים לגבי סין, הודו, צפון אפריקה, ערב הסעודית וארצות הברית מראים, כי ריקון מאגרי מי התהום באגני הניקוז העיקריים מסתכם ב-160 ק"מ מעוקב לשנה לפחות. שאיבת יתר חמורה במיוחד בהודו, ומספר מומחי מים כבר הזהירו, כי עד רבע מיבולי הדגנים של הודו מצויים בסכנה כתוצאה מכך. העובדה, שניצול של מי התהום בעולם כולו מתחת לקצב המילוי החוזר העולמי, אין פירושה שניצולם באזורים ספציפיים הוא בר-קיימא. מה שחשוב הוא ממשק המים באגנים מסוימים, וישנם אזורים רבים בעולם בהם הדרישה כיום עולה על הכמות המותרת לניצול.

הפיכת מי השיטפונות למשאב זמין דורשת בדרך כלל בניית סכרים ומאגרים כדי ללכוד, לאגור ולווסת את זרימת המים.

40,700	<b>סך כל הזרימה העולמית</b>
	זרימה מרוחקת:
5,400	אגן האמזונס
660	אגן זאיר-קונגו
1,740	נהרות צפוניים מרוחקים
7,800	<b>סך כל הזרימה המרוחקת</b>
20,400	מי שיטפונות שאינם נלכדים
12,500	<b>זרימה זמינה</b>
	סך כל הניצול העולמי:
2880	חקלאות
975	תעשייה
300	ערים
275	אבדן במאגרים
4,430	<b>סך כל הניצול העולמי</b>
2,350	<b>שימושים בתוך הזרימה</b>
6,780	<b>סך כל השימוש על ידי האדם</b>

טבלה 2 - הזרימה העולמית, הניצול ואופן הקצאות השימוש על ידי האדם של מקורות המים המתוקים של מי הנגר העילי (ביחידות של ק"מ מעוקב לשנה).

זרימה מרוחקת היא זרימת נהרות שאינם זמינים מבחינה גאוגרפית, והיא מוערכת ב-95 אחוזים מהזרימה באגן האמזונס, 95 אחוזים בנהרות המרוחקים של צפון-אפון-אמריקה ואירואסיה ומחצית הזרימה באגן זאיר-קונגו. הערכות הזרימה של הנגר העילי כוללות גם מי תהום מתחדשים. ההערכה היא כי 18 אחוזים (או 2,285 ק"מ מעוקב לשנה) של המים הזורמים הזמינים נצרכים, אף כי אנשים משתמשים באופן ישיר או עקיף ב-6,780 ק"מ מעוקב לשנה או 54 אחוזים מהזרימה הזמינה. מים שנשאבים אך אינם נצרכים לא תמיד חוזרים לאותו הנהר או האגם שמהם נשאבו. לקוח מ- (Postel et al. 1966), ומבוסס על נתונים נוספים מ- (Czaya 1981), (L'Vovich et al. 1990), (Shiklomanov 1997)

המים מפני שטח המאגרים על ידי אידוי) מסתכמת ב-4,430 ק"מ מעוקב לשנה, ו-52 אחוזים מכך משמשים לצריכה. שימוש במים או שאיבתם עלולים לשנות גם את איכות המים הנותרים באגן או באפיק על ידי העלאת ריכוז היונים העיקריים, הנוטריאנטים או המזהמים. כפי שאפשר ללמוד מהדוגמה של ימת ארל, השפעה זו יכולה להגביל את מידת ההתאמה של מים אלו לשימוש עתידי.

נוסף על המים הנשאבים מהמערכות הטבעיות, פרויקטים רבים נסמכים על מים באפיקיהם הטבעיים. שימושים אלו במים בתוך מערכת הזרימה הטבעית שלהם כוללים דילול מזהמים, בילוי ונופש, תעבורה, קיום שפכי נהר בריאים, קיום חקלאות מדגה והגנת המגוון הביולוגי. כיוון שהשימושים במים באפיקיהם הטבעיים משתנים בין האזורים ובין העונות, קשה להעריך את כמותם העולמית. אם דילול מזהמים נלקח כמייצג, כמות המים שבהם נעשה שימוש באפיקי הזרימה יכול להסתכם ב-2,350 ק"מ מעוקב לשנה בהערכה שמרנית, שאינה כוללת את כל השימושים.

נתון זה של שימוש באפיקי הזרימה יחד עם ההערכה של שיעור השאיבה העולמית מסתכם ב-6,780 ק"מ מעוקב מים לשנה. פירוש הדבר, כי אנשים מנצלים כיום 54 אחוזים מכלל המים המתוקים הזורמים כנגר עילי בכדור הארץ.

הדרישה העולמית למים ממשיכה לצמוח עם הגידול באוכלוסייה האנושית והגידול בצריכת המים. לעומת זאת, גידול בכמות המים הזורמים הזמינים כנגר עילי יושג, רק אם ייבנו סכרים חדשים או יותפלו מי ים. כיום, ההתפלה תורמת פחות מ-0.2 אחוזים של השימוש במים, ובשל דרישות האנרגיה הגבוהות

מהצמחים ומהקרקע ואינם זמינים לשימוש נוסף.

ישראל, יחד עם הרשות הפלסטינאית המשתמשת באותם מאגרי מים תת-קרקעיים, היא דוגמה לאזור, שבו קצב גידול האוכלוסייה והעלייה המהירה ברמת החיים גורמים לדרישה הולכת וגוברת למים שפירים. דרישה זו עולה בהרבה על יכולת המערכת להוסיף מים שפירים טבעיים לשימוש. המחזוריות של שנות בצורת מוסיפה קושי לאמינות האספקה הסדירה. מדינת ישראל השכילה להבין שלא הורדה דרסטית של הצריכה החקלאית והעירונית וללא התפלה מסיבית של מי ים היא לא תוכל להבטיח אספקת מים שפירים באיכות גבוהה לאוכלוסייתה. כמתוכנן, הופחתה הצריכה החקלאית בעשרות אחוזים, בעוד שהצריכה העירונית ממשיכה לעלות. בשנים האחרונות החלה המדינה גם במימוש תכניות רחבות היקף של התפלת מי ים.

קצב מופרז של צריכת מים יכול להיות בעל השפעות קיצוניות על מערכות אקולוגיות מקומיות ואזוריות. באגן ההיקוות של ימת ארל, לדוגמה, הטיות גדולות של הנהרות לצורכי השקיה גרמו לאגם להתכווץ בשלושה רבעים מנפחו וב-15 מטרים מעומקו במשך ארבעת העשורים האחרונים. קו החוף של ימת ארל נסוג עד 120 ק"מ במקומות מסוימים, ותעשיית הדיג שפעם ייצרה 45,000 טון יבול בשנה והעסיקה 60,000 איש - חוסלה. גם איכות המים ירדה. מליחות המים שילשה עצמה בין 1960 ל-1990, והמים שנותרו, מלוחים כיום יותר ממי האוקיינוס.

