



מהו מחזור החנקן ומדוע הוא הכרחי לחיים?

Miriam R. Aczel*

המרכז למדיניות סביבתית, אימפריאל קולג' לונדון, לונדון, בריטניה

סוקרות צעירות

JULIETTE

גיל: 14



CLAIRE

גיל: 15



חנקן, היסוד הכי נפוץ באטמוספירה שלנו, הכרחי לחיים. חנקן נמצא באדמה ובצמחים, במים שאנו שותים ובאוויר שאנו נושמים. הוא גם הכרחי לחיים: חנקן משמש כיחידת בנייה חשובה של דנ"א, אשר מכתוב את הגנטיקה שלנו, והוא הכרחי לצמיחה של צמחים ולכן הכרחי למזון שאנו מגדלים. אולם כמו עם כל דבר גם כאן איזון הוא חשוב: עם מעט מדי חנקן צמחים לא יכולים לשגשג, מה שמוביל לתפוקה נמוכה של יבולים; אולם יותר מדי חנקן יכול להיות רעיל לצמחים, וגם יכול לפגוע בסביבה שלנו. צמחים שאין להם מספיק חנקן נעשים צהובים ולא גדלים טוב, ויש להם פרחים ופירות קטנים יותר. חקלאים יכולים להוסיף חומרי דשן עם חנקן כדי להפיק יבולים טובים יותר, אולם יותר מדי חנקן יכול לפגוע בצמחים ובחיות, ולזהם את המערכות הימיות. הֶבְנֵת מחזור החנקן – כיצד חנקן נע מהאטמוספירה אל כדור הארץ, דרך האדמה וחזרה לאטמוספירה במחזור אינסופי – יכולה לסייע לנו לגדל יבולים בריאים ולהגן על הסביבה שלנו.

הקדמה

חנקן, שמסומן ב-N, הוא יסוד חסר צבע וחסר ריח. חנקן נמצא באדמה שמתחת לרגלינו, במים שאנו שותים ובאוויר שאנו נושמים. למעשה, חנקן הוא היסוד השכיח ביותר באטמוספירה של כדור הארץ: בסביבות 78% מהאטמוספירה מורכבת מחנקן! חנקן חשוב לכל היצורים החיים,

כולל אותנו. הוא ממלא תפקיד חשוב בגדילה של צמחים: עם מעט מדי חנקן צמחים לא יכולים לשגשג, מה שמוביל לתפוקה נמוכה של יבולים; אולם יותר מדי חנקן יכול להיות רעיל לצמחים [1]. חנקן הכרחי לאספקת המזון שלנו, אולם עודף חנקן יכול לפגוע בסביבה.

מדוע חנקן חשוב?

האיזון העדין שבין חומרים שחשובים עבור שימור החיים הוא תחום מחקר חשוב, ואיזון החנקן בסביבה אינו יוצא דופן [2]. כאשר לצמחים אין מספיק חנקן הם נעשים צהובים, גדילתם איטית יותר והם מייצרים פרחים ופירות קטנים יותר. חקלאים יכולים להוסיף חומרי דשן שמכילים חנקן ליבולים שלהם כדי להאיץ את גדילת היבולים. מדענים מעריכים שללא חומרי דשן עם חנקן היינו מפסידים עד שלישי מהיבולים שאנו נתמכים בהם עבור מזון וסוגי חקלאות אחרים. אולם אנו צריכים לדעת כמה חנקן הכרחי לגדילה של צמחים מאחר שיותר מדי חנקן יכול לזהם נתיבי מים, מה שיפגע בחיים הימיים.

חנקן הכרחי לחיים!

חנקן הוא יסוד מפתח בחומצות הגרעין **דנ"א** ו-**רנ"א**, שהן המולקולות הביולוגיות החשובות ביותר והן הכרחיות לכל היצורים החיים. דנ"א נושא מידע גנטי, כלומר את הוראות הבנייה של צורות החיים. כאשר צמחים לא מקבלים מספיק חנקן הם לא מסוגלים לייצר חומצות אמינו (חומרים שמכילים חנקן ומימן ויוצרים הרבה תאים חיים, שרירים ורקמות). ללא חומצות אמינו צמחים לא מסוגלים לייצר חלבונים מיוחדים שתאיהם זקוקים להם כדי לגדול. ללא כמות מספיקה של חנקן הגדילה הצמחית מושפעת באופן שלילי. עם יותר מדי חנקן צמחים מייצרים יותר מדי ביומסה, או חומר אורגני, כמו למשל גבעולים ועלים, אולם לא מספיק מבני שורש. במקרים קיצוניים, צמחים עם רמות גבוהות מאוד של חנקן שנספג מהאדמה יכולים להרעיל חיות מרעה שאוכלות אותם [3].

מהי אטרופיקציה והאם ניתן למנוע אותה?

חנקן עודף יכול לדלוף מהאדמה אל מקורות מים תת-קרקעיים, או שהוא יכול להיכנס למערכות ימיות כמו מי נגר. החנקן העודף הזה יכול להצטבר, מה שמוביל לתהליך שמכונה **אטרופיקציה** (העֵתְרָה על פי האקדמיה ללשון עברית). אטרופיקציה מתרחשת כאשר יותר מדי חנקן מעשיר את המים, מה שגורם לגדילה עודפת של צמחים ואצות. יותר מדי חנקן יכול אפילו לגרום לאגם להפוך לירוק בהיר או להיצבע בצבעים אחרים, עם "פריחה" של אצות מסריחות שנקראות **פיטופלנקטון** (ראו איור 1)! כאשר פיטופלנקטון מתים מיקרובים במים מפרקים אותם. תהליך הפירוק מפחית את כמות החמצן שהתמוסס במים, ויכול להוביל ל"אזור מת" שאין בו מספיק חמצן לתמוך במרבית צורות החיים. אורגניזמים באזור המת מתים ממחסור בחמצן. האזורים המתים האלה יכולים להתרחש באגמים של מים מתוקים וגם בסביבות חופיות שבהן נהרות שמלאים בחומרי מזון ממי נגר חקלאיים (זרימת יתר של חומרי דשן) זורמים לתוך האוקיינוסים [4].

דנ"א (DNA)

חומצה דאוקסיריבונוקלאית, חומר שמשכפל את עצמו אשר נוכח כמעט בכל האורגניזמים החיים כרכיב העיקרי של כרומוזומים, והנשא של המידע הגנטי.

רנ"א (RNA)

חומצה ריבונוקלאית, חומצת גרעין שנוכחת בכל התאים החיים ומשמשת כשליח שנושא הוראות מהדנ"א.

אטרופיקציה (Eutrophication)

כמות עודפת של חומרי מזון (כמו למשל חנקן) באגם או בגוף מים אחר, שגורמת לגדילה דחוסה של צמחים מימיים כמו אצות.

פיטופלנקטון (Phytoplankton)

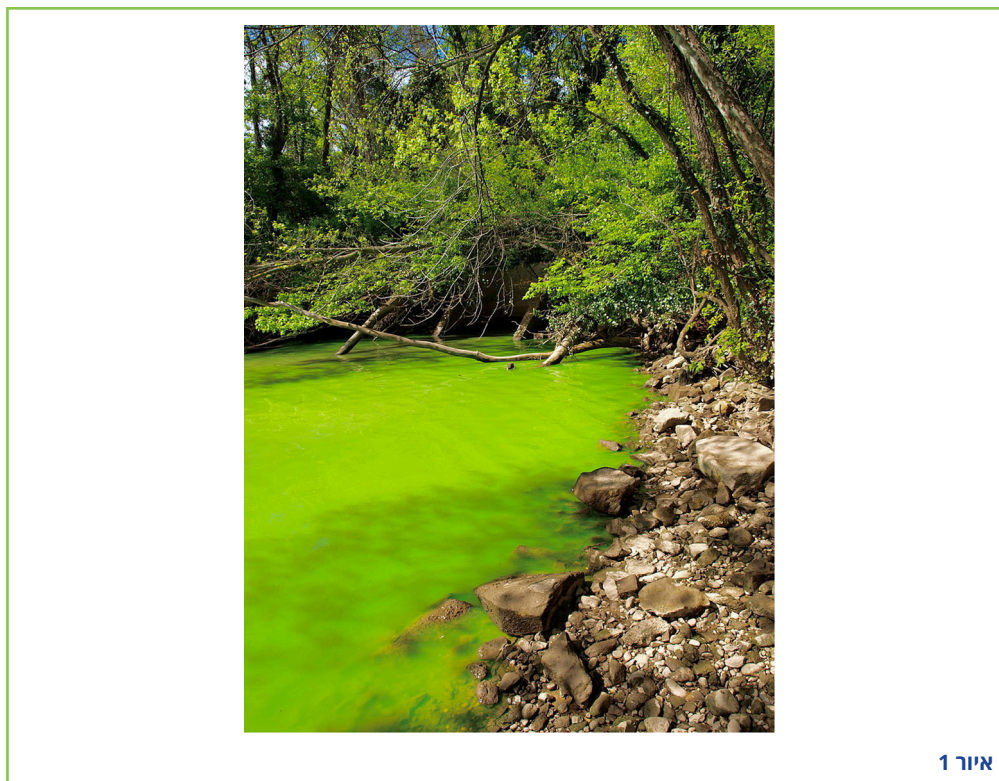
אצה ימית מיקרוסקופית (שידועה גם כ microalgae) שדורשת אור שמש כדי לגדול.

איור 1

אטרופיקציה של מי פסולת בנהר פוטומאק שבווישינגטון, ארצות הברית. המים בנהר הזה הם ירוקים בהירים מאחר שהם עברו אטרופיקציה כתוצאה מעודף חנקן וחומרים מזהמים אחרים במים, אשר הובילה לפריחת מוגברת של פיטופלנקטון ואצות, כך שהמים הפכו למעוננים והם יכולים להיצבע בצבעים שונים כמו ירוק, צהוב, אדום או חום, כתלות בפריחת האצות (רישיון

ויקימדיה: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Potomac_green_water.JPG

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Potomac_green_water.JPG



איור 1

איור 2 מציג את שלבי האטרופיקציה (התמונה ברישיון הפתוח של ויקימדיה: <https://commons.m.wikimedia.org/wiki/File:Eutrophicationmodel.svg>).

האם אפשר למנוע אטרופיקציה? כן! אנשים שמנהלים מקורות מים יכולים להשתמש באסטרטגיות שונות כדי להפחית את ההשפעות השליליות של פריחת אצות ושל אטרופיקציה במשטחי מים. הם יכולים, בין השאר, לנתב מחדש את חומרי המזון העודפים הרחק מנהרות ומאזורי חוף פגיעים; להשתמש בקוטלי עשבים (כימיקלים שיודעים כהורגים גדילת צמחים לא רצויה) או קוטלי אצות (כימיקלים שמשמשים להריגת אצות) במטרה להפסיק את פריחת האצות, ולהפחית את כמויות או שילובי חומרי המזון שמשמשים בחומרי דשן חקלאיים [5]. אולם לעיתים קשה למצוא את המקור של החנקן ושל חומרי המזון העודפים הנוספים.

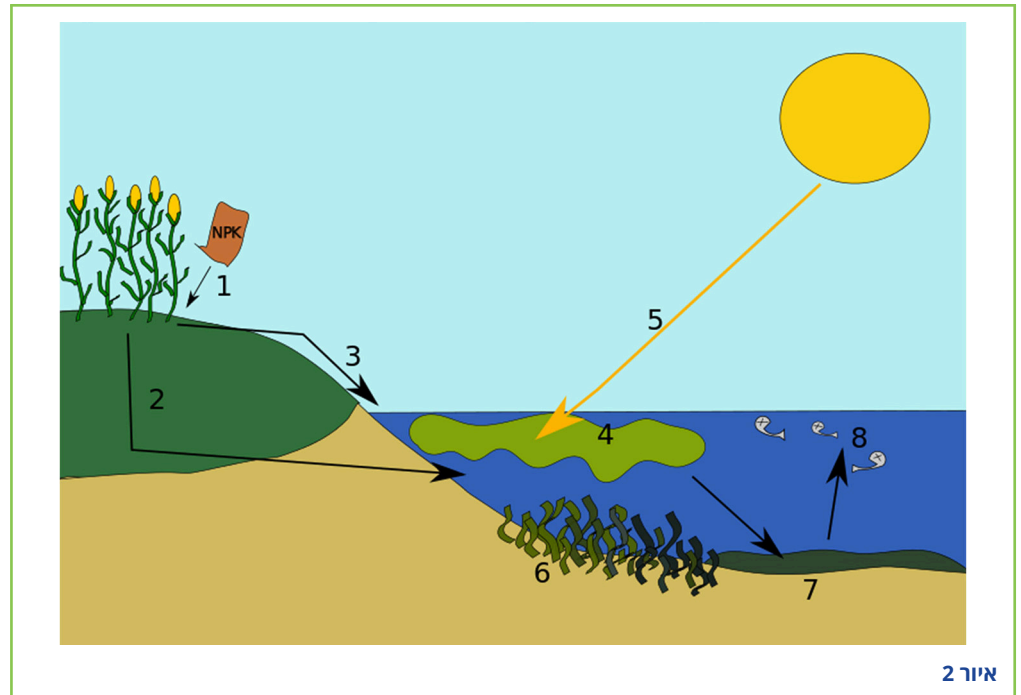
טיפול ביולוגי (Bioremediation)

שימוש במיקרואורגניזמים או ביצורים חיים זעירים אחרים במטרה לאכול את הזיהום ולפרקו בכדי לנקות אתר מזהם.

ברגע שאגם עבר אטרופיקציה, אפילו קשה יותר לעשות בקרת נזקים. קוטלי אצות יכולים להיות יקרים והם גם לא מתקנים את מקור הבעיה: החנקן או חומרי המזון העודפים האחרים שגרמו לפריחת האצות מלכתחילה! פתרון פוטנציאלי אחר נקרא **טיפול ביולוגי**, שהוא תהליך של שינוי מכוון של רשת המזון במערכות אקולוגיות ימיות במטרה להפחית את כמות הפיטופלנקטון או לשלוט בה. לדוגמה, מנהלי מים יכולים להכניס אורגניזמים שאוכלים פיטופלנקטון, והאורגניזמים האלה יכולים לסייע בהפחתת כמויות הפיטופלנקטון באמצעות אכילה שלהם!

איור 2

שליבים של אטרופיקציה. (1) עודף חומרי מזון מגיע לאדמה ולקרקע. (2) חלק מחומרי המזון מומסים במים ודולפים לתוך שכבות אדמה עמוקות יותר. לבסוף הם דולפים לגוף מים כמו אגם או בריכה. (3) חלק מחומרי המזון "בורחים" מהאדמה והקרקע ישירות לתוך המים. (4) חומרי המזון העודפים גורמים לאצות לפרוח. (5) אור שמש נחסם על-ידי האצות. (6) פוטוסינתזה וגדילה של צמחים מתחת למים ייחלשו או יפסקו. (7) תהליך הפירוק גורם לשבירה של השאריות, וחמצן נצרך בתהליך. (8) תהליך הפירוק גורם למים להיות עם פחות חמצן, מה שמובייל ל"אזורים מתיים". צורות חיים גדולות יותר כמו דגים לא מצליחות לנשום באותם האזורים, ומתות. בשלב זה גוף המים עבר אטרופיקציה.



איור 2

מהו בדיק מחזור החנקן?

מחזור החנקן הוא מחזור של תהליכים שדרכם חנקן נע דרך דברים חיים ולא חיים: האטמוספירה; אדמה; צמחים; חיות וחיידקים. כדי לנוע דרך חלקים שונים של המחזור, חנקן צריך לשנות צורות. באטמוספירה, חנקן מתקיים כגז (N_2) אולם באדמה הוא מתקיים כתחמוצת החנקן, NO , וכחנקן דו-חמצני, NO_2 , וכאשר הוא משמש כחומר דשן אפשר למצוא אותו בצורות שונות כמו אמוניה, NH_3 , שאותן אפשר לעבד לחומרי דשן נוספים כמו אמוניום חנקתי, NH_4NO_3 .

ישנם חמישה שליבים במחזור החנקן, ואנו נדון בכל אחד מהם בתורו: קיבוע (פיקסציה) או התנדפות; מינרליזציה; חנקון (ניטריפיקציה); אימוביליזציה ודניטריפיקציה. בתמונה הזו מיקרובים באדמה הופכים גז חנקן (N_2) למה שנקרא אמוניה נדיפה (NH_3), ולכן תהליך הקיבוע נקרא גם תהליך התנדפות. תהליך ה'שטיפה' (leaching) הוא תהליך שבו צורות של חנקן (כמו ניטרט, או NO_3) מומסות במים ודולפות מחוץ לאדמה, ולעיתים מזהמות נתיבי מים.

שלב 1: קיבוע של חנקן (FIXATION)

בשלב הזה חנקן נע מהאטמוספירה לתוך האדמה. האטמוספירה של כדור הארץ מכילה מאגר גדול של גז חנקן (N_2). אולם החנקן הזה "אינו זמין" לצמחים מאחר שהם לא מסוגלים להשתמש בתצורה הגזית של החנקן באופן ישיר בלי שתעבור התמרה. כדי שניתן יהיה להשתמש בו, גז החנקן צריך להיות מותמר דרך תהליך שנקרא קיבוע של חנקן. הקיבוע ממיר את החנקן באטמוספירה לצורות שצמחים יכולים לספוג דרך מערכת השורשים שלהם.

חיידקים (Bacteria)

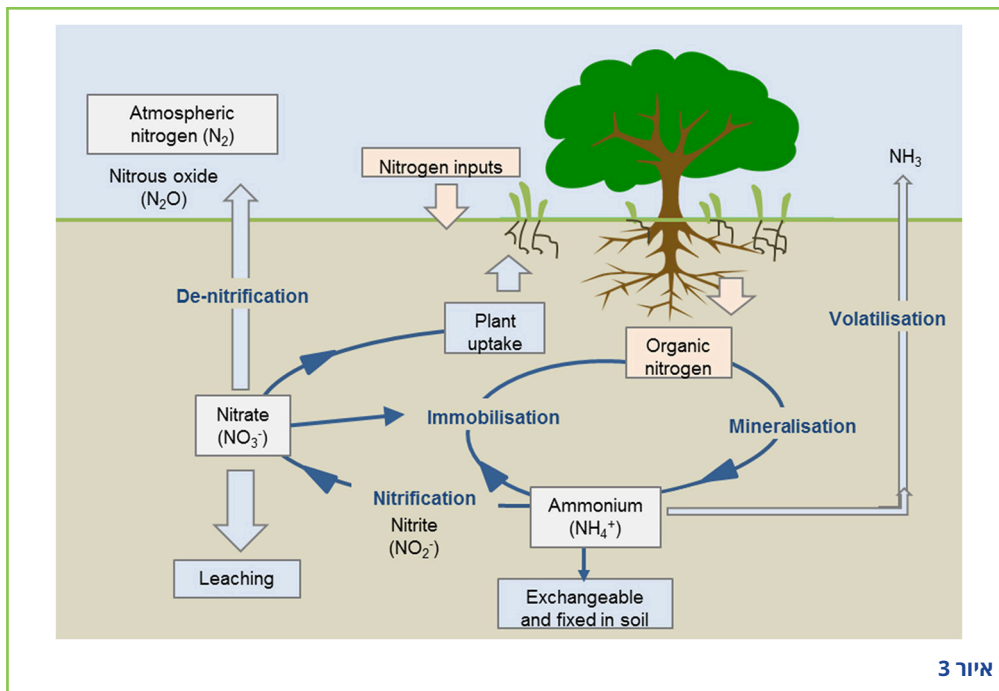
אורגניזמים חיים מיקרוסקופיים שבדרך כלל מכילים רק תא אחד ואפשר למצוא אותם בכל מקום. חיידקים יכולים לגרום לפירוק של חומר אורגני באדמה או לשבירתו.

שטיפה (leaching)

כאשר מינרל או כימיקל (כמו ניטרט, או NO_3) נשטף החוצה מאדמה או מחומר אחר על הקרקע ודולף אל האזור הסובב.

איור 3

שליבים של מעגל החנקן. מעגל החנקן: החנקן שעובר דרך צורות שונות באדמה קובע את כמות החנקן שזמינה לשימוש של צמחים. מקור: <https://www.agric.wa.gov.au/soil-carbon/immobilisation-soil-nitrogen-heavy-stubble-loads>



איור 3

כמות קטנה של חנקן יכולה להיות מקובעת כאשר האור מספק את האנרגיה שנדרשת לגז חנקן להגיב עם חמצן, מה שמייצר תחמוצת חנקן, NO, וחנקן דו-חמצני, NO₂. צורות החנקן האלה יכולות להיכנס לאדמה דרך גשם או שלג. חנקן יכול להיות מקובע דרך תהליך תעשייתי במייצר חומר דשן. צורת הקיבוע הזו מתרחשת בתנאים של לחץ וטמפרטורה גבוהים, ובמהלכה חנקן ומימן והאטמוספירה משולבים ליצירת אמוניה (NH₃), שאותה אפשר לעבד הלאה כדי להפיק אמוניום חנקתי (NH₄NO₃), צורה של חנקן שאפשר להוסיף לאדמה, ושצמחים יודעים להשתמש בה.

מרבית קיבוע החנקן מתרחש באופן טבעי, באדמה, על-ידי חיידקים. באיור 3 (לעיל), אתם יכולים לראות קיבוע של חנקן ותחלופת צורות שמתרחשת באדמה. חלק מהחיידקים מתחברים לשורשי הצמחים ומקיימים קשר סימביוטי (קשר שיש בו תועלת גם לצמח וגם לחיידקים) עם הצמח [6]. החיידקים מקבלים אנרגיה דרך פוטוסינתזה, ובתמורה הם מקבעים חנקן לצורה שהצמח זקוק לה. לאחר מכן, החנקן המקובע נישא לחלקים אחרים של הצמח ומשמש ליצירת רקמות צמחיות, כך שהצמח יכול לגדול. חיידקים אחרים חיים באופן חופשי באדמות או במים ויכולים לקבע חנקן ללא הקשר הסימביוטי הזה. החיידקים האלה גם יוצרים צורות של חנקן שאורגניזמים יכולים להשתמש בהן.

שלב 2: מינרליזציה (MINERALIZATION)

השלב הזה מתרחש באדמה. חנקן נע מחומר אורגני כמו צואת חיות או חומרים צמחיים, אל צורה אנאורגנית של חנקן שהצמח יכול להשתמש בה. לבסוף, חומרי המזון של הצמח נגמרים והצמח מת ומרקיב. זה נעשה חשוב בשלב השני של מעגל החנקן. מינרליזציה מתרחשת כאשר מיקרובים פועלים על חומר אורגני כמו למשל צואת חיות, צמח שמרקיב או חומר של חיות, ומתחילים להמיר אותו לצורת חנקן שהצמחים יכולים להשתמש בה. כל הצמחים

קטניות (Legumes)

צמחים ממשפחת האפונה;
שעועית; עדשים; פולי סויה;
בוטנים ואפונה. אלה הם
צמחים עם תרמילי זרעים
שמתפצלים לשניים.

שנמצאים תחת עיבוד חקלאי, מלבד **קטניות** (צמחים עם תרמילי זרע שנחצים לשניים כמו למשל עדשים, אפונה או בוטנים) מקבלים את החנקן שהם צריכים דרך האדמה. קטניות מקבלות חנקן דרך קיבוע שמתרחש בשורשים שלהן, כפי שמתואר לעיל.

צורת החנקן הראשונה שמוצרת בתהליך המינרליזציה היא אמוניה, NH_3 . האמוניה באדמה מגיבה עם מים ויוצרת אמוניום, NH_4 . האמוניום הזה מוחזק באדמה והוא זמין לשימוש על-ידי צמחים שלא מקבלים חנקן דרך קשר של קיבוע חנקן סימביוטי שתואר לעיל.

שלב 3: חנקון (NITRIFICATION)

השלב השלישי, החנקון, גם מתרחש באדמה. במהלך חנקון, אמוניה באדמה, שמוצרת במהלך מינרליזציה, מותמרת לתרכובת שנקראת ניטריט, NO_2 , וניטרט, NO_3 . צמחים יכולים להשתמש בניטריטים על-ידי צמחים ובעלי חיים שצורכים את הצמחים. חלק מהחיידקים באדמה יכולים להפוך אמוניה לניטריטים. אף על פי שניטריט אינו ניתן לשימוש באופן ישיר על ידי צמחים ובעלי חיים, חיידקים אחרים יכולים לשנות ניטריטים לניטריטים - צורה שהיא שמישה על-ידי צמחים ובעלי חיים. התגובה הזו מספקת אנרגיה לחיידקים שמעורבים בתהליך הזה. החיידקים שאנו מדברים עליהם נקראים ניטרוסומונס וניטרובקטר. ניטרובקטר הופך ניטריטים לניטריטים; ניטרוסומונס הופך אמוניה לניטריטים. שני סוגי החיידקים יכולים לפעול רק בנוכחות של חמצן, O_2 [7]. תהליך החנקון חשוב לצמחים מאחר שהוא מייצר מאגר נוסף של חנקן זמין שיכול להיספג על-ידי צמחים דרך מערכת השורשים שלהם.

שלב 4: אימוביליזציה (IMMOBILIZATION)

השלב הרביעי במחזור החנקן הוא אימוביליזציה, שלעיתים מתוארת כתהליך מינרליזציה הפוך. שני התהליכים האלה יחד שולטים בכמות החנקן באדמה. ממש כמו צמחים, **מיקרואורגניזמים** שחיים באדמה דורשים חנקן כמקור אנרגיה. המיקרואורגניזמים האלה מושכים חנקן מהאדמה כשהשאריות של צמחים נרקבים לא מכילות מספיק חנקן. כאשר מיקרואורגניזמים לוקחים אמוניום (NH_4^+) וניטרט (NH_3^-), צורות החנקן האלה כבר לא זמינות עבור צמחים, ועשויות לגרום למחסור בחנקן. לכן, אימוביליזציה קושרת חנקן במיקרואורגניזמים. אולם אימוביליזציה חשובה מאחר שהיא מסייעת לשלוט בכמות החנקן באדמה ולאזן את החנקן באמצעות קשירה שלו, או אימוביליזצית חנקן, במיקרואורגניזמים.

שלב 5: דניטריפיקציה (DENITRIFICATION)

בשלב החמישי של מחזור החנקן, חנקן חוזר לאוויר כשניטריטים מותמרים לחנקן אטמוספרי (N_2) על-ידי חיידקים בתהליך שאנו קוראים לו דניטריפיקציה. זה גורם לאובדן כולל של חנקן מהאדמה מאחר שהצורה הגזית של חנקן נעה לתוך האטמוספירה, חזרה למקום שממנו הסיפור שלנו התחיל.

מיקרואורגניזם (Microorganism)

אורגניזם, או יצור חי, שהוא
זעיר מדי בכדי להיראות ללא
מיקרוסקופ, כמו למשל חיידק.

חנקן הוא הכרחי לחיים

מחזור החנקן דרך המערכת האקולוגית הכרחי לשמירה על היצרנות והבריאות של מערכות אקולוגיות עם יותר מדי או פחות מדי חנקן. ייצור צמחים וביומסה (חומר חי) מוגבלים על ידי זמינות של חנקן. הבנת האופן שבו עובד מחזור החנקן באדמה צמחית יכולה לסייע לנו לקבל החלטות טובות יותר על אלה יבולים לגדל והיכן לגדל אותם, כך שנוכל לספק כמות מתאימה של מזון. ידע על מחזור החנקן יכול גם לסייע לנו להפחית את הזיהום שנגרם על ידי הוספת חומר דשן רב מדי לאדמה. צמחים יכולים להשתמש ביותר חנקן או חומרי מזון אחרים כמו למשל זרחן – חומר דשן נוסף, ואפילו יכולים לשמש כחוצץ, או כמסנן, כדי למנוע מחומר דשן עודף להיכנס לנתיבי מים. לדוגמה, מחקר שנערך על-ידי Pinay ו-Haycock [8] הראה שעצי צפצפה שימשו כחוצץ שהחזיק 99% מהניטרט שנכנס לזרם המים התת-קרקעי במהלך החורף, בעוד שאזור גדת נהר שהיה מכוסה בסוג מסוים של דשא (*Lolium perenne* L.) החזיק עד 84% מהניטרט, ומנע ממנו להיכנס לנהר.

כפי שראיתם, כמות בלתי מספיקה של חנקן באדמה משאירה את הצמחים רעבים, בעוד שיותר מדי חנקן יכול להיות רע: חנקן עודף יכול להרעיל צמחים ואפילו מקנה! זיהום מאגרי המים שלנו על-ידי חנקן עודף וחומרי מזון אחרים מהווה בעיה גדולה, בעוד שצורות חיים ימיות נחנקות מהרקבה של פריחות אצות מתות. חקלאים וקהילות צריכים לעבוד לשיפור לקיחתן של תוספות חומרי המזון על-ידי יבולים, ולטפל בפסולת צואת חיות באופן מתאים. אנו גם צריכים להגן על אזורי החציצה הצמחיים הטבעיים שיכולים לקחת חנקן שברח לפני שהוא מגיע לגופי מים. אולם התבניות הנוכחיות שלנו של כריתת עצים לצורך בניית כבישים ולצורך עבודות בנייה אחרות מחריפות את הבעיה הזו, מאחר שישנם פחות צמחים שנשארים לקחת את עודפי חומרי המזון. אנו צריכים לחקור עוד כדי לקבוע אלה מיני צמחים הכי טובים לגידול באזורי חוף במטרה לקחת עודפי חנקן. אנו גם צריכים למצוא דרכים אחרות לקבע או להימנע מבעיות של עודף חנקן שנשפך לתוך מערכות אקולוגיות ימיות. באמצעות התקדמות לקראת הבנה מלאה יותר של מחזור החנקן ומחזורים אחרים שמשחקים תפקיד במערכת הטבעית המקושרת של כדור הארץ, נוכל להבין טוב יותר כיצד להגן על המשאבים הטבעיים היקרים מפז של כדור הארץ.

מקורות

1. Britto, D. T., and Kronzucker, H. J. 2002. NH_4^+ toxicity in higher plants: a critical review. *J. Plant Physiol.* 159:567–84. doi: 10.1078/0176-1617-0774
2. Weathers, K. C., Groffman, P. M., Dolah, E. V., Bernhardt, E., Grimm, N. B., McMahon, K., et al. 2016. Frontiers in ecosystem ecology from a community perspective: the future is boundless and bright. *Ecosystems* 19:753–70. doi: 10.1007/s10021-016-9967-0
3. Brady, N., and Weil, R. 2010. "Nutrient cycles and soil fertility," in *Elements of the Nature and Properties of Soils, 3rd Edn*, ed V. R. Anthony (Upper Saddle River, NJ: Pearson Education Inc.), 396–420.
4. Foth, H. 1990. Chapter 12: "Plant-Soil Macronutrient Relations," in *Fundamentals of Soil Science, 8th Edn*, ed John Wiley and Sons (New York, NY: John Wiley Company), 186–209.

5. Chislock, M. F., Doster, E., Zitomer, R. A., and Wilson, A. E. 2013. Eutrophication: causes, consequences, and controls in aquatic ecosystems. *Nat. Educ. Knowl.* 4:10. Available online at: <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/eutrophication-causes-consequences-and-controls-in-aquatic-102364466>
6. Peoples, M. B., Herridge, D. F., and Ladha, J. K. 1995. Biological nitrogen fixation: an efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production? *Plant Soil* 174:3–28. doi: 10.1007/BF00032239
7. Manahan, S. E. 2010. *Environmental Chemistry, 9th Edn.* Boca Raton, FL: CRC Press, 166–72.
8. Haycock, N. E., and Pinay, G. 1993. Groundwater nitrate dynamics in grass and poplar vegetated riparian buffer strips during the winter. *J. Environ. Qual.* 22:273–8. doi: 10.2134/jeq1993.00472425002200020007x

פורסם אונליין: 28 בינואר 2021

נערך על ידי: Mark A. Brandon, The Open University, United Kingdom

ציטוט: Aczel MR (2021) מהו מחזור החנקן ומדוע הוא הכרחי לחיים? Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2019.00041-he

תורגם והותאם:

Aczel MR (2019) What is the Nitrogen Cycle and Why Is It Key to Life? Front. Young Minds 7:41. doi: 10.3389/frym.2019.00041

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

COPYRIGHT © 2019 © Aczel 2020. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון Creative Commons Attribution License (CC BY). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים (ים) המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקרות צעירות

JULIETTE, גיל: 14

שמי ג'ולייט ואני תלמידת כיתה ט'. למדתי איך לשחק שחמט בגיל צעיר ומאז שיחקתי והתחריתי בתחרויות שחמט. אני גם אוהבת לשחק טניס. נוסף על אנגלית אני מדברת ספרדית ומנדרינית. בבית יש לי אוגר ששמו פומבה, על שם חזיר היבלות של מלך האריות.

CLAIRE, גיל: 15

אני הולכת לתיכון בניו-יורק, שם אני מבלה זמן בכתיבת שירה ובנגינה בפסנתר.



הכותבת

MIRIAM R. ACZEL

אני חוקרת תחת מלגת President's Ph.D. באימפריאל קולג' בלונדון. המחקר שלי בוחן את האופן שבו קידוחים שמיועדים לגילוי גז פצלים (גז טבעי שכלוא בתוך סלעים) משפיעים גם על בריאותם של בני אדם וגם על הסביבה. אני גם המקימה, השותפה והמנהלת השותפה של קרן Amir D. Aczel למחקר ולחינוך במדעים ובמתמטיקה, שמטרתה לסייע לתלמידים צעירים בקמבודיה ללמוד מדע ומתמטיקה. נולדתי ביום כדור הארץ, כך שבאופן טבעי אני אוהבת להיות בחוץ ולחפש כל תירוץ לבלות זמן עם חיות בכל הצורות והגדלים! [*miriam.aczel14@imperial.ac.uk](mailto:miriam.aczel14@imperial.ac.uk)



Hebrew version
provided by

מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים (ע"ר)
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem

