

# סוגיות באקולוגיה

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

הופק על ידי החברה האקולוגית האמריקאית (אביב 1997)

## השינויים שגורם האדם במחזור החנקן: הגורמים והשלכותיהם



צילום: Nadine Cavender

החוברת פורסמה במקור ע"י החברה האקולוגית האמריקאית (1997) 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

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

# השינויים שגורם האדם במחזור החנקן: הגורמים והשלכותיהם

נכתב במקור על ידי :

Peter M. Vitousek, Chair, John Abert W. Howarth, Gene E. Likens, Pamela A. Matson, David W. Schindler William H. Schlesinger, David G. Tilman

היבט הישראלי נלקח מתוך:

איכות הסביבה בישראל – נתונים ומדדים 2001/2002.

תכנית הניטור הלאומית בצפון מפרץ אילת. דו"ח שנתי מסכם – 2003.

## תקציר

פעילויות האדם מגבירות מאוד את כמות החנקן העוברת תהליכים מחזוריים בין עולם היצורים החיים ובין הקרקע, המים והאטמוספירה. למעשה, בני האדם כבר הכפילו את קצב הכניסה של החנקן למחזור החנקן היבשתי, וקצב זה ממשיך לטפס. שינוי זה, הנגרם על ידי האדם, הוא בעל השלכות חמורות על מערכות אקולוגיות ברחבי העולם, מפני שחנקן הכרחי ליצורים חיים, ולזמינותו יש תפקיד מכריע בארגון ובתפקודן של המערכות האקולוגיות העולמיות. במערכות אקולוגיות רבות – יבשתיות וימיות – אספקת החנקן היא גורם מפתח בבקרה על האופי ועל המגוון של הצומח, על הדינמיקה של אוכלוסיות אוכלי העשב ושל טורפיהן ועל תהליכים אקולוגיים חיוניים, כגון: יצרנות הצומח ומחזורי הפחמן ומינרלי הקרקע. עובדה זו תקפה לא רק במערכות טבעיות, אלא גם במרבית שטחי החקלאות והיערות הנטועים. דישון יתר של חנקן עלול לזהם מערכות אקולוגיות ולשנות הן את תפקודיהן האקולוגיים והן את החברות הביולוגיות המתקיימות בהן.

מרבית פעילויות האדם האחראיות לעלייה בכמות החנקן העולמי מתקיימות בקנה מידה מקומי, החל מייצור ושימוש בחומרי דשן חנקניים ועד לשרפת דלקים במכוניות, בתחנות כח ובתעשייה. אולם פעילות האדם לא רק הגדילה את אספקת החנקן, אלא גם הגבירה את התנועה העולמית של צורות שונות של חנקן דרך האוויר והמים. בגלל העלייה בניידות, יתר חנקן מפעילויות האדם משפיע באופן חמור ולטווח זמן ארוך על חלקים נרחבים של כדור הארץ.

כותבי המאמר זיהו באופן ודאי השלכות אחדות במחזור החנקן, אשר מקורן בפעילויות האדם:

- עלייה בריכוזי "גז הצחוק" ( $N_2O$ , Nitrous Oxide), גז חממה רב עצמה, באטמוספירה, וכן עליות אזוריות בריכוזים של תחמוצות חנקן אחרות (כולל חנקן חד-חמצני,  $NO$ ), המניעות את תהליך היווצרות הערפוח;
- אבדן נוטריאנטים מהקרקע, דוגמת סידן ואשלגן, החיוניים לפוריות הקרקע לטווח הארוך;
- עלייה בחומציות של קרקעות ומים של נחלים ואגמים בכמה אזורים;
- עלייה משמעותית בהסעה של חנקן על ידי נהרות לאסטוארים (אזור שפכי הנהרות לים שבהם מי הנהרות ומי הים מתערבבים)

ולמימי החופים, שם החנקן מהווה מזהם עיקרי. כותבי המאמר גם בטוחים, כי שינוי מחזור החנקן על ידי האדם: ■ האיץ אבדן של מגוון ביולוגי, במיוחד של צמחים המותאמים לקרקעות דלות בחנקן, וכתוצאה מכך גם אבדן מגוון ביולוגי של בעלי חיים ומיקרואורגניזמים התלויים בצמחים אלו; ■ גרם לשינויים בצומח, בחי ובתהליכים האקולוגיים בשפכי נחלים ובמערכות אקולוגיות שליד חופים ותרם לירידות ארוכות טווח של יבול הדיג באזורי החוף.

המדיניות הלאומית והבין-לאומית צריכה לשאוף לצמצם השפעות אלו על ידי פיתוח והטמעה רחבה יותר של טכנולוגיות יעילות לניצול דלקים וממשקים חקלאיים טובים יותר, אשר יצמצמו את הדרישה ההולכת וגוברת לדשנים חנקניים ואת שחרורם של דשנים אלה.

## הקדמה

דיווח זה סוקר את ההבנה המדעית הקיימת כיום לגבי השינויים שגורם האדם למחזור החנקן העולמי ואת השלכות של שינויים אלה. הדיווח מתייחס גם לאפשרויות שונות של מדיניות וממשק אשר יכולים למתן את השינויים הללו במחזור החנקן ואת תוצאותיהם.

## מחזור החנקן

חנקן הוא מרכיב חיוני בחלבונים, בחומר הגנטי, בכלורופיל ובמולקולות אורגניות חשובות נוספות. כל האורגניזמים זקוקים לחנקן כדי לחיות. הוא ממוקם במקום הרביעי אחרי חמצן, פחמן ומימן כיסוד הכימי הנפוץ ביותר ברקמות חיות. עם זאת, עד שהחלו פעילויות האדם לגרום לשינוי המחזור הטבעי (איור 1), היה חנקן זמין במידה מועטה בלבד למרבית העולם הביולוגי. כתוצאה מכך, חנקן שימש כאחד הגורמים המגבילים העיקריים אשר וויסתו את הדינמיקה, את המגוון הביולוגי ואת התפקוד של מערכות אקולוגיות רבות.

האטמוספירה של כדור הארץ מורכבת מ-78% גז חנקן, אך מרבית הצמחים ובעלי החיים אינם יכולים להשתמש בגז זה ישירות מהאוויר, כפי שהם משתמשים בדו-תחמוצת הפחמן ובחמצן. במקום זאת, צמחים – וכל שאר האורגניזמים, מבעלי חיים אוכלי עשב ועד לטורפים ומפרקים, אשר

המידה הסטנדרטית לניתוח מחזור החנקן העולמי היא טרהגרם (או בקיצור Tg), אשר שווה למיליון טון חנקן. ברקים, לדוגמה, מקבעים פחות מ-10 Tg של חנקן בשנה – אולי אף פחות מ-5 Tg. מיקרואורגניזמים הם הספקים העיקריים של חנקן זמין מבחינה ביולוגית. לפני הגידול הנרחב של קטניות, אורגניזמים יבשתיים קיבעו ככל הנראה בין 90 ל-140 Tg חנקן מדי שנה. לכן, גבול עליון סביר לקצב קיבוע החנקן על היבשה הוא בסביבות 140 Tg של חנקן לשנה.

## קיבוע חנקן המונע על ידי האדם

פעילות האדם הגבירה באופן ברור את קצב קיבוע החנקן על היבשה במאה החולפת והכפילה את כמות החנקן המועברת מדי שנה מהמאגר האטמוספרי העצום אך הלא זמין לצורות זמינות מבחינה ביולוגית. המקורות העיקריים של הגברת האספקה הזו הם תהליכים תעשייתיים המייצרים דשנים חנקניים, שרפת דלקים וגידול פולי סויה, אפונה וגידולים חקלאיים נוספים המקיימים חיידקים סימביוטיים מקבעי חנקן. יתר על כן, פעילות האדם מאיצה את קצב השחרור של החנקן ממאגרים לטווח ארוך הנמצאים בקרקע ובחומר אורגני.

### דשן חנקני

קיבוע תעשייתי של חנקן לשימוש כדשן מוערך כיום בכ-80 Tg לשנה ומייצג את התרומה הגדולה ביותר של חנקן חדש למחזור העולמי על ידי פעילויות האדם (איור 3). ערך זה אינו כולל דשן אורגני, אשר מהווה מעבר של חנקן מקובע ממקום אחד למשנהו ולא קיבוע של חנקן חדש.

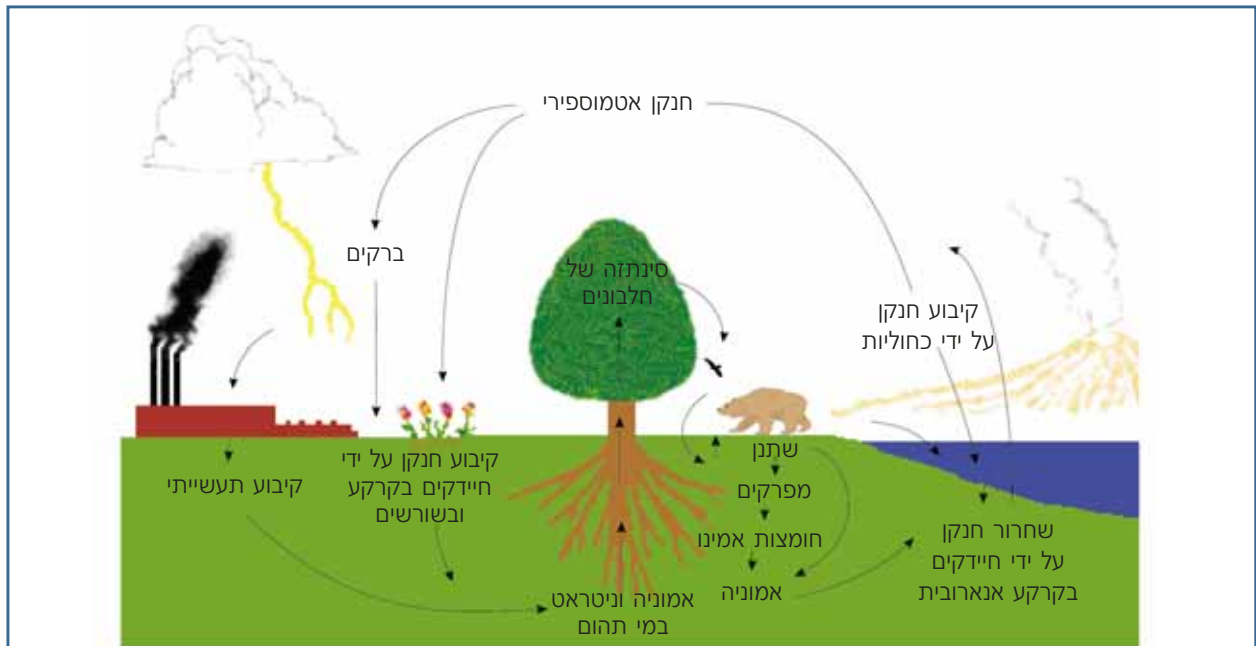
התהליך של ייצור דשנים על ידי קיבוע תעשייתי של חנקן

מסתמכים בתזונתם על חומר אורגני שמיוצר על ידי צמחים – צריכים לחכות שהחנקן יקובע; כלומר, יילקח מהאוויר ויקושר למימן או לחמצן ליצירת תרכובות אי-אורגניות, בעיקר יוני אמוניום ( $\text{NH}_4$ ) וניטראט ( $\text{NO}_3$ ). שאותן הם יכולים לנצל. כמות החנקן הגזי המקובע על ידי תהליכים טבעיים בכל רגע נתון מייצגת רק תוספת קטנה למאגר של חנקן, שכבר קובע וממוחזר בין המרכיבים החיים והדוממים של המערכות האקולוגיות של כדור הארץ. מרביתו של חנקן זה אינו זמין, והוא קבור בחומר האורגני בקרקע – חלקו בשאריות צמחים ובעלי חיים נרקבים – וצריך לעבור פירוק על ידי מיקרואורגניזמים של הקרקע. מיקרואורגניזמים אלו משחררים חנקן בצורת של אמוניום או ניטראט ומאפשרים את מחזורו במארג המזון. שני המקורות הטבעיים העיקריים לחנקן חדש הנכנס למחזור הם אורגניזמים מקבעי חנקן וברקים.

אורגניזמים מקבעי חנקן כוללים מספר קטן יחסית של אצות וחיידקים. רבים מהם מתקיימים באופן חופשי בקרקע, אך החשובים ביותר מביניהם הם חיידקים המקיימים קשרים סימביוטיים עם צמחים עילאיים. חיידקים סימביוטיים מקבעי חנקן כמו, למשל, ריזוביה חיים ופועלים בפקעיות שורשים של אפונה, שעועית, אספסת וקטניות נוספות. חיידקים אלו מייצרים אנזים המאפשר להם להפוך חנקן גזי ישירות לצורות זמינות לצמח.

ברקים יכולים באופן בלתי ישיר להפוך חנקן אטמוספרי לניטראטים, אשר שוקעים עם הגשמים לקרקע.

כימות קצב קיבוע החנקן לפני השינויים שיצר האדם במחזור, היא משימה קשה אך הכרחית על מנת להעריך את השפעות השינויים שנגרמו על ידי האדם למחזור החנקן העולמי. יחידת



איור 1 - תרשים מחזור החנקן. מעובד על פי:

Environmental Science, Third Edition by Jonathon Turk and Amos Turk, 1984 by Saunders College Publishing (באישור המוציא לאור).





צילום: D. Tilman

איור 2 - חנקן הוא הגורם המרכזי המגביל מערכות אקולוגיות יבשתיות, ובכלל זה המערכות של האזורים הממוזגים, כמו סוואנת האלונים שבתמונה זו. המספר וההרכב של מיני הצמחים ובעלי החיים שחיים במערכות יבשתיות אלו ותפקוד המערכת האקולוגית תלויים בקצב אספקת החנקן למערכת.

מינים שאינם קטניות, בעיקר אורז. כל אלו מהווים מאגרי חנקן חדשים, תוצרי פעילות האדם, הזמינים מבחינה ביולוגית. כמות החנקן המקובעת על ידי גידולים חקלאיים קשה יותר להערכה מאשר ייצור החנקן התעשייתי. ההערכות נעות בין 32 ל-53 Tg לשנה. כממוצע 40 Tg יהיה הערך שבו נשתמש.

### שרפת דלקים מחצביים

שרפת דלקים מחצביים דוגמת פחם ונפט משחררת חנקן שקובע בעבר ממאגרים ארוכי טווח בתצורות גאולוגיות חזרה לאטמוספירה בצורה של גזים דוגמת חנקן חד חמצני (NO). שרפה בטמפרטורות גבוהות מקבעת גם כמות קטנה של חנקן אטמוספרי באופן ישיר. בסך הכול, הפעלה של כלי רכב, מפעלים, תחנות כוח ותהליכים נוספים של שרפה במנועים פולטת יותר מ-20 Tg של חנקן מקובע לאטמוספירה בכל שנה. במאמר זה ההתייחסות לחנקן זה היא כלחנקן חדש שקובע, מפני שהוא היה קבור במשך מיליוני שנים והיה נשאר קבור לעולם ועד, אילולא שוחרר על ידי האדם.

המקור העיקרי לפליטה של תחמוצות חנקן (NOx) בישראל ובעולם הוא כלי רכב ותעשייה, בעיקר תחנות כוח ובתי זיקוק. בישראל יש כמה תחנות לניטור אוויר, המשמשות למדידת ריכוז המזהמים באוויר. על פי דו"ח "איכות הסביבה בישראל, נתונים ומדדים 2001/2002" אין שיפור בריכוז הממוצע השנתי של תחמוצות חנקן באזורים השונים בארץ, ובאזורים רבים נרשמו חריגות מערך התקן לממוצע שנתי של תחמוצות חנקן, שעומד על 40 מיקרוגרם למטר

פוחת לראשונה בגרמניה במהלך מלחמת העולם הראשונה, וייצור דשן גדל באופן מעריכי מאז שנות ה-40. הקצב הגובר של ייצור ושימוש היה חסר תקדים בשנים האחרונות. כמות החנקן שיוצר באופן תעשייתי לצרכים חקלאיים במשך העשור שבין 1980 ל-1990 הייתה גדולה מכל כמות החנקן התעשייתי שיוצרה לפני כן בהיסטוריה האנושית.

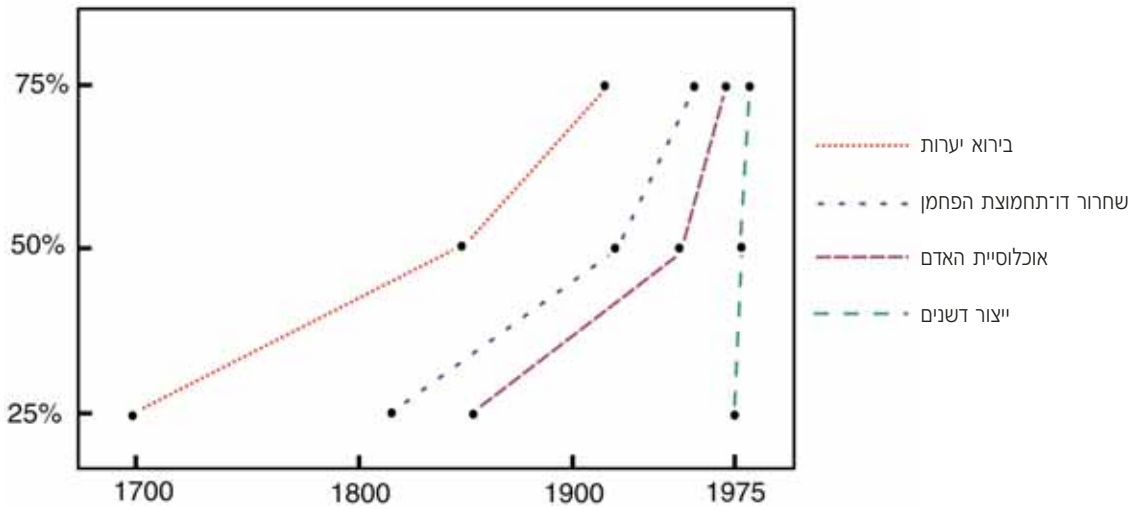
עד סוף שנות ה-70 היה מרבית השימוש בדשן תעשייתי נחלת הארצות המפותחות. כיום השימוש באזורים אלו התייצב, בעוד שבארצות המתפתחות השימוש גדל באופן משמעותי. המגמות של גידול באוכלוסייה האנושית והעיר הגובר מבטיחות, כי ייצור תעשייתי של דשנים בעשורים הבאים יימשך בקצב גבוה וגדל על מנת לעמוד בדרישה ההולכת וגוברת למזון.

### גידולים מקבעי חנקן

כמעט שלישי מפני שטח היבשה של כדור הארץ מנוצל לשימוש חקלאי ולמרעה, ושטחים גדולים של צמחיית בר מגוונת הוחלפו בגידולים חד-מיניים של פולי סויה, אפונה, אספסת וגידולים אחרים ממשפחת הקטניות למטרות מאכל ומרעה. צמחים אלו תומכים בקיומם של מקבעי חנקן סימביוטיים, וכך הם משיגים את מרבית החנקן ישירות מהאטמוספירה ומעלים באופן משמעותי את קצב קיבוע החנקן ביחס למה שהיה קיים בשטחים אלו.