ההבדל בין שימוש במים לבין צריכתם הוא חשוב בכל הקשור לניהול משק המים. שאיבת המים העולמית (כולל איבוד

הכרוכות בהפעלתה, סביר להניח כי היא תישאר מרכיב זעיר באספקת המים גם בעתיד הנראה לעין.

בישראל גוברת ההכרה, כי משק המים הגיע לפרשת דרכים בכל הקשור בניהול משאבי המים של המדינה וכי פוטנציאל הפקת המים הטבעיים הגיע לקצה גבול ניצולו. שתי מגמות מרכזיות קיימות היום במדיניות הפיתוח של משק המים: התפלת מי ים והשבת מי קולחין לשימוש חקלאי. כיום, התפלת מי ים מסתמנת כאחד הפתרונות המרכזיים למשבר המים. על פי החלטת הממשלה, ישראל תקים מכונים להתפלת מי ים בנפח כולל של 400 מיליון קו"ב, שהם תוספת של יותר מ-20 אחוזים למשק המים הישראלי (על פי נתוני שנת 2004). האתר באשקלון מתוכנן לתפוקה של 100 מיליון קו"ב והוא המפעל הגדול מסוגו בעולם. הפניית מים מטופלים מושבים לחקלאות, תוך שחרור מים שפירים לצרכים ביתיים, היא פתרון נוסף, חלקי בלבד, מאחר שהמים המושבים צפויים להביא בטווח הארוך להמלחת מי התהום באזורים, שבהם שטחי החקלאות הם מעל האקוויפר, בעיקר מעל אקוויפר החוף.

הסכרים ממשיכים להוסיף יותר מים לשליטת האדם, אבל בשל ההכרה בהשפעות הסביבתיות השליליות שיש לתהליך זה, קצב הקמתם הואט, ובמקומות רבים (למשל, בארצות הברית), סכרים אף נהרסים. בארצות המפותחות, מרבית האתרים הטובים ביותר כבר נוצלו. הגידול הכלכלי, הסביבתי והחברתי – ובכלל זה הרס בתי גידול, אבדן מגוון ביולוגי ועקירה של קהילות אנושיות – הופכים את המשך בניית הסכרים למסובכת יותר. כ-260 סכרים חדשים מוקמים מדי שנה ברחבי העולם בהשוואה ל-1000 לשנה בין שנות ה-50 לשנות ה-70 של המאה ה-20. יתר על כן, לפחות 180 סכרים נהרסו בארצות הברית בעשור האחרון מסיבות של בטיחות, השפעה על הסביבה והתיישנות. הרס סכר אדוארדס על נהר קנבק במיין בארצות הברית ב-1999 סימן את האירוע הראשון, שבו פיקוח פדרלי קבע, כי התועלות הסביבתיות של סילוק הסכר עולות על התועלות הכלכליות של תפעולו.

כתוצאה מכך ומגמות נוספות, כמות מי הנגר הזמינים לא צפויה לגדול ביותר מחמישה עד עשרה אחוזים בשלושים השנים הבאות. במשך תקופה זו אוכלוסיית העולם צפויה לגדול ב-35 אחוזים בערך. הדרישות ממערכות המים המתוקים ימשיכו לגדול במאה הקרובה.

## מחזור המים ושינויי אקלים

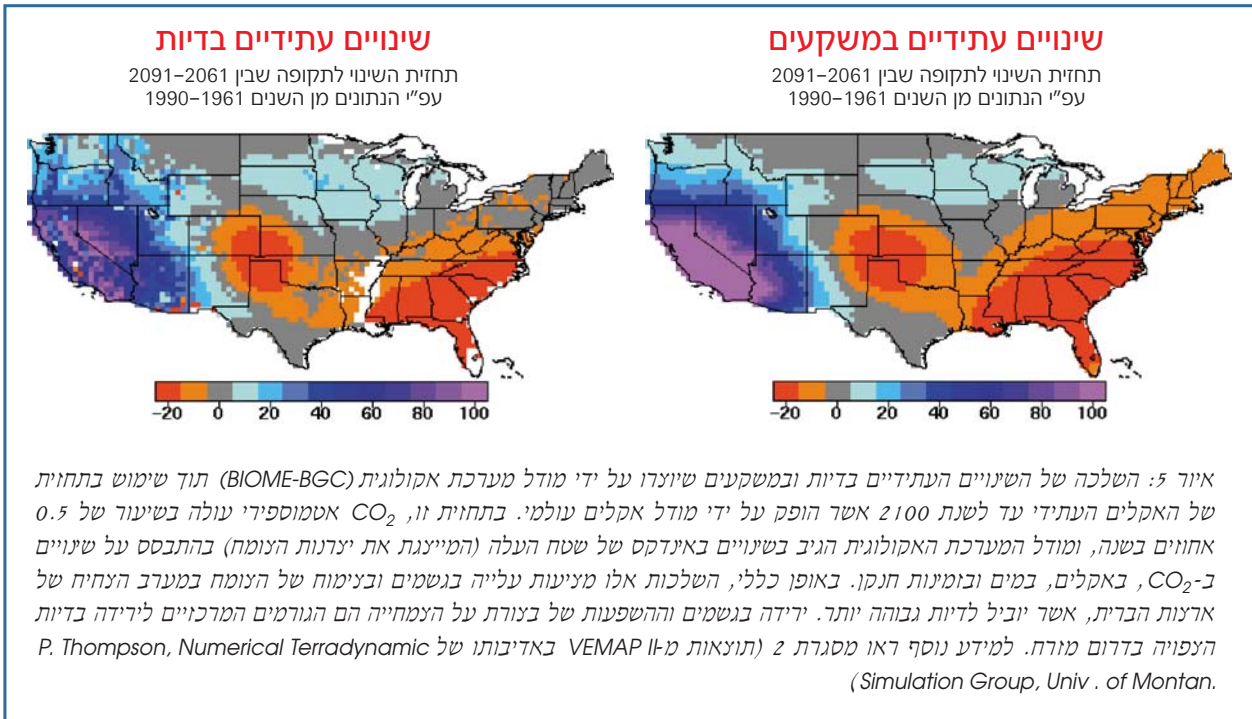
כיום קיימת תמימות דעים בקרב מדענים, כי ההצטברות המתמשכת של גזי החממה באטמוספירה כתוצאה מפעילות האדם גורמת לחימום כדור הארץ. העשור האחרון של המאה ה-20 היה החם ביותר שתועד, ונתונים היסטוריים אודות שינויי האקלים מראים, כי חמישים השנים האחרונות היו חמות במידה שלא נמדדה באלף השנים האחרונות. הצפי הוא כי המשך התחממות כדור הארץ במאה הבאה ילווה בהתעצמות מחזור המים. באקלים חם יותר כמויות גדולות יותר של מים יתאדו מהצמחים, מהקרקעות ומגופי המים בעולם, יעלו יותר ידי מים לאטמוספירה שיומטרו חזרה כגשם, וכתוצאה מכך

יגבר הנגר העילי וייצור מצבים הידרולוגיים קיצוניים, כגון: שיטפונות ובצורות, שיהיו שכיחים יותר וחזקים יותר. מידה מסוימת של הפחתה בשלג ובכיסוי הקרח כבר נצפתה (למשל, בקרחונים שבדרום אמריקה). השינויים בטמפרטורה ובמחזור המים ישפיעו בהכרח על גדילת הצומח ועל תהליכי הפירוק בקרקע, ובהם – מחזור הפחמן, החנקן ונוטריאנטים אחרים, ששינוי הריכוזים שלהם ישפיע על איכות המים.

