



האם דישון רב מדי הוא בעייתי?

Christopher J. Sedlacek^{1,2*}, Andrew T. Giguere^{1,3}, Petra Pjevac^{1,4}

¹המחלקה לאקולוגיה מיקרובית, המרכז למדעי מערכות מיקרוביולוגיה וסביבה, אוניברסיטת וינה, וינה, אוסטריה

²פלטפורמת המחקר של קוממו, אוניברסיטת וינה, וינה, אוסטריה

³המרכז לחברות מיקרוביות, אוניברסיטת אאלבורג, אאלבורג, דנמרק

⁴המתקן המיקרובי המשותף של האוניברסיטה הרפואית של וינה ושל אוניברסיטת וינה, וינה, אוסטריה

סוקר צעיר

ARYAN

גיל: 15



מדשנים הם חומרים שמוסיפים ליבולים במטרה להפיק מספיק מזון לכל אוכלוסיית כדור הארץ. מדשנים מספקים ליבולים חומרי מזון כמו אשלגן, זרחן וחנקן, אשר מאפשרים ליבולים לגדול מהר יותר, לגדול גדול יותר, ולייצר יותר מזון. בפרט, חנקן הוא חומר מזון הכרחי לגדילה של כל אורגניזם על כדור הארץ. חנקן נמצא בכל מקום סביבנו והוא מהווה כ-78% מהאוויר שאנו נושמים. אולם, צמחים וחיות לא יכולים להשתמש בגז החנקן שנמצא באוויר. כדי לגדול, צמחים זקוקים לתרכובות חנקן מהאדמה, אשר יכולות להיות מיוצרות באופן טבעי או להיות מסופקות על ידי מדשנים. אולם שימוש בכמויות עודפות של מדשנים מוביל לשחרור של גזי חממה מזיקים לאטמוספירה ולאיטרוֹפיקציה של דרכי המים שלנו. כיום מדענים מנסים למצוא פתרונות להפחית את ההשפעות המזיקות לסביבה של מדשנים, בלי להפחית את כמות המזון שאנו יכולים לייצר כשאנו משתמשים בהם.

מהו מדשן?

מדשן הוא כל חומר שמוסף לאדמה, אשר מעודד גדילה של צמחים. ישנם הרבה מדשנים שונים, ומרביתם מכילים חנקן (N), זרחן (P) ואשלגן (K). על האריזה של מדשנים שנמכרים

בחנויות ניתן למצוא את היחס N-P-K. המדשנים משמשים בכל רחבי העולם כדי לשמור על מדשאות ירוקות ולייצר יותר יבולים בתחומי החקלאות. מדשנים יכולים להיות מחולקים לשלוש קבוצות:

1. **מדשנים מינרליים** (זרחן ואשלג) נכרים מהסביבה ונכתשים או מטופלים כימית לפני שנעשה בהם שימוש.
2. **מדשנים אורגניים** (צואת חיות וקומפוסט) מיוצרים מהפרשות של חיות, או מצמחים וחיות שנרקבו.
3. **מדשנים תעשייתיים** (אמוניום פוספט, אוראה, אמוניום ניטרט) מיוצרים באופן תעשייתי על ידי בני אדם דרך תגובות כימיות.

בעוד שמדשנים אורגניים ומינרליים נמצאו בשימוש כדי להגדיל תפוקת יבולים בחקלאות במשך זמן רב, מדשנים תעשייתיים הם פיתוח חדש יחסית. למרות זאת, מדשנים תעשייתיים הם השכיחים ביותר בקרב המדשנים כיום.

מדוע אנו זקוקים למדשנים שמכילים חנקן?

חנקן הוא אחד היסודות, או חומרי המזון, שכל היצורים החיים (מיקרואורגניזמים, צמחים וחיות) צריכים כדי לגדול. אף על פי שיש כמויות גדולות של חנקן סביבנו (כ-78% מהאוויר שאנו נושמים), מרבית החנקן על כדור הארץ נמצא כגז חסר צבע וחסר ריח, שנקרא גז חנקן (N_2). לרוע המזל, צמחים וחיות לא יכולים להשתמש ישירות בגז חנקן. כבני אדם, אנו מקבלים את החנקן שלנו מהמזון שאנו אוכלים. מזונות עתירי חלבון כמו בשר, דגים, אגוזים, או שעועית מכילים כמויות גדולות של חנקן. צמחים מקבלים את החנקן שלהם מהאדמה, וחנקן הוא חומר המזון השכיח ביותר שמגביל גדילה צמחית. ישנן שתי דרכים שבהן גז חנקן מועבר באופן טבעי, או "מקובע", לתרכובות שמכילות חנקן אשר יכולות להגיע לאדמה, ללא התערבות אנושית (איור 1):

1. **ברקים:** ברקים מפיקים מספיק אנרגיה כדי לפצל גז חנקן באטמוספירה וליצור תרכובות שמכילות חנקן, אשר מוצאות את דרכן לאדמה.
2. **קיבוע חנקן ביולוגי:** חלק מהמיקרואורגניזמים יכולים להשתמש בגז חנקן ישירות כחומר מזון. המיקרואורגניזמים המתמחים האלה ממירים גז חנקן לאמוניום (NH_4^+) והם נקראים "מקבעי חנקן". חלק מהמיקרואורגניזמים שמקבעים חנקן חיים באדמה, וחלקם יכולים ליצור קשר קרוב עם שורשיהם של צמחים מסוימים, כמו שעועית או תלתן.

אולם אפילו עם כל **קיבוע החנקן** הטבעי הזה, כמויות קטנות של חנקן באדמה לעיתים קרובות עדיין מגבילות גדילה של צמחים. זו הסיבה לכך שמרבית המדשנים מכילים תרכובות חנקן ומדוע מדשנים תעשייתיים הכרחיים כדי ליצור מספיק יבולים להזין את אוכלוסיית כדור הארץ. בני אדם מוסיפים כיום כמות זהה או גדולה יותר של חנקן מקובע (בערך 150 מיליארד קילוגרמים) לסביבה בכל שנה, מאשר מה שמקובע באופן טבעי [1, 2]. 150 מיליארד קילוגרמים של כל חומר זה כמות שקשה לדמיין, אולם זהו זהו למשקל של בערך 24 מיליון פילים בוגרים!

קיבוע חנקן

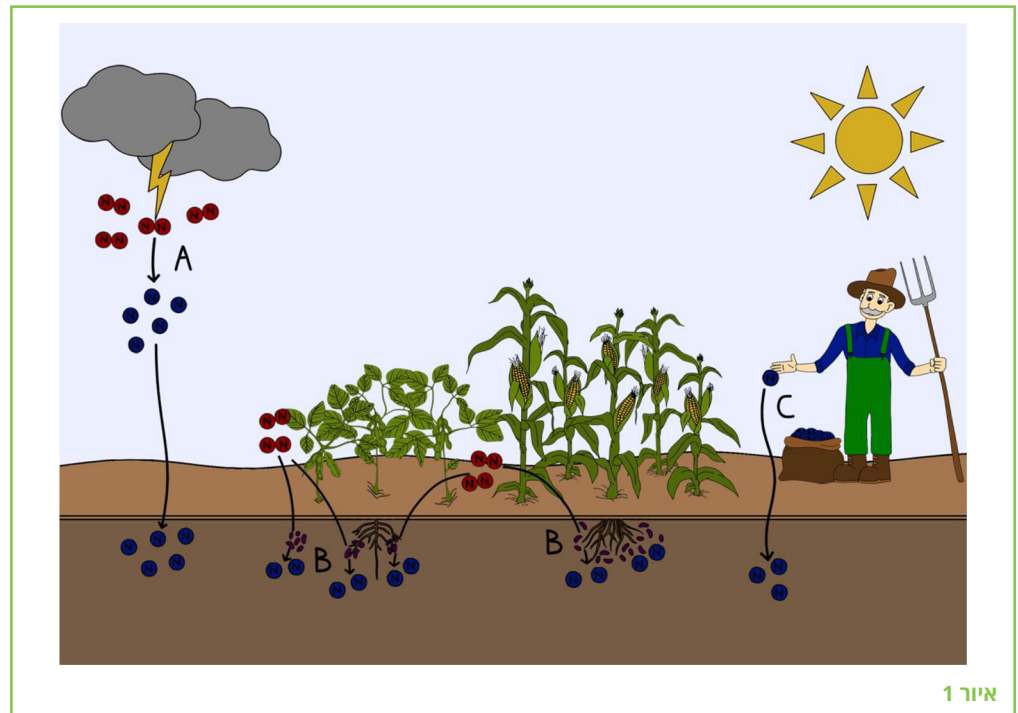
(Nitrogen Fixation)

