35-34

גיליון מס' 34-35 ■ אב תש"ף, יולי 2020

>קריאתביניים

ביטאון למורי מדע וטכנולוגיה בחטיבת הביניים

מתחמם, מתחמם, חם...
משבר האקלים לאן?

שלום רב,

אנו חווים היום משבר בריאותי וכלכלי בעקבות מגפת הקורונה, שבמהלכו בני אדם רבים סובלים בכל העולם. רבים סוברים שסבל זה הוא רק דוגמה קטנה לסבל שיחושו בני האדם ממשבר האקלים בעתיד. משבר האקלים הוא מושג המתאר את ההתחממות העולמית על פני כדור הארץ ואת תוצאותיה. בניגוד למשבר הקורונה, שהגיע במפתיע והיה קשה להתכונן אליו, על משבר האקלים נכתב כבר בניו יורק טיימס בשנת 1953. כלומר, לפני קרוב לשבעים שנה. מה נעשה מאז ועד היום? מהם הנתונים המעידים על קיומו של המשבר וכיצד הם נאספים? מהי מידת מעורבותו של האדם במשבר זה? ומהם הפתרונות האפשריים? "משבר אקלים" או "שינוי אקלים" – התלבטנו באיזה מונח להשתמש בגיליון זה של קריאת ביניים. השימוש במונח "משבר האקלים" יכול לעורר חשש ולהרחיק תלמידים מלימוד התופעה, והרי מטרתנו היא ללמד ולנסות להוביל את התלמידים לשנות את התנהגותם ולהיות מסוגלים להתמודד עם הבעיה בבגרותם. לכן בחרנו להשתמש במונח "שינוי אקלים". אך הריכוך הלשוני איננו משנה את העובדה כי לפנינו משבר ממשי, לפי הערכתם של רוב המדענים.

גיליון זה של קריאת ביניים פותח בדבר המפמ"ר למו"ט ובדבר ראש המרכז למורי מו"ט בחטיבת הביניים. שניהם מתייחסים בדבריהם למשבר הקורונה ולמשבר האקלים.

במדור "חזית המדע" ארבעה מאמרים: הראשון עוסק בפרספקטיבה גאולוגית על שינוי האקלים, מתאר ומציג נתונים ממדידות של התחממות כדור הארץ המסתמכים על ארכיבים גאולוגיים. המאמר השני עוסק במערכת ייצור המזון מול שינוי האקלים, ומציג את הקונפליקט הטמון בכך שמערכת המזון היא מהתורמים הראשיים לפליטות גזים לאטמוספרה, מצד אחד, וצורך חיוני לקיומנו מהצד האחר. המאמר השלישי עוסק בהשפעת ההתחממות הגלובלית על תוצרת חקלאית טרייה לפני ואחרי קטיף, והמאמר הרביעי סוקר את תולדות ההבנה שלנו ביחס לשינוי האקלים ומדגיש את הצורך בידע מדעי רחב ומעמיק לחיזוק הבנה זו.

במדור "הוראת המדעים" שני מאמרים. הראשון דן במושג "אוריינות אקלימית" וחשיבותה בתוך הוראת המדעים במערכת החינוך, והשני הוא מאמר סקירה של הספרות העולמית העוסקת בחינוך בנושא שינוי האקלים, לרבות כמה וכמה דוגמאות להוראת הנושא בשיעור המו"ט.

מדור "משדה ההוראה" גדול במיוחד הפעם, וכולל ארבעה מאמרים. המאמר הראשון מציג משימה בנושא שינוי האקלים אשר פותחה במסגרת קורס מובילי קהילות והופעלה בכיתות בשיעורי מו"ט. המאמר השני מתאר את מסעו פורץ הדרך של בית ספר בארץ שצורף לרשת בתי ספר עולמיים המלמדים לאור יעדי הקיימות של האומות המאוחדות. המאמר השלישי מציג דוגמאות להוראת משבר האקלים שכבר מיושמות בחטיבות הביניים. ולבסוף, המאמר הרביעי מציג פעילויות ומערכי שיעור מתוך אתר "זווית בחינוך". הגיליון נחתם בפרסומו של אוגדן למורה המפותח בימים אלה במרכז המורים הארצי למורי מו"ט בחטיבת הביניים, וכולל פעילויות לשילוב בשיעורי המו"ט.

קריאה מהנה!

חברי המערכת

35-34

גליון מס' 35-34 - תמוז תש"פ, יולי 2020

>קריאתביניים

ביטאון למורי מדע וטכנולוגיה בחטיבת הביניים

עורכת: ד"ר ארנה פליק

מערכת (בסדר א"ב): פרופ' בת שבע אלון, ד"ר גיורא אלכסנדרון, ד"ר דנה ודר-וייס, ד"ר עופר מוקדי, גב' דורית פנו-עיני, פרופ' דיויד פורטס, גב' אורנה בן עטר, ד"ר אילנה הופפלד, גב' ורד זיידמן, ד"ר תמי יחיאלי, פרופ' ענת ירדן, ד"ר יעל שורץ, ד"ר זהבה שֶׁרֶץ.

עריכה לשונית: ענבל גיל

מידענות: עדי דגן-דדוש

עריכה, שרטוטים ועיצוב גרפי: ציפי עובדיה

עיצוב שם העיתון: אביגיל הורוביץ

דוא"ל: adi.weizmann@ac.il

טלפון: 08-9378372

דוא"ל: adi.dagan-dadush@weizmann.ac.il

טלפון: 08-9378372

תמונה בשער החיצוני:

ימת סלטון (Salton Sea), הנמצאת בקליפורניה שבארצות הברית. הימה שימשה כמקום קיט ונופש עד אמצע המאה העשרים, לפני האסון האקולוגי שהתרחש בה בשל פסולת שהושלכה אל מימיה. גושי הבטון הם שרידים של יישוב קיט שתושביו נאלצו לעזוב. התמונה צולמה בשנת 2016 על ידי דורון גזית, אומן סביבתי, במסגרת פרויקט "הקו האדום". "השרוול האדום הוא מטאפורה לעורק הדם של אמא אדמה הזועקת לעזרה ואיתו אני עובר ויוצר במקומות בעולם שנפגעו מהתחממות כדור הארץ וטיפשותו ההרסנית של האדם" (דורון גזית).

הפרויקט מבוצע עפ"י מכרז 09/07.13 עבור המזכירות הפדגוגית, משרד החינוך.

*איורים ותמונות המשולבים בעיתון זה נלקחו באישור מאתר Shutterstock.

© כל הזכויות שמורות למשרד החינוך

המחלקה להוראת המדעים

מרכז מורים ארצי למו"ט בחט"ב

מינהלת מל"מ המרכז הישראלי לחינוך מדעי טכנולוגי על-שם עמוס דה-שליט

אגף א' למדעים המזכירות הפדגוגית משרד החינוך

תוכן עניינים גיליון 34-35

בפתח הגיליון

בסיום שנה ובמבט קדימה..... 4
עופר מוקדי

סיכומה של שנת לימודים "מוזרה" ונימה אישית לסיכום

יעל שוורץ

קידום נושא שינוי האקלים במסגרות שונות.....5

חזית המדע

פרספקטיבה גאולוגית על שינוי האקלים..... 6
איתי הלוי

קיימת ודאות לגבי היות ריכוזי ה-CO_2 במאתיים השנים האחרונות חריגים בראי הזמן. המאמר מתאר ומציג נתונים ממדידות של התחממות כדור הארץ המסתמכים על ארכיבים גאולוגיים.

מערכת המזון מול שינוי האקלים..... 15
עופר מנדלסון

הצגת הקונפליקט הטמון בכך שמערכת המזון היא מהתורמים הראשיים לפליטות גזים לאטמוספרה, מצד אחד, וצורך חיוני לקיומנו מהצד האחר.

כיצד התחממות עולמית עלולה להשפיע על תוצרת חקלאית טרייה לפני ואחרי קטיף?..... 23
אלעזר פליק

אחד האתגרים העומדים בפני החקלאות בהקשר של תופעת שינוי האקלים הינו לאפשר המשך קבלת יבולים גבוהים וזמינים ואיכות חיצונית, פנימית ובריאותית של פירות וירקות טריים לאחר הקטיף.

בין זהירות מונעת לרשלנות פושעת..... 31
עופר מוקדי

המאמר סוקר את תולדות ההבנה שלנו ביחס לשינוי האקלים ומדגיש את הצורך בידע מדעי רחב ומעמיק לחיזוק הבנה זו.

הוראת מדעים

חינוך בנושא שינוי האקלים, כן בבית ספרנו: על המשמעות של טיפוח אוריינות מדעית אקלימית בעידן של משבר סביבתי. 36
איריס אלקחר

המאמר דן במושג "אוריינות אקלימית" כחלק מהאוריינות המדעית וכחלק מהוראת המדעים במערכת החינוך, מציג עקרונות מדעיים בסיסיים וחיוניים בהקניית אוריינות אקלימית ללומדים וסוקר גישות לטיפוחה.

חינוך בנושא שינוי אקלים כבר כאן, ובכל מקום אחר בעולם..... 42
ליאורה ביאלר, שרמן רוזנפלד וארנה פליק

מאמר זה סוקר את הספרות ומתייחס לחינוך בנושא שינוי האקלים בעולם בקרב תלמידי ומורי חטיבות הביניים ובגילים אחרים.

משדה ההוראה

עוזרים לגרטה להציל את העולם..... 49
נורית הוכברג, ליאת זלוצ'ובר הרנוי, שושי מנצור, קרן אריכא ומיכל שכטר

מאמר זה מציג משימה שפותחה במסגרת קורס מובילי קהילות מדעים ארצי המתקיים במרכז המורים הארצי למורי מדע וטכנולוגיה בחטיבת הביניים, בנושא שינוי האקלים.

מחוללי עתיד: כיצד מערבים תלמידים בלימודי קיימות ושינויי האקלים..... 57
גולן צוקרון

סיפור מסעו פורץ הדרך של בית ספר בארץ שצורף לרשת בתי ספר עולמיים המלמדים לאור יעדי הקיימות של האומות המאוחדות.

מפסיקים לפחד ומתחילים ללמד..... 64
גילה לוי הוברמן ויעל ברקי גטניו

המאמר מציג דוגמאות להוראת משבר האקלים שכבר מיושמות בחטיבות הביניים.

זווית בחינוך
מחברים סביבה לכיתה: לומדים על שינוי האקלים..... 68
דקלה גיש

הצגה של פעילויות ומערכי שיעור מתוך אתר "זווית בחינוך" בנושא שינוי האקלים.

שינוי אקלים כנושא רב-תחומי להוראת מו"ט בחט"ב - אוגדן למורה..... 71
איתי ללזר ויעל שורץ

על פיתוחו של אוגדן למורה בנושא שינוי האקלים הכולל הצעות לרצף שיעורים ומעבדות המיועדים לתלמידים.

בסיום שנה ובמבט קדימה

לקראת סיומה של שנת הלימודים תש"ף אנו מסתכלים לאחור על שנה "מוזרה" ביותר. שנה שלאורך רוב המחצית השנייה שלה היו התלמידים והמורים בבית. הלמידה לבשה צורה חדשה, בלתי מוכרת ומאוד מאתגרת. למדנו להשתמש בעזרי הוראה מקוונים לא כ"תוספת" אלא כ"מנה עיקרית". לצערי, כל הסימנים הנוכחיים מצביעים על כך שרכישת ההרגלים האלה עוד תשרת אותנו רבות גם בשנה הבאה...

הן הלמידה מרחוק לכל צורותיה והן הקורונה שהובילה את כולנו להכיר את ערוציה, תופסות כיום מקום מרכזי בשורה הראשונה של דאגותינו, ובצדק רב – ההשלכות של משבר הקורונה זועקות מכותרות העיתונים ושידורי החדשות, ומכרסמות ברבדים הקיומיים ביותר. הן הצליחו למוסס, בקלות רבה, את מעט תשומת הלב שהבינה האנושות שהכרחי לייחד לנושא משבר האקלים. נושא זה, שנבחר כנושא מרכזי לכנס השנתי ולגיליון הנוכחי, הינו בעל השלכות קיומיות לא פחות. לפי כל הסימנים – עוד בחייהם של קוראי שורות אלה; נכון, לא בתוך ימים או שבועות, כמו הקורונה, אך בתוך עשורים בודדים. כשתסיים האנושות ללקק את פצעי הקורונה (ואני מתייחס בכך גם לצורך להתאושש כלכלית, ולא רק בריאותית), היא תשוב ותתייצב בפני ההשלכות העגומות והנחרצות של התנהגות בלתי-אחראית המחוללת את משבר האקלים. כאנשי חינוך, שמעשיהם מכוונים להשפעה בטווח הבינוני והארוך – ראוי לנו לזכור זאת.

בנימה אישית, אני נפרד מכם לאחר שנה יחידה שבה מילאתי את תפקיד המפמ"ר. אני מבקש להודות לשותפי דרך נפלאים – למרכז המורים, לצוותי הפיקוח וההדרכה, ולכל אנשי השטח העושים במלאכת הוראת מדע וטכנולוגיה דבר יום ביומו, בימי שגרה כבימי חירום. למדתי מכולכם הרבה במהלך שנה זו, וייתכן שעוד ניפגש במעגלי החיים והעשייה.

שלכם,

ד"ר עופר מוקדי

מפמ"ר מדע וטכנולוגיה

דבר ראש מרכז המורים,

מורים יקרים,

שנת תש"ף החלה כקודמותיה, בתוכניות עבודה סדורות ובחשיבה על רעיונות מרכזיים שאנו מעוניינים לקדם.

אחד הרעיונות הללו היה שינוי האקלים (שלא לומר משבר האקלים) וההתמודדות הגלובלית, הלוקלית והאישית עם שינויים אלו. היה זה לאחר אחד הקיצים החמים ביותר שעבר אזורינו, אזור המזרח התיכון, אחרי בצורת קשה באלסקה, ושריפות ענק בקנה מידה שלא ראינו בעבר שהשתוללו באוסטרליה ופגעו אנושות במגוון האנושי ביבשת.

הנושא קודם בכמה מסגרות: בקהילת מובילי קהילות זה היה הנושא השנתי שליווה את הקהילה; התחלנו בפיתוח אוגדן למורה שיופץ בתשפ"א וליווה בשבועות האחרונים את המשתתפים בהשתלמות קיץ מקוונת בנושא. כמו כן, החלטנו שזה יהיה הנושא הן בכנס המורים השנתי ב-18.8.2020 והן בגיליון "קריאת ביניים" שבו אתם קוראים כעת.

ואז... הגיעה הקורונה... והמעבר ללמידה מרחוק... והחזרה ללימודים תחת מגבלות כמעט בלתי-אפשריות של ריחוק חברתי, מגבלות שחודדו בימי שרב קיצוני – האם אפשר לעטות במשך שעות רבות מסיכה ו / או משקף מגן בתנאי הקיץ הישראלי? האומנם הגיוני לשבת בכיתה שמופעל בה מזגן עם חלונות פתוחים כדי לאפשר אוורור? היה לי נדמה שסגרנו מעגל – כיצד מצבי קיצון של מזג אוויר חם במיוחד משפיע על יכולתנו להתמודד עם מגפה? וכיצד המגפה, הנוכחת כל כך, משפיעה על יכולת ונכונות של העם ומנהיגיו לחשיבה ארוכת טווח על כדור הארץ?

ועוד שאלות עולות – על הקשר בין שינוי האקלים להתפשטות מגפות, על הערבות ההדדית והאחריות ההדדית שנדרשו להן כמעט כל תושבי העולם באשר הם להתמודדות המשותפת שלנו עם אתגרים המאיימים על כל תושבי העולם – נשים וגברים, צעירים ומבוגרים, תושבי אסיה, אירופה, ארצות הברית וישראל.

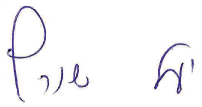
והאתגרים המשותפים – רבים הם – ממציאת חיסון לנגיף הקורונה, דרך התמודדות עם הנזקים הכלכליים ומציאת דרכים להניע מחדש את הכלכלה העולמית, וכלה באתגר הבא – התמודדות עם שינוי האקלים במישורים רבים – הגלובלי, הארצי, האישי, ובהקשר שלנו - החינוכי.

האם האנושות ומקבלי ההחלטות מסוגלים להיישיר מבט אל העובדות המדעיות? להסיק מסקנות? להעמיד את טובת העתיד לפני טובת ההווה? את טובת כדור הארץ לפני טובת המדינה? ומה חושבים הצעירים על העולם שאנו משאירים להם? מה תפקידנו כמורים למדעים וכדמויות חינוכיות בהקשרים אלו? ועוד ועוד...

אין לי תשובות, אבל בגיליון הנוכחי של קריאת ביניים יש הרבה חומר למחשבה...

קריאה נעימה,

שלכם,



פרספקטיבה גאולוגית על שינוי האקלים

איתי הלוי[1]

קיימת ודאות לגבי היות ריכוזי ה-CO_2 במאתיים השנים האחרונות חריגים בראי הזמן. ארכיבים גאולוגיים – טבעות עצים, קרח באנטארקטיקה ובגרינלנד, משקעים בקרקעית אגמים ובאוקיינוסים, נטיפים וזקיפים במערות, ועוד – הם מקור חשוב של מידע על התגובה האקלימית והאקולוגית לשינויים בריכוז ה-CO_2 באטמוספרה.

לפני כמאתיים שנה החלו מדינות אירופה וארצות הברית תהליכי תיעוש, שבעקבותיהם עלה קצב פליטת גז דו-תחמוצת הפחמן (CO_2) עשרות מונים. אוניות מפרש ועגלות רתומות לסוסים הוחלפו בספינות וברכבות קיטור, התעשייה הפכה מידנית לממוכנת, ופותחו תהליכי ייצור שצרכו אנרגייה רבה יותר. את רוב האנרגייה סיפקה שריפה של דלק מאובן, בעיקר פחם. הפחם, וכן מיני דלקים נוזליים המופקים מנפט גולמי, נקראים דלק מאובן, מכיוון שנוצרו על ידי קבורה בת מיליוני שנים של חומר אורגני קדום. הדלק המאובן מורכב בעיקר מפחמן ומימן, ותגובתו עם חמצן בטמפרטורה גבוהה יוצרת CO_2 ואדי מים ובתוך כך משחררת חום, אשר שימש, בין השאר, ליצירת קיטור להנעת כלי רכב ומכונות. ניצול החום המופק משריפת דלק מאובן עדיין מהווה את התשתית למשקי התחבורה, האנרגייה והתעשייה של ימינו.

המדען השוודי סוונטה ארהניוס (Svante Arrhenius) היה הראשון אשר כימת את השפעתו האקלימית של CO_2 (במילותיו, חומצה פחמתית באוויר), במאמר שפרסם ב-1896. ארהניוס ציין במאמרו ש-CO_2 אינו מפריע לקרינת השמש לחדור את האטמוספרה ולהגיע לפני כדור הארץ (כדה"א), אולם גז זה מונע את בריחתה של חלק מקרינת החום הנפלטת מפניו של כוכב הלכת (Arrhenius, 1896). על שום הדמיון לחממת זכוכית, המעבירה אור ולוכדת חום, נקראת התופעה "אפקט החממה". ארהניוס הראה כי אפשר להסביר את הטמפרטורה הממוצעת של כדה"א על ידי מאזן אנרגייה בין קרינת השמש הנכנסת (בתחום הנראה של הספקטרום האלקטרומגנטי) לבין קרינת החום (בתחום האינפרה-אדום) שמצליחה לעבור את החממה האטמוספרית ולצאת לחלל. ככל שנלכד יותר מהחום הנפלט מפני השטח של כדה"א, כך עולה הטמפרטורה של פני השטח עצמם.

מאז עבודתו של ארהניוס נכתבו אלפי מאמרים על השפעתם של גז CO_2 וגזי חממה אחרים על אקלים[2] כדה"א. בין השאר, התפשט המחקר מתחומי הכימיה הפיזיקלית, שניסתה לכמת את השפעת הרכב האטמוספרה על מעבר קרינה דרכה, לתחומי דינמיקה אטמוספרית ואוקיאנית, שבהם נחקרת השפעת זרימה באטמוספרה ובאוקיינוסים על הסעת חומר ואנרגייה, וכן לתחומי אקולוגיה וביוגאוכימיה, ששמים למטרה את הבנת המאזנים הטבעיים והמלאכותיים של CO_2 ושל חומרים אחרים המשפיעים על מעבר קרינה באטמוספרה. הבנת האקלים של

1 פרופ' איתי הלוי, המחלקה למדעי כדור הארץ וכוכבי הלכת, מכון ויצמן למדע.

2 האקלים הוא הממוצע ארוך הטווח (על פני עשרות או מאות שנים) של משתנים מטאורולוגיים, כגון טמפרטורה, לחות, לחץ אטמוספרי, משקעים, ועוד. שנה או אפילו כמה שנים גשומות או שחונות במיוחד, חמות או קרות במיוחד, אינן שינוי אקלים. **שינוי אקלים** הוא תנודה בממוצע הרב-שנתי, שאפשר לזהותה בוודאות רק על ידי תצפיות המתפרסות על פני עשורים.

כדה״א בהווה מצריכה שילוב מורכב של תחומי מחקר רבים. תחזית האקלים העתידי, בתגובה לפעילות אנושית ולתנודות טבעיות, מורכבת עוד יותר, וזאת משום שנדרשת הבנה מעמיקה של מכלול ההשפעות, התגובות ומנגנוני ההיזון החוזר. מחקר האקלים חושף בהדרגה את אוסף התהליכים הללו, אך לצד הבנה הולכת ומעמיקה מתגלעים חילוקי דעות מדעיים, ואלה באים לידי ביטוי באי-ודאות מצד מדעני האקלים לגבי תחזיותיהם.

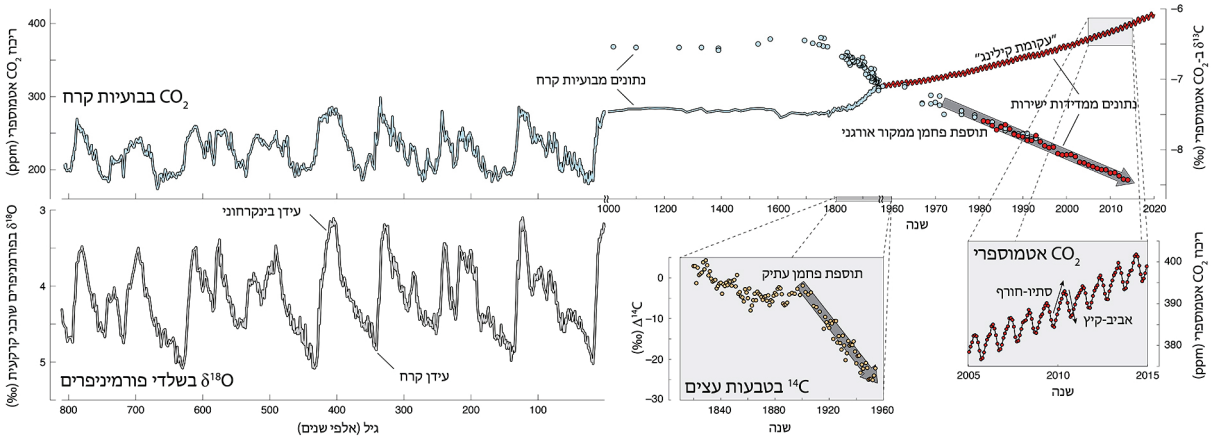
דיווח על אי-ודאות הוא חלק בלתי נפרד מדיווח אחראי על תוצאות מדעיות. עם זאת, אותה אי-הוודאות גורמת בציבור לתחושה שאולי כדאי לדחות פעולות יקרות להתמודדות עם שינוי האקלים עד שהמדענים יסכימו בינם לבין עצמם. תחושות אלו מנוצלות לעיתים קרובות על ידי בעלי עניין שפעולה נחרצת לצמצום פליטת גזי חממה צפויה לפגוע בהכנסותיהם או בהשפעתם. לכן חשוב להתחיל את הדיון על שינוי האקלים בהבנת העובדות שאינן ניתנות לערעור, שהקהילה המדעית מסכימה עליהן.

ריכוזי CO_2 חריגים במאתיים השנים האחרונות נגרמו על ידי פעילות אנושית

אנו יודעים בוודאות כי: (א) ריכוז ה-CO_2 באטמוספרה עולה בחדות זה כמאתיים שנה לרמות שלא נראו זה כשלושה מיליוני שנה; (ב) העלייה בריכוז ה-CO_2 (וגזי חממה אחרים) אינה טבעית, אלא קשורה לפעילות אנושית; (ג) CO_2 הוא גז חממה, שנוכחותו באטמוספרה לוכדת חלק מקרינת החום הנפלטת מכדה״א. בחלקו הראשון יעסוק המאמר בנתונים שעליהם מתבססות טענות (א) ו-(ב). חלקו השני של המאמר יעסוק בעדויות התורמות להבנת הנושאים שלגביהם קיימת עדיין אי-ודאות – תגובתה הכוללת של מערכת האקלים לעלייה בריכוז גזי החממה באטמוספרה. בשני החלקים יתבסס המאמר על ארכיבי מידע גאולוגיים וגאוכימיים המאפשרים שחזור של הרכב האטמוספרה והטמפרטורה על פני כדה״א (תמונה 1).

ב-1958 החל המדען צ׳ארלס דיוויד קילינג (Charles David Keeling) מהמכון האוקיינוגרפי סקריפס שבאוניברסיטת סן דייגו מדידות רציפות של ריכוז ה-CO_2 באטמוספרה בראש הר הגעש מאונה לואה (Mauna Loa) שבהוואי. כשנפטר

תמונה 1: כמה מארכיבי המידע המוזכרים במאמר; **מימין** נראים קידוחי קרח באנטארקטיקה, שבועיות אוויר הלכודות בהם מספקות הצצה על הרכב האטמוספרה בעת הילכדות הבועיות (קרדיט: British Antarctic Survey). **במרכז** נראה חתך של גזע עץ ובו טבעות גידול. כל טבעת מייצגת שנה מחיי העץ, ותכולת ה-^{14}C בטבעת מעידה על תכולת ה-^{14}C ב-CO_2 האטמוספרי בזמן היווצרותה. **משמאל** נראים שלדי $CaCO_3$ של פורמיניפרים. הרכב האיזוטופים של חמצן בשלדים הנמצאים במשקעים בקרקעית הים ובסלעי משקע מספק מידע על טמפרטורת מי הים ועל כמות הקרח שהיה על היבשות.



איור 1: מידע על פליאו-אקלים (אקלים קדום) מארכיבים גאולוגיים; למעלה מימין נראים הריכוז וההרכב האיזוטופי ($\delta^{13}C$) של CO_2 אטמוספרי, כפי שנמדדו מאז 1958 בראש הר הגעש מאונה לואה שבהוואי ("עקומת קילינג"). **למעלה במרכז ומשמאל** נראים הריכוז וההרכב האיזוטופי של CO_2 אטמוספרי בבועיות בקרח אנטארקטי. ירידה ב-$\delta^{13}C$ מעידה על פליטת CO_2 ממקור אורגני. **למטה מימין** נראה המחזור העונתי בריכוז ה- CO_2 באטמוספרה. **למטה במרכז** נראית תכולת האיזוטופ הרדיואקטיבי של פחמן (^{14}C), כפי שנמדדה בטבעות גידול של עצים. ירידה בתכולת ^{14}C מעידה על פליטת CO_2 ממקור "עתיק" – דלק מאובן. **למטה משמאל** נראה ההרכב האיזוטופי של חמצן ($\delta^{18}O$) בשלדי $CaCO_3$ של פורמיניפרים (שימו לב שציר ה-y הפוך). ככל שערך ה-$\delta^{18}O$ גבוה יותר, כך נוצר השלד בטמפרטורה נמוכה יותר או בתקופה שבה היה קרח רב יותר על היבשות (או שילוב של שני הגורמים). האיור מבוסס על נתונים מ: Keeling et al., 2001; Stuiver et al., 1981; Lisiecki & Raymo, 2005; Eggleston et al., 2016; Rubino et al., 2019.

קילינג האב, המשיך את המדידות בנו ראלף, אף הוא פרופסור באוניברסיטת סן דייגו, ואלה נמשכות עד היום (Keeling et al., 2001). מיקום המדידות בראש הר געש חשוף נועד למזער השפעות של צמחייה ופעילות מקומית על מאזן ה-CO_2, ומדידות באתרים אחרים מראות שהדפוסים שנצפו במאונה לואה מייצגים את ריכוז ה-CO_2 הגלובלי. מריכוז של כ-313 חלקים למיליון (ppm), כשהחלו המדידות ב-1958, עלה ריכוז ה-CO_2 באטמוספרה בהתמדה, חצה את קו ה-400 חלקים למיליון ב-2013, ונכון לחודש מאי 2020, ניצב על כ-415 ppm (איור 1 למעלה מימין). מעבר לעלייה המתמדת אפשר לראות בבירור דפוס משונן (איור 1 למטה מימין), שנובע ממחזור שנתי בפעילות פוטוסינתטית, שבה עצים וצמחים מקבעים CO_2 אטמוספרי כחומר אורגני. באביב ובקיץ מלבלבים הצמחים ומגדלים ענפים, גבעולים ועלים חדשים, וקצב הפוטוסינתזה עולה על קצב פירוק החומר האורגני שעל רצפת היער ובקרקעות. כתוצאה מכך יורד ריכוז ה-CO_2 באטמוספרה בחודשים מאי עד ספטמבר. בחודשי הסתיו והחורף משירים העצים את עליהם ומפסיקים לייצר עלים חדשים, והמשך פירוק של חומר אורגני משחרר CO_2 ומוביל לעלייה בריכוזו בחודשים אוקטובר עד אפריל.

"עקומת קילינג", כפי שמוכר האיור שבו נראית בבירור העלייה בריכוז ה-CO_2 באטמוספרה (איור 1 למעלה מימין), נחשבת לאחד מההישגים המדעיים החשובים של המאה העשרים. עם זאת, העקומה כוללת מידע רק מכשישים שנות מדידה, והעלייה הנצפית נטולת הקשר ארוך טווח. האם העלייה בריכוז ה-CO_2 חריגה ביחס לעידנים אחרים? האם היא נגרמת מפעילות אנושית, או שהיא חלק ממחזוריות טבעית, שאולי תתגלה כשתמשכנה המדידות? אם כן, איך אפשר להביט לאחור בזמן ולברר מה היו ריכוזי ה-CO_2 באטמוספרה בתקופות שקדמו למדידות? ובאופן כללי יותר, איך אפשר לדעת מה היו תנאי האקלים בתקופות שקדמו למכשירי מדידה מודרניים?

ארכיבי מידע טבעיים מאפשרים את שחזור התנאים ששררו בעבר על פני כדור הארץ

בחלק זה יצוינו שני ארכיבי מידע (מתוך רבים אחרים, שכמה מהם יידונו בהמשך) המאפשרים לשחזר את ריכוז ה-CO_2 באטמוספרה בתקופות שקדמו למדידות וכן את מקורו: (א) בועיות אוויר בקרח; (ב) איזוטופים של פחמן.

(א) בועיות אוויר בקרח

בקרבת הקטבים של כדה"א מצטבר קרח על היבשה (גרינלנד בצפון, אנטארקטיקה בדרום). מדי שנה יורד שלג, ורובו אינו ניתך, אלא הולך ונקבר תחת שלג חדש. התכה חלקית של השלג וקפיאתו מחדש הופכות אותו לקרח קשה, ובשלב מסוים נלכדות בקרח בועיות אוויר. בועיות אלה שנלכדו בעבר הן מעין קפסולות אטמוספריות, המספקות הצצה להרכב האטמוספרה הקדומה. את הבועיות מוצאים בקידוחי קרח בגרינלנד ובאנטארקטיקה (תמונה 1). הקרח העתיק ביותר באנטארקטיקה, המתאים לשחזור רציף של הרכב האטמוספרה, הוא בן כ-800,000 שנה. בחינת ריכוזי ה-CO_2 בבועיות אוויר בקרח במשך אלף השנים האחרונות מראה בבירור את תחילת העלייה החדה לפני כמאתיים שנה, בעיתוי דומה למהפכה התעשייתית (איור 1 למעלה במרכז). העיתוי הדומה אינו מהווה בפני עצמו עדות לכך שמקור ה- CO_2 הוא אכן שריפת דלק מאובן ושינויים בשימושי קרקע בעקבות המהפכה התעשייתית (על כך בהמשך), ואולם הוא נותן הקשר ארוך טווח יותר ממשך המדידות המודרניות. במבט על כמעט מיליון שנות הארכיב האנטארקטי אפשר לראות שרמות ה-CO_2 במאתיים השנים האחרונות הן חריגות (איור 1 למעלה). במשך כמיליון שנות הארכיב, ריכוז ה-CO_2 האטמוספרי נע בין כ-180 לכ-280 ppm, ומאתיים השנים האחרונות חריגות הן מבחינת הריכוז והן מבחינת קצב השינוי. בהמשך נדון במשתנים סביבתיים נוספים הנמצאים במתאם עם השינוי בריכוזי ה-CO_2, למשל, הטמפרטורה וגובה פני הים.

(ב) איזוטופים של פחמן ב-CO_2

מניין לנו שהעלייה בריכוז ה-CO_2 באטמוספרה נגרמת על ידי פעילות אנושית ולא מסיבות טבעיות? כאן אפשר ללמוד מאיזוטופים[3] של פחמן. לפחמן שלושה איזוטופים טבעיים, מתוכם שניים יציבים: ^{12}C, המהווה כ-99% מכלל הפחמן בטבע, ו-^{13}C, המהווה כ-1% מכלל הפחמן. לפחמן גם איזוטופ רדיואקטיבי נדיר ביותר, ^{14}C, שנוצר כשקרניים קוסמיות בעלות אנרגייה גבוהה פוגעות באטומי חנקן באטמוספרה. מרגע שנוצר ^{14}C, הוא מתפרק והופך ל-^{14}N (יציב) תוך פליטת קרינת בטא, עם זמן מחצית חיים של 5,730 שנה. זאת אומרת, בהינתן כמות כלשהי של אטומי ^{14}C, כעבור 5,730 שנה מחצית הכמות תישאר ומחציתה תתפרק. תכונה זו של ^{14}C היא הבסיס לשימוש באיזוטופ זה של פחמן לקביעת גילם של חומרים גאולוגיים וארכיאולוגיים. בזמן שנוצר חומר פחמני כלשהו, אורגני או אי-אורגני, חלק מהפחמן שבו הוא ^{14}C, והכמות המדויקת תלויה בריכוז ה-^{14}C באטמוספרה. מאגר ה-^{14}C בחומר אינו מתחדש, שכן מקור ה-^{14}C הוא באטמוספרה, ולכן ריכוזו בחומר הולך וקטן ככל שהוא מתפרק. מידיעת ריכוזו ההתחלתי של ^{14}C בחומר וממדידת ריכוזו הנוכחי אפשר לקבוע כמה זמן עבר מאז שהחומר נוצר. מדענים שמדדו את כמות ה-^{14}C בטבעות גידול שנתיות שבגזעי עצים (דוגמה בתמונה 1) הראו שהחל מתחילת המאה התשע-עשרה (1820), כמות ה-^{14}C קטנה ככל שגיל הטבעות צעיר יותר (איור 1 למטה במרכז). זאת אומרת, ככל שמתקרבים לימינו, ישנו "דילול" של CO_2 אטמוספרי ב-^{14}C. דילול זה נובע מתוספת משמעותית לאטמוספרה של CO_2 שמקורו בשריפת דלק מאובן, שהוא עתיק ולכן אינו מכיל כמויות מדידות של ^{14}C. התופעה נקראת אפקט זוס, על שם המדען האוסטרי האנס זוס (Hans Suess), שחקר את השפעתה על דיוק תיארוך באמצעות ^{14}C (Suess, 1955; Tans , De Jong & Mook, 1979).

תמיכה בממצא שלפיו במהלך המאות התשע-עשרה והעשרים "הוזרקו" לאטמוספרה כמויות גדולות של CO_2 שמקורו בשריפת דלק מאובן מגיעה גם מארכיב האיזוטופים היציבים של פחמן, ^{12}C ו-^{13}C (Keeling, 1979). בתהליך הפוטוסינתזה, שבו צמחים החשופים לאור השמש מקבעים CO_2 מהאטמוספרה כחומר אורגני, ישנה העדפה לקיבוע ^{12}C (Farquhar, Ehleringer

3 תכונותיו הכימיות של יסוד נקבעות לפי מספר הפרוטונים בגרעינו ומספר האלקטרונים מסביבו. איזוטופים הם אטומים של היסוד (ולכן בעלי מספר זהה של פרוטונים), שלהם מספר שונה של נויטרונים בגרעין. כתוצאה מכך איזוטופים שונים הם בעלי מסה שונה, דבר המשפיע על חוזק הקשרים הכימיים שהם יוצרים ועל קצבי תגובות כימיות שבהן הם משתתפים. ההבדלים בחוזק הקשר או בקצב התגובה לרוב אינם עולים על אחוזים בודדים.

1989 , Hubick &). כתוצאה מכך, יחס האיזוטופים $^{13}C/^{12}C$ בחומר אורגני נמוך מיחס זה ב-CO_2 האטמוספרי בכ-2.5%; ובעת בעירה של חומר אורגני, חדש או מאובן, משתחרר CO_2 דל יחסית ב-^{13}C. מגוון ארכיבים של פחמן, כולל CO_2 בבועיות בקרח וכן מינרלי קלציום קרבונט ($CaCO_3$), למשל באלמוגים או בנטיפים וזקיפים במערות, מראים ירידה חדה ביחס האיזוטופים $^{13}C/^{12}C$, המקבילה לעלייה בריכוזי ה-CO_2 בקרח האנטארקטי (איור 1 למעלה). ירידה זו מעידה על כך שמקור ה-CO_2 שנוסף לאטמוספרה הוא חומר אורגני. מכיוון שהחומר האורגני "עתיק", כפי שמעידים ריכוזי ה-^{14}C, אפשר להסיק שמדובר בבעירה של דלק מאובן.

מורכבות מערכת האקלים מולידה אי-ודאות לגבי תגובתה לעלייה בריכוז ה-CO_2 באטמוספרה

ארכיבים של ריכוז ה-CO_2 והרכבו האיזוטופי אינם מותירים ספק כי הצטברות ה-CO_2 באטמוספרה במהלך מאתיים השנים האחרונות נובעת מפעילות אנושית, ובעיקר משריפת דלק מאובן. גזי חממה אחרים, כגון מתאן (CH_4) וחמצן דו-חנקני (N_2O), מגיעים אף הם בעיקר מפעילות אנושית והשפעותיה. ואין גם ספק שעלייה בריכוזי גזי החממה באטמוספרה תוביל לעלייה בלכידת קרינת החום הנפלטת מפני כדה"א. אם כן, מה נתון במחלוקת?

את המחלוקת המדעית אפשר לפשט לשאלה: מה תהיה התגובה הכוללת של מערכת האקלים לעלייה בריכוזי ה-CO_2 באטמוספרה? הסיבה שקיימת אי-ודאות היא שהשפעת גזים על מעבר קרינה באטמוספרה היא חלק אחד (וחשוב) מתוך רבים במערכת האקלים. קיימים במערכת האקלים מנגנוני היזון חוזר רבים, חלקם חיוביים וחלקם שליליים, וכן יחסי תלות הדדית בין גורמים. הניסיון להבין יחסים מורכבים אלה נמצא בחזית חקר האקלים כיום, וכדאי להתעכב ולהדגים את המורכבות. נניח כי עלייה בריכוז CO_2 באטמוספרה גרמה להתחממות. כתוצאה מכך, האוויר החם מכיל יותר אדי מים, שהם בעצמם גז חממה, וההתחממות מתעצמת. באותו זמן, לחות רבה יותר באטמוספרה תגרום להיווצרות עננים רבים יותר. בהפשטה גסה, עלייה בשטח כדה"א המכוסה עננים תפעל נגד ההתחממות, בשל גוונם הבהיר של העננים ותכונתם להחזיר חלק מקרינת השמש לחלל. אולם חשוב להבין אילו עננים בדיוק נוצרים, כי חלקם גורמים דווקא להתחממות, למשל, עננים דקיקים וגבוהים בקרבת הקטבים. חקר העננים ותגובתם לשינויים בטמפרטורה ותכולת הלחות של האטמוספרה הוא אחד ממקורות אי-הוודאות הגדולים ביותר, בעיקר בשל מגוון סדרי הגודל העצום שמעורב בהיווצרות עננים ותכונותיהם הפיזיקליות. נחזור לעלייה בטמפרטורה ובתכולת האדים של האטמוספרה, שגורמת גם לשינוי בדפוסי הזרימה והמשקעים, ואלה גוררים תזוזה של רצועות צמחייה; למשל, ירידה צפויה בכמות המשקעים הכוללת באזורנו תגרום, כנראה, לירידה בצפיפות כיסוי הצמחייה, לשינוי בגוון פני השטח, ולכן לשינוי בחלק היחסי של קרינת השמש שנבלע על ידי פני השטח ומומר לחום. השינויים בדפוסי הצמחייה עשויים לשנות את מאזן הפחמן ולגרום לשינוי (עלייה באזורים מסוימים וירידה באחרים) בקצב הפוטוסינתזה הגלובלי ולקיבוע CO_2 כחומר אורגני. ההתחממות משפיעה בכמה אופנים גם על זרימה באוקיינוסים, ואחת ההשפעות החשובות היא האטה בערבול האוקיינוסים. האטה זו מקטינה את שטפי החום וה-CO_2 מהאטמוספרה לאוקיינוס, ובכך מגבירה את ההתחממות. ההתחממות אף גורמת לירידה בכיסוי הקרח של אוקיינוס הקרח הצפוני (האוקיינוס הארקטי), והחלפת הקרח הבהיר במי ים כהים גורמת לעלייה בבליעת קרינת השמש והמרתה לקרינת חום.

היחסים שתוארו כאן הם רק קצה הקרחון – מדובר במערכת מורכבת ורבת-רבדים. מסיבה זו בעיקר, קיימת אי-הסכמה בין מודלים המנסים לכלול את השפעותיהם של התהליכים שתוארו כאן ורבים אחרים. תיאור מדויק של התהליכים מצריך חישוב על פני סדרי גודל רבים של מרחב (מיקרומטרים עד אלפי קילומטרים) וזמן (שברי שנייה עד עשרות או אפילו מאות שנים), שאיננו מעשי בהינתן כוח החישוב הקיים היום. בהיעדר יכולת חישוב מדויקת של תגובת מערכת האקלים לפעילות אנושית, האם אפשר ללמוד על התגובה הצפויה בעתיד דווקא מהתבוננות לעבר?

פרוקסים אקלימיים מאפשרים שחזור מקורב של ריכוזי CO_2 באטמוספרה, טמפרטורה וגובה פני הים

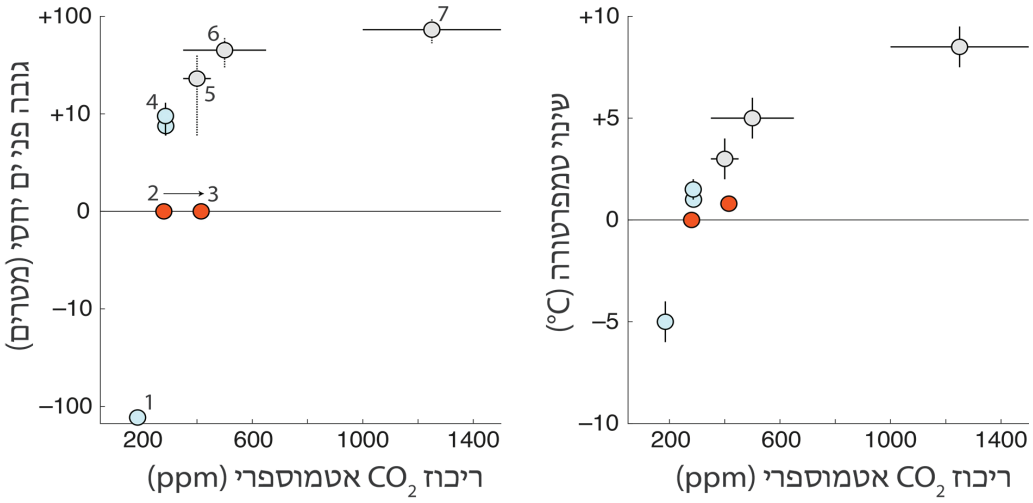
בהיעדר יכולת תצפית ישירה, מדעני אקלים מסתמכים על "פרוקסים אקלימיים" (climate proxies) – תכונות של חומרים טבעיים, שתגובתם לתנודות במשתנים אקלימיים מובנת או מכוילת במחקרים אמפיריים. קיימים יותר פרוקסים משניתן לסקור במאמר זה. בהמשך נבחן את הקשר בין פרוקסים לריכוז ה-CO_2 באטמוספרה, פרוקסי משולב לטמפרטורה באוקיינוס ולכמות הקרח על היבשות, וכן מדדים לגובה פני הים הקדום.

ריכוז ה-CO_2 בבועיות בקרח באנטארקטיקה ובגרינלנד נותן את ריכוזו באטמוספרה בזמן שנוצרו הבועיות. כאמור, הקרח העתיק ביותר המתאים לשחזור ריכוז ה-CO_2 באטמוספרה הוא בן כ-800,000 שנה. את ריכוז ה-CO_2 באטמוספרה בתקופות עתיקות יותר אפשר להעריך באמצעים אחרים. נתעכב על אחד, שהוא רלבנטי להשוואה בין ריכוז ה-CO_2 באטמוספרה לבין הטמפרטורה וגובה פני הים על פני 40 מיליון השנים האחרונות. אצות חד-תאיות מיקרוסקופיות גדלות בחלקו העליון של האוקיינוס, החשוף לאור השמש. כאמור, בתהליך הפוטוסינתזה, ישנה העדפה לקיבוע CO_2 עם האיזוטופ הקל של פחמן, ^{12}C. מסתבר שהעדפה זו תלויה, בין השאר, בריכוז ה-CO_2 במי הים שבהם גדלות האצות. כיול אמפירי של תלות זו מאפשר שחזור ריכוז ה-CO_2 על ידי מדידת יחס האיזוטופים $^{13}C/^{12}C$ במולקולות פחמניות הנקראות אלקנונים (alkenones) (Pagani, 2014). למרות חולשותיו, שנידונו בספרות המקצועית, מתאים הפרוקסי מבוסס-האלקנונים לשחזור מקורב של ריכוז ה-CO_2 באטמוספרה על פני פרקי זמן של מאות אלפי עד עשרות מיליוני שנים.

אחד המשתנים האקלימיים שמעניין ביותר לשחזר הוא הטמפרטורה הממוצעת, ולצורך זה פותחו פרוקסים רבים. הראשון והבולט שבהם הוא ההרכב האיזוטופי של חמצן במינרלים קרבונטיים. לחמצן שלושה איזוטופים יציבים: ^{16}O (כ-99.76% מכל החמצן), ^{17}O (כ-0.04%) ו-^{18}O (כ-0.20%). נעסוק רק ביחס הריכוזים של שני האיזוטופים הנפוצים יותר, ^{16}O ו-^{18}O. בעת שקיעת מינרלים קרבונטיים מתמיסה רוויה – ולענייננו כאן, שקיעת מינרלי קלציום קרבונט ($CaCO_3$) ממי ים – יש העדפה לכניסה למינרל של יוני קרבונט (CO_3^{2-}) המכילים ^{18}O. כתוצאה מכך, יחס האיזוטופים $^{18}O/^{16}O$ במינרל גבוה בכ-3.5% מיחס זה במים שמהם שקע המינרל.

אבי הגאוכימיה האיזוטופית, הרולד יורי (Harold Urey), היה פרופסור באוניברסיטת שיקגו, שממנה יצאו כמה מהמחקרים הראשונים על איזוטופים יציבים בריכוזים טבעיים (זאת אומרת, לא בריכוזים מועשרים לשימוש כסמנים). במאמר מ-1947 שטח יורי את הבסיס התרמודינמי להתמיינות איזוטופים בשיווי משקל בין חומרים שונים, ובו הראה שההעדפה לריכוז האיזוטופים הכבדים של חמצן במינרלים קרבונטיים (ביחס למים) תלויה בטמפרטורה (Urey, 1947); יורי הציע שההרכב האיזוטופי של מינרלים קרבונטיים יכול לספק מידע על הטמפרטורה שבה נוצרו. בעקבות עבודה זו ורבות אחריה, התבססו מדידות יחס האיזוטופים $^{18}O/^{16}O$ במינרלים קרבונטיים כפרוקסי משולב לטמפרטורה של מי הים ולכמות הקרח המצוי על היבשה. הסיבה לכך שפרוקסי זה משלב מידע על טמפרטורה ועל כמות הקרח היבשתי היא שלקרח יבשתי יחס $^{18}O/^{16}O$ נמוך מזה של מי הים, ולכן ככל שמצטבר יותר קרח על היבשה (למשל, בעידני הקרח), נותר האוקיינוס מועשר ב-^{18}O (Shackleton, 1967). אורגניזמים ימיים רבים יוצרים קונכייה או שלד מקלציום קרבונט (למשל, מיני צדפות, שבלולים, אצות ופלנקטון), וכך ככל שהטמפרטורה שבה חיו האורגניזמים נמוכה יותר, וככל שהיה קיים יותר קרח על היבשה בזמן חייהם, יחס האיזוטופים $^{18}O/^{16}O$ בשלדיהם גבוה יותר.

משתנה אקלימי נוסף, שלו השלכות חברתיות וכלכליות מרחיקות לכת, הוא גובה פני הים. די בעלייה של עשרות סנטימטרים כדי להציף שטחי יבשה גדולים, שכיום חיים בהם עשרות מיליוני אנשים (Stocker et al., 2013). מעבר לכך, חדירת מי מלח למי התהום הרדודים תהפוך שטחי חקלאות עצומים לבלתי שמישים, ותפגע באספקת מי שתייה לאוכלוסיות במדינות מתפתחות. גם אוכלוסיות שאינן גרות בשטחים שיוצפו, אך שוכנות בקרבת החוף, תיחשפנה לסכנת הצפה בזמן סערות. מחקרים רבים עוסקים בכימות הנזק של עלייה נתונה בגובה פני הים; הנזק הכלכלי של עלייה בת 50 ס"מ בגובה פני הים מוערך במאות מיליארדי דולרים. עם זאת, קיימת אי-ודאות ביחס למידת העלייה הצפויה בתגובה לשינוי



איור 2: עדויות גאולוגיות לקשר בין ריכוז CO_2 אטמוספרי לבין הטמפרטורה וגובה פני הים; **מימין** הקשר בין ריכוז CO_2 אטמוספרי לבין הטמפרטורה, כפי שמצטייר מפרוקסים גאוכימיים. **משמאל** הקשר בין ריכוז ה-CO_2 באטמוספרה לבין גובה פני הים, כפי שמצטייר מפרוקסים גאוכימיים וגאולוגיים. המספרים מציינים את 1: העידן הקרחוני האחרון; 2: טרום המהפכה התעשייתית; 3: היום (2020); 4: העידן הבינקרחוני האחרון; 5: לפני 3 מיליון שנה; 6: לפני 32 מיליון שנה; 7: לפני 40 מיליון שנה. ריכוז ה-CO_2 הנוכחי (מספר 3) הופיע בעבר, בתקופה שבה היו פני הים גבוהים ביותר מ-10 מטרים מגובהם כיום (מספר 5). מבוסס על נתונים מ: Alley, Clark, Huybrechts & Joughin, 2005; Raymo et al., 2011; Dutton et al., 2015; Dutton & Barlow, 2019.

בריכוז ה-CO_2 באטמוספרה. השוואה בין רמות ה-CO_2 לבין גובה פני הים בעבר יכולה לספק הקשר חשוב, גם אם אינה מספקת הבנה מנגנונית מלאה.

את גובה פני הים בעבר ניתן לשחזר על ידי מדידת גובהן הנוכחי של תופעות הנוצרות בפני הים ושגילן ידוע. לשם המחשה, מזח רומי, שהיה בפני הים כשנבנה לפני כאלפיים שנה וכיום נמצא בעומק חמישה מטרים מתחת לפני הים, מעיד על שינוי בגובה פני הים היחסי. כגורם לטביעת המזח, לא ניתן להבדיל בין עלייה במפלס המים לבין שקיעת יסודות המזח, ולכן אפשר לומר רק שהיה שינוי בגובה פני הים היחסי, לא המוחלט. באופן דומה, אפשר למדוד את הגובה והגיל של תופעות טבעיות שנוצרות בפני הים, כגון סלעים הנוצרים רק בקו החוף או שוניות הגדלות עד לפני המים כמעט. בדומה למזח, גם במקרה של תופעות טבעיות יש להפריד בין השפעות טקטוניות ואחרות ששינו את גובהה של התופעה מבלי להשפיע על מפלס המים הגלובלי, לבין שינויי מפלס של ממש. הפרדה זו לא תמיד קלה, ולעיתים בלתי אפשרית, והיא מדויקת רק עבור תופעות שגילן צעיר יחסית במונחים גאולוגיים – עשרות עד מאות אלפי שנים (Raymo et al., 2011; Dutton & Barlow, 2015). כתוצאה מכך, אי-הוודאות לגבי שחזורים עתיקים יותר של גובה פני הים היא גדולה.

על הקשר בין ריכוז ה-CO_2 באטמוספרה, הטמפרטורה הממוצעת וגובה פני הים בעבר הגאולוגי

משהוצגו מעט מהפרוקסים ל-CO_2 באטמוספרה (בועיות בקרח, יחס האיזוטופים $^{13}C/^{12}C$ באלקנונים) לטמפרטורה (יחס האיזוטופים $^{18}O/^{16}O$ בשלדי $CaCO_3$) ולגובה פני הים (מדידות גובה של תופעות הנוצרות בפני הים), אפשר לבחון את הקשר בין משתנים אלה בעבר הגאולוגי.

פורמיניפרים הם יצורים חד-תאיים, חלקם שחיינים וחלקם שוכני קרקעית (תמונה 1), שיוצרים שלד חיצוני מקלציום קרבונט. השוואת ארכיב ה-CO_2 בבועיות בקרח האנטארקטי ליחס האיזוטופים $^{18}O/^{16}O$ בשלדי פורמיניפרים שוכני קרקעית חושפת מתאם טוב (איור 2 משמאל). בתקופות שבהן ריכוז ה-CO_2 באטמוספרה נמוך, יחס האיזוטופים $^{18}O/^{16}O$ בשלדים הינו גבוה, ומעיד על טמפרטורה נמוכה ועל מאגרי קרח גדולים על היבשה. בתקופות שבהן ריכוז ה-CO_2 באטמוספרה גבוה, ההרכב האיזוטופי של השלדים מצביע על טמפרטורה גבוהה יותר ועל פחות קרח. שני הארכיבים הללו משקפים את

המחזוריות האקלימית בין עידני קרח לעידנים בינקרחוניים במשך כמיליון השנים האחרונות. למחזוריות האקלים הקרחונית-בינקרחונית קשר הדוק למחזוריות במסלול סיבובו של כדה"א סביב השמש וסביב צירו, אך שינויים אלה במסלול כדה"א אינם מספיקים בפני עצמם כדי להסביר את מחזוריות האקלים. ריכוז ה-CO_2 באטמוספרה מראה מתאם טוב עם המחזוריות הקרחונית-בינקרחונית, ונחשב לגורם שהגביר את עוצמת המחזוריות האקלימית מעבר לעוצמתה בהשפעת מסלול כדה"א בלבד. המתאם בין ריכוז ה-CO_2 לטמפרטורה אינו מחייב קשר סיבה–תוצאה. עם זאת, נראה ששינוי מחזורי של כ-100 ppm בריכוז ה-CO_2 בא בד בבד עם שינוי מחזורי ומשמעותי בטמפרטורה ובכמות הקרח על היבשות. מבלי להיכנס לפרטים, מפאת קוצר היריעה, אפשר לשייך כמחצית מהשינוי ביחס האיזוטופים $^{18}O/^{16}O$ בשלדים לשינויים בכמות הקרח על היבשות וכמחצית לשינויים בטמפרטורה (Schrag, Hampt & Murray, 1996). השינוי המחזורי בטמפרטורה של קרקעית האוקיינוס, שאותה "מקליטים" שלדי הפורמיניפרים, הוא של כ-5 מעלות צלזיוס (איור 2 מימין). עם השינוי בטמפרטורה, בא שינוי קרחוני-בינקרחוני בגובה פני הים של כ-120 מטרים (איור 2 משמאל), הנובע ברובו ממחזוריות בכמות הקרח על היבשות ובחלקו מהשפעת הטמפרטורה על נפח המים באוקיינוס.

אם נוסיף להשוואה נקודות זמן עתיקות ממיליון שנה, נראה שהפעם האחרונה שבה היה ריכוז ה-CO_2 קרוב לריכוזו הנוכחי (415 ppm) הייתה לפני כ-3 מיליון שנה. את ריכוז ה-CO_2 בתקופה זו אנו יודעים ממדידת ההרכב האיזוטופי של פחמן באלקנונים, שהוזכרו למעלה. הטמפרטורה הממוצעת הייתה חמה בכ-3 מעלות צלזיוס מהטמפרטורה היום (איור 2 מימין), ופני הים היו גבוהים בעשרות מטרים מגובהם היום (איור 2 משמאל). אפשר לראות שהרגישות הן של הטמפרטורה הממוצעת והן של גובה פני הים לריכוז ה-CO_2 גבוהה יותר בעידנים הקרחוניים-בינקרחוניים מאשר בתקופות קדומות יותר. ההבדל נובע, בין השאר, מכמות הקרח היבשתי הגדולה יחסית בעידנים הקרחוניים, שבהם היו חלקים גדולים מאירופה ומצפון אמריקה מכוסים בקרח. חשוב לציין שהרגישות שמציגה מערכת האקלים הקדום לריכוז ה-CO_2 היא בקירוב הרגישות בשיווי משקל. אלו הם הטמפרטורה וגובה פני הים לאחר שמערכת האקלים הגיבה באופן מלא (בקירוב) לריכוז ה-CO_2 – זאת אומרת, מאזן הקרינה לאחר פעולת מנגנוני ההיזון החוזר האטמוספריים נסגר, ועבר די זמן שבו האוקיינוס ומאגרי הקרח שינו את נפחם ותנועתם, ובכך השפיעו על היבטים נוספים, כמו גוון פני השטח של כדה"א והזרימה באוקיינוסים. האקלים הנוכחי טרם הגיע לשיווי משקל עם ריכוז ה-CO_2 ההולך וגדל. עוד צפויה התחממות, שתוביל להמסת קרחונים בים וביבשה, לשינויים בצמחייה ובעננות, ועוד. ארכיבי הפליאו-אקלים נותנים הצצה לשינוי הצפוי ככל שיתקדם כדה"א לשיווי משקל אקלימי עם ה- CO_2 באטמוספרה.

סיכום

לסיכום, למרות ודאות גמורה לגבי היות ריכוזי ה-CO_2 במאתיים השנים האחרונות חריגים בראי הזמן, ואף שברור שפעילות אנושית היא המקור לעלייה בריכוז ה-CO_2, קיימת אי-ודאות לגבי עוצמת התגובה האקלימית והאקולוגית לשינויים אלה. אי-הוודאות נובעת בעיקר מהבנה חלקית של התהליכים המעורבים והאינטראקציות המורכבות ביניהם, וכן ממגבלות כוח חישוב, שאינן מאפשרות סימולציה מדויקת של התהליכים. ארכיבים גאולוגיים – טבעות עצים, קרח באנטארקטיקה ובגרינלנד, משקעים בקרקעית אגמים ובאוקיינוסים, נטיפים וזקיפים במערות, ועוד – הם מקור חשוב של מידע על התגובה האקלימית והאקולוגית לשינויים בריכוז ה- CO_2 באטמוספרה.

במאמר זה הובאו מעט מהעדויות לקשר שבין ריכוז ה-CO_2 באטמוספרה לבין הטמפרטורה הממוצעת וגובה פני הים. מעבר להתחממות ולעלייה בגובה פני הים, לעלייה בריכוז ה-CO_2 באטמוספרה יש השלכות רבות, שבהן לא ניתן להעמיק כאן. עלייה בחומציות האוקיינוסים (CO_2 מומס הוא חומצה פחמתית) צפויה להשפיע על אורגניזמים מסוימים, למשל על שוניות אלמוגים. השינוי בדפוסי משקעים צפוי להוביל באזורים מסוימים לבצורות ושריפות ובאחרים להצפות, שיטפונות ומפולות בוץ. הפשרת קרקעות קפואות והחלפתן בביצות, למשל בסיביר, כבר מובילה לייצור מתאן, שהוא בעצמו גז חממה. בתי גידול בים וביבשה משתנים ועימם מגוון המינים. ועוד כהנה וכהנה. על רבים מהשינויים הללו בעבר אפשר ללמוד מארכיבים גאולוגיים, גאוכימיים ופליאונטולוגיים (מאסף מאובנים מקרוסקופיים ומיקרוסקופיים).

רשימת ספרות

Alley, R.B., Clark, P.U., Huybrechts, P. & Joughin, I. (2005). Ice-Sheet and Sea-Level Changes. *Science 310*: 456-460.

Arrhenius, S. (1896). XXXI. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 41:* 237-276. doi.org/10.1080/14786449608620846

Dutton, A. & Barlow, N.L.M. (2019). What do we know about Last Interglacial sea level? *Pages Magazine 27*: 6-7.

Dutton, A., Carlson, A.E., Long, A.J., Milne, G.A, Clark, P.U., DeConto, R., Horton, B.P, Rahmstorf, S. & Raymo, M.E. (2015). Sea-level rise due to polar ice-sheet mass loss during past warm periods. *Science 349*: aaa4019.

Eggleston, S., Schmitt, J., Bereiter, B., Schneider, R. & Fischer, H. (2016). Evolution of the stable carbon isotope composition of atmospheric CO_2 over the last glacial cycle. *Paleoceanography 31*. doi.org/10.1002/2015PA002874

Farquhar, G.D., Ehleringer, J.R. & Hubick, K.T. (1989). Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 40*: 503-537.

Keeling, D.K., Piper, C.P., Bacastow, R.B., Wahlen, M., Whorf, P.W., Heimann, M. & Meijer, A. (2001). Exchanges of atmospheric CO_2 and $^{13}CO_2$ with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000. I. Global aspects. *SIO Reference Series No 01-06, Scripps Institution of Oceanography, San Diego*, 88 pages.

Keeling, C.D. (1979). The Suess effect: ^{13}Carbon-^{14}Carbon interrelations. *Environment International 2:* 229-300. doi.org/10.1016/0160-4120(79)90005-9

Lisiecki, L.E., Raymo, M.E. (2005). A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}O$ records. *Paleoceanography 20:* PA1003.

Pagani, M. (2014). Biomarker-Based Inferences of Past Climate: The Alkenone pCO_2 Proxy. *Treatise on Geochemistry (Second Edition) 12*: 361-378.

Raymo, M.E, Mitrovica, J.X., O'Leary, M.J, DeConto, R.M. & Hearty, P.J. (2011). Departures from eustasy in Pliocene sea-level records. *Nature Geoscience 4:* 328-332.

Rubino, M., Etheridge, D.M., Thornton, D.P., Howden, R., Allison, C.E., Francey, R.J., Langenfelds, R.L., Steele, L.P., Trudinger, C.M., Spencer, D.A., Curran, M.A.J., Van Ommen, T.D. & Smith, A.M. (2019). Revised records of atmospheric trace gases CO_2, CH_4, N_2O and $\delta^{13}CO_2$ over the last 2000 years from Law Dome, Antarctica. *Earth Systems Science Data 11*: 473-492.

Schrag, D.P., Hampt, G. & Murray, D.W. (1996). Pore Fluid Constraints on the Temperature and Oxygen Isotopic Composition of the Glacial Ocean. *Science 272*: 1930-1932.

Shackleton, N. (1967). Oxygen Isotope Analyses and Pleistocene Temperatures Re-assessed. *Nature 215:* 15-17.

Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgeley, P.M. (eds.) (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I of the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Stuiver, M. & Quay, P.D. (1981). Atmospheric ^{14}C changes resulting from fossil fuel CO_2 release and cosmic ray flux variability. *Earth and Planetary Science Letters 53*: 349-362.

Suess, H.E. (1955). Radiocarbon concentration in modern wood. *Science 122:* 415-417. 10.1126/science.122.3166.415-a

Tans, P.P., De Jong, A.F.M. & Mook, W.G. (1979). Natural atmospheric ^{14}C variation and the Suess effect. *Nature 280:* 826-828.

Urey, H.C. (1947). The thermodynamic properties of isotopic substances. *Journal of the Chemical Society: 562-581.*

מערכת המזון מול שינוי האקלים

עופר מנדלסון[1]

ההכרה הנרחבת בקיומו של תהליך שינוי האקלים הובילה להבנה עולמית בצורך הקיים במקביל הן בהפחתת הפליטות של גזי חממה (mitigation) והן בהיערכות להשפעות הצפויות (adaptation). אחד הגורמים המשמעותיים ביותר בשני היבטים אלה הוא מערכת המזון, שמצד אחד היא מהתורמים הראשיים לפליטות ומצד שני הינה צורך חיוני לקיומנו ורווחתנו שכבר עומד בפני אתגרים רבים עקב שינוי האקלים.

ההכרה הנרחבת בקיומו של תהליך שינוי האקלים הובילה להבנה עולמית בצורך הקיים במקביל הן בהפחתת הפליטות של גזי חממה (mitigation) והן בהיערכות להשפעות הצפויות (adaptation). אחד הגורמים המשמעותיים ביותר בשני היבטים אלה הוא מערכת המזון, שמצד אחד היא מהתורמים הראשיים לפליטות ומצד שני הינה צורך חיוני לקיומנו ורווחתנו שכבר עומד בפני אתגרים רבים עקב שינוי האקלים.

מהי מערכת המזון?

מערכת מזון, במובנה הרחב וכפי שהגדיר ברמה הבינלאומית ארגון החקלאות והמזון של האומות המאוחדות (FAO), כוללת רכיבים כמו סביבה, בני אדם, תשומות, תהליכים, תשתית, מוסדות וכדומה, וכן את הפעולות הקשורות לייצור, עיבוד, הפצה, הכנת וצריכת מזון. המערכת כוללת גם את ההשפעות החברתיות-כלכליות והסביבתיות של פעולות אלה. בשיח הציבורי והמחקרי הנסוב על שינוי האקלים יש כבר תשומת לב רבה לחקלאות, ובשנים האחרונות התרחבה ההבנה כי יש להתייחס גם לרכיבים אחרים, כמו תעשיית המזון, הובלה ובזבוז מזון, ובמקביל גם לבחירת התפריט של כל אחד ואחד מאיתנו.

מה תפקידה של מערכת המזון בהפחתת הפליטות של גזי חממה?

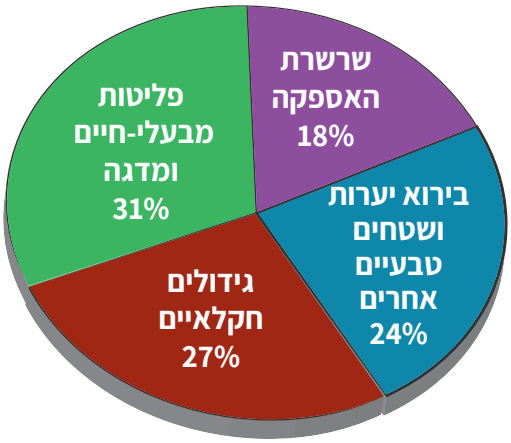
אפקט החממה המקובל בקרב רוב הקהילה המדעית כגורם מרכזי לשינוי האקלים הנוכחי הוא תהליך שבו גזי חממה הנמצאים באטמוספרה סביב כדור הארץ מאפשרים לקרינה מהשמש לעבור, אך כולאים חלק מהקרינה התת-אדומה המוחזרת מפני הקרקע ומומרת לחום. כמעט לכל הגזים יש אפקט חממה כלשהו; גז החממה המרכזי הוא אדי מים שאין לאדם כמעט שליטה על פליטתם, והשיח בנושא גזי חממה מתמקד באלו בעלי ההשפעה הגבוהה ביותר ואשר פליטתם תלויה גם בפעילות האדם. גז עיקרי בין גזי החממה הוא פחמן דו-חמצני (CO_2), ואחריו מתאן (CH_4) וחמצן דו-חנקני (N_2O). יצוין שגם לאוזון (O_3) ולפראונים (CFC) יש אפקט חממה מוכר, אך הוא שולי יחסית לשלישייה זו. פליטות המתאן והחנקן הדו-חמצני קטנות בהרבה מאלה של פחמן דו-חמצני, אך אפקט החממה שלהן לכל יחידת מסה גדול בהרבה – פי 84 ו-310 בהתאמה, וכדי לפשט זאת, נהוג להשתמש בחישוב הפליטות ביחידות שוות ערך לפליטת פחמן דו-חמצני. לגבי פליטות הפחמן הדו-חמצני חשוב לציין את התהליך ההפוך של קיבוע פחמן על ידי פוטוסינתזה או חומר אורגני בקרקע אשר ממתן את מאזן הפחמן השלילי. האדם משפיע גם על קיבוע הפחמן, בפעולות המקטינות השפעה מיטיבה זו, כמו בירוא יערות או עיבוד קרקע חקלאי אגרסיבי (בעיקר חריש עמוק ושימוש עודף בדשנים).

כימות הפליטות של גזי חממה הוא תהליך מורכב, ובהתאם למדדים של הפאנל הבינלאומי לשינוי האקלים (IPCC),

1 ד"ר עופר מנדלסון, אוניברסיטת תל אביב והפורום הישראלי לתזונה בת-קיימא.

אפשר לציין שמערכת המזון אחראית לכרבע מפליטות גזי החממה התלויות בפעילות האדם, בעיקר מחקלאות. קודם לה רק ייצור אנרגייה האחראי לכשליש מהפליטות, בעוד הפליטות מתעשייה (כחמישית) ומתחבורה (כשישית) נמוכות ממנה. הפליטות מחקלאות וייעור מהוות 13% מהפליטות של פחמן דו-חמצני, 44% מהמתאן ו-82% מהחמצן הדו-חנקני (IPCC, 2014). עם זאת, חשוב לציין שהתייעלות החקלאות תרמה לכך שרמת הפליטות הכוללת בעקבותיה לא עלתה בעשורים האחרונים, למרות הגידול בייצור החקלאי. אפשר לחלק פנימית את הפליטות ממערכת המזון לרכיבים הבאים (Poore & Nemecek, 2018) (טבלה 1 ואיור 1):

1. בירוא יערות ושטחים טבעיים אחרים – רכיב זה, המוכר גם כ-land use, כולל בעיקר הפחתת קיבוע הפחמן של השטחים שהוסבו לחקלאות.
2. גידולים חקלאיים – רכיב זה כולל בעיקר פליטת חמצן דו-חנקני מדישון סינתטי או אורגני, פליטת מתאן מגידולי אורז ופחמן דו-חמצני מתהליכים עתירי אנרגייה של ייצור דשנים סינתטיים ושימוש במכונות וכלים חקלאיים בשדה.
3. פליטות מבעלי חיים ומדגה – רכיב זה כולל בעיקר פליטת מתאן על ידי בעלי חיים מעלי גירה (בעיקר פרות), טיפול בהפרשות של בעלי חיים ודלק בשימוש ציי הדיג.
4. שרשרת האספקה – עיבוד מזון, הפצה (תחבורה), אריזה ושיווק.



איור 1: חלוקה של פליטות גזי החממה מרכיבים של שונים מערכת המזון באחוזים

בניתוח דומה אפשר לראות את ההבדל ברמת הפליטות המצטברת גם יחסית למקור המזון, שבו בולטת ההשפעה הגדולה של מזון מבעלי-חיים לעומת מקור צמחי (Poore & Nemecek, 2018). בניתוח של ממוצע הפליטות של גזי חממה במהלך ייצור אלף קלוריות מזון אפשר לראות שיחסית לרוב המזונות הצמחיים הוא פי 3.2 בביצים, פי 5.3 בחלב ובעוף, פי 12.2 בבשר בקר שמקורו בפרות חולבות ופי 36.4 בבשר בקר רגיל. מגמה דומה ואף בולטת יותר עולה בבחינת ההבדל בממוצע הפליטות במהלך ייצור 100 גרם חלבון ממקורות צמחיים כמו קטניות או דגנים לעומת ייצורו במזון שמקורו בבעלי חיים.

טבלה 1: חלוקה פנימית של פליטות גזי החממה מרכיבים שונים של מערכת המזון באחוזים

רכיב	בירוא יערות ושטחים טבעיים	גידולים חקלאיים	פליטות מבעלי-חיים ומדגה	שרשרת האספקה
השפעות פנימיות	מרעה וגידול מזון לבעלי חיים – 16% גידול מזון לאדם – 8%	גידול מזון לאדם – 21% גידול מזון לבעלי חיים – 6%		עיבוד מזון - 4% הפצה - 6% אריזה - 5% שיווק - 3%
השפעה כללית	24%	27%	31%	18%

בבחינה עולמית של האפשרויות להפחתת פליטות גזי חממה הועלו בשנים האחרונות כיוונים שונים שכדי ליישמם נדרשת התאמה לתנאים המקומיים ולאופי החקלאות וגם ליכולת היישום שנגזרת מאופי החברה והכלכלה המקומית (Niles et al., 2018; Loboguerrero et al., 2019):

1. חקלאות אקסטנסיבית (תמונה 2) (מרעה, חקלאות מסורתית מעוטת תשומות של חקלאים קטנים) – במדינות מתפתחות שבהן נפוץ יותר סוג כזה של חקלאות (במיוחד באפריקה) ניכרת במיוחד הדרישה הגוברת למזון, עם גידול האוכלוסייה. שימוש נרחב יותר בדשנים באופן מושכל יעלה אומנם את הפליטות הישירות, אך עליית היבול ליחידת שטח תפחית את בירוא היערות, ובחישוב משוקלל תרד כמות הפליטות. שיטות אגרואקולוגיות שיפורטו בהמשך יכולות לסייע בהגדלת הייצור ליחידת שטח תוך הפחתת תוספת דשנים ובירוא שטחים טבעיים. גם במדינות מפותחות שבהן החקלאות כוללת בעיקר מרעה יכולות שיטות אגרואקולוגיות להפחית את הצורך בדישון.

תמונה 2: חקלאות אקסטנסיבית מסורתית ללא שימוש במיכון

2. חקלאות אינטנסיבית (תמונה 3) הכוללת שימוש נרחב בתשומות ובמכשור – במדינות מתפתחות שנעשה בהן לעיתים שימוש עודף בדשנים (במיוחד בדרום מזרח אסיה) אפשר להפחית שימוש זה או להרחיב את השימוש בשיטות אגרואקולוגיות, גם בלי פגיעה משמעותית ביבול, וכן אפשר להשתמש במקורות אנרגייה חלופיים לייצור דשנים וחומרים אחרים. במדינות מפותחות אפשר להשתמש בשיטות מתקדמות של חקלאות מדייקת, המאפשרות אופטימיזציה של תשומות בכל מקום בשדה באמצעות ניטור וחישה מרחוק ומיכון מדויק, וכן לשלב שיטות אגרואקולוגיות.

תמונה 3: חקלאות אינטנסיבית הכוללת חריש עמוק, מיכון ושימוש נרחב בדשנים ובחומרי הדברה

3. עיבוד מזון והובלה – במדינות מתפתחות נדרש שיפור וייעול של התשתית הטכנולוגית לעיבוד, אריזה וקירור של המזון וכן של תשתית הדרכים והתחבורה, כל זאת כדי להקטין אובדן מזון ובכך להגדיל את הניצול האפקטיבי ליחידת שטח. במדינות מפותחות אפשר לשפר את היעילות האנרגטית של מפעלי העיבוד והאריזה ולשלב מקורות אנרגייה חלופית במידת האפשר. קיצור מרחקי הובלה מהשדה לצרכן, במקומות שבהם הדבר אפשרי, יסייע גם כן.

4. צריכה – שינוי תפריט למזונות שטביעת הרגל הפחמנית שלהם נמוכה יותר ישפיע לכל אורך מערכת המזון.

5. בזבוז מזון – הקטנת אובדן ובזבוז מזון היא כלי משמעותי לניצול אפקטיבי יותר של המזון המיוצר בכל יחידת שטח. כאמור, במדינות מתפתחות בזבוז המזון העיקרי שאפשר להקטינו הינו עדיין בשלבים שלאחר קטיף ולפני הגעת המוצרים לשווקים. לעומתן, במדינות מפותחות, בזבוז המזון נובע במידה רבה מהתנהגות הצרכנים שרוכשים כמויות גדולות יותר מהצריכה בפועל, או משאירים על המדף מוצרים פחות "אסתטיים" או באיכות מעט נמוכה יותר, גם אם אין בכך פגיעה בערכם התזונתי.

כאמור, כיוון חשוב למניעת פליטה של גזי חממה הוא הרחבת השימוש בשיטות אגרואקולוגיות שהשימוש בהן ירד לאיטו בעקבות המהפכה התעשייתית בחקלאות.

להלן כמה אפשרויות חשובות מסוג זה:

1. שימוש בקומפוסט – שמקורו בעיבוד אירובי של הפרשות בעלי חיים ופסולת צמחית. הכנה נכונה של קומפוסט ממחזרת את הפסולת ומייצרת דשן עשיר במקורות הזנה לצמח שגם משפר את תכונות הקרקע.
2. מַחְזוֹר זרעים – החלפה של גידולים שונים בין העונות באותו שדה לצורך שמירת פריון הקרקע ומניעת מחלות, כולל בין היתר קטניות שמקבעות חנקן מהאוויר ומקטינות את הצורך בדישון חנקני.
3. גידולי כיסוי – שילוב צמחייה טבעית וזרועה בתוך הגידול המסחרי כחיפוי לקרקע, לצורך מניעת סחף, שיפור מבנה הקרקע ותוספת חומר אורגני, והפחתת שיבוש עשבים.
4. שימור קרקע – שיטות למניעת סחף, כמו עיבוד לפי קווי גובה וטרסות, הפחתת חריש עמוק וניקוז השטח.
5. תמיכה בהדברה ביולוגית – הפחתת השימוש בחומרי הדברה שפוגעים גם באויבים טבעיים, שמירת צמחייה טבעית בחלקה החקלאית ומסביבה, כבית גידול, ופיזור אויבים טבעיים.

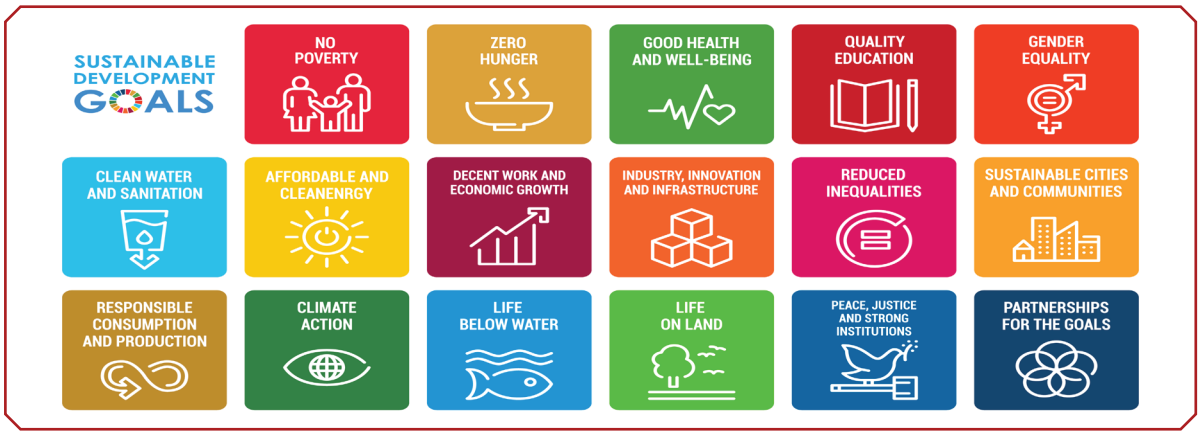
כיצד מערכת המזון צריכה להיערך להשפעות הצפויות של שינוי האקלים?

בראייה המקובלת על רוב הקהילה המדעית, גם אם נצליח להקטין את פליטות גזי החממה, אנו כבר בעיצומו של שינוי אקלים שמערכת המזון חייבת להיערך מולו. עיקרון "אי-חרטה" (No Regret) יכול לסייע בתהליך כזה, מאחר שהוא מכוון להיערכות באמצעות פעולות המועילות בפני עצמן, כך שלא נתחרט על ביצוען גם אם תחזיות שינוי האקלים לא יתממשו. ההיערכות יכולה להיות ממוקדת ואפקטיבית יותר, על ידי קביעת מטרה של שמירת ביטחון תזונתי, המוגדר כעמידה בעקרונות הבאים שגובשו בתחילת המאה ה-21 וקיבלו בהמשך הכרה רחבה בפסגה העולמית לביטחון מזון ברומא ב-2009 (FAO, 2006):

1. זמינות (availability) – זמינות מזון בכמות מספקת ובאיכות מתאימה, מייצור מקומי או יבוא, כולל החזקת מלאים ויכולת לאספקה מיידית. עצמאות ייצור מזון (food sovereignty) יכולה אומנם לתרום רבות להשגת זמינות יציבה, אך מאחר שהתנאים המקומיים ברוב המדינות אינם מאפשרים עצמאות מלאה, ההסתכלות על הזמינות היא ברמה אזורית ועולמית.
2. נגישות (access) – נגישות הפרטים בקהילה למקורות מתאימים לצורך השגת המזון הדרוש להם. נגישות זו תלויה בקיום תנאים חוקיים, פוליטיים, כלכליים וחברתיים הולמים, כמו יכולת השתכרות שתאפשר רכישת מזון או גישה של החקלאים למשאבים כמו קרקע ומים לצורך גידולו.
3. ניצול (utilization) – ניצול נכון של המזון באמצעות תפריט בריא, מים נקיים, תנאי סניטציה וטיפול רפואי שיאפשרו לספק את כל הצרכים הפיזיולוגיים של אנרגייה ותזונה.
4. יציבות (stability) – נגישות למזון נאות בכל עת, גם בנסיבות של משבר פתאומי, למשל מסיבות אקלימיות או כלכליות, או באירועים מחזוריים כמו עונות יבשות.

הדגש כיום בשיח בנושא ביטחון מזון הוא זמינות מזון ללמעלה מ-9 מיליארד אנשים בשנת 2050, כשלאור הגידול המקביל ברמת החיים תידרש תוספת של 50%-60% בכמות המזון לעומת היכולת הנוכחית. גישה זו התפתחה במהלך המהפכה הירוקה במחצית השנייה של המאה העשרים, אשר התמקדה בהגדלת יבולים, אך עם הזמן התרחבה לגישה הוליסטית יותר, הכוללת את כל ארבעת הרכיבים של ביטחון מזון. ראייה הוליסטית כזו תומכת גם בתמונה הרחבה שגובשה במסגרת הצבת היעדים לפיתוח בר-קיימא (SDG – Sustainable development goals) (איור 2) ל-2030 (UN, 2018); דוגמה לחשיבות הטמונה בראייה רחבה וגמישה היא משבר הקורונה והשלכותיו; בתחילת 2020 יצאה התחזית השנתית העולמית של משברי מזון שהתמקדה באזורי מלחמה ועוני, אך מייד לאחר פרסומה היא עודכנה, נוכח משבר הקורונה הלא צפוי שנפגעו בו מיידית הנגישות למזון ויציבות אספקתו, בעקבות הפגיעה בסחר המזון הבינלאומי ובמצב הכלכלי.

ההשפעות העיקריות של שינוי האקלים על ביטחון המזון שיש להיערך מולן סומנו לאחרונה במסמך משותף של מוסדות האו"ם העוסקים בנושא (FAO, IFAD, UNICEF, WFP & WHO, 2018). ההשפעה המרכזית שצוינה היא עלייה בכמות, התכיפות



איור 2: יעדי פיתוח בר-קיימא ל-2030 שגובשו בהסכמה בינלאומית

והמורכבות של אירועי קיצון כמו גלי חום ושריפות, בצורות, סופות ושיטפונות, שמתחילת המאה ה- 21 עלה מספרם השנתי בעשרות אחוזים, תוך השפעה משמעותית על ביטחון המזון. מעבר להשפעות המיידיות של אירועי קיצון קיימות גם השפעות ארוכות טווח, כמו מדבור או דלדול קרקע עקב סחף באירועי גשם קיצוניים, וכן שינויי תפוצה, התפרצות ועוצמה של מזיקים ומחלות בצמחים ובעלי חיים וחדירת מינים פולשים (Deutsch et al., 2018). שינוי האקלים משפיע לאורך זמן גם על סדירות העונות, ומאפשר תזוזה גלובלית של הגידול מאזורים שיתחממו ויתייבשו לאזורים צפוניים שבהם הקיץ מתחמם ומתארך.

כיווני ההיערכות העיקריים מול שינוי האקלים שעולים היום במחקר ועל ידי ארגונים בינלאומיים וממשלות מתמקדים בשינויים הדרגתיים הנדרשים לשם חיזוק החוסן (resilience), ואפשר לחלקם לפי אופי הפתרונות:

1. מדע וטכנולוגיה – סגירת פער היבול באזורים שהתנאים בהם מאפשרים לגדל יותר מהקיים כיום ליחידת שטח וחיזוק יכולת העמידה מול שינויים קצרי וארוכי טווח. המיקוד הוא בפיתוח המותאם לתנאים מקומיים של זנים עמידים יותר לעקות כמו חום, יובש ומזיקים, דשנים וחומרי הדברה חדשים, ציוד חקלאי מתקדם ועוד. כיוון נוסף הוא פיתוח אמצעי ניטור, מודלים ומערכות מידע שישפרו את ההתרעה המוקדמת על אירועי אקלים ויאפשרו סיוע שוטף לחקלאים ומקבלי החלטות על סמך מידע שוטף ונגיש מהשטח.
2. תכנון ומדיניות – פיתוח כלי תכנון ומדיניות לאומיים ובינלאומיים המשלבים ראייה רחבה כלכלית, חברתית וסביבתית באופן גמיש ומותאם לתנאים המקומיים. כלים אלה צריכים להתבסס על ניהול הערכת סיכונים מבוססת-מידע באופן שוטף, שיתוף ידע וניסיון, החזקה ושינוע של מלאי חירום, קידום צעדים גמישים לחיזוק החקלאות המקומית באמצעות תמיכות ו/או שוק חופשי, חיזוק רשתות תמיכה חברתיות, העצמת נשים ואוכלוסיות מוחלשות, מימון וביטוח אסונות טבע לחקלאים וכדומה.
3. היערכות שותפי מערכת המזון (חקלאים, סוחרים, מפעלים וכולי) – התאמת הגישה והפעילות של כל השותפים למצב חדש שמחייב היערכות וקבלת החלטות מתאימה, תוך התעדכנות בידע הנדרש לשם כך. לדוגמה, ייתכן שעל פי תרחיש עדכני של שינוי אקלים, חקלאים יצטרכו לתכנן אילו גידולים וזנים יגדלו ובאילו שיטות, ומה יהיו מקורות המים שלהם, ואף להחליט על נטישת אזור גידול שהתנאים בו מידרדרים, והסוחרים ותעשיית המזון יצטרכו לתכנן את מיקוד, היקף ומיקום הפעילות שלהם בהתאם.
4. שינוי הרגלי קנייה ותפריט של הצרכנים – הצרכנים יצטרכו להתאים את עצמם לזמינות המזון הצפויה ולאתגרי נגישות ויציבות אפשריים, כמו עליות מחירים ומחסורים זמניים, על ידי חיסכון, החזקת מלאי ביתי ואף גידול עצמי מסוים של מזון, למשל. התאמה זו יכולה לחייב גם שינוי הדרגתי בתפריט כדי לאפשר ניצול נכון של המזון.

חלק גדול מההיערכות הנדרשת מוטל על כתפיהם של החקלאים והציבור הרחב, וחשוב להביא בחשבון שאימוץ שינויים כאלה יכול להיתקל באתגרים וחסמים כלכליים, חברתיים ותרבותיים שחשוב לזהותם לצורך התמודדות עימם. לדוגמה, מחקר של אוניברסיטת תל אביב שנערך בקרב חקלאים בישראל ובקניה בנושא אימוץ שיטות חדשות להדברה אזורית משולבת, הראה כי מעבר לחסמים ראשוניים של עלויות וידע, לכל אזור מאפיינים משלו המחייבים זיהוי ומענה מתאים. בכל אחת מהארצות כלל המחקר מאות חקלאים; בישראל עסק המחקר בהדברה משולבת של זבוב הים התיכון במטעים ונערך בשנים 2012–2017 בקרב כל מגדלי הפירות בצפון הארץ, והמחקר בקניה עסק בזבוב המזרחי, שהוא מזיק מרכזי במנגו, ונערך בקרב כל המגדלים באחד ממחוזות המדינה. בישראל בלטו החשש מאי קבלת התרעה מספקת על התפרצות ועלייה מהירה בנגיעות וחוסר ניסיון בשיתוף פעולה אזורי רחב בתחומים אלה, שהובילו לגיבוש תוכנית מתאימה של הצוות המקצועי והניהולי לשיפור אמון החקלאים בתמיכה המקצועית וגיבוש מנגנונים לחיזוק השקיפות והניהול האזורי. בקניה בלט החוסר בתשתית מתאימה שתאפשר הפצה של הציוד הנדרש, כמו מלכודות ללכידה המונית וחומרי הדברה ביולוגיים וכן מחסור בהון שוטף אצל החקלאים, ולכן נדרשו פתרונות להפצה על ידי סוכנים מקומיים, כולל מתן מיקרו אשראי לחקלאים.

מהן ההמלצות הכוללות למערכת המזון?

בתחילת 2019 פורסם דו"ח Eat-lancet (Willet et al., 2019) על ידי קבוצת מדענים בינלאומית שקיבץ Lancet, אחד מכתבי העת הרפואיים המובילים בעולם. דו"ח זה הציג שורת המלצות משולבת להתמודדות מערכת המזון מול האתגרים של שינוי האקלים, ובעקבותיו החלה פעילות במדינות שונות להפצת ההמלצות והתאמתן לתנאים מקומיים. ההמלצות שילבו היבטים כלכליים, חברתיים וסביבתיים, כולל התמקדות גם באיכות התזונה מעבר לצורך הבסיסי להגדיל כמותית את ייצור המזון נוכח גידול האוכלוסייה הצפוי בעולם. חשיבותו של היבט זה התבהרה היטב עם פרוץ משבר הקורונה, שבמהלכו התבררה השפעתן הבריאותית השלילית של מחלות רקע המושפעות משמעותית מאיכות התזונה, כמו השמנת יתר, סוכרת ומחלות לב.

הדו"ח הגדיר כשתי מטרות אב תזונה בריאה וייצור מזון בר-קיימא, והמליץ על חמש אסטרטגיות להשגתן:

1. גיוס מחויבות לאומית ובינלאומית למעבר לסוגי תזונה בריאים – צריכה מוגברת של סוגי מזון שמקורם מהצומח ובמקביל הגבלה משמעותית של סוגי מזון שמקורם מהחי. זאת על ידי הגדלת הזמינות, הנגישות ויכולת הקנייה (עלות סבירה) של מזון בריא, שיפור המידע ושיווק המזון וכן השקעה בחינוך לקיימות ולתזונה בריאה.

2. כיוון מחדש של סדר העדיפויות בחקלאות, מייצור כמויות גדולות של מזון לייצור מזון בריא – המדיניות החקלאית ביבשה ובים צריכה לעבור לייצור מגוון וגדול של סוגי מזון מזינים, במקום להגדיל את הכמויות של מספר גידולים מצומצם שרבים מהם משמשים כיום להזנת בעלי חיים.

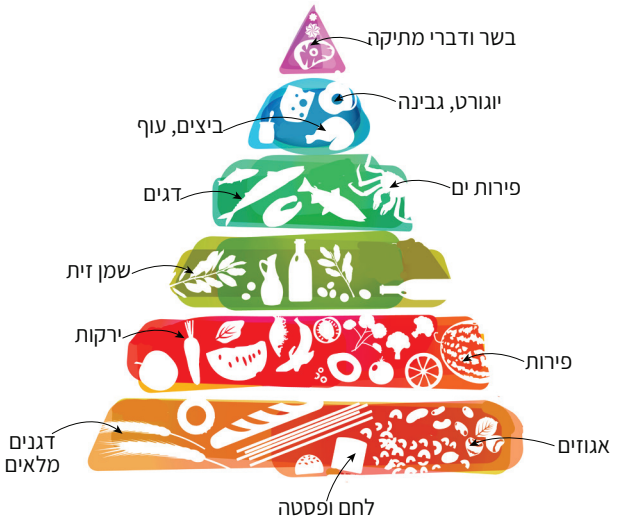
3. הגברת ייצור מזון באופן מקיים, כדי להגדיל תפוקה באיכות גבוהה – הפחתה של 75% לפחות בפערי היבול בשטחים החקלאיים הקיימים, שיפורים קיצוניים ביעילות השימוש במים ובדשנים ויישום דרכים למיתון שינוי האקלים. כדי לעמוד במטרות הסכם פריז שנחתם ב-2015 על ידי רוב מדינות העולם ועיקרו העצמת שיתוף הפעולה הבינלאומי מול שינוי האקלים, מטרת מערכת המזון הגלובלית צריכה להיות פליטות גזי חממה ברמה נמוכה יותר מקיבוע הפחמן משנת 2040 ואילך.

4. משילות הדוקה ומתואמת על היבשה והאוקיינוסים – הזנת האנושות על בסיס הקרקע החקלאית הקיימת, ללא כל הרחבה לתוך מערכות אקולוגיות טבעיות ויערות עשירים במינים, שיקום וייעור מחדש של קרקעות מדולדלות, אימוץ אסטרטגיה של "חצי כדור ארץ" לשימור המגוון הביולוגי, המבוססת על שימור של לפחות 80% מעושר המינים, על ידי שמירת 50% מהשטח הנותר בכדור הארץ כמערכות אקולוגיות טבעיות.

5. הפחתה למחצית אובדן ובזבוז המזון – חינוך הצרכנים ויישום מדיניות ציבורית ופתרונות טכנולוגיים לאורך שרשרת האספקה לצורך שיפור בתשתיות הטיפול לאחר קטיף, בשינוע המזון, בעיבודו ובאריזתו.

כיצד מערכת המזון בישראל מתמודדת עם שינוי האקלים?

הפורום הישראלי לתזונה בת-קיימא משמש כיום כנציג Eat-lancet בישראל, ובמסגרת זו החלה פעילות מול גורמי מחקר ומקצוע ומול משרדי ממשלה שונים להתאמת המלצות הדו"ח לישראל. מאחר שבישראל אין עדיין תוכנית אב לאומית למזון, המטרה היא לגבש לראשונה תוכנית כזו, שישולבו בה גם ההמלצות בנושא שינוי האקלים. המלצה שכבר יצאה לאחרונה על ידי משרד הבריאות ומתאימה לרוח ה-Eat-lancet היא קידום תזונה ים תיכונית (איור 3) הידועה בזכות הסגולות הבריאותיות שלה והיתרונות שהיא מספקת לשמירה על אורח חיים בריא ומניעת מחלות. תפריט זה, המבוסס על **פירות וירקות טריים, קטניות, דגנים מלאים, דגים, שמן זית ומעט מוצרי חלב** ובשר, שחלקם הגדול מגיע מייצור מקומי, משלב בין תזונה בריאה להפחתת פליטות של גזי חממה (Dernini et al., 2017).



איור 3: פירמידת התזונה הים תיכונית

לפי מתודולוגיית ה-IPCC המשמשת לדיווחים של הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, רמת הפליטות של גזי חממה מחקלאות בישראל נמוכה בהרבה מהממוצע העולמי. על פי הדיווח, החקלאות תורמת פחות מ-3% מסך הפליטות במשק, כמחצית מהן נובעת ממשקי בעלי החיים וכמחצית מגידולים חקלאיים. אפשר להסביר הבדל זה מהממוצע העולמי על ידי ההיקף הנמוך של שטח חקלאי בישראל, יעילות גבוהה של השקיה, מספר נמוך יחסית של בעלי חיים מעלי גירה לנפש וחוסר בירוא יערות. עם זאת, שיטת חישוב זו מתייחסת רק לפעילות החקלאית בגבולות המדינה, בעוד מערכת המזון הישראלית נסמכת במידה רבה על יבוא של דגנים, בשר וסוכר וכן מזון ומספוא לבעלי חיים שגם אותם יש להביא בחשבון, כך שבפועל, כמות הפליטות הכרוכות במערכת המזון בישראל היא גבוהה יותר.

חקלאות ישראל נהנתה לאורך השנים מפעילות מחקר ופיתוח, הדרכה והטמעת הידע המצטבר בשדה, כולל עיסוק בסוגיות המשיקות להיערכות לשינוי האקלים. בין אלה אפשר לציין את ייעול השימוש במים ובממשקי דישון, טיפוח מיני צמחים המתאימים לגידול בתנאי יובש ועקת חום, התמודדות עם מזיקים חדשים וגורמי מחלות, תוך הפחתת השימוש בחומרי הדברה, צינון במשקי החי, שיפור שיטות לאחסון תוצרת חקלאית, אימוץ אמצעים אגרו-טכניים כגון כיסוי רשתות במטעים וחקלאות מדייקת ועוד. פעילות נוספת היא "בנק הגנים לצמחי ארץ ישראל" העוזר לשמור על המגוון הגנטי של צמחי התרבות וצמחי הבר של ישראל, כמשאב חשוב להתמודדות עם השינויים הסביבתיים.

בסוף 2017 הוגשו לממשלה המלצות לאסטרטגיה ותוכנית פעולה לאומית בנושא היערכות לשינוי האקלים שריכזו המשרדים השונים (המשרד להגנת הסביבה, 2017); בהיבט החקלאי צוינו התוכניות הבאות:

1. בנק הגנים – המשך איסוף הזרעים, שימורם ומחקר בשיטות אחסונם, לרבות קריאה להכרה בו כמוסד לאומי.
2. שימור משאבי קרקע, מים וסביבה – אימוץ והטמעה של עקרונות חקלאות משמרת הדוגלת במינימום הפרה של הקרקע, חיפוי צמחי רציף ומחזור גידולים, ניהול הנגר העילי בראייה אגנית וגישה אינטגרטיבית, סקרי סיכונים ופיתוח מערך מחקר וניטור לטווח ארוך, כולל לוויני.
3. סקר הערכת סיכונים אקלימיים לחקלאות בישראל (טופורוב וחובריו, 2019).
4. מזיקים פולשים – גיבוש צוותים מקצועיים, הכנת רשימות לאיסורי יבוא והגברת בדיקות, הרחבת מערך הניטור ובניית מודל ממוחשב להתאמה עתידית של אורגניזמים לתנאי האקלים.

5. השקעה במחקר ופיתוח ובמיפוי פערי ידע בחקלאות בנושאים רלבנטיים.

סיכום

בשנים האחרונות התבהרה חשיבותה של מערכת המזון, הן כאחד הגורמים המשפיעים ביותר על פליטת גזי חממה והן כגורם חיוני לקיומו ורווחתו של האדם שצריך להיערך במהירות לשינוי האקלים. מורכבות זו מחייבת חשיבה מחדש על מערכת המזון הנוכחית, תוך גיבוש המלצות וצעדים המבוססים על ראייה רחבה הכוללת היבטים סביבתיים, כלכליים וחברתיים כאחד. חשיבה מחדש כזו צריכה לכלול גם את שיפור התזונה כדי לנצלה להפיכת מערכת המזון למקיימת יותר ברמה העולמית והמקומית. דו"ח Eat-lancet הוא צעד חשוב בגיבוש המלצות רחבות כאלה, וכעת נדרשת התאמתו לתנאים והדרישות של ישראל. מעבר לקידום ידע וטכנולוגיה, צריכה התאמה כזו לכלול גם צעדי מדיניות, כמו חינוך לתזונה בריאה, חיזוק החקלאות ושיפור רשתות התמיכה לנזקקים באופן שיוכל לספק מזון בריא בכמות מספקת בכל עת.

רשימת ספרות

טופורוב, ג., פרל, מ., גרינהוט, צ. ולוינגרט אייצ'יצ'יי, ע. (2019). הערכות חקלאות ישראל לשינוי האקלים. אקולוגיה וסביבה דצמבר 2019, גיליון 4, (39-45).

המשרד להגנת הסביבה (2017). היערכות ישראל להסתגלות לשינוי אקלים: המלצות לממשלה לאסטרטגיה ותכנית פעולה לאומית.

Dernini, S., Berry, E.M., Serra-Majem, L., La Vecchia, C., Capone, R., Medina, F.X., ...& Corella, D. (2017). Med Diet 4.0: the Mediterranean diet with four sustainable benefits. Public health nutrition 20(7): 1322-1330.

Deutsch, C.A., Tewksbury, J.J., Tigchelaar, M., Battisti, D.S., Merrill, S.C., Huey, R.B. & Naylor, R.L. (2018). https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30166490/. Science 361(6405): 916-919.

FAO (2006). Food security policy brief.

FAO, IFAD, UNICEF, WFP & WHO. (2018). The state of food security and nutrition in the world 2018: building climate resilience for food security and nutrition. Food & Agriculture Org.

IPCC (2014). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Loboguerrero, A.M., Campbell, B.M., Cooper, P.J., Hansen, J.W., Rosenstock, T. & Wollenberg, E. (2019). Food and earth systems: priorities for climate change adaptation and mitigation for agriculture and food systems. Sustainability 11(5): 1372.

Niles, M.T., Ahuja, R., Barker, T., Esquivel, J., Gutterman, S., Heller, M.C., ... & Vermeulen, S. (2018). Climate change mitigation beyond agriculture: a review of food system opportunities and implications. Renewable Agriculture and Food Systems 33(3): 297-308.

Poore, J. & Nemecek, T. (2018). Reducing food´s environmental impacts through producers and consumers. Science 360(6392): 987-992.

UN (2018). Sustainable development goals for 2030.

Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., ... & Jonell, M. (2019). Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. The Lancet 393(10170): 447-492.

כיצד התחממות עולמית עלולה להשפיע על תוצרת חקלאית טרייה לפני ואחרי קטיף?

אלעזר פליק[1]

שינויי האקלים המתרחשים עם ההתחממות העולמית והעלייה ברמת הפד"ח באטמוספרה מהווים סכנה ממשית לאורגניזמים החיים ולסביבה. לכן אחד האתגרים העומדים בפני החקלאות הינו להתמודד עם שינוים אלה ולאפשר המשך קבלת יבולים גבוהים וזמינים; ואיכות חיצונית, פנימית ובריאותית של פירות וירקות טריים לאחר הקטיף.

מבוא

בני האדם תלויים בחקלאות כמקור לאספקת מזון רציף מהצומח ומן החי. לכן שינוי האקלים העולמי מציב בפני חקלאים ברחבי העולם שורת אתגרים. על פי מחקרים שנערכו ונערכים על ידי גופים בינלאומיים, טמפרטורת האוויר מעל פני הקרקע תעלה בין 0.3 ל-5.8 מעלות צלזיוס (מ"צ) עד סוף המאה ה-21 (IPCC, Climate change, 2014). שינויים אלה מובילים לתנודות קיצוניות במזג האוויר בעולם. כבר היום נחווים שינויי מזג אוויר קיצוניים, כמו גלי חום הגורמים לעליה בטמפרטורות היום והלילה גם בחורפים, או גלי קור עם כפור לא אופייני (Mditshwa, Magwza & Tesfay, 2019). ההשפעות על היבולים אינן ברורות. מחד גיסא, עלייה גבוהה של הטמפרטורה יכולה להאיץ את נשימת הצמח אשר קולט חמצן ופולט פחמן דו-חמצני (פד"ח), דבר שיגרום לירידה ביבול, בכמות המזון ובאיכותו (Bisbis, Gruda & Blanke, 2018). מאידך גיסא, ייתכן כי אחד הצדדים החיוביים בשינוי האקלים וההתחממות הגלובלית הוא העלייה בריכוז הפד"ח באוויר. עלייה זו יכולה להשפיע באופן חיובי על התפתחות הצמח כתוצאה מעלייה במוטמעים הנוצרים בתהליך הפוטוסינתזה, ובעקבות כך כמות היבולים תעלה. אולם, עלייה בריכוזי הפד"ח יכולה גם לגרום לפגיעה באספקת המזון, באיכותו ובביטחון התזונתי, שכן פד"ח גבוה גורם לירידה בתחולת חלבונים, ברזל ויסודות קורט בצמח ובתוך הפרי. בעיה נוספת שתגרום ההתחממות העולמית הינה עלייה בתצרוכת ההשקיה אל מול הירידה בזמינותם ואיכותם של המים הראויים להשקיה, דבר שיפגע הן בקרקע והן ביבולים ובאיכות הפרי הקטוף (Fallik et al., 2019).

בשל שינוי האקלים, מועדי חילופי העונות משתבשים, חלק מהעונות מתארכות וחלקן מתקצרות, והדבר יכול לגרום להקדמת קבלת יבולים כתוצאה מהתפתחות הצמח והפרי בצורה מהירה (חורפים ואביבים חמים), או להאט את ההתפתחות והבשלת הפרי והירק כתוצאה מטמפרטורות אביב נמוכות או קרה הגורמת לנשירת חנטים צעירים ולפגיעה ביבול. העלייה בטמפרטורה אף תעודד התפתחות של מחוללי מחלות, בעיקר פטריות אשר עלולות להגביר את יצירת הרעלנים (מיקוטוקסינים) במזון ואת החרפת בעיית חרקים-מזיקים הגורמים כיום לירידה של כ-18% ביצור החקלאי השנתי, ולכן עולה הדרישה העולמית של האדם למזון. טמפרטורות גבוהות יכולות לזרז את מחזור החיים של החרק-המזיק, להאיץ את גדילתו ליצור דורות רבים של חרקים מזיקים יותר במהלך השנה (Kiritani, 2006). בעיה נוספת העלולה להתרחש קשורה לחרקים מאביקים; בחורפים או באביבים חמים, הפריחה לא תמיד מסונכרנת עם פעילות החרקים-המאביקים, בעיקר בימים קרים וגשומים. כתוצאה

1 פרופ' אלעזר פליק, המחלקה לחקר תוצרת חקלאית, מנהל המחקר החקלאי, מרכז וולקני.

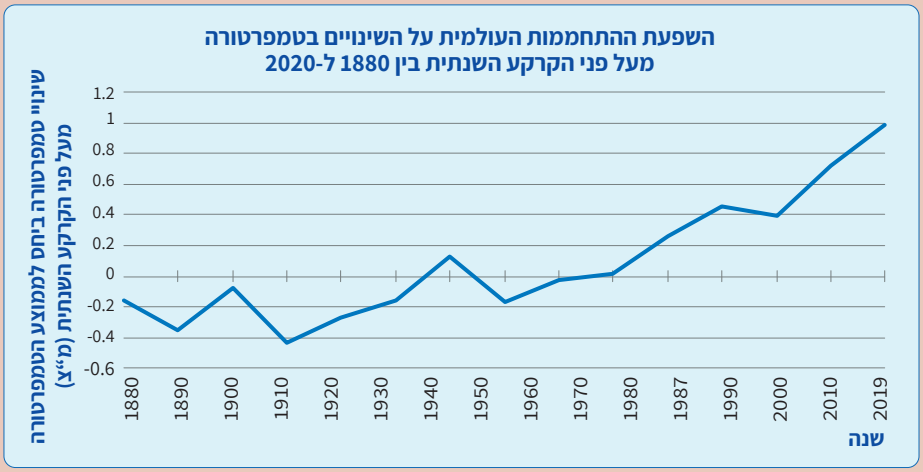
מכך חנטת הפירות יכולה להיות ירודה, והיבול ייפגע (Chitu & Paltineanu, 2020). ההתחממות העולמית עלולה אף לגרום לשינויים קיצוניים במועדי הלבלוב, הפריחה וגורמים נוספים הקשורים למחזור החיים של הצמח (פנולוגיה) אשר יפגעו באינטראקציה בין החרקים המזיקים והפונדקאים (הצמחים) ובכך יגרמו להדבקות של פונדקאים חדשים (Kiritani, 2006).

סכנה נוספת העלולה להתרחש כתוצאה מהשינויים באקלים וההתחממות העולמית הינה שינויים אנתרופוגניים (שינויים המתרחשים בטבע כתוצאה מפעילות אנושית, כמו פגיעה בטבע ובסביבה) שישפיעו על תפוצה של מיני צמחים באופן שיגביל, יקטין, או אפילו יכחיד אותם. צמחים אלה לא יוכלו לגדול ולצמוח בבתי הגידול המקוריים שלהם. למשל, מיני עגבניות בר שמקורם בהרי האנדים ואשר משמשים מקור לטיפוח עגבניות למאכל, מאחר שהם מכילים גנים העמידים בפני מחלות ומזיקים. עגבניות בר אלה אף עלולות לאבד את הגנים הייחודיים להן כתוצאה משינוי האקלים ובכך תיפגע האפשרות כי ישמשו חומר טיפוח לעגבניית מאכל עם עמידות למחלות ומזיקים שונים (Lin, Lu & Lee, 2020).

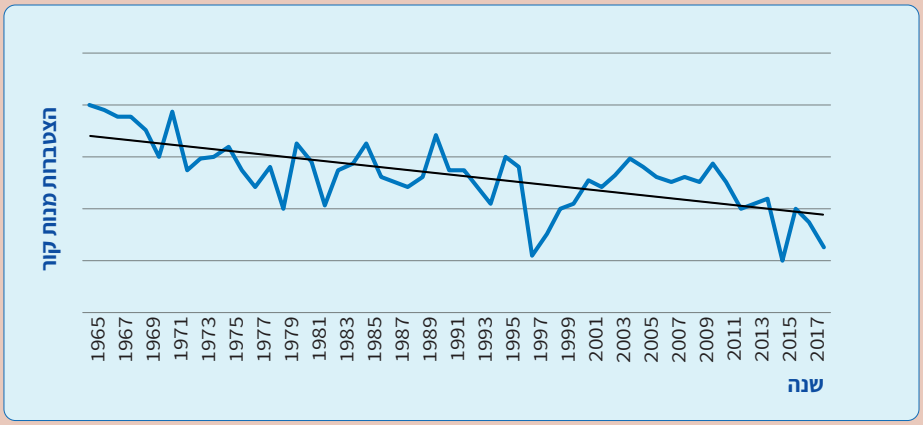
השפעת ההתחממות העולמית על הגידול, על היבול ועל איכות הפרי לפני הקטיף כאמור, השינויים העולמיים במזג האוויר גורמים לדאגה הולכת וגוברת בענף החקלאות. במהלך שלושים השנים האחרונות, טמפרטורת הקרקע עלתה בכ-0.2 מעלות צלזיוס לעשור (איור 1). חשיפת הצמח לטמפרטורות גבוהות יכולה לגרום לשינויים מורפולוגיים, אנטומיים, פיזיולוגיים וביוכימיים ברקמות השיח או העץ, דבר שישפיע על הגידול והתפתחות אברי הצמח, וכמובן על היבול. יבול הפירות והירקות ואיכותם קשורים קשר הדוק לתנאי הסביבה ולשינויים במזג האוויר, כמו עלייה או ירידה חדה בטמפרטורות ולאורך זמן, קרינת שמש חזקה, משבי רוחות, גשמי זעף או ברד אשר יפגעו ביבול ובאיכות הפרי או הירק לפני ואחרי הקטיף (Bal, Saha, Fand, Singh, Rane & Minhas, 2014). מלבד העלייה בטמפרטורה, שינוי האקלים משנה את הרכב הגזים באטמוספרה, כמו הפד"ח והאוזון, דבר המשפיע רבות על תהליכי תנובת הפרי או הירק (Lloyd & Farquhar, 2008).

מעבר לפגיעה בהתפתחות איטית או מהירה של הצמח כתוצאה משינוי האקלים, האבקת הפרחים היא תהליך קריטי בקבלת יבולים טובים, הקשור ישירות לחנטת הפרח והתפתחות הפרי והיבול (Peña & Carabalf, 2018). טמפרטורות הקיצון משפיעות גם על מאביקים, כמו דבורים, חרקים או פרפרים, דבר המשפיע על האבקת הפרח לקבלת פרי (Brown et al., 2016). בניסוי שנעשה נמצא כי טמפרטורה של 35 מ"צ במהלך תהליך חנטה ויצירת הפרי של לונגאן גרמה לאי נביטת האבקה על צלקת העלי ואי חנטת הפרי, והדבר גרם לירידה ביבול (Pham et al., 2015).

הצטברות מנות קור בצמחים כתוצאה מטמפרטורות קרות ידועה בכינוי 'קיוט' (vernalization – חשיפה למנות קור [chill units or chill hours]), ונחוצה לגרימת פריחה במיני עצים שונים, כמו נשירים (תפוח עץ, אגס, שקד, שזיף, קיווי, דובדבן וכיו"ב). ההתחממות העולמית, ובעיקר החורפים החמים, יחסית, מפחיתים את הצטברות מנות הקור הללו (איור 2). העץ הנשיר נכנס לתרדמה במהלך החורף, בשל הירידה בטמפרטורות, ובמהלך תקופה זו עליו לצבור מנות קור שיסייעו לו לצאת מהתרדמה, להתעורר ולפרוח באביב. מחסור במנות קור יכול לגרום לעיכוב בפריחת העצים הנשירים וכן להארכת עונת הפריחה ועונת הגידול, ובתוך כך ייתכן שאיכותו של הפרי תיפגע במועד הקטיף המיטבי; הפרי יהיה קטן, גמיש ופחות מתוק, ולכן בעל כושר אחסנה קצר יותר (El Yaacoubi et al., 2019). תופעה זו של חוסר קיוט קריטית מאוד לאזורים כמו ישראל; מרבית העצים הנשירים אינם מסוגלים לקבל את מנות הקור החיוניות [להם] בתנאים הקיימים בארץ כדי להיכנס (ובהמשך לצאת) לתרדמה הנחוצה לקבלת יבול נאות ואיכות פרי טובה. מצב זה עלול להחמיר עם ההתחממות העולמית עד כדי סכנה שבתוך שנים ספורות לא יהיה אפשר לגדל בארץ פירות נשירים. הפתרון להמשך גידול נשירים בארץ הוא בטיפוח עצי פרי בעלי דרישות נמוכות למנות קור, אם בכלל, כדי לקבל יבול ופרי איכותי. בנוסף, החקלאים יידרשו לאמץ אסטרטגיות גידול חדשות, כמו מציאה או פיתוח של חומרים שוברי-תרדמה. מצב דומה עלול להתרחש באזורי הגידול הצפוניים של צ'ילה, הנמצאת בחצי הכדור הדרומי, או בעמקים המרכזיים של קליפורניה (Fernandez, Whitney, Cuneo & Luedeling, 2020). אזורים אלה עלולים לאבד לפחות 50% ממנות הקור החורפיות עד סוף המאה ה-21 (Fernandez et al., 2020). במקביל, על מנת לגדל נשירים איכותיים יהיה צורך למצוא אזורי גידול חדשים, גבוהים יותר,



איור 1: שינויי הטמפרטורה במהלך 140 השנים האחרונות (מבוסס על נתונים מתוך IPCC, 2014)



איור 2: הירידה בהצטברות מנות קור לאורך 52 השנים האחרונות (Fernandez et al., 2020). מנת קור שווה למעלה אחת מתחת לאפס הביולוגי הנ"ל למשך שעה. לדוגמה, אם עץ שהאפס הביולוגי שלו הוא 4 מ"צ, ובלילה ירדה הטמפרטורה ל-2 מ"צ (דהיינו 2 מעלות מתחת לאפס הביולוגי), למשך 10 שעות, פירוש הדבר שהעץ קיבל 20 מנות קור (2 כפול 10)

ששוררות בהם טמפרטורות נמוכות יותר.

לכל פרי או ירק קיימות דרישות לטמפרטורות מיוחדות כתנאי לקבלת יבול איכותי. למשל, צבע פרי של תפוח עץ קשור ליצירת אנטוציאנינים (הפיגמנט שמקנה לחלקים שונים בצמח או בפרי את צבעם האדום-סגול. האנטוציאנינים הם נוגדי חמצון חזקים התורמים להאטת תהליכי הזדקנות באדם). יצירת אנטוציאנינים קְטֵנה בטמפרטורות אוויר גבוהות. פירות תפוח עץ החשופים לשמש הם בעלי תכולה גבוהה יותר של סוכר, בהשוואה לפירות הגדלים בין ענפי העץ. ענבים הגדלים בטמפרטורות גבוהות מכילים סוכר גבוה אך חומצה טרטרית נמוכה, דבר המשנה את המאזן בין סוכר וחומצה, ובכך פוגע בטעם האופייני והטוב של הענב. בניסוי שנערך נמצא כי עלייה של 10 מעלות הקטינה

ב-50% את תכולת החומצה הטרטרית בענבים. דווח גם כי טמפרטורות גבוהות במהלך הגדילה וההתפתחות של הפרי הקטינו את תכולת הוויטמינים. טמפרטורות גבוהות בעת גדילה והתפתחות של אבוקדו גרמו לעלייה בתחולת החומר היבש ולירידה בתכולת השמן, דבר שהאריך את משך הבשלת הפרי, ולכן פגם באיכותו וביכולת החקלאים לשווק פרי אבוקדו איכותי (Bisbis et al., 2018).

גם חלק מהירקות חייבים להיחשף למנות קור על מנת שיתקבלו היבולים האיכותיות והטובים ביותר. נמצא כי טמפרטורות גבוהות מדי במהלך שלב התרדמה, לפני התפתחות הפרי (עגבנייה) או ראש הירק (למשל, חסה, כרובית) מובילות לעיכוב התפתחות הירק ולירידה ביבול. משך התרדמה באספרגוס התארך ב-15 ימים כאשר הטמפרטורה עלתה ב-3 מ"צ, מ-2 מ"צ ל-5 מ"צ, דבר שגרם לירידה בהיווצרות גבעולי אספרגוס הראויים לשיווק (Nie, Chen & Liu, 2016). מדדי איכות כמו סוכרים, חומצות ותכולת חומרים נוגדי חמצון ישתנו אף הם כתוצאה משינויי האקלים הקיצוניים (Bisbis et al., 2019). כאמור, טמפרטורות גבוהות מאיצות את קצב התפתחות הירקות, מה שגורם להאצה בהתפתחות באיברי הצמח, לדוגמה, מהפריחה להיווצרות הפרי והבשלתו. הדבר מוביל לקטיף של מוצר עם מאפיינים לא רצויים, כמו תכולת סוכר נמוכה וחומציות גבוהה, או ריכוזים נמוכים ברכיבים התזונתיים של הפרי או הירק הקטופים. עגבניות שגדלו והתפתחו בטמפרטורות גבוהות, בדרך כלל גודלן קטן והן בעלות תכולת חומר יבש גבוה וריכוז סוכר נמוך, דבר הפוגע בטעם הפרי לאחר הקטיף. בברוקולי, חום יכול לגרום לעיוות בראש הירק ובקבלת ניצני פרחים גדולים, גם בטמפרטורה של 25 מ"צ, אשר גורמת להבשלה מוקדמת של ראש הברוקולי, עד כדי פסילתו לשיווק, ירידה במתיקות הראש ועלייה במרירותו (Kaluzewicz, Krzesinski & Knaflewski, 2009). בטמפרטורות מעל 12–16 מ"צ, השראת הפריחה בירקות נפגעת כתוצאה מחוסר מנות קור. בכרובית, השראת יצירת ראש הכרוב מתרחשת רק בטמפרטורות של 7–10 מ"צ, וטמפרטורות גבוהות ישרו עיכוב ביצירת הראש האכיל. לכן בקיץ, כאשר הטמפרטורות הרגילות גבוהות מהרגיל, נוצר מחסור בכרובית איכותית (Bisbis, Gruda & Blanke, 2019). שינוי האקלים, בעיקר העלייה בטמפרטורה, עלול לזרז התפתחות של מחלות; לגרום להופעתן מוקדם יותר בעונה; או להוביל לפיתוח מחלות חדשות שיפגעו בגידולים חד-שנתיים או רב-שנתיים בחקלאות, דבר שיהווה סכנה עולמית לביטחון במזון. שינויים אקלימיים אלה עלולים להגביר את מחוללי המחלות בצמחים באזורי הגידול הקיימים והידועים בקשר פונדקאי-פתוגן (הצמח מחולל המחלה), או להרחיב את תפוצתם של מחוללי המחלות לאזורי גידול חדשים, אזורים שכרגע אינם נגועים במחוללי המחלות השונות עקב הטמפרטורות הנמוכות, יחסית, ולכמות המשקעים. טמפרטורות גבוהות יכולות לזרז את מחזור החיים של החרק-המזיק, להאיץ את גדילתו ויצירת דורות רבים יותר במהלך השנה (Kiritani, 2006). החשה וקיצור של מחזור החיים של החרק-המזיק עלולים ליצור חרקים-מזיקים העמידים לטמפרטורות הגבוהות, דבר שיגביר את הנזקים שאלה יחוללו בחקלאות (Lehmann et al., 2020). ההתחממות העולמית יכולה גם לשנות אוכלוסיות של חרקים בצורה לא ישירה, על ידי השינויים שיתרחשו בכמויות ואיכויות הצמחייה והצמחים, או באופן ישיר על ידי שינויים בתפוצת המזיקים, הקטנה בקצב תמותתם כתוצאה מחורפים לא קרים, תחילת הופעתם המוקדמת באביב והאצת הגדילה ויצירת דורות רבים יותר במהלך השנה (Lehmann et al., 2020). נמצא כי טמפרטורות גבוהות הקטינו את יעילות חומרי ההדברה בקטל מזיקים ומחלות, דבר שהגביר את הצורך במתן ריסוסים נוספים (Lehmann et al., 2020).

השפעת ההתחממות העולמית על איכות הפרי לאחר הקטיף

איכות הפרי וכושר אחסנתו נקבעים, בין היתר, משילוב של מדדים חיצוניים ופנימיים בפרי, הכוללים תכונות פיזיו-כימיקליות, רכיבים תזונתיים, טעם וארומה. הטמפרטורה היא אחד הגורמים החשובים ביותר בקביעת מדדי הקטיף אשר יקבעו את איכות הפרי לאחר הקטיף ובאחסנה ממושכת. קטיף של תוצרת חקלאית טרייה מתרחש בזמנים שונים של השנה, התלויים בזן, במשטר השקיה, בתנאי מזג האוויר (טמפרטורה, לחות וקרינת השמש), בהדברת המזיקים והמחלות במהלך הגידול וכן במדדי ההבשלה השונים. על מנת למזער את השינויים הלא-רצויים במדדי האיכות השונים לאחר הקטיף, חקלאים, משווקים ויצואנים מאמצים טכנולוגיות להארכת חיי המדף של המוצרים. טכנולוגיות אלו כוללות שיטות קטיף שונות (בעיקר ידניות), ניקוי, שטיפה, חיטוי, אריזה, קירור, אחסנה

באווירות שונות. עלייה, כאמור, בטמפרטורה משפיעה בעיקר על תהליכי ההבשלה וההזדקנות המתרחשים בצמח ובפרי או הירק הקטוף. רוב התהליכים הפיזיולוגיים הקשורים להבשלה תקינה של הפרי או הירק מתרחשים בטמפרטורות הנעות בין 0 ל-40 מ"צ. אולם הטמפרטורות המתאימות ביותר לתהליכי הבשלה מיטביים חייבות לנוע בתחום שבין 10 ל-30 מ"צ. ככל שהפרי על העץ נחשף לטמפרטורות גבוהות יותר, כך תוקדם הבשלתו, ואיכותי תיפגע, לא יהיו לו חיי מדף ארוכים, הטעם והארומה ייפגעו גם הם (רמות סוכר וחומצה והיחס ביניהם) וכן רכיבים תזונתיים מועילים (נוגדי חמצון, פוליפנולים, פלאבנואידים). על מנת לשמור על איכות התוצרת הטרייה לאחר הקטיף יש צורך לקרר אותה כמה שיותר מהר, כדי לסלק את חום השדה ובכך לעכב את הנשימה, את איבוד המים ואת התפתחותם של מחוללי מחלות. לכן צפוי שעם ההתחממות העולמית, הפרי נקטף שעה שטמפרטורת הקליפה שלו גבוהה יותר, דבר המצריך שימוש באנרגיית קירור רבה וחזקה יותר על מנת להוריד את טמפרטורת הפרי לטמפרטורת האחסנה המיטבית. צריכה רבה יותר של אנרגייה מייקרת את מחיר הפרי.

כאמור, איכות הפרי וחיי המדף יוארכו ככל שהוא יאוחסן מהר יותר בקור לאחר שנקטף. על כל ירידה של 10 מ"צ יתארכו חיי המדף של התוצרת פי 2 עד 3. האחסנה בקור מקטינה את קצב הנשימה והפעילות האנזימתית של הפרי הקטוף הקשורים לתהליכי הבשלת הפרי. לכן איכות התוצרת נשמרת כתוצאה מהאטה בתהליכי ההבשלה וההזדקנות, הקטנה של שיעור איבוד המים, שמירת מוצקות או גמישות המוצר ועיכוב התפתחות מחוללי מחלות עקב הקירור (Talbot & Chau, 2002).

כדוגמה להשפעת שינוי האקלים על התוצרת הקטופה נתייחס שוב לתפוחי העץ. משך אחסון ואיכות תפוח עץ לאחר הקטיף מושפעים באופן משמעותי ממוצקות הפרי בזמן הקטיף וכן ממדדי איכות נוספים הקובעים את מועד הקטיף המיטבי של הפרי. אולם, שינוי האקלים וההתחממות העולמית גורמים לשינויים בתהליכים הפיזיולוגיים בעץ ובפרי ומשפיעים על קביעת מדדי קטיף אלה, באופן הפוגע במהימנותם. לכן בשנים האחרונות נקטפים תפוחי עץ גמישים ולא מוצקים. ידוע כי מספר מדדים פיזיקליים וכימיים קשורים לקביעת מוצקות התפוח. כמות המים ותכולת החומר היבש מיוחסים למוצקות הפרי בהתאם לזן. אפילו חומציות הציפה (pH) יכולה להשפיע על מוצקות הפרי. בנוסף, התרכבות הפרי מוסברת בעיקר בשינויים בתכולת הפקטין בפרי ובהתפרקותו. ההתרכבות נגרמת בעקבות דחייה בהבשלת הפרי כתוצאה מהטמפרטורות הגבוהות במהלך הגדילה (Chitu & Paltineanu, 2020). דוגמה נוספת היא מנדרינה מזן סטצומה. נמצא כי עלייה של בין 2 ל-4 מ"צ מעל לטמפרטורה הממוצעת, בעיקר במהלך הבשלת הפרי על העץ, גורמת לנזק המתבטא בהיפרדות הקליפה מהציפה (peel puffing) (תמונה 1), לפגיעה בהיווצרות הצבע הכתום של הקליפה, לירידה ברמות הסוכר והחומצה במיץ הפרי, דבר הפוגם באיכות הנאכלת של הפרי ובכושר אחסנת הפרי, עקב העלייה ברגישות הפרי למחוללי מחלות לאחר הקטיף (Sato & Ikoma, 2020).

תמונה 1: היפרדות הקליפה מהציפה במנדרינה (peel puffing).
צילום: אלי פליק

נזקי הצינה הם גורמים המשפיעים על רגישות הפרי, ומושפעים מהטמפרטורה במהלך הצמיחה והתפתחות הפרי לפני הקטיף (טבלה 2). פירות פלפל שנקטפו בערבה בתחילת עונת היצוא, בין החודשים דצמבר–ינואר, נמצאו רגישים הרבה יותר לנזקי

צינה כשהפרי אוחסן ב-1.5 מ"צ, בהשוואה לפירות שנקטפו בפברואר-מרץ. הדבר נבע מטמפרטורות הגידול הגבוהות שבהן גדל הפרי במהלך ספטמבר–נובמבר ולפני שנקטף בדצמבר–ינואר, בהשוואה לטמפרטורות הגדילה הקרירות ששררו בערבה בדצמבר–ינואר כאשר הפרי נקטף בפברואר–מרץ (Bar-Yosef et al., 2009). בתפוח עץ, המחלה הפיזיולוגית צרבון בזן גרני-סמיט (השחרת הקליפה ופסילת הפרי לשיווק), המתפתחת באחסנה ממושכת ב-0 מ"צ, נמצאה קשורה לטמפרטורות ששררו במטע לפני הקטיף. ככל שהפרי נחשף לטמפרטורות קרות במטע, כך היה עמיד יותר להתפתחות הצרבון (תמונה 2) כאשר אוחסן ב-0 מ"צ (Diamantidis, Thomal, Genitsariotis, Nanos, Bolla & Sfakiotakis, 2002). לכן התחממות עולמית תגביר את רגישות הפרי המאוחסן לנזקי צינה עד כדי אי היכולת לאחסן פירות או ירקות בקירור, עקב רגישותם הגבוהה לנזקים אלה.

טבלה 2: השפעת עונת הקטיף ביחס לעונת הגידול (תחילת עונת הקטיף בחודשים דצמבר–ינואר, כאשר הפרי גדל בטמפרטורות גבוהות בחודשים ספטמבר–נובמבר; סוף עונת הקטיף בחודשים פברואר–מרץ, כאשר הפרי גדל בטמפרטורות נמוכות בחודשים דצמבר–ינואר) על אחוז פירות פלפל מתוק עם נזקי צינה וחומרת הנזקים (Bar-Yosef et al., 2009)

טיפול / טמפרטורת אחסנה	נזקי צינה (%)		חומרת נזקי הצינה (0-3)*	
	תחילת עונה	סוף עונה	תחילת עונה	סוף עונה
7 מ"צ	0	0	0	0
1.5 מ"צ	40	20	1.5	0.7

*0 = אין נזקי צינה;
1 = כ-10% מהפרי מכוסה בזנקי צינה;
2 = כ-25% מהפרי מכוסה בנזקי צינה;
3 = כ-50 מהפרי מכוסה בנזקי צינה.

עם העלייה במסחר העולמי של יצוא ויבוא תוצרת חקלאית טרייה, קיימת סכנת הפצה של מזיקים לארצות שבהן מזיקים אלה אינם נמצאים (למשל, זבוב הים התיכון שנמצא בישראל ותוקף פירות רבים, אך אינו נמצא ביפן, בסינגפור או בקוריאה, שאליהן ישראל מייצאת פירות הדר). על מנת למנוע את הסכנה הזאת חייבים לבצע טיפולי הסגר שמטרתם לקטול את המזיק טרם כניסתו לארץ היעד. אחד הטיפולים המעשיים הינו טיפול בקור – אחסנת התוצרת בטמפרטורות תת-אופטימליות, המחסלות את המזיק, אולם אחסנה בטמפרטורות תת-אופטימליות עלולה גם לגרום להתפתחות נזקי צינה ולפסילת הפרי לשיווק (לדוגמה – תפוזים מאוחסנים ב-6 מ"צ, ואחסנה בטמפרטורה נמוכה יותר תגרום להתפתחות נזקי צינה בפרי. טיפול בהסגר דורש אחסנת התפוז ב-1.2 מ"צ למשך 16 ימים כדי להרוג את זבוב הים התיכון, אך קיימת טכנולוגיה למניעת נזק צינה). לא מן הנמנע כי ההתחממות העולמית תגביר את רגישות הפרי לנזקי קור, באופן שלא יאפשר פיתוח טיפולי הסגר בטמפרטורות תת-אופטימליות, והדבר יפגע במדינות המייצאות תוצרת טרייה.

תמונה 2: צרבון בתפוח עץ מזן גרני-סמיט. צילום: אלי פליק

סיכום

שינויי האקלים המתרחשים עם ההתחממות העולמית והעלייה ברמת הפד"ח באטמוספרה מהווים סכנה ממשית לאורגניזמים החיים ולסביבה. לכן אחד האתגרים העומדים בפני החקלאות הינו להתמודד עם שינוים אלה ולאפשר המשך קבלת יבולים גבוהים וזמינים; ואיכות חיצונית, פנימית ובריאותית של פירות וירקות טריים לאחר הקטיף. ההתחממות העולמית עלולה להגדיל את העוני על ידי הקטנת היבולים והעלאת מחיריהם,

וכתוצאה מהצורך בשימוש יתר בקירור, דבר שייקר אף יותר את מחירי הפירות והירקות (Hallegatte et al., 2016). כמו כן התחממות זו עלולה לגרום לשינויים, להאטה או לחוסר יכולת של ארצות שונות לגדל את הגידולים הקלאסיים שהן מגדלות לאורך שנים, דבר שעלול להגביר אף יותר את סכנות הרעב במדינות אלו ואת חוסר יכולתם של התושבים לקנות מוצרים אלה. תרחיש כזה יכול לקרות בין היתר כתוצאה מחוסר במים זמינים ואיכותיים (שימוש יתר בהשקיה עקב הטמפרטורות הגבוהות, או המלחת המים) ומפגיעה באדמות הראויות לעיבוד חקלאי. כדי להתגבר על ההשלכות של ההתחממות העולמית יש צורך דחוף למצוא או לטפח זני ירקות ופירות המשלבים יבול טוב עם איכות תזונתית, וזאת גם בתנאי גדילה, התפתחות והבשלה בטמפרטורות יום ולילה גבוהות. טכנולוגיות כאלה כבר קיימות, והן מסייעות להקטין את רגישות הפרי לנזקי צינה. דוגמה לכך היא טיפולי חום לזמן קצר בשילוב עם אריזת הפרי בתוך בטנה פלסטית. קיימים גם טיפולי אקלום שבהם הפרי או הירק מאוחסנים במחזורי טמפרטורות גבוהות ונמוכות למשכי זמן קצרים (שעות) על מנת לאפשר לפרי לקבל "חסינות" כנגד נזקי צינה (Fallik, Perzelan, Alkala-Tuvia, Nemny-Lavy & ester, 2012). בנוסף, נעשים ניסויים הבוחנים את האפשרות לגדל עצי פרי בעלי דרישות לקור באזורי גידול חדשים וקרירים יותר, או פירות וירקות היכולים לחנוט ולגדול באזורים חמים מאוד או באזורים שיסבלו מההתחממות העולמית (Lippmann, Babben, Menger, Delker & Quint, 2019; Scarano et al., 2020).

רשימת ספרות

Bal, S.K., Saha, S., Fand, B.B., Singh, N.P., Rane, J. & Minhas, P.S. (2014). Hailstorms: Causes, damage and post-hail management in agriculture. Technical Bulletin No. 5. National Institute of Abiotic Stress Management, Malegaon, Baramati. 413 115. Pune, Maharashtra (India), pp. 44.

Bar-Yosef, A., Alkalai-Tuvia, S., Perzelan, Y., Aharon, Z., Ilic', Z., Lurie, S. & Fallik, E. (2009). Effect of shrink packaging in combination with rinsing and brushing treatment of chilling injury and decay development of sweet pepper during storage. Adv. Hort. Sci. 23: 225-230.

Bisbis, M., Gruda, N. & Blanke, M. (2018). Adapting to climate change with greenhouse technology. Acta Hortic 1227: 107-114.

Bisbis, M.B., Gruda, N.S. & Blanke, M.M. (2019). Securing horticulture in changing climate – a mini review. Horticulturae 56. http://doi:10.3390/horticulturae5030056

Brown, M.J., Dicks, L.V., Paxton, R.J., Baldock, K.C., Barron, A.B., Chauzat, M.P., et al. (2016). A horizon scans of future threats and opportunities for pollinators and pollination. Peer. J. 4, e2249. https://peerj.com/articles/2249/

Chitu, E. & Paltineanu, C. (2020). Timing of phenological stages for apple and pear trees under climate change in a temperate-continental climate. Intl. J. Biometeorol. https://doi.org/10.1007/s00484-020-01903-2

Diamantidis, G., Thomal, T., Genitsariotis, M., Nanos, G., Bolla, N. & Sfakiotakis, E. (2002). Scald susceptibility and biochemical/physiological changes in respect to low preharvest temperature in 'starking delicious' apple fruit. Sci. Hort. 92: 361-366.

Fallik, E., Alkalai-Tuvia, S., Chalupowicz, D., Zaaroor-Presman, M., Offenbach, R., Cohen, S. & Tripler, E. (2019). How water quality and quantity affect pepper yield and postharvest quality. Horticulturae 5: https://doi.org/10.3390/horticulturae5010004

Fallik, E., Perzelan, Y., Alkala-Tuvia, S., Nemny-Lavy, E. & Nester, D. (2012). Development of cold quarantine protocols to arrest the development of the Mediterranean fruit fly (*Ceratitis capitata*) in pepper (*Capsicum annuum L.*) fruit after harvest. Postharvest Biol. Technol 70: 7-12.

El Yaacoubi, A., El Jaouhari, N., Bourioug, M., El Youssfi, L., Cherroud, S., Bouabid, R., Chaoui, M. & Abouabdillah, Z. (2019). Potential vulnerability of Moroccan apple orchard to climate change-induced phenological perturbations: effects on yield and fruit quality. Intl. J. Biometeorol 64: 377-387.

Lloyd, J. & Farquhar, G.D. (2008). Effects of rising temperatures and CO_2 on the physiology of tropical forest trees. Philosop. Trans. Royal Soc. Biol. Sci. 363: 1811-1817.

Mditshwa, A., Magwza, L.S. & Tesfay, S.Z. (2019). Shade netting on subtropical fruit: Effect on environmental conditions, tree physiology and fruit quality. Sci. Hortic. 256: 108556.

Nie, L.C., Chen, Y.H. & Liu, M. (2016). Effects of low temperature and chilling duration on bud break and changes of endogenous hormones of asparagus. Eur. J. Hortic. Sci. 81: 22-26.

Peña, J.F. & Carabalí, A. (2018). Effect of honey bee (*Apis mellifera L.*) density on pollination and fruit set of avocado (*Persea americana Mill.*) cv. Hass. J. Apic. Sci. 62: 5-14.

Pham, V.T., Herrero, M. & Hormaza, J.I. (2015). Effect of temperature on pollen germination and pollen tube growth in longan (*Dimocarpus longan Lour.*). Sci. Hortic. 197: 470-475.

Sato, K. & Ikoma, Y. (2020). Effects of elevated temperatures during the flowering to physiological fruit drop stage and at the fruit maturation stage on fruit quality of the satsuma mandarin. J. Agric. Meteo. 76: 29-35.

Scarano, A., Olivieri, F., Gerardi, C., Liso, M., Chiesa, M., Chieppa, M., Fruscuante, L., Barone, A., Santino, A. & Rigano, M.M. (2020). Selection of tomato landraces with high fruit yoeld and nutritional quality under elevated temperatures. J. Sci. Food Agric. 100: 2791-2799.

Talbot, M.T. & Chau, K.V. (2002). Precooling strawberries agricultural and biological engineering department, Florida cooperative extension service. Gainesville: Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida [11 p, Bulletin 942].

Fernandez, E., Whitney, C., Cuneo, I.F. & Luedeling, E. (2020). Prospects of decreasing winter chill for deciduous fruit production in Chile throughout the 21st century. Climatic Change 159: 423-439.

Hallegatte, S., Bangalore, M., Bonzanigo, L., Fay, M., Kane, T., Narloch, U., Rozenberg, J., Treguer, D. & Vogt-Schilb, A. (2016). Shock waves: Managing the impacts of climate change on poverty. Climate Change and Development Series. Washington, DC: World Bank, 2016. doi:10.1596/978-1-4648-0673-5

IPCC. Climate change. (2014). Working group II: Impacts, adaptations and vulnerability. <http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg2/005.html> Accessed 13.03.09.

Kaluzewicz, A., Krzesinski, W. & Knaflewski, M. (2009). Effect of temperature on the yield and quality of broccoli heads. Veg. Crops Res. Bull. 71: 51-58.

Kiritani, K. (2006). Predicting impacts of global warming on population dynamics and distribution of arthropods in Japan. Population Ecology 48: 5-12.

Lehmann, P., Ammunet, T., Barton, M., Battisti, A., Eigenbrode, S.D., Uhd Jepsen, J., Kalinkat, G., Neuvonen, S., Niemela, P., Terblanche, J.S., Okland, B. & Bjorkman, B. (2020). Complex responses of global insect pest to climate warming. Front. Ecol. Environ. 18: 141–150. doi:10.1002/fee.2160

Lin, Y-P., Lu, C-Y. & Lee, C-R. (2020). The climatic association of population divergence and future extinction risk of *Solanum pimpinellifolium*. AoB PLANTS 12: plaa012. doi: 10.1093/aobpla/plaa012

Lippmann, R., Babben, S., Menger, A., Delker, C. & Quint, M. (2019). Development of wild and cultivated plants under global warming conditions. Curr. Biol. 29: R1326-R1338.

בין זהירות מונעת לרשלנות פושעת

עופר מוקדי[1]

המאמר סוקר את תולדות הבנתנו את שינויי האקלים, מדגיש את החשיבות של ידע מדעי רחב ומעמיק הדרוש להבנה זו, מעלה את שאלת חלקו של האדם בתופעה, את המחיר הסביבתי והכלכלי שלה ומציג מה עושות מדינות העולם כדי להפחית את התופעות הללו בכללן ישראל – לא עושות מספיק!

"כדי להיאבק על הסביבה, יישמו עקרון הזהירות המונעת תיושם בצורה נרחבת על ידי מדינות, בהתאם ליכולותיהן. במקרים שבהם קיים איום של נזק חמור או בלתי הפיך, היעדר ודאות מדעית מלאה לא ישמש עילה להימנע משימוש באמצעים יעילים למניעת הידרדרות סביבתית."

(סעיף 15 ב"הצהרת ריו" שנכתבה עם סיומה של "פסגת כדור הארץ" [Rio declaration, 1992])

החתימות החשובות באמת של נציגי 153 המדינות שהשתתפו בפסגת כדור הארץ בריו דה-ז'נירו, ברזיל, הן אלה ששורבטו ביוני 1992 על "אמנת המסגרת של האו"ם בעניין שינוי האקלים" – מסמך המצהיר על מטרה מרכזית ברורה: "להביא לייצוב ריכוז גזי החממה באטמוספרה ברמה שתמנע התערבות אנושית מסוכנת במערכת האקלימית. יש להשיג ייצוב זה במסגרת זמן שיש בה כדי לאפשר למערכות אקולוגיות להתאים את עצמן באופן טבעי לשינוי האקלים, להבטיח שייצור המזון אינו בסיכון, ולאפשר המשך פיתוח כלכלי בר-קיימא" (UNFCCC, 1992).

המסמך אושרר בתוך כשנתיים על-ידי 189 מדינות (כולל ישראל), והוא כולל התפתלויות מורכבות, לא לגמרי מחייבות משפטית, שפירושן המעשי הוא (בערך): מדינות מפותחות ישתדלו לייצב את פליטות גזי החממה לרמתם בזמן מוקדם כלשהו (לא לגמרי מוגדר...), עד סוף המאה העשרים.

מעבר לקשיים שמשקפים הניסוחים הפתלתלים, בעיקר באשר לחלקן היחסי של המדינות המפותחות והמתפתחות בנשיאת הנטל הכלכלי של הייצוב הנדרש, מציבה האמנה שאלות רבות שמשלבות מרכיב ערכי גבוה עם הצורך בידע מדעי רחב ומעמיק: איזה שינוי נחשב "התאמה" של מערכת אקולוגית ומה נחשב כ"פגיעה"? מה נחשב כפיתוח "בר-קיימא"? ובכלל – מהי התערבות "מסוכנת"? (Grassl & Metz, 2013).

תולדות הבנתנו את שינויי האקלים

ארהניוס (Arrhenius, 1896) היה, אולי, הראשון שהצביע על הקשר בין שריפת דלקים פוסיליים להתחממות גלובלית. בדמיון מרשים לאומדן המודרני, הוא חזה שהכפלת ריכוז הפחמן הדו-חמצני (פד"ח) באטמוספירה תגרום עליה של 3-5 מעלות צלזיוס (מ"צ); הטווח המקובל כיום הוא 2-4.5 מ"צ (IPCC, 2007). מאוחר יותר הציג קלנדר (Callendar, 1938) את הקשר בין שינוי בריכוזי הגזים לבין ההתחממות על פני חצי מאה. הקהילה המדעית לא התרגשה מכך, בלשון המעטה, בין היתר מתוך חוסר אמון במדידות עצמן. אכן, לשם הערכה אמינה של שינויי ריכוז פד"ח, מתוך שיתוף פעולה בינלאומי בין מעבדות אנליטיות, צריך היה להמתין עד שנות השישים, ובאשר לשני השחקנים החשובים האחרים בתחום "גזי החממה" – חמצן דו-חנקני (N_2O – nitrous oxide, חד"ח) ומתאן (CH_4) – אפילו עד שנות השמונים המאוחרות.

בראשית שנות השישים הוקמו תחנות ניטור לריכוזי פד"ח במקומות מרוחקים מהשפעות אדם (אנטארקטיקה, הוואי),

1 ד"ר עופר מוקדי, מפמ"ר מדע וטכנולוגיה, המזכירות הפדגוגית, משרד החינוך.

ובתום העשור הראשון לפעולתן כבר הסתמנה עלייה יציבה בריכוז הפד"ח של 0.4% בשנה; עלייה שרק מתגברת מאז. תחנות ניטור נוספות שהוקמו מציגות עלייה יציבה בריכוז הפד"ח (NOAA, 2011). כפי שאפשר לראות בפרסומי מעבדת הניטור הגלובלית – ב-40 השנה האחרונות עלה ריכוז הפד"ח בכ-22%, מ-340 חלקים למיליון (חל"מ) לכ-415 חל"מ, שמבטאים עלייה של קצת פחות מ-0.5% בשנה. ריכוזי מתאן החלו להימדד משנות השמונים המאוחרות ומראים גם הם עלייה יציבה, וכך גם חד"ח, שנמדד מראשית האלף הנוכחי.

הפאנל הבין-ממשלתי לשינוי אקלים (IPCC)

ההבנה שהמדע הוא אשר צריך להניח את תשתית הידע לשם קביעת מדיניות נמצאת בלב העיסוק בנושא שינוי האקלים. הבנה זו הובילה, בין היתר, להקמת קבוצות העבודה הנרחבות הפועלות מאז 1988 במסגרת ה-IPCC, שנחשב לסמכות המדעית העליונה עבור קובעי המדיניות: קבוצת עבודה 1 (WGI) עוסקת בריכוז המחקרים באשר לשינויים עצמם, ובאשר למעורבות פעילות האדם בגרימתם; קבוצה 2 (WGII) עוסקת בהשפעות של השינויים; קבוצה 3 (WGIII) עוסקת בצעדים שאפשר לנקוט נוכח השינויים. להלן אני סוקר על קצה המזלג כמה מן הממצאים הבולטים בדוחות שהוגשו במסגרת זו, והפרשנויות שניתנו להם.

מעבר לקביעה שיש עלייה ניכרת בריכוז גזי חממה כתוצאה מפעילות אדם, הציג הדוח הראשון (IPCC, 1990) מתאם גבוה בין ריכוז פד"ח לטמפרטורה הגלובלית, לפי ליבות קרח המתעדות כ-160,000 שנה (Jouzel et al., 1989). עליית טמפרטורה דרסטית של סוף תקופות קרח מאופיינת בעליית ריכוז פד"ח לרמה של כ-270 חל"מ, ובשיא תקופות קרח – בריכוז פד"ח נמוך (כ-200 חל"מ).

תיאור שינויי האקלים השתכלל והתחדד לאורך שנות ה-IPCC. כיום , על פי הדוח החמישי (IPCC, 2014), "התחממות האקלים ברורה באופן חד-משמעי". כל אחד משלושת העשורים האחרונים היה חם יותר, ובקנה מידה גלובלי היו אלה העשורים החמים ביותר מאז 1850. האוקיינוסים הם קולטי החום העיקריים, ואפשר לקבוע בוודאות מוחלטת ששכבת המים העליונה (עד לעומק של כ-700 מטר) התחממה לאורך 40 השנה האחרונות. כיפות הקרח בגרינלנד ובאנטארקטיקה מאבדות מסה בהתמדה, וכך גם הקרחונים ברחבי העולם. מראשית המאה העשרים עד היום עלו פני האוקיינוסים בכ-20 ס"מ. ריכוז הפד"ח עלה בכ-40% מלפני העידן התעשייתי, ובאוקיינוסים (הקולטים העיקריים!) יש לכך השפעה משמעותית של החמצה (הורדת ה-pH).

מה חלקו של האדם?

התשובה לשאלה "עד כמה אחראי האדם להתחממות?" התפתחה אף היא בהדרגה. דוח IPCC השני (IPCC, 1995) קבע כי "מאזן העדויות מציג השפעה אנושית מוחשית על האקלים הגלובלי". הדוח השלישי (IPCC, 2001) הציג "עדויות חדשות וחזקות יותר לכך שרוב ההתחממות במחצית השנייה של המאה העשרים נגרמה בהשפעת האדם", ואילו הדוח הרביעי (IPCC, 2007) קבע "ברמת ביטחון גבוהה מאוד", שפעילות האדם הובילה להתחממות גלובלית מאז 1750. התייחסות זו, המחלקת את תולדות שינוי האקלים ל"לפני" ו"מאז" העידן התעשייתי, עוברת כחוט השני בכל המחקרים והפרשנויות.

בשנים שקדמו לפרסום הדוח החמישי עלו ערעורים על המשקל שיש לייחס לפעילות האנושית, וכתוצאה מכך – לקביעה שהאדם מסוגל, ואף אחראי במידה רבה, לנקוט צעדים לשיפור המצב. בדוח החמישי (IPCC, 2014) ההתבטאות חריפה בהרבה גם בקשר להשפעת האדם. הדוח מציג ראיות לכך שהשפעת האדם ניכרת בכל היבטי ההתחממות ותוצאותיה. הוא קובע "בסבירות גבוהה במידה קיצונית" שפעילות אנושית הייתה הגורם הדומיננטי להתחממות הגלובלית מאז אמצע המאה העשרים. עוד מרחיב הדוח ומעיד על כך שפליטות אנושיות גברו בהתמדה מאז ראשית העידן המתועש, כחלק מגידול האוכלוסייה והתפתחות הכלכלה, והובילו לריכוז גזי חממה ללא תקדים לאורך 800 אלף השנים האחרונות[2]!

2 מומלץ מאוד לצפות עם תלמידים באנימציה המציגה מחזוריות בריכוז הפד"ח על פני כ-800 אלף שנה, וממשיכה עד לעלייה המזעזעת בתקופתנו...

מה המחיר הסביבתי? והכלכלי?

אף שכל הדוחות עסקו בתוצאות ההשפעה של ההתחממות הגלובלית, הדוח הרביעי (IPCC, 2007) היה הראשון שנקב במחירים סביבתיים קונקרטיים. ברובד הפיזי, מתאר הדוח הגברה בתדירות ובחומרה של אירועי מזג אוויר קיצוני; שינויים במערכות הידרולוגיות בעקבות שינוי במשטר המשקעים, והתכת שלגי-עד ומשטחי קרח-עד; הצפת נהרות מצד אחד ובצורות מתמשכות מצד שני; שיבושים חריפים באזורי חוף בעקבות עליית מפלס הים, כולל הצפות הרסניות של אזורים נרחבים. ברובד הביוטי ניכר הנזק למערכות ימיות (בין היתר בעקבות החמצת מי האוקיינוס); ריבוי אירועי שריפות ענק; שינויים בתפוצתם של מינים רבים, בדגמי הנדידה שלהם ובהתנהגותם בעקבות כל השינויים שנזכרו לעיל. הנזקים לרובד האנושי נגרמים גם בעקיפין, דרך שינויים לרעה ביבולים חקלאיים ופגיעות נוספות בייצור מזון, אך גם בנזקים ישירים לבריאות.

הדוח הרביעי אף העמיד תחזיות עתידיות קודרות למדי באשר למחיר הסביבתי. למשל, 20%–30% ממיני החי והצומח שנבחנו צפויים לסכנת הכחדה בהתחממות של יותר מ-1.5–2.5 מ"צ. הדוח החמישי (IPCC, 2014) מרחיב ומפרט את התחזיות, בדרגה גבוהה יותר של ביטחון, במרחב ובזמן. הסיכונים העתידיים בהחלט אינם אחידים על פני כדור הארץ, ופגיעתם באוכלוסיות ובאזורים מוחלשים עתידה להיות חמורה יותר. ניתוח קודר במיוחד עוסק בזמינות המזון בשני היבטים – ירידה דרמטית בדגה ובמזון-ימי אחר, וירידה ביבולים חקלאיים כמו חיטה, תירס, אורז וסויה.

אז מה עושים?

בזה אחר זה, בדרגות פירוט וודאות גדלות והולכות, הבהירו דוחות IPCC שקיימים אמצעים טכנולוגיים ומדיניותיים לייצוב האקלים. לצד דוחות אלה ראוי לציין דוח כלכלי נרחב של שטרן (Stern, 2007), מתוכו חשוב להדגיש שתי קביעות; ראשית, ניתן עדיין למנוע את ההשפעות החמורות ביותר של שינוי האקלים אם ננקוט פעולה מיידית. שנית, אפשר לעמוד בעלויות של ייצוב האקלים, ודחיית הפעולה תהיה יקרה בהרבה ואף מסוכנת!

חמש שנים אחרי החתימה הראשונית על אמנת המסגרת (UNFCCC, 1992), בשנת 1997, נחתם ביפן "פרוטוקול קיוטו", המטיל על המדינות המפותחות מחויבות להפחתת פליטות גזי חממה (UNFCCC, 1997). מדינות אלה התחייבו להפחית את הפליטות ב-5.2% יחסית לרמה בשנת 1990, שנקבעה כשנת בסיס, ולעמוד ביעד זה במהלך 2008–2012. ערכו היישומי של הפרוטוקול נשחק מאוד, בכך ששתי התורמות הגדולות ביותר לפליטות גזי החממה – ארצות הברית וסין – לא השתתפו בנטל המחויבות. ארצות הברית פרשה מההסכם ב-2001 במחאה על כך ש-80% מהעולם אינו נושא בנטל המחויבות, ובכלל זה ריכוזי אוכלוסייה גדולים כמו סין והודו. סין (וכאמור, הודו, ומדינות נוספות) הייתה משוחררת מלכתחילה. פרישתה של קנדה ממחויבותה לפרוטוקול קיוטו, ב-2012, חיזקה את השחיקה בערכו של הפרוטוקול.

תקווה מחודשת ניצתה ב-2015, כאשר התכנסו שוב נציגי 196 מדינות בפריז, מתוך הכרה מחוזקת עוד יותר בהכרח לנקוט פעולה לייצוב האקלים (UNFCCC, 2015). ככלות הכול, באותו שלב כבר החלו להתפרסם חלקי הדוח החמישי של IPCC, והיה ברור שאין כל אפשרות להמתין. כל המדינות התחייבו לעשות את "הכמעט-בלתי-אפשרי" – להגביל את ההתחממות הגלובלית "הרבה מתחת ל-2 מ"צ" (בשפת המקור – "well below"), וככל האפשר אף מתחת ל-1.5 מ"צ, יחסית לטמפרטורה טרם העידן המתועש. גם הבסיס לקיום המחויבות נראה מבטיח יותר – כל מדינה תגדיר לעצמה את "תרומתה" למאמץ העולמי, תצהיר עליה ואף תעדכן אותה אחת לחמש שנים באתר אינטרנט ייעודי (סעיף 4.2 בהסכם פריז). נכון להיום הגישו 186 מדינות הגדרות ראשונות, ו-4 כבר הגישו גם עדכון.

התרומה של ישראל

אף שהתועלת המעשית בתרומתה של מדינת ישראל להפחתת הפליטות העולמיות, מעצם חלקה הזניח בסך הפליטות של גזי חממה (כ-0.2%), יש חשיבות הצהרתית, ציבורית ואף חינוכית בשותפותה בהסכם פריז. ביעד ההפחתה שהגישה ישראל בנובמבר 2016, היא מתחייבת להוריד את הפליטה לנפש בשיעור שאפתני של 26% (7.7 טון פד"ח ב-2030 לעומת 10.4 טון ב-2005), על ידי הפחתה של 17% בצריכת החשמל כתוצאה מהתייעלות, מעבר לייצור 17% מהחשמל ממקורות אנרגיה ירוקים, ומעבר של 20% מתחבורה פרטית לתחבורה ציבורית.

בינתיים – המצב "לא משהו"

בנובמבר 2019 הודיעה ארצות הברית של הנשיא טראמפ על פרישתה מהסכם פריז, צעד שייכנס לתוקף בנובמבר 2020 (שנה מיום ההכרזה). מזכיר המדינה פומפאו, אשר מסר את הודעת הפרישה, ציין כי "הנטל הכלכלי אינו הוגן" ואילו הנשיא טראמפ נקט ניסוח אופייני לו – "הסכם פריז הוא עסקה רעה לאמריקנים... ממשל אובמה נשא ונתן על ההסכם וחתם מתוך ייאוש".

כפי שמראים הנתונים שנסקרו לעיל, נכון להיום הפליטות עדיין בעלייה. לרוע המזל, יש להניח שפרישתה של ארצות הברית לא תעודד מדינות אחרות למאמץ, וגדולה מאוד הסכנה שגם הסכם פריז לא יניב את הפרי הנדרש.

הוראת מדע וטכנולוגיה – אמרנו?

תפקידה של הוראת מדע וטכנולוגיה בהקשר של שינוי האקלים הוא הגברת המודעות של תלמידים לבעיות אלה, הרחבה והעמקה של הידע הרלבנטי בתחומי הפיזיקה, הכימיה, הביולוגיה והטכנולוגיה, ואף מדעי כדור הארץ (כולם רלבנטיים!), תוך שילוב והנכחה ברורה של המרכיב הערכי. ככל מנוף חינוכי, גם כאן מדובר בהשפעה לטווח הבינוני והארוך, ובהיעדר פעולות ממשלתיות בטווח המיידי, יש מקום לחשוש לירידת המוטיבציה החינוכית. עם זאת, חובתנו לקבל את המשימה החינוכית הזאת ולבצעה על הצד המלא ביותר.

כיום, כמעט שלושה עשורים אחרי ועידת ריו, חרף מחקר מעמיק וודאות כמעט-מוחלטת בדבר הסכנות והדרכים למניעתן, עדיין רב המרחק מהיעד של ייצוב האקלים...

מאחר שזה מכבר אין האנושות נוקטת את הנדרש על פי עקרון הזהירות המונעת,

יש חשש ברור שכל המתנה או דיחוי הם בגדר רשלנות פושעת!

חצי מעלה – מה זה משנה?

עד היום ההתחממות הגלובלית, בעיקר בעקבות פליטת גזי חממה בפעילות האדם, הובילה לעליית טמפרטורה של קצת פחות מ-1 מ"צ **יחסית לטרום העידן המתועש** (יטע"מ). המשך המגמה הנוכחית צפוי להוביל לעליית טמפרטורה של 1.5 מ"צ יטע"מ בטווח הזמן שבין 2030 ל-2055. הסכם פריז מדגיש את החשיבות במאמץ להגביל את עליית הטמפרטורה לערך זה, ולא להגיע ל-2 מ"צ יטע"מ. למה, בעצם? מה כבר ההבדל?

מתברר שלצד ההבדל של 0.5 מ"צ בטמפרטורת פני השטח, צפויים להיגרם הבדלים משמעותיים בכל ההיבטים הבאים, בסיכוי של למעלה מ-67% (רמת ביטחון "גבוהה" ומעלה):

- אירועי שרב קיצוניים.
- פגיעה במגוון המינים ובהיבטים נוספים של המערכות הטבעיות, כולל פגיעה ב"שירותי הטבע" לאדם.
- עליית טמפרטורת האוקיינוסים, החמצתם וירידה בריכוז החמצן במים. הפגיעה במערכות חי ימיות תפגע גם בשירותי המערכות לאדם.
- סיכונים בריאותיים קשורי-אקלים.
- ביטחון תזונתי ואספקת מי שתייה.
- היבטים כלכליים, ובכללם עלות הצעדים שיידרשו להתמודדות עם המצב. בכך תהיה פגיעה ברווחה הכלכלית העתידית.

חשוב לדעת:

- דרוש מאמץ גבוה יותר על מנת להתייצב על 1.5 מ"צ יטע"מ. למשל, נדרשת הפחתת פליטות של 45% מ-2010 עד 2030, ואיפוס הפליטות כבר ב-2050. על מנת להתייצב על 2 מ"צ יטע"מ אפשר להסתפק בהפחתה של 25% בין 2010 ל-2030, ולהגיע לאיפוס הפליטות רק ב-2070.
- ההתחייבויות הנוכחיות של מדינות, במסגרת הסכם פריז, אינן מספיקות לשם ייצוב על 1.5 מ"צ יטע"מ.

(דוח מיוחד – IPCC, 2018)

רשימת ספרות

Arrhenius, S. (1896). On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 5:237–276.

Callendar, G.S. (1938). The artificial production of carbon dioxide and its influence on climate. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 64:223–240.

Grassl, H.& Metz, B. (2013). Climate change: science and the precautionary principle. In: Late lessons from early warnings: science, precaution, innovation. European Environment Agency report 1/2013. p. 308-346.

IPCC (1990). First Assessment Report, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC (1995). Climate Change 1995: A report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC

IPCC (2001). Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Integovernmental Panel on Climate Change [Watson, R.T. and the Core Writing Team (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA.

IPCC (2007). Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.

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, Switzerland.

IPCC (2018).Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor & T. Waterfield (eds.)]. In Press.

Jouzel, J., Barkov, N.I., Barnola, J.M., Genthon, C., Korotkevitch, Y.S., Kotlyakov, V.M., Legrand, M., Lorius, C., Petit, J.P., Petrov, V.N., Raisbeck, G., Raynaud, D., Ritz, C. & Yiou, F. (1989). Global change over the last climatic cycle from the vostok ice core record (Antarctica). Quarternary International 2:15-24.

NOAA (2011). Global monitoring laboratory. National Oceanic and Atmospheric Administration.

Rio Declaration (1992). Rio Declaration on Environment and Development.

Stern, N.(2007). The Stern review on the economics of climate change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

UNFCCC (1992). United Nations Framework Convention on Climate Change.

UNFCCC (1997). Kyoto Protocol to The United Nations Framework Convention on Climate Change.

UNFCCC (2015). Adoption of the Paris Agreement.

חינוך בנושא שינוי האקלים, כן בבית ספרנו:

על המשמעות של טיפוח אוריינות מדעית אקלימית בעידן של משבר סביבתי

איריס אלקחר[1]

המאמר דן במושג "אוריינות אקלימית" כחלק מהאוריינות המדעית וכחלק מהוראת המדעים במערכת החינוך, מציג עקרונות מדעיים בסיסיים וחיוניים בהקניית אוריינות אקלימית ללומדים וסוקר גישות לטיפוחה.

אוריינות אקלים כחלק מאוריינות מדעית-טכנולוגית

אוריינות אקלימית (Climate literacy) או אוריינות מדעית אקלימית (Science climate literacy) משמעותה "ההבנה של האדם לגבי האופן שבו הוא משפיע על האקלים והאופן שבו האקלים משפיע עליו כפרט וכחברה. אדם בעל אוריינות אקלימית יודע כיצד להעריך מידע מדעי אמין בנושא האקלים, משתתף בשיח בנושא אקלים ושינוי האקלים בדרכים משמעותיות ומסוגל לקבל החלטות מושכלות לגבי פעולות אנושיות שיכולות להשפיע על האקלים."(NOAA, 2014)

הגדרה זו של הארגון הלאומי לניהול האוקיינוסים והאטמוספרה (The National Oceanic and Atmospheric Administration), שהוא גוף ממשלתי בארצות הברית, מקובלת כיום בקרב מדענים וחוקרים בתחום.

בהתאם להגדרה זו, בעלי אוריינות מדעית אקלימית מבינים כיצד פועלות מערכות אקלימיות בעולם ומודעים לקשר ההדוק בין תופעות אקלימיות לבין החיים האנושיים ולהשפעות האקלים על בריאות האדם. הם מסוגלים לשפוט את מידת האמינות של טענות מדעיות ולהיעזר בהן בקבלת החלטותיהם לגבי שיפור איכות חייהם. בנוסף, אזרחים בעלי אוריינות מדעית אקלימית מבינים שחוקרים בתחום האקלים מתבססים על מספר הנחות יסוד (Niepold, Herring & McConville, 2007):

- מערכות האקלים בכדור הארץ ניתנות להבנה וחיזוי והן עדיין מתפתחות
- מדעי האקלים הוא תחום מתקדם שהמידע בו הולך ומצטבר
- המחקר בתחום מדעי האקלים נשען על עדויות אמפיריות בעלות תוקף ומהימנות גבוהים

לפי מובילי התוכנית הלאומית של ארצות הברית לחקר שינוי האקלים, טיפוח אוריינות מדעית בנושא האקלים רלבנטי לתהליכי קבלת ההחלטות של כל האזרחים בכל הגילים ולאיכות חייהם. לכן אפוא יש להתייחס לטיפוח אוריינות אקלימית כאל תהליך למידה לכל החיים, היוצא מנקודת מבט של חשיבה מערכתית ובינתחומית ומתמקד ביחסי הגומלין הדינמיים בין מערכות כדור הארץ והאדם. ככל שאזרחים רבים יותר יבינו את ההשפעות ההדדיות בין מערכות אקלים לבין חייהם, כך תלך ותתחזק המודעות הציבורית לשינוי האקלים (USGRP, 2009).

ההבנה שיש לכלול את נושא האקלים ושינוי האקלים כחלק מהאוריינות המדעית וכחלק מציוני הדרך של הוראת המדעים במערכת החינוך הלכה והתחזקה במהלך שלושת העשורים האחרונים, ככל שהעמיקה ההבנה שקיימות השפעות הדדיות בין האקלים לבין האדם (McCaffery & Buhr, 2008). בתקופה זו נושאים בתחום מדעי הסביבה נכללו במסמכים לאומיים של הוראת המדעים, כמו האטלס האמריקאי לאוריינות מדעית בהוראת המדעים (AAAS, 2020) והדו"ח

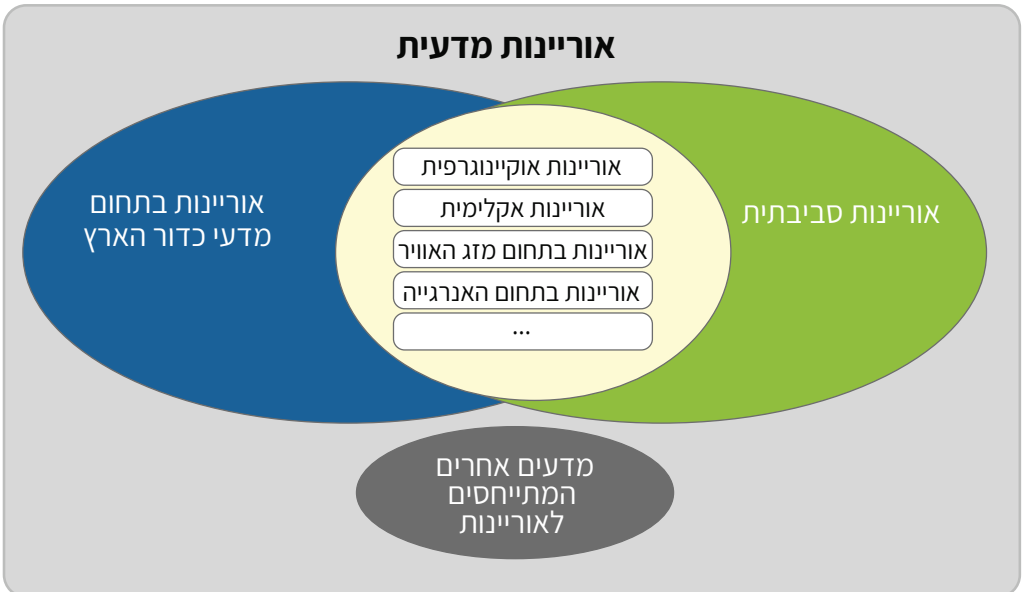
1 ד"ר איריס אלקחר, הפקולטה למדעים, מכללת סמינר הקיבוצים, iris.alkaher@smkb.ac.il

האירופי של הוראת המדעים לטיפוח אזרחות אחראית (European Commission, 2015).

ב-2015 פרסם ארגון האומות המאוחדות שבעה-עשר יעדים של פיתוח בר-קיימא (Sustainable development goals - SDG) שיש להשיג עד 2030 בתחומי חיים מגוונים, ובהם חינוך, בריאות, כלכלה, חברה, תרבות וסביבה – ליצירת עולם הוגן ולשמירה על כדור הארץ (UN, 2018). אחד מהיעדים הללו הוא אִפחות שינוי האקלים והשלכותיו. לחינוך תפקיד מרכזי בהשגת יעדים אלה. גופים בינלאומיים נוספים המתמקדים בחקר שינוי האקלים ובהתמודדות עימו מצביעים על תפקיד החינוך בעיצוב אזרחים המודעים לנושא ומוכנים לפעול על-מנת להיטיב את איכות חייהם ואת מצב הסביבה. בהתאם לכך הם קוראים לחיזוק האוריינות המדעית בנושא שינוי אקלים בקרב אזרחי העולם.

ארגוני מחקר והערכה שונים בעולם העוסקים בתחומי המדע והחברה חוקרים כיום את החשיבות של הקניית אוריינות אקלימית לאזרחי העולם בעידן של משבר סביבתי. לדוגמה, במסגרת מחקרי פיזה (PISA), הבודקים את רמת האוריינות המדעית של תלמידים בני חמש-עשרה במדינות רבות בעולם, באמצעות ארגון ה-OECD (OECD, 2012), הציפייה היא שאדם בעל ידע מדעי אקלימי יהיה בעל ידע דקלרטיבי (לדעת ש...), ידע אפיסטמי (תיאורטי) וידע פרקטי (מעשי) במדעי האקלים; יהיה מסוגל להעריך מידע רלבנטי בתחום זה בזכות כשירויות מדעיות מגוונות (למשל: תכנון חקר והערכתו, ניתוח נתונים מדעיים, הצגת ידע, פתרון בעיות); ויאמץ עמדות והתנהגויות המכוונות גם לצמצום בעיית שינוי האקלים וגם להסתגלות לשינוי האקלים (OECD, 2013).

כיום, רוב המדענים והחוקרים בתחום החינוך המדעי מסכימים שאוריינות סביבתית, המתמקדת בהבנת קשרי הגומלין בין בני אדם למערכות טבעיות בכדור הארץ, ואוריינות במדעי כדור-הארץ, המתמקדת בהבנת תופעת ותהליכים של מערכות כדור הארץ, הן חלק מאוריינות מדעית (McCaffrey & Buhr, 2008; USGCRP, 2009) בהלימה לכך, מומחים בתחומים אלה ממליצים לכלול מושגים מתחומי מדעי הסביבה ומערכות כדור הארץ (כגון אטמוספרה, אקלים, אוקיינוסים, אנרגייה, ומזג אוויר) כחלק מטיפוח אוריינות מדעית (לדוגמה, Azevedo & Marques, 2017). מומחים אלה ממקמים את האוריינות האקלימית הן כחלק מהאוריינות הסביבתית והן כחלק מהאוריינות בתחום מדעי כדור הארץ (ראו איור 1).



איור 1: ייצוג חזותי של הקשרים בין אוריינות סביבתית, אוריינות בתחום מדעי כדור-הארץ ובין אוריינות בתחומים אחרים כרכיבים של אוריינות מדעית. איור זה מבוסס על Azevedo & Marques, 2017.

עקרונות מדעיים של אוריינות אקלים

ההבנה במדינות שונות כי שילוב נושא האקלים ושינוי האקלים בתוכניות הלימודים בחינוך המדעי בבתי הספר הוא הכרחי הצריכה להתאים נושא זה למערכת החינוך. אתגר מרכזי בראשית הדרך היה פיתוח מסגרת עיונית ברורה להוראת מדעי האקלים וקביעת העקרונות והתכנים המדעיים שיש ללמד במסגרת טיפוח אוריינות אקלימית. הארגון הלאומי לניהול האוקיינוסים והאטמוספרה בארצות הברית הוביל ב-2006 תהליך חינוכי מבוסס-מחקר שבמסגרתו חוקרים ואנשי חינוך מתחומי מדע שונים קבעו בתהליך שיתופי שבעה עקרונות מדעיים בסיסיים וחיוניים שיש לכלול בהקניית אוריינות אקלימית ללומדים (NOAA, 2014):

קיימת הסכמה רחבה בקרב מדענים וחוקרים בחינוך המדעי, שטיפוח אוריינות אקלימית במערכות חינוכיות בעולם היא צו השעה לנוכח הסיכונים ששינוי האקלים מביא עימו לאדם ולמערכות כדור הארץ ולנוכח השפעת האדם על שינוי האקלים.

1. השמש היא מקור האנרגייה המרכזי במערכת האקלים של כדור הארץ.
2. האקלים מווסת בין מרכיבים שונים במערכות כדור הארץ, באמצעות קשרי-גומלין מורכבים.
3. החיים בכדור הארץ תלויים באקלים, מעוצבים על ידיו ומשפיעים עליו.
4. האקלים משתנה במרחב ובזמן כתוצאה מתהליכים טבעיים ומתהליכים שהם מעשה ידי אדם.
5. אפשר להעמיק את ההבנה ביחס למערכת האקלים באמצעות תצפיות, לימודים עיוניים והמחשות.
6. פעולות האדם משפיעות על מערכת האקלים.
7. לשינוי האקלים יש השלכות על מערכות כדור הארץ ועל חיי האדם.

עקרונות אלה הוצגו לראשונה בכנס שערך ב-2008 הארגון הלאומי של מורי המדעים (בבסיסם עומדת ההבנה שבני האדם יכולים לקבל החלטות מושכלות בנושא האקלים ולפעול כדי לצמצם את שינויי האקלים והשלכותיהם).

טיפוח אוריינות אקלימית באמצעות חינוך המכוון לנושא שינוי האקלים

חינוך בנושא שינוי האקלים (Climate change education) מתאים מבחינה רעיונית לעקרונות המרכזיים העומדים בבסיס החינוך לקיימות. **חינוך לקיימות** הוא גישה חינוכית המיישמת עקרונות של פיתוח בר-קיימא תוך הדגשת יחסי הגומלין בין חברה, כלכלה וסביבה. מטרתו לטפח אזרחים שנוהגים באחריות סביבתית כפרטים וכקהילה ופועלים למען עתיד בר-קיימא למענם ולמען הדורות הבאים (Stevenson, 2006). חינוך המתמקד בשינוי האקלים צריך אף הוא לכוון את אזרחי העולם לפעול למען עתיד מקיים. ככזה, חוקרים סבורים שבהיבט ההתנהגותי על החינוך לשינוי האקלים להתייחס לשתי אסטרטגיות פעולה עיקריות (Anderson, 2012): **אִפחות** (mitigation) – השקעת מאמצים אקטיביים לצמצום גזי החממה הנפלטים לאטמוספרה, למשל באמצעות שינויים בדפוסי ייצור וצריכה; **הסתגלות** (adaptation) – צמצום הרגישות של מערכות אקולוגיות להשפעות של שינוי האקלים, וביצוע התאמות חברתיות, אקולוגיות וכלכליות לאקלים המשתנה, באמצעות שינויי התנהגות נדרשים.

חוקרים שונים, כמו אנדרסון (Anderson, 2012), מדגישים שעל-מנת לטפח אוריינות אקלימית במסגרת חינוך בנושא שינוי האקלים נחוצים שני רכיבים:

(1) **תשתית פדגוגית** מתאימה, המציידת את הלומד בכלים שיאפשרו לו להתמודד ביעילות עם עתיד המתאפיין באי-ודאות. תשתית זו כוללת רכישת ידע והבנה של הגורמים לשינויי האקלים ולמשבר הסביבתי, זיהוי יחסי הכוחות בין בעלי עניין שונים המעורבים בשינוי האקלים ויכולת לשפוט את תרומתם לטובת הכלל, וכן ידע הנוגע לפרקטיקות שונות של הפחתה והסתגלות. נוסף על כך, תשתית זו כוללת טיפוח כשירויות רלבנטיות להתמודדות עם סוגיות סביבתיות, כמו חשיבה ביקורתית, פתרון בעיות, קבלת החלטות ושיתוף פעולה.

(2) **תשתית פיזית** מתאימה, שפירושה דאגה לסביבות למידה ומרחבי למידה בטוחים, המשקפים יישום בפועל של אסטרטגיות ההפחתה וההסתגלות (למשל, מבנים "ירוקים" הבנויים, מעוצבים ומתוחזקים בהתאם לעקרונות של קיימות).

אתגרים בטיפוח אוריינות אקלימית

כאמור, קיימת הסכמה רחבה בקרב מדענים וחוקרים בחינוך המדעי, שטיפוח אוריינות אקלימית במערכות חינוכיות בעולם הוא צו השעה לנוכח הסיכונים ששינוי האקלים מביא עימו לאדם ולמערכות כדור הארץ ולנוכח השפעת האדם על שינוי האקלים (IPCC, 2018). עם זאת, קידום האוריינות האקלימית עדיין לוקה בחסר במדינות רבות, ונוצר מצב שבו בוגרי מערכות חינוך ברחבי העולם לא נחשפו כלל לנושא שינוי האקלים בלימודיהם. כתוצאה מכך, קיימות בציבור הרחב תפיסות שגויות לגבי מושג זה, אשר צוינו במחקרים רבים כאתגר מרכזי בחינוך בנושא שינוי האקלים. תפיסות שגויות נפוצות כוללות בלבול בין המושגים "אקלים" ו"מזג-אוויר", ייחוס שינוי האקלים לחור באוזון, התייחסות למושגים "שינוי האקלים" ו"גזי חממה" כאל מושגים נרדפים, התייחסות לנטיית ציר הסיבוב של כדור הארץ ככזו הגורמת לעונות השנה, התעלמות מהשפעת האדם על שינוי האקלים וחוסר מודעות להשלכות של שינוי האקלים על חיי האדם, שיוצרת חוסר עניין להבין את הנושא ולפעול בהתאם (לדוגמה,Bunten & Dawson, 2017).

ממחקרים רבים עולה שמידת ההבנה והמודעות של אזרחים בנושא השפעת שינוי האקלים על חייהם תלויה בגורמים סוציו-דמוגרפיים כמו מיקום גאוגרפי, שיוך תרבותי, מצב סוציו-אקונומי, רמת השכלה ונטייה פוליטית. לדוגמה, אזרחים צעירים, משכילים ובעלי נטייה פוליטית דמוקרטית, המתגוררים בערי חוף בארצות הברית, שחשופות להשלכות של שינוי האקלים (כגון עליית מפלס מי הים, סופות חמורות ושיטפונות), נוטים לתמוך בפעולות פרוגרסיביות לצמצום משבר האקלים במידה רבה יותר מזו האופיינית לאזרחים שמרניים יותר מבחינה פוליטית, החיים רחוק מהחוף, אשר נוטים להתנגד לתוכניות פעולה לצמצום משבר האקלים, אף שהם סובלים בעצמם מאירועי מזג אוויר קיצוניים (Foss & Ko, 2019).

נוסף על חוסר ההבנה של נושא שינוי האקלים בקרב הציבור הרחב, בספרות המחקרית מצוינות כמה סיבות לכך שאנשי חינוך, ובהם מורים למדעים, נמנעים משילוב נושא זה בהוראתם בבית הספר. כך למשל נטען כי: המושג מורכב מבחינה מדעית; למורים ידע לקוי ותפיסות שגויות ביחס למושג זה; הנושא שנוי במחלוקת חברתית-פוליטית; למורים חסר ידע תוכן פדגוגי בנושא, משום שאינו נכלל בתוכנית הלימודים בבתי הספר, בהכשרת מורים וברוב התוכניות להתפתחות מקצועית, ומשום שחסר ידע מדעי עדכני בתחום זה בחומרי ההוראה; המורים תופסים את שינוי האקלים כתופעה אדירת ממדים ומאיימת, שאי אפשר לפתור ביעילות באמצעות שינויים בהתנהגויות אנושיות, והם מתקשים לזהות סיכונים מקומיים לשינויי האקלים הגלובליים ולכן נרתעים ללמד נושא זה. אתגרים אלה יוצרים מציאות מורכבת. הם מחייבים את מקבלי ההחלטות וקובעי המדיניות בתחום החינוך לחשוב על דרכים לשילוב נושא שינוי האקלים במערכות חינוך מנקודת מוצא בסיסית ביותר, על מנת לשנות תפיסות, רגשות, הבנה ועמדות של אנשי חינוך לגבי נחיצות העיסוק בנושא באופן שיחלחל בצורה הראויה גם לתלמידים.

גישות ופרקטיקות לטיפוח אוריינות מדעית אקלימית

בספרות המחקרית מתוארות כמה וכמה גישות לטיפוח אוריינות אקלימית בקרב הציבור הרחב ובמערכת החינוך. גישה אחת היא חיזוק של הידע בנושא שינוי האקלים, המיומנויות הכרוכות בהבנתו והשיח הציבורי לגביו – כל זאת באמצעות טיפוח אוריינות מידע. אוריינות מידע (Media literacy) משמעותה היכולת לגשת, לנתח, להעריך, ליצור ולפעול בהצלחה בכל סוגי המדיה (National Association for Media Literacy Education, 2009). אוריינות מידע מעודדת חשיבה עצמאית וביקורתית וניתוח מידע

בספרות המחקרית מתוארות כמה וכמה גישות לטיפוח אוריינות אקלימית בקרב הציבור הרחב ובמערכת החינוך. גישה אחת היא חיזוק של הידע בנושא שינוי האקלים, המיומנויות הכרוכות בהבנתו והשיח הציבורי לגביו – כל זאת באמצעות טיפוח אוריינות מידע.

באופן מושכל, כלים הנחוצים כיום בעידן שבו כמות עצומה של מידע ממקורות שונים מופצת במדיה העולמית ללא סינון ובקרה. קופר (Cooper, 2011) הציע לפתח את אוריינות המידע כאסטרטגיה מרכזית שתסייע בהבנה וקבלה של תופעת שינוי האקלים בקרב הציבור, וזאת באמצעות שלוש שאלות מפתח שיש לשאול כשבוחנים אמינות של מידע כלשהו:

(1) מהי מידת ההטיה של המידע מבחינת מקור המידע, מטרת הפרסום וההשפעה הכלכלית של פרסומו?

2) מהם המשמעויות והמסרים הגלויים והסמויים של המידע מבחינת תוכן ופרשנויות אפשריות לתוכן?

(3) אילו היבטים אישיים