שינויים אזוריים ומקומיים יהיו כנראה מגוונים יותר וקשים יותר לחיזוי מאשר שינויים עולמיים. אזורים רבים, במיוחד ממוזגים, יעברו תקופות קיץ יבשות עם אידוי מוגבר ואף ירידה כללית בכמות הגשמים בקיץ (איור 5). לדוגמה, כמעט כל המודלים של המחזור הכללי (General Circulation Models (GCMs)) של האקלים בעולם חוזים, שבדרום אירופה יירדו פחות משקעי קיץ. לעומת זאת, מחזור המים באזורים טרופיים יושפע פחות יחסית מהשינויים שמקורם בהתחממות. איהוודאות שנותרת בחיזוי האקלים ברמה האזורית מודגמת על ידי מגוון רחב של תרחישים לחיזוי לחות הקרקע במרכז ארצות הברית (על ידי מודלים המתבססים על הנחות יסוד שונות וייצוגים שונים של תהליכי המים) – מ-75 אחוזים יבש יותר ועד 30 אחוזים רטוב יותר בקיץ.

שינויים עתידיים במחזור המים, אשר יהיו בעלי חשיבות רבה במיוחד לזמינות של מים מתוקים, כוללים את הכמות ואת העיתוי של הגשמים והנגר העילי, את קצב ההתאדות מהצומח ומהקרקע ואת העלייה במפלס הים. ככל שהטמפרטורות עולות, האידוי עולה באופן אקספוננציאלי, וכך גם האידוי מהאוקיינוסים, וכתוצאה מכך – גם ירידת הגשם הממוצעת. למעשה, נתונים מעודכנים מראים, כי ממוצע הגשמים כבר עלה במעט באזורים שאינם טרופיים. בארצות הברית וקנדה כמות המשקעים עלתה ב-10 עד 15 אחוזים במשך חמישים השנים האחרונות, והזרימה בנחלים עלתה גם היא באופן משמעותי במשך תקופה זו, במיוחד בחצי המזרחי של ארצות הברית. עלייה קטנה יותר במשקעים, אך עדיין משמעותית, הייתה גם בברית המועצות לשעבר (בערך 10 אחוזים במאה שנים) ובסקוטלנד. בניגוד לכך, באזורים צחיחים וטרופיים אין עדות לעלייה במשקעים, ויכול להיות שהם אפילו יבשו מעט בעשורים האחרונים.

מובן שעליות מצומצמות בממוצע הגשם בעולם לא יעלו את כמות המים המתוקים הזמינים באופן אחיד בכל האזורים. תופעות אזוריות יהיו תלויות בחלקן במערכת משוברים מורכבת בין הצומח, הקרקע והאטמוספירה בסביבה חמה ולחה יותר. למשל, עלייה בכמות דו-תחמוצת הפחמן האטמוספרי יכולה להעלות את יעילות ניצול המים של הצמחים, ונתון זה יחד עם עלייה בגשם יביאו למגמה של עלייה בזמינות המים. עם זאת, השפעות אלו יכולות להיות מקוזזות במידה רבה על ידי קצבי התאדות גבוהים יותר מהצומח ומהקרקע באקלים חם יותר. נוסף על כך, הצפי הוא כי במאה הבאה פני השטח היבשתי יתחממו הרבה יותר מהר מאשר פני השטח של האוקיינוסים (מפני שזרימת המים באוקיינוסים וקיבולת החום הגבוהה של המים ממתנים את השינויים בטמפרטורה), ועקב כך תעלה הסבירות לבצורת ביבשות. הבדל זה בקצב החימום יכול גם להעצים את מפלי הלחץ ואת דגמי הרוח באזורי החוף ולהגביר את עליית מי העומק באוקיינוסים לפני השטח



שינויים במחזור המים המשפיעים על לחות הקרקע, על זמינות הנוטריאנטים ועל העלייה במליחות ישנו את קצב הצמיחה של מיני צמחים, את היצרנות ואת התפוצה שלהם. יתר על כן, קצב התהליכים המיקרוביאליים של הקרקע, המווסתים את קצב הצטברות החומר האורגני בקרקע ואת שחרור הנוטריאנטים כמו, למשל, חנקן, מושפעים מאוד ממשיך זמן כיסוי הקרקע על ידי שלג, ממחזורי קפיאה והפשרה וממליחות הקרקע. במקביל, שינויים בגדילה של צמחים ובפעילות המיקרוביאלית ישפיעו על המחזוריים הביוגיאוכימיים המשפיעים על איכות המים.

שינויים באיכות המים ובכמותם משפיעים גם על בתי גידול לחים. במערכות אקולוגיות של מים, בדיוק כמו על היבשה, יצרנות הצמחים ומחזורי החומרים מושפעים ממשך זמן הכיסוי על ידי קרח ושלג ומשינויים עונתיים בזרימת המים. הנגר העילי נושא עמו פחמן, חנקן ונוטריאנטים אחרים ממערכות במעלה הזרמה לאזורי החוף, ולכן עלייה בשטפים אלו עלולה לפגוע במדגה בחופים על ידי דלדול החמצן, או אף לסכן את בריאות האדם על ידי עידוד פריחות של אצות מסוכנות.

מחזור המים בטבע יושפע במאה הקרובה גם מעליית המפלס של מי הים. מפלס הים כבר עלה בכ-8 ס"מ במאה האחרונה, והוא צפוי לעלות ב-30 עד 50 ס"מ נוספים במאה השנים הבאות. עלייה זו תסיט את קו המים פנימה ליבשה בשלושים מטרים בממוצע ותיצור שינויים דרמטיים במערכות החופים. לדוגמה, עליית המפלס של מי הים תחמיר את חדירת המים המלוחים לאקוויפרים של מים מתוקים באזורי החוף, תשנה את הפיזור ואת ההידרולוגיה של בתי גידול לחים בחופים ותעקור חקלאות באזורי חוף ודלתות. אקוויפרים רבים של אזורי החוף, שכבר היום מדולדלים לצורכי חקלאות ושימושים עירוניים, יעמדו בפני איום נוסף של זיהום על ידי מי ים. בארצות הברית רשויות ערים כמו, למשל, מיאמי בפלורידה ומחוז

(upwelling) באזורי החופים.

כל אלו מצביעים על העובדה, ששינויים במחזור המים המלווים את שינויי אקלים יורגשו באופן שונה לחלוטין באזורים שונים. באופן כללי, אף כי חלק מהאזורים הממוזגים והקוטביים יקבלו כנראה יותר משקעים, אזורים אחרים יקבלו פחות, ואזורים רבים אחרים יהיו למעשה יבשים יותר כתוצאה מאיזוי רב יותר במשך עונת הצמיחה.

