

# שינויי אקלים כנושא רב תחומי להוראת מדעים בחטיבת הביניים

## אוגדן למורה

ד"ר איתי ללזר, ד"ר יעל שוורץ

המרכז הארצי למורי מדע וטכנולוגיה בחט"ב  
המחלקה להוראת המדעים  
מכון ויצמן למדע, רחובות

הפרויקט מבוצע על פי מכרז 13.07/09 עבור המזכירות הפדגוגית, משרד החינוך.  
© כל הזכויות שמורות למשרד החינוך

# תוכן עניינים

4	מבוא	4
5	רציונל היחידה	5
5	מטרות האוגדן	5
6	פרק 1: מערכת האקלים בכדור הארץ	6
6	1.1 האטמוספירה והרכבה	6
8	1.2 אפקט החממה והספקטרום האלקטרומגנטי	8
9	1.3 שיעורים ומשימות	9
9	1.3.1 שיעור 1: חוקרים שינויים בהרכב האטמוספירה של כדור הארץ	9
12	1.3.2 שיעור 2: מדגימים את פעילות גזי החממה	12
15	1.3.3 שיעור 3: האי השוקע	15
17	פרק 2: אוכלוסייה זה כל הסיפור	17
17	2.1 התפתחות האוכלוסייה בכדור הארץ	17
18	2.2 שינוי בהרגלי צריכת דלקי מאובנים	18
21	2.3 ניתוח מחקר מדעי	21
23	פרק 3: מחזורים ביוגיאוכימיים	23
23	3.1 מחזור הפחמן	23
24	3.2 תהליך הפוטוסינתזה	24
29	3.3 שיעורים ומשימות	29
29	3.3.1 שיעור 3: הפחמן שובר את האינטרנט	29
30	3.3.2 שיעור 4: האם נוצרים חומרים אורגניים בעלה?	30
31	3.3.3 שיעור 5: פוטוסינתזה - השלב הראשון במחזור הפחמן	31
34	3.3.4 שיעור 6 - חוקרים את הספקטרום האלקטרומגנטי בעזרת שוקולד	34
35	פרק 4: החמצת האוקיינוסים	35
35	4.1 החמצת האוקיינוסים איך זה עובד?	35
37	4.2 השלכות ביולוגיות של החמצת אוקיינוסים	37
38	4.3 שיעורים ומשימות	38
38	4.3.1 שיעור 7 - החמצת אוקיינוסים	38
41	פרק 5: מחזור החנקן	41
41	5.1 מחזור החנקן	41
43	5.2 חשיבות ביולוגית של מחזור החנקן	43
2		2

אוגדן למורה בנושא משבר האקלים לכיתה ט'

44	תהליך הבר-בוש	5.3
46	ניתוח מחקר מדעי	5.4
48	קבוע חנקן בקטניות	5.5
49	הקשר שבין שינויי אקלים למחזור החנקן	5.6
52	שיעורים ומשימות	5.7
52	שיעור 8: היכרות עם היסוד חנקן	5.7.1
53	שיעור 9: מחזור החנקן	5.7.2
54	שיעור 10: קבוע חנקן בקטניות	5.7.3
56	שיעור 11: מה הקשר בין מחזור החנקן ומשבר האקלים	5.7.4
..	שיעור 12 - חוקרים מחזורים ביוגיאוכימיים בעזרת עמודת וינגרדסקי	5.7.5
56		
61	פרק 6: השפעת שינוי אקלים ופעילות אדם על שירותי המערכת האקולוגית	
61	בעיצומה של ההכחדה השישית	6.1
61	שינוי ייעוד קרקע	6.2
62	חדירה של מינים פולשים	6.3
63	ניצול יתר	6.4
64	שינויי אקלים	6.5
65	שירותי המערכת האקולוגית	6.6
66	למה צריך מגוון ביולוגי?	6.7
67	הערך הכלכלי של המגוון הביולוגי	6.8
67	שיעורים ומשימות	6.9
67	שיעור 13: טרגדיית נחלת הכלל	6.9.1
	שיעור 14: מחקר שדה - חוקרים את המגוון הביולוגי בעזרת מלכודות	6.9.2
69		נפילה

עידן הקרח האחרון הסתיים לפני בערך 11,700 שנים והוא מגדיר את עידן האקלים הנוכחי והתפשטות החברה האנושית. בשנים האחרונות אנו עדים לשינויים משמעותיים באקלים הכדור. הבאים לידי ביטוי בעלייה בריכוז גזי החממה באטמוספירה, שינוי משטר הגשמים, עליה בטמפרטורה הממוצעת, עליה בקצב המסת קרחונים ועוד. ריכוז הפחמן הדו-חמצני (פד"ח) באטמוספירה עלה משמעותית מ- $270_{\mu\text{mol}}$   $\text{mol}^{-1}$  בשנת 1750 ליותר מ- $350_{\mu\text{mol}} \text{mol}^{-1}$  לתקופה הנוכחית (Quéré et al., 2018; Solomon et al., 2009). גם ריכוז גזי החממה: מתאן ( $\text{CH}_4$ ), ניטרוס-אוקסיד ( $\text{N}_2\text{O}$ ), ואוזון ( $\text{O}_3$ ), עלו בצורה דרמטית כתוצאה משריפת דלקים מאובנים (נפט, פחם, גז) ופעילויות אנתרופוגניות נוספות, וצפויים לעלות עוד בשנים הבאות. העלייה בריכוז גזי החממה באטמוספירה היא גורם עיקרי המשפיע על ההתחממות הגלובאלית, והצפי הוא שבמשך 50-100, הטמפרטורה השנתית הממוצעת תעלה ב- $3-5^{\circ}\text{C}$ . למרות שבין השנים 1880-2012 הטמפרטורה הממוצעת העולמית עלתה לכאורה רק ב- $0.85^{\circ}\text{C}$ , לא ניתן להקל ראש בשינויים הללו. מחקרים מראים שעבור כל עליה של מעלה אחת בטמפרטורה השנתית הממוצעת, תנובת החיטה יורדת ב-5%. זאת ועוד, השפעות שינויי האקלים ותהליך ההתחממות הגלובלית, הובילו לתהליך מתמשך של מדבור באזורים נרחבים בעולם. מדבור שנגרם בגלל ניצול יתר של הקרקע מוביל לסחף קרקע, המלחת קרקע ולירידה בפוריות הקרקע לחקלאות (Asseng et al., 2015).

לצד השפעות ארוכות-טווח על אקלים כדור הארץ, לשינויי האקלים ולפעילות האדם יש השפעה שלילית על כלל שירותי המערכת האקולוגית, כלומר לכלל התועלת שמפיק האדם מהמערכות האקולוגיות. החמצן שאנו נושמים, המים שאנו שותים והתרופות שאנו צורכים הן דוגמאות מעטות לשירותי המערכת האקולוגית אותם אנו צורכים. הפגיעה במגוון המינים היא אחת הבעיות הסביבתיות המשמעותיות ביותר המאיימת על שירותי המערכת האקולוגית ועל איכות החיים של בני האדם בכדור הארץ. עדויות רבות מצטברות בשנים האחרונות, לפיהן קצב הכחדת המינים הנוכחי גדול בהרבה מקצב ההכחדה הטבעי המצופה (background extinction rate) (Ceballos et al., 2015). פגיעה במגוון המינים משפיעה של שירותי המערכת האקולוגית כגון, האבקה, טיהור מים, סחף קרקעות, מדבור, פנאי ועוד. כדי לצמצם את הפגיעה במגוון המינים צריך להשקיע מאמצים רבים כדי להקטין את הלחץ על בתי הגידול.

# רציונל היחידה

משבר האקלים הוא כאן וצפוי להישאר וחובתנו כמורים למדעים ללמד את התלמידים את העובדות המדעיות הקשורות לנושא. הוראת הנושא מהווה הזדמנות גדולה להמחיש כיצד מדע הוא רלוונטי מאד לחיים שלנו שכן, לא אחת אנו נשאלים "למה צריך ללמוד את זה?" ובאמת הנושאים בהם עוסק האוגדן מאד מגוונים והרבה מהם לא מהווים חלק ישיר של תכנית הלימוד, אבל הם בהחלט רלוונטיים לחיי התלמידים. מכאן, שכדי ללמד את התכנים המופיעים באוגדן נדרשת הכנה גדולה מצד המורה. לכן בבחירת הנושאים הושם דגש על נושאים שחשבנו שהם לב לבו של העניין מצד אחד ומן הצד השני כאלה שמרבית המורים והתלמידים יתעניינו בלמידתם. בנוסף חיפשנו נושאים שיאפשרו ככל שניתן למידה התנסותית במעבדה או בשדה.

הוראה במאה ה-21 מצריכה מאתנו המורים התייחסות לעקרונות פדגוגיים שונים מאלה שהורגלנו אליהם. יש חשיבות גדולה יותר בפיתוח לומד עצמאי, פיתוח חשיבה מערכתית, למידת חקר, שימוש במאגרי מידע, למידה התנסותית, למידה ערכית וצמצום של הוראה פרונטאלית. בנוסף יש חשיבות לשימוש במדיה דיגיטלית להוראה, והבנייה של פדגוגיה המתאימה ללמידה מרחוק שכן אוגדן זה נכתב בעיצומו של משבר הקורונה.

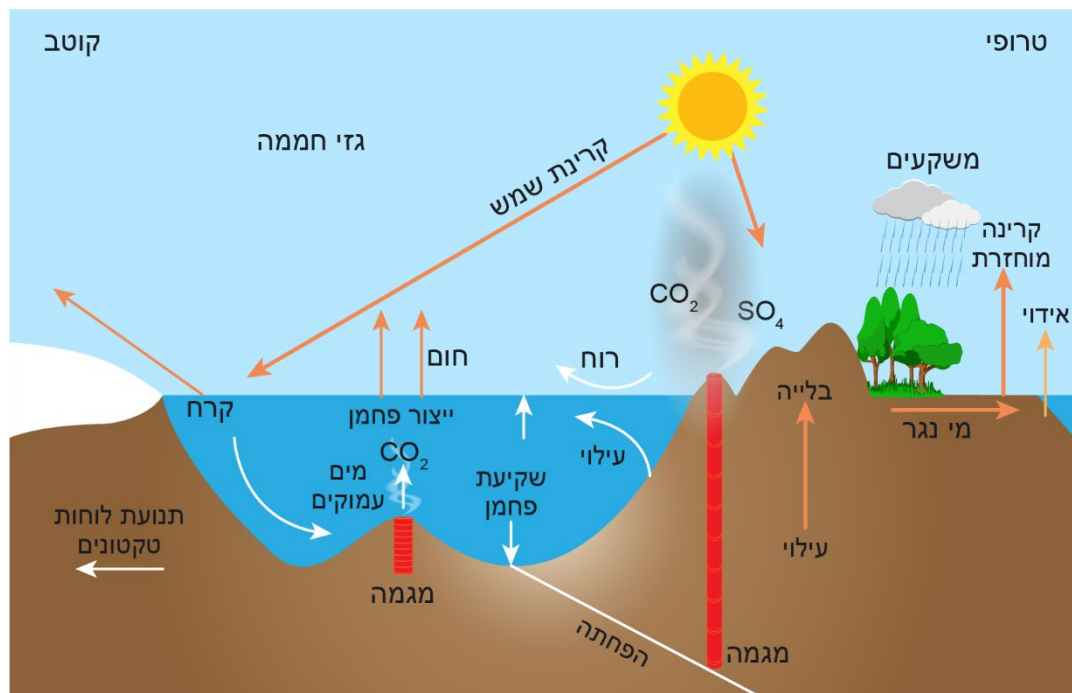
אחד העקרונות המנחים שהובילו אותנו בכתיבת האוגדן היה שימוש במושגים חוצי דיסציפלינות (Cross cutting concepts), כדי להעמיק את הבנת התלמידים בעקרונות המדע הבסיסיים. עקרונות אלה תוארו במסמך שבחן את לימודי המדעים בארצות הברית (NRC, 2013), פירוט על מסמך זה תוכלו למצוא כאן. האוגדן מיועד למורים למדעים המלמדים בכיתות ט'. למרות שניתן לשלב את הנושאים השונים גם בהוראה בכיתות ז' ו ח'.

## מטרות האוגדן

1. להציג עדויות מדעיות לקיומו של משבר האקלים.
2. להציג עדויות לדוגמאות לתרומת האדם להאצת משבר האקלים.
3. להציע עקרונות פדגוגיים ופעילויות להוראת הנושא בכיתה, בלמידה מרחוק ובשדה.
4. להציג פתרונות אפשריים לשינוי המגמה.
5. לפתח בקרב התלמידים תפישה מערכתית כוללת של מחזורי חומר ואנרגיה במערכות כדור הארץ.

# פרק 1: מערכת האקלים בכדור הארץ

כשמדברים על התחממות גלובלית, אין הכוונה למזג האוויר היומי. לפי ארגון האקלים העולמי (WMO) אקלים הוא מזג אוויר בתקופה של 30 שנה או יותר. בין ימים ובין שנים קיימת שונות במזג האוויר, אבל את העלייה של הטמפרטורה העולמית הממוצעת ב-0.8 מעלות צלזיוס לאורך עשרות שנים אנחנו לא מרגישים. התחממות גלובלית מתייחסת לעליה כוללת בכמות האנרגיה בכדור הארץ. הטענה היא שהעלייה בטמפרטורה קשורה בעליה בריכוז של גזי חממה באטמוספירה. ובאמת הוספת אנרגיה למערכת האקלים הכוללת של כדור הארץ גורמת לתופעות אקלימיות קיצוניות בתדירות גבוהה יותר (תמונה 1).

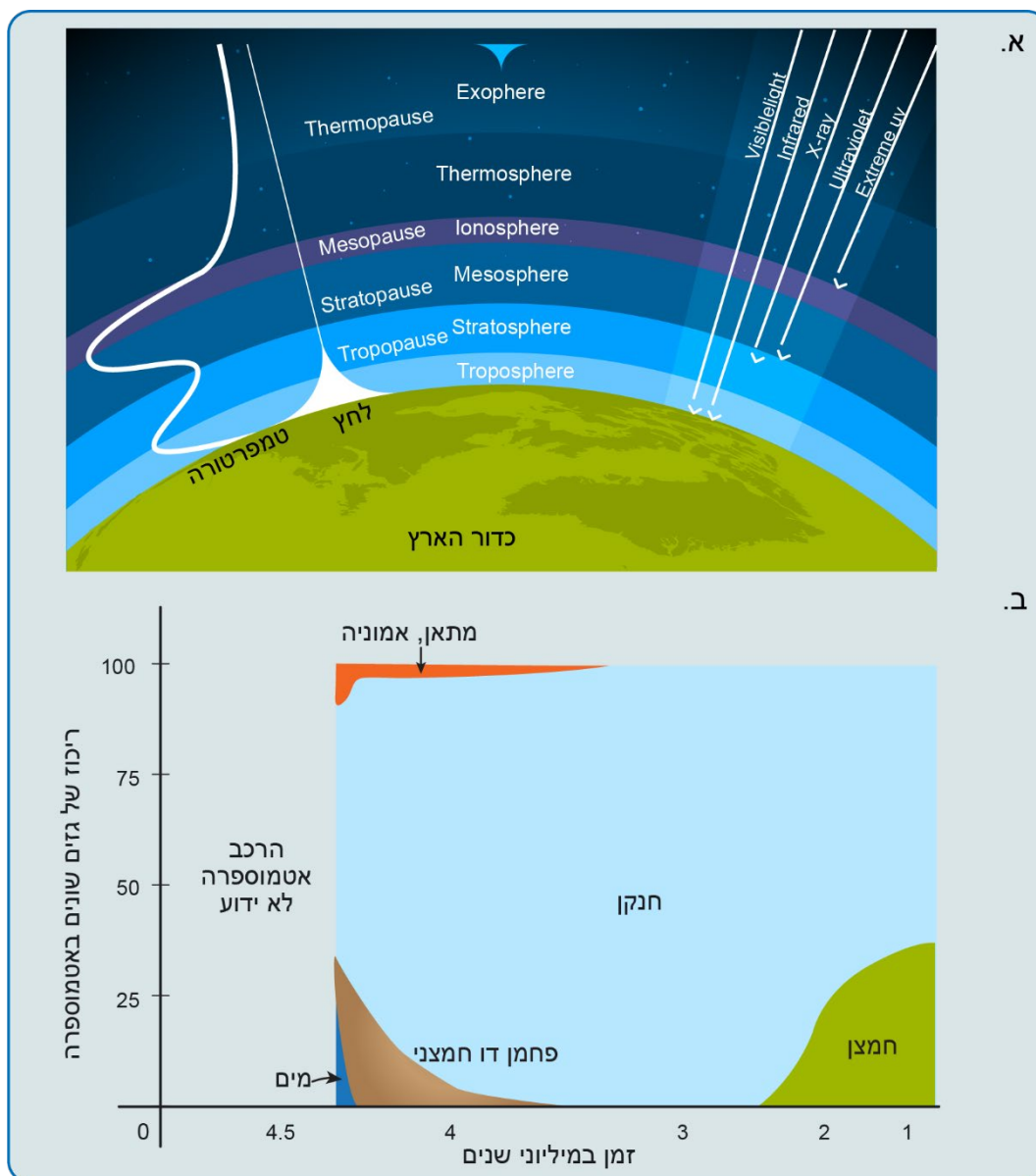


תמונה 1: מערכת האקלים בכדור הארץ. מערכת האקלים כוללת את מחזור המים, מחזור הפחמן, מחזור הסלעים ועוד. האנרגיה שמניעה את התהליכים בכדור הארץ מקורה מהשמש.

## 1.1 האטמוספירה והרכבה

אטמוספירה היא שכבת האוויר העוטפת את כדור הארץ, והיא מחולקת לאזורים שונים לפי שינויים בטמפרטורה, בלחץ ושינויים בהרכב הגזים. אך בדרך כלל חלוקת אזורי האטמוספירה תהיה על פי הגובה מהקרקע (תמונה 2 א'). השכבה הראשונה של האטמוספירה היא הטרופוספירה, אזור זה מוגדר עד לגובה של 20 קילומטרים מהקרקע ומכיל 80% מהמסה של האטמוספירה. השכבה הבאה המשתרעת על פני כ-30 קילומטרים היא הסטרטוספירה. שכבה זו חשובה מאד לקיום החיים על פני כדור הארץ שכן היא מכילה את גז האוזון (O<sub>3</sub>) המגן עלינו מהקרינה האולטרה סגולית של השמש. האוזון נוצר ע"י התרכבות מולקולת חמצן עם אטום חמצן. האוזון מתפרק במגע עם קרינת UV חזרה לאטום חמצן

ולמולקולת חמצן אך שיווי המשקל הכימי הוא לטובת יצירת אוזון. אוזון יכול להיווצר גם סמוך לקרקע מתהליכים תעשייתיים של זיהום. אוזון זה הוא מזיק לבריאות ופוגע בתוצרי גומי. על שאר שכבות האטמוספירה לא נפרט כאן.



**תמונה 2: א)** מבנה האטמוספירה של כדור הארץ. ככל שעולים בגובה, האטמוספירה נעשית דלילה יותר, והלחץ קטן. הטמפרטורה יורדת למעט מקומות בהם נוצר חום בגלל קרינת UV. הטרופוספירה היא אזור מזג האוויר, מכילה 80% מהמסה של האטמוספירה, משתרעת בין הגבולות 0-15 קילומטרים מפני כדור הארץ. **ב)** שינוי הרכב האטמוספירה בכדור הארץ לאורך השנים.

לאורך שנות קיומו של כדור הארץ ידעה האטמוספירה שינויים רבים בהרכבה (תמונה 2 ב'). האטמוספירה הראשונית הייתה עניה בחמצן, והכילה בעיקר  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ . עם התפתחותם של יצורים פוטוסינתטיים, ריכוז החמצן באטמוספירה הלך ועלה וריכוז הפחמן הדו-חמצני ירד. כיום המרכיב העיקרי

באטמוספירה הוא חנקן ( $N_2$  78%), חמצן ( $O_2$ , 21%), האחוז הנותר מכיל אדי מים, פחמן חד-חמצני (Co), פחמן דו-חמצני ( $CO_2$ ), נאון (Ne), ארגון (Ar), מתאן ( $CH_4$ ), אוזון ( $O_3$ ), וגזים אחרים (טבלה 1).

**טבלה 1:** הרכב האטמוספירה של כדור הארץ

מרכיב באטמוספירה	גז
78%	חנקן ( $N_2$ )
21%	חמצן ( $O_2$ )
0.9%	ארגון (Ar)
0.04%	פחמן דו-חמצני ( $CO_2$ )
0.06%	גזים אחרים

## 1.2 אפקט החממה והספקטרום האלקטרומגנטי

חלק מהגזים המרכיבים את האוויר נקראים גזי חממה. באופן טבעי, גזי חממה מונעים מהחום שנקלט מהמשמש מלברוח בחזרה לאטמוספירה. ללא גזים אלה, הטמפרטורה הממוצעת על פני כדור הארץ הייתה  $-18^{\circ}C$ , מצב שלא היה מאפשר חיים על פני כדור הארץ, זאת בהשוואה לממוצע הטמפרטורה כיום העומד על 15 מעלות צלזיוס. **אבל מה הופך גז להיות גז חממה?** קרינה תת-אדומה (infra-red), היא קרינה בטווח אורכי גל 700nm-1000nm, אותה אנו יכולים להרגיש כחום. מי שעמד מספר דקות בשמש, ליד מדורה או נורת להט, מכיר בוודאי את תחושת החום על גבי עורו. אצל בעלי חיים מסוימים התפתחו לאורך האבולוציה יכולות לזיהוי טרף על בסיס פליטת הקרינה התת-אדומה. וליכולת שלנו למדוד את הקרינה הזו יש גם שימושים אזרחיים וצבאיים.

כאשר קרינת השמש פוגעת בכדור הארץ חלק ממנה נבלע והחלק שמוחזר מהאדמה הוא קרינה תת-אדומה אותה אנו מרגישים כחום. האוויר אותו אנו נושמים מורכב בעיקר מחמצן וחנקן, שהן מולקולות יחסית "פשוטות", במובן הזה שכאשר הן נחשפות לקרינה תת-אדומה המולקולות רוטטות בצורה מאד מוגבלת שלא מאפשרת יצירה של חום. בהשוואה אליהן, ובתגובה עם אור השמש, מולקולות פחמן דו-חמצני יכולות להחזיר קרינה תת-אדומה אותה אנו מרגישים כחום. הסיבה לכך היא, שאטומי החמצן והפחמן יכולים להימצא במישורים שונים וכתוצאה מכך במגע עם האור נפלטת קרינה תת-אדומה. אותו הדבר נכון גם למולקולות המים שיש באוויר, גז המתאן, ועוד. מכאן שלגזי החממה יש תפקיד מכריע בשמירה על טמפרטורת כדור הארץ בטווחים מאפשרי חיים. הבעיה היא מה קורה כאשר ריכוזם באטמוספירה עולה מעבר לסף מסוים.



## 1.3 שיעורים ומשימות

### 1.3.1 שיעור 1: חוקרים שינויים בהרכב האטמוספירה של כדור הארץ.

#### מהלך השיעור

התלמידים מקבלים קובץ אקסל עם נתונים המכיל את שינוי הטמפרטורה בכדור הארץ, ושינוי בריכוז הפחמן הדו-חמצני בין השנים 1850-2019. כדי לנתח את הנתונים התלמידים מקבלים 3 שאלות מנחות ומתמודדים עם הכנת תרשימים, וניסוח מסקנות.

#### ידע קודם נדרש

התלמידים צריכים ידע מקדים בשימוש עם תכנת אקסל. אפשר למצוא מדריכים טובים ברשת לשם כך.

#### הנחיות לתלמיד

1. לפניכם קובץ נתונים שעובדו מהאתר "our world in data". התבוננו בנתונים וענו על השאלות הבאות:
2. האם יש מגמה של שינוי בריכוז הפחמן הדו-חמצני בין השנים 1850-2019?
3. האם יש מגמה של שינוי טמפרטורה ביחס לממוצע הטמפרטורה בין השנים 1960-1990?
4. האם קיים קשר בין שינוי ריכוז הפחמן הדו-חמצני לשינוי בטמפרטורה הממוצעת בין השנים 1960-1990?
5. כדי לענות על כל אחת מהשאלות הכינו תרשים מתאים. הקפידו לציין את הכותרת לתרשים, מקרא, צירים ויחידות מידה. מתחת לכל תרשים הוסיפו תיאור תרשים.
6. נסחו מסקנה אחת העולה מהתרשימים שהכנתם.
7. ארגנו את התרשימים שהכנתם בשקף אחד, הוסיפו את שמכם בראש השקף וצרפו את השקף ללוח הפדלט השיתופי.

## תוצאות למורה

### חלק ראשון - בוחרים את סוג התרשים.

כדי לענות על שאלות 1, 2 אנו מצפים מהתלמידים להכין גרף ובעזרתו לבדוק האם יש מגמה. סביר להניח שהתלמידים יתלבטו בין גרף קווי לגרף עמודות. אז מה נכון?

א. נקודת המוצא שלנו בבחירת הגרף היא **שגרף עמודות תמיד נכון**. גרף קווי נכון במקרים מסוימים. לשם כך עלינו להבחין בין סוגי המשתנים. משתנה יכול להיות:

1. **קטגוריאלי**: למשל ארץ, מספר בית (הוא משתני קטגורי מאחר ואין משמעות לבית מספר 38.5), צבע שיער, זווית ועוד.
2. **אורדינלי**: משתנה אורדינלי, דומה למשתנה קטגוריאלי למעט העובדה שניתן לסדר את הקטגוריות לפי סדר בעל משמעות. למשל עונה (קיץ, אביב, סתיו).

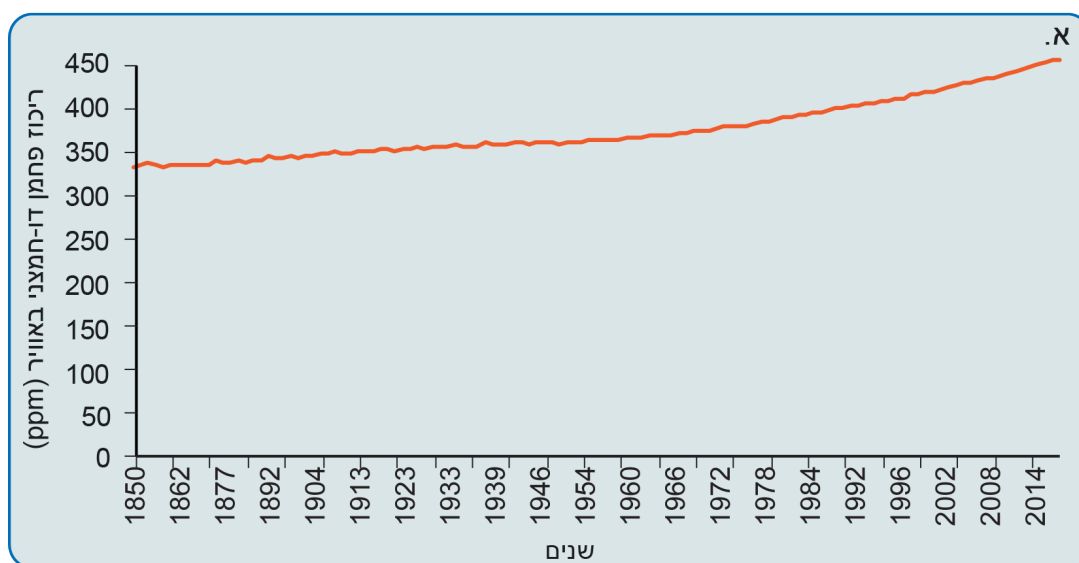
3. **מספרי:** דומה למשתנה אורדינלי, אבל המרווחים בין הערכים של המשתנה הם זהים. זהו משתנה רציף, שקל לזהותו לפי העובדה שיש משמעות לערכי הביניים שלו. למשל דרגת pH, צפיפות, הכנסה חודשית ועוד.