תהליך של המרת גז חנקן לתרכובות שמכילות חנקן. קיבוע חנקן יכול להתרחש באופן טבעי דרך ברקים, להיות מבוצע על ידי מיקרואורגניזמים מתמחים, או להיות מבוצע באופן תעשייתי.

איור 1

כיצד גז חנקן מקובע לצורה שיכולה לשמש

צמחים וחיות (A) ברקים יכולים לפצל גז חנקן (באדום) באטמוספירה. תרכובות החנקן החדשות שנוצרו (בכחול) נופלות על האדמה ומדשנות אותה באופן טבעי. **(B)** מיקרואורגניזמים שמתמחים בקיבוע פחמן באדמה או על שורשיהם של צמחים יכולים להתמיר גז חנקן לתרכובות חנקן שיכולות לשמש צמחים וחיות. **(C)** גז חנקן יכול להיות מותמר לתרכובות חנקן שמישות באופן תעשייתי בתהליך הבר-בוש כדי לייצר חומרי דשן, שיכולים להיות מושמים ישירות על אדמה.



איור 1

כיצד מיוצרים מדשנים תעשייתיים מכילי חנקן?

כפי שצוין, מרבית החנקן על כדור הארץ נמצא כגז חנקן שאינו שמיש עבור צמחים וחיות. בשנות ה-1900 המוקדמות, מדענים גילו כיצד להתמיר גז חנקן מהאטמוספירה לתרכובות מכילות חנקן שיכולות לשמש כדי לדשן אדמות (איור 1). הקיבוע התעשייתי הזה נקרא **תהליך הבר-בוש**. כמעט כל החנקן במדשנים תעשייתיים מקובע בתהליך הבר-בוש.

תהליך הבר-בוש (Haber-Bosch Process)

תהליך קיבוע חנקן תעשייתי שיכול להיות מבוצע במעבדה כדי להפיק מרכיבים של דשנים. הוא התגלה על ידי המדענים פריץ הבר וקארל בוש, ונקרא על שמם.