שינויים אטמוספריים לא יהיו הכוחות היחידים שיניעו את שינויי האקלים במאה הבאה. לשינויים שיעשה האדם בשימוש בקרקע יהיה תפקיד חשוב בהקשר זה, כיוון שאופי כיסוי הצומח משפיע על קצב ההתאדות מהצמחים ומהקרקע ועל החלק היחסי של קרינת השמש המגיע לפני הקרקע אשר מוחזר ישירות לחלל ללא נוכחות עננים - האלבדו. לכן פעולות, כגון: בירוא יערות, נטיעה מחודשת של יערות ואפילו תהליכי מדבור כדוגמת התפשטות שיחים לאזורי עשב ישפיעו על האקלים ועל מחזור המים. בקנה מידה אזורי, כריתת יערות מפחיתה את ירידת הגשמים על ידי הקטנת מחזור המים והגדלת האלבדו. עליית הייבוש בעקבות כריתת עצים עלולה להיות כבדת משקל באזורים טרופיים ובסוונות ולהקשות על נטיעה מחדש בשטחים שבהם היער נעלם בשל כריתת או שרפה. עלייה בהשקיה באזורים שלמים יכולה להשפיע באופן הפוך ולהשרות אקלים אזורי לח וקריר יותר. בארצות הברית החקלאות משתמשת ב-81 אחוזים מכלל המים הנצרכים, וחלק ניכר מהם מיועדים להשקיית גידולים באזורים היבשים יותר, שבהם קצב האידוי גבוה, במיוחד במישורים הגדולים במרכז ובאזורי המערב. לשינוי בשימושי הקרקע יכולה להיות השפעה על מחזור המים גם בקנה מידה קטן יותר. שינויים, כגון: כריתת יערות, לדוגמה, יכולים לשנות באופן מהותי את הנגר העילי ואת כמויות המים המגיעות לאגני היקוות מסוימים.

מים מתוקים מהווים כבר היום משאב מגביל בחלקים גדולים של העולם. במאה הבאה משאב זה יגביל אף יותר לאור הגידול באוכלוסייה, בעיור ובשינוי האקלים. הגבלה זו תיגרם לא רק על ידי עליית הביקוש למים, אלא גם על ידי זיהום מערכות אקולוגיות של מים מתוקים. זיהום מקטין את כמות המים הניתנים לשימוש ומייקר את עלות הטיהור. חלק מהמזהמים, כגון: כספית או תרכובות אורגניות כלורוניות מזהמים את מקורות המים ומשפיעים על אספקת המזון. יותר משמונה מיליארד קילוגרמים של חנקן ושני מיליארד קילוגרמים של זרחן משוחררים בכל שנה למי פני השטח בארצות הברית. זיהום נוטריאנטים זה, יחד עם הביקוש למים מצד בני האדם, משפיעים על המגוון הביולוגי, על תפקוד המערכות האקולוגיות ועל השירותים הטבעיים של מערכות מימיות, שעליהם מתבססות חברות אנושיות.

עלייה בביקוש למים מתוקים משפיעה באופן דרמטי גם על שימור מינים. בעולם כולו, לפחות חמישה מהמינים של דגי מים מתוקים מצויים כיום בסכנת הכחדה או שנעלמו לחלוטין. מינים מימיים מהווים כמעט מחצית מבעלי החיים ברחבי ארצות הברית המצויים ברשימה הפדראלית של בעלי החיים המצויים בסכנת הכחדה. בארצות הברית יש כמעט פי שניים דגי מים מתוקים בסכנה מאשר במדינות אחרות, וכבר נכחדו

אורנג' בקליפורניה הוציאו מיליוני דולרים בעשרים האחרונים על החדרת מי פני שטח מטופלים לאקוויפרים על מנת לשמור את מפלסי המים גבוהים ולדחות חדירת מים מלוחים.

## סוגיות לעתיד

### בעיות שצצות והשלכותיהן על המחקר

השפעת האדם על איכות המים המתוקים ועל כמותם יכולה לאיים על הרווחה הכלכלית, על היציבות החברתית ועל חוסנם של השירותים האקולוגיים שמספקות המערכות המימיות. ככל שחברות אנושיות ומערכות אקולוגיות נהיות תלויות יותר ויותר בהיצע מים קבוע או מצטמצם, יש סכנה גדלה לכשל חמור של המערכות החברתיות, ובכלל זה – אפשרות לעימותים מזוינים על מים וכן שינוי צורה מוחלט של מערכות אקולוגיות. צריכה גוברת של מים מתוקים יכולה לקטוע קשרים אקולוגיים בין מערכות מימיות ולנתק נהרות ממישורי ההצפה שלהם, מהדלתות ומסביבות חוף הים. היא יכולה גם לשנות את כמות המים, את איכותם ואת עיתוי אספקתם, פרמטרים שבהם תלויות מערכות אקולוגיות ובשתיות, מימיות ואלו של שפכי הנהרות.

### מסגרת 2: חיזוי משאבי מים

להשקיה וויסות הכניסות למאגרים המשפיעים על הנגר העילי, המודלים ההידרולוגיים חייבים להיות מופעלים יחד עם סוגים אחרים של מודלים אשר יכולים להתחשב בגורמים אלו.

סוג אחר של חיזוי מים כולל ניתוח של תגובות הידרולוגיות ארוכות טווח לתרחישים עתידיים של שימושי קרקע או שינוי אקלים. לדוגמה, הידרולוגים יכולים להעריך עלייה בפוטנציאל הנגר העילי והשיטפונות שיכולים להתרחש, אם חלקים מאגן ההיקוות ינוקו מהצמחייה, או להעריך את השינויים שיחולו בסדימנטציה בנחלים, אם תגבר רעיית בקר באגן ההיקוות. אפשר לחזות את ההשלכות על איכות המים ועל הזרימות בעקבות עיור מוגבר, או פעילות חקלאית באזור מסוים, על ידי מערך תרחישים ביחס לאוכלוסייה ולגידולים. אך כדי לחזות שינויים בזמינות של מים מתוקים במשך עשרות או מאות שנים, הטוב ביותר שאפשר לעשות כיום הוא לבנות תרחישים עתידיים המבוססים על תסריטים של שינוי אקלים המתקבלים ממודלים כלליים של הסירקולציה (GCM).

מודלים הידרולוגיים מתקדמים יכולים גם לחשב היבטים קריטיים המשפיעים ישירות על איכות המים, כגון: טמפרטורת הזרימה, ריכוז החמצן המומס, עומס הנוטריאנטים ויצרנות הצמחים המימיים. אוטורופיקציה (תהליך של העשרת המים בנוטריאנטים) של אגמים ומאגרים ניתנת לחיזוי מנתונים על השימוש בקרקע ובשטפי המים והנוטריאנטים. תכונות כימיות נוספות המשפיעות על איכות המים, כגון: pH וריכוזי המיקרו-מזהמים ניתנות לחיזוי בעזרת מודלים מכניסטיים וסטטיסטיים. מודלים הולכים ותופסים מקום חשוב גם בחיזוי של השפעת פעילויות האדם על מחזורי הנוטריאנטים באקווינוס ועל שפע הדגים, והם גם מודדים את פוטנציאל הפלישה של מינים זרים לבתי גידול של מים מתוקים.