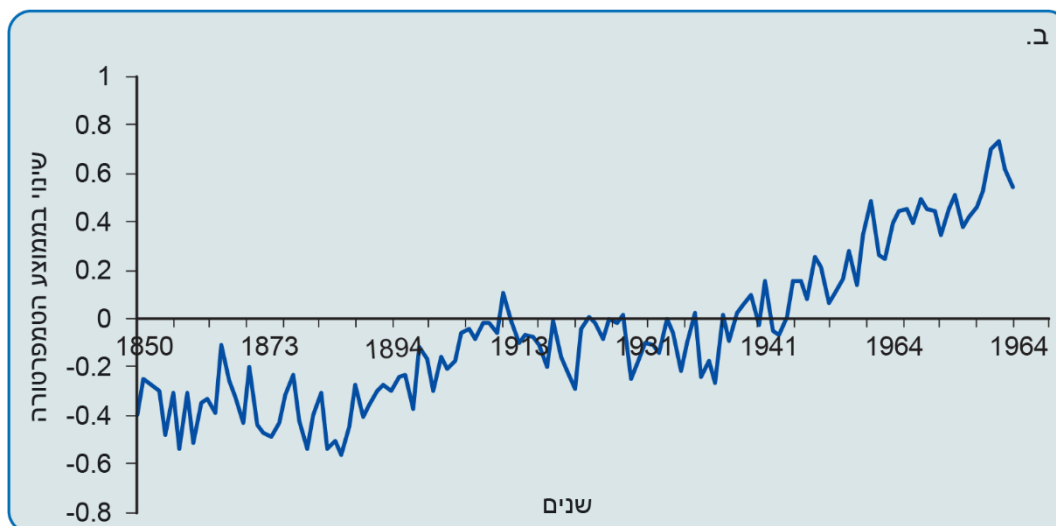
ב. אם כך, כאשר המשתנה שלנו **מספרי**, או **אורדינלי**, אנו יכולים להשתמש בגרף קווי. לדוגמה, אם אנחנו מודדים את נתוני לחץ הדם, של אותו אדם, כל שעה במשך יממה. במקרה הזה המשתנה "שעה" הוא משתנה אורדינלי, ואנו יכולים להשתמש בגרף קווי להצגת התוצאות. אותו הדבר יהי נכון גם עבור מדידות של ריכוזי הגז פחמן דו-חמצני באוויר בכל שנה. ניתן כמובן להתייחס ל "שנה" גם כאל משתנה קטגוריאלי.

ג. **שיקולים אחרים:** לפעמים השיקול בבחירת הגרף יהיה דווקא המסר אותו אני רוצה להעביר. אם למשל כמות נתונים, היא מועטה, נניח - ריכוז פחמן דו-חמצני באוויר בשנים 2000 ו-2001. במקרה זה אולי יהיה יתרון להציג את הנתונים בצורה של עמודות למרות שכבר אמרנו שמותר להשתמש בגרף קווי מאחר והמשתנה "שנה" הוא אורדינלי. באותו האופן, לפעמים הדגמת גודל השינוי ממוחשת בצורה טובה יותר בגרף עמודות, אך אם המגמה היא זאת שחשובה ואז גרף קווי יעביר את המסר בצורה טובה יותר.

**עבור השאלה הראשונה:** המשתנה "שנה" הוא משתנה אורדינלי, ולכן נבחר בגרף מסוג קו להצגת התוצאות (תמונה 3 א'). ניתן היה לבחור גם בגרף עמודות, אבל אנו סבורים שנראה את מגמת השינוי בצורה טובה יותר בגרף קווי.

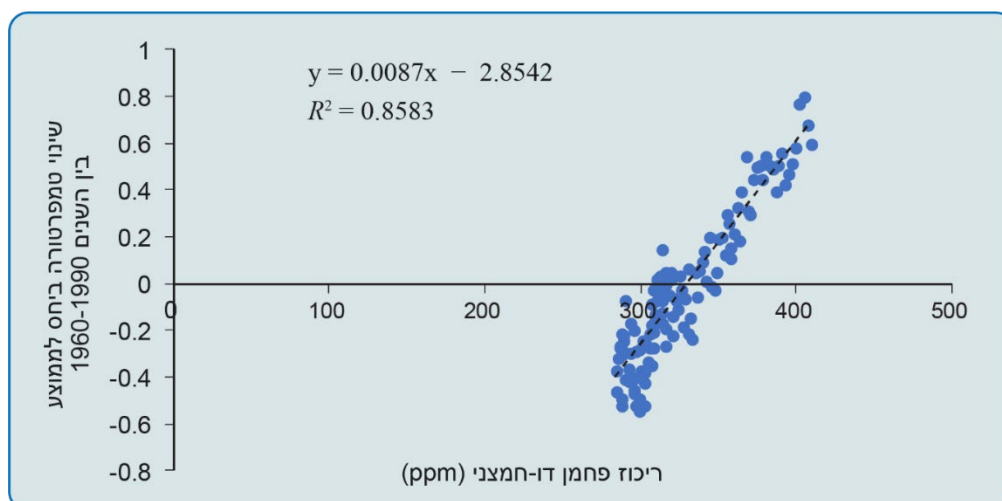
**עבור השאלה השנייה:** כמו בשאלה הקודמת, המשתנה "שנה" הוא אורדינלי. הנתונים המוצגים בגרף הם השינוי (כלומר ההפרש או דלתא) של הטמפרטורה הממוצעת העולמית בשנה מסוימת בהשוואה לממוצע הטמפרטורה בין השנים 1960-1990. אם לדוגמא, בשנת 1894, הטמפרטורה הממוצעת הייתה נמוכה ממוצע הטמפרטורה בין השנים 1960-1990 אז נקבל כמובן הפרש שלילי. גם כאן, נעדיף להשתמש **בגרף קווי** (תמונה 3 ב'). כדי לראות טוב יותר את השינוי בין כל שנה. אבל **ניתן** היה להציג את המגמה גם בתרשים עמודות.

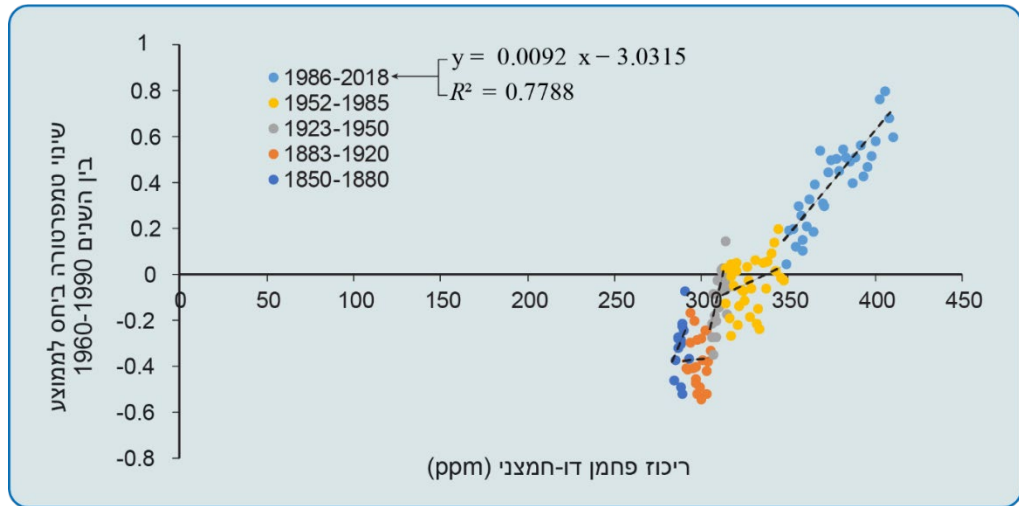




תמונה 3 א', ב': השינוי בריכוז פחמן דו-חמצני באוויר ובממוצע הטמפרטורה בין השנים 1850-2014. א). השינוי בריכוזי הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה. ב) השינוי בממוצע הטמפרטורה ביחס לממוצע הטמפרטורה בין 1960-1990.

**עבור השאלה השלישית:** כדי להציג קשר בין משתנים נרצה לבחור בגרף מסוג "פיזור XY", בגרף כזה לכל נקודה בגרף יש ערך X וערך Y מתאים. צריך לזכור שאנחנו לא יכולים לחבר את הנקודות בקו רציף, שכן מדובר במשתנים שונים. ניתן ורצוי להעביר קו מגמה ולהציג את ערך  $R^2$  בתרשים. ערך זה מלמד אותנו, כמה מהשונות מוסברת על ידי הנתונים. ככל שערך זה קרוב יותר לאחד הקשר הסטטיסטי חזק יותר (תמונה 4 א', ב).





**תמונה 4 א', ב':** הקשר בין ריכוז פחמן דו-חמצני באוויר לבין שינוי הטמפרטורה ביחס לממוצע הטמפרטורה העולמי בין השנים 1960-1990. **א)** כל הנתונים מוצגים כמקשה אחת. ניתן לראות מגמה כללית של מתאם גבוה בין רמת הפד"ח לשינוי בטמפ' ביחס לממוצע העולמי. **ב)** הנתונים מקובצים לאשכולות המייצגים תקופות שנים קרובות. ניתן לראות בדרך הזאת, שהשינוי הגדול ביותר מתייחס לשנים 1986-2018. בדרך ההצגה הראשונה אמנם אנו רואים מגמה, אבל אין דרך לדעת לאיזו שנה כל נקודה מתייחסת. בנוסף, כאשר בוחנים את ערכי  $R^2$  של כל אחד מקווי המגמה עבור קבוצות השנים השונות, באמת ניתן לראות שהקשר לא ניתן לאבחון לפני 1950.

### 1.3.2 שיעור 2: מדגימים את פעילות גזי החממה

(מבוסס על ניסוי של פרופ' ניר אוריון).

#### מהלך השיעור

מטרת הניסוי היא להדגים את אפקט החממה. בניסוי מתנסים התלמידים בהכנת תרשים, תיאור תוצאות והסקת מסקנות.

#### ידע קודם נדרש

היכרות עם גיליון אלקטרוני אקסל.

היכרות עם ניסוח תהליכים כימיים, והמושגים מגיבים ותוצרים.

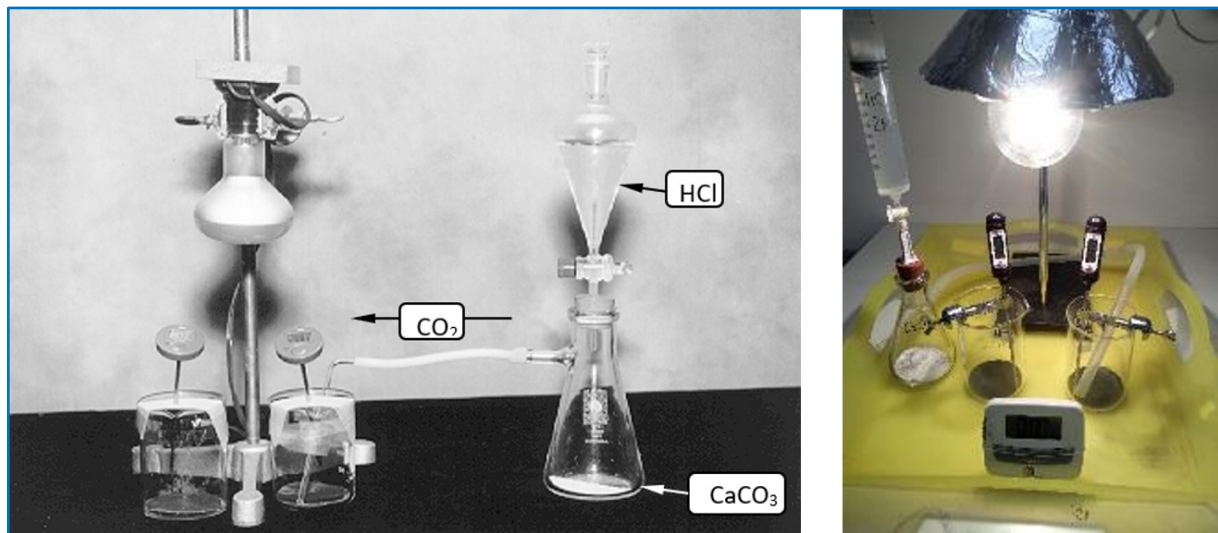
#### ציוד נדרש

- ארלנמייר עם  $\text{CaCO}_3$ .
- משפך מפריד עם חומצה מלחית (HCL) בריכוז.
- שתי כוסות כימיות בנפח 150 מ"ל שבתחתית כל אחת מהן בריסטול שחור.
- שני מדחומים.
- פארפילם לאיטום הכוסות הכימיות.
- נורה כמקור חום.
- צינורית לחיבור בין הארלנמייר לאחת מהכוסות הכימיות.

## משימה ראשונה

בשנים האחרונות גובר החשש מפני השינויים העלולים להתרחש כתוצאה מהתחממות האטמוספירה של כדור הארץ. לדעת רוב המדענים עלייה בטמפרטורה תגרום לשינוי אקלימי עולמי אשר יגרום בין היתר להמסת קרחונים, לעליית מפלס פני הים ולהצפת אזורים נרחבים לאורך החופים. במהלך שנות התשעים של המאה ה-20 נמדדה באזורים רבים בכדור הארץ טמפרטורה גבוהה מהמוצע. חוקרים רבים טוענים שאפשר לראות בכך סימן לבאות והוכחה ששינוי אקלימי אכן מתרחש. לטענתם בעתיד הטמפרטורות ימשיכו לעלות ואירועים קיצוניים כגון הצפות, סופות ושנות בצורת, יתרחשו בתדירות גבוהה יותר ובעוצמה חזקה יותר.

1. לפי מה שידוע לכם אילו גורמים עלולים להשפיע על הטמפרטורה בפני כדור הארץ?
2. התבוננו במערכת הניסוי (תמונה 5). הניסוי כולל שתי כוסות כימיות זהות בנפחן (כוס ניסוי וכוס בקרה), בתחתית כל אחת מהכוסות מונחת דסקית שחורה. שתי הכוסות מוארות מלמעלה במנורה הממוקמת במרחק שווה מכל אחת מהן. בשתי הכוסות מונח מד טמפרטורה המודד את טמפרטורת האוויר שבכוס.
  - א. ברגע הדלקת הנורה, מדי הטמפרטורה מראים טמפרטורה זהה בשתי הכוסות. הציעו מספר גורמים, שאם תשנו אותם, תשנו את הטמפרטורה באחת הכוסות.
  - ב. נסו למצוא התאמה בין הגורמים שהצעתם לבין גורמים טבעיים המשפיעים על הטמפרטורה של כדור הארץ.
  - ג. מה תפקיד כוס הבקרה בניסוי?

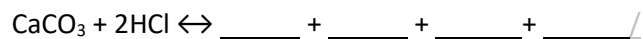


כלי יש מד טמפרטורה. הפחמן דו-חמצני שנוצר מוזרם רק לאחד מהכלים. בכל

( $\text{CaCO}_3$ ),

## משימה שנייה – ניסוי.

1. כדי לבחון את השפעת תוספת פחמן דו-חמצני על עליית הטמפרטורה, נרצה להעלות את ריכוז הפחמן הדו-חמצני באחד הכלים. לשם כך הכינו את מערכת הניסוי כפי שמתואר באיור 5 ב'.



תהליך זה הוא תהליך המסת קלציט בחומצה מלחית.

2. בעת פתיחת המשפך המפריד תתערבב החומצה המלחית עם הקלציט ( $\text{CaCO}_3$ ), ותרחש תגובת ההמסה הבאה:

3. השלימו את התהליך הכימי המתאר את תגובת ההמסה בין הקלציט לחומצה המלחית.

4. האם לדעתכם תוספת פחמן דו-חמצני לכוס הניסוי תשפיע על הטמפרטורה? אם כן, האם טמפרטורת כוס הניסוי תהיה גבוהה יותר מכוס הבקרה, נמוכה ממנה או זהה לה? הסבירו.

5. המיסו קלציט ( $\text{CaCO}_3$ ) בחומצה מלחית ( $\text{HCl}$ ), על ידי פתיחת המשפך המפריד, כדי להפיק את הפחמן הדו-חמצני והזרימו אותו לכוס הניסוי (תמונה 5 ב').

6. עקבו אחר שינוי הטמפרטורה בשני הכלים, כל דקה למשך 20 דקות.

7. ארגנו את תוצאות הניסוי בטבלה הבאה.

8. תנו כותרת לטבלה

טבלה :

הפרש טמפרטורה		הטמפרטורה הנמדדת				תיאור השינוי שנעשה
		כוס ביקורת		כוס ניסוי		
כוס ביקורת	כוס ניסוי	אחרי	לפני	אחרי	לפני	הזרמת פחמן דו-חמצני אל כוס הניסוי

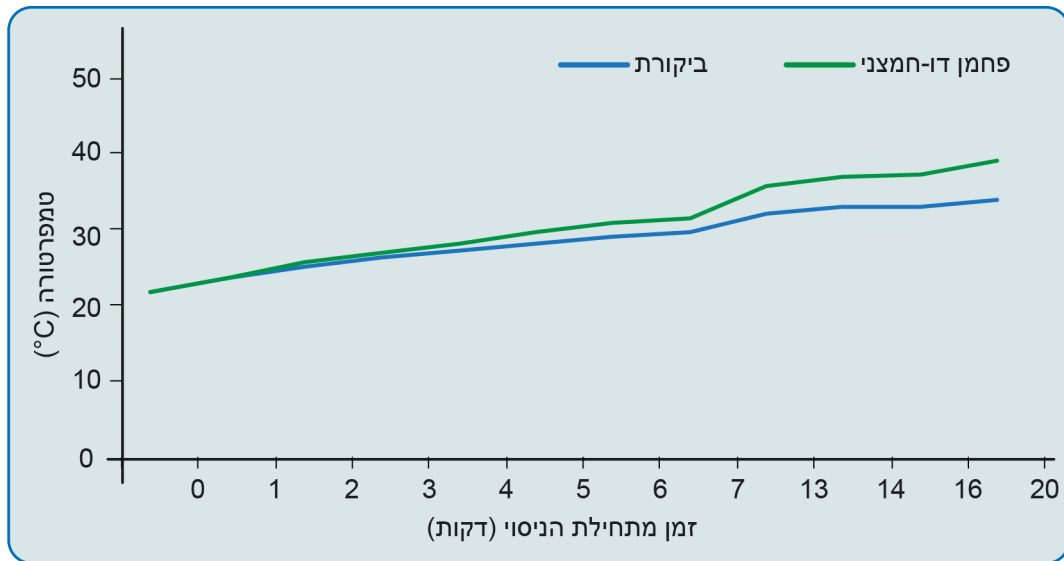
9. ארגנו את התוצאות בתרשים ותארו את התוצאות.

10. נסחו מסקנה אחת שעולה מהניסויים שבצעתם במהלך ההתנסות.

### שיעור 2: תוצאות למורה

- אפשר לראות שקיימת השפעה קטנה של תוספת פחמן דו-חמצני על הטמפרטורה (תמונה 6). עם התלמידים אפשר לדון בכך. האם שינוי כה קטן בטמפרטורה הוא באמת משמעותי? למה מתכוונים שמציינים טמפרטורה עולמית ממוצעת?

- אפשר למצוא הקבלה בין השפעת מרחק הכוס הכימית מהמנורה על הטמפרטורה בכוס לבין השפעת מרחק כדור הארץ מהשמש על טמפרטורת כדור הארץ.



תמונה 6: השפעת תוספת פחמן דו-חמצני על עליית הטמפרטורה בכלי.

- אפשר להסיק שטמפרטורת האטמוספירה של כדור הארץ מושפעת מגורמים רבים. שינוי בכל אחד מהגורמים עלול לגרום לשינויי בטמפרטורה

### 1.3.3 שיעור 3 : האי השוקע

#### מהלך השיעור

בפעילות זו, משתמשים בנתונים על מנת לחזות את עליית גובה פני הים, דנים בגורם אי הוודאות, ומחליטים האם המדינות המזדהמות ביותר צריכות לשלם פיצויים לתושבי האיים שבסכנת הצפה, או לקלוט אותם לאחר שמקום מגוריהם יוצפו. בשיעור זה יבואו לידי ביטוי מיומנויות קריאת גרף, ניבוי מבוסס נתונים וקבלת החלטות. שיעור זה מתאים גם כפעילות הוראה מרחוק.

#### הכנות נדרשות

צרו באפליקציית המנטימטר שאלה עבור תלמידכם – מה הייתם מרגישים אילו הייתם גרים בקריבטי? בחרו בתצוגת ענן מילים. לאחר מכן הציגו את התוצאות במליאה.

1. צפו בסרטונים המוצגים בקישורים מטה (על פי הסדר).

[The Paris Climate Deal May Be Too Little, Too Late for the Islanders of Kiribati](#)

[Kiribati Land Purchase in Fiji](#)

2. ענו על השאלה הבאה באתר המנטימטר: מה הייתם מרגישים אילו

הייתם גרים בקריבטי?

פתיח

(10 דק') הצגת הנושא

1. דונו בסיבות לעליית גובה פני הים.
2. היעזרו בגרף "תחזית עליית גובה פני הים" המובא מטה, ובנתונים נוספים על פי ראות עיניכם וכתבו תחזית – מתי לדעתכם יוצף האי קריבטי?
3. דונו בשאלה - באיזה שלב תמליצו לאנשים לנטוש את קריבטי? כשהים יכסה את רוב האדמה? כשהיה מחסור במי שתייה בגלל שמי התהום יזדהמו ממי הים? כשהאיים לגמרי ישקעו? האם תוכלו להצביע בתחזית שכתבתם מעלה על השלב בו אתם ממליצים לנטוש את האי?

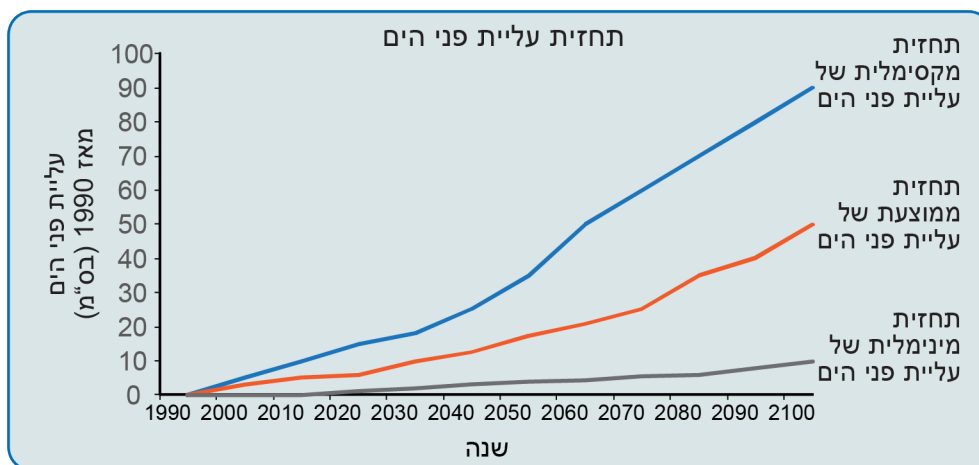
**(15 דק') עריכת תחזיות לגבי עליית גובה פני הים בקריבטי**

דונו בשאלה: האם המדינות המובילות בפליטות פחמן דו-חמצני וגזי חממה אחרים (למשל ארה"ב, סין והמדינות האירופאיות) צריכות לקנות שטחים לתושבי איים שבסכנת הצפה? התבוננו בתרשימים המובאים [בקישור זה](#) על מנת להדגיש את ממדי אי השוויון בפליטות הפד"ח. נמקו עמדתכם

**דיון ערכי (15 דקות)**

**מידע למורה**

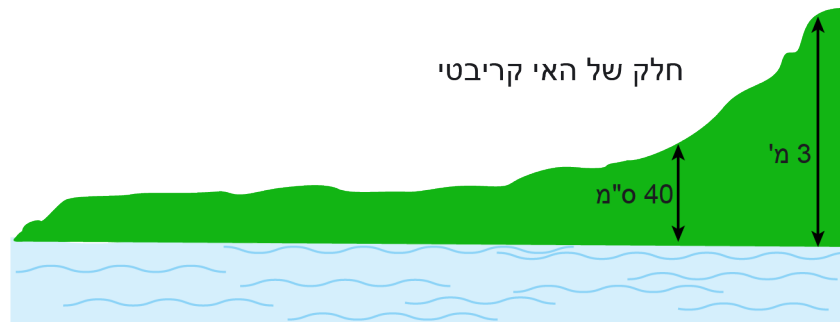
1. גרף תחזית עליית פני הים שיש לתת לתלמידים בתחילת משימת הליבה. דפי עבודה מובנים בנושא זה קיימים [בקישור לאוגדן פעילויות עומ"ר](#)



גרף תחזית עליית גובה פני הים.

2. תרשים של האי קריבטי. על רוב האיים, הנקודה הגבוהה ביותר היא פחות מ-3 מטרים מעל פני הים. אלפי אנשים חיים בשטח שנמצא 40 ס"מ או פחות מעל פני הים.





חתך צד של האי קריבטי המתאר את המבנה הטופוגרפי של האי.

3. בדיון על גובה פני הים והצגת המלצות התלמידים העלו את נושא אי הוודאות בהערכות.

#### אי-ודאות

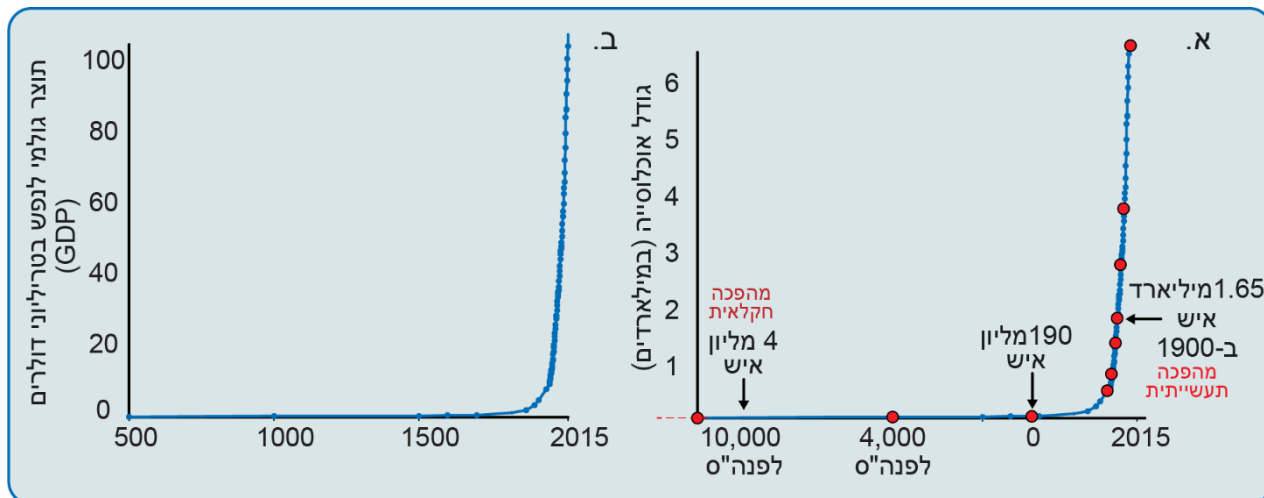
מדענים משתמשים במודלים ממוחשבים על מנת לחזות את עליית פני הים בעתיד. מאחר והמדענים לא יכולים לדעת את ערכי כל המשתנים המשפיעים על תופעה אקלימית, כמו ריכוז דו תחמוצת הפחמן, הטמפרטורה הממוצעת, כמות המשקעים ועוד, הם קובעים ערכי מקסימום ומינימום צפויים למשתנים האלו, על פי הנחות מחקר שונות. הערכים השונים לכל משתנה נותנים טווח של תחזיות לעליית פני הים. למשל בשנת 2040 גובה פני הים יעלה בין 4 ל-24 ס"מ. הערך של טווח התחזיות הזה נכתב כאי-ודאות: תחזית עליית גובה פני הים ב 2040 = (14 ס"מ, ±10 ס"מ).

## פרק 2: אוכלוסייה זה כל הסיפור

### 2.1 התפתחות האוכלוסייה בכדור הארץ

בראשית, היה האדם צייד לקט, ולאורך תקופה ארוכה גודל האוכלוסייה בכדור הארץ עמד על בערך 4 מיליון אנשים (תמונה 7 א'). התפתחות החקלאות, בהתחלה כאמצעי לאספקת מזון ובהמשך כמקור להכנסה למשפחה החליפה את אורח החיים הנוודי. כתוצאה מכך, חוותה האנושות שינויים תרבותיים גדולים ביותר. ביות צמחים ובעלי חיים היה הסימן הראשון של מה שאנו קוראים לו כיום בשם חקלאות. והמאמצים לשיפור יבולים וגידול בעלי חיים היה כבר מתועד בכתבים עתיקים של מסופוטמיה, מצרים, אפריקה וסין. מקובל להתייחס לשינויים אלה בשם "המהפכה מחקלאית", אך למעשה לא מדובר על מהפכה אחת, אלא על הרבה מהפכות חקלאיות קטנות שהתרחשו בזמנית באזורים שונים בעולם. מאז, המהפכה החקלאית שמתוארכת ל 10,000 שנה לפני הספירה, הובילה לעלייה הדרגתית אך איטית באוכלוסיית כדור הארץ, כך שבאמצע המאה ה-19, אוכלוסיית העולם מנתה כמיליארד וחצי בני אדם בלבד. היום, כמאה שנים אחרי, אוכלוסיית העולם מונה כבר מעל 7 מיליארד בני אדם והצפי הוא שעד 2050 יחיו בכדור הארץ כמעט 10 מיליארד אנשים (תמונה 7 א'). לצד הגידול באוכלוסייה, נראה שגם

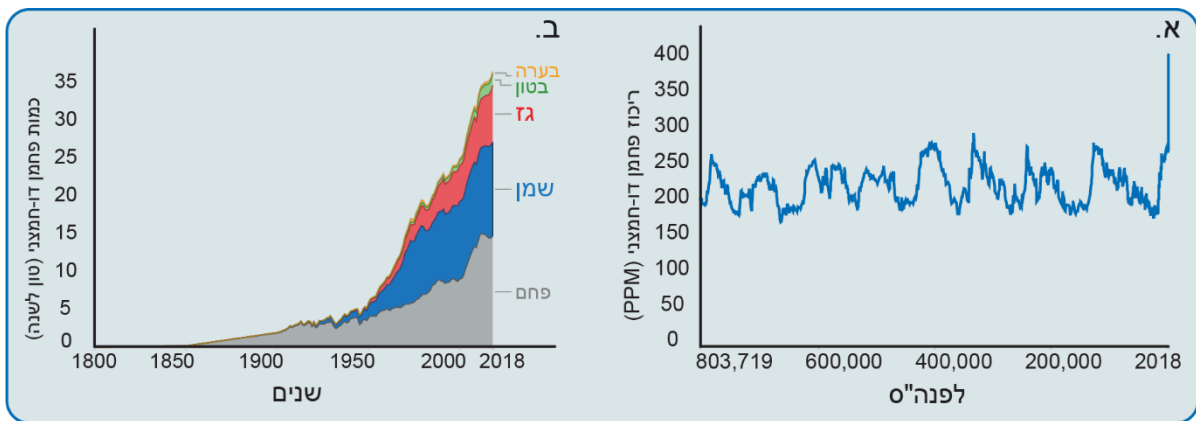
השפעת האדם על כדור הארץ מתרחבת. הצריכה האנושית הממוצעת למשל, עולה פי 10 בין השנים 1950-2016, בעוד שהגידול באוכלוסייה עלה רק פי 4. מכאן שלא רק שהאוכלוסייה גדלה היא גם צורכת יותר (תמונה 7ב').



**תמונה 7 א-ב:** א) שינוי בגודל האוכלוסייה בכדור הארץ ב – 12,000 השנים האחרונות. ב) שינוי בערך GDP (Gross Domestic Product) העולמי. המדד מייצג את הערך הכלכלי של הסחורות והשירותים באזור מסוים. למעשה מתאר המדד את עוצמת הצריכה של שירותים. ככל שהערך גבוהה יותר המשמעות היא צריכה יותר גדולה וצמיחה כלכלית.

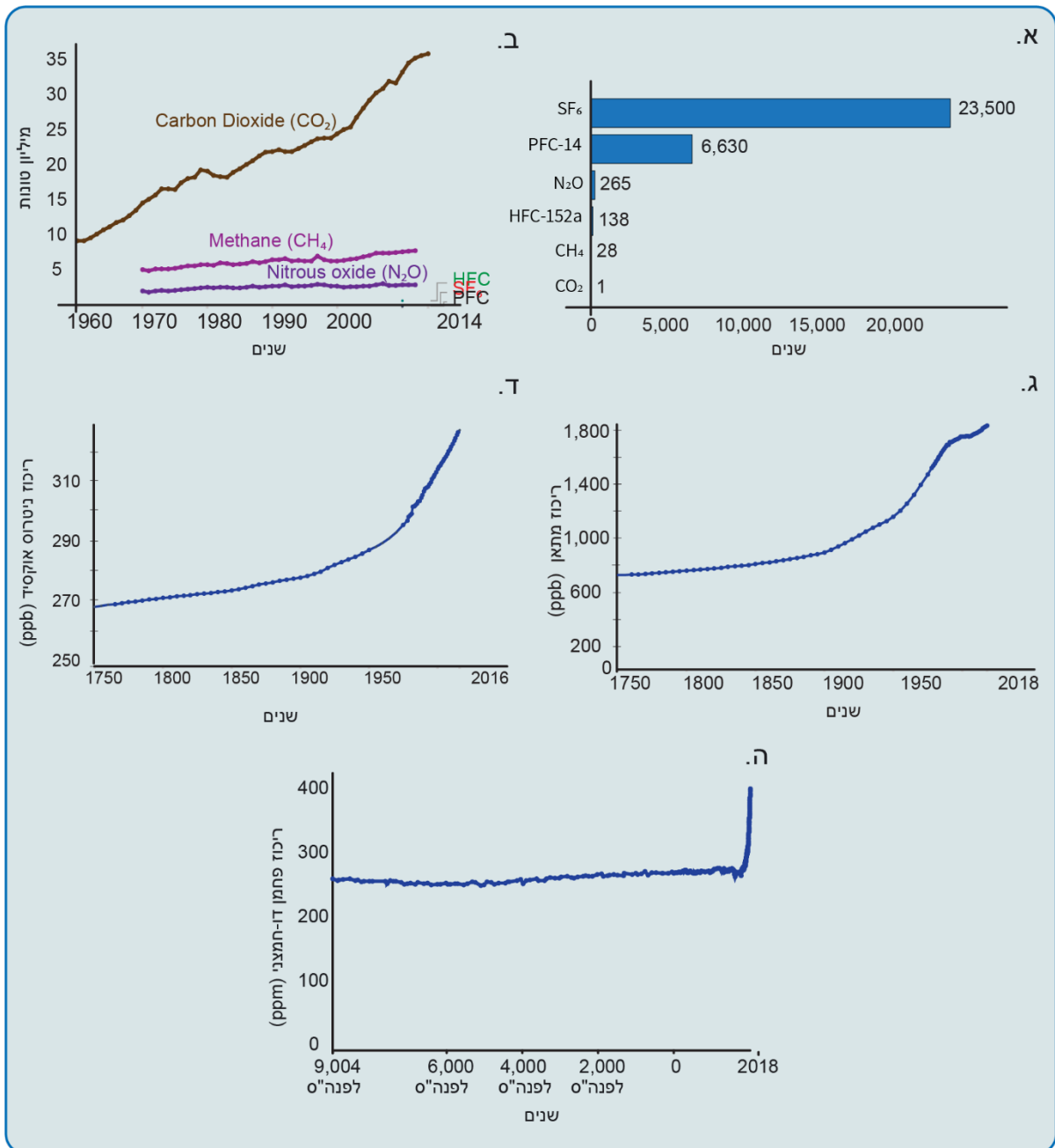
## 2.2 שינוי בהרגלי צריכת דלקי מאובנים

במקביל לעליה בכמות האוכלוסייה, ובמיוחד מאז המהפכה התעשייתית באמצע המאה התשע עשרה, ניתן לראות עליה דרמטית בצריכת דלקי מאובנים (נפט, גז טבעי, פחם). מרבצים אלו נשרפו בקצב הולך ועולה כדי לספק אנרגיה לתעשיות ולבתים, ולעמוד בדרישות האוכלוסייה למוצרים ותשתיות. דבר זה הוביל לעלייה ניכרת בריכוזי הפחמן הדו-חמצני האטמוספרי (Churkina et al., 2020). ובאמת, כשבוחנים את השינויים בריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה לאורך תקופה של מעל 800 אלף שנה, ניתן לראות בבירור כי בעת הנוכחית ניכרת עליה בריכוזו באטמוספירה, הרבה מעבר למה שהיה באלפי השנים שקדמו לכך (תמונה 8 א'). עליה זו בריכוז הפחמן הדו חמצני באטמוספירה נמצאת בקנה אחד עם העלייה בשריפת דלקי מאובנים העולמית בין השנים 1751-2017, (תמונה 8 ב'). מכאן, שניתן למצוא קשר בין עליה בריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה לבין הפעילות האנושית.



**תמונה 8 א', ב':** (א) ריכוז פחמן דו-חמצני ( $\text{CO}_2$ ) באטמוספירה בשנים 803,719 לפנה"ס – 2018. (ב) פליטת פחמן דו-חמצני לי סוג שריפת דלק בשנים 1751-2017. (א) ריכוז ממוצע של פחמן דו-חמצני נדד בחלקיקים למיליון (ppm). ריכוזי פחמן דו-חמצני בתקופות קדומות נמדדות מדוגמאות אוויר שהשתמרו בקרח. (ב) כמות הפחמן הדו-חמצני הנפלטת נמדדה בטונות לשנה. מקור: CDIAC; Global Carbon Project (GCP); EPICA Dome C,  $\text{CO}_2$  record (2015) & NOAA (2018).

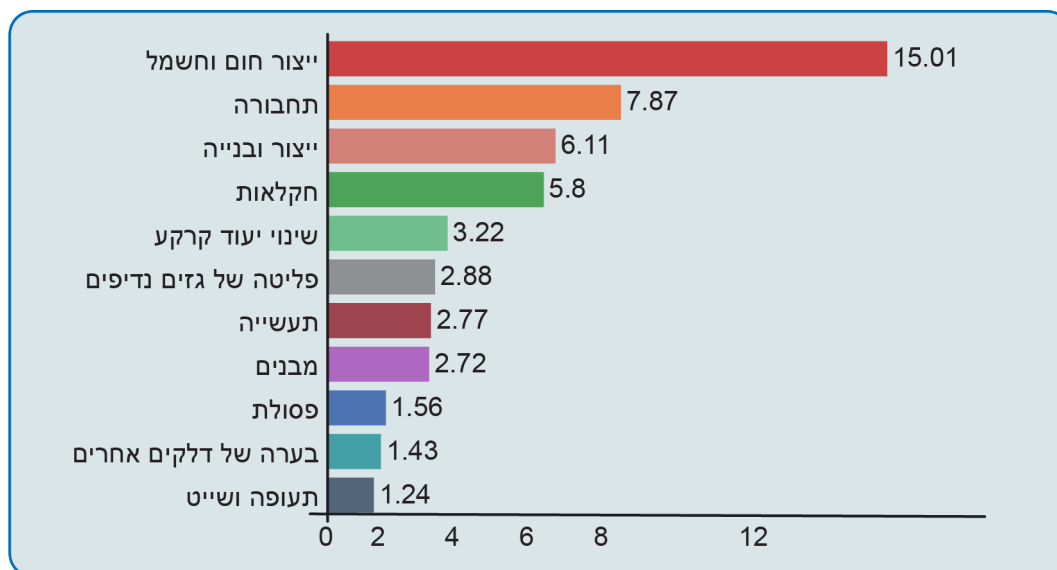
לצד עליה בפליטה של פחמן דו-חמצני, חלה עליה משמעותית בפליטה של גזי חממה נוספים. אלה כוללים את גז המתאן, ניטרוסאוקסיד והגזים  $\text{SF}_6$ ,  $\text{HFC-152a}$ , ו-  $\text{PFC-14}$ , (שנקראים בקיצור גזי F, מאחר שהם מכילים את אטום הפלואור F) (תמונה 9 ב'). ובהתאם עולה ריכוזם של גזים אלה גם באטמוספירה (תמונה 9 ג'-ה'). למרות ההבדלים הגדולים בכמויות הפליטה של הגזים השונים, צריך לשים לב לנתון נוסף, והוא מידת המסוכנות של הגזים כגזי חממה. ובאמת כאשר בוחנים את מידת המסוכנות של גזים אלה בהשוואה לפחמן דו-חמצני עולה תמונה מעניינת. גז מתאן מסוכן פי 28 מפחמן דו-חמצני, וגז הניטרוסאוקסיד מסוכן פי 265 (תמונה 9 א'). כלומר, למרות הכמות הקטנה, יחסית, של פליטת ניטרוסאוקסיד לאטמוספירה, המסוכנות שלו כה גדולה, שלצמצום הפליטה שלו תהיה תרומה משמעותית על אפקט החממה. אם נכפיל את מסוכנות הגז, בכמות הגז הנפלטת, נקבל מדד נוסף שנקרא  $\text{CO}_2$  equivalent,  $\text{CO}_2$  e). מדד זה מתאר את כמות הפחמן הדו-חמצני, שהייתה מחממת את כדור הארץ באותו האופן כמו הגז המדובר. למשל, בשנת 2012 ערך  $\text{CO}_2$  e של מתאן היה 140 טון. מכאן, שבהשוואה לפחמן דו-חמצני, גם גזים שנפליטים בכמויות נמוכות מאד כמו ניטרוסאוקסיד וגזי F, השפעתם על אפקט החממה היא מאד גדולה. נשאלת השאלה אם כך, מדוע עיקר המאמץ המדעי והתקשורתי עוסק בצמצום פליטת פחמן דו-חמצני ולא בשאר גזי החממה? על שאלה זו ננסה לענות בהמשך האוגדן.



**תמונה 9: א)** פוטנציאל התחממות גלובלית של גזי חממה בטווח של 100 שנה לפי מדד  $GWP_{100}$ . מדד  $GWP_{100}$  משווה את התרומה היחסית של יחידת מסה של גז חממה לזו של פחמן דו-חמצני. ערך  $GWP$  של 28 עבור מתאן אומר שטון אחד של גז מתאן משפיע פי 28 מטון אחד של פחמן דו-חמצני בטווח של 100 שנים. [מקור הנתונים](#). **ב)** פליטת גזי חממה עולמית, 1970-2012. כמות פליטת גזי החממה העולמית נמדדת לפי ההשפעה היחסית שלהם בהשוואה לפחמן דו-חמצני. [מקור הנתונים](#). ג-ה) ריכוז מתאן, ניטרוס אוקסיד ופחמן דו-חמצני באטמוספירה בהתאמה.

נקודה נוספת שיש לתת עליה את הדעת היא מהו המקור העיקרי לפליטת הגזים המזהמים. באופן כללי ניתן לומר שמרבית פליטת גזי החממה המרכזיים מקורה בצריכת חשמל ואנרגיה, ובמידה נמוכה יותר שימושי תחבורה וחקלאות. (תמונה 10). אבל כאשר בוחנים את מקור הפליטה העיקרי של כל אחד מהגזים בנפרד, נראה שהרוב הכמעט מוחלט של פליטת הניטרוסאוקסיד ורוב המתאן הנפלט

לאטמוספירה מקורו בחקלאות. לעומת זאת, פליטת רוב הפחמן דו-חמצני לאטמוספירה מקורה בעיקר משימושי אנרגיה ותחבורה. למידע הזה יש ערך רב עבור קובעי מדיניות בבואם לתכנן אסטרטגיות לצמצום פליטת גזי חממה.



תמונה 10: התפלגות פליטת גזי חממה לפי סקטור.

## 2.3 ניתוח מחקר מדעי

### חברת החיידקים בכרס משפיע על פליטת המתאן

מבוסס על המאמר:

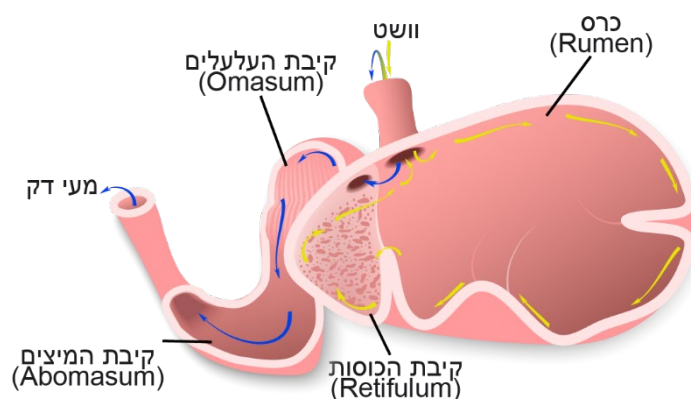
Kamke, J. *et al.* Rumen metagenome and metatranscriptome analyses of low methane yield sheep reveals a *Sharpea*-enriched microbiome characterised by lactic acid formation and utilisation. *Microbiome* 4, 1–16 (2016).

מתוך סך המתאן שנפלט לאטמוספירה ממקורות חקלאיים נמצא ששליש ממנו מקורו באופן ספציפי מבעלי חיים מעלי גירה (צאן ובקר). במעלי גירה, המזון יורד מן הושט אל שק היושב מעל לקיבה וקרני כרס. לשק זה צמוד כיס שדומה לחלת דבש (רטיקולום). בכרס מתרחש עיכול ראשוני פיזי ופירוק מיקרוביאלי. לאחר מכן מתרחשת העלאת הגירה וירידה של המזון לקיבת ה Omasum. משם המזון יורד לקיבה האמיתית הקרויה Abomasum. שם מתרחש עיכול הדומה לזה שביונקים אחרים (תמונה 11).

התכונה של פליטת מתאן, היא תכונה גנטית והיא מושפעת ממשך הזמן שעובר המזון בכרס (rumen), ומגודל הכרס. לכן הועלתה ההשערה שניתן יהיה ליצור על ידי הכלאות, קווים גנטיים של בקר וצאן, בעלי פנוטיפ של פליטת מתאן נמוכה. פליטת המתאן במעלי גירה, מקורה בפעילות מיקרוביאלית המתרחשת בכרס וברטיקולום (שמתפקדים מבחינה פונקציונלית כאיבר אחד). כדי לבדוק את ההשערה הזו נבדקה חברת החיידקים בכבשים המפרישות מעט או הרבה מתאן (Kamke et al., 2016). בין שני סוגי הכבשים נמצאו הבדלים בהרכב חברת החיידקים ובביטוי שונה של גנים האחראים על תסיסת סוכרים. אצל כבשים

המפרישות מעט מתאן נמצא עושר של חיידקי *Sharpea spp* בעוד שאצל כבשים המפרישות הרבה מתאן נמצאו חיידקים מהסוגים *Lachnospiraceae* ו *Ruminococcaceae*. כתוצאה מהבדלים אלו, כבשים המפרישות מעט מתאן ביצעו תסיסה מהירה של סוכרים ללקטאט ובוטיראט. בעוד שכבשים שהפרישו הרבה מתאן ייצרו אצטט ובוטיראט. בחישוב יבש נראה שכבשים המפרישות מעט מתאן מייצרות 24% פחות מתאן מכבשים המפרישות הרבה מתאן. אולם, סביר להניח שמאחר וקיימים מסלולי תסיסה נוספים, הבדל זה במציאות הוא קטן יותר. למרות זאת תוצאות המחקר תומכות בהשערה שהתכונה הפרשת מתאן היא תכונה גנטית שיכולה לעבור סלקציה. מידע זה יכול לשמש חקלאים ומגדלים, לבחירת קווים גנטיים המפרשים מעט מתאן, לטובת צמצום פליטתו לאטמוספירה.

### מערכת הקיבות במעלי גירה



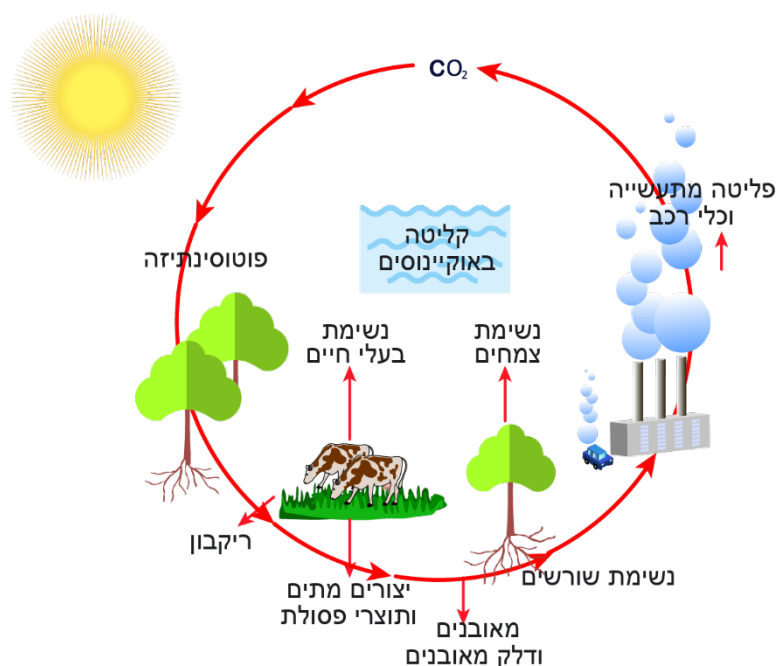
תמונה 11: מבנה הקיבה של מעלה גירה.

## פרק 3: מחזורים ביוגיאוכימיים

מערכות אקולוגיות יבשתיות מהוות מבלע חשוב לגזי חממה כמו פחמן דו-חמצני, מתאן ( $\text{CH}_4$ ), וניטרוסאוקסיד ( $\text{N}_2\text{O}$ ). אלה מקובעים בצמחים, ובעלי חיים על ידי מחזורים ביוגיאוכימיים. מחזורים ביוגיאוכימיים מתארים מעברים של חומר מהאטמוספירה - ליצורים חיים - אל הקרקע ובחזרה לאטמוספירה. ולכן מהווים חלק מרכזי במערכת האקלים של כדור הארץ. מחזורים ביוגיאוכימיים קובעים, בין השאר, את הריכוז האטמוספרי של מספר גזי חממה כמו פחמן דו-חמצני, מתאן וניטרוסאוקסיד.

### 3.1 מחזור הפחמן

היסוד פחמן מהווה מרכיב מרכזי במולקולות ביולוגיות רבות וככזה הוא גם היסוד הנפוץ ביותר ביצורים חיים. פחמן דו חמצני ( $\text{CO}_2$ ), מוטמע בתהליך הפוטוסינתזה על ידי יצורים אוטוטרופיים ונפלט בחזרה לאטמוספירה בתהליכי הנשימה התאית של יצורים אוטוטרופיים והטרורופיים. בקרקע, פחמן דו-חמצני נאגר בצורה של דלק מאובנים או בשכבות קרקע קפואות (permafrost), שם מוצאים לפחות פי 5 פחמן מאשר באטמוספירה. כתוצאה מהמשך תהליך ההתחממות, מערכים כי 25% משכבת הפרמפרוסט תפשיר עד שנת 2100, דבר שישחרר כמות גדולה של חומר אורגני ומתאן לאטמוספירה (Anisimov, 2007). (בחלק מתהליכי פירוק של החומר האורגני אלו נפליטים גזי חממה כמו פד"ח או מתאן). חלק גדול מעודפי הפחמן הדו-חמצני הנפליטים לאטמוספירה נקלטים בהמשך באוקיינוסים. מכאן שתרכובות פחמן ממוחזרות בין הקרקע, האטמוספירה, האוקיינוסים ובין היצורים החיים שחיים שם. ביחד מרכיבים אלו מהווים את מחזור הפחמן העולמי (תמונה 12). היצורים החיים בביוספרה, מהעצים הגדולים ביותר ועד לחיידקים הקטנים ביותר, לכולם תפקיד מרכזי במחזור תרכובות פחמן לצורות חדשות. את מחזור הפחמן ניתן לחלק לשניים. מחזור הפחמן המתרחש בגיאוספרה וזה המתרחש בביוספרה. המחזור הגיאוספרי פועל לאורך מיליוני שנים ובקצב מאד איטי. תהליכים כמו, יצירת סלעי משקע, תנועות טקטוניות, והתפרצויות געשיות הם התהליכים הגיאוספריים המרכזיים. לעומתם, התהליכים בביוספירה פועלים בטווחי זמן של שניות ועד מאות שנים. תהליכים אלה כוללים את הפוטוסינתזה, נשימה תאית ובעירה. תהליכי נשימה תאית של צמחים ובעלי חיים, מחזירים פחמן דו-חמצני לאטמוספירה. פירוק בעזרת חיידקים ופטירות של חומר אורגני מת, מעשיר את הקרקע במולקולות אורגניות. במהלך עידן הפחם למשל, צמחים ענקיים דמויי שרך גדלו בביצות עצומות הפרושות על פני כדור הארץ. החומר הצמחי המת של צמחים אלו הצטבר על רצפת היער אם מכיוון שטרם התפתחו המיקרואורגניזמים שיכלו לפרק חומרים אורגניים אלה, או שפשוט תנאי אקלים ותזוזות טקטוניות קברו את העץ המת ומנעו את פירוקו. במשך מיליוני שנים, שבאו אחר כך, לחץ וטמפרטורות גבוהות הפכו את החומר האורגני המת למרבצי דלק מאובנים (נפט, גז טבעי, פצלי שמן, פחם).

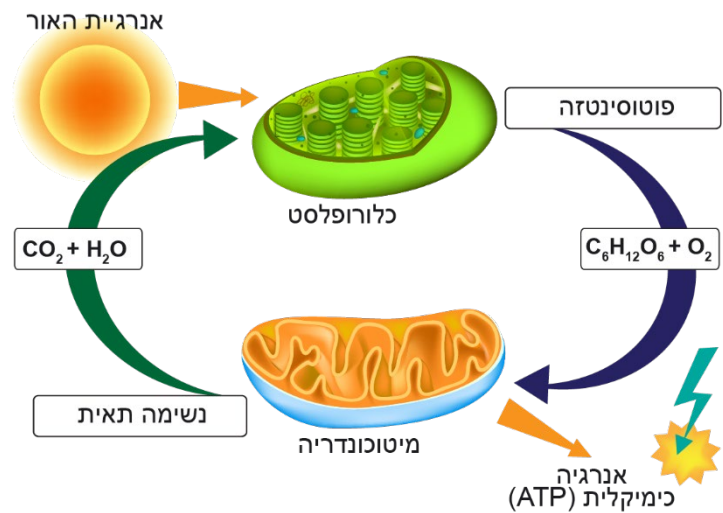


**תמונה 12:** מחזור הפחמן. פחמן דו-חמצני מקובע בתהליכי פוטוסינתזה לתוך תרכובות אורגניות.

## 3.2 תהליך הפוטוסינתזה

את הדיון שלנו על מחזור הפחמן, נרכז בעיקר בתהליך הפוטוסינתזה, שכן תהליך זה הוא הבסיס לקיום שלנו בכדור הארץ. פוטוסינתזה היא תהליך בעזרתו מנוצלת אנרגיה אור להרכבת מולקולות אורגניות ממולקולות אנאורגניות. התהליך מתרחש בצמחים עילאיים, ברוב מיני האצות ובמספר מינים של חיידקים. יצורים פוטוסינתטיים נקראים גם אוטוטרופיים שכן הם מסוגלים לייצר את החומרים האורגניים שלהם בעצמם מחומרים אי-אורגניים. זאת בניגוד ליצורים הטרוטרופיים – התלויים באספקת חומר אורגני לצורך הפקת אנרגיה. בתהליך הפוטוסינתזה (תמונה 13) מקובעות מולקולות פחמן דו-חמצני למולקולת גלוקוז תוך כדי פליטת חמצן לאטמוספירה. מכאן שהחמצן שאנו נושמים מקורו בתהליכים פוטוסינתטיים עתיקי שנים. בנוסף משמש תהליך הפוטוסינתזה כמקור מבלע חשוב לפחמן דו-חמצני. תהליך הפוטוסינתזה מתרחש בעלים באברונים הנקראים כלורופלסטים. בהם נמצאות מולקולות פיגמנט שאחראיות על קליטת האור.

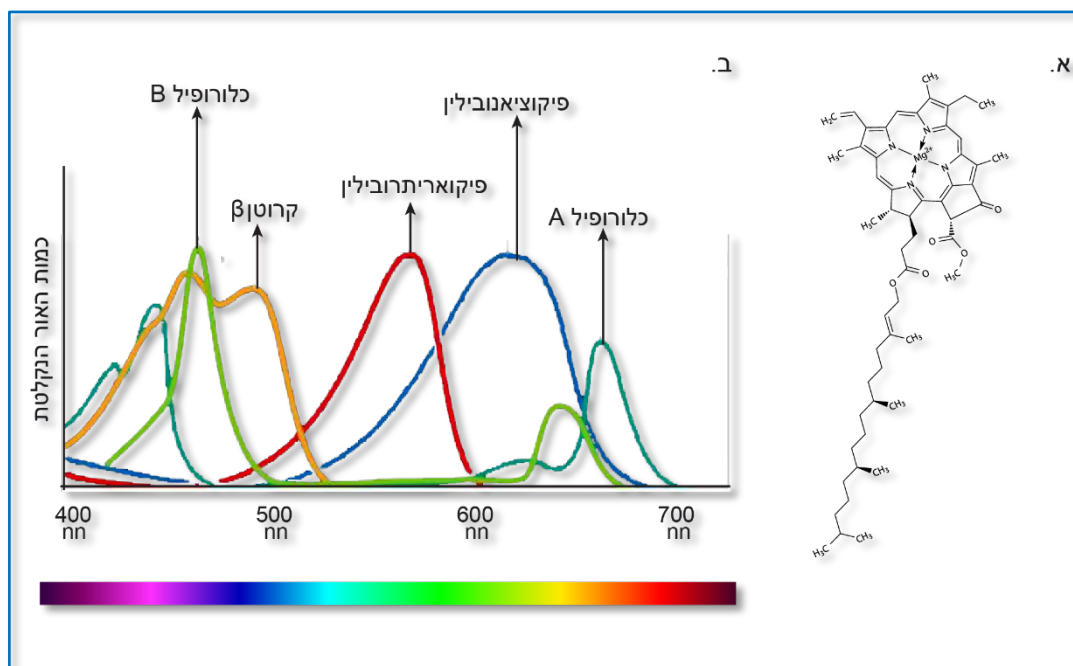




**תמונה 13:** תהליך הפוטוסינתזה והנשימה התאית. יוצרים פוטוסינתטים, קולטים פחמן דו-חמצני מהאוויר, מים מהקרקה, ובעזרת אנרגיית אור השמש מייצרים בכלורופלסט גלוקוז. תוצר לוואי של התהליך הוא חמצן, שמשמש את התא בתהליך הנשימה התאית המתרחש במיטוכונדריה, ליצירת אנרגיה על ידי חמצון גלוקוז.

### הפיגמנטים הפוטוסינתטיים

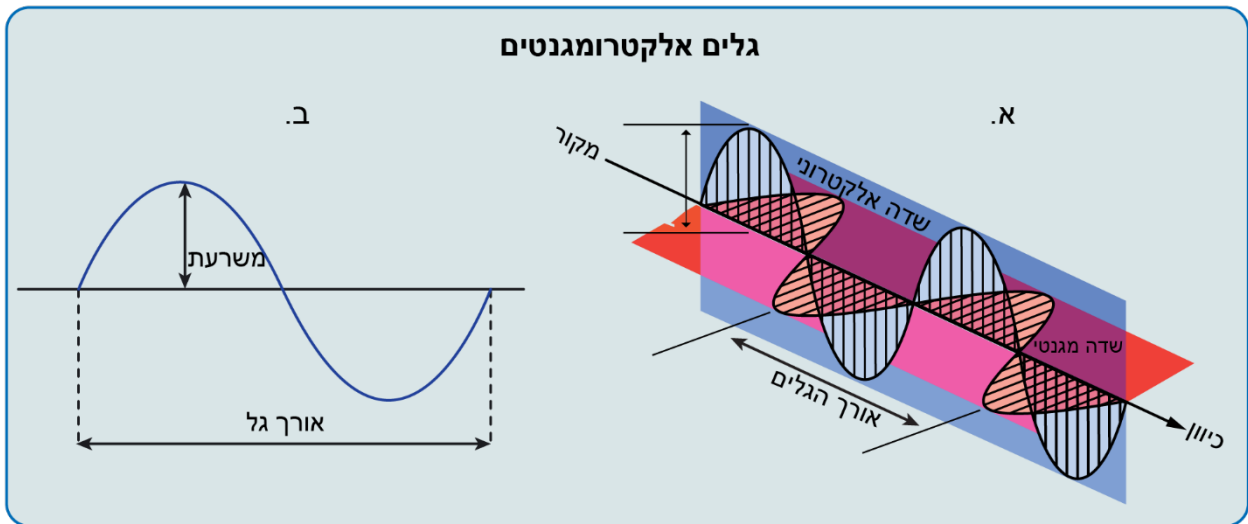
חומר המסוגל לקלוט אור בטווח אורכי הגל של ספקטרום התחום הנראה 400-700nm מכונה פיגמנט (תמונה 14 א'). הפיגמנט קולט אורכי גל מסוימים ומחזיר את אורכי הגל אותם הוא אינו מסוגל לקלוט. רוב התהליכים הפוטו-ביולוגים מתחוללים בתחום האור הנראה. כאשר פוטונים מתחום האור הנראה פוגעים במולקולת פיגמנט, הם גורמים בה לשינויים מבניים (קונפורמטיביים) הפיכים. פוטונים בעלי אורכי גל קצרים מ- 400nm, עלולים להרוס את מולקולת הפיגמנט ע"י יצירת שינויים בלתי הפיכים בשל כמות האנרגיה הגבוהה שבהם. לעומת זאת, פוטונים בעלי אורכי גל ארוכים מ- 700nm, הנם דלי אנרגיה ועל כן אינם מסוגלים להביא לשינוי כלשהו במולקולת הפיגמנט. לצמחים העילאיים ישנם מספר סוגי פיגמנטים (תמונה 14 ב'). רוב הפיגמנטים של הצמח הם פיגמנטים ירוקים הקרויים כלורופיל a ו-b. כלורופילים אלו, בולעים אור בעיקר בתחום הכחול (400-460nm) והאדום (630-680nm). פיגמנטים נוספים הם הקרוטינואידים אשר בולעים אור בתחום הכחול, והפיקובילינים אשר בולעים אור בתחום הצהוב - כתום (520-560nm) צבעם המוחזר של שני פיגמנטים אלו הוא אדום-כתום. הפיכת אנרגיית האור לאנרגיה כימית מתבצעת רק ע"י חלק ממולקולות כלורופיל a. הפיגמנטים האחרים קרויים פיגמנטים משניים או פיגמנטי עזר. לפיגמנטים אלו שני תפקידים: א) להעביר את האנרגיה שקלטו למולקולות הכלורופיל המשתתפות ישירות בריאקציה הפוטוסינתטית. ב) להגן על הצמח מפני קרינה בעוצמות אור גבוהות ע"י הפיכת האנרגיה העודפת לחום. פיגמנטי העזר, ביחד עם חלבונים, מסודרים על פני ממברנת התילקואיד, במבנה הקרוי קומפלקס אנטנה.



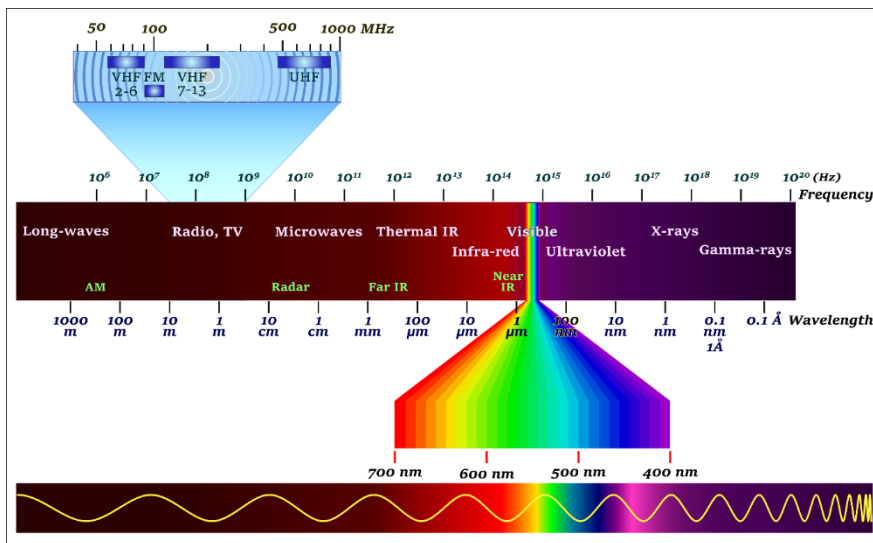
**תמונה 14:** א') מולקולת כלורופיל. במרכז המולקולה, אטום מגנזיום הקשור לארבעה אטומי חנקן. בקצה השני קיים זנב אלקוהולי של 20 אטומי פחמן ב) ספקטרום הבליעה של פיגמנטים שונים.

### האור מרכיב הכרחי בתהליך הפוטוסינתזה

האור הנראה הוא קרינה המהווה חלק מהקרינה האלקטרומגנטית שמקורה מהשמש. הספקטרום האלקטרומגנטי מתאר סוגים שונים של קרינה אלקטרומגנטית (קרינה היא סוג של אנרגיה) שנועה בחלל בצורה של גלים ומקורה הוא השמש. כל סוגי הקרינה האלקטרומגנטית הם גלים הנעים בחלל בו זמנית בשני שדות: שדה מגנטי ושדה חשמלי- שדות אלו מאונכים זה לזה ומשתנים בצורה מחזורית (תמונה 15 א'). נהוג לתאר את הגל בעזרת שני פרמטרים, אורך הגל ותדירות. אורך הגל המסומן באות  $\lambda$  הוא המרחק בין שני שיאים עוקבים. התדירות המסומנת באות  $\nu$  מתארת את מספר המחזורים בשנייה. מכאן שאנחנו יכולים לתאר את הקשר בין תדירות לאורך גל, כאשר  $c$  מסמל את מהירות האור בריק  $c = 3 \times 10^8$  m/sec (תמונה 15 ב'). תחום אורכי הגל משתרע על פני 16 סדרי גודל. בקצה האחד של הסקאלה נמצא את גלי הרדיו בעלי אורך גל ארוך ותדירות נמוכה המכילים מעט אנרגיה, ובקצה השני את קרינת הגמא המייננת, בעלת אורך גל קצר ותדירות גבוהה, המכילים אנרגיה רבה (תמונה 16).



**תמונה 15:** א) קרינה האלקטרומגנטית נעה בגלים הנעים בחלל בו זמנית בשני שדות: שדה מגנטי ושדה חשמלי-שדות אלו מאונכים זה לזה ומשתנים בצורה מחזורית. ב) נהוג לתאר את הגל בעזרת שני פרמטרים, אורך הגל ותדירות. אורך הגל המסומן באות  $\lambda$  הוא המרחק בין שני שיאים עוקבים. התדירות המסומנת באות  $V$  מתארת את מספר המחזורים בשנייה. מכאן שאנחנו יכולים לתאר את הקשר בין תדירות לאורך גל בנוסחה:  $c = \lambda V$ .



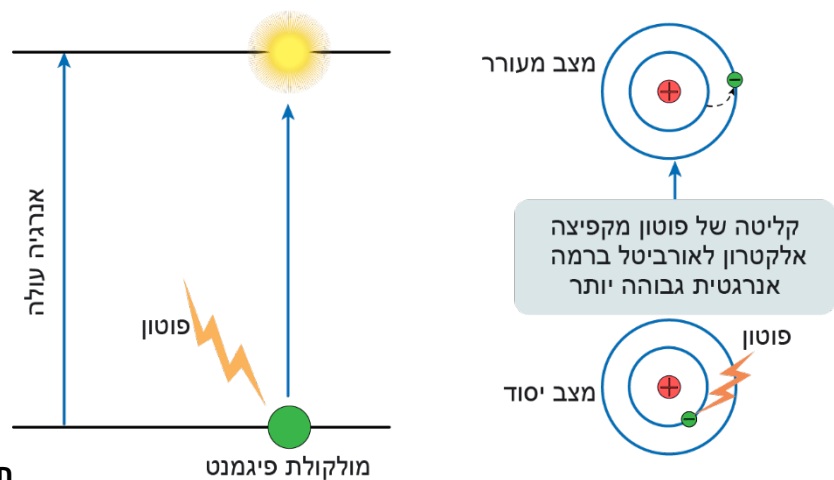
**תמונה 16:** אורך גל מתאר את המרחק בין שני שיאים עוקבים בגל. ניתן לראות בתמונה גלים מאד צפופים כלומר בעלי אורך גל קצר מאד ועל כן מאד אנרגטיים. וגלים ארוכים יותר להם אנרגיה נמוכה יותר.

### ההתנהגות החלקיקית של האור

לצד ההתנהגות של האור כגל, הוא מתנהג גם כחלקיק. חלקיקי האור מכונים פוטונים, שהם חלקיקי אנרגיה חסרי מסה ומטען. לכל פוטון שי תכולת אנרגיה  $E$  התלויה בתדירות הקרינה לפי הנוסחה:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

כאשר  $h$  הוא קבוע פלאנק והוא שווה  $h=6.6262 \times 10^{-34} \text{ j} \cdot \text{sec}$ . קבוע פלאנק מתאר את הקשר בין האנרגיה של פוטון והתדירות של הגל האלקטרומגנטי אותו הוא יוצר. ההתנהגות החלקיקית של האור באה לידי ביטוי באינטראקציה שלו עם חומר. האלקטרונים באטומים של יסודות או מולקולות מסודרים ברמות אנרגיה אטומיות (אורביטלים) או מולקולריות בהתאמה. הפרשי האנרגיה בין רמות אנרגיה שונות הם קבועים ומאפיינים את היסוד או התרכובת. בליעת פוטון על ידי מולקולה מסוימת גורמת לעליה במצב האנרגטי של אחד האלקטרונים שבמולקולה. האלקטרון נמצא בדרך כלל במצב יציב ברמת אנרגיה נמוכה, מצב יסוד (ground state). לאחר בליעת הפוטון עולה האלקטרון לרמת אנרגיה גבוהה יותר, למצב מעורר (excited state). מיד לאחר מכן אלקטרונים יורדים חזרה לרמת האנרגיה הנמוכה תוך פליטת אנרגיה של אור (איבוד אנרגיה) (תמונה 17) לא כל הפוטונים נבלעים על ידי חומר מסוים, אלא רק אלה בעלי התדירות המתאימה, המקיימת את הקשר לפיו אנרגיית הפוטון הנבלע שווה להפרש האנרגיות בין מצב מעורר למצב יסוד. מכאן שכל חומר בולע אור באורכי גל האופייניים לו ומשקפים את מבנה רמות האנרגיה שלו.



**תמונה 17:** ההתנהגות החלקיקית של

האור. כאשר מולקולת פיגמנט נחשפת לפוטונים של אור, אלקטרון מוקפץ לאורביטל בעל רמה אנרגטית גבוהה יותר. כאשר האלקטרון חוזר לאורביטל המקורי, נפלטת אנרגיה ביחס ישר לאנרגיית העירור.

## 3.3 שיעורים ומשימות

### 3.3.1 שיעור 3: הפחמן שובר את האינטרנט

השיעור מתאים גם להוראה מרחוק

#### מטרות השיעור

בתחום התוכן: הכרת המגוון העצום של תרכובות פחמן ושימושיהן  
בתחום התוכן: הכרת קבוצות פונקציונליות שונות של תרכובות הפחמן  
בתחום המיומנויות: פיתוח מיומנויות של חיפוש מושכל באינטרנט  
בתחום המיומנויות: פיתוח מיומנות של מיזוג מידע ממקורות שונים  
בתחום הפדגוגיה: שימוש במשחק טריוויה כדרך לעודד תלמידים ללמוד מעבודותיהם של אחרים

#### חלק א - עבודה בקבוצות – 4 תלמידים בקבוצה, 20 דקות

לפניכם כרטיסיה ובה נוסחת מבנה של תרכובת פחמן.

1. חשבו כיצד ניתן לחפש מידע ברשת לפי נוסחת המבנה. האם תוכלו לתרגם אותה לייצוג אחר?
2. חפשו מידע ברשת לגבי התרכובת שקיבלתם, בנו פוסטר וירטואלי בגודל A3 ובו הסבר על תרכובת הפחמן בכרטיס שברשותכם

#### מה צריך לכלול הפוסטר?

הרכב מולקולרי, קבוצות פונקציונליות, השפעת הקבוצות הפונקציונליות על תכונות החומר (מסיסות במים או בנוזלים אחרים, מצב צבירה בטמפ' החדר ועוד), מקור החומר (טבעי, סינטטי), גילוי (היכן? מתי? על ידי מי?) שימושים, עובדות מעניינות נוספות, מקורות מידע הפוסטר צריך להראות יפה ויזואלית, כולל תמונה אחת לפחות.

#### חלק ב – 20 דקות

עברו בין כל הפוסטרים הוירטואליים של כל הקבוצות וכתבו בגיליון 4-5 שאלות שונות שהתשובות עליהן נמצאות בפוסטרים. אין לכתוב שאלות על הפוסטר שלכם! שלחו את השאלות והתשובות למורה

## חלק ג – 20 דקות, בשיעור העוקב משחק טריוויה המבוסס על השאלות ששאלו התלמידים. לפניכם פלטפורמות להכנת משחקים מקוונים:

פליפיטי Flippity.net

[קישור לדוגמא למסמך שיתופי המאפשר עריכה](#)

[kahoot - קישור לדוגמא לחידון](#)

פלטפורמות נוספות ליצירת חידונים:

[triventy](#)

[quizizz](#)

[fyrebox](#)

[flipquiz](#)

[יו-יו טריוויה](#)

[nara view](#)

[quizalize](#)

[socrative](#)

### שיעור 4: האם נוצרים חומרים אורגניים בעלה?

#### הנחיות למורה:

הצג לתלמידים את הניסוח הכימי של תהליך הפוטוסינתזה ושאל אותם:

1. כיצד לדעתכם ניתן להוכיח כי נוצרים חומרים אורגניים בעלה?

חלקם יזכור אולי כי גלוקוז נאגר בצמח בצורה של עמילן ובהתאם יציע לבדוק את נוכחותו בעזרת לוגול.

#### הכנות לניסוי:

- את החלק של המיצוי המורה יבצע בהדגמה.
- את החלק של כיסוי העלים כדאי לעשות עם התלמידים. לשם כך, מומלץ לצאת עם התלמידים לחצר למצוא שיח גרניום (Geraniaceae), ולבקש מהתלמידים להביא מחוררי נייר בצורות יפות (כאלה שניתן בעזרתם לחורר צורות כמו, לב, כלב, כוכב ועוד). לאחר מכן צריך לדאוג שהחור יהיה בצד העליון של העלה.
- בימים של אמצע הקיץ, מספיק לכסות את העלים ליום-או ימיים. אפשר גם להאיר את העלים בעזרת מקור אור חזק במעבדה ולבדוק מהו משך הזמן המומלץ.

## פרוטוקול הניסוי:

1. לפניך עלה גרניום שכוסה בנייר אלומיניום למספר ימים, אך מספר חלקים בעלה נותרו חשופים לאור.
2. הכנס את העלה למים רותחים למשך 2 דקות (התהליך הורס את קרום התא ומרכך את העלה).
3. העבר את העלה לכוס כימית המכילה 100% אתנול.
4. הכנס את הכוס לכלי עם מים חמים כך שטמפרטורת האתנול תהיה 60 מעלות צלסיוז, והדגר למשך 15 דקות.
5. שטוף את העלה במי ברז כדי שיתרכך והעבר לצלחת פטרי עם תמיסת לוגול (0.2g I+ 5gr KI) בתוך 100 מ"ל מים), למשך 10 שניות.
6. שפוך בזהירות את תמיסת הלוגול והוסף מים נקיים.
7. צלם את העלה לפני ולאחר הוספת היוד.
8. תאר והסבר את תוצאות הניסוי.

### עמילן נוצר בחלקים הירוקים של העלה, החשופים לאור.



**תמונה 4:** היווצרות עמילן בחלקים הירוקים בעלה. (א) מערכת המיצוי של הכלורופיל. (ב) עלה שהיה חשוף לאור בשבוע חורפי במיוחד. ג, ד) עלים שהיו חשופים לאור וכוסו באופן חלקי. (ה) עלה עטוף בנייר אלומיניום. ניתן לראות את הצורות היפות שהשאיר העמילן בחלקים שהיו חשופים לאור.

## 3.3.2 שיעור 5: פוטוסינתזה - השלב הראשון במחזור הפחמן.

מטרת השיעור:

1. התלמיד ידע להסביר את הקשר בין ספקטרום הבליעה של הכלורופיל לצבע שלו.
2. התלמיד ידע להסביר מדוע תהליך הפוטוסינתזה יכול להתקיים רק בתחום אורכי גל מסוימים.

### דרישות מקדימות:

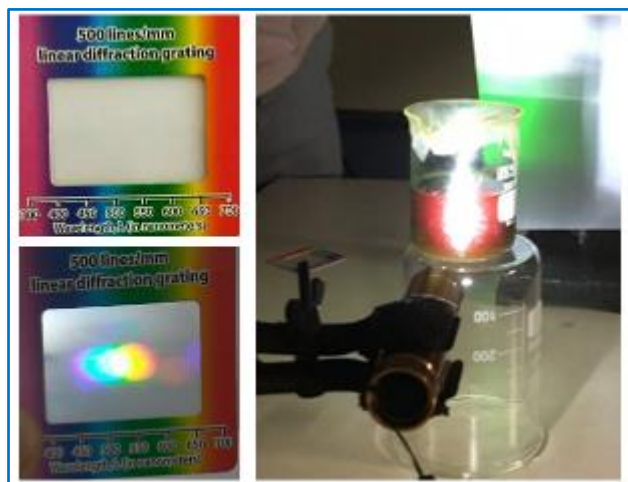
1. התלמיד למד על תהליך הפוטוסינתזה ומכיר את הגורמים המשפיעים על התהליך.
2. התלמיד למד על פיגמנטים הפוטוסינתטיים.
3. התלמיד למד על הספקטרום האלקטרומגנטי.

משך השיעור: 90 דקות.

כבר בשנת 1883 הוכיח תיאודור אנגלמן, בניסוי אלגנטי, כי אורכי הגל האפקטיביים ביותר להנעת הפוטוסינתזה, נמצאים בתחום האדום והכחול של ספקטרום האור הנראה. אמנם מדובר בניסוי מאד אלגנטי, שהתבצע לפני שנים רבות, אבל אפילו היום קשה לשחזר אותו במעבדה ממוצעת. ובכל זאת, כדי להמחיש לתלמידים, מהו ספקטרום האור הנראה, ומהם אורכי הגל החשובים לפוטוסינתזה אנו מציעים לבצע את הניסוי הבא.

### ניסוי 1: זיהוי ספקטרום הבליעה של כלורופיל

1. הכנס בדחיסות (לפחות 100 גרם), עלי תרד לכוס כימית המכילה 200 מ"ל של אתנול 100%.
  2. שמור את הכוס במקרר, מכוסה לגמרי באלומיניום, למשך שלושה ימים. בתום שלושה ימים, ניתן יהיה לראות כי צבע התמיסה הוא ירוק כהה.
- #### חלק ראשון
3. חבר פנס לד המאיר באור לבן למעמד בעזרת אטב.
  4. למעמד נוסף שימוקם מול המעמד הראשון ובמרחק של כ- 50 ס"מ ממנו, חבר דף נייר לבן.
  5. בין שני המעמדים הנח את מיצוי הכלורופיל.
  6. הדלק את הפנס ותאר את צבע האור שהתקבל על גבי כוס הזכוכית שהכילה את מיצוי הכלורופיל ועל גבי הנייר הלבן.



#### למורה

חלק זה הוא פשוט, על התלמיד להגיד שבנקודת המגע של האור בכוס היא נראתה בצבע אדום, ודף הנייר נראה היה ירוק.



## חלק שני

בחלק השני של הניסוי נרצה להדגים את השינוי בספקטרום האור הלבן לאחר המעבר דרך מיצוי הכלורופיל. לשם כך נעשה שימוש בסריג עקיפה. סריג עקיפה מאפשר להפריד את האור לאורכי הגל ממנו הוא מורכב בדומה למנסרה.

1. הנח את סריג העקיפה מול הפנס ותאר את ספקטרום האור המתקבל.
2. הנח את סריג העקיפה מאחורי הכוס עם מיצוי הכלורופיל, האר את הכוס, ותאר את ספקטרום האור המתקבל.
3. הסבר מדוע הכוס נראית בצבע אדום? מדוע הנייר נראה ירוק? מדוע הכוס לא זוהרת באור כחול?

### חלק שלישי – ניסוי הדגמה

המורה ייקח ציין לייזר ויאיר על הכוס עם מיצוי הכלורופיל. סביר להניח שאור לא יעבור דרך המיצוי. עכשיו אפשר לבקש מהתלמידים לבדוק מה צפוי להיות אורך הגל של קרן הלייזר בציין.

### דף רקע למורה

אור וקרנינה אלקטרומגנטית הם נושאים מאד מופשטים עבור התלמידים. כיצד אם כך ניתן להסביר את התוצאות? פגיעה של פוטון באורך הגל המתאים גורמת להקפצת אלקטרון לרמה אנרגטית גבוהה יותר. בעת חזרתו לנקודת היסוד נפלטת אנרגיה שנמצא ביחס ישר לאורך הגל שעורר את האלקטרון. מכאן שאם כדי להקפיץ אלקטרון במולקולת כלורופיל דרוש אורך גל אדום הרי כאשר האלקטרון יחזור לנקודת היסוד יתקבל צבע אדום. למה אם כן, לא ראינו זהירה באור כחול? אחת האפשרויות היא שהאור הכחול הוא הרבה יותר אנרגטי וקצר יותר והוא עובר מיסוך על ידי נוכחות האור האדום. מצד שני צריך לבדוק מהו היחס בין האור האדום והכחול בפנס הלבן שהשתמשנו בו. יתכן שהאור הלבן בפנס מכיל יותר אורכי גל אדומים ופחות כחולים. במצב זה ההסתברות שאלקטרון יעורער על ידי אור כחול היא קטנה יותר. האור הירוק שהתקבל על גבי הנייר הלבן הוא עדות לכך שאורכי גל אלה לא הגיבו עם מולקולות הכלורופיל.

בדרך כלל אנו משתמשים בדוגמה זו כדי להגיד לתלמידים שהצבע של חומר הוא מה שהוא מחזיר. כלומר, עלה הוא ירוק בגלל שהוא לא קולט את אורכי הגל הירוקים. אבל ראינו שהכלורופיל בכלל זוהר באור אדום, אז למה העלה הוא ירוק? נקודה זו קשורה לריכוז הגדול של מולקולות הכלורופיל כאשר הן נמצאות בתמיסה. בהשוואה למצבן בתוך העלה. כשאלת הרחבה לתלמידים ניתן לשאול אותם, מדוע השמיים כחולים ולמה הם לא אדומים?

### למורה

התבוננות באור הלבן מבעד לסריג העקיפה חשפה את כל ספקטרום האור. לעומת זאת התבוננות באור שעבר דרך מיצוי הכלורופיל מבעד לסריג העקיפה הראתה שחלק מהספקטרום האדום וכל הספקטרום של האור הכחול נעלם.

### 3.3.3 שיעור 6 - חוקרים את הספקטרום האלקטרומגנטי בעזרת שוקולד.

בעזרת הדגמה קצרה זו, נחקור עם התלמידים את ההתנהגות הגלית של האור. לשם כך נרצה לחשב את מהירות האור בעזרת שוקולד ומיקרוגל. שיעור זה יכול להתבצע גם בצורה של למידה מרחוק.

#### דרישות מקדימות:

1. התלמיד צריך להכיר את מאפייני הספקטרום האלקטרומגנטי.
2. התלמיד צריך להכיר את הנוסחה המקשרת בין תדירות, אורך גל ומהירות האור.

משך השיעור: 40 דקות.

#### מטרת השיעור

1. התלמיד ידע להסביר את הקשר בין אורך הגל לתדירות.

#### ציוד נדרש

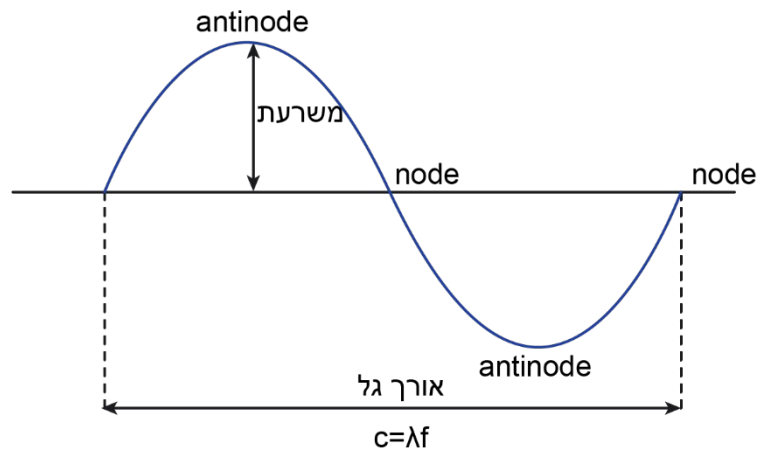
- מיקרוגל ללא הצלחת המסתובבת
- שוקולד (אפשר גם נקניקיה).
- סרגל

#### מהלך הניסוי

1. הוצא את הצלחת המסתובבת מהמיקרוגל.
2. בדוק את תדירות הפעילות של המיקרוגל בו אתה משתמש (תמצא זאת כתוב על המדבקה בגב המכשיר).
3. הנח את השוקולד במרכז המיקרוגל והפעל אותו למשך 20 שניות בעוצמה מקסימאלית.
4. מדוד בעזרת סרגל את המרחק בין שתי נקודות צריבה ברורות על השוקולד. מרחק זה מייצג מחצית אורך גל (ראה הסבר בהמשך).
5. תדירות מכשיר המיקרוגל בדרך כלל נתונה בערכים של מגה הרץ, נכפיל ב  $10^6$  כדי לקבל את הערכים ביחידות של הרץ.
6. נציב בנוסחה:  $c = \lambda f$  את הנתונים שחישבנו ומדדנו ונקבל בקירוב טוב את מהירות האור.

#### הסבר

- א. צפה בסרטון [הסבר](#)
- ב. למדנו כבר שמהירות האור (c) היא מכפלת אורך הגל ( $\lambda$ ) בתדירות (f). בתוך המיקרוגל, גלי המיקרו נעים בצורה קבועה. כאשר האזורים החמים ביותר, כלומר עם האנרגיה הגבוהה ביותר, יהיו השיאים של הגל (antinode) והאזורים עם מעט אנרגיה יהיו האזורים הנמוכים ביותר (node). מכאן שהחימום של המיקרו הוא לא אחיד וזו גם הסיבה מדוע חשוב לחמם את המזון בצורה סיבובית כדי לקבל חימום אחיד של המזון. כאשר מוציאים את הצלחת המסתובבת, השוקולד שבתוך המיקרו מתחמם בצורה לא אחידה ובמיוחד בנקודות השיא של גלי המיקרו. מרחק זה מייצג חצי אורך גל. עכשיו יש לנו את כל מה שאנחנו צריכים כדי לחשב את מהירות האור.



## פרק 4: החמצת האוקיינוסים

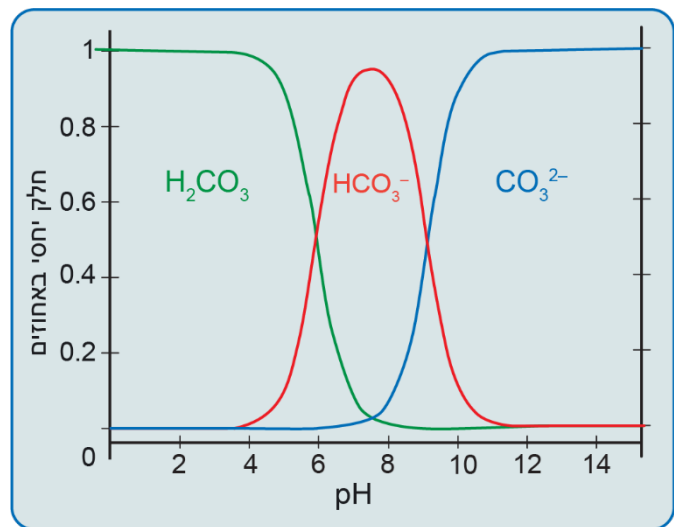
### 4.1 החמצת האוקיינוסים איך זה עובד?

האוקיינוסים מהווים מקור מבלע גדול ביותר לפחמן (פי 50 יותר מאשר באטמוספירה), שם הוא נמצא בדרך כלל בצורת יוני ביקרבונט ( $\text{HCO}_3^-$ ), יוני קרבונט ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), או כמרכיב עיקרי במיקרואורגניזמים (Bar-On et al., 2018). שריפת דלקי מאובנים ושינוי בשימושי קרקע שיחררו לאטמוספירה מאז סוף המאה ה-19 כמויות עצומות של פחמן דו-חמצני מה שהעלה את ריכוזו באטמוספירה לרמות שלא היו מוכרות אלפי שנים לפני כן. יחד עם זאת, עליה זו מתמתנת על ידי האוקיינוסים שקולטים לפחות שליש מכמות הפחמן שנפלטת לאטמוספירה ממקורות אנתרופוגניים (אנושיים) (Sabine et al., 2004). אילולא כך, היינו חווים רמות גדולות בהרבה של פחמן דו-חמצני באטמוספירה. לעליה בריכוז פחמן דו-חמצני באוקיינוסים יש מחיר, היא גורמת לירידה ב-pH ולשינויים כימיים אחרים שנקראים ביחד "החמצת אוקיינוסים" או כמו שמדענים קוראים לזה: "The other CO<sub>2</sub> problem" (Doney et al., 2009). זרמי האוקיינוסים מניעים פחמן דו-חמצני מהשכבות העליונות של המים לשכבות העמוקות יותר. פחמן דו-חמצני שעבר בדיפוזיה מהאטמוספירה לשכבה העליונה באוקיינוס הופך ליון ביקרבונט. בתלות בזרמים, בצפיפות המים, מועבר הפחמן הדו-חמצני מהשטח העליון של האוקיינוסים הפסיפי והאטלנטי לעומק האוקיינוס האטלנטי והים הארקטי. אחסון הפחמן הדו-חמצני בים העמוק הקר משמש כמבלע לשינויים בריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה. הבנת המנגנונים המתווכים את שינוי ריכוז הפחמן הדו-חמצני בין היבשה, האוקיינוסים והאטמוספירה ואת ההשפעה שלהם על שינויי האקלים היא חשובה מאד. לאחר שהתמוססה במי הים, מולקולת CO<sub>2</sub> מגיבה עם מים וכתוצאה מכך נוצרת חומצה פחמתית (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), שיכולה להמשיך ולהתפרק על ידי מסירת יוני מימן למולקולות מים נוספות, כדי ליצור יוני ביקרבונט ( $\text{HCO}_3^-$ ) ויוני קרבונט ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). תגובות אלה נמצאות בשינוי משקל הפיך (משוואות 1-3).

1.  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$
2.  $\text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$
3.  $\text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$

משוואות 1-3: משוואות כימיות המתארות את תגובת פחמן דו-חמצני עם מים.

הירידה המשוערת עד לסוף המאה ה-21 בדרגת ה-pH של 0.3-0.4 שוות ערך לעליה של 150% בריכוז יוני  $\text{H}^+$  ולירידה של 50% ביוני קרבונט  $\text{CO}_3^{2-}$  (Orr et al., 2005). כל עוד דרגת ה-pH של המים היא בסביבות 8.1 כ-90% מהפחמן האי-אורגני במים נמצא בצורת יוני ביקרבונט ( $\text{HCO}_3^-$ ), 9% בצורה של יוני קרבונט ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) ורק 1% בצורה של פחמן דו-חמצני מומס במים (תמונה 18). הוספת פחמן דו-חמצני למי הים מעלה את ריכוז של הפחמן הדו חמצני המומס בהם ( $\text{CO}_2^{\text{aq}}$ ), כתוצאה מכך התגובה הכימית נעה ימינה בכיוון שיווי המשקל החדש וריכוז יוני המימן במים עולה ביחד עם עליה בריכוז יוני ביקרבונט. עליה בריכוז יוני המימן מורידה את דרגת ה-pH שכן  $\text{pH} = -\log_{10}[\text{H}^+]$ . כתוצאה מכך ריכוז יוני הקרבונט במים **דווקא יורד**. אבל למה זה כך? הרי אם כל התגובות נעות לכיוון התוצרים היינו מצפים לעליה בריכוז יוני הקרבונט במים, אבל בגלל הבדלים בקבועי שיווי המשקל של התגובות הכימיות למעשה התגובה השלישית נעה לכיוון המגיבים ככל שהחומציות עולה ולכן ריכוז יוני הקרבונט קטן (תמונה 18).



**תמונה 18:** השפעת חומציות על ריכוז יוני פחמן במים. ככל שמידת החומציות של המים עולה כך יורד ריכוז יוני הביקרבונט הזמינים במים.

### השלכות של ירידת ריכוז יוני הקרבונט במים

פחמן באוקיינוס נמצא בצורה של פחמן דו-חמצני מומס במים, יוני קרבונט ויוני ביקרבונט. כולם ביחד נקראים DIC (Dissolve inorganic carbon). יוני סידן ( $\text{Ca}^{2+}$ ) בים נמצאים בעודף, ובשיווי משקל יונים אלה מגיבים עם  $\text{CO}_3^{2-}$  ליצור פחמת סידן ( $\text{CaCO}_3$ ) שהוא המרכיב בשלד הגירני של יצורים רבים כמו אלמוגים, ויצורים פלנקטונים רבים. אנחנו יכולים לחשב את התנאים בהם תתרחש הרכבה של קלציום קרבונט על ידי חישוב מידת רווית מי הים ביוני ביקרבונט, המתוארת ע"י ערך הקרוי אומגה (2) (משוואה 2)

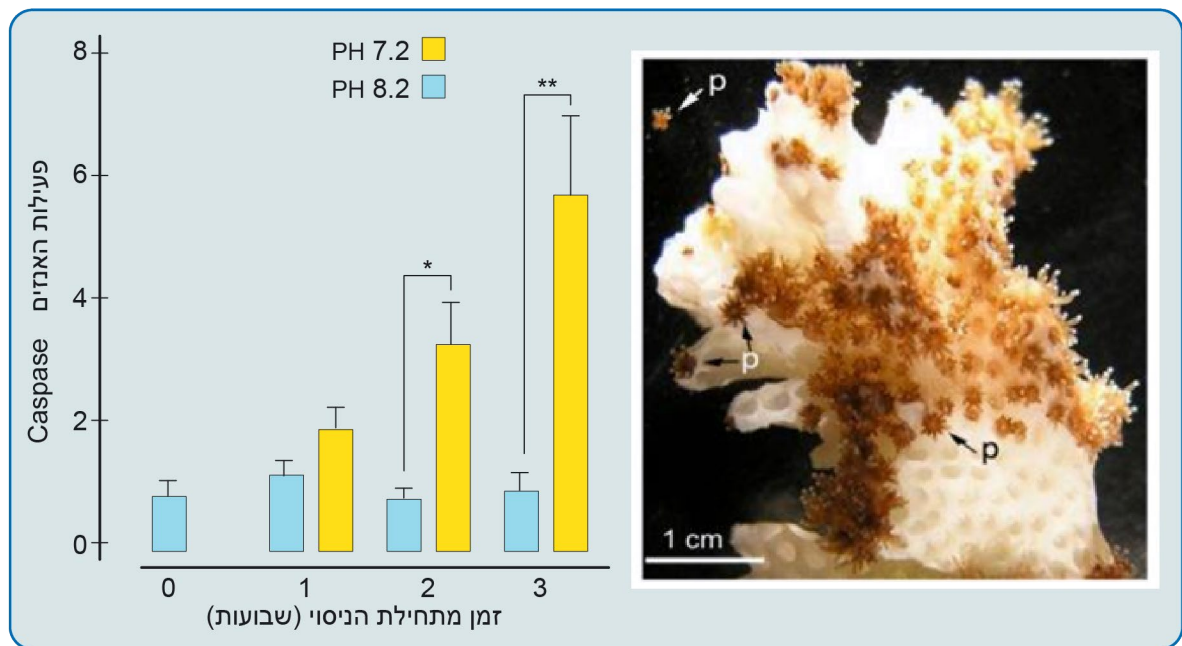
כאשר אומגה גדול מ-1 התגובה תלך לכיוון התוצרים כלומר שיקוע של  $\text{CaCO}_3$ . כאשר אומגה קטן מ-1 התגובה תלך בכיוון המגיבים כלומר פירוק  $\text{CaCO}_3$ . עלייה בריכוז פחמן דן-חמצני, מורידה את ה-pH, ובהתאם ריכוז יוני  $\text{CO}_3^{2-}$  יורד גם כן. כתוצאה מכך יורדת מידת הרוויה של פחמת הסידן ( $\text{CaCO}_3$ ) בפני השטח של המים, היכן שמתרחש רוב הייצור הראשוני באוקיינוסים. שכן במצב החדש יש מחסור ביוני קרבונט ולכן יש פירוק של השלד הגירני במקום יצירה שלו.

$$\frac{[\text{Ca}^{2+}] \times [\text{CO}_3^{2-}]}{\text{CaCO}_3} = \Omega$$

משוואה 2: מדד אומגה לתיאור מידת הרוויה של מי הים ביוני סידן וביקרבונט.

## 4.2 השלכות ביולוגיות של החמצת אוקיינוסים

אלמוגים הם חסרי חוליות השייכים למערכת הצורבים. מערכה זו כוללת בנוסף גם את המדוזות, שושנות הים והידרות. צורת המבנה הבסיסית של האלמוגים השונים היא פוליפ או מדוזה. הפוליפ בעל צורה גלילית לרוב מכיל את הפה וזרועות הציד ובדרך כלל הוא ישיב. המדוזה היא הצורה השוחה במים באופן חופשי. בין האלמוגים אנו מוצאים אלמוגים רכים שאינם מפרישים שלד גירני ואת אלמוגי האבן המפרישים שלד גירני. אלמוגי האבן חשובים מאד ליצירת מצע השונית עליו יתבססו מינים רבים של בעלי חיים וצמחים. בהתאם, אלמוגים אלה נקראים אלמוגים "בוני שונית". לפי עדויות ממחקר המאובנים, הועלתה השערה כי אלמוגי אבן יכולים להחליף את מבנה גופם ממבנה בעל שלד גירני למבנים רכים חסרי שלד גירני. השערה זו אומתה בניסויים בהם חשפו את אלמוגי האבן *Oculina patagonica* ו *Madracis pharensis* לתנאי pH נמוכים, כאלה הצפויים בתקופות של עליה בריכוז הפחמן הדו-חמצני. הכנסת אלמוג אבן לסביבה בעלת pH = 7.2 הובילה להפרדות של הפוליפים מגוף האלמוג ולעליה בפעילות האנזים קאספז שקשור לתהליך המוות התאי מתכונת. החזרה של האלמוגים לסביבה בעלת pH = 8.2 הובילה ליצירה מחודשת של הפוליפים המושבתיים ולירידה בפעילות האנזים קאספז (תמונה 19).



תמונה 19: א) פוליפים על אלמוג אבן. אזורים לבנים מייצגים שלד אלמוג שאיבד את הפוליפים. ב) פעילות האנזים קספז בתנאי pH שונים. אפור – pH=7.2 לבן – pH=8.2

## 4.3 שיעורים ומשימות

### 4.3.1 שיעור 7 - החמצת אוקיינוסים

#### מהלך השיעור

במהלך השיעור התלמידים מתנסים בשתי דרכים לבחינת השפעת הוספת פחמן דו-חמצני על דרגת ה-pH של המים כאמצעי להדגמת תהליך החמצת האוקיינוסים. הפעילות מאפשרת גם שימוש באוגרי נתונים, איסוף נתונים וניתוח תרשימים.

#### בתום השיעור התלמיד ידע:

1. להסביר כיצד עלייה בריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה משפיעה על חומציות מי הים.
2. להסביר מדוע ובאיזה אופן, עליה בחומציות המים משפיע על יצורים בעלי שלד גירני העשוי קלציום-קרבוט.

#### ידע קודם:

1. היכרות עם נושא של חומצות ובסיסים.
  2. הכרות עם תהליך הפוטוסינתזה והנשימה התאית והקשר ביניהם לצריכה או פליטה של פחמן דו-חמצני.
- משך השיעור: 90 דקות.

## דף מידע לתלמיד

חשיבותם של אלמוגים ויצורים פלנקטונים למערכת האקולוגית הנה משמעותית ביותר. למרות ששוניות אלמוגים מכסות פחות מ 0.1% מרצפת האוקיינוסים, הם מקיימות מעל ל 25% מהמינים בים. יצורים פלנקטונים במיוחד, מהווים את הבסיס לשרשרת המזון הימית, ולכן פגיעה בהם עלולה להיות הרסנית. שוניות אלמוגים, הן מהמערכות האקולוגיות המגוונות ביותר בכדור הארץ, העלייה בחומציות האוקיינוסים מאיימת לפגוע באלמוגים בוני השונות ובחלק מהיצורים הפלנקטונים משתי סיבות: הראשונה היא, שהשלד הפנימי של יצורים אלה מורכב מגיר (CaCO<sub>3</sub>) שמתפרק בסביבה חומצית. הסיבה השנייה היא שבסביבה חומצית, קצב היווצרות השלד הגירני מלכתחילה הוא איטי יותר בצורה משמעותית.

### ניסוי 1

לפניך חול שלא מכיל קלציום קרבונט, ואבקת אלמוגים (אפשר להשתמש כמובן בגיר). טפטף מספר טיפות של חומץ על כל אחת מהדוגמאות והתבונן במתרחש בעזרת זכוכית מגדלת או בינוקולר.

א. תאר את המתרחש.

ב. נסח את התגובה הכימית שהתרחשה באחת הכוסות.

### ניסוי 2 – הדגמת שינוי pH של תמיסה כתוצאה מנשימת שמרים

1. לפניך 5 גרם של אבקת שמרים יבשים במבחנת זכוכית. הוסף למבחנה 100 מ"ל מים פושרים וכפית סוכר.

2. סגור את המבחנה בעזרת הפקק המיוחד שלתוכו הורכבה צינורית.

3. הכנס את אחת הצינורית לכוס כימית המכילה 100 מ"ל מים מזוקקים.

4. בעזרת מד pH, מדוד כל 5 דקות במשך 30 דקות, את השינוי ברמת החומציות של המים כתלות בזמן. (תזכורת: בעת תסיסת השמרים נפלט פחמן דו-חמצני כתוצר לוואי של תהליך הנשימה התאית).

5. ארגן את הנתונים בטבלה ותאר את המתרחש.

6. העבר את הנתונים לגיליון אקסל והכן תרשים המתאר את שינוי מידת חומציות המים כתלות בזמן.



## הצעות נוספות למורה:

- א. המורה יפתח גיליון אקסל שיתופי וכל קבוצה תכניס את הנתונים שלה לגיליון השיתופי. לאחר מכן בעזרת שימוש בנתונים הכיתתיים, ידגים המורה לתלמידים את המשמעות של המושגים: שונות, ממוצע וסטיית תקן.
- ב. הכן כלי נוסף עם שמרים והכנס את הצינורית לכלי אטום שלתוכו חובר חיישן המודד ריכוז פחמן דו-חמצני באוויר. מדוד את השינויים בריכוז הפחמן הדו-חמצני בכלי כתלות בזמן.

## ניסוי 3 – הדגמת שינוי pH של תמיסה בעזרת חומץ וסודה לשתייה.

### חומרים



1. תמיסת 0.04% ברומותימול כחול.
2. כוסות חד פעמיות שקופות גבוהות.
3. כוסות חד פעמיות נמוכות מקרטון.
4. סלוטייפ
5. נייר לבן
6. טוש לסימון
7. אבקת סודה לשתייה
8. חומץ שני מכסים של צלחות פטרי

### מהלך הניסוי

1. הוסף 50 מ"ל של תמיסת הברומותימול כחול לכל אחת מהכוסות הגבוהות שלפניך.
2. הוסף 2 גרם (חצי כפית) אבקת סודה לשתייה לכוס קרטון אחת.
3. הדבק את כוס הקרטון לדופן הפנימית של כל אחת מכוסות הפלסטיק. הקפד שהכוס לא תיגע באינדיקטור. (ראה תמונה).
4. הוסף 5 מ"ל חומץ לכל אחת מכוסות הקרטון. הקפד לא לשפוך חומץ לתמיסת האינדיקטור.
5. כסה מייד את שתי הכוסות בעזרת מכסה של צלחת פטרי.

## שיעור 7 - תוצאות למורה

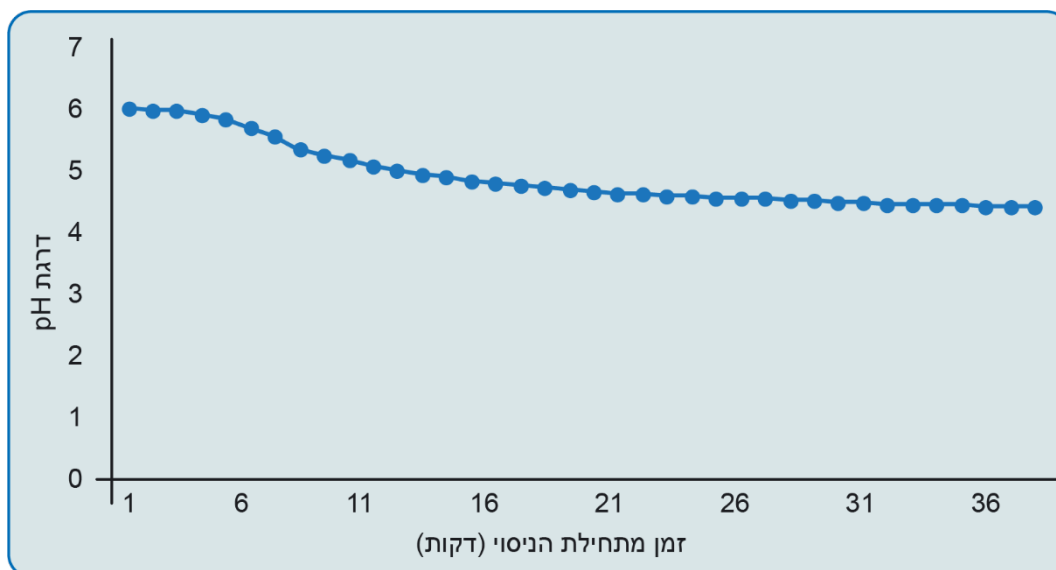
### ניסוי 1:

מטרת הניסוי הראשון היא להדגים בצורה הפשוטה ביותר פליטה של פחמן דו-חמצני במגע בין גיר לחומצה. כדי להמחיש לתלמידים שחומצה יכולה לפרק קלציום קרבונט. אפשר כמובן להשתמש בגיר לשם ההדגמה.

### ניסוי 2:



בניסוי זה אנחנו רוצים להראות שפחמן דו חמצני שנפלט בתהליך נשימה תאית, יכול לעבור בדיפוזיה לכלי עם מים ולהשפיע על מידת החומציות שלהם. מהתוצאות שלנו עולה כי לאורך הניסוי ירד ה-pH של המים בערך בסדר גודל (תמונה 20).



תמונה 20: השפעת פחמן דו-חמצני על דרגת ה-pH של המים.



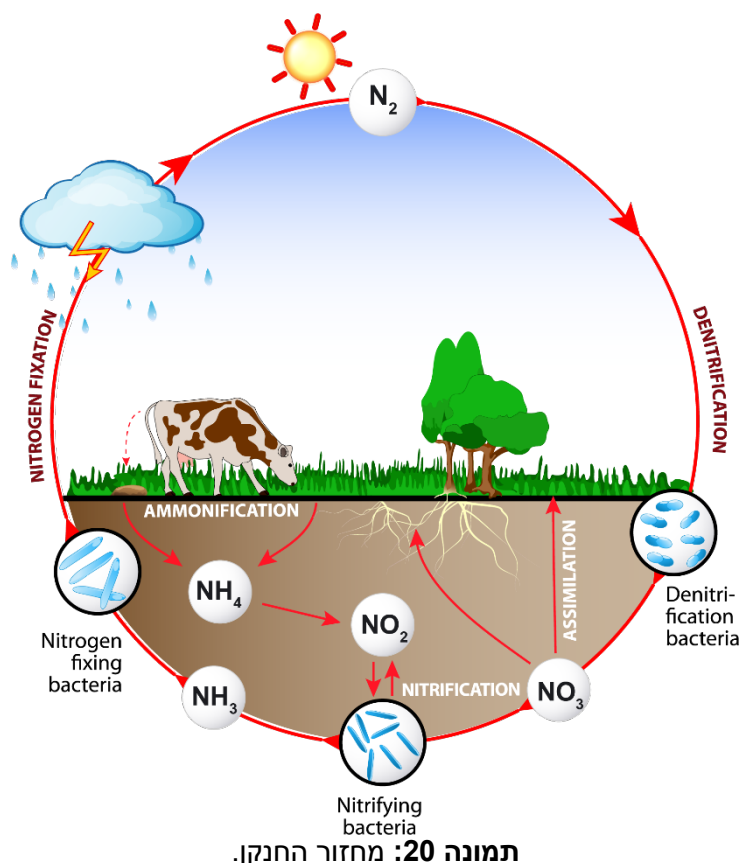
ניסוי 3: מטרת הניסוי היא להראות בצורה איכותית כיצד דיפוזיה של פחמן דו-חמצני משפיעה על חומציות המים. ניתן לראות את השינוי בצבע הכוסות כתלות בטמפרטורת המים לאחר 6 דקות מתחילת הניסוי.

## פרק 5: מחזור החנקן.

### 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. מולקולת החמצן מתחרה במולקולת 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 אנארוביים.

3. **אמוניפיקציה** – תהליך הפיכת חומרים אורגנים נרקבים, על ידי חיידקים או פטריות לאמוניה ( $\text{NH}_3$ ) ובכך הופכים אותה לזמינה עבור יצורים חיים. חיידקים גם מפרקים תרכובות עשירות בחנקן לאמוניום ( $\text{NH}_4^+$ ), 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 אנארובי ומתרחש בדרך כלל בשכבות עמוקות בסדימנט הימי או בקרקע. בשלבי הביניים של התהליך נוצרים שני גזים נוספים חנקן חמצני ( $\text{NO}$ ) וחמצן דו-חנקני ( $\text{N}_2\text{O}$ ), 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

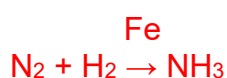
הקדום ביותר לכל היצורים (Latest universal common ancestor-LUCA), או שהתפתח בשלב מאוחר יותר. מה שברור הוא שבלעדי שני אנזימים אלו, הניטרוגנז ורוביסקו, החיים כפי שאנו מכירים אותם על כדור הארץ היו נראים אחרת לגמרי.

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

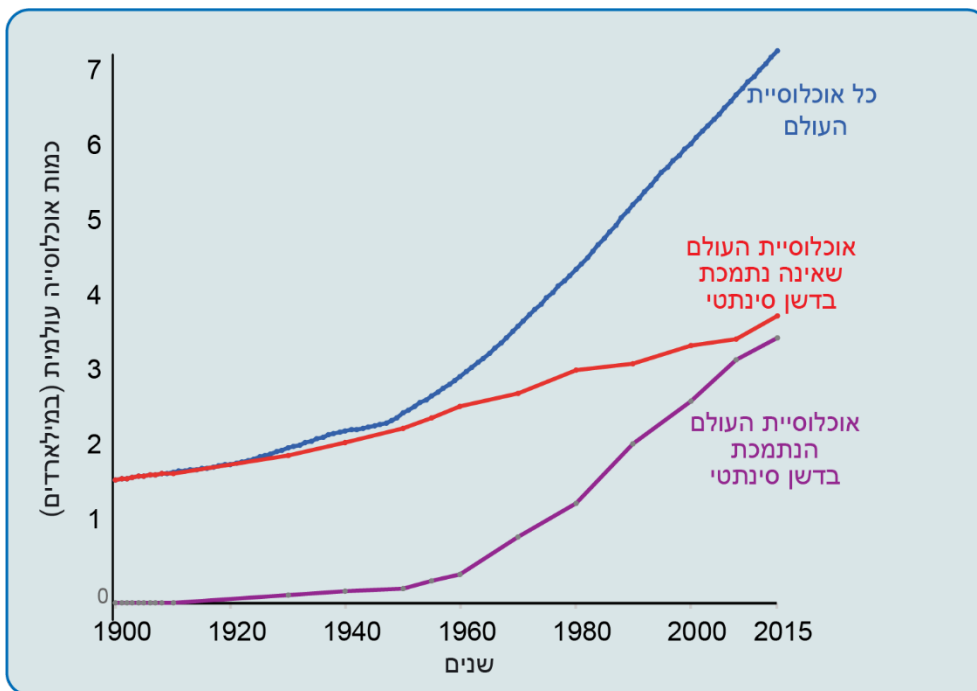
שלב מספר	שם התהליך	חשיבות	תהליך כימי
1	קיבוע חנקן	הפיכת חנקן מולקולרי לזמין מבחינה ביולוגית	$N_2 \rightarrow 2NH_3 + H_2$
2	ניטריפיקציה	הפיכת אמוניה לניטריט	$NH_3 \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO_3^-$
3	אנאמוקס	חמצון אמוניה לניטראט בתנאים אנארוביים	$NH_4^+ + NO_2^- \rightarrow N_2 + 2H_2O$
4	דניטריפיקציה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

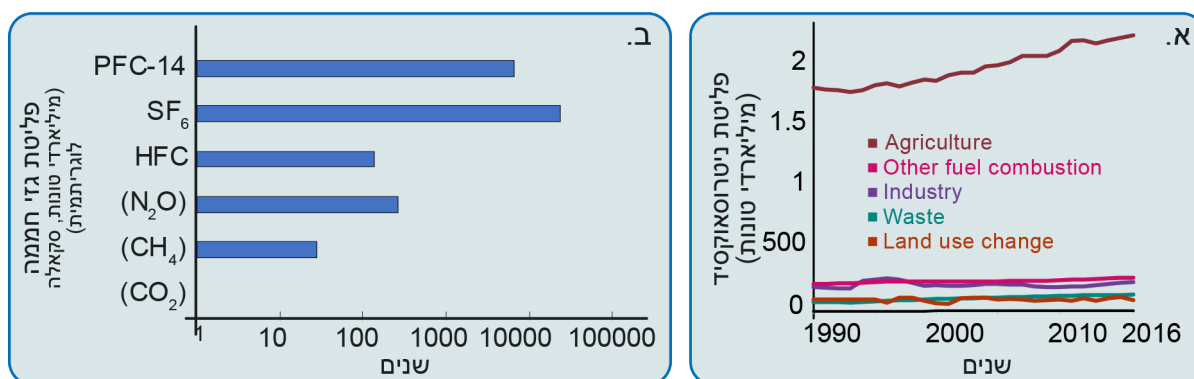


כיום כ- 2% מצריכת האנרגיה העולמית מושקעת בהפקת אמוניה בתהליך הבר-בוש. ההמצאה הובילה למותם של מיליוני אנשים ב-100 השנים האחרונות. יחד עם זאת היא תרמה להאכלה של מיליונים רבים אחרים. כ- 40% מאוכלוסיית העולם כיום, תלויה בדשנים שמקורם בתהליך הבר בוש (תמונה 21).



**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.



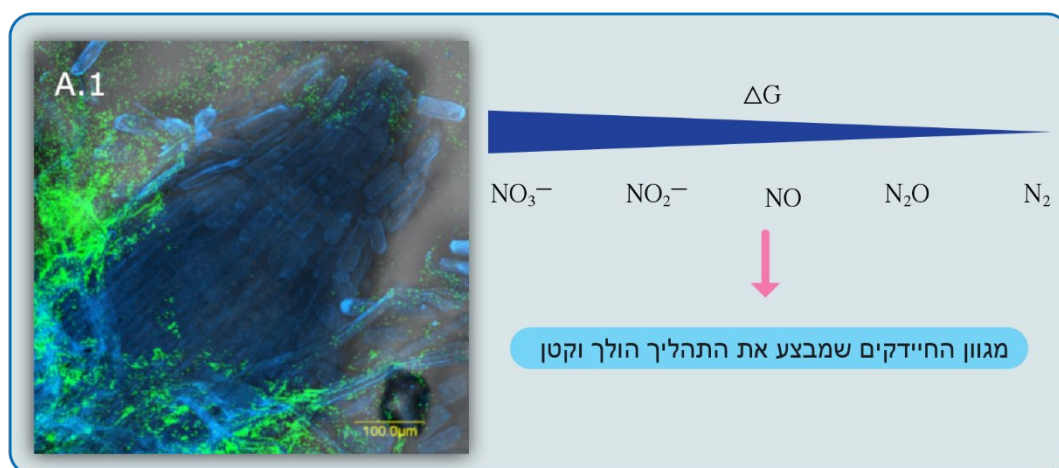
**תמונה 22:** א) חקלאות היא המקור המרכזי לפליטת ניטרוסאוקסיד לאטמוספירה. ב) מידת המסוכנות של גזי חממה שונים (סקלה לוגריתמית) בהשוואה לזו של פחמן דו חמצני. ניטרוסאוקסיד מסוכן פי 265.

### מניפולציה של המיקרוביום בשורשי חיטה

מבוסס על המאמר

Usyskin-Tonne, A., Hadar, Y., Minz, D., 2019. Altering N<sub>2</sub>O emissions by manipulating wheat root bacterial community. Scientific Reports 9, 7613.

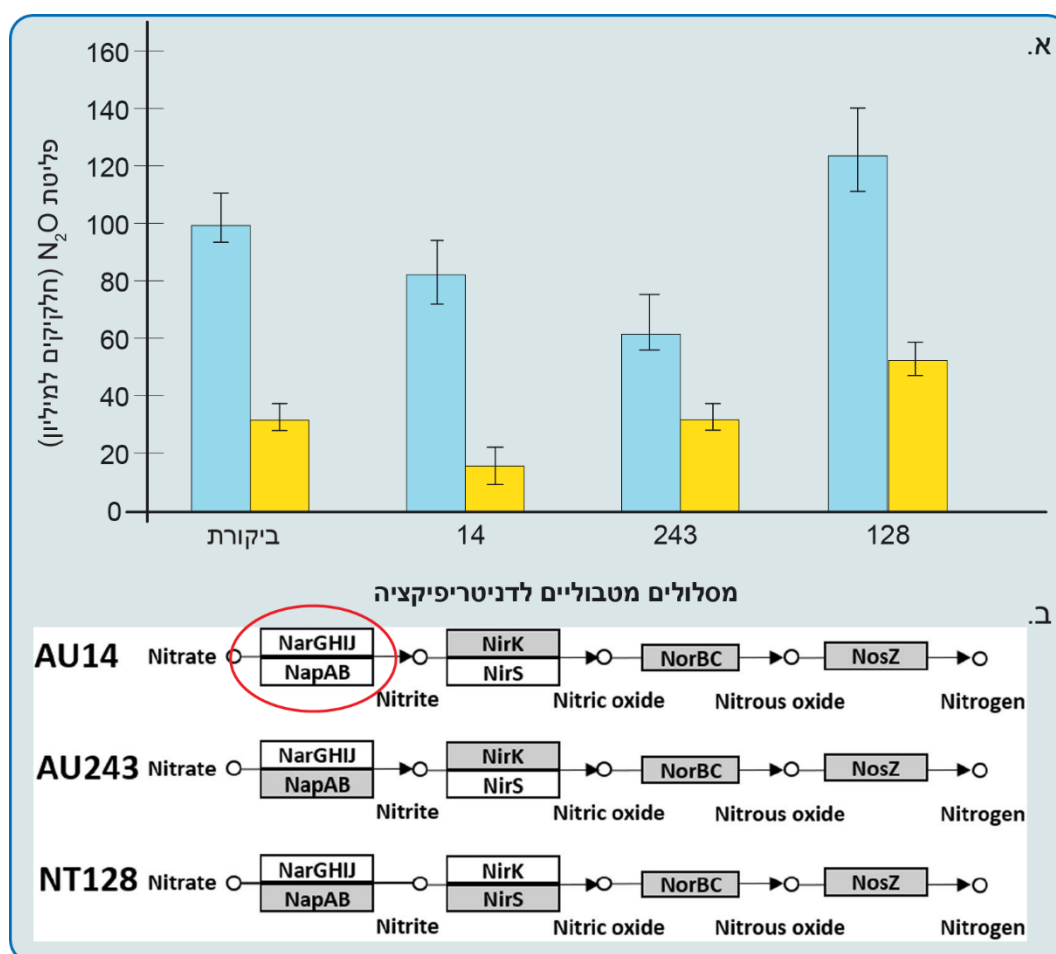
חיטה היא אחד הגידולים החקלאיים החשובים בעולם. בשלב הנביטה, מפרישים שורשי החיטה עד 40% מתוצרי הפוטוסינתזה שלהם (מוטמעים) אל הקרקע, כמגוון רחב של חומרים אורגניים (סוכרים, חומצות קרבוקסיליות, חומצות אמינו ועוד ועוד). חומרים אלו משמשים כמקור לגיוס חברת חיידקים ייחודית. בהינתן תנאים מתאימים (עושר חומר אורגני, ניטראט ותנאים אנאירובים או מיקרו-אאירופיליים) 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. 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- $\Delta G$  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<sub>2</sub>O 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<sub>2</sub>O 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<sub>2</sub>O ל N<sub>2</sub>, 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 לחנקו אטמוספרי.

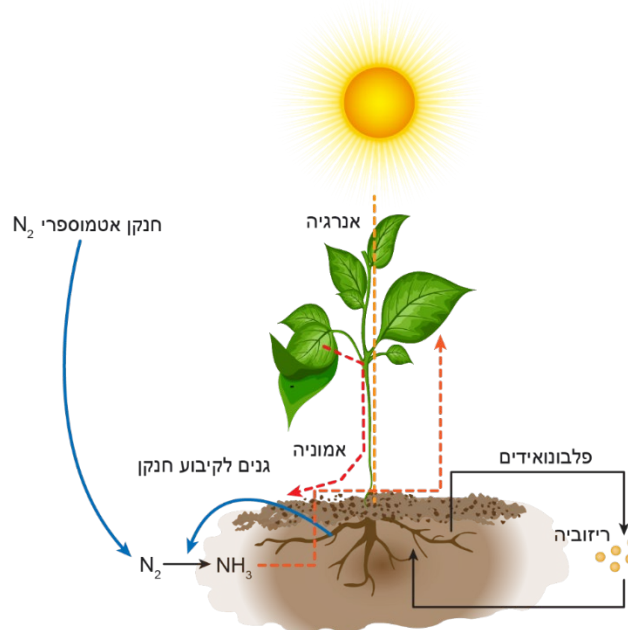


**תמונה 24: א'** פליטת ניטרוס אוקסיד בסביבה מבוקרת, על ידי שלוש תבדידים שונים. כחול – סביבה עשירה בחנקן. כתום – תנאים רגילים. **ב** הרכב האנזימים שאחראים על תהליך הדינאמיקה. תבדיד מס' 14 חסר את האנזים שיודע לחזר ניטראט לניטריט.

## 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.

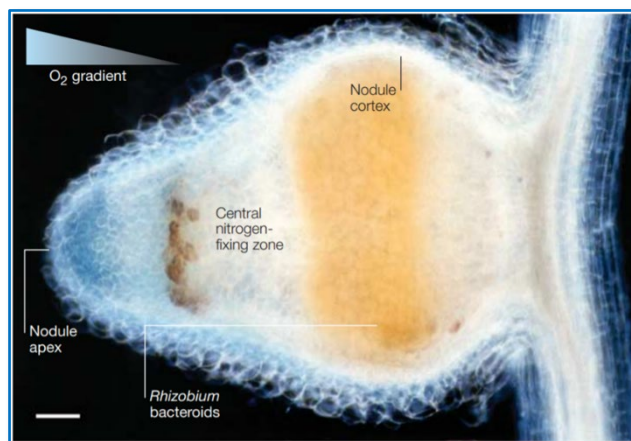
תחילת האינטראקציה בין החיידקים לצמח מתחילה בהפרשה של חומרים (פלבנואידיים) על ידי הצמח שמזוהים על ידי החיידקים. חומרים כימוטקטיים אלה, מזרזים את הגעתם של חיידקי הריזוביום אל השורש ואת התרבותם. מולקולות הפלבנואידיים מפעילות בחיידקים גנים (פקטורי שעתוק הנקראים NOD factors) שאחראים על הסתלסלות היונקות ויצירת הפקעיות. 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 הפקעיות. הפקעית ממשיכה לגדול כל עוד יש לה אספקה מספיקה של מוטמעים עבור החיידקים המתרבים. בתוך הפקעית, מתמיינים החיידקים לצורת חיים ייחודית המכונה בקטרואידיים. הבקטרואידיים הם אלה שאחראים על קיבוע החנקן, אך מאבדים בעצמם את כושר ההתרבות.



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



חיידקי הריזוביום, הם ארוביים 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.



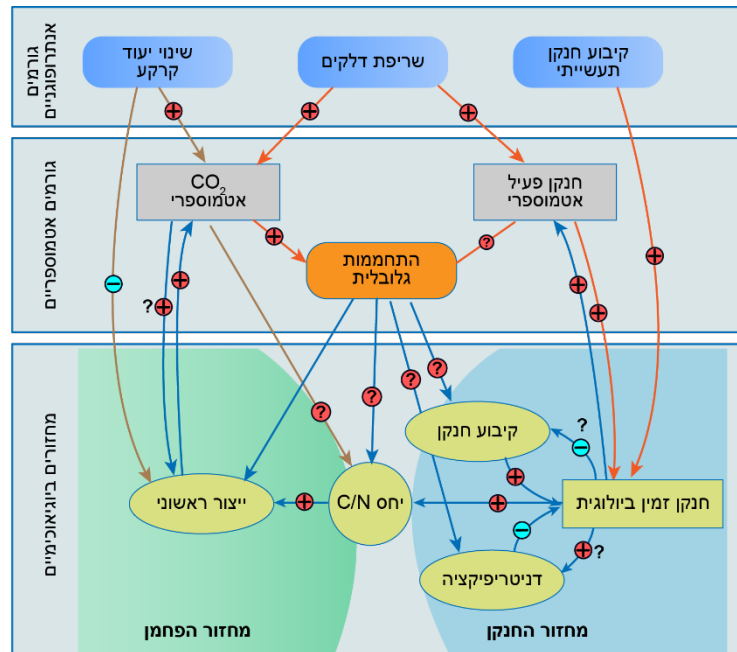
תמונה 26: חתך רחב בפקעית.

## 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.

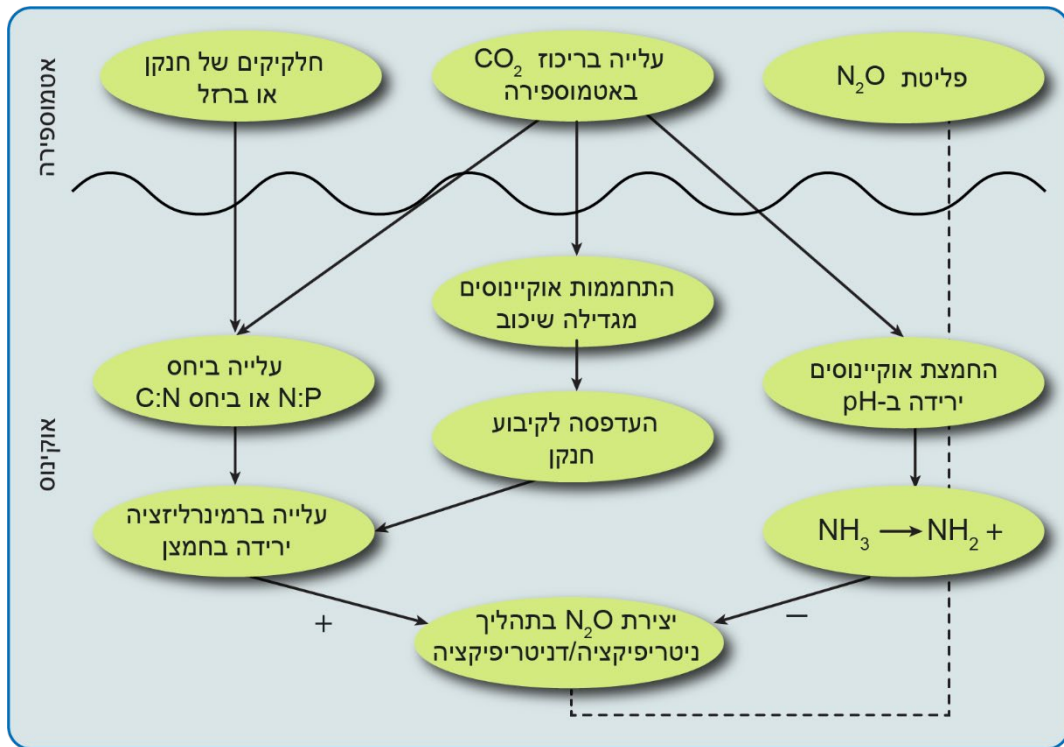
בעידן של שינויי אקלים כה גדולים יש חשיבות מאד גדולה להבנת ההשפעות ההדדיות בין מחזור החנקן-מחזור הפחמן-ומערכת האקלים של כדור הארץ, וחשובה גם ההבחנה בין המערכת הימית, למערכת היבשתית. השאלה שאנו שואלים היא, כיצד תוספת של חנקן אטמוספרי תשפיע על יכולתו של כדור הארץ להמשיך ולהטמיע פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה. 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 לקבע פחמן דו חמצני (תמונה 27). לפי התסריט השני, אם תהליך החמצת אוקיינוסים שנגרם בגלל קליטה

עודפת של  $\text{CO}_2$  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 בטמפרטורה 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:

4. הפוסטר יהיה בגודל של דף A4

5. ניתן לשלב בתוך הפוסטר סרטון קצר שלכם או מהרשת.

6. 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.

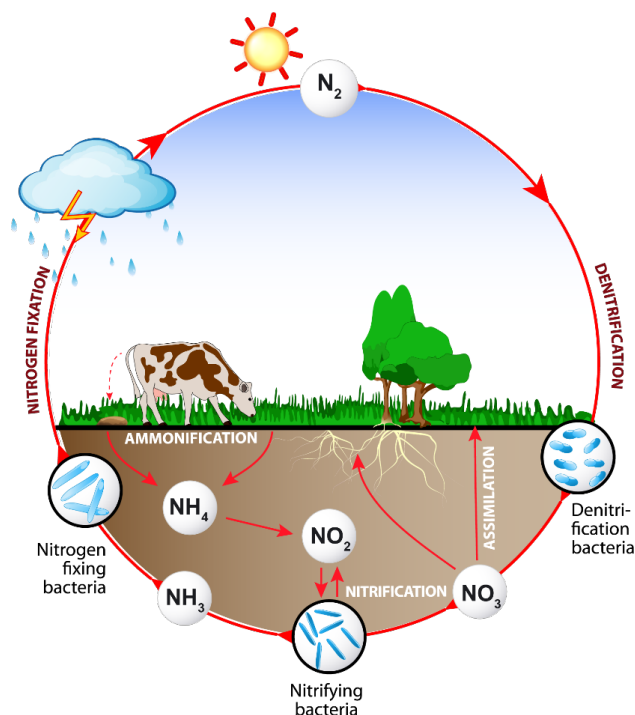
### 5.7.2 שיעור 9: מחזור החנקן

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 מאד 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:

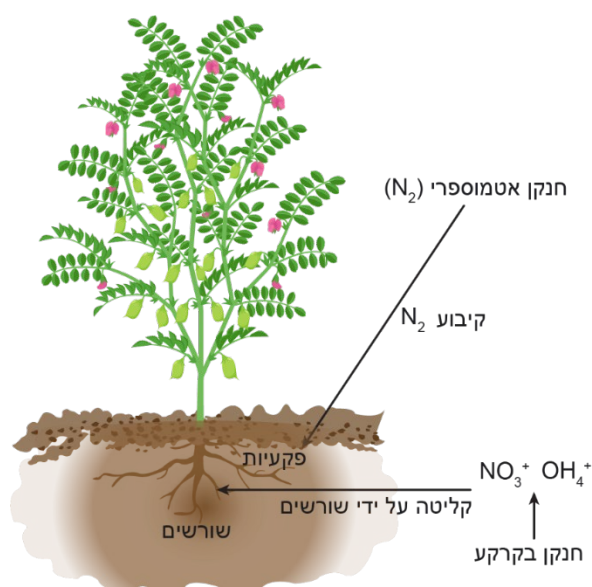
1. לתאר את תהליך קיבוע החנקן על ידי צמחים ממשפחת הקטניות.
2. להסביר את חשיבות התהליך לחקלאות.

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 נחקור 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 שככל 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 האורגניים 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.

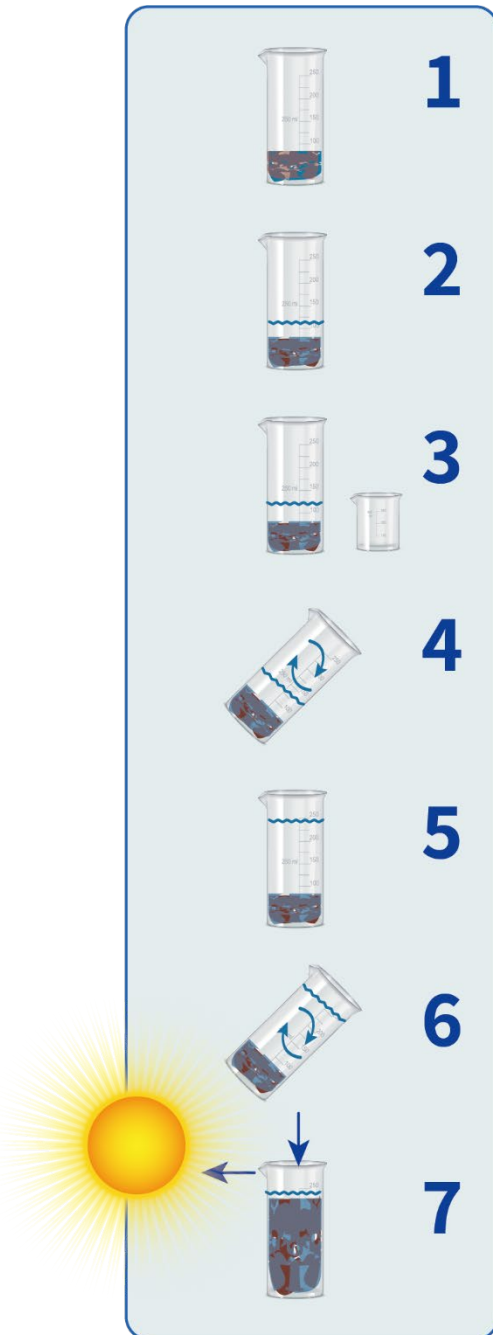
**טבלה 1:** טיפולים שונים לעמודת וינוגרדסקי.

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

500 mM	80 g L <sup>-1</sup>		40 g L <sup>-1</sup>	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 <sup>-1</sup>	2 g L <sup>-1</sup>	0.2 g L <sup>-1</sup>	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 בעמודת 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.

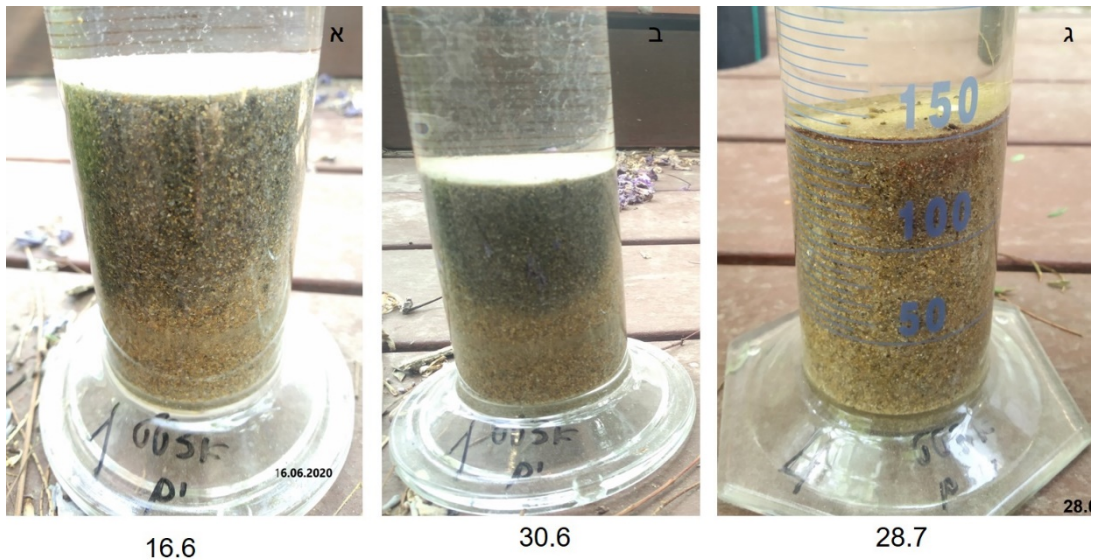
**טבלה 2:** הצעה לטבלת איסוף נתונים.

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		

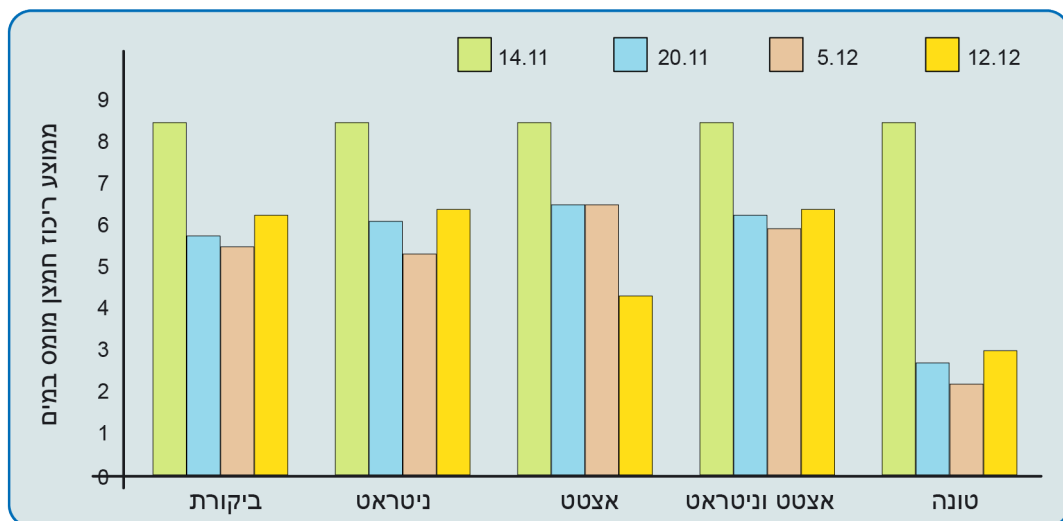
## שיעור 12: תוצאות צפויות לניסוי עם עמודות ווינוגרדסקי

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 בעמודת 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.

מספר בקבוק	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 הטיפול השונים על ריכוז החמצן המומס במים בעמודות השונות.

# פרק 6: השפעת שינוי אקלים ופעילות אדם על

## שירותי המערכת האקולוגית

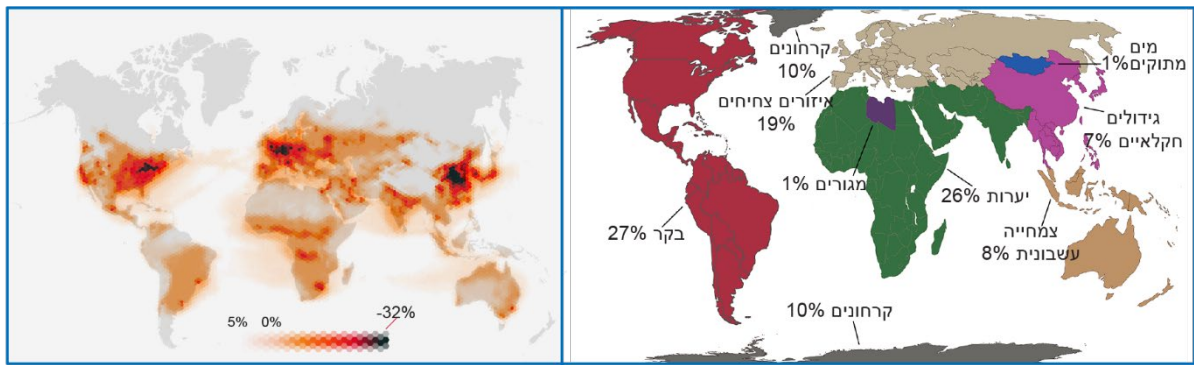
בפרקים הקודמים, הצגנו כיצד פעילות האדם מובילה לשינויי האקלים אותם אנו חווים. דנו בשינויים בהרכב האטמוספירה, ובמחזור החנקן והפחמן כמרכיבים מרכזיים באקלים כדור הארץ. בפרק הזה נציג בהסתכלות רחבה יותר את השפעת האדם על כלל שירותי המערכת האקולוגית.

### 6.1 בעיצומה של ההכחדה השישית

המגוון הביולוגי (Biodiversity) הוא מונח המתאר את כלל השונות בטבע. הוא מתאר את המגוון הגנטי, את מגוון המערכות האקולוגיות, את מגוון מערכות יחסי הגומלין בין ובתוך המינים. בשנים האחרונות, יותר ויותר עבודת מראות כי חלה ירידה דרסטית במגוון המינים בכדור הארץ, לדעתם של חוקרים רבים אנחנו נמצאים בעיצומה של ההכחדה השישית (Ceballos et al., 2015). הגורם המרכזי לפגיע במגוון המינים הוא הרס וקיטוע של בתי גידול. גורמים נוספים המשפיעים על המגוון כוללים, זיהום מים וקרקע, ניצול יתר, חדירה של מינים פולשים ושינויי אקלים.

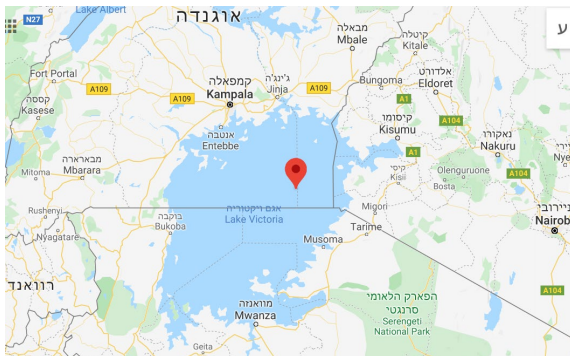
### 6.2 שינוי ייעוד קרקע

כ-40% מהשטח היבשתי (ללא לוחות הקרח) של כדור הארץ משמש כיום לחקלאות (תמונה 33 א'). מכאן שבתי גידול שלמים נהרסו, ומינים נפגעו או נכחדו. בנוסף, להפיכת אזורים נרחבים לחקלאיים, יש השלכות על העשרת הקרקע בחומרי הדברה ונוטריינטים שבהמשך משפיעים אף הם על המערכת האקולוגית. לצד בדיקת ההשפעה של שינוי ייעוד קרקע על הכחדת המינים, אפשר לבדוק את ההשפעה של תהליכים אלו על מגוון המינים. למשל, במחקר שבדק שינויים בעושר מינים ומגוון מינים באזורים נרחבים בעולם, נמצא שבאזורים נרחבים, שינוי בייעוד קרקע לאורך השנים הוביל לירידה של עד כ-30% בעושר המינים (תמונה 33 ב') (Newbold et al., 2015). החוקרים משערים שכל עוד מגמה זו תמשיך עד שנת 2100 צפויה ירידה מתמשכת במגוון המינים.



**תמונה 33:** התפלגות ייעוד הקרקע בעולם (א) והשפעת שינוי ביעוד קרקע על מגוון מינים (ב). (א) כדי להמחיש את השטח הכולל שתופס כל שימוש קרקע בכדור הארץ, חושב השטח וחולק על פני היבשות. למשל שטחי גידול הבקר בעולם, מכסים שטח ששווה בגודלו לזה של אמריקה הצפונית והדרומית. (ב) אזורים בהם קיימת פגיע משמעותית במקוון המינים.

### 6.3 חדירה של מינים פולשים



**תמונה 34:** (א) ימת ויקטוריה והמדינות השכנות. (ב) תושב מחזיק דג גדול של נסיכת הנילוס. תמונה מויקיפדיה.

מין פולש זה אורגניזם שמתפשט באזור הרחוק מאזור תפוצתו המקורי, בסיוע האדם. לאחר שהגיע לאזור החדש, המין מסוגל לקיים את עצמו ללא סיוע. ולבסוף להתרבות באזור החדש. מינים פולשים גורמים לנזקים רבים בשטח אליו הם פלשו, הם מתחרים על משאבים, דוחקים מינים קיימים, משנים את מבנה בית הגידול ועוד. מינים פולשים מאופיינים בדרך כלל ברבייה חזקה, והיעדר טורפים טבעיים, שתי תכונות מרכזיות שמאפשרות להם לשגשג בבית הגידול החדש על חשבון מינים קיימים. אחת הדוגמאות המצוטטות ביותר בנושא מינים פולשים, היא החדרת הדג נסיכת הנילוס, על ידי הבריטים לימת ויקטוריה באפריקה בשנות ה-50 של המאה העשרים. ימת ויקטוריה משתרעת על פני שטח של 70,000 ק"מ רבועים וגובלת במדינות, קניה, אוגנדה וטנזניה. במקור כללה הימה מגוון של כ-500 מיני דגים מקומיים, וספקה מקור פרנסה חשוב לתושבי האזור. הבריטים שרצו

לשפר את הכנסותיהם מייצוא דיג, החליטו להחדיר לימה את דג נסיכת הנילוס. בניגוד לדגים הקטנים המקומיים, נסיכת הנילוס הוא דג טורף גדול. כתוצאה מהחדרתו לימה, תוך מספר עשורים חלה עליה גדולה באוכלוסיית הדג במקביל לירידה דראסטית במגוון המינים הקיימים (Pringle, 2005). במקביל לשינויים הביולוגיים בימה, חלו שינויים חברתיים מרחיקי לכת. את הדגים הקטנים דגו מקומיים, נשים וגברים, בעזרת רשתות וכלי שיט קטנים. לעומת זאת, לשם דיג נסיכת הנילוס היה צורך בהכנסת כלי שיט

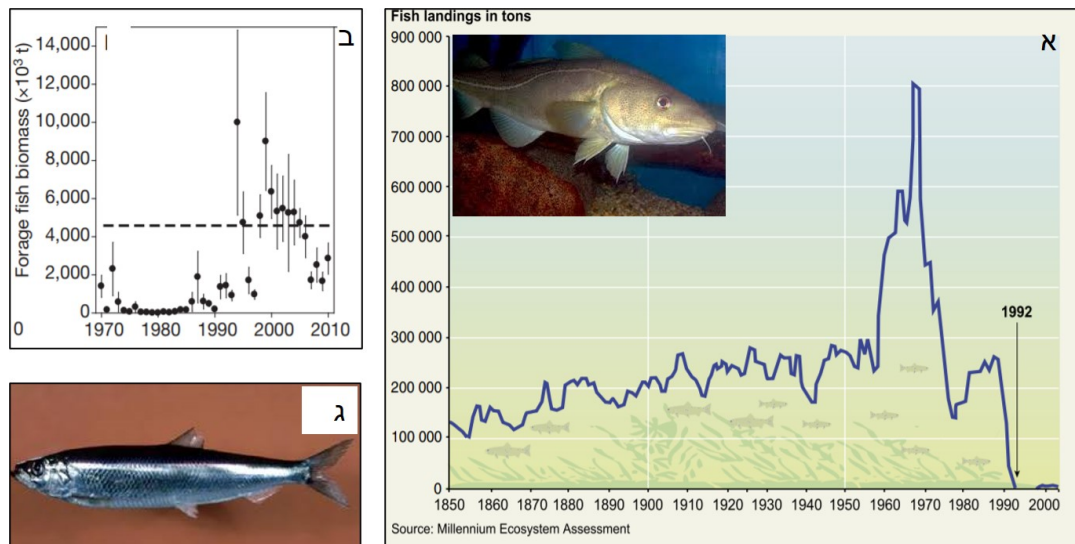
גדולים ומאסיביים. כתוצאה מכך העובדים המקומיים הפכו להיות עובדי פס ייצור, והנשים נפלטו ממעגל העבודה. בנוסף, דגים קטנים ניתן היה לייבש בשמש לצורך שימורם, אך את נסיכת הנילוס היה צריך לייבש במעשנות גדולות שבבנו תוך כדי פגיע קשה ביערות שגבלו באגם. מה שהוביל לסחף קרקע מאסיבי והפך את הקרקע ללא ראוייה לחקלאות. דגי נסית הנילוס משווקים לאירופה והמרווחים העיקריים הן הממשלות ולא התושבים הגוועים ברעב, שכן אין להם אמצעים לקנות את הדגים היקרים. אם זה לא מספיק אז המטוסים שחוזרים מאירופה, מביאים בחזרה לאפריקה נשק ותחמושת המשמשים למלחמות האזרחים באזור. כתוצאה משינויים חברתיים אלה, מחלות, זנות ואידס התפשטו מסביב לאגם. מכאן ניתן לראות שלהחזרה של מינים פולשים בין אם בטעות או במתכוון, יכולות להיות השלכות ביולוגיות וחברתיות נרחבות. מומלץ להרחיב בנושא ולצפות בסרט התיעודי "הסיוט של דארווין" שמתאר בצורה מרשימה את ההשפעות הביולוגיות והחברתיות על האוכלוסייה המקומית.

## 6.4 ניצול יתר

הקוד האטלנטי הוא דג טורף גדול ששוכן באזור קרקעית האוקיאנוס. באזור צפון האוקיאנוס האטלנטי, ולאורך שנים רבות התקיים מסחר פעיל של דייג הקוד על ידי האוכלוסייה המקומית בקנדה ובארצות הברית. לאורך שנים רבות מאמץ הדיג היה יחסית מתון ועקבי (תמונה 35 א'). באמצע שנות ה-60 של המאה העשרים, החלו להכניס כלי דיג משוכללים יותר, ומאמץ הדיג התגבר עד כדי דעיכה של האוכלוסייה. בשנות ה-90 של המאה ה-20 יצא צו נשיאותי שאסר את המשך הדיג בחופי קנדה. בהמשך הוחלו הגבלות דומות גם ברוסיה ובארצות הברית. לקח כמעט 20 שנה, לאחר איסור הדיג, כדי לראות שינוי מקומי באוכלוסיית דגי הקוד. נשאלת השאלה למה?

הירידה הגדולה באוכלוסיית הקוד, שהיה טורף העל במערכת, הובילה לעליה בכמותם של דגים קטנים יותר, שהיו בדרך כלל מזונו של הקוד (תמונה 35 ב'). הכמות הגדולה של דגים אלה, כמו ההרינג האטלנטי (תמונה 35 ג'), אפשרה להם לטרוף את הדרגות הצעירות של דגי הקוד ובכך למנוע את שיקום האוכלוסייה. למעשה התרחש כאן היפוך תפקידים בין טורף לנטרף. מקרה זה, הוא אחד מיני רבים המתארים ניצול יתר של המערכת האקולוגית עד כדי מצב שבו אין למערכת יכולת לשקם את עצמה. לניצול יתר יש גם היבטים חברתיים, קריסת ענף הדיג הובילה לאובדן פרנסה שלא עשרות אלפי אנשים באזור קנדה וארצות הברית (Frank et al., 2011).





**תמונה 35:** מאמץ דיג הקוד האטלנטי בין השנים 1850-2000. א) דייג יתר בשנות ה-60 של המאה העשרים הוביל לירידה דראסטית באוכלוסיית הקוד. ב) במקביל לירידה בכמות דגי הקוד, חלה עליה בכמותם של דגים קטנים יותר כמו ההרינג האטלנטי (*Clupea harengus*). ג) דגי ההרינג אטלנטי טורפים את הדרגות הצעירות של הקוד ומעכבים את שיקום אוכלוסייתו. תמונה מתוך: Frank, et al (2011).

## 6.5 שינויי אקלים

הדו"ח הבין ממשלתי לשינויי אקלים (IPCC) (Meyer, 2014) בחן בין השאר, באיזו מידה שינויים במערכות ביולוגיות הם תוצאה של שינויי אקלים. משימה זו היא לא פשוטה שכן מחקרים רבים בתחום הם בהכרח מחקרים קורלטיביים, והסקת המסקנות היא על כן סובייקטיבית. בנוסף, הזכרנו כבר שהפגיעה המרכזית ביותר במערכות ביולוגיות היא כתוצאה מהרס וקיטוע של בתי גידול, ניצול ייתר ומינים פולשים. עובדות שמאפשרות לאנשים רבים, ביניהם לקובעי מדיניות, לטעון שלשינויי אקלים השפעה מועטה על מערכות טבעיות. ואכן ההשפעות של שינויי אקלים על המגוון הביולוגי, הן ככל הנראה איטיות יותר בהשוואה לסלילת כביש, בירוא יער, או הקמת שדה חקלאי, אבל אין לזלזל בהן. אפשר לשער כיצד תופעות כמו מדבור או הצפות יכולות להוביל ללחצי סלקציה שישפיעו על מגוון המינים בבית גידול מסוים. אחת מהשפעות הנחקרות ביותר של שינויי אקלים על יצורים חיים, היא שינויי דפוס פעילות (phenological shifts) (Cohen et al., 2018). מושג זה מתייחס לפגיעה בתזמון של מחזורים עונתיים של בעלי חיים וצמחים. למשל, פגיעה בתזמון שבין הגעת ציפורים מקננות למקור המזון (Mckinney et al., 2012). במחקר ארוך טווח שבדק את השפעת שינויי האקלים על מועד ההגעה של ציפורי שיר נמצא שבאזורים שהפכו להיות קרים יותר, תאריך ההטלה התאחר, ובאזורים שהתחממו, תאריך ההטלה הוקדם. שינויים אלה עלולים להשפיע על זמינות המשאבים, ושרידות המין. דוגמאות נוספות כוללות בין השאר, פגיעה בתזמון בין שיא הפריחה להגעת מאביקים, ובין טפילים לפונדקאים. כמו כן נראה שבאזורים צפוניים יותר, לעלייה בטמפרטורה יש השפעה גדולה יותר על שינויים פנולוגיים בהשוואה לאזורים ממוזגים. הלבנת אלמוגים, היא עוד תופעה המשויכת לעלית טמפרטורה מי הים. אבל במקרה זה, יתכן ולאמוגים יש פתרון. אלמוגי אבן בוני שונית מקיימים סימביוזה עם אצות חד תאיות מהסוג



*Symbiodinium*. בכל אלמוג בדרך כלל נמצא דומיננטיות של מין אחד של אצה, למרות שיכולים להיות בו זמנית מינים נוספים. במחקר שבדק את הרכב חברת האצות באלמוגי אבן, תוארו בשיטות מולקולריות ארבע קבוצות של סימביונטים (Clad). החוקרים מצאו שבאזורים בהם הייתה עליה משמעותית בטמפרטורת המים, למשל כתוצאה מתופעת אל-ניניו, שכיחות האלמוגים שהכילו סוג מסויים של סימביונט עלתה בצורה משמעותית, ואלמוגים אלה לא חוו הלבנה (Baker et al., 2004). השערת החוקרים היא שמדובר בסימביונט שהוא עמיד באופן טבעי לטמפרטורות גבוהות ועל כן מקנה לאלמוגים באזורים חמים יותר יתרון.

## 6.6 שירותי המערכת האקולוגית

בני האדם נהנים ממגוון רחב של שירותים אותם הם מקבלים מהמערכות האקולוגיות. אלה כוללים בין השאר, אוויר נקי, מים נקיים, מזון, מחסה, תרופות, סיבים, ופנאי. למעשה, אפשר לראות גם במגוון הביולוגי שירות מערכת בפני עצמו (Mace et al., 2012). המגוון הביולוגי חשוב מאחר שהוא זה, שאחראי על אספקת שירותי המערכת האקולוגית. לדוגמא: צמחים מספקים לנו חמצן, חרקים מספקים שירתי האבקה, חומרים המופקים מצמחים משמשים בתעשיית התרופות, ועוד. אולם, לאור העלייה העצומה באוכלוסיית האדם בכדור הארץ, והעלייה הגדולה אף יותר בצריכה האנושית (תמונה 7ב'), נשקפת סכנה משמעותית למגוון הביולוגי ובהתאם לפגיעה בכל שירותי המערכת האקולוגית. ולכן אנחנו צריכים לראות כיצד אנחנו יכולים לשמור על המגוון הביולוגי.

בשנת 2005 התפרסם הדו"ח – "The Millennium Ecosystem Assessment" הדוח הוזמן על ידי האו"ם והשתתפו בכתיבתו מעל ל 1360 חוקרים מכל העולם. כותבי הדו"ח, בחנו דרכים חדשות בעזרתן ניתן היה להעריך את ההשפעה של החלטות של קובעי מדיניות ופעילויות אדם על המבנה והתהליכים של מערכות אקולוגיות, השירותים שהן מספקות, ורווחת האדם. כותבי הדו"ח ניתחו בצורה חדשנית את ההשפעה של שינויי סביבה על מערכות אקולוגיות ועל רווחת האדם. הם בחנו מערכות אקולוגיות לפי השירותים שהן מספקות לחברה, כיצד שירותים אלו תורמים לאדם, וכיצד פעילויות אדם משנות מערכות אקולוגיות ואת השירותים שהן מספקות (Overpeck et al., 2013), (תמונה 36).

"בעשרים שנה האחרונות שינו בני האדם את המערכות האקולוגיות בצורה נרחבת יותר מאשר כל תקופה בהיסטוריה"

היכן האתגר?



שיקולי רווח והפסד של קובעי מדיניות

תמונה 36: המורכבות בשמירה על מערכות אקולוגיות.

## 6.7 למה צריך מגוון ביולוגי?

עבודות אקולוגיות רבות הראו שככל שמספר המינים במערכת גדול יותר, התפקוד של המערכת והשירותים שהיא מספקת הינם טובים יותר. מאחר והרבה מחקרים נעשו בקנה מידה קטן, נשאלת השאלה האם ההנחות בדבר הנחיצות במספר מינים גדול תהיה נכונה גם בשדה. שתי הנחות מובילות למסקנות הפוכות בשאלה זו. לפי ההנחה הראשונה, צפוי שכלל שהשטח הגיאוגרפי גדל, כך נצטרך יותר מינים לספק את השירות, שכן בכל אזור גיאוגרפי יתפקדו מינים אחרים. מצד שני, ידוע שבהרבה חברות אנו מוצאים דומיננטיות של מספר מצומצם של מינים לצד מגוון של מינים נדירים יותר. מכאן, שיתכן שבטבע שירותי המערכת מסופקים על ידי מספר מצומצם של מספר מינים דומיננטיים (Winfree et al., 2018). בעבודה שבדקה את מספר המאביקים הדרוש להאבקה של שלושה גידולים חקלאיים שונים, נמצא שמספר מיני הדבורים שהיה דרוש להאבקת גידולים באתר בדיקה אחד היה בממוצע 5.5 דבורים, אבל ברגע שלקחו בחשבון את כל אתרי הניסוי גם יחד, מספר מיני הדבורים שהיה נחוץ להשגת אותו מאמץ האבקה, היה גדול בהרבה (Winfree et al., 2018). בנקודה זו חשוב לעצור ולהציג צד נוסף של המטבע. לפי הטיעון המרכזי שהוצג כרגע, חשוב לשמור על מגוון גדול של דבורים משיקולים של שירותי מערכת. מכאן שאם ניישם מדיניות של שימור שירותי מערכת אז ניטיב עם מגוון הדבורים. אך מאמר שפורסם עלי ידי (Kleijn et al., 2015) מצא שמספר מצומצם של דבורי בר מבצע את רוב שירותי ההאבקה. מכאן שמינים נדירים ושנמצאים בסכנה, ושאינם תורמים הרבה למאמץ ההאבקה, לא ייהנו מצעדים לשיפור שירותי המערכת האקולוגית. מצד שני, אם ינקטו צעדים לשימור המגוון הביולוגי פשוט כי הוא חשוב, אז גם מינים אלה ייהנו מכך.

כשרוצים לבחון את ההשפעה של מגוון המינים, על שירותי המערכת האקולוגית, חשוב לשים לב לאינטראקציות בין מינים השייכים לרמות טרופיות שונות. שכן, התפקוד של קבוצה טקסונומית אחת, יכול להיות תלוי בכמות ובעושר של מינים השייכים לקבוצות טקסונומיות שונות. למשל, כמות יכולה להיות הגורם המרכזי שישפיע על קצב של תהליך ביוגיאוכימי, מצד שני, האבקה של גידולים חקלאיים אולי תהיה

תלויה בעושר במינים ולא דווקא בכמות (Soliveres et al., 2016). במחקר שבדק, את האינטראקציה של מספר גדול מאד של פרטים מקבוצות טקסונומיות מגוונות, נמצא שלעושר המינים בין רמות טרופיות שונות (למשל, מפרקים, צמחוניים, ויצרנים) הייתה השפעה משמעותית חיובית על תפקודי המערכת האקולוגית, בהשוואה לעושר המינים שנמצא עבור קבוצה טקסונומית נפרדת (Soliveres et al., 2016).

## 6.8 הערך הכלכלי של המגוון הביולוגי

זו הפעם הראשונה בהיסטוריה של כדור הארץ שמעל 50% מאוכלוסיית העולם מתגוררת בערים. יתר על כן, רוב הערים ממוקמות בקרבת החופים, מה שהופך אותן לפגיעות יחסית לשינויי אקלים ובתלות גדולה לתפקוד תקין של מערכת החופים. ניתן היה לשער שהחיים בעיר יהוו פתרון אקולוגי נהדר, אבל "המרחב האקולוגי" שערים אלה דורשות הוא עצום. כל זאת למרות שהטח העירוני תופס בסה"כ כשני אחוזים משטח היבשה של כדור הארץ. במחקר שנערך על העיר לונדון, התגלה שטבעית הרגל האקולוגית של העיר גדולה פי 300 מהשטח הגאוגרפי שלה, ומהווה פי שניים מהשטח של כל בריטניה (Best foot forward 2000). שינויי אקלים, שינוי בשימושי קרקע, מינים פולשים, ניצול יתר, זיהום, גידול אוכלוסייה וגידול כלכלי, כולם גדלים בשנים האחרונות וצפויים להמשיך במגמה זו. מכאן, שהאנושות נכנסת למצב חדש שלא הכירה בעבר והאתגרים שאנו עומדים בפניהם עם עצומים (Carpenter et al., 2009).

## 6.9 שיעורים ומשימות

### 6.9.1 שיעור 13: טרגדיית נחלת הכלל

מטרת המשחק היא להמחיש לתלמידים את המשמעות של המושג ניצול יתר.

**בתום השיעור התלמיד ידע:**

1. להסביר מהי דילמת המרעה המשותף (טרגדיית נחלת הכלל).
2. ידע להדגים כיצד "הטרגדיה" באה לידי ביטוי במערכות ביולוגיות שונות.

**מספר שיעורים:** שיעור אחד למשחק עצמו ושיעור נוסף להצגת הנושא.

ידע קודם נדרש: לא הכרחי.

**שלום לכולם,**

אתם עשרה מגדלי בקר החולקים אחו פתוח וחופשי לשימוש. לכל אחד מכם יש 3 פרות שמניבות כל אחת 1 ליטר חלב ביום בתנאים מיטביים. ליטר חלב נמכר בשוק במחיר של 2 שקלים. האחו יכול לכלכל בצורה

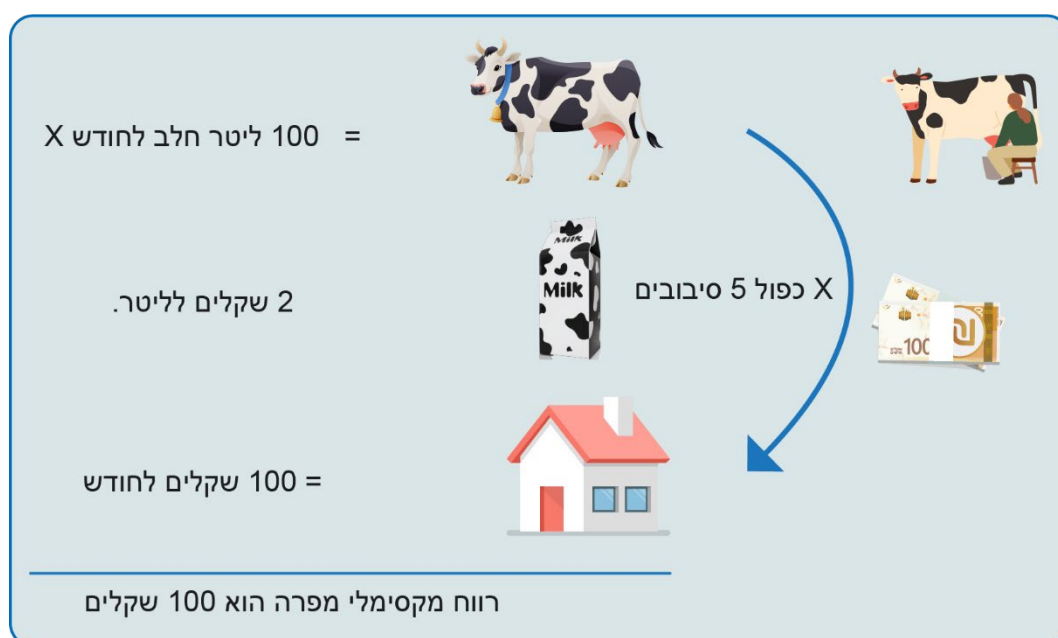
נאותה מקסימום של 40 פרות אך אם תעברו את המכסה הזאת, הרווח האישי שלכם עבור כל אחת מהפרות יקטן ב 0.1 יחידות חלב עבור כל פרה עודפת.

**מטרת המשחק:** המטרה שלכם היא למקסם את הרווח הכלכלי האישי שלכם ולהגדיל את עדר הפרות שלכם.

### מהלך המשחק:

המשחק משוחק למשך 10 סיבובים כל אחד מהם מדמה שנה בחיי האחו. בכל סיבוב תתבקשו להחליט לכמה פרות אתם נותנים לרעות באחו. את ההחלטה אתם תכתבו על פתק ולא תוכלו להתייעץ עם שאר החקלאים. בתוך דקה, כל המשתתפים יחשפו בבת אחת את מספר הפרות שהם שלחו לשדה ויחושב הרווח הכלכלי שלהם עבור אותו הסיבוב. לפני הסיבוב הבא במשחק תוכלו לבחור האם לקנות פרה נוספת במחיר של 1 שקל.

**סיום המשחק:** בתום 10 סיבובים נבדוק את הרווח האישי של כל חקלאי, המנצח יקבל שקית שוקו!.



קבוצה	סיבוב	מספר פרות	סה"כ תנובת חלב
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

למורה:

סביר להניח שהתלמידים מהר מאד יגרמו לניצול יתר של שטח הרעיה על ידי שליחת פרות רבות ככל שניתן לאחו. זה יהיה הרגע לעצור את המשחק ולעבור לחלק הבא.

**חלק שני:**

1. קראו את המידע המצורף על [דילמת המרעה המשותף](#).

2. הסבירו את הדילמה במילים שלכם.

3. מה דעתכם על הפתרונות המוצעים?

4. האם תוכלו לחשוב על דוגמה נוספת לדילמה זו מחיי היום יום שלכם?

## 6.9.2 שיעור 14: מחקר שדה - חוקרים את המגוון הביולוגי בעזרת מלכודות

### נפילה

מטרת היחידה היא לחשוף את התלמידים למחקר אקולוגי וללמדם דרך כך את שלבי החקר המדעי. בין השאר נוכל לשאול שאלות ערכיות הנוגעות להשפעת האדם על מגוון המינים. האם אנחנו עושים רק נזק? האם ניתן לחזור אחורה ולתקן? וכיצד ניתן לעשות זאת? נושאים אלה הם חלק מהנושא הרחב "מערכות אקולוגיות" שהוא נושא חובה הנלמד בכיתה ח' וט'.

כדי לבצע את המחקר אנחנו מציעים לבצע דיגום של פרוקי רגליים, בשטחים הפתוחים ליד בית הספר בעזרת מלכודות נפילה. מערכת זו יחסית קלה לבניה ודורשת תחזוקה מינימלית. ההתמקדות בפרוקי הרגליים חושפת את התלמידים למגוון רחב של יצורים והתאמות לבית גידול כמו גם למגוון רחב של דרכי הזנה. כמו כן, העבודה מאפשרת לנו לחקור גם את עולם הצומח, לתאר ולהכיר מספר מיני צומח נפוצים, לתאר את התאמתם לבית הגידול ואת דרך הרבייה שלהם. בנוסף, בתי ספר שיבצעו את המחקר לאורך מספר שנים, יוכלו ליצור מאגר מידע רב שנתי באזור בית הספר שיאפשר השוואה וחקר של הסביבה המשתנה לאורך הזמן.

## בתום היחידה ידע התלמיד:

1. לתאר את הביולוגיה קבוצות נבחרות של פרוקי רגליים וצמחים בבית הגידול.
2. להסביר את המושג "מגוון ביולוגי" ואת החשיבות בשמירה עליו.
3. לכתוב עבודת מחקר מדעית.
4. לנתח ולהציג נתונים בתרשימים ובטבלאות.

## ידע קודם נדרש:

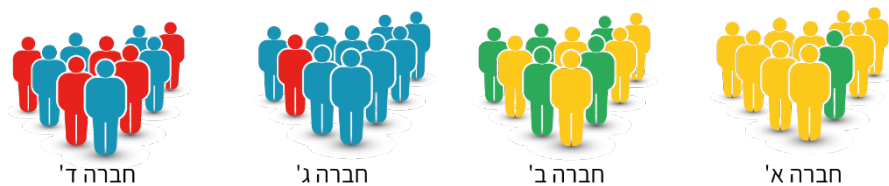
אין צורך בידע קודם, הנושאים שהתלמידים צריכים להכיר הם מגוונים מאד וחבל יהיה ללמדם בכיתה לפני המפגש בשדה. אנחנו כן חושבים שחשוב לעשות פעילות פתיחה מלהיבה בכיתה כדי ליצור מוטיבציה של לתלמידים לבצע את המחקר. כדאי לשלוח את התלמידים למשימות סיכום קצרות להרחיב על אורגניזמים נבחרים שנמצאו בשדה.

## מספר שיעורים נדרש:

מומלץ לצאת פעמיים בחודש, במשך חודשיים לפחות. שיא הפריחה והפעילות של החרקים הוא בסוף פברואר ותחילת מרץ. אלה הם זמנים אידאליים לתכנון הפעילות. אפשר גם לצאת פעם או פעמיים ממש בחורף לצורך השוואה לאביב, או להתחיל באביב ולסיים בקיץ.

## רקע קצר למורה:

מערכות אקולוגיות, מורכבת מחברות של חי וצומח שביניהן ובתוכן מתקיימים יחסי גומלין כמו: הדדיות, טריפה, קומנסליזם ותחרות. חברה - היא כלל המינים החיים בבית גידול מסוים. אחת הדרכים לתיאור של חברה היא בעזרת מדדים המתארים את הרכב המינים ומגוון המינים בחברה. הרכב המינים (species composition) הוא מונח המתאר מי הם המינים הנמצאים בחברה. מגוון המינים (biodiversity), הוא מדד המתאר את עושר המינים (species Richness) והתפלגות השיפעה היחסית (Species Relative Abundance), של כל מין. ניקח לדוגמא את חברה א' וחברה ב' באיור למטה. בשתייהן קיימים שני מינים, ובשתייהן מספר הפרטים הכולל הוא זהה. אבל השיפעה היחסית של כל מין בחברות הללו היא שונה. בחברה א' נמצא רק פרט אחד בצבע ירוק בהשוואה לארבעה פרטים בחברה ב'. חברות ג' וד' לשם השוואה מציגות הרכב מינים זהה לזה של חברות א' ו ב' אולם זהות המינים היא שונה לגמרי. מכאן שעל-ידי תיאור הרכב המינים, והשיפעה היחסית ביניהם אפשר להשוות בין חברות דומות הנמצאות בבתי גידול שונים או בין אותה החברה לאורך זמן.



## שלבי העבודה

## הכנות למורה

מלכודת נפילה, כשמה כן היא, היא מלכודת שמאפשרת לנו לדגום פרוקי רגליים שנפלו לתוכה במהלך פרק זמן אותו אנו מגדירים מראש. מאד חשוב להקפיד לסגור את המלכודת בימים בהם היא לא בשימוש כדי שלא יפלו יצורים חיים לתוכה וימותו שם ברעב, מחום או גשם. מלכודת נפילה מורכבת מבור קטן שנעשה בקרקע לתוכה מכניסים קופסת פלסטיק. מאד חשוב ששפת הקופסה תהיה מעט מתחת לפני הקרקע אחרת חרקים ילכו מסביב ולא יפלו פנימה. כדי שדפנות הבור לא יקרסו בכל פעם שמוצאים את הקופסה לבדיקה, מומלץ להכניס לבור צינור ביוב בקוטר 4 צול לתמיכה בבור. ראו כאן [סרטון הדגמה](#) כיצד להכין מלכודת נפילה. אפשר להשתמש במכסים של קופסאות החומוס במקום המכסה המתואר בסרטון.

### שלב ראשון: הכנת המלכודות עם התלמידים

1. הטמנת מלכודות נפילה עם התלמידים בסביבת בית הספר. נרצה לחפש אזורים טבעיים ולהשוות אותם לגינות מעובדות. במידה ובקרבת בית הספר נמצאת בריכת חורף, דיונת חול או חוף הים, נרצה לבחור את אזורים אלו לשם השוואה.
2. אפשר כמובן להתמקד בבית גידול אחד ולבחון אותו לאורך תקופה ארוכה.
3. נחלק את הכיתה לקבוצות, לכל קבוצה מלכודת עליה היא אחראית.
4. יציאה לשדה לדיגום במהלכו נמדוד נתונים אביוטיים כמו: טמפרטורת אוויר וקרקע, עצמת קרינה ולחות. ובמקביל נספור ונתעד את היצורים שנפלו למלכודת. את כל הנתונים מכניסים בצורה מסודרת לדף הסיור המצורף בסוף המשימה (שימו לב! לא חייבים להשתמש בכל הדף, אפשר לבחור לאסוף רק נתונים מסוימים, בהתאם לכיתה, ולמורכבות של בית הגידול).

**חשוב! את המלכודת יפתח המורה יום קודם ליום הדיגום. בעת בדיקת המלכודת, חשוב לשחרר את היצורים ולסגור את המלכודות.**

### שלב שני: מנסחים שאלת מחקר

אנו ממליצים ללוות את הפעילות בעזרת שאלות מחקר. ננסח שאלת מחקר לפני הטמנת המלכודות ובסיום הדיגום נחזור אל שאלות המחקר ונבדוק האם ניתן לענות עליהן בעזרת הנתונים שאספנו. דוגמה לשאלות מחקר:

- א. האם לאופי בית הגידול (שטח טבעי או שטח מעובד) יש השפעה על מגוון המינים?
  - ב. כיצד קרבה לכבישים, או שבילי הליכה תשפיע על מגוון המינים?
1. כל קבוצה מרכזת את התוצאות שלה בטבלה מתאימה. לאחר מכן תיבחר דרך ההצגה הטובה ביותר של הנתונים. ראו דוגמה לטבלת איסוף נתונים.

תאריך	מספר קבוצה	טמפ' האוויר	טמפ' קרקע	לחות אוויר	מלכודת מס'	מקום	עכבישנים	סרטני יבשה	חיפושיות	נמלים	אחר	סה"כ מגוון

## שלב שלישי: עיבוד, ניתוח ותאור התוצאות

1. חוזרים אל השאלות ובודקים על אילו שאלות חקר ניתן לענות בעזרת הנתונים שאספנו. במידת הצורך, מתקנים את שאלות החקר ובחרים שאלה אחת.
2. מנתחים את הנתונים ומסכמים אותם בגרפים או בטבלאות מתאימות.
3. מתארים את התוצאות במלל ומסיקים מסקנות.

## שלב רביעי: כתיבת העבודה

### העבודה תכתב בגופן אריאל גודל 12 מרווח שורה 1.5.

1. עמוד מס' 1: כותרת ושמות מגישים
2. עמוד מס' 2: מבוא (חצי עמוד עד עמוד) על בית הגידול הנבחר כמערכת אקולוגית. מאפיינים, בעלי חיים וצמחים אופייניים. בסוף המבוא תצוין מטרת המחקר, שאלת החקר, השערת החקר.
3. עמוד מס' 3: הצגה ותיאור תוצאות.
4. עמוד מס' 4: מסקנות.
5. עמוד מס' 5: רפלקציה אישית של כל תלמיד בנפרד.

## רשימת ספרות למורה ולתלמיד

1. [חוברת מידע על חולות החוף](#)
2. [מגדיר פרוקי רגליים](#)
3. [מגדיר חרקים](#)
4. האתר [חרקים עולם קטן בגדול](#)
5. החי והצומח של ארץ ישראל כרך 3 "החרקים", כרך 2 "פרוקי רגליים יבשתיים". (נמצאים בסביבה של מט"ח)

## תרגיל מחקר אקולוגי – דף סיור

שמות חברי הצוות: \_\_\_\_\_  
תאריך: \_\_\_\_\_ שעה: \_\_\_\_\_ אתר המחקר: \_\_\_\_\_  
בית הגידול הנבדק: \_\_\_\_\_

### מאפייני בית הגידול

אפיינו את בית הגידול על בסיס הנצפה בשטח:

תארו תיאור מילולי של השטח, מאפיינים בולטים (כמו צמחיה, טופוגרפיה, סוג קרקע, מבנים).

---

---

---



צרפו תרשים השטח או צילום שמאפיין את בית הגידול.

## מדידות

בצעו מדידות של גורמים ביוטיים ומדידות של גורמים אביוטיים במהלך הסיור\*.

לגבי כל בדיקה פרטו:

- מה נבדק?
- כיצד נבדק?
- חשיבות הבדיקה: הסבר מדוע בדיקה מסוימת היא רלוונטית או יכולה להיות כזו.
- תוצאות המדידות, כולל יחידות מדידה.

**מדידות של גורמים אביוטיים:** בצעו את המדידות הבאות וסכמו את התוצאות בטבלה (בשורת ה"מיקום" רשמו היכן התבצעו המדידות, על המדרון החשוף, מתחת לשיח וכו):

לחות הקרקע בעומק 5 ס"מ (רטוב, לח, יבש) או חישוב לאחר ייבוש בכיתה	טמפרטורת קרקע בעומק 5 ס"מ (°C)	עוצמת קרינה חוזרת מהקרקע (Lux)		לחות אוויר יחסית (%) RH	מהירות הרוח (קמ"ש) * (Km/h)	טמפרטורת האוויר (°C)	
		באזור מואר	באזור מוצל				
							מיקום
							תוצאת המדידה

### מדידות של גורמים ביוטיים:

#### 1. עושר מיני צומח בריבוע הדגימה:

התבוננו בשטח שליד מלכודת הנפילה אותה אתם חוקרים. זרקו את ריבוע הדגימה באקראי, ליד המלכודת וספרו את סה"כ מיני הצומח שנמצאו בתוך הריבוע. פרטו את שמות המינים המוכרים לכם. חזרו על הפעולה לפחות 4 פעמים.

גודל הריבוע: \_\_\_\_\_ בית הגידול: \_\_\_\_\_

מיקום	מס' פרטים	האורגניזם	מלכודת מספר

סה"כ מינים	מספר פרטים

מספר הריבוע	שם מין 1:	שם מין 2:	שם מין 3:	שם מין 4:	שם מין 5:	שם מין 6:

## 2. רישום נתוני בעלי חיים

התבוננו בבעלי החיים במלכודות הנפילה. מלאו את הנתונים הבאים עבור כל אורגניזם שנצפה:

מלכודת מספר	האורגניזם	מס' פרטים	מיקום

## התאמות

3. תארו **התאמות** של אורגניזמים שנצפו בסיור (צמחים ובעלי חיים) או ציינו פרטים שיכולים להצביע על התאמה לבית גידול, או לעונה מסוימת, או לכל דבר אחר. לגבי כל התאמה ציינו מהי ההתאמה, מהו היתרון לאורגניזם מהתאמה זו.

בצמחים: מניעה של אכילת הצמח על ידי בעלי חיים, דרך ההאבקה של הצמח, הפצת זרעים.  
 בבע"ח: הגנה מפני טריפה, השגת מזון, תקשורת בין-מינית או תקשורת תוך-מינית, ההתאמות יכולות להיות באורגניזמים שונים, או באותו אורגניזם.

שם האורגניזם	תיאור ההתאמה, היתרון לאורגניזם, התאמה ל -

## תוספת אישית

4. הוסיפו, בקצרה (2-4 שורות), מידע מעניין הקשור לסיור או לדיווח עליו. כגון מידע הקשור לאחד האורגניזמים שנצפו (מהסיור או מהספרות) להשפעת האדם, או לכל נושא ביולוגי מעורר עניין.

---



---



---

5. אפשר לעקוב אחר פעילות התלמידים באמצעות בלוג. כל קבוצה פותחת בלוג והמורה משייך את הבלוגים של הקבוצות השונות לבלוג האישי שלו.

1. Anisimov, O. A. (2007). Potential feedback of thawing permafrost to the global climate system through methane emission. *Environmental Research Letters*, 2(4), 045016. [DOI:10.1088/1748-9326/2/4/045016](https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/045016)
2. Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R. P., Lobell, D. B., Cammarano, D., Kimball, B. A., Ottman, M. J., Wall, G. W., White, J. W., Reynolds, M. P., Alderman, P. D., Prasad, P. V. V., Aggarwal, P. K., Anothai, J., Basso, B., Biernath, C., Challinor, A. J., De Sanctis, G., & Zhu, Y. (2015). Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change*, 5(2), 143–147. [DOI:10.1038/nclimate2470](https://doi.org/10.1038/nclimate2470)
3. Baker, A. C., Starger, C. J., McClanahan, T. R., & Glynn, P. W. (2004). Corals' adaptive response to climate change. *Nature*, 430(7001), 741–741. [DOI:10.1038/430741a](https://doi.org/10.1038/430741a)
4. Bar-On, Y. M., Phillips, R., & Milo, R. (2018). The biomass distribution on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(25), 6506–6511. [DOI:10.1073/pnas.1711842115](https://doi.org/10.1073/pnas.1711842115)
5. Carpenter, S. R., Mooney, H. A., Agard, J., Capistrano, D., Defries, R. S., Diaz, S., Dietz, T., Duraiappah, A. K., Oteng-Yeboah, A., Pereira, H. M., Perrings, C., Reid, W. V., Sarukhan, J., Scholes, R. J., & Whyte, A. (2009). Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(5), 1305–1312. [DOI:10.1073/pnas.0808772106](https://doi.org/10.1073/pnas.0808772106)
6. Ceballos, G., Ehrlich, P. R., Barnosky, A. D., García, A., Pringle, R. M., & Palmer, T. M. (2015). Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science Advances*, 1(5), e1400253. [DOI:10.1126/sciadv.1400253](https://doi.org/10.1126/sciadv.1400253)
7. Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C. P. O., Ruff, A., Vinke, K., Liu, Z., Reck, B. K., Graedel, T. E., & Schellnhuber, H. J. (2020). Buildings as a global carbon sink. *Nature Sustainability*, 3,269-276. [DOI:10.1038/s41893-019-0462-4](https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4)
8. Cohen, J. M., Lajeunesse, M. J., & Rohr, J. R. (2018). A global synthesis of animal phenological responses to climate change. *Nature Climate Change*, 8(3), 224–

228. [DOI:10.1038/s41558-018-0067-3](https://doi.org/10.1038/s41558-018-0067-3)
9. Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (2009). Ocean Acidification: The Other CO<sub>2</sub> Problem. *Annual Review of Marine Science*, 1(1), 169–192. [DOI:10.1146/annurev.marine.010908.163834](https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834)
10. Frank, K. T., Petrie, B., Fisher, J. A. D., & Leggett, W. C. (2011). Transient dynamics of an altered large marine ecosystem. *Nature*, 477(7362), 86–91. [DOI:10.1038/nature10285](https://doi.org/10.1038/nature10285)
11. Kamke, J., Kittelmann, S., Soni, P., Li, Y., Tavendale, M., Ganesh, S., Janssen, P. H., Shi, W., Froula, J., Rubin, E. M., & Attwood, G. T. (2016). Rumen metagenome and metatranscriptome analyses of low methane yield sheep reveals a Sharpea-enriched microbiome characterised by lactic acid formation and utilisation. *Microbiome*, 4, 1–16. [DOI:10.1186/s40168-016-0201-2](https://doi.org/10.1186/s40168-016-0201-2)
12. Kleijn, D., Winfree, R., Bartomeus, I., Carvalheiro, L. G., Henry, M., Isaacs, R., Klein, A. M., Kremen, C., M'Gonigle, L. K., Rader, R., Ricketts, T. H., Williams, N. M., Lee Adamson, N., Ascher, J. S., Báldi, A., Batáry, P., Benjamin, F., Biesmeijer, J. C., Blitzer, E. J., & Potts, S. G. (2015). Delivery of crop pollination services is an insufficient argument for wild pollinator conservation. *Nature Communications*, 6(7414). [DOI:10.1038/ncomms8414](https://doi.org/10.1038/ncomms8414)
13. Mace, G. M., Norris, K., & Fitter, A. H. (2012). Biodiversity and ecosystem services: A multilayered relationship. *Trends in Ecology and Evolution*, 27(1), 19–26. [DOI:10.1016/j.tree.2011.08.006](https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.08.006)
14. McKinney, A. M., Caradonna, P. J., Inouye, D. W., Barr, B., Bertelsen, C. D., Waser, N. M., & Irwin, R. E. (2012). Asynchronous changes in phenology of migrating Broad-tailed Hummingbirds and their early-season nectar resources. *Ecology*, 93(9), 1987–1993. [DOI:10.1890/12-0255.1](https://doi.org/10.1890/12-0255.1)
15. Meyer, R. K. P. & L. A. (Ed.). (2014). *IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzer.*
16. Newbold, T., Hudson, L. N., Hill, S. L. L., Contu, S., Lysenko, I., Senior, R. A., Börger, L., Bennett, D. J., Choimes, A., Collen, B., Day, J., De Palma, A., Díaz,

- S., Echeverria-Londoño, S., Edgar, M. J., Feldman, A., Garon, M., Harrison, M. L. K., Alhusseini, T., & Purvis, A. (2015). Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, 520(7545), 45–50. [DOI:10.1038/nature14324](https://doi.org/10.1038/nature14324)
17. Orr, J. C., Fabry, V. J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S. C., Feely, R. A., Gnanadesikan, A., Gruber, N., Ishida, A., Joos, F., Key, R. M., Lindsay, K., Maier-Reimer, E., Matear, R., Monfray, P., Mouchet, A., Najjar, R. G., Plattner, G.-K., Rodgers, K. B., & Yool, A. (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 437(7059), 681–686. [DOI:10.1038/nature04095](https://doi.org/10.1038/nature04095)
18. Overpeck J., Garfin, G., Jardine, A., Busch, D. E., Cayan, D., Dettinger, M., Fleishman, E., Gershunov, A., MacDonald, G., Redmond, K. T., Travis, W. R., & Udall, B. (2013) Summary for Decision Makers. In: Garfin G., Jardine A., Merideth R., Black M., LeRoy S. (eds) Assessment of Climate Change in the Southwest United States. NCA Regional Input Reports. Island Press, Washington, DC. [DOI:10.5822/978-1-61091-484-0\\_1](https://doi.org/10.5822/978-1-61091-484-0_1)
19. Phoenix, G. K., Hicks, W. K., Cinderby, S., Kuylenstierna, J. C. I., Stock, W. D., Dentener, F. J., Giller, K., Austin, A. ., Lefroy, R. D. ., GIMENO, B. S., Ashmore, M. R., & Ineson, P. (2006). Atmospheric nitrogen deposition in world biodiversity hotspots: the need for a greater global perspective in assessing N deposition impacts. *Global Change Biology*, 12(3), 470–476. [DOI:10.1111/j.1365-2486.2006.01104.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01104.x)
20. Pringle, R. M. (2005). The origins of the Nile perch in Lake Victoria. *BioScience*, 55(9), 780–787. [DOI:10.1641/0006-3568\(2005\)055\[0780:TOOTNP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2005)055[0780:TOOTNP]2.0.CO;2)
21. Quéré, C., Andrew, R., Friedlingstein, P., Sitch, S., Hauck, J., Pongratz, J., Pickers, P., Ivar Korsbakken, J., Peters, G., Canadell, J., Arneeth, A., Arora, V., Barbero, L., Bastos, A., Bopp, L., Ciais, P., Chini, L., Ciais, P., Doney, S., & Zheng, B. (2018). Global Carbon Budget 2018. *Earth System Science Data*, 10(4), 2141–2194. [DOI:10.5194/essd-10-2141-2018](https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018)
22. Sabine, C. L., R. A. Feely., N. Gruber., R. M. Key., K. H. Lee., J. L. Bullister., R. Wanninkhof., C. S. Wong., D. W. R. Wallace., B. Tilbrook., F. J. Millero., T.-H. Peng., A. Kozyr., T. Ono., & A. F. Rios (2004). The oceanic sink for anthropogenic CO<sub>2</sub>. *Science*, 305(5682), 367 – 371. [DOI: 10.1126/science.1097403](https://doi.org/10.1126/science.1097403)

23. Soliveres, S., Van Der Plas, F., Manning, P., Prati, D., Gossner, M. M., Renner, S. C., Alt, F., Arndt, H., Baumgartner, V., Binkenstein, J., Birkhofer, K., Blaser, S., Blüthgen, N., Boch, S., Böhm, S., Börschig, C., Buscot, F., Diekötter, T., Heinze, J., & Allan, E. (2016). Biodiversity at multiple trophic levels is needed for ecosystem multifunctionality. *Nature*, 536(7617), 456–459. [DOI:10.1038/nature19092](https://doi.org/10.1038/nature19092)
24. Solomon, S., Plattner, G. K., Knutti, R., & Friedlingstein, P. (2009). Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(6), 1704–1709. [DOI:10.1073/pnas.0812721106](https://doi.org/10.1073/pnas.0812721106)
25. Tovi, N., Frank, S., Hadar, Y., & Minz, D. (2019) 'Host specificity and spatial distribution preference of three Pseudomonas isolates'. *Frontiers in Microbiology*, 10, 1–11. [DOI:10.3389/fmicb.2018.03263](https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.03263)
26. Usyskin-Tonne, A., Hadar, Y., & Minz, D. (2019). Altering N<sub>2</sub>O emissions by manipulating wheat root bacterial community. *Scientific Reports*, 9(1), 1–9. [DOI:10.1038/s41598-019-44124-3](https://doi.org/10.1038/s41598-019-44124-3)
27. Winfree, R., Reilly, J. R., Bartomeus, I., Cariveau, D. P., Williams, N. M., & Gibbs, J. (2018). Species turnover promotes the importance of bee diversity for crop pollination at regional scales. *Science*, 359(6377), 791–793. [DOI:10.1126/science.aao2117](https://doi.org/10.1126/science.aao2117)