קיבוע של רמות משמעותיות של חנקן מתקיים גם בגידול

## שינויים שנגרמו על ידי האדם למחזור החנקן העולמי



איוור 3 - הקצב של מרבית השינויים העולמיים שנגרמו על ידי האדם גדל באופן חמור בתקופה המודרנית, אך אף לא אחד מהם בקצב שבו גדל הייצור התעשייתי של דשנים החל משנות ה-40 של המאה ה-20. באיור אפשר לראות את השנה שבה השינויים בקצב גדול האוכלוסיה האנושית, בפליטה של דו-חמצנית הפחמן, בבירוא יערות ובייצור דשנים הגיעו ל-25%, 50%-1 75% מהערך שנמדד בשנות ה-80 המאוחרות (לקוח מ: Kates et al., 1990).

במערכות אקולוגיות אלו. פעילויות אחרות של האדם משחררות כמות נוספת של חנקן זמין בשיעור של כמחצית מערך זה. מעדויות אלו סביר להניח ולסכם שפעילויות האדם מגדילות את מעבר החנקן מהאטמוספירה למחזור החנקן הביולוגי היבשתי בשיעור של פי שניים לפחות.

תוספת החנקן הנוצר על ידי האדם מפוזרת באופן בלתי שווה על פני שטח כדור הארץ: חלק מהאזורים, דוגמת צפון אירופה, עוברים שינויים משמעותיים, בעוד שאחרים, דוגמת אזורים נידחים בחצי הכדור הדרומי, מקבלים תוספת ישירה מועטה מחנקן זה. עם זאת, אין אזור שנשאר בלתי מושפע. העלייה בחנקן המקובע הסובב את כדור הארץ ושוקע לקרקע כמשקעים רטובים או יבשים קלה לזיהוי, אפילו בגילוי דיגמות הנחצבים בקרחונים בגרינלנד.

## השלכות לגבי האטמוספירה

אחת ההשלכות העיקריות של שינוי מחזור החנקן כתוצאה מפעילות האדם היא השינוי העולמי והאזורי של הכימיה של האטמוספירה (איור 4) ובפרט - עלייה בפליטת גזים מבוססי חנקן, כגון: Nitrous Oxide ( $N_2O$ ), חנקן חד-חמצני ( $NO$ ) ואמוניה ( $NH_3$ ). אף כי פליטות אלו קיבלו פחות תשומת לב מאשר העלייה בפליטות  $CO_2$  ותרבות גופרית שונות, גזי החנקן השאריטיים גורמים להשפעות סביבתיות גם כשהם נישאים באוויר וגם לאחר שקיעתם בקרקע. לדוגמה,  $N_2O$  נמצא לאורך זמן באטמוספירה ותורם להגברה נוספת של אפקט החממה כתוצאה מפעילות האדם, אשר גורמת כנראה להתחממות אקלים כדור הארץ.  $NO$  הוא חומר מוצא חשוב לגשם חומצי ולעריפיח פוטוכימי.

מעוקב אוויר. בתחנה המרכזית הישנה בתל-אביב, למשל, נמדד בשנת 2001 ערך של 131 מיקרוגרם/מ"ק אוויר, בנתניה - 55 מיקרוגרם/מ"ק אוויר, ובשוק תלפיות בחיפה - 48 מיקרוגרם/מ"ק אוויר. (מתוך: איכות הסביבה בישראל - נתונים ומדדים 2001/2).

## שינוע של חנקן אגור

מלבד עליה ברמת הקיבוע של החנקן ושחרורו ממאגרים גאולוגיים, מעשי האדם גורמים גם לשחרור חנקן ממאגרים ביולוגיים ארוכי טווח כמו, למשל, חומר אורגני בקרקע וגזעים של עצים, התורמים לעלייה נוספת בחנקן הזמין מבחינה ביולוגית. פעילויות אלו כוללות שרפת יערות, עצי בערה ושדות בור, אשר פולטים יותר מ-40 Tg של חנקן לשנה; ניקוז של בתי גידול לחים, אשר יכול לאפשר חמצון של חומר אורגני בקרקע שיכול לשנע 10 Tg ואף יותר לשנה; בירוא שטחים לגידולים חקלאיים אשר יכול לשנע 20 Tg חנקן לשנה מקרקעות.

יש חוסר ודאות מדעית בסוגיות משמעותיות לגבי הכמות והגורל של החנקן המשונע מפעילויות אלו. עם זאת, אם מחברים את כולן יחד, הן יכולות לתרום באופן משמעותי לשינוי מחזור החנקן העולמי.

## קיבוע חנקן ע"י האדם לעומת קיבועו באופן טבעי

ייצור דשנים, גידולי קטניות ושריפת דלקים מחצביים מספקים בסך הכל כ-140 Tg של חנקן חדש למערכות אקולוגיות יבשתיות מדי שנה. ערך זה שווה להערכות הגבוהות ביותר של כמות חנקן המקובע באופן טבעי על ידי אורגניזמים

העלייה נותרו עלומים. שרפת דלקים מאובנים וההשפעות הישירות של דישון חקלאי נשקלו ונדחו כמקור מרכזי לעלייה זו. לעומת זאת, מתפתחת הסכמה לגבי העובדה, שמקורות רבים ומגוונים שמיוצרים על ידי האדם תורמים באופן שיטתי להעשרה של מחזור החנקן היבשתי. "מקורות פזורים" אלו כוללים דשנים, מי תהום מועשרי חנקן, יערות רוויים בחנקן, שרפת יערות, בירוא שטחים לחקלאות ואף ייצור ניילון, NO ומוצרים תעשייתיים נוספים.

ההשפעה הכללית של כל אלה היא עלייה בריכוזים העולמיים של גז חממה רבי-עצמה, התורם גם להידקקות שכבת האוזון הסטרטוספירית.

$N_2O$  הוא אחד מגזי החממה העיקריים שמקורם בפעילות אנושית (שלושת האחרים הם: דו-תחמוצת הפחמן, מתאן ואוזון). תרומת המגזרים השונים לפליטה של  $N_2O$ , כפי שנרשמה בשנת 2000: תעשייה – 1.63 אלפי טונות, חקלאות – 4.2 אלפי טונות, בעיקר כתוצאה של פירוק דשנים חנקניים בקרקע (3.4 אלפי טונות), פסולת – 0.6 אלפי טונות. בסך הכל נמדד ערך של 7.1 אלפי טונות  $N_2O$ , ערך השווה מבחינת ההשפעה היחסית שלו, לעומת ההשפעה של דו-תחמוצת הפחמן כגז חממה, ל-72,437 אלפי טונות של  $CO_2$  למאה שנים (מתוך: איכות הסביבה בישראל – נתונים ומדדים 2001/2).

### חנקן חד-חמצני (NO) ואמוניה ( $NH_3$ )

לעומת  $N_2O$  שאינו ראקטיבי באטמוספירה התחתונה, גם  $NO$  וגם  $NH_3$  הם ריאקטיביים מאוד ולפיכך בעלי זמן חיים קצר. על כן, שינויים בריכוזיהם באטמוספירה ניתנים לזיהוי רק בקנה מידה מקומי או אזורי.

ל- $NO$  כמה תפקידי מפתח בכימיה של האטמוספירה, ובהם זירוז יצירת ערפיח פוטוכימי (או ערפיח חום). בנוכחות אור השמש  $NO$  וחמצן מגיבים עם פחמימנים (hydrocarbons) הנפלטם מכלי רכב ויוצרים אוזון - המרכיב המסוכן ביותר של הערפיח. אוזון בגובה פני השטח גורם נזקים רציניים לבריאות האדם ולבריאותם וליצרנותם של גידולים חקלאיים ויערות.

$NO$ , יחד עם תחמוצות אחרות של חנקן וגפרית, יכול להפוך באטמוספירה לחומצה חנקתית ולחומצה גפריתית, המהוות מרכיבים עיקריים של גשם חומצי.

חלק מפעילויות האדם שנדונו לעיל, משפיעות על האטמוספירה באופן ישיר. לדוגמה, מרבית תוספת החנקן המקובע, יותר מ-20 Tg בשנה, המשוחרר דרך מפלטים של כלי רכב ופעילויות נוספות של שרפת דלקים מחצביים, משתחררת לאטמוספירה כ- $NO$ . פעילויות אחרות מגבירות באופן עקיף את הפליטות לאטמוספירה. דישון אינטנסיבי של קרקעות חקלאיות יכול להעלות את הקצב שבו חנקן בצורת אמוניה מתנדף ואובד לאוויר. תהליך זה יכול גם להאיץ את הפירוק החיידקי של אמוניום וניטראטים בקרקע ולהגביר שחרור של  $N_2O$ . חנקן שנוצר מפעילות האדם יכול לשקוע, אפילו בקרקעות בר ובקרקעות שאינן מעובדות, על ידי הרוח או הגשמים המגיעים מאזורים חקלאיים או תעשייתיים, וכך עלולה להיות עלייה בפליטות גזים חנקניים מקרקעות אלו.

מידות שנערכו ב"תחנות תחבורתיות" לניטור אוויר (תחנות המראות את ריכוז האוויר שאנו נושמים) מראות, כי קיימות מאות חריגות מהתקנים לגבי תחמוצות חנקן. בעוד ערך התקן הממוצע החצי-שעתי עומד על 940 מיקרוגרם/מ"ק אוויר, בכל התחנות התחבורתיות נרשמו בשנת 2001 חריגות מתקן זה: בחיפה, למשל, נמדד ערך של 2,918 מיקרוגרם/מ"ק אוויר, בבני ברק – 2,284 מיקרוגרם/מ"ק אוויר, וביפו – 2,732 מיקרוגרם/מ"ק אוויר. חשוב לציין, כי בכל תחנות המדידה, שמונה במספר, נמדדו מאות חריגות מהתקנים החצי-שעתיים לגבי תחמוצות החנקן, החל מעת הקמתן של התחנות בשנת 1998. עם זאת, במקומות אחדים נרשמה ירידה במספר החריגות שנמדדו (מתוך: איכות הסביבה בישראל – נתונים ומדדים 2001/2).