חיזוי עתיד המים שלנו חשוב להבטחת היצע המים לאנושות, לתכנון לוח הזמנים של השקיה וייצור כוח הידרואלקטרי, לוויסות שיטפונות ולתיאום פעילות פנאי ונופש. חיזויים הידרולוגיים צופים שינויים עתידיים בהידרולוגיה באמצעות תחזיות מזג אוויר ותנאים הידרולוגיים קיימים. כיום, תחזיות של הדינמיקה ההידרולוגית משתפרות לאור הזמינות המיידית של נתוני הניטור באינטרנט. התחזיות כיום הן בדרך כלל לשלושה עד חמישה ימים מראש, אך שיפורים בהפצת המידע ובבניית המודלים ההידרו-מטאורולוגיים יאפשרו בעתיד הקרוב תחזיות של חודש אחד עד שישה חודשים מראש.

כדוגמה למערך של מקבצי נתונים הדרושים לחיזוי איכותי, יש היום שימוש במכ"ם דופלר הממפה את תאי המשקעים כל חצי שעה, ומרבית הנתונים בתחנות המדידה בערוצים מדווחים יומית על ידי טלמטריית לוויינים ומוצגים באתר המכון הגאולוגי האמריקאי. שימוש כזה נעשה גם בישראל, בתחנה המטאורולוגית בלוד. עדכונים שבועיים של משתני פני השטח, כגון: כיסוי השלג זמינים כיום לעולם בעזרת הלוויינים המתקדמים ביותר העוקבים אחר כדור הארץ. מודלים ממוחשבים שונים משתמשים במידע על תצפיות מזג האוויר, על כמות הגשם, על עובי השלג, על הטופוגרפיה, על הקרקעות, על כיסוי הצומח ועל הזרימה בנחלים כדי לחזות מגמות במפלסים ובעיתוי של הנגר באגני היקוות מסוימים. מודלים הידרו-מטאורולוגיים חדשים יכולים להשתמש במידע היומי מהנחלים כדי לחשב את מפלסי הזרימה הצפויים במורד הנהרות בימים הבאים. ככל שאיכות תחזיות האקלים של חודש אחד עד שישה חודשים תשתפר, יתאפשר לבצע תחזיות הידרולוגיות לטווח ארוך יותר. באזורים גדולים יותר, שבהם מתקיימת פעילות אדם, ובכלל זה – צריכת מים

קיים צורך חסר תקדים במחקר רב־תחומי כדי לפתור בעיות מים קיימות. הדוגמאות שהוצגו לעיל הדגישו את העובדה שהיצע המים ואיכותם שלובים זה בזה, אך גבולות מסורתיים בין דיסציפלינות מדעיות, כגון: קלימטולוגיה, הידרולוגיה, לימנולוגיה, אקולוגיה ומדעי החברה מפריעים לנו להבין מערכות מים ולהתייחס אליהן כמכלול. הצורך במחקר אינטגרטיבי נדון לעתים קרובות גם בעבר, אך רשויות המימון, הניהול ומוסדות המחקר יישמו המלצות אלו רק לעתים רחוקות (דוגמה חריגה בולטת בארצות הברית היא תכנית בנושא מים ופרשת המים המשותפת לקרן הלאומית למדע ולסוכנות להגנת הסביבה). הזמן בשל כיום להגביר את המאמצים החיוניים כל כך להגיע לסינתזה.

בחיזוי ההשלכות של תרחישי מדיניות שונים על היצע המים ואיכותם יש להביא בחשבון מרכיבים אחדים. אלו כוללים שינויים צפויים בזרימות המים ובריכוז המשקעים, הנוטריאנטים והמזהמים ובמשאבים הביזויים (מסגרת 2). אגן היקוות מוגדר הוא יחידה מרחבית עבור חיזויים אלו, אך חלק מהבעיות, כגון: אוטוריפיקציה בחופים דורשות שילוב של חיזויים אלו בקנה מידה אזורי. חיזויים אלו צריכים להיות כמותיים, לספק הערכות לגבי אי־הודאות, כגון: הסתברות הפיזור ולהיות מבוססים על תחומים מוגדרים וברורים היטב. אף כי אפשר למצוא בספרות כלים כמותיים רבים לחיזוי מקורות המים המתוקים, תחום זה עדיין אינו מובנה היטב, והוא חסר מערכת כללית של כלים, אמות מידה והתייחסויות. חסרים גם כלים

בה יותר רכיכות מאשר בכל מקום אחר. בהרי האפלצ'ים וכן באגן ההיקוות וברכס ההרים הצחיח של מדבר סונורה, רכיכות ודגי מים מתוקים פגיעים במיוחד. ישנם גם מינים אנדמיים פגיעים במערכות הקרסטיות (חללים בסלעים קרבונטיים, כגון אבני גיר ודולומיטים, שנוצרו בתהליך המסה אטי של הסלע, בעיקר לאורך סדקים ומישורי שכבות) ובאקוויפרים, כולל שפמנונים עיוורים (blind catfish), סרטני מים מתוקים (crayfish) וסלמנדרות. מינים מימיים אחרים ברחבי העולם נמצאים בסכנה לא פחותה.

בישראל, כ-38 אחוזים מדגי המים המתוקים נמצאים בסכנת הכחדה חמורה או שכבר הוכחדו (גורן, 2002). באופן דומה, כ-85 אחוזים מבין מיני הדו-חיים בישראל, התלויים גם הם במשאב המים המתוקים, נמצאים בדרגות שונות של סכנת הכחדה או שכבר נעלמו (גפני, 2002).

למגמות חדשות בניהול משאבי מים שמתפתחות כיום יש השלכות על סדרי העדיפויות של המחקר המדעי. הן מדגישות את הצורך בצוות של מדענים ומנתחי מדיניות שיגדירו יעדים ראליסטיים וסדרי עדיפויות של מחקר בסוגיות המים. בעוד שלאחרונה נעשו מספר צעדים כדי להתוות עדיפויות כאלו, כל אחד מהם אינו מושלם או עדיין מחכה לשלב היישום. סקירתנו הקצרה יכולה רק להציע דגשים אחדים הנראים לנו הכרחיים, בהכירנו את הצורך בחשיבה רחבה יותר המקושרת לביצוע.

## דגשים לאיזון ביקושים עכשוויים ועתידיים של היצע המים

- עידוד "אוגר מים סביבתי" על מנת להבטיח כי מערכות אקולוגיות יקבלו מים בכמות, באיכות ובעיתוי המתאימים כדי לקיים את תפקודן האקולוגי ושירותיהן לחברה האנושית;
- הכרה תחיקתית במי פני שטח ומי תהום מתחדשים כמקור מים משותף;
- שיפור הניטור, ההערכה, והחיזוי של כמויות ואיכויות המים בכדי להקצות את משאבי המים לצרכים מתחרים;
- הגנה על בתי גידול חשובים במיוחד דוגמת אזורי מילוי חוזר ואגני היקוות;
- תמחור מציאותי יותר של היצע המים ושל שירותי המערכות האקולוגיות של מים מתוקים;
- תמריצים כלכליים חזקים יותר לשימוש יעיל במים בכל מגזרי הכלכלה;
- המשך השיפור בסילוק מקורות זיהום ממוקדים ושאינם ממוקדים;
- תוכנית לאומית מתואמת כראוי לניהול הלחצים הגדלים והמגוונים על מערכות המים המתוקים ומיסוד יעדים וסדרי עדיפויות למחקר על נושאי רחב בתחום המים.

טבלה 3 - חלק מהדגשים לאיזון ביקושים עכשוויים ועתידיים לאספקת מים.

וכיום חלקים משטח האגם שיושב הוצפו מחדש.

ב-1966 השקיעה עיריית ניו-יורק יותר ממיליארד דולר כדי לרכוש שטחים ולשקם בתי גידול בהרי הקאטסקיל – מקור המים המתוקים של העיר. אגן ההיקוות הלך והזדהם בשפכים, בחומרי דשן ובחומרי הדברה. העלות המשוערת להקמתו של המפעל לטיהור המים הייתה שמונה מיליארד דולר ועלות הפעלתו מדי שנה – 300 מיליון דולר. לעומת זאת, נמצא כי שימור בית הגידול באגן ההיקוות ויצירת התנאים המתאימים שיאפשרו למערכת האקולוגית לפעול ולנקות את המים יהיו יעילים באותה מידה כמו מפעל הטיהור החדש המוצע. עוד נמצא כי שימור בית הגידול ושיקומו עולים חמישית מעלות הקמתו של מפעל הטיהור החדש, חוסכים את העלות השנתית של אחזקתו במאות מיליוני דולרים ונוסף על כך – מסופקים רווחים אקולוגיים וחברתיים רבים לאזור.

יזמה מרשימה נוספת בתחום מדיניות משק המים מתרחשת באגן מיוריי-דרלינג באוסטרליה, אזור הנתון ללחצי ביקוש גבוה למים וסובל מזמינות מים נמוכה, מגידול באוכלוסייה ומשינויים בשימושי הקרקע. באגן מיוריי-דרלינג חיים שני מיליון איש. הוא משתרע על פני חלקים מארבע מדינות באוסטרליה ותורם יותר ממחצית היבול החקלאי של אוסטרליה. שני שלישים מ-700,000 קמ"ר של השטח המיוער הפכו לשטחי גידולים ומרעה. בשנים האחרונות, אדמות שהושקו בשפע הומלחו, ושינויים במפלס המים הקטינו את היבול החקלאי ב-20 אחוזים. כתוצאה מהצטברות עדויות על הבריאות האקולוגית המידרדרת של האגן, החליטה המועצה המיניסטרילית להקצות רבע מזרימת המים הטבעית לשימור בריאותה של המערכת האקולוגית.

בישראל גוברת ההכרה, כי משבר המים גובה מחיר כבד מהמערכות האקולוגיות הטבעיות. עקב כך יזמו רשות הטבע והגנים והמשרד לאיכות הסביבה את הכנתו של מסמך מדיניות העוסק בזכות הטבע למים ובדרישות המים עבור גופי מים ובתי גידול לחים. מסמך המדיניות שהוכן על ידי צוות מומחים רב-תחומי והוצג לציבור באוגוסט 2003, מעלה את נושא אספקת המים לצורכי טבע ונוף על סדר היום הציבורי ומציג את הטבע כצרכן מים לגיטימי. המסמך ממליץ להקצות כמויות מים משמעותיות לזרימה בנחלים ולגופי מים טבעיים, מתווה קווים מנחים לאיכות המים הנדרשות להזרמה בגופי מים אלה ודן במשמעות הכלכלית של הקצאות אלה. עקב הכנת המסמך החל תהליך של הסדרת המים לצורכי הטבע והנוף ותיקון חוק המים.

התפתחות חלה גם בזמינות המים לבריאות האדם. מספר האנשים שחסרו מי שתייה נקיים בשנת 1994 היה נמוך ב-700 מיליון בהשוואה ל-1980, אף-על-פי שאוכלוסיית העולם גדלה ביותר ממיליארד. בארצות מתפתחות, החלק היחסי של אנשים שיש להם גישה למי שתייה נקיים גדל מפחות ממחצית לשלושה רבעים במשך אותה התקופה. בארצות הברית, שכיחות המחלות הנגרמות על ידי מים מזוהמים בשנים 1970 עד 1990 הייתה פחות מחצי השכיחות שנמדדה בשנים שבין 1920 ל-1940, והיא הגיעה לפחות מארבעה מקרים לכל 100,000 איש.

כמותיים לחיזוי שינויים בתהליכים ביו-גאוכימיים במערכות אקולוגיות יבשתיות ובמערכות של מים מתוקים, במיוחד בקנה המידה של אגני היקוות גדולים ואזורים נרחבים.

בישראל הובן כבר לפני שני דורות ההכרח לנהל את משאבי המים באופן המושכל ביותר וזאת על רקע קיומם של שלושה מאגרי מים גדולים המרוכזים כולם בצפון ובמרכז הארץ. מפעל המפא"ר (מפעל המים הארצי) המקשר בין הכינרת, אקוויפר ההר ואקוויפר החוף, מאפשר נידוד מים מצפון הארץ לדרומה (הצחיח) ונותן כלי ניהולי בידי מנהלי משק המים, שבעזרתו אפשר להפעיל את כל אחד משלושת המאגרים הגדולים בנפרד או במשולב. מדיניות המים נקבעת על ידי נציב המים בהתאם להמלצות נציבות המים והשירות ההידרולוגי, אך גורמים נוספים, כגון: משרד הבריאות, המשרד לאיכות הסביבה וכמובן משרד האוצר משפיעים על יישום ההחלטות ועל אפשרויות הפיתוח.

## ההתקדמות כיום ואפשרויות ממשק המים

ביקושים גדלים למקורות מים מתוקים נותנים הזדמנויות לקשר בין המחקר המתקיים כיום לבין ממשק מים משופר. ההצלחות של מדיניות המים בעשורים האחרונים מצביעות בבירור על קשר זה. למעשה, בגלל קשרים אלו, האאוטרופיקציה והזיהום של מים מתוקים פחתו באפיקי מים רבים. בנהר ההדסון בארצות הברית, לדוגמה, פחתו ריכוזי מתכות כבדות כדוגמת נחושת, קדמיום, ניקל ואבץ לכדי מחצית בהשוואה לאמצע שנות ה-70 של המאה ה-20. לפני שלושה עשורים, מדענים ואנשי ממשק מים הראו בוודאות, כי הגורם הראשון במעלה לאאוטרופיקציה של מים מתוקים אינו כניסה מוגברת של פחמן, אלא דווקא כניסה של נוטריאנטים אניאורגניים, במיוחד חנקן וזרחן. גילוי זה הביא להנהגת מדיניות להורדת מזהמים אניאורגניים, שיושמה באופן נרחב בצפון אמריקה ובאירופה, וכללה איסור על שימוש בחומרי טיהור זרחניים וטיפול טוב יותר בשפכים. שיפור מהיר במספר גופי מים הראה שמדיניות זו יעילה. כדי להשתמש בהצלחות אלו ולנצל אותן, מקורות לא נקודתיים (דיפוזיים) של מזהמי נוטריאנטים חייבים להצטמצם בעתיד. לעיתים יידרש ניהול אגרסיבי שישלוט על כניסת חנקן, כיוון שחנקן הוא נוטריאנט חשוב ויסודי בחלק מהמערכות האקולוגיות המימיות.

שיקום בתי גידול ושימורם הוא המוקד של מאמצים רבים לשיפור איכות המים. לדוגמה, החל מ-1962 שונה נהר קיסימי, שהתפתל לאורך 166 ק"מ מדרום לאגם אוקיצ'ובי בפלורידה בארצות הברית, לתעלה באורך של 90 ק"מ ובעומק של תשעה מטרים כדי לווסת את השיטפונות. הנזקים למגוון הביולוגי ולשירותי המערכות האקולוגיות היו מידיים. מספר עופות המים החורפים ירד ב-90 אחוזים. האאוטרופיקציה באגם אוקיצ'ובי גדלה עם היעלמות בתי הגידול במישורי ההצפה, בתי גידול שבעבר סיננו את הנוטריאנטים מהנהר. כיום, אחרי עשורים של מחקר ואינסוף ניסיונות, החל שיקום 70 ק"מ של אפיק הנהר, 110 קמ"ר של בתי גידול לחים ו-100 קמ"ר של מישורי הצפה בעלות צפויה של חצי מיליארד דולר. בישראל רבים סבורים כי ייבוש אגם החולה היה טעות,

## מסקנות

אוכלוסיית העולם צפויה לגדול במחצית המאה הבאה בקצב של לפחות פי שלושה יותר מאשר זמינות מי נגר מתוקים. לאור זאת, יהיה הכרח לשפר את יעילות הטיפול במים על מנת לאזן בין היצע המים המתוקים לביקוש, יחד עם הגנה על שלמות המערכות האקולוגיות המימיות (טבלה 3). טכנולוגיות כמו השקיה בטפטוף הן בעלות פוטנציאל עצום, שטרם מומש במלואו, להקטנה של צריכת המים בחקלאות. תמריצים כלכליים ותמחור מציאותי של היצע המים ושירותי המערכות האקולוגיות יכולים להגביר את יעילות השימושים השונים במים. ניטור טוב יותר של הרכב המים ושטפי הזרימה, ובכלל זה - מדידת איכות וכמות המים באותו קנה מידה של המרחב ושל הזמן, יספקו מידע טוב יותר להקצאה יעילה של מקורות המים בין צרכים שונים. דגש זה חשוב במיוחד, מפני שבשלושת העשורים האחרונים יותר מחמישית מנקודות המדידה, שהיו ממוקמות בארצות הברית על נחלים קטנים הזורמים באופן טבעי - בוטלו. עדיפויות נוספות יש להעניק להבטחת זרימה מספקת בכמותה, באיכותה ובעיתוי המתאים של מערכות מימיות טבעיות, לשימור בתי גידול קריטיים באזורי מילוי חוזר ובאגני היקוות ולהמשך מניעת זיהומים ממקורות נקודתיים ודיפוזיים.

השגת שימוש בר-קיימא במים בעתיד יהיה תלוי בהמשך הנהגת השינויים בתרבות הניהול של משק המים. לפחות שש מחלקות פדרליות ועשרים סוכנויות בארצות הברית חולקות את האחריות להיבטים שונים של מחזור המים. תיאום פעולותיהן המגוונות באמצעות גוף שיכלול נציגים מכל המחלקות באמצעות סוכנות מרכזית יעודד פיתוח של תכנית לאומית ראויה למחקר ולניהול משק המים. נדרשת גם הקמת ועדה מייעצת של מדענים ומנתחי מדיניות כדי להגדיר סדרי עדיפויות מחקריים ויעדים בסוגיות רחב של נושאי המים. צעד חיובי ראשון בתהליך זה יהיה יוזמה מדעית חדשה על מחזור המים בעולם כחלק מתכנית מחקר השינוי העולמי (Global Change Research Program).



- Wilson, M. A. and S. R. Carpenter. 1999. Economic valuation of freshwater ecosystem services in the United States, 1977-1997. *Ecological Applications* 9:772-783.

## ספרות מצוטטת ל"היבט הישראלי"

- גורן, מ. 2002. מחלקת הדגים. עמ' 39-52, מתוך דולב, ע. ופרבלוצקי א. הספר האדום, מינים בסכנת הכחדה בישראל, רשימת המינים בסיכון - חולייתנים. הוצאת רשות הטבע והגנים והחברה להגנת הטבע
- גפני, ש. 2002. מחלקת הדו-חיים. עמ' 55-68, מתוך דולב, ע. ופרבלוצקי א. הספר האדום, מינים בסכנת הכחדה בישראל, רשימת המינים בסיכון - חולייתנים. הוצאת רשות הטבע והגנים והחברה להגנת הטבע

## על סדרת סוגיות באקולוגיה

סדרת סוגיות באקולוגיה נועדה לדווח, בשפה המובנת לכל, את ההסכמות של פנל מדענים על סוגיות רלוונטיות לסביבה. סוגיות באקולוגיה הופקה בתמיכת Pew Scholars in Conservation Biology grant ל-David Tilman ועל ידי ה-Ecological Society of America כל הדו"חות עברו ביקורת עמיתים ואושרו על ידי צוות המערכת לפני פרסומן.

## מים בעולם משתנה

### נכתב במקור על ידי :

Robert B. Jackson, Stephen R. Carpenter, Clifford N. Dahm, Diane M. McKnight, Robert J. Naiman, Sandra L. Postel, and Steven W. Running

### הוסיפו על ההיבט הישראלי

ד"ר אבי בורג, האגף למשאבי טבע ומים, המכון הגיאולוגי לישראל.  
ד"ר שריג גפני, המחלקה לזואולוגיה, אוניברסיטת תל-אביב.

### על המהדורה האמריקאית

החוברת פורסמה במקור ע"י החברה האקולוגית האמריקאית (1997) בסדרת החוברות סוגיות באקולוגיה.

### על המהדורה הישראלית:

המהדורה בעברית יצאה לאור על ידי קמפוס טבע באוניברסיטת תל-אביב (2005).  
המהדורה היא תרגום של המהדורה האמריקאית בתוספת ההיבט הישראלי. הצילומים והאיורים זהים למקור האמריקאי.

### על פנל המדענים

דוח זה מציג את הסכמה שהתקבלה על ידי שבעה מדענים

## מקורות

החוברת התפרסמה בסדרת *Issues in Ecology* (אביב 2001). החוברת מסכמת את ממצאי פנל המדענים. הדו"ח המלא התפרסם ב- (Ecological Applications, Vol.11, August 2001) ובו דיון וציטוט מקורות ביבליוגרפיים רבים ומקיפים. מרשימה זו נבחרו הפרסומים הבאים כמייצגים את הפרסומים המדעיים וכבסיס לדו"ח הנוכחי.

