

פרק 5: מחזור החנקן.

תוכן עניינים

פרק 5: מחזור החנקן.	1
קישורים לשיעורים	1
מחזור החנקן	5.1
חשיבות ביולוגית של מחזור החנקן	5.2
תהליך הבר-בוש	5.3
ניתוח מחקר מדעי	5.4
קבוע חנקן בקטניות	5.5
הקשר שבין שינויי אקלים למחזור החנקן.	5.6
שיעורים ומשימות	5.7
שיעור 8: היכרות עם היסוד חנקן	5.7.1
שיעור 9: מחזור החנקן	5.7.2
שיעור 10: קבוע חנקן בקטניות	5.7.3
שיעור 11: מה הקשר בין מחזור החנקן ומשבר האקלים	5.7.4
שיעור 12 - חוקרים מחזורים ביוגיאוכימיים בעזרת עמודת וינגרדסקי.	5.7.5

קישורים לשיעורים

[שיעור 8: היכרות עם היסוד חנקן](#)

[שיעור 9: מחזור החנקן](#)

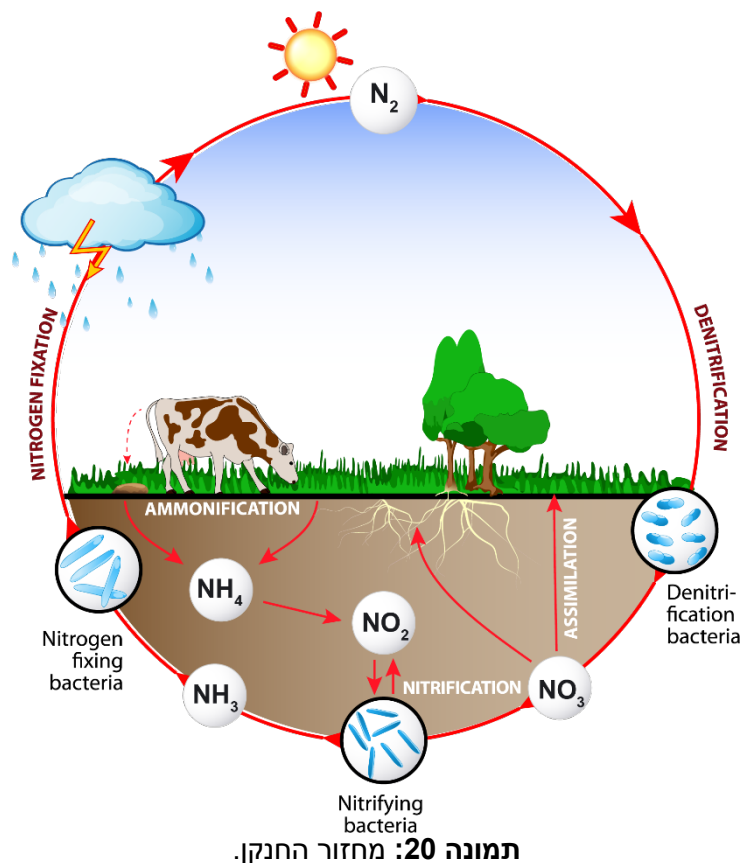
[שיעור 10: קבוע חנקן בקטניות](#)

[שיעור 11: מה הקשר בין מחזור החנקן ומשבר האקלים](#)

[שיעור 12 - חוקרים מחזורים ביוגיאוכימיים בעזרת עמודת וינגרדסקי.](#)

5.1 מחזור החנקן

חנקן אטמוספרי (N_2), מהווה כמעט 80% מהגזים באטמוספירה, אך, בצורתו האטמוספירית אינו זמין (אינרטי) לרוב היצורים על פני כדור הארץ. יצורים חיים זקוקים לחנקן לשם בנייה של חומצות גרעין, חלבונים, מולקולות כלורופיל ועוד. ומכאן שזמינות החנקן מהווה גורם ראשון במעלה המגביל גידול בכלל ובפרט גורם המגביל את קצב הייצור הראשוני ביבשה ובמים. בטבע, מולקולות המכילות חנקן עוברות שינויים כימיים רבים, החל בהפיכת החנקן האטמוספירי לזמין ביולוגית וכלה בשחרורם של צורני חנקן רבים ושונים, שינויים אלו נקראים בשם כולל – מחזור החנקן (תמונה 20).



השלבים השונים במחזור החנקן

1. **קיבוע חנקן** - השלב הראשון במחזור החנקן הוא הפיכת מולקולה דו-אטומית של חנקן (N_2) לאמוניה (NH_3). קיבוע החנקן מבוצע אך ורק על ידי חיידקים, בניהם חיידקי קרקע, חיידקי מים (מתוקים ומלוחים) החיים בצורה חופשית, או על ידי חיידקים המקיימים סימביוזה עם שורשי צמחים, רבים מהם ממשפחת הקטניות (כגון חמוס, אפונה, עדשים ואספסת). האנזים שמבצע את תהליך הקיבוע נקרא ניטרוגנאז. יכולת קיבוע חנקן בחיידקים התפתחה, ככל הנראה, בתקופה בה ריכוז החמצן באטמוספירה היה נמוך מאוד. עדות לכך היא העובדה שהאנזים ניטרוגנאז רגיש לחמצן. מולקולות החמצן מתחרה במולקולות החנקן על קישור לאתר הפעיל של האנזים. לכן, בסביבה אווירנית רגילה

למקבעי חנקן אירוביים צפויה להיות בעיה בקיום תהליך קיבוע יעיל, והם עלולים להיות תלויים במקורות חיצוניים לחנקן. בקבוצות שונות של מקבעי חנקן מוצאים פתרונות ומנגנונים שונים הממדרים ומגנים על האנזים מיקום קיבוע החנקן מהמקום בו נפלט החמצן.

2. **ניטריפיקציה** - הוא השלב השני במחזור החנקן והוא נחלק לשני שלבים. בשלב הראשון, חיידקים מקבוצת "מחמצני אמוניה", מחמצנים את האמוניה לניטריט (NO_2^-). בשלב השני ניטריט מחומצן לניטראט על ידי חיידקים "מחמצני ניטריט" (NO_3^-). יוני הניטריט (NO_2^-), והניטראט (NO_3^-) נקלטים בקלות על ידי הצמח דרך מערכת השורשים של צמחים ועל ידי יצורים אחרים החיים בקרקע (או בסביבות מימיות). מחמצני אמוניה ומחמצני ניטראט הם חיידקים איירובים נפוצים, ועד סוף שנות ה-90 של המאה הקודמת חשבו שתהליכים אלו מתרחשים רק בסביבות איירוביות. מאז ועד היום, נמצאו חיידקים המבצעים חמצון אמוניה בתהליך כימי חדש ומכונים **Annamox**. Annamox יכולים לחמצן אמוניה לניטראט בתנאים אנאירוביים.

3. **אמוניפיקציה** – תהליך הפיכת חומרים אורגנים נרקבים, על ידי חיידקים או פטריות לאמוניה (NH_3) ובכך הופכים אותה לזמינה עבור יצורים חיים. חיידקים גם מפרקים תרכובות עשירות בחנקן לאמוניום (NH_4^+), יון מסיס במים, שהתמוססותו במים יוצרת סביבה בסיסית ומעלה את ה-pH של הקרקע. חלק מיוני האמוניום ייקלטו על ידי יצורים חיים, וחלקם יעבור תהליך ניטריפיקציה בעזרת חיידקים וחוזר חלילה. בירוא יערות והפיכת שטחים פתוחים לשטחים לגידול בעלי חיים מובילים לאיבוד גדול של חנקן מהקרקע לאטמוספירה. חקלאים מוסיפים דשנים חנקניים לקרקע כתוצאה מכך מתווספים לקרקע יוני אמוניום, וחומציות הקרקע עולה. בתנאים אלו, יוני מגנזיום וקלציום נשטפים מהקרקע בקלות בעזרת מים.

4. **דניטריפיקציה**, הוא השלב השלישי במחזור החנקן. בתהליך זה ניטראט מחוזר לניטריט ו משם לחנקן אטמוספרי בתהליך רב שלבי. תהליך זה הוא אנאירובי ומתרחש בדרך כלל בשכבות עמוקות בסדימנט הימי או בקרקע. בשלבי הביניים של התהליך נוצרים שני גזים נוספים חנקן חמצני (NO) וחמצן דו-חנקני (N_2O), האחרון שבהם הוא גז חממה שיכול להגיב עם שכבת האוזון ונחשב כמזהם אוויר מרכזי בחשיבותו.

5.2 חשיבות ביולוגית של מחזור החנקן

לחנקן, או לתהליכי מחזור החנקן שני תפקידים ביולוגיים עיקריים. ראשית, צורני החנקן האי-אורגניים: אמוניה, ניטריט וניטראט, נקלטים על ידי התאים ומשמשים לבניית מולקולות אורגניות חיוניות- חומצות אמיניות וחומצות גרעין בניהן, אך גם תרכובות רבות נוספות. תהליך זה המתרחש בציטוזול של התא ונקרא "**קיבוע חנקן אסימילטורי**". בדומה, כשפחמן דו-חמצני מקובע בתהליך הפוטוסינתזה לגלוקוז מכונה התהליך "קיבוע פחמן אסימילטורי". שנית, אך לא בעל חשיבות פחותה, תהליכי חמצון אמוניה (**ניטריפיקציה**) ותהליכי חיזור ניטראט (**דניטריפיקציה**) משמשים את התא כאמצעי לקבלת אנרגיה. תהליכים אלה מתרחשים על פני ממברנת התא וצורני החנקן משמשים כתורמי אלקטרונים (אמוניה) או

מקבלי אלקטרונים (ניטראט וניטריט) בשרשרת העברת אלקטרונים (בדומה לשרשרת מעבר האלקטרונים בתהליך הנשימה התאית).

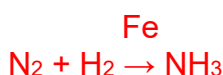
בפרספקטיבה אבולוציונית, אנחנו חושבים שהאנזים ניטרוגנאז (שאחראי על קיבוע החנקן) והאנזים רוביסקו בצמחים (שאחראי על קיבוע פחמן דו-חמצני - במעגל קלווין) שניהם התפתחו פעם אחת באבולוציה. עוד ידוע שמקורם בחיידקים בעוד שרוביסקו מוכר גם באוקריוטים (אם כי באברון שמקורו בחיידק- הכלורופלסט), את הניטרוגנאז מצאו עד היום רק בחיידקים וארכיאה. אנחנו יודעים שאנזים זה התפתח בתקופה בה היה משבר גלובלי של מחסור בחנקן מקובע, אך הגיאולוגים לא יודעים לתארך משבר זה. לכן, עדיין איננו יודעים האם הניטרוגנאז הוא תכונה קדומה מאוד, שהייתה כבר באב המשותף הקדום ביותר לכל היצורים (Latest universal common ancestor-LUCA), או שהתפתח בשלב מאוחר יותר. מה שברור הוא שבלעדי שני אנזימים אלו, הניטרוגנאז ורוביסקו, החיים כפי שאנו מכירים אותם על כדור הארץ היו נראים אחרת לגמרי.

טבלה 1: סיכום התהליכים הכימיים של מחזור החנקן. ניסוח התהליך הכימי מובא כאן באופן חלקי לצורך הפשטה.

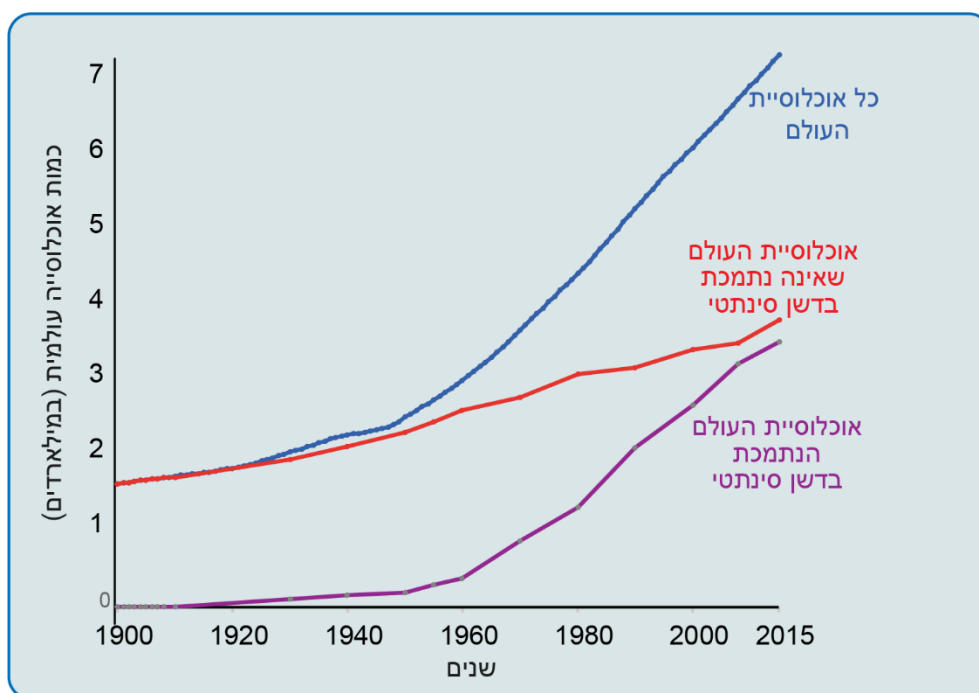
מספר שלב	שם התהליך	חשיבות	תהליך כימי
1	קיבוע חנקן	הפיכת חנקן מולקולרי לזמין מבחינה ביולוגית	$N_2 \rightarrow 2NH_3 + H_2$
2	ניטריפיקציה	הפיכת אמוניה לניטריט	$NH_3 \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO_3^-$
3	אנאמוקס	חמצון אמוניה לניטראט בתנאים אנארוביים	$NH_4^+ + NO_2^- \rightarrow N_2 + 2H_2O$
4	דניטריפיקציה	חיזור ניטראט לניטריט	$NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO + N_2O \rightarrow N_2$
5	אמוניפיקציה	הפיכת חומרים אורגניים נרקבים לאמוניה ברקע	$\rightarrow NH_4^+$ חומרים אורגניים

5.3 תהליך הבר-בוש

השלב הראשון במחזור החנקן - קיבוע החנקן, מתרחש בשלוש דרכים עיקריות: (1) התפרצויות געשיות וברקים, (2) בצורה ביולוגית על ידי חיידקים, (3) ובאופן תעשייתי בעזרת תהליך הבר-בוש. בחלקים הבאים נתמקד בשתי הדרכים האחרונות. בשנת 1931 מקבלים פריץ הבר, וקארל בוש, פרס נובל בכימיה על יצירת אמוניה בצורה תעשייתית. בתהליך זה, חנקן אטמוספרי נדחס עם מימן בלחץ וטמפרטורה גבוהים בנוכחות ברזל לקבלת אמוניה.

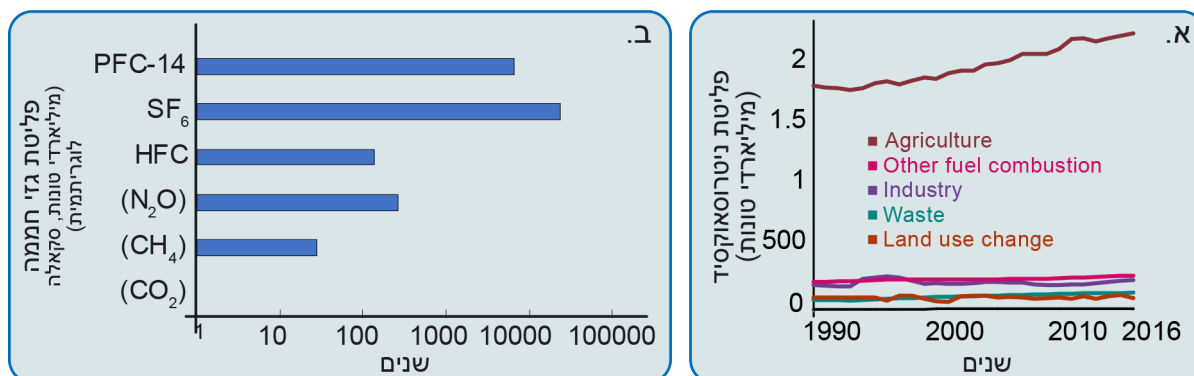


כיום כ- 2% מצריכת האנרגיה העולמית מושקעת בהפקת אמוניה בתהליך הבר-בוש. ההמצאה הובילה למותם של מיליוני אנשים ב-100 השנים האחרונות. יחד עם זאת היא תרמה להאכלה של מיליונים רבים אחרים. כ- 40% מאוכלוסיית העולם כיום, תלויה בדשנים שמקורם בתהליך הבר בוש (תמונה 21).



תמונה 21: השפעת תוספת דשנים על כמות האוכלוסייה בעולם. כיום, כ- 40% מאוכלוסיית העולם, תלויה בדשנים שמקורם בתעשייה.

לשימוש הנרחב בדשנים תעשייתיים יש השלכה סביבתית חריפה מאד הן על הסביבה היבשתית והן על הסביבה הימית, ובעיקר בסביבות עניות בחנקן באופן טבעי. העשרת מקווי מים בחומר אורגני (אאוטרופיקציה), מובילה להיפוקסיה (תנאים של מחסור בחמצן). בקרקע, החמצת הקרקע מובילה לזליגה של ניטראט למי תהום. כמו כן עודפי אמוניה בקרקע ובמים עלולים לפגוע במגוון המינים (Phoenix et al., 2006) שימוש יתר בדשנים מוביל גם לעליה בזיהום האוויר על ידי פליטה של ניטרוסאוקסיד לאטמוספירה. ובאמת, הרוב המוחלט של ניטרוסאוקסיד נפלט לאטמוספירה בתהליכים חקלאיים (תמונה 22 א'). בהשוואה לפחמן דו-חמצני, ניטרוסאוקסיד מסוכן פי 265 חמצני בטווח של 100 שנים (תמונה 22 ב'). מכאן שיש חשיבות במציאת דרכים לצמצום פליטת הניטרוסאוקסיד לאטמוספירה בתהליכים חקלאיים.



תמונה 22: א) חקלאות היא המקור המרכזי לפליטת ניטרוסאוקסיד לאטמוספירה. ב) מידת המסוכנות של גזי חממה שונים (סקלה לוגריתמית) בהשוואה לזו של פחמן דו חמצני. ניטרוסאוקסיד מסוכן פי 265.

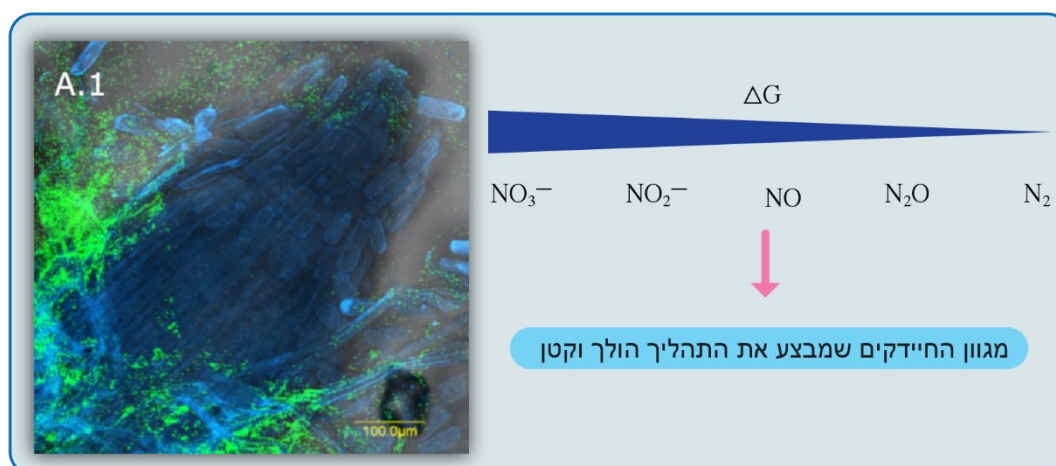
5.4 ניתוח מחקר מדעי

מניפולציה של המיקרוביום בשורשי חיטה

מבוסס על המאמר

Usyskin-Tonne, A., Hadar, Y., Minz, D., 2019. Altering N₂O emissions by manipulating wheat root bacterial community. Scientific Reports 9, 7613.

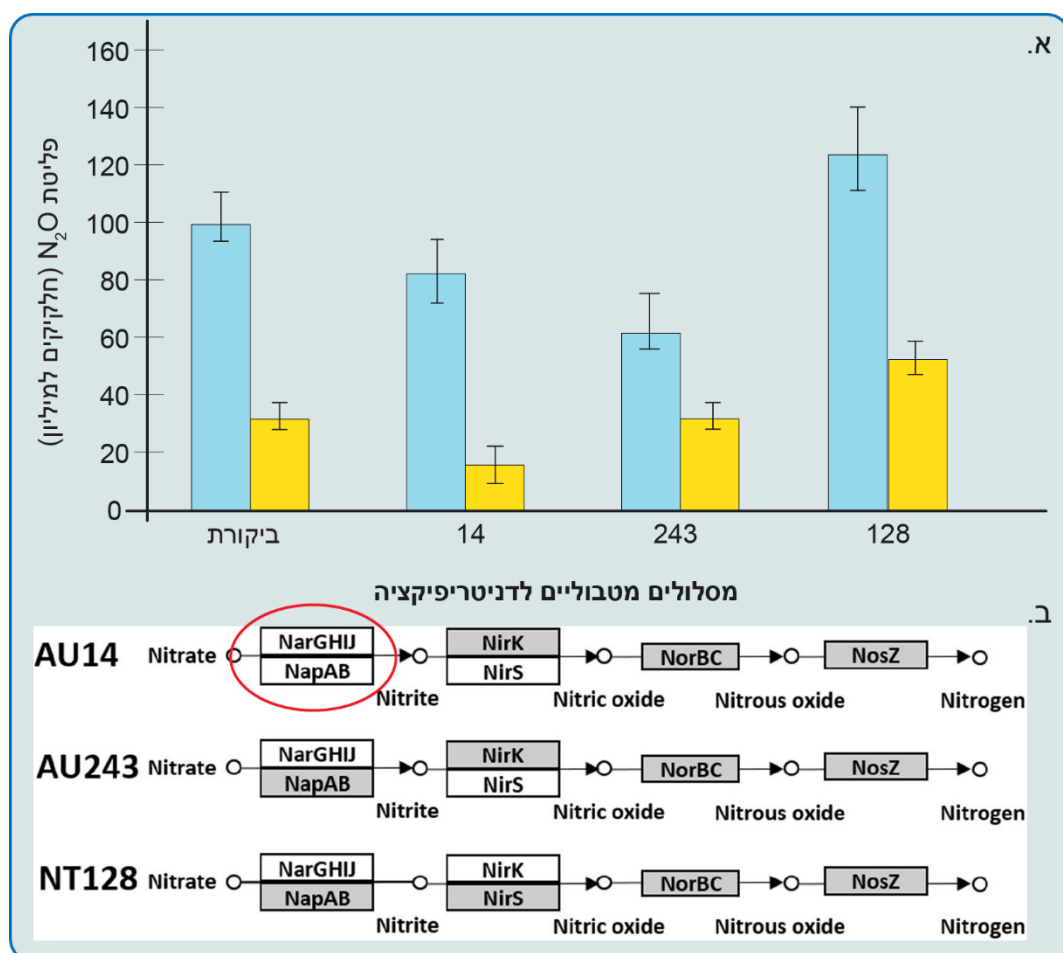
חיטה היא אחד הגידולים החקלאיים החשובים בעולם. בשלב הנביטה, מפרישים שורשי החיטה עד 40% מתוצרי הפוטוסינתזה שלהם (מוטמעים) אל הקרקע, כמגוון רחב של חומרים אורגניים (סוכרים, חומצות קרבוקסיליות, חומצות אמינו ועוד ועוד). חומרים אלו משמשים כמקור לגיוס חברת חיידקים ייחודית. בהינתן תנאים מתאימים (עושר חומר אורגני, ניטראט ותנאים אנאירוביים או מיקרו-אירופיליים) חיידקים אלו יכולים לבצע תהליך דניטריפיקציה לשם הפקת אנרגיה. אם נתבונן בתהליך זה, נראה שהוא מורכב ממספר שלבים, כל אחד מתבצע על ידי אנזים אחר (תמונה 23).



תמונה 23: א) קצה שורש של חיטה עם יונקות- צילום במיקרוסקופ קונפוקלי בסריקת לייזר. ב) היונקות מאוכלסות על ידי חיידקים בצפיפות גדולה עקב הפרשת מוטמעים. בירוק: חיידקים מסומנים בסמן פלואורוסנטי. (Tovi, N. et al 2019) ב) סכימה של תהליך הדניטריפיקציה. הרווח האנרגטי בתהליך החיזור של צורני החנקן - ה- ΔG

הולך וקטן ככל שדרגת החיזור עולה. במקביל, מוצאים ירידה במגוון החיידקים בעלי יכולת לבצע את השלבים האחרונים של התהליך.

לכאורה ניתן היה לצפות, שתהליך הדניטריפיקציה יתרחש במלואו ובסופו, יוחזר חנקן לאטמוספירה. אם כך, מדוע תהליכים חקלאיים אחראיים על פליטה כל כך גדולה של N_2O לאוויר. הסיבה הראשונה לכך היא, שכל עוד יש ניטראט בקרקע, מבחינה אנרגטית, יש יתרון לשימוש בו לצורך הפקת אנרגיה, מבלי להשלים את התהליך עד סופו. הסיבה השנייה לכך היא, שמגוון החיידקים שמסוגל לחזר N_2O לחנקן אטמוספרי הוא קטן, והם לא בהכרח מתחרים טובים של אחרים, המבצעים את התהליך החלקי בלבד. מכאן, שתוך כדי תהליך הדניטריפיקציה, מצטבר ניטרוסאוקסיד בקרקע שנפלט בחזרה לאטמוספירה. אם היינו יכולים להעשיר את הקרקע בחיידקים בעלי העדפה לחיזור N_2O ל N_2 , היינו יכולים לצמצם בצורה משמעותית את פליטתו לאטמוספירה. השערה זו הייתה בסיס לעבודת המחקר שביצעה אלה אוסישקין וחובריה (Usyskin-Tonne et al., 2019), אלה בחנה את היכולת של תבדידי חיידקים לחזר ניטרוסאוקסיד. במחקר בודדו כ- 100 תבדידי חיידקים (תרביות של חיידקים שמקורן בחיידק בודד), משורשי החיטה. הסיבה ששורשי חיטה נבחרו כמקור לתבדידים היא שאנו מעוניינים למצוא חיידקים שיודעים לאכלס את אזור השורש באופן טבעי, ושיוכלו להתחרות בצורה טובה בזנים קיימים. כל אחד מהתבדידים נבדק לגבי היכולת שלו לחזר ניטרוס אוקסיד. שלושה תבדידים משכו את צומת לב החוקרים, ומתוכם תבדיד מספר 14 בלט בצורה מיוחדת. תבדיד מס' 14 הקטין ביותר מ- 50% את פליטת ניטרוסאוקסיד גם בסביבה אנארובית וגם בתנאים אטמוספריים רגילים (תמונה 24 א'). בנוסף אנליזה גנומית הראתה שמתוך שלושת התבדידים שנבדקו רק לתבדיד מס' 14 חסר הגן שאחראי על חיזור ניטראט לניטריט (תמונה 24 ב'). מכאן שגם בתנאים עתירי ניטראט חיידק זה יוכל לחזר ניטרוס אוקסיד לחנקן אטמוספרי.