### $(N_2O)$ Nitrous Oxide

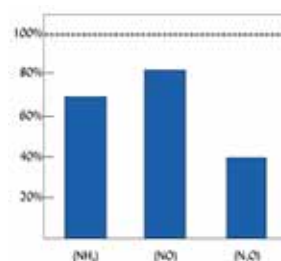
$N_2O$  הוא גז יעיל מאוד ללכידת חום באטמוספירה; הוא קולט חום שמוקן מכדור הארץ באורכי גל של אינפרא-אדום, אורכי גל אשר אינם נלכדים על ידי גזי חממה עיקריים אחרים, אדי מים ודו-תחמוצת הפחמן. על ידי קליטה והקרנה מחדש של חום זה חזרה כלפי כדור הארץ תורם  $N_2O$  לאפקט החממה.

על אף ש- $N_2O$  אינו ריאקטיבי ומתקיים לאורך זמן באטמוספירה התחתונה, כאשר הוא עולה לסטרטוספירה, הוא יכול להניע תגובות אשר פוגעות בשכבת האוזון הסטרטוספירית, המגינה על כדור הארץ מפני קרינה אולטרה-סגולה מזיקה.

ריכוז ה- $N_2O$  באטמוספירה עולה כיום בקצב של 0.2 עד 0.3 אחוזים בשנה. בעוד שעלייה זו מתועדת באופן ברור, מקורות

### פליטת חנקן עולמית הנגרמת על ידי האדם

איור 4 - פעילויות האדם אחראיות לנתח גדול של פליטת גזים מבוססי חנקן, ובכלל זה 40 אחוזים מפליטות ה- $N_2O$ , 80 אחוזים או יותר מפליטות ה- $NO$  ו-70 אחוזים מפליטות האמוניה. התוצאה היא עלייה של דיכווי גז החממה האטמוספרי  $N_2O$ , של גורמי מוצא לערפיח ושל חנקן זמין מבחינה ביולוגית אשר שוקע מהאטמוספירה ומדשן מערכות אקולוגיות.



להשפעות הדישון של החנקן, הממריצות צימוח צמחי, משקעים אלו יכולים להשפיע באופן עקיף על האטמוספירה על ידי שינוי מחזור הפחמן העולמי.

שפע הצומח וההצטברות בעבר של מאגרי חומר צמחי הוגבלו על ידי משאבי חנקן מצומצמים על פני שטחים נרחבים בכדור הארץ, במיוחד באזורים ממוזגים וצפוניים. פעילות האדם הגבירה באופן משמעותי את הצטברות החנקן בחלקים גדולים מאזורים אלו, ועובדה זו מעלה שאלות חשובות: כמה מהגידול הצמחי הנוסף נגרם כתוצאה מתוספת חנקן שמקורה בפעילויות האדם? כתוצאה מכך, כמה פחמן נוסף נאגר במערכות האקולוגיות היבשתיות במקום לתרום לעליית הריכוזים של דו-תחמוצת הפחמן באטמוספירה?

תשובות לשאלות אלו יכולות להסביר את חוסר האיזון במחזור הפחמן, הידוע בכינויו "המבלע החסר" (missing sink). הפליטות המוכרות של דו-תחמוצת הפחמן הנובעות מפעילויות האדם, כגון: שרפת דלקים מחצביים וכריתת יערות גדולה ב-1,000 Tg מהכמות הידועה של דו-תחמוצת הפחמן המצטברת באטמוספירה מדי שנה. האם קצבי גידול מוגברים של צמחייה יבשתית יכולים להיות המבלע שאחראי לגורל חלק נכבד מהפחמן החסר?

ניסויים באירופה ובאמריקה מראים, כי חלק גדול של החנקן הנוסף המוחזק על ידי מערכות אקולוגיות של יערות, בתי גידול לחים וטונדרה מעודד ספיגת פחמן ואגירתו. אולם, חנקן זה יכול גם לעודד פירוק חיידקי וכך לשחרר פחמן מחומר אורגני שבקרקע. עם זאת, במאזן כולל, נראה, כי שיעור ספיגת הפחמן באמצעות צימוח חדש עולה על שיעור איבוד הפחמן, במיוחד ביערות.

קבוצות אחדות ניסו לחשב את כמות הפחמן שיכולה להיאגר בצמחייה יבשתית כתוצאה מצימוח הנובע מתוספת חנקן. ההערכות שהתקבלו נעות בין 100 ל-1,300 Tg בשנה. המספר נטה לגדול בניתוחים העדכניים יותר, ככל שהיקף השינויים שנגרמו על ידי האדם למחזור החנקן הפך לברור יותר. הניתוח העדכני ביותר [לעת כתיבת דו"ח זה] של מחזור הפחמן העולמי, שנערך על ידי פנל בין-לאומי שעסק בנושא שינויי האקלים, הביא למסקנה, כי תוספת החנקן יכולה לייצג מרכיב מרכזי של מבלע הפחמן החסר.

הערכות מדויקות יותר יהיו אפשריות, לאחר שתהיה לנו הבנה טובה יותר של שיעור החנקן הנגרם על ידי האדם אשר באמת מוחזק בתוך מערכות אקולוגיות יבשתיות שונות.

## רוויה בחנקן ותפקוד מערכות אקולוגיות

מידת העלייה בגידול הצומח על ידי דישון חנקני מוגבלת. בנקודה מסוימת, כאשר המחזור בחנקן טבעי במערכת אקולוגית מסופק במלואו, הגידול של הצומח מוגבל על ידי מיעוט של משאבים אחרים, כגון: אשלגן, סידן או מים. כאשר הצמחייה אינה יכולה להגיב יותר לתוספת של חנקן, המערכת



איור 5 - צמחי בר במערכות אקולוגיות טבעיות, כמו התורמוס שבתמונה המקבע חנקן, שלטו במחזור החנקן במשך מיליוני שנים. ייצור דשנים חנקניים על ידי האדם, שרפה של דלקים מחצביים וביית אינטנסיבי של מיני קטניות מוסיפים כיום חנקן למערכות האקולוגיות היבשתיות בכמות המשתווה לזו הקיימת בכל התהליכים הטבעיים גם יחד.

על אף שמספר מקורות תורמים לפליטות NO, בעירת דלקים במוזעים היא מקור דומיננטי לפליטות. שרפת דלקים מחצביים פולטת יותר מ-20 Tg N<sub>2</sub>O בשנה. שרפת יערות וחומר צמחי אחר על ידי האדם יכולה להוסיף עוד כ-10 Tg, ופליטה כלל עולמית של NO מקרקעות, אשר חלק נכבד ממנה נגרמת על ידי האדם, מסתכמת ב-5 עד 20 Tg בשנה. בסך הכול, 80 אחוזים או יותר של פליטות NO ברחבי העולם נובעות מפעילויות האדם, ובאזורים רבים התוצאה היא עלייה בערפיח ובגשם החומצי.

בניגוד ל-NO, אמוניה מתפקדת כגורם ראשוני בנטרול של חומצות באטמוספירה, ויש לה השפעה הפוכה על חומציות אירוסולים, על מי ענבים ועל משקעים. כמעט 70 אחוזים מפליטת האמוניה העולמית נגרמת על ידי האדם. אמוניה המתנדפת משדות מדושנים תורמת כ-10 Tg לשנה; אמוניה שמשחררת מהפרשות של חיות משק כ-32 Tg ומשריפת יערות - כ-5 Tg.

## השפעות על מחזור הפחמן

עלייה בפליטות חנקן הנישא באוויר הובילה להגברה של שקיעת חנקן על פני שטח היבשה ובאוקיינוסים. הודות



של צפון אירופה מאשר בצפון אמריקה, משום שמצבורי החנקן, שנוצרו עקב פעילות האדם, גדולים פי כמה וכמה שם מאשר במקומות הנגועים ביותר בצפון אמריקה. במערכות האקולוגיות רוויות החנקן של אירופה, חלק נכבד של מצבורי הניטראט האטמוספרי נעים מהאדמה לנחלים, מבלי שהם עוברים דרך גופם של אורגניזמים או מבלי שהם ממלאים תפקיד כלשהו במחזור הביולוגי.

בניגוד לכך, בצפון-מזרח ארצות הברית, עלייה בשטיפת ניטראטים מהקרקע ותנודות גדולות ביחסי הנוטריאנטים בעלים של עצים נצפו, בדרך כלל, רק בסוגים מסוימים של יערות. לדוגמה, אתרים גבוהים המקבלים משקעי חנקן גדולים ואתרים עם קרקעות שטוחות המכילות מעט מינרלים אלקליניים המווסתים את החומציות. במקומות אחרים בארצות הברית נצפו שלבים ראשונים של רוויה בחנקן בתגובה לעלייה במצבורי החנקן ביערות, שמקיפים את אגן לוס אנג'לס וברכס הקדמי של הרי הרוקי'ס של קולורדו.

לחלק מהיערות יש יכולת לאגור חנקן נוסף, בייחוד ליערות שהיו חשופים לכריתות חוזרות ונשנות. דבר שגורם בדרך כלל לאבדן חמור של חנקן. באופן כללי, היכולת של יער לאגור חנקן נוסף תלויה בפוטנציאל שלו לצמיחה נוספת ובמלאי החנקן שלו. כך השפעת צבירת החנקן צמודה לגורמים אחרים שהאדם משנה, כמו למשל שימושי שטח, אקלים ושינויים ברמות של דו תחמוצת הפחמן ואוזון באטמוספירה.

## השפעות על המגוון הביולוגי ועל הרכב המינים

אספקה מוגבלת של חנקן זמין ביולוגית היא עובדת חיים במרבית המערכות האקולוגיות הטבעיות, ומינים רבים של צמחים מקומיים מותאמים לתפקד בצורה הטובה ביותר תחת אילוף זה. אספקה חדשה של חנקן למערכות אקולוגיות יכולה לגרום לשינוי דרמטי במינים הדומיננטיים וגם לירידה

האקולוגית מגיעה למצב המתואר כ"רוויה בחנקן". באופן תאורטי, כאשר מערכת אקולוגית רוויה לגמרי בחנקן והקרקעות שלה, הצמחים והחיידקים אינם יכולים להשתמש בו או לאגור אותו יותר, כל תוספת של חנקן חדש תתפזר לנחלים, למי התהום ולאטמוספירה.

לרוויה בחנקן יש כמה השלכות מזיקות על הבריאות ועל התפקוד של מערכות אקולוגיות. השלכות אלו נצפו לראשונה באירופה בשנות ה-70 של המאה ה-20, כאשר מדענים הבחינו בעלייה משמעותית בריכוזי הניטראט בכמה אגמים ונחלים וכן בהצהבה נרחבת ובאבדן של מחטים ביערות אשוחים ומחטניים נוספים, אשר ספגו תוספות חנקן משמעותיות. תצפיות אלו הובילו לניסויי שדה בארצות הברית ובאירופה שהראו, כי יש רצף מורכב של השפעות הנגרמות זו על ידי זו בשל עודף חנקן בקרקעות יער.

כאשר אמוניום מצטבר בקרקע, הוא מומר לניטראט על ידי פעילותם של חיידקים, תהליך שמשחרר יוני מימן ומסייע להחמצת הקרקע. הצטברות הניטראט מחזקת פליטת  $N_2O$  מהקרקע ומעודדת את שטיפת הניטראט, המסיס מאוד במים, לנחלים ולמי התהום. כשהניטראטים הטעונים שלילית נשטפים מהקרקע, הם לוקחים עמם מינרלים אלקליניים הטעונים חיובית, כגון: סידן, מגנזיום ואשלגן. באופן כזה שינויים שגורם האדם למחזור החנקן, מקטינים את פוריות הקרקע על ידי האצה גדולה של אבדן סידן ונוטריאנטים אחרים, החיוניים לגידולם של הצמחים. סילוק של הסידן והפיכת הקרקע לחומצית גורמים לשינוע של יוני אלומיניום, אשר כמותם מגיעה לבסוף לרמות רעילות אשר עלולות להזיק לשורשי עצים או לגרום לתמותת דגים, אם האלומיניום נשטף לנחלים. עצים שגדלים בקרקעות מועשרות בחנקן אך חסרות סידן, מגנזיום ואשלגן, עלולים לפתח חוסר איזון של נוטריאנטים בשורשים ובעלים. תהליך זה עלול להפחית את קצב הפוטוסינתזה ואת יעילותה, לעצור את גידולם ואפילו להגביר את קצב התמותה.

תופעת הרוויה בחנקן נרחבת הרבה יותר בשטחים נרחבים

איור 6 - תהליך של שקיעת חנקן מהאטמוספירה אחראי, כפי הנראה, להצהבה ולאבדן מחטים מעצי מחט ולמקרים של תמותת יערות, כפי שנראה בתמונה.



John Aber צילום.



צילום: D. Tilman

איור 7 - תוספת חנקן בשיעורים שונים הובילה לשינויים מרחיקי לכת בהרכב של מיני הצומח והחרקים ובמגוון המינים בחלקות של צמחים עשבוניים במינסוטה. גודל כל חלקה הוא 4 מטרים x 4 מטרים, ובכל חלקה הוספו כמויות חנקן שונות (בצורה של אמוניום ניטראט) מאז 1982.

רמת הניטראטים הוכפלה מאז 1965. בנהרות מרכזיים של צפון-מזרח ארצות הברית ריכוזי הניטראט עלו פי 3 עד 10 מאז תחילת המאה ה-20, והעדויות מורות כי מגמה דומה קיימת גם בנהרות אירופה.

שוב, באופן בלתי מפתיע, ריכוזי הניטראט בנהרות הגדולים בעולם עלו יחד עם צפיפות האוכלוסייה האנושית באגני הניקוז. כמויות סך כל החנקן המומס בנהרות תואמות את צפיפות האוכלוסייה האנושית, אבל סך כל החנקן אינו עולה באופן מואץ כמו חלקו של הניטראט. ממצאים מורים, שעם העלייה בהפרעות האנושיות גדל חלקו של הניטראט מתוך כלל החנקן המצוי במי פני השטח.

ריכוזים גדלים של ניטראט נצפו גם במי תהום באזורים חקלאיים רבים, על אף שקשה לקבוע את היקף המגמה בדרך כלל, למעט באקוויפריים בודדים מאופיינים היטב. בסך הכול התוספות למי התהום מייצגות כפי הנראה רק חלק יחסי קטן של העלייה בניטראט המוסע במי פני שטח. עם זאת, למי תהום באקוויפריים רבים זמן מחזור ארוך, ופירוש הדבר שאיכות מי התהום תמשיך כנראה לרדת, ככל שפעולות האדם יהיו בעלות השפעה משמעותית על מחזור החנקן. רמות גבוהות של ניטראט במי שתייה מעלות חששות רציניים לבריאות האדם, במיוחד לגבי תינוקות. חיידקים בקיבת תינוקות יכולים להפוך רמות גבוהות של ניטראט לניטריט. כאשר הניטריט נספג במחזור הדם, הוא הופך את ההמוגלובין נושא החמצן לצורה בלתי יעילה הנקראת מטמוגלובין.

משמעותית בסך כל מגוון המינים, מכיוון שמינים מעטים של צמחים המותאמים לנצל את יתרונות כמויות החנקן הגבוהות מנצחים בתחרות את שכניהם. באנגליה, לדוגמה, דשנים חנקניים שניתנו לשטחי ניסוי עשבוניים, הביאו לעלייה בדומיננטיות של כמה מיני עשב אשר הגיבו לחנקן ולאבדן של מיני צמחים רבים אחרים. בקצב הדישון הגבוה ביותר מספר מיני הצמחים ירד פי חמישה. בצפון אמריקה, צמצום דומה של המגוון הביולוגי נוצר על ידי דישון של שטחים עשבוניים במינסוטה ובקליפורניה (איורים 7, 8, 9). ברחבי אירופה המערבית, בשטחי בור שהיו בעבר עשירים במינים, הצטברות חנקן כתוצאה מפעילות האדם נחשבת לאחראית לאבדן משמעותי במגוון הביולוגי בעשורים האחרונים.

בהולנד, צפיפות אוכלוסייה גבוהה, גידול חיות משק אינטנסיבי ותעשיות יצרו יחדיו את הקצב הגבוה ביותר של הרבצת חנקן בעולם. אחת ההשלכות המתועדת באופן מלא היא הפיכת שטחי בור עשירים במינים לשטחים עשבוניים ויערות דלים במינים. לא רק עושר המינים של הבור, אלא גם המגוון הביולוגי של הנופים פחת, מפני שחברות הצמחים, שעברו שינוי, דומות כיום להרכב של חברות המאכלסות קרקעות פוריות יותר. הרכב המינים הייחודי שהותאם לקרקעות חוליות, דלות בחנקן, נעלם מהאזור.

אבדן של מגוון ביולוגי כתוצאה מהצטברות חנקן יכול גם להשפיע על תהליכים ביולוגיים אחרים. ניסויים שנערכו לאחרונה בשטחים עשבוניים במינסוטה הראו, שבמערכות אקולוגיות שהפכו עניות במינים כתוצאה של דישון, יצרנות הצמחים הייתה הרבה פחות יציבה בעתות של בצורת. אפילו בשנים שבהן לא הייתה בצורת, אירועי האקלים החריגים הנורמליים גרמו לשונות רבה יותר בין שנה לשנה ביצרנות של חלקות עשב עניות במינים מאשר בחלקות עשירות במינים.

## השפעות על מערכות אקולוגיות מימיות

### שינויים היסטוריים בכימיה של המים

באופן בלתי מפתיע ריכוזי החנקן במי פני שטח עלו, ככל שפעולות האדם האיצו את קצב הכנסת החנקן המקובע למחזור. מחקר שנעשה לאחרונה על אגן האוקיינוס הצפון אטלנטי על ידי מדענים מתריסר מדינות, מעריך, כי תנועה של סך כל החנקן המומס למרבית הנהרות באזור הממוזג של האגן עלתה כנראה פי 2 עד פי 20 מן התקופה שלפני המהפכה התעשייתית (איור 10). בנהרות באזור הים הצפוני העלייה בחנקן עשויה להיות פי 6 עד פי 20. העלייה בחנקן בנהרות אלו תואמת את כמויות החנקן, שמקורו בפעילויות האדם, הנכנסות לאגני הניקוז של נהרות אלו, בראש ובראשונה על ידי דשנים ומשקעים אטמוספריים.

במשך עשרות שנים ריכוזי הניטראט בנהרות ובמקורות רבים של מים לשתייה נותרו בקפדנות באזורים המפותחים של העולם. ניתוח של נתונים אלו מורה על עלייה ברמות החנקן במי פני שטח. לדוגמה, באלף אגמים בנורבגיה רמות הניטראט הוכפלו במשך תקופה קצרה מעשור שנים. בנהר המיססיסיפי

איור 8 - שטחים עשבוניים טבעיים במינסוטה מכילים, לעתים קרובות, 20 עד 30 או יותר מיני צמחים במטר רבוע, כמו החלקה שבתמונה זו. חלקה זו היא חלקת בקרה אשר לא קיבלה תוספת חנקן ושמרה על המגוון המקורי.



צילום: D.Tilman

המזיקות על נחלים ואגמים. ממשלות אירופיות הכירו כבר בחשיבות החנקן להחמצת קרקעות ומים, ומאמצים בין-ממשלתיים מתקיימים על מנת לצמצם את הפליטות והמשקעים של חנקן על בסיס אזורי.

רמות גבוהות של מטמוגלובין - מצב אנמיה הידוע בשם מטמוגלובינמיה - יכול לגרום לנזק מוחי ואף למוות. מצב זה נדיר בארצות הברית, אך הפוטנציאל קיים בכל מקום שבו רמות הניטראט עולות על התקן האמריקאי של שירות הבריאות הציבורי (10 מיליגרם לליטר).

### אאוטריפיקציה של אסטוארים ומי החופים

אחת התולדות המובנות והמתועדות ביותר של שינויים במחזור החנקן עקב פעילות האדם היא אאוטריפיקציה של אסטוארים (אזור שפכי הנהרות לים שבהם מי הנהרות ומי הים מתערבבים) ומי החופים (איור 11 ו-12). אפשר לטעון כי זהו האיום הגדול ביותר של פעילות האדם על שלמות המערכות האקולוגיות החופיות.

### חנקן ועליית חומציות אגמים

חומצה חנקתית היא גורם מרכזי בהחמצה של אגמים ונחלים בגלל שתי סיבות מרכזיות. האחת, מרבית המאמצים לבקר את המשקעים החומציים - הכוללים גשם חומצי, שלג, ערפל ומשקעים יבשים - התמקדו בצמצום פליטות של דו-חמצנת הגפרית כדי להגביל יצירה של חומצה גפריתית באטמוספירה. מאמצים אלו הצליחו לצמצם באזורים רבים את כניסת החומצה הגפריתית לקרקעות ולמים, בעוד שפליטות של חומצות חנקתיות, שהן חומרי המוצא של חומצה גופרתית, נותרו ברובן ללא בקרה. הסיבה השנייה - אגני ניקוז רבים באזורים בעלי שקיעת חנקן גבוהה עד בינונית מגיעים כנראה לרוויה בחנקן, והקרקעות ההולכות ומחמיצות הן בעלות קיבולת מועטה לווסת את הגשם החומצי, לפני שהוא חודר לנחלים.

גורם נוסף באזורים רבים הוא העובדה שחומצה חנקתית היא השכיחה ביותר בין המזהמים המצטברים בשלגי החורף הנערמים. מרביתה של חומצה זו נשטפת החוצה עם תחילת ההמסה של השלגים באביב, ונוצר במקרים רבים "פולס חומצי" פתאומי ומרוכז לאגמים רגישים.

הוספת חנקן אנ-אורגני למערכות אקולוגיות של מים מתוקים, אשר עשירות גם באשלגן, יכולה ליצור אאוטריפיקציה (העשרה של המים בנוטריאנטים) ולגרום להחמצה של המים. גם אאוטריפיקציה וגם החמצה מובילות בדרך כלל לירידה במגוון של מיני צמחים ובעלי חיים כאחד. אוכלוסיות דגים במיוחד צומצמו או נעלמו לחלוטין באגמים רבים, שהוחמצו ברחבי סקנדינביה, קנדה וצפון-מזרח ארצות הברית.

מאחר ששיעור המערכות האקולוגיות הרוויות בחנקן ממשיך לגדול, יחד עם שקיעת חנקן תוצר פעולות האדם, בקרת הפליטה של דו-חמצנת הגפרית לבדה לא תהיה מספקת על מנת להקטין את הגשם החומצי או למנוע את השפעותיו

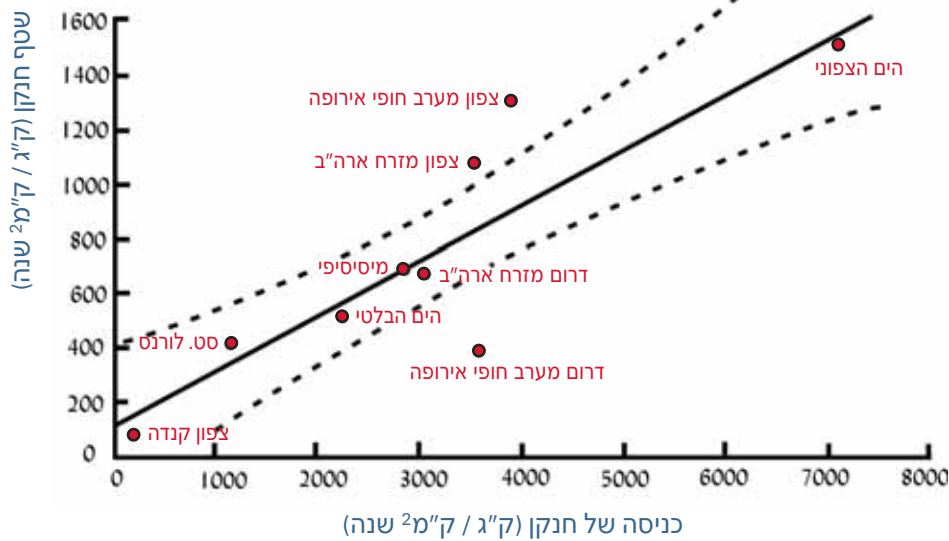


צילום: D.Tilman

איור 9 - תוספת חנקן לחלקה, שהייתה ממוקמת ליד החלקה שבאיור 8, הובילה לאבדן של כמעט כל מיני הערבה המקוריים ולהשתלטות של אגרופידון זוחל. בשנת 1982 חלקה זו נדאתה דומה מאוד לחלקה שבאיור 8.



## השוואה בכניסות של חנקן במערכות מימיות שונות



איור 10 - תנועה של חנקן למרבית מהנהרות באזורים הממוזגים, הנשפכים אל האוקיינוס הצפון האטלנטי, גדלה בשיעור של פי 2 עד פי 20 מאז התקופה שלפני המהפכה התעשייתית. העלייה בכמויות החנקן בנהרות אלו תואמת את כמויות החנקן, שמקורו בפעילויות האדם, הנכנסות לאגני הניקוז של נהרות אלו, בראש ובראשונה על ידי דשנים ומשקעים אטמוספריים.

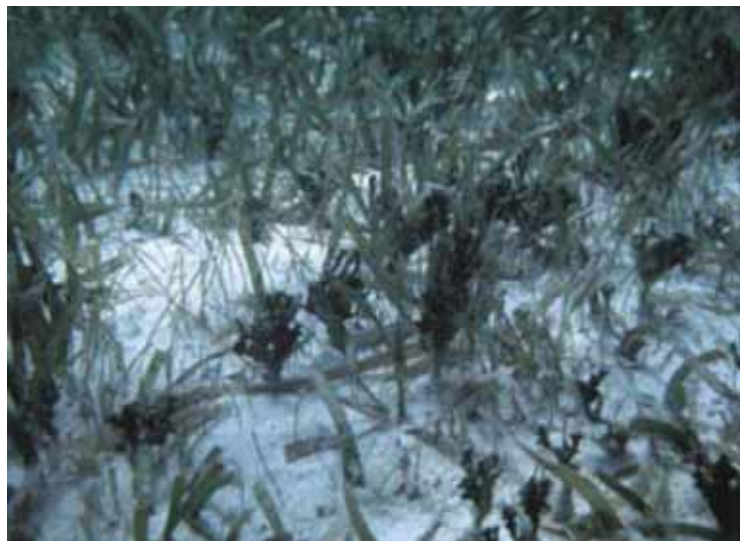
הללו הופכים לשכיחים יותר ויותר בשפכי נהרות ובמי חופים רבים. יש עדויות חזקות לעובדה, שמשנות ה-50 או ה-60 של המאה ה-20 האנוקסיה התגברה בים הבלטי, בים השחור ובמפרץ צ'ייסיפיק (מרילנד, ארצות הברית). תקופות של היפוקסיה נצפו לעתים תכופות במפרץ לונג איילנד, בים הצפוני ובמיצר קאטגאט (המפריד בין דנמרק לשבדיה), ותוצאתן הייתה אבדן משמעותי של דגים ורכיכות.

אטרופיקציה קשורה גם לאבדן של מגוון, גם בחברות של קרקעית הים - ובהן עשבי ים ואלמוגים - וגם באורגניזמים הפלנקטוניים. במים אאוטרופיים, לדוגמה, "אצות המהוות מטרד לאדם" עלולות להשתלט על חברת הפיטופלנקטון. בעשורים האחרונים נצפתה ברחבי העולם עלייה בפריחת אצות מטרדות או רעילות בשפכי נהרות ובמי חופים. בשנות ה-80 גרמו פריחות רעילות של דינופלגטים ואורגניזמים של

בניגוד חריף למרבית האגמים באזורים הממוזגים, שבהם אשלגן הוא הנוטריאנט המגביל ביותר את הייצור הראשוני על ידי אצות וצמחים מימיים אחרים ומבקר בפני אוטרופיקציה, תהליכים אלו מווסתים באזורים הממוזגים על ידי כניסות של חנקן במרבית האסטוארים ומי החופים. זאת בעיקר משום שהשטף הטבעי של חנקן למים אלו וקצב קיבוע החנקן על ידי אורגניזמים פלנקטוניים הוא נמוך יחסית, בעוד שמיקרואורגניזמים במשקעים של קרקעית הים משחררים באופן פעיל חנקן חזרה לאטמוספירה.

כאשר העמסה של כמויות חנקן גבוהות יוצרת אוטרופיקציה במים משוכבים - שבהם מפל טמפרטורה חד מונע ערבוב של מי פני השטח החמים עם מי הקרקעית הקרים יותר - התוצאה יכולה להיות אנוקסיה (היעדר חמצן) או היפוקסיה (כמות חמצן נמוכה) במי הקרקעית. נראה, כי שני המצבים

איור 11 - בתמונה זו אפשר לראות את צמחי הקרקעית של מערכת אקולוגית מימית שהועשרה בכמויות טבעיות של חנקן. שימו לב למגוון הגדול של הצמחים ולהתפורותם בשטח.



צילום: Robert Howarth



Robert Howarth



איור 12 - צמחי הקרקעית במערכת אקולוגית ימית שקיבלה שיעורים גדולים של תוספת חנקן. שימו לב למיעוט המינים ולעובדה שהעלים מכוסים בשכבה עבה של אנות.

### קיבוע חנקן בים

מעט ידוע על מחזור החנקן הטבעי בים הפתוח. ההערכות המקובלות של מידת קיבוע החנקן על ידי אורגניזמים בים נעות בין כמה סדרי גודל, מפחות מ-30 Tg ועד ליותר מ-300 Tg לשנה. יש כמה עדויות לפיהן שינוי מחזור החנקן על ידי האדם יכול לשנות תהליכים ביולוגיים בים הפתוח, אך אין מסגרת השוואתית מספקת שתאפשר להעריך לעומתה שינויים פוטנציאליים שנגרמים על ידי האדם בקיבוע החנקן בים.

### שינויים במשאבים מגבילים

אחת ההשפעות של שינויים במחזור החנקן העולמי הנגרמים על ידי האדם היא ההסטה במשאבים המגבילים תהליכים ביולוגיים באזורים רבים. כמויות גדולות של חנקן מושקעות כיום במערכות אקולוגיות רבות, אשר היו בעבר חסרות חנקן. המינים הדומיננטיים במערכות אלו התפתחו עם מגבלת החנקן, והדרכים שבהן הם גדלים, מתפקדים ויוצרים שותפויות סימביוטיות משקפות הסתגלות למגבלה זו. עם הסרת מגבלה זו מינים צריכים לפעול תחת אילוצים חדשים כמו, למשל, מחסור באספקת אשלגן או מים. כיצד מושפעים תפקודם של האורגניזמים והתהליכים האקולוגיים מהשינויים בסביבתם הכימית, אשר אין להם לגביה רקע אבולוציוני והם אינם מותאמים לה?

### יכולת הקיבול של חנקן

יערות ובתי גידול לחים שונים מאוד בקיבולת שלהם לתוספת חנקן. גורמים שונים המשפיעים זה על זה מוכרים ביכולתם להשפיע על יכולת קיבול זו, ובהם – מרקם הקרקע, מידת הבלייה הכימית של הקרקע, היסטוריית השרפות, קצב ההצטברות של החומר הצמחי ושימוש האדם בשטח בעבר. יחד עם זאת, אנחנו עדיין חסרים הבנה בסיסית כיצד תהליכים של אגירת החנקן שונים בין מערכות אקולוגיות ועוד הרבה פחות – כיצד הם השתנו בעבר וישתנו עם הזמן בעתיד.

גאות חומה (brown-tide organism) למוות של דגים ורכיכות בשפכי נהרות רבים. על אף שהגורמים עדיין לא לגמרי מובנים, יש עדויות מוצקות לפיהן העשרה בנוטריאנטים של מי החופים אחראית, לפחות בחלקה, לפריחות אלו.

נתוני ניטור לאומי במפרץ אילת בין החודשים ספטמבר 2002 לנובמבר 2003 מראים מגמה חסרת תקדים של עלייה משמעותית בכמות הנוטריאנטים – חנקן וסיליקה – ובפרט חנקן בעמודת המים העמוקים בלב המפרץ. עלייה זו נמשכת לפחות שש שנים ומגיעה עד גבולה הדרומי של ירדן. כמות החנקן ליחידת שטח בים הפתוח גדלה מאז 1997 פי 2.2 בשיעור ממוצע – עלייה שנתית של 252 טון חנקן לשנה. קיימים ארבעה מקורות אפשריים להעשרה המסיבית בחנקן – כלובי הדגים, חדירת מי תהום עשירים בנוטריאנטים, שינוי כלשהו במאגר הגדול של חנקן אורגני מומס במי הים וסיבות טבעיות כמו, למשל, הגברת עליו המים במפרץ או בים סוף. האפשרות הרביעית, עם זאת, נשללת בשל העובדה, שכמות הסיליקה גדלה בשיעור של 1.8 בלבד לעומת 2.2, וכן מדדים כמו טמפרטורה ומליחות אשר היה צפוי שישתנו גם הם, לו יותר מים היו מועלים מן העומק. עובדות אלו מעידות על תרומת נוטריאנטים ממקור חיצוני, אשר יחס החנקן לסיליקה שבו גבוה יותר מאשר במי הים (מתוך: תכנית הניטור הלאומית בצפון מפרץ אילת. דו"ח שנתי מסכם - 2003).

### אי-ודאויות מרכזיות

על אף שדו"ח זה התמקד במה שידוע על השינויים הנגרמים על ידי האדם למחזור החנקן העולמי, נותרו אי-ודאויות מרכזיות. חלקן הוזכרו בפרקים הקודמים. פרק זה, עם זאת, מתמקד בתהליכים חשובים שנותרו כה לא מובנים עד כי קשה להבחין בהשפעות שנגרמות על ידי האדם או לצפות את השלכותיהן.



צילום: Nadine Cavender

איור 13 - פעילויות האדם כמו, למשל, ייצור דשנים, גידול קטניות ושרפת דלקים מחצביים אחראיות לכמות חנקן השווה לכמות החנקן הנוצרת בתהליכים טבעיים ואף גדולה ממנה בשיעורה. השליטה של האדם במחזור החנקן משפיעה על תפקודן של מערכות אקולוגיות יבשתיות וימיות, ובהן - בתי גידול של גדות נחלים, כמו זה שבמערכת האקולוגית האלפינית המוצג בתמונה זו.

למרות זאת, יש דרכים שבהן אפשר להאט את הגידול בשימוש בדשנים וגם להפחית ביכולת השינוע - וכתוצאה מכך בהשפעות האזוריות והעולמיות - של חנקן הניתן לשדות.

דרך אחת להפחית את כמות הדשן שמשתמשים בו היא העלאת יעילותו. במקרים רבים, לפחות מחצית מכמות הדשן שניתן לשדה אובדת לאוויר או למים. דליפה זו מהווה בזבז יקר לחקלאי וכן גורם משמעותי לשינוי סביבתי. קיימים מספר נוהלי ממשק אשר יכולים להקטין את כמויות הדשנים הניתנות ולהפחית את אבדן החנקן לאוויר ולמים, מבלי לוותר על היבולים או על הרווחים (ובמקרים מסוימים אפילו להגדיל אותם). לדוגמה, חווה מסחרית לגידול קנה סוכר בהוואי הצליחה לקצץ בשימוש בדשנים החנקניים בשליש ולהפחית אבדן של  $\text{NO}_x$  ו- $\text{N}_2\text{O}$  פי 10 על ידי המסת הדשן במי ההשקיה, החדרתו מתחת לפני הקרקע ותזמון הטיפולים, באופן שיתאימו לצרכים של גידול הצומח. מערכת עתירת ידע זו הוכיחה עצמה כרווחית יותר מאשר מתן טיפולים מעטים יותר וגדולים יותר לפני שטח הקרקע. היישום הנרחב של ממשק כזה, במיוחד באזורים מתפתחים, צריך להיות בעדיפות גבוהה אצל אגרונומים ואקולוגים, מאחר שממשק משופר מאפשר להקטין את ההוצאות של ייצור המזון ולהאט את קצב השינוי העולמי.

יש דרכים למנוע מחנקן, שנשטף מקרקעות חקלאיות מדושנות, להגיע לנחלים, לשפכי הנהרות ולמי החופים, שם הוא תורם לאאוטרופיקציה. אדמות חקלאיות התרחבו באזורים רבים על ידי הטיית נתיבי זרימה, בירוא יערות בגדות הנחלים וניקוז בתי גידול לחים. עם זאת, אזורים אלו מהווים מבלעים חשובים לחנקן טבעי. שיקום בתי גידול לחים וגדות נחלים ואפילו בניית בתי גידול לחים מלאכותיים נמצאו יעילים לשם מניעת כניסה של עודפי חנקן למים אלו.

### שרפת דלק מחצבי

המקור השני החשוב לקיבוע חנקן על ידי האדם הוא שרפת דלקים מחצביים. גם תהליך זה יגבר באופן משמעותי במאה הנוכחית, במיוחד בארצות המתפתחות. אחד המחקרים צופה כי ייצור חומצות חנקתיות מדלקים מחצביים יכפיל עצמו

### שינוי הדה-ניטריפיקציה

באגני נהרות גדולים מרבית החנקן שמגיע מפורק, כנראה, על ידי חיידקים דה-ניטריפיקטיים ומשחרר לאטמוספירה כגז חנקן או  $\text{N}_2\text{O}$ . קיימת הבנה מעטה לגבי מקום ההתרחשות של תהליך זה, אף כי אנחנו יודעים, כי אזורים של גדות הנחלים ובתי גידול לחים הם חשובים. פעולות האדם, כגון: עלייה בהשקעת חנקן, בניית סכרים וגידול אורז הגבירו כנראה את הדה-ניטריפיקציה, בעוד שייבוש בתי גידול לחים ושינוי מערכות אקולוגיות של גדות נחלים הפחיתו כנראה תהליך זה. אבל השפעת האדם כשלעצמה נותרה לא ברורה.

### מחזור החנקן הטבעי

מידע לגבי הקצבים של שקיעת החנקן ואבדנו באזורים שונים לפני הפיתוח האנושי המקיף נותר חלקי. בחלקו הוא משקף את העובדה, כי כל כדור הארץ מושפע במידה כלשהי על ידי פעילות האדם. למרות זאת, מחקרים באזורים מרוחקים בחצי הכדור הדרומי מורים, כי עדיין נותר מידע רב ערך שיש לאסוף על אזורים שבהם השפעת האדם מינימלית.

## תחזיות עתידיות ואפשרויות ממשק

### שימוש בדשנים

התוספות הגדולות ביותר של חנקן שמקורן באדם קשורות לפעולות שנועדו להגביר את ייצור המזון. חקלאות מודרנית אינטנסיבית מחייבת שימוש בכמויות גדולות של דשנים חנקניים; האנושות, לעומת זאת, זקוקה לחקלאות אינטנסיבית כדי לקיים אוכלוסייה הולכת וגדלה. כתוצאה מכך, ייצור דשנים חנקניים ושימוש בהם גדל באופן מעריכי, וכיום שימוש הולך וגובר בדישון קיים במדינות המתפתחות, שבהן קצב גידול האוכלוסייה הוא הגבוה ביותר. אחד המחקרים צופה, כי הייצור העולמי של דשנים חקלאיים יעלה עד שנת 2020 מרמתו הנוכחית -  $\text{Tg } 80$  לשנה - ל- $\text{Tg } 134$  לשנה.

הפחתת הגידול בייצור של דשנים חקלאיים היא אתגר קשה.

- Nixon, S. W., J. W. Ammerman, L. P. Atkinson, V. M. Berounsky, G. Billen, W. C. Boicourt, W. R. Boynton, T. M. Church, D. M. Ditoro, R. Elmgren, J. H. Garber, A. E. Giblin, R. A. Jahnke, N. P. J. Owens, M. E. Q. Pilson, and S. P. Seitzinger. The fate of nitrogen and phosphorus at the land-sea margin of the North Atlantic Ocean. *Biogeochemistry* 35: 141-180.
- NRC. 1994. *Priorities for Coastal Ecosystem Science*. National Research Council. Washington, D.C.
- Prinn, R., D. Cunnold, R. Rasmussen, P. Simmonds, F. Alyca, A. Crawford, P. Fraser, and R. Rosen. 1990. Atmospheric emissions and trends of nitrous oxide deduced from 10 years of ALE-GAGE data. *Journal of Geophysical Research* 95:18,369-18,385.
- Schindler, D. W. and S. E. Bayley. 1993. The biosphere as an increasing sink for atmospheric carbon: estimates from increasing nitrogen deposition. *Global Biogeochemical Cycles* 7:717-734.
- Schlesinger, W. H. 1991. *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*. Academic Press, San Diego.
- Smil, V. 1991. Population growth and nitrogen: an exploration of a critical existential link. *Population and Development Review* 17:569-601.
- Tamm, C. O. 1991. *Nitrogen in Terrestrial Ecosystems*. Springer-Verlag, Berlin. 115 pp.
- Tilman, D. 1987. Secondary succession and the pattern of plant dominance along experimental nitrogen gradients. *Ecological Monographs* 57(3):189-214.
- Vitousek, P. M. and R. W. Howarth. 1991. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? *Biogeochemistry* 13:87-115.

## ספרות מצוטטת ל"היבט הישראלי":

- גנין א' וסילברמן ג'. 2004. תכנית הניטור הלאומית בצפון מפרץ אילת. דו"ח שנתי מסכם – 2003.
- איכות הסביבה בישראל – נתונים ומדדים 2001/2. 2003. המשרד לאיכות הסביבה.

## על סדרת סוגיות באקולוגיה

סדרת סוגיות באקולוגיה נועדה לדווח, בשפה המובנת לכל, את ההסכמות של צוות המדענים על סוגיות רלוונטיות לסביבה. סוגיות באקולוגיה הופקה בתמיכת Pew Scholars 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.

ב-25 השנים הבאות, מכ-20 Tg בשנה ל-46 Tg. הפחתת הפרשות אלו תדרוש שיפורים ביעילות של שרפת הדלק ובלכידת תוצרי הלוואי הנישאים על ידי הרוח. בדומה לשיפורים ביעילות דשנים, יהיה חשוב במיוחד להפיץ טכנולוגיות מנועים יעילות לארצות המתפתחות, שבהן הכלכלה והתעשייה נמצאות בהליך של צמיחה.

## מסקנות

פעולות האדם במהלך המאה החולפת הכפילו את הקצב השנתי הטבעי של כניסת חנקן מקובע למחזור החנקן היבשתי, וקצב זה נמצא כנראה במגמת האצה. ההשלכות הסביבתיות החמורות של תהליכים אלה כבר נראות לעין. ריכוזים של גז החממה  $N_2O$  ושל חומרי המוצא החנקניים של ערפיח וגשם חומצי באטמוספירה עולים. הקרקעות באזורים רבים עוברות תהליך של החמצה ושל שטיפה של נוטריאנטים החיוניים להמשך הפוריות שלהן. מי נחלים ואגמים באזורים אלו עוברים גם הם תהליך של החמצה, וחנקן עודף מוסע על ידי הנהרות לשפכים ולמי החופים. יש להניח, כי העמסת חנקן זו, שאין לה תקדים, תרמה כבר לירידה ארוכת טווח בדגת החופים ולאבדן מואץ של מגוון צמחים ובעלי חיים במערכות אקולוגיות מימיות ויבשתיות. יש צורך דחוף במדיניות לאומית ובין-לאומית אשר תתמודד עם סוגיית החנקן, תאט את קצב השינוי העולמי ותמתן את השפעותיו.

## מקורות:

- Berendse, F., R. Aerts, and R. Bobbink. 1993. Atmospheric nitrogen deposition and its impact on terrestrial ecosystems. Pp. 104-121 in C.C. Vos and P. Opdam (eds), *Landscape Ecology of a Stressed Environment*. Chapman and Hall, England.
- Cole, J. J., B. L. Peierls, N. F. Caraco, and M. L. Pace. 1993. Nitrogen loadings of rivers as a human-driven process. Pages 141-157 in M. J. McDonnell and S. T. A. Pickett (eds.), *Humans as Components of Ecosystems: The Ecology of Subtle Human Effects and Populated Areas*. Springer-Verlag, NY.
- DOE (Department of Environment, UK). 1994. *Impacts of Nitrogen Deposition in Terrestrial Ecosystems*. Technical Policy Branch, Air Quality Div., London.
- Galloway, J. N., W. H. Schlesinger, H. Levy II, A. Michaels, and J. L. Schnoor. 1995. Nitrogen fixation: atmospheric enhancement-environmental response. *Global Biogeochemical Cycles* 9:235-252.
- Howarth, R. W., G. Billen, D. Swaney, A. Townsend, N. Jaworski, K. Lajtha, J. A. Downing, R. Elmgren, N. Caraco, T. Jordan, F. Berendse, J. Freney, V. Kudryarov, P. Murdoch, and Zhu Zhao-liang. 1996. Regional nitrogen budgets and riverine N & P fluxes for the drainages to the North Atlantic Ocean: Natural and human influences. *Biogeochemistry* 35: 75-139.

## 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
- Dr. William Schlesinger, Departments of Botany and Geology, Duke University, Durham, NC 27708-0340

### 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

### תודות

סדרה 'סוגיות באקולוגיה' היא פרי השראתו של Dr. Ron Pulliam, אשר הגה את הרעיון לראשונה, ושל Dr. Judy Meyer, אשר ישבה בראש הוועדה של החברה האקולוגית האמריקאית, שפיתחה את התפיסות ושכנעה את ה-ESA לקדם זאת. אנו מוקירים את תרומתם.

## השינויים שגורם האדם במחזור החנקן: הגורמים והשלכותיהם

### נכתב במקור על ידי:

Peter M. Vitousek, Chair, John Aber, W. Howarth, Gene E. Likens, Pamela A. Matson, David W. Schindler, William H. Schlesinger, David G. Tilman

### על המהדורה האמריקאית:

החבורת התפרסמה בסדרת Issues in Ecology (אביב 1997). החבורת מסכמת את ממצאי צוות המדענים. הדו"ח המלא התפרסם ב-Ecological Applications, Vol 7, August 1997, ובו דיון וציטוט של יותר מ-140 מקורות ביבליוגרפיים. מרשימה זו נבחרו הפרסומים הבאים כבסיס לדו"ח הנוכחי.

### 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

דו"ח זה מציג את ההסכמה של שמונה מדענים העוסקים בהיבטים השונים של תחום זה. הדו"ח עבר ביקורת עמיתים ואושר על ידי המערכת של 'סוגיות באקולוגיה'. ההשתייכות של המדענים היא:

- Dr. Peter M. Vitousek, Panel Chair, Department of Biological Sciences, Stanford University, Stanford, CA 94305
- Dr. John Aber, Complex Systems Research Center, Institute for the Study of Earth, Oceans and Space, University of New Hampshire, Durham, NH 03824-3525
- Dr. Robert W. Howarth, Section of Ecology and Systematics, Corson Hall, Cornell University, Ithaca, NY 14853
- Dr. Gene E. Likens, Institute of Ecosystem Studies, Cary Arboretum, Millbrook, NY 12545
- Dr. Pamela A. Matson, Soil Science, University of California, Berkeley, Berkeley, CA 94720
- Dr. David W. Schindler, Department of Biological Sciences, University of Alberta, Edmonton, Alberta, T6G 2E9, CANADA
- Dr. William H. Schlesinger, Departments of Botany and Geology, Duke University, Durham, NC 27708-0340
- Dr. David Tilman, Department of Ecology, Evolution and Behavior, University of Minnesota, St. Paul, MN 55108-6097

### על הכותבת המדעית

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



---

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