- Czaya, E. 1981. *Rivers of the World*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Gleick, P. H. 1998. *The World's Water 1998-1999*. Island Press. Washington, D.C.
- Jackson, R. B., S. R. Carpenter, C. N. Dahm, D. M. McKnight, R. J. Naiman, S. L. Postel, S. W. Running. 2001. *Water in a Changing World*. *Ecological Applications* 11(4): in press.
- Jones, J. B., and P. J. Mulholland (eds.) 2000. *Streams and Ground Waters*. Academic Press. San Diego, California. 425 pp.
- L'Vovich, M. I., G. F. White, A. V. Belyaev, J. Kindler, N. I. Koronkevic, T. R. Lee, and G. V. Voropaev. 1990. Use and transformation of terrestrial water systems. Pages 235-252 in B. L. Turner II, W. C. Clark, R. W. Kates, J. F. Richards, J. T. Mathews, and W. B. Meyer, (eds.). *The Earth as Transformed by Human Action*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Naiman, R.J., J.J. Magnuson, D.M. McKnight, and J. A. Stanford (eds.). 1995. *The Freshwater Imperative: A Research Agenda*. Island Press, Washington, D.C.
- National Research Council. 1999. *New Strategies for America's Watersheds*. National Academy Press, Washington, D.C.
- Postel, S. L., G. C. Daily, and P. R. Ehrlich. 1996. Human appropriation of renewable fresh water. *Science* 271: 785-788.
- Postel, S. 1999. *Pillar of Sand: Can the Irrigation Miracle Last?* W.W. Norton & Co., New York.
- Shiklomanov, I. A. 1997. *Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world*. World Meteorological Organization, Stockholm, Sweden.
- United States Geological Survey. 1999. *Streamflow information for the next century: a plan for the national streamflow information program of the U.S. Geological Survey*. USGS Open-File Report 99-456.
- Vörösmarty, C. J., P. Green, J. Salisbury, and R. B. Lammers. 2000. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science* 289:284-288.

- Dr. William Schlesinger, Departments of Botany and Geology, Duke University, Durham, NC 27708-034

## המערכת המדעית הישראלית

**ד"ר יעל גבריאל:** קמפוס טבע, אוניברסיטת תל-אביב

**פרופ' תמר דיין:** המחלקה לזואולוגיה, אוניברסיטת תל-אביב

**פרופ' דויד זלץ:** המחלקה לאקולוגיה מדברית ע"ש מרקו ולואיז מיטרני, המכון לחקר המדבר ע"ש יעקב בלאושטיין, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

**פרופ' יוסי לוי:** המחלקה לזואולוגיה, אוניברסיטת תל-אביב

**פרופ' עוזי מוטרו:** המחלקה לאבולוציה, סיסטמטיקה ואקולוגיה, האוניברסיטה העברית בירושלים

## תודות

הפנל מודה ל- J. Baron, L. Pitelka, D. Tilman ולשבעת מבקרים עמיתים אנונימיים על הערותיהם המועילות לכתב היד. RJB מודה לתמיכה של ה- National Science Foundation, the Andrew W. Mellon Foundation, the Inter American Institute for Global Change Research, and the Department of Energy. מאמר זה הוא פרי תרומתם של Terrestrial Ecosystems (GCTE) and Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle (BAHC) Core Projects of the International Geosphere Biosphere Programme (IGBP).

העוסקים בהיבטים שונים של תחום זה. הדו"ח עבר ביקורת עמיתים ואושר על ידי המערכת של "סוגיות באקולוגיה". ההשתייכות של חברי פנל המדענים היא:

- Robert B. Jackson, Panel Chair, Department of Biology and Nicholas School of the Environment, Duke University, Durham, NC, 27708
- Stephen R. Carpenter, Center for Limnology, University of Wisconsin, Madison, WI, 53706
- Clifford N. Dahm, Department of Biology, University of New Mexico, Albuquerque, NM, 87131
- Diane M. McKnight, Institute for Arctic and Alpine Research, University of Colorado, Boulder, CO, 80309
- Robert J. Naiman, School of Aquatic and Fishery Sciences, University of Washington, Seattle, WA, 98195
- Sandra L. Postel, Global Water Policy Project, 107 Larkspur Drive, Amherst, MA, 01002
- Steven W. Running, School of Forestry, University of Montana, Missoula, MT, 59812.

## על הכותבת המדעית

איבון בסקין היא כותבת מדעית שערכה את הדו"ח של פנל המדענים כדי שיובן גם על ידי קהל קוראים שאינם מדענים.

## המערכת המדעית של סוגיות באקולוגיה

Dr. David Tilman, Editor-in-Chief, Department of Ecology, Evolution and Behavior, University of Minnesota, St. Paul, MN 55108-6097. E-mail: tilman@lter.umn.edu

## חברי המערכת

- Dr. Stephen Carpenter, Center for Limnology, University of Wisconsin, Madison, WI 53706
- Dr. Deborah Jensen, The Nature Conservancy, 1815 North Lynn Street, Arlington, VA 22209
- Dr. Simon Levin, Department of Ecology & Evolutionary Biology, Princeton University, Princeton, NJ 08544-1003
- Dr. Jane Lubchenco, Department of Zoology, Oregon State University, Corvallis, OR 97331-2914
- Dr. Judy L. Meyer, Institute of Ecology, The University of Georgia, Athens, GA 30602-2202
- Dr. Gordon Orians, Department of Zoology, University of Washington, Seattle, WA 98195
- Dr. Lou Pitelka, Appalachian Environmental Laboratory, Gunter Hall, Frostburg, MD 21532

---

כדי לקבל עותקים נוספים של דוח זה יש לפנות:

קמפוס טבע, אוניברסיטת תל-אביב, רמת-אביב,

תל-אביב 69978

טל. 03-6405148, פקס. 03-6405253

או דוא"ל: [teva@tauex.tau.ac.il](mailto:teva@tauex.tau.ac.il)

## על סדרת סוגיות באקולוגיה

סדרת סוגיות באקולוגיה נועדה לדווח, בשפה המובנת לכל, את ההסכמות של פנל מדענים על סוגיות רלבנטיות לסביבה. סוגיות באקולוגיה הופקה בתמיכת Pew Scholars grant במסגרת תוכנית בביולוגיה של שמירת טבע ועל ידי ה- Ecological Society of America. כל הדוחות עברו ביקורת עמיתים ואושרו על ידי צוות המערכת לפני פרסומם.

סוגיות באקולוגיה היא פרסום רשמי של החברה האקולוגית האמריקאית, החברה הלאומית האמריקאית המקצועית המובילה של אקולוגים. החברה האקולוגית האמריקאית נוסדה ב-1915, והיא פועלת לקידום היישום האחראי של עקרונות אקולוגיים לפתרון בעיות סביבתיות.

למידע נוסף:

Ecological Society of America,  
1707 H Street, NW, Suite 400, Washington, DC 20036  
E-mail: [esahq@esa.org](mailto:esahq@esa.org), Tel: (202) 833-8773