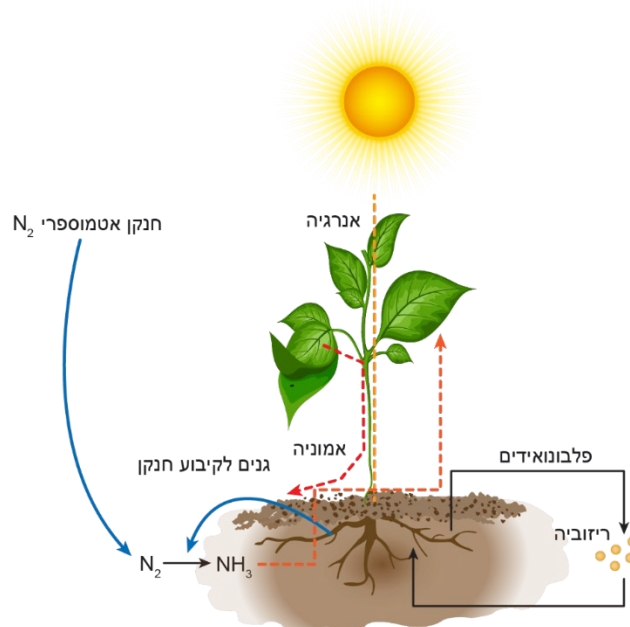


תמונה 24: א' פליטת ניטרוס אוקסיד בסביבה מבוקרת, על ידי שלוש תבדידים שונים. כחול – סביבה עשירה בחנקן. כתום – תנאים רגילים. **ב'** הרכב האנזימים שאחראים על תהליך הדינאמיקה. תבדיד מס' 14 חסר את האנזים שיועד לחזר ניטראט לניטריט.

5.5 קבוע חנקן בקטניות

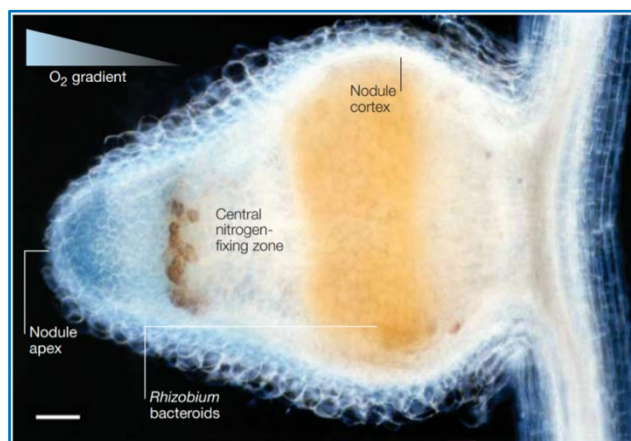
אחת הדוגמאות החשובות והנלמדות ביותר לאינטראקציה בין מיקרואורגניזמים לבין צמחים היא הסימביוזה שבין חיידקי ריזוביום לצמחים ממשפחת הקטניות. חיידקי ריזוביום מתגוררים בשורשי הקטניות במבנים ייחודיים המכונים פקעיות (root nodules). שם, החיידקים מקבעים חנקן אטמוספרי מהאוויר, לתוך תרכובות אורגניות, והם מעבירים אותן לצמח המאכסן. הצמח, מצדו, מבצע פוטוסינתזה יעילה ו"מפרנס" בעזרת תוצריה את דייריו החיידקיים. מעניין הוא, שכל מין של קיטנית יוצרת סימביוזה עם מין ייחודי מתוך קבוצת הריזוביום וכל מין ריזוביום יודע להגיב בצורה ייחודית למסרים המולקולריים הייחודיים למאכסן שלו ולא יגיב לאלה של מאכסנים אחרים.

תחילת האינטראקציה בין החיידקים לצמח מתחילה בהפרשה של חומרים (פלבונואידים) על ידי הצמח שמזהים על ידי החיידקים. חומרים כימוטקטיים אלה, מזרזים את הגעתם של חיידקי הריזוביום אל השורש ואת התרבותם. מולקולות הפלבונואידים מפעילות בחיידקים גנים (פקטורי שעתוק הנקראים NOD factors) שאחראים על הסתלסלות היונקות ויצירת הפקעית. החיידקים, שעד עתה מצאו את השורש ונצמדו ליונקות השורש, מתרבים לתוך "חוט אינפקציה" המיוצר על ידי הצמח ככיס החודר אל תוך רקמת השורש. החיידק אינו בא במגע עם הציטופלזמה של תאי הצמח אלא חודר עטוף בתוך ממברנה. עם ההתקדמות, מפריש החיידק חומרים שגורמים לתאי הצמח להתחלק בקצב מואץ וליצור מבנים הנדחפים החוצה ויוצרים את הפקעית. הפקעית ממשיכה לגדול כל עוד יש לה אספקה מספיקה של מוטמעים עבור החיידקים המתרבים. בתוך הפקעית, מתמיינים החיידקים לצורת חיים ייחודית המכונה בקטרואידים. הבקטרואידים הם אלה שאחראים על קיבוע החנקן, אך מאבדים בעצמם את כושר ההתרבות.



תמונה 25: קיבוע חנקן בקטניות. הצמח מפריש חומרים פלבנואידים שנקלטים על ידי חיידקי הריזוביה. בתגובה, מופעלים פקטורי שעתוק בחיידקים שמובילים בהמשך להיווצרות הפיקה ביונקות השורש.

חיידקי הריזוביום, הם אארוביים אולביגטוריים, כלומר הם חייבים חמצן כדי להתקיים. אך, קומפלקס החלבונים שאחראי על קיבוע החנקן - הניטרוגנאז, רגיש לחמצן. לכן, על הצמח היה למצוא מנגנון לוויסות ריכוזי החמצן בפקעית, כדי להשיג קיבוע חנקן יעיל. הצמחים פיתחו שני מנגנונים: א) הקורטקס הפנימי של התאים שעוטפים את החיידקים, משמש כמחסום המעכב את כניסת החמצן לתוך הפקעית. ב) בתוך הציטופלסמה של התאים המאכסנים את החיידקים, נמצאת מולקולה הנקראת לגהמוגלובין, שבדומה להמוגלובין (בתאי דם אדומים) יכולה לקשור חמצן ובכך מורידה את ריכוזו ומרחיקה אותו מהניטרוגנאז.



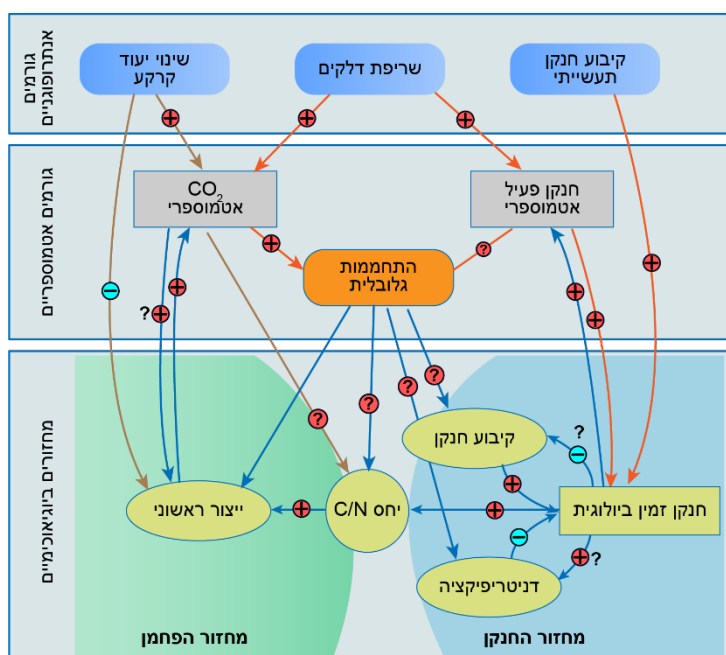
תמונה 26: חתך רחב בפקעית.

5.6 הקשר שבין שינויי אקלים למחזור החנקן.

אין ספק, שהגדלת היצור התעשייתי של דשנים, בתהליך הבר-בוש, תרמה תרומה משמעותית ליכולת של האנושות לייצר גידולים חקלאיים. יחד עם זאת, הגידול באוכלוסייה מעלה את הצורך להגדיל את הייצור דבר שמוביל ל"הפעלה" ביתר של מחזור החנקן. למעשה, ככל שאנחנו מכניסים יותר אמוניה למערכת אנחנו דוחפים אותה לנוע בכיוון התוצרים. במצב הטבעי די היה בכך כדי להפוך את עודפי האמוניה לחנקן אטמוספרי, אך כפי שראינו, תוצאות הביניים מובילות דווקא לעליה בפליטה של ניטרוסאוקסיד לאטמוספירה. בנוסף, סביבות ימיות ויבשתיות חוות אאוטרופיקציה גבוהה והחמצת קרקע ואוקיינוסים.

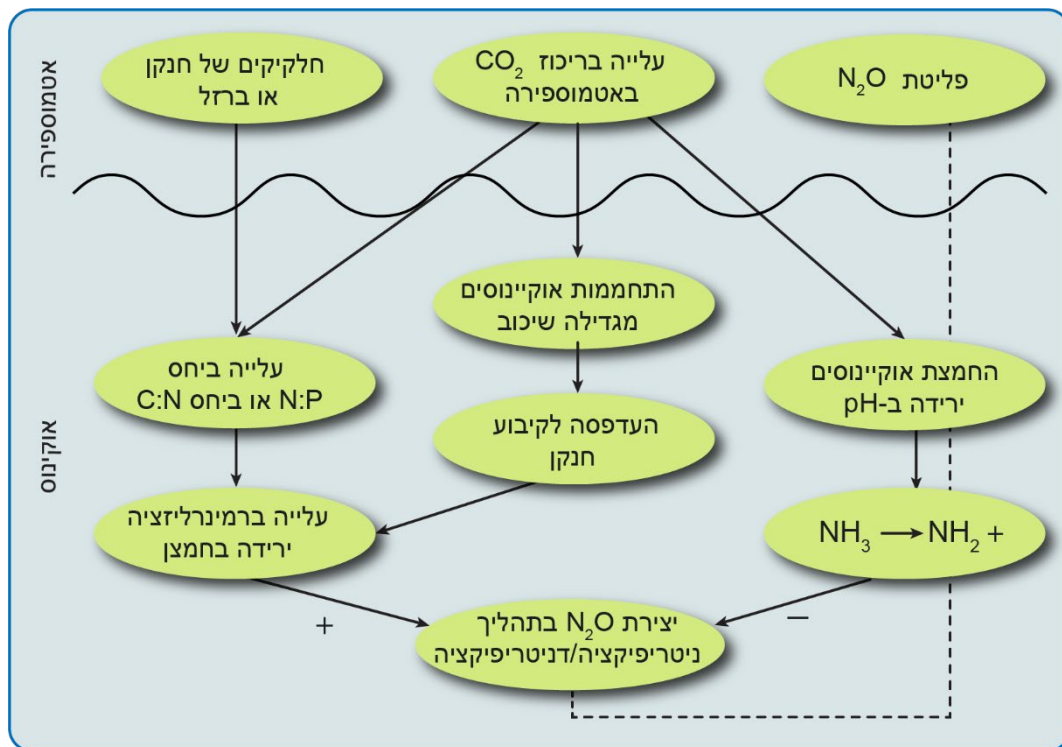
בעידן של שינויי אקלים כה גדולים יש חשיבות מאד גדולה להבנת ההשפעות ההדדיות בין מחזור החנקן-מחזור הפחמן- ומערכת האקלים של כדור הארץ, וחשובה גם ההבחנה בין המערכת הימית, למערכת היבשתית. השאלה שאנו שואלים היא, כיצד תוספת של חנקן אטמוספרי תשפיע על יכולתו של כדור הארץ להמשיך ולהטמיע פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה. וכיצד התחממות האוקיינוסים תשפיע על מחזור החנקן ועל פליטה של N_2O לאטמוספירה. לפי אפשרות אחת, במערכת היבשתית, שם חנקן מהווה גורם מגביל לתהליכים פוטוסינטיים, המחסור הצפוי בחנקן זמין, במצב של עודפי CO_2 יפריע למערכת להמשיך לקבוע פחמן דו חמצני (תמונה 27). לפי התסריט השני, אם תהליך החמצת אוקיינוסים שנגרם בגלל קליטה

עודפת של CO_2 ימשך, אז יגדל היחס בהטמעה של C/N ובהתאם גם יגדל קיבוע החנקן. במובן הזה עודף קיבוע של פחמן מהאטמוספירה יעודד המשך קיבוע של פחמן דו-חמצני.



תמונה 27: יחסי הגומלין בין חנקן, פחמן ואקלים כדור הארץ. סימן + מעיד שהאינטראקציה מגדילה את הגורם המוצג. סימן – מעיד על ירידה. סימני שאלה מעידים על השפעה שאינה ידועה. חצים כתומים מייצגים השפעות אנתרופוגניות ישירות. חצים כחולים מייצגים השפעות טבעיות.

האוקיינוסים אחראים על פליטה של כ- 30% מסך הניטרוסאוקסיד שנפלט לאטמוספירה, בתהליכי ניטריפיקציה ודניטריפיקציה. בנוסף, הם מהווים מקור מבלע חשוב לפחמן דו-חמצני. על כן חשוב להבין כיצד שינויי אקלים ישפיעו על המערכת הימית בוויסות שינויי האקלים. באופן טבעי באוקיינוסים קיימים הבדלים בריכוזי הנוטריינטים בין שכבות המים השונות. תהליכים פיזיקליים, אחראיים על ערבול המים והובלה של נוטריינטים משכבות עמוקות עשירות בנוטריינטים לגובה פני השטח, היכן שמתרחש רוב הייצור הראשוני. בנוסף, מערכת זרמים אוקייניים המוכרת בשם "המסוע האוקיאני" (great conveyor belt). אחראית על העברת נפחי מים גדולים בין אוקיינוס אחד לשני, חלק מגורמים שאחראיים על העלאת נוטריינטים לפני השטח הם זרמי עילוי (upwelling) וערבוב חורפי (winter mixing). עליה בטמפרטורות מי הים עלולה להוביל ליצירת "שכבות" במים, וליצור אזורים עשירים ועניים בחמצן ולהשפיע על מחזור החנקן באוקיינוס (תמונה 28)



תמונה 28: תרחישים אפשריים של השפעת עלייה בריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה על מחזור החנקן באוקיינוסים.

5.7 שיעורים ומשימות

5.7.1 שיעור 8: היכרות עם היסוד חנקן

בשיעור זה התלמידים מחפשים מידע על מולקולות ביולוגיות בהן חנקן הוא מרכיב מרכזי, ומסכמים את המידע בעזרת פוסטר.

בסוף השיעור התלמיד:

1. יבין כיצד באה לידי ביטוי החשיבות של חנקן ליצורים חיים.
2. יוכל להסביר, מדוע חנקן אינו זמין ליצורים חיים.
3. יסביר בצורה בסיסית, כיצד חנקן מקובע למולקולות אורגניות.

משך השיעור: שיעור כפול, מתאים גם בזום.

ידע קודם: היכרות עם מולקולות המכילות חנקן, אם התלמידים לא למדו, אפשר לתת להם רשימה של מולקולות,

סגנון עבודה: בקבוצות או באופן אישי.

הכנות נדרשות: על המורה להכין מצגת שיתופית לתלמידים.

חלק ראשון

א. הבא דוגמה למולקולה אורגנית שחנקן הוא מרכיב מרכזי לבנייתה (כלורופיל, חומצות אמיניות, DNA, אמוניה, אוראה).

ב. עבור המולקולה שבחרת, הכן פוסטר, על הפוסטר להכיל:

1. נוסחת מבנה של המולקולה.
2. היכן מוצאים אותה בתא החי.
3. מה התפקיד של המולקולה.
4. מתי התגלתה ועל ידי מי.

ג. מבנה הפוסטר:

1. הפוסטר יהיה בגודל של דף A4
2. ניתן לשלב בתוך הפוסטר סרטון קצר שלכם או מהרשת.
3. העלה את הפוסטר למצגת השיתופית.

חלק שני: תגובות לפוסטרים של תלמידים אחרים.

- א. התבונן בשלושה פוסטרים שכתבו חבריך
- ב. בעזרת אפשרות "הוסף הערה", כתוב הערה אחת לפחות עבור כל פוסטר. הערה יכולה להיות, הוספה של נתון, התרשמות לטובה, הצעה לניסוח טוב יותר. בכל מקרה, חשוב שההערה תהיה מנוסחת בצורה מנומסת ועניינית.

חלק שלישי:

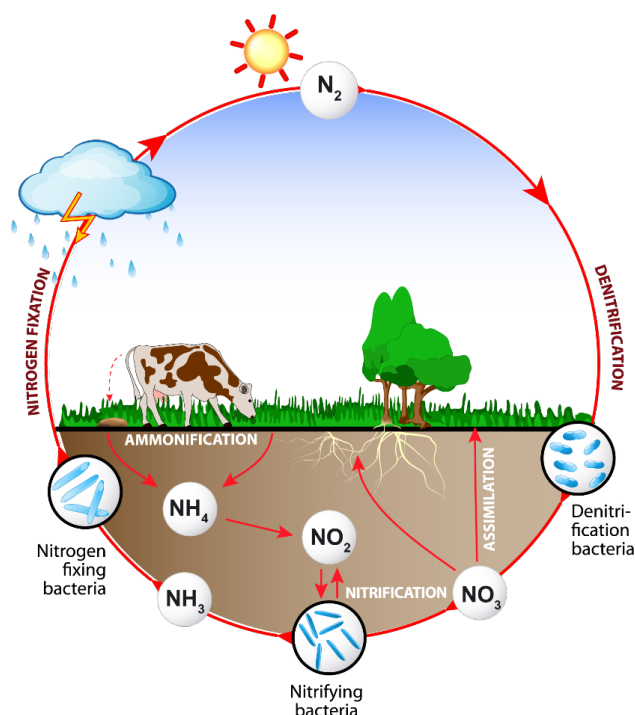
ראינו כי חנקן הוא יסוד מרכזי במולקולות ביולוגיות רבות. למרות חשיבותו לעולם החי, חנקן אטמוספרי (N_2) אינו זמין לרוב היצורים החיים. חפשו במרשתת מידע ונסחו בפסקה קצרה של עד 5 משפטים, מדוע חנקן לא זמין ליצורים חיים, וכיצד בכל זאת, משולב חנקן במולקולות של יצורים חיים.

5.7.2 שיעור 9: מחזור החנקן

בתום השיעור התלמיד ידע:

1. להסביר את השלבים במחזור החנקן.
2. להסביר את החשיבות של מחזור החנקן לעולם החי.

חלק ראשון - פתיחה:



חנקן אטמוספרי (N_2), מהווה כמעט 80% מהרכב האטמוספירה, יחד עם זאת בצורתו האטמוספירית חנקן אינו זמין לרוב היצורים על פני כדור הארץ. יצורים חיים זקוקים לחנקן לשם בנייה של חומצות גרעין, חלבונים, מולקולות כלורופיל ועוד. מכאן, שבסביבות רבות, זמינות החנקן מהווה גורם המגביל את קצב הייצור הראשוני. בטבע, מולקולות החנקן עוברות שינויים כימיים רבים, ההופכים אותה לזמינה עבור יצורים חיים, שינויים אלו נקראים בשם כולל – מחזור החנקן.

תמונה 29: מחזור החנקן ביבשה. חנקן (N_2) הופך זמין לצמחים בעזרת חיידקים מקבעי חנקן. חיידקים מסוגים אחרים יכולים לפרק תרכובות אורגניות לאמוניום (NH_4^+) או לניטראט (NO_3^-) שאף הם זמינים לצמח.

א. התבונן בתרשים המתאר את מחזור החנקן ובעזרת קטע הקריאה וודא כי אתה מבין את השלבים השונים של מחזור החנקן.

ב. עכשיו, שאל 10 שאלות על התרשים. שאלה יכולה להיות פשוטה למשל: מה זה קבוע חנקן? או שאלה מורכבת יותר.
הערה לתלמידים: יתכן שמהר מאוד תכתבו 3-5 שאלות, החלק המאתגר הוא להתעמק בתהליך ולהמשיך לשאול שאלות שהתשובה להן לא בהכרח טריוויאלית.

חלק שני:

למורה: אפשר לרכז את השאלות במסמך שיתופי, פדלט, מנטימטר ועוד.
לאחר שצפינו בכל השאלות נחלק את הכיתה לקבוצות, כל קבוצה תהיה אחראית להכין מצגת קצרה על מרכיב אחד במחזור החנקן. למשל קבוצת החיידקים המקבעים חנקן בקטניות, קבוצת הדניטריפיקנטים ועוד. כל קבוצה תצטרך להתייחס לשאלה אחת מתוך שלל השאלות שהועלו בחלק הקודם.

חלק שלישי - סיכום

מציגים במליאה את המצגות ומסכמים את עיקרי הדברים לכיתה.

5.7.3 שיעור 10: קבוע חנקן בקטניות

בתום השיעור התלמיד ידע:

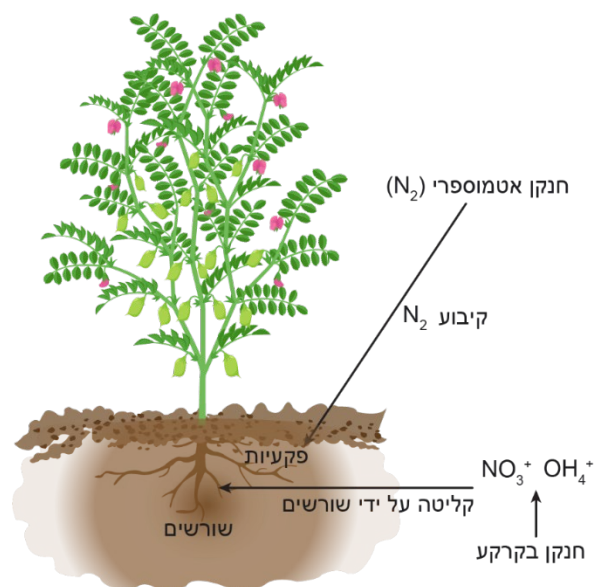
1. לתאר את תהליך קיבוע החנקן על ידי צמחים ממשפחת הקטניות.
2. להסביר את חשיבות התהליך לחקלאות.

ידע קודם נדרש

1. התלמיד צריך להכיר את הנושאים הבאים: סימביוזה, מבנה הצמח, שורשים, יונקות, דרישות תזונתיות של הצמח.

חלק ראשון - פתיחה

- (1) התבוננו בשורשים של הצמח שלפניכם, זהו על גבי השורשים פקעיות עגולות. צלמו ותעדו את מבנה השורש עם הפקעיות שלהם (אם אין שורשים אז אפשר בתמונה).
- (2) צפו [בסרטון](#) (דקות 13:00-20:15) ותארו בעזרת תרשים את מרכיבי הסימביוזה בקטנית.
- (3) אפשרות נוספת: [קישור להרצאה באינטרנט](#). צפו והקשיבו לקטע בין הדקות 13:00 – 20:15
א. מהן הדרכים לניצול החנקן האטמוספירי (N_2) ומה יעילות כל אחת מהן? (התבסס על נתונים מההרצאה)
ב. בין צמח הקיטנית לבין חיידק הריזוביום מתקיימים יחסי סימביוזה מסוג הדדיות. ציין מה תרומת הצמח לחיידק ומהי תרומת החיידק לצמח?



תמונה 30: יחסי הסימביוזה בין חיידקים לשורשי צמח הקטנית.

(4) משימת אתגר למתקדמים:

צפו והקשיבו לקטע בין הדקות 20:15-32:25

לפניך רשימת תהליכים המתארים שלבים שונים בתהליך יצירת פיקה (פקעית) בשורש הקטנית. סדר את התהליכים ברצף הנכון. (ניתן כתרשים זרימה על ידי הוספת חיצים)

- א. חלוקת התאים גורמת לדחיקתם החוצה ויצירת בליטה
- ב. יצירת חוט אינפקציה על ידי החיידק בתוך היונקת (בתוך ממברנה שיצר הצמח)
- ג. החיידקים הופכים לבקטרואידים ומתחילים בתהליך קיבוע חנקן
- ד. תאי החיידק מצויים בקרקע סביב יונקת וצורתם מתגים
- ה. מתחילה חלוקה נמרצת של תאים בתוך השורש
- ו. החיידק מפריש חומרים
- ז. תוך כדי התקדמות החיידק מסתלסלת היונקת

חלק שני – הצעה לעבודת חקר

בניסוי זה נחקר את ההשפעה של תוספת חנקן לקרקע על התפתחות פקעיות בקטניות. אנו מציעים לגדל מספר צמחי קטנית ולהוסיף לכל קבוצה כמויות שונות של חנקן כדשן. ההשערה היא שכל שיהיה יותר חנקן זמין לצמח מספר הפיקות וגודלן יהיה קטן יותר. מומלץ שהמורה יבצע ניסוי מקדים לפני ביצוע הניסוי עם התלמידים. כמו כן, אפשר לבקש מהתלמידים לנסח את ההשערות ולתכנן את הניסוי לפני שנותנים להם ניסוי מתוכנן ומוכן.

5.7.4 שיעור 11: מה הקשר בין מחזור החנקן ומשבר האקלים

מטרת השיעור:

1. התלמיד יסביר כיצד שינויי האקלים עלולים להשפיע על מחזור החנקן.
2. התלמיד יסביר כיצד מחזור החנקן ומחזור הפחמן קשורים זה לזה.

משך השיעור: שיעור כפול

ידע קודם נדרש: היכרות עם המושגים הבסיסיים של מחזור החנקן.

למורה:

בפעילות זו, מקבלים התלמידים קטע קריאה, המסכם את הקשר בין מחזור הפחמן-למחזור החנקן ושינויי אקלים. במכוון, מכיל הקטע מושגים שאינם ברורים. מטרת התלמידים היא להכין "דף ויקי" שבו כל 2-3 תלמידים היו צריכים להסביר מושג אחד ולצרף את ההסבר שלהם כקישור לדף שכתב המורה.

- המורה צריך להכין מסמך שיתופי אותו הוא ישתף עם התלמידים.
- המורה יסמן את המילים שהיה רוצה שהתלמידים יסבירו.
- עבור קטע הקריאה אנו מציעים להשתמש בפסקה המתוארת בפרק 5.6, ולסמן עליו מושגים שהייתם רוצים שהתלמידים יסבירו.

מכילים דף ויקי – מחזור החנקן ושינויי אקלים

1. קראו את הקטע.
2. חפשו מידע על המושג שתקבלו מהמורה, ונסחו אותו בעד חמש שורות במילים שלכם בטופס גוגל חדש. תוכלו להוסיף תמונה או סרטון להמחשה. ניתן להיעזר בדוגמאות.
3. שתפו את הדף שלכם באמצעות: שתף < מתקדם < שנה < כל אחד שיש בידו קישור זה < יכול לערוך < שמור < בוצע.
4. העתיקו את הקישור שבראש הדף וקשרו למושג עליו עבדתם בדף זה.
5. תוכלו להגיב למושגים שהסבירו חברים שלכם בעזרת, סימון מילה בקטע < הוסף < הערה < כתיבת ההערה < אישור.

5.7.5 שיעור 12 - חוקרים מחזורים ביוגיאוכימיים בעזרת עמודת וינוגרדסקי.

סרגיי ניקולאיביץ וינוגרדסקי (Sergei Nikolayevitch Winogradsky, 1856-1953) הינו אחד מאבות האקולוגיה המיקרוביאלית. מרבית המיקרוביולוגים בני זמנו, כמו לואי פסטר, התמקדו בחקר מיקרואורגניזמים על ידי גידולם בתרבית טהורה, ובתנאים הרחוקים מהתנאים השוררים בבתי הגידול הטבעיים של המינים הנחקרים. לעומתם, בחר וינוגרדסקי, בין יתר מחקריו, לבחון את ההתאמות של אוכלוסיות חיידקים שונות לקיום בבית גידולם הטבעי, ואת האינטראקציות בין אוכלוסיות חיידקים שונות בבתי גידול אלה. אחד הגילויים הרשומים לזכותו של וינוגרדסקי הוא תופעת הכימואוטוטרופיות (Chemoautotrophy). יצורים כימואוטוטרופיים מיצרים לעצמם את החומרים האורגנים מחומרים אי-אורגניים תוך שימוש

בתהליכים כימיים. למשל חמצון מימן או חמצון גפרית. עד גילוי זה, המצב האוטוטרופי היחידי שהיה מוכר היה השימוש באור.

עמודות וינוגרדסקי הנן כלי מעבדתי באמצעותו ניתן להדגים את האינטראקציה, ההשפעה ויחסי הגומלין בין אוכלוסיות מיקרואורגניזמים המשתייכות לקבוצות תפקודיות שונות (אוטוטרופיים, הטרוטרופיים, אירוביים, אנארוביים וכו') לבין עצמם ובינם לבין הסביבה בה הם מתקיימים.

בסתירה לכמות ולמורכבות המידע אותו ניתן להפיק מעמודות אלה, מבנה מערכת הניסוי פשוט ביותר. בתוך מיכל קיבול שקוף, דוגמאות סדימנט (בלועזית -משקע. חומרים מוצקים השוקעים בקרקעית ים או אגם). שקועות תחת מים. בהתאם לדרישות הניסוי הספציפי, הסדימנט ועמודת המים עשויים להדגם מאותה הסביבה או מסביבות שונות. בנוסף, על ידי מניפולציות פשוטות ניתן לשנות את ההרכב הכימי של עמודת המים (הוספה של מרכיבים אורגניים או אי-אורגניים, שינוי ה- pH ועוד). או את התנאים הפיסיקליים בהם היא מוצבת (אור/חושך, טמפרטורת אינקובציה ועוד).

מערכת הימים והאוקיינוסים בטבע היא מערכת מעורבלת, ולכן מי הים עשירים בחמצן בכל עומקם. בניגוד לכך, מערכות מימיות שונות (בריכות חורף למשל) הן מערכות מים עומדים. במערכות עומדות כאלה מתהווים גרדיאנטים כימיים ופיסיקליים, מפני המים ועד הסדימנט. הכוונה היא, שאם נסתכל על עמודת המים מלמעלה למטה, ריכוז החומרים, והנתונים הפיסיקלים של העמודה, pH, ריכוז חמצן מומס ועוד, משתנים בצורה הדרגתית (או חדה) מראש העמודה כלפי מטה או להפך. בניגוד למשל לעמודת מים שכל הזמן תהיה בתנאי ערבוב תמידיים. עמודות וינוגרדסקי אינן מעורבלות ולכן יתרחשו בהן תהליכי שיכוב (יצירת שכבות) הדומים לאלה המתקיימים במערכות מים עומדות (איור 1). שני הגרדיאנטים המרכזיים המתפתחים בעמודות הם גרדיאנט בריכוז החמצן, ההולך ופוחת ככל שמתרחקים מראש העמודה, וגרדיאנט בריכוז הסולפיד הקטן ככל שמתרחקים מן האזור האנארובי – תחתית העמודה (איור 1). שני גורמים אלו מושפעים באופן ישיר מחשיפה לאור והוספת חומרים אורגניים ואי-אורגניים שונים לעמודה.

במעבדה נשתמש בעמודות וינוגרדסקי כדי לבחון את המעורבות של אוכלוסיות חיידקים שונות. שמקורן במי הים ובסדימנט הימי, במחזורים ביוגאוכימיים המרכזיים המתרחשים בסביבות אלה: מעגל הפחמן, מעגל החנקן, ומעגל הגופרית.

טבלה 1: טיפולים שונים לעמודת וינוגרדסקי.

חומר	אמוניה	אצטט	פפטון	חלקי דג	אגר	ניטראט
תורם אלקטרונים	+	+	+	+	+	-
מקור פחמן	-	+	+	+	+	-
מקור חנקן	+	-	+	+	-	+
מקבל אלקטרונים	-	-	-	-	-	+

500 mM	80 g L ⁻¹		40 g L ⁻¹	500 mM	76 mM	ריכוז תמיסת מקור
5 ml	1/2 petri dish	1 g	2.5 ml	5 ml	2.5 ml	למשורות 500 מ"ל
10 ml	1 petri dish	2 g	5 ml	10 ml	5 ml	למשורות 1000 מ"ל
5 mM	2 g L ⁻¹	2 g L ⁻¹	0.2 g L ⁻¹	5 mM	0.38 mM	ריכוז סופי בעמודה

מהלך העבודה

1. על שולחנכם תמצאו משורה בנפח 500 או 1000 מ"ל ומדבקה.

כתבו על המדבקה את שמותיכם וסמנו עמה את המשורה. הדביקו את המדבקה בבסיס המשורה בצד המנוגד לפיית המשורה.

2. מלאו 1/5 מנפח המשורה במי ים (כלומר, 100 מ"ל מי ים למשורה

בנפח 500 מ"ל או 200 מ"ל מי ים למשורה בנפח 1000 מ"ל).

לאחר מכן הוסיפו בהדרגה, סדימנט ים. יש לדאוג שהסדימנט ישקע באופן אחיד בתחתית המשורה שלא יופיעו בו בועות.

הסדימנט ימולא עד לגובה 150 מ"ל במשורות בנפח 500 מ"ל או עד לגובה 300 מ"ל במשורות בנפח 1000 מ"ל.

3. על פי הכתוב על המדבקה, בדקו לאיזה טיפול מיועדת העמודה

שלכם. הוסיפו למשורה את החומרים הדרושים בכמויות המפורטות בטבלה 1.

4. נגבו את פי המשורה בנייר מעבדה וכסו אותה בפארפילם (נייר

שעווה, הוא ייצמד במתיחה על פי המשורה ויאטום אותה). הטו

את המשורה על צידה וערבבו את המרכיבים השונים.

5. השלימו על ידי הוספת מי ים את גובה העמודה ל 500 מ"ל או

1000 מ"ל, בהתאם למשורה שלכם.

6. נגבו את פי המשורה בנייר מעבדה וכסו אותה בפארפילם. הטו

את המשורה על צידה וערבבו את המרכיבים השונים. וודאו כי אין

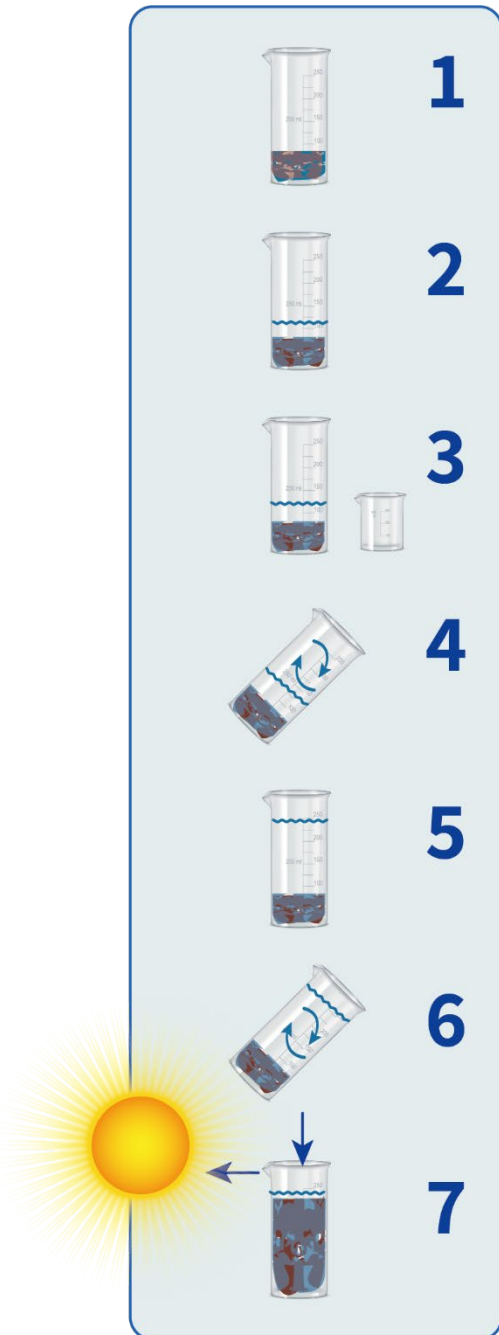
בסדימנט בועות לאחר הערבוב.

7. הציבו את המשורה במקום המיועד לכך, כך שפיית המושרה פונה

על האור. גם עמודות שמיועדות לטיפול חושך יוצבו באותו כיוון!

כסו את פתח המשורה בנייר אלומיניום. משורות המיועדות

לטיפול חושך יכוסו בצינור המיועד לכך.



תצפית ואיסוף נתונים

לאחר הכנת העמודות, משאירים אותן לעמוד במקום החשוף לאור שמש במשך מספר שבועות ועוקבים אחר שינויים בעמודות המים ובסדימנט (ראו הצעה לטבלת איסוף נתונים בהמשך, טבלה 2). אפשר אם רוצים להשאיר חלק מהעמודות בחושך ולראות כיצד שינוי תנאי התאורה משפיעים על התפתחות חברת החיידקים.

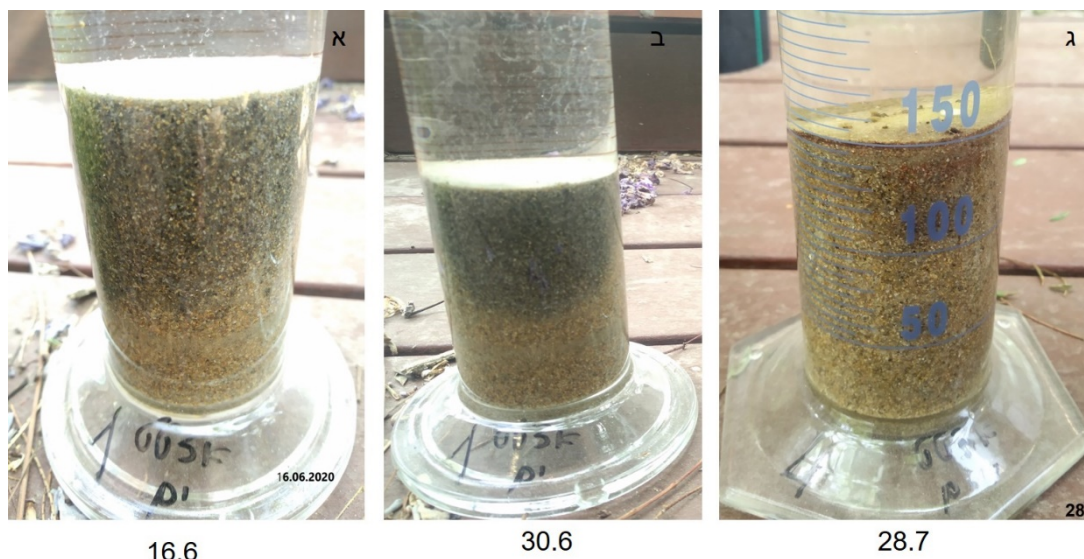
טבלה 2: הצעה לטבלת איסוף נתונים.

טיפול	פרמטר נבדק/תאריך	תאריך	תאריך שני
אור בלבד	צבע/ עכירות עמודת המים		
	צבע הסדימנט		
	גזים ובועות (מיקום וכמות)		
	ריח		
	מיקרואורגניזמים		
	ריכוז חמצן מומס במים		
	pH		

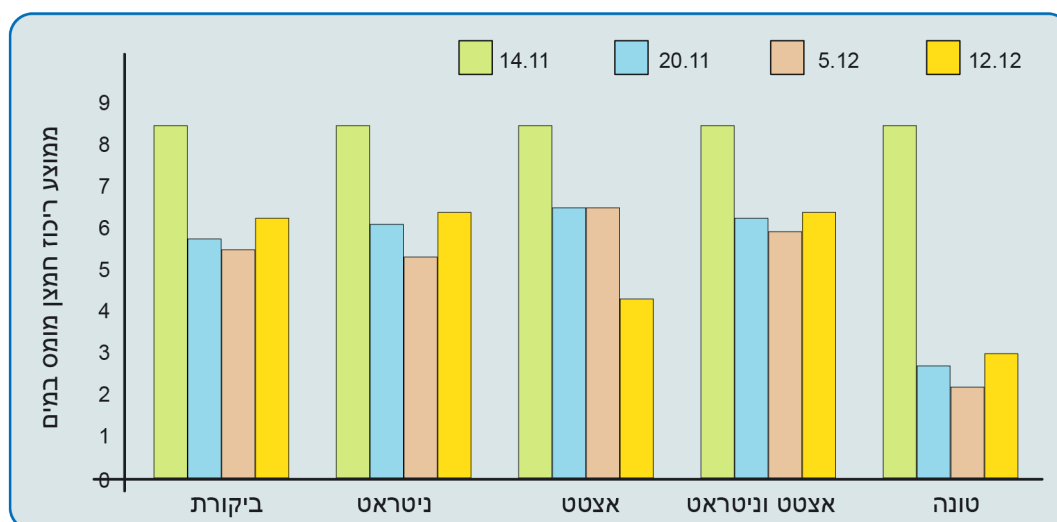
שיעור 12: תוצאות צפויות לניסוי עם עמודות ווינוגרדסקי

ניסוי וינוגרדסקי הוא ניסוי לטווח ארוך, כשאי להעמיד אותו לפחות למספר חודשים ולעקוב אחר השתנות העמודות לאורך זמן. דרך אחת לתאר את התוצאות היא באמצעות טבלת מעקב. בטבלה זו נתאר מה קרה בכל עמודה (טבלה א). כמובן שנרצה לצלם את העמודות ולתעד את השינויים. כדאי לנסות ולצלם תמיד מאותו מרחק ולשים קנה מידה כדי שיהיה קל אחר כך להשוות בין התמונות (תמונה). אם מודדים שינויים פיזיקליים בעמודות עמים נניח ריכוז חמצן מומס, ניתן ליצור גרף של השינויים בעמודות השונות. כאן חשוב להדגיש, שהמדידה צריכה להתרחש בדיוק מאותה הנקודה בעמודה שכן בכל מקום צפוי להיות גרדיאנט שונה של חמצן.

בקבוק מספר	טיפול	פרמטר נבדק/תאריך	14.11	20.11	5.12	12.12
1	אור בלבד	צבע/ עכירות עמודת המים	צלול	צלול	מעט ירקרק	צלול
		צבע הסדימנט	אין שינוי	אין שינוי	אין שינוי	אין שינוי
		גזים ובועות (מיקום וכמות)	אין	אין	אין	אין
		ריח	אין	אין	אין	אין
		מיקרואורגניזמים	אין	אין	אין	אין
		ריכוז חמצן מומס במים	8.2	5.7	5.4	6.2
		pH				8.24



תמונה 31: עמודות עם תוספת אצטט כמקור פחמן יחיד. ניתן לראות שלאחר 12 יום מתחילת הניסוי נגמר החנקן בעמודה וחלקים של המצע משחירים בתהליך של חיזור סולפאט לסולפיד (א, ב). כחודשיים מתחילת הניסוי, נצפה משטח צהוב על הסדימנט. כנראה שהסולפיד חומצן בצורה אנארובית בנוכחות ניטראט לגפרית אלמנטרית (ג).



תמונה 32: השפעת הטיפולים השונים על ריכוז החמצן המומס במים בעמודות השונות.