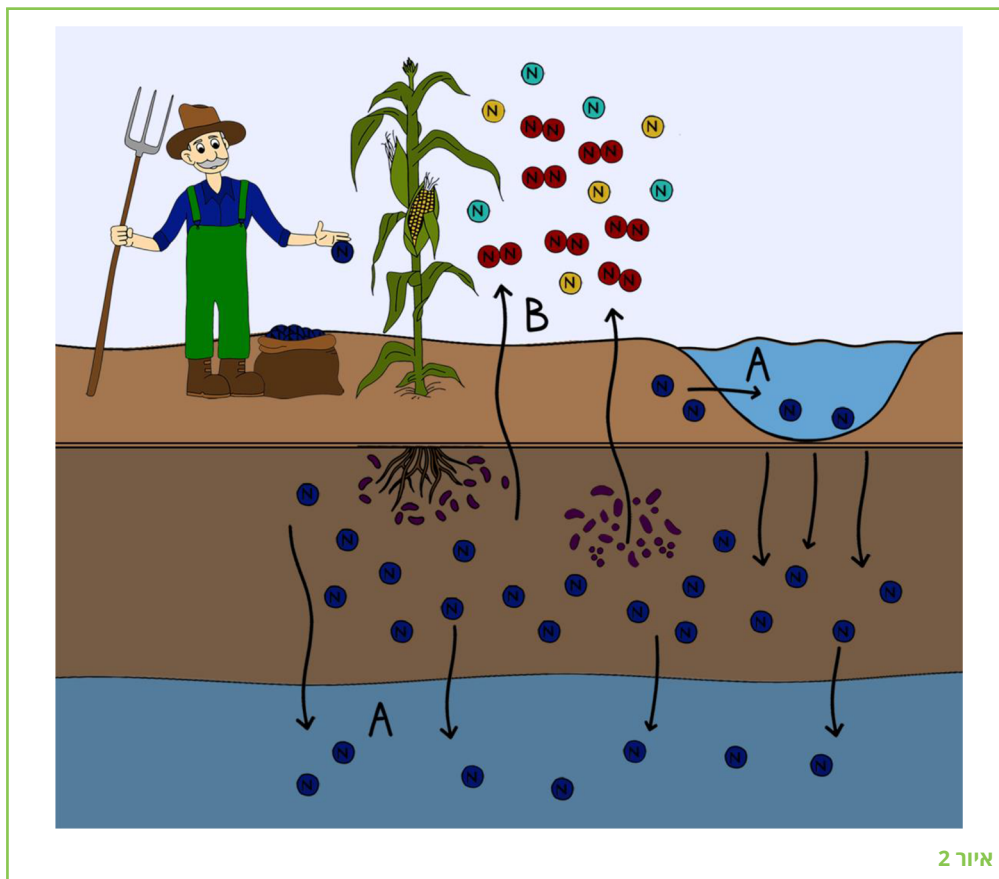
הקיבוע התעשייתי הזה של חנקן מבוצע במעבדות כימיות ובמפעלים גדולים בכל רחבי העולם. תהליך הבר-בוש דורש שגז חנקן יהיה מעורבב עם גז מימן (H_2) ויושם תחת לחץ עצום (פי 200 מלחץ אטמוספרי). זהו הלחץ שהייתם מרגישים אם הייתם צוללים לעומק של 2,000 מטרים מתחת לפני הים, שהוא מרחק גדול מערימה של 6 מגדלי אייפל שערומים זה על גבי זה! תערובת הגז הדחוסה הזו מחוממת לטמפרטורות גבוהות מאוד (450 מעלות צלזיוס). תחזוק הלחצים והטמפרטורות הגבוהים האלה דורש כמות עצומה של אנרגיה. תהליך הבר-בוש מוערך כצורך 1-2% מאספקת האנרגיה השנתית העולמית [2].

מדוע אנו משתמשים בכל כך הרבה מדשנים מכילי חנקן?

התשובה הקצרה היא שמדשנים שמכילים חנקן מסייעים לצמחי יבול לגדול מהר יותר, ומסייעים להפיק יותר יבולים. זה מאפשר שימוש יעיל יותר בקרקע חקלאית מאחר שמדשני אדמה מייצרים יותר מזון. למעשה, ההמצאה של מדשנים תעשייתיים היא אחת הסיבות העיקריות לכך שאוכלוסיית כדור הארץ גדלה מהר כל כך ב-60-70 השנים האחרונות. לפני התפשטות השימוש במדשנים תעשייתיים בשנות ה-1960, לקחו כ-123 שנים עד שאוכלוסיית כדור הארץ הכפילה את עצמה ממיליארד לשני מיליארד בני אדם (1804-1927).

איור 2

להיכן חנקן מגיע בסביבה.
 חנקן ממדשנים שלא נלקח על ידי צמחים יכול להיאבד מהאדמה. (A) חנקן יכול לחמוק מן האדמה ולהיכנס לנתיבי מים מעל האדמה (אגמים, נחלים, נהרות, או אוקיינוסים) או לתוך מי התהום. חנקן שמגיע לתוך מערכות אקולוגיות ימיות יכול להוביל לפריחות אצות מזיקות ולאטרופיקציה של נתיבי המים. (B) חלק מהמיקרואורגניזמים מסוגלים להתמיר חנקן במדשנים למגוון של גזים שונים מכילי חנקן. החנקן הגזי הזה יכול להיאבד באטמוספירה בצורה של גז חממה.



איור 2

אולם, לקחו כ-45 שנים (1974-2019) לאוכלוסיית כדור הארץ להכפיל את עצמה מ-4 ל-8 מיליארד בני אדם. כיום, אנו תלויים כל כך במדשני חנקן שבלעדיהם יכולנו לייצר רק כ-50% מהמזון שנדרש לאוכלוסיית העולם [1, 2].

להיכן מגיע החנקן ממדשנים מכילי חנקן?

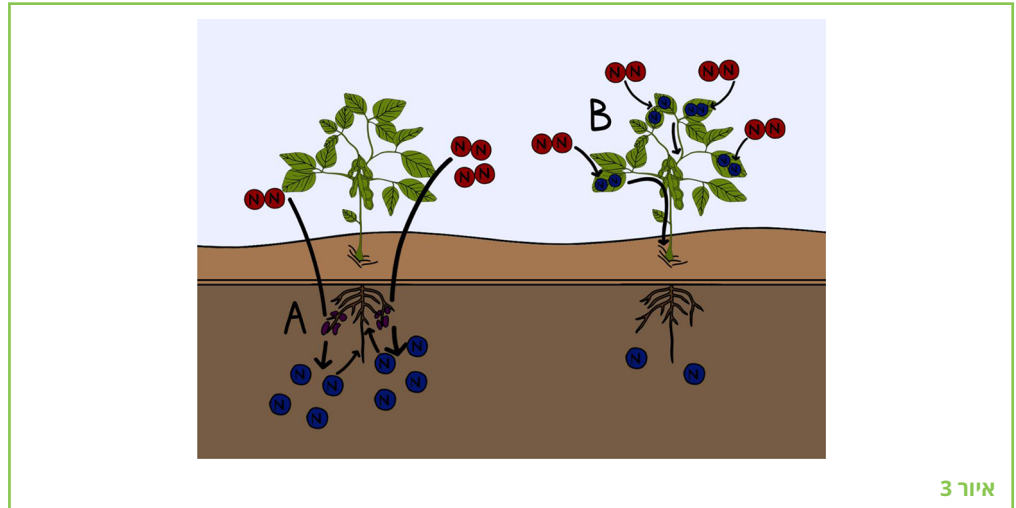
היבולים לוקחים אותו כמובן! לרוע המזל, זה לא סוף הסיפור. למידע נוסף על התגובות הכימיות במעגל החנקן, עליכם לקרוא את מאמר פרונטיר - מדע לצעירים "What is the Nitrogen Cycle and Why is it Key to Life" [3]. בשדה חקלאי ממוצע, רק כ-50% מהחנקן ממדשנים משמש את היבולים [4]. לכן, בעוד שמדשנים גורמים ליבולים לגדול מהר וטוב יותר, מחצית מהחנקן המקובע שאנו מוסיפים הולך לאיבוד. דמיינו את זה – אנו מאבדים כמות אנלוגית של 12 מיליוני פילי חנקן בכל שנה! החנקן האבוד יכול להגיע לאטמוספירה, או שהוא יכול להישטף החוצה לאדמה ולסיים בנתיבי המים, כמו למשל מי תהום, נחלים, נהרות, אגמים ואוקיינוסים (איור 2). החנקן האבוד הזה גורם למגוון בעיות סביבתיות [2].

לאלו בעיות סביבתיות מדשנים מכילי חנקן גורמים?

חלק מהמיקרואורגניזמים באדמה יכולים להתמיר חנקן שמסופק על ידי מדשנים לגזים מכילי חנקן, אשר משתחררים לתוך האטמוספירה כמו גז החממה תחמוצת החנקן (N₂O).

איור 3

שתי דוגמאות למחקרים עכשוויים שעוסקים בשיפור יעילות המדשנים. (A) מיקרוביולוגים ומדעני אדמה עובדים על שיפור הגדילה של מיקרואורגניזמים מקבעי חנקן שנמצאים באדמה, כדי להגדיל את קיבוע החנקן הביולוגי. זה יגדיל את תכולת החנקן של האדמה (בכחול). (B) ביולוגים של צמחים עובדים על יצירת צמחי יבול שמסוגלים לקבע גז חנקן (באדום) ישירות מהאטמוספירה לתוך הרקמות שלהם. זה יפחית את הצורך להוסיף מדשנים מכילי חנקן ליבולים האלה.



איור 3

גזי חממה הם אחד מהגורמים העיקריים להאצת ההתחממות הגלובלית. לתחמוצת החנקן יש פוטנציאל חימום גדול פי 300 בערך מגז החממה הכי מוכר, פחמן דו-חמצני (CO_2).

בנתיבי מים, תוספת של חומרי מזון חיצוניים (כמו למשל חנקן עודף) נקראת **איטרופיקציה**. איטרופיקציה היא דישון לא רצוי של נתיבי מים, והיא מעודדת את גדילתם של מיקרואורגניזמים, אצות, וצמחים, ממש כמו דישון של האדמה. אולם הגדילה המהירה של מיקרואורגניזמים ושל צמחים יכולה לגרום לצריכה של כל החמצן בנתיבי המים האלה, ולהפוך אותם למה שנקרא "dead zones", מאחר שחיות ימיות לא יכולות לחיות ללא חמצן. איטרופיקציה יכולה גם להוביל לגדילה של מיני אצות שמייצרים כימיקלים רעילים, שנקראות **פריחות אצות מזיקות**.

בעוד שאנו זקוקים לחנקן ממדשנים באדמות החקלאיות שלנו, איננו רוצים או צריכים חמצן נוסף באטמוספירה או בנתיבי המים שלנו. משמעות הדבר היא שאנו צריכים לאזן בין היתרונות החיוביים של דישון בחנקן (יותר מזון) לבין ההשלכות השליליות של עודף דישון (בעיות סביבתיות) [1, 2]. מדענים עובדים כיום כדי למצוא את האיזון הזה, ולשפר את מצבנו הנוכחי.

אלו מחקרים שקשורים במדשנים נעשים היום?

מטרה עיקרית אחת של מחקרים שקשורים במדשנים היא להפחית את כמות החנקן התעשייתי המקובע שנאבד (בשווי של כ-12 מיליון פילים) לאטמוספירה ולנתיבי המים. הפתרון נקרא "שיפור יעילות השימוש בחנקן בסביבות חקלאיות". להלן כמה דוגמאות למחקר עכשווי על מדשנים:

מיקרוביולוגים ומדעני אדמה עובדים על דרכים לשפר את תנאי השדות כדי לקדם גדילה טבעית של חיידקי אדמה שמקבעים חנקן. נוסף על כך ישנה עבודה רבה גם על הדרכים שבאמצעותן אפשר למנוע גדילה של מיקרואורגניזמים באדמה שתורמים לאובדן החנקן המקובע לאטמוספירה או לנתיבי המים (איור 3). יחד, זה יכול להפחית את הכמות הכוללת של מדשנים מכילי חנקן שנדרשים כדי לקבל את אותה תפוקת היבולים.

גזי חממה

(Greenhouse Gases)

גזים שכולאים חום באטמוספירה ממש כמו גגות של חממות שכולאים חום כדי להגן על צמחים שגדלים בתוכן. ממזג אוויר קר ומכפור.

איטרופיקציה

(Eutrophication)

שינוי בסטטוס חומרי המזון בסביבה שנגרם על ידי רמות גבוהות של חומרי מזון (חנקן או זרחן) שנכנסים לנתיבי המים (אגמים, נהרות, או אוקיינוסים). תוצאה מרכזית אחת היא פריחות אצות מזיקות ואובדן של חיים ימיים.

פריחת אצות מזיקה

(Harmful Algal Blooms)

כאשר ציאנובקטריה ואצות גדלים מהר מאוד בשל כמויות גדולות של חומרי מזון (חנקן וזרחן) שנמצאות במים שבהם הם חיים. הציאנובקטריה והאצות האלה משחררים כימיקלים רעילים - רעלנים - אל תוך נתיבי המים.

כימאים עובדים על עיצוב מדשנים שיהיו יציבים באדמה למשך זמן רב יותר ולכן יפורקו פחות על ידי מיקרואורגניזמים. המדשנים האיטיים האלה ישחררו כמויות קטנות של חומרי מזון בכל פעם, כך שחומרי מזון יהיו זמינים במהלך מחזור חייהם של היבולים. הגישה הזו עדיין תלויה במדשנים מכילי חנקן, אולם היא תפחית את כמות המדשנים שנדרשים ותפחית את כמות החנקן שיאבד.

ביולוגים של צמחים מנסים להנדס גנטית יבולים שידרשו פחות חנקן ממדשנים [5]. היבולים האלה יהיו מסוגלים לקבע את החנקן שלהם מגז חנקן, ממש כמו מיקרואורגניזמים שמתמחים בקיבוע חנקן. היבולים האלה ידרשו פחות מדשנים כדי לייצר את אותה תפוקת יבולים (איור 3).

מדעני מחשב ומדעני אדמה עובדים יחד על עיצוב מערכות דישון חכמות שיכולות לנטר את תנאי האוויר והאדמה בשדות חקלאיים. המערכות האלה יכולות להוסיף כמויות קטנות של מדשנים בעת הצורך בלבד. זה ממזער את כמות הדשן שמוסיפים, מתאים בין תוספות המדשנים לבין צורכי היבולים, ומפחית את כמות החנקן שנאבד.

סיכום

מדשנים מספקים ליבולים חומרי מזון הכרחיים כמו חנקן, כך שהיבולים גדלים מהר יותר, לגודל גדול יותר, ומייצרים יותר מזון. אולם שימוש בכמות גדולה כל כך של מדשנים עלול להיות בעייתי מאחר שהוא מוביל לשחרור של גזי חממה ולאטרופיקציה. כיום מדענים מנסים למצוא פתרונות שיפחיתו את כמות המדשנים הנדרשים, בלי להפחית את כמות המזון שמיוצר.

תודות

לינאה קופ יצרה באדיבות רבה וסיפקה הרשאות לשימוש באיורים שלה עבור כל האיורים במאמר הזה.

מקורות

1. Galloway, J. N., Leach, A. M., Erisman, J. W., and Bleeker, A. 2017. Nitrogen: the historical progression from ignorance to knowledge, with a view to future solutions. *Soil Res.* 55:417–24. doi: 10.1071/SR16334
2. Erisman, J. W., Galloway, J. N., Dice, N. B., Sutton, M. A., Bleeker, A., Grizzetti, B., et al. 2015. *Nitrogen: Too Much of a Vital Resource. Science Brief.* Zeist: WWF Netherlands.
3. Aczel, M. 2019. What is the nitrogen cycle and why is it key to life? *Front. Young Minds* 7:41. doi: 10.3389/frym.2019.00041
4. Hirel, B., Tétu, T., Lea, P. J., and Dubois, F. 2011. Improving nitrogen use efficiency in crops for sustainable agriculture. *Sustainability* 3:1452–85. doi: 10.3390/su3091452
5. Good, A., 2018. Toward nitrogen-fixing plants: a concerted research effort could yield engineered plants that can directly fix nitrogen. *Science* 359:869–70. doi: 10.1126/science.aas8737

פורסם אונליין: 07 בפברואר 2022

נערך על ידי: Mark A. Brandon

מנחה מדעי: Dhruv Suri

ציטוט: Sedlacek CJ, Giguere AT and Pjevac P (2022) האם דישון רב מדי הוא בעייתי? Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2020.00063-he

תורגם והותאם: Sedlacek CJ, Giguere AT and Pjevac P (2020) Is Too Much Fertilizer a Problem? Front. Young Minds 8:63. doi: 10.3389/frym.2020.00063

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

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

סוקר צעיר

ARYAN, גיל: 15

Aryan הוא למדן חרוץ שנהנה לקרוא על חידושים מדעיים במיוחד בתחום של שינוי אקלים ואנרגיה. מחוץ לכיתה, Aryan הוא שחקן פוטבול נפלא ומלא באנרגיה ובחן. יום אחד הוא מקווה שמנצ'סטר יונייטד תזכה בליגה האנגלית, אף על פי שאם הם ימשיכו להפסיד לניוקאסל, היום הזה יהיה רחוק!



הכותבים

CHRISTOPHER J. SEDLACEK

אני פוסט-דוקטורנט חוקר באוניברסיטת וינה באוסטריה. המחקר שלי מתמקד בהבנת האופן שבו חיידקים שורדים וגדלים בסביבה. אני מתעניין מאוד במיקרובים שנקראים ניטריפירים, שהם מיקרובים שמשמשים בתרכובות חנקן (כמו כאלה שנמצאות במדשנים) כדי לקבל את כל האנרגיה שלהם. מטרת המחקר שלי היא להבין כיצד ניטריפירים גדלים כך שנוכל לשלוט באופן ובמיקום שבו הם גדלים בסביבה. מחוץ למדע, אני נהנה להקשיב למוזיקה ולשחק הוקי קרח. *sedlacekc88@univie.ac.at



ANDREW T. GIGUERE

אני חוקר פוסט-דוקטורנט באוניברסיטת אאלבורג בדנמרק ובאוניברסיטת וינה באוסטריה. תחומי המחקר שלי מתמקדים במיקרואורגניזמים באדמה שמעורבים במחזור החנקן. בפרט, אני רוצה לדעת יותר על הגורמים הפיזיקליים והכימיים ששולטים על הפעילות של קבוצות שונות של מיקרואורגניזמים שמעורבים במחזור החנקן. אני גם מתעניין באופן שבו פעילותם של מיקרואורגניזמים זעירים יכולה להיות בעלת השפעה גדולה על חקלאות ועל בריאות הסביבה. andrew.giguere@univie.ac.at



**PETRA PJEVAC**

אני מדענית בכירה באוניברסיטת וינה באוסטריה. אני חוקרת כיצד מיקרואורגניזמים שונים גדלים, ומה הם יכולים לאכול. המידע הזה מאוחסן בדנ"א שלהם, בגנומים שלהם - שהם כמו דיסקים קשיחים של מיקרואורגניזמים שמכילים את כל הנתונים על מה שהם יכולים לעשות. בהתבסס על המידע הזה, אני רוצה להבין מדוע חלק מהמיקרואורגניזמים גדלים טוב יותר בסביבות מסוימות מאשר מיקרואורגניזמים אחרים. כשאני בעבודה, אני חוקרת את הפארוקים ואת היערות ברחבי וינה עם שלושת ילדיי.
petra.pjevac@univie.ac.at

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



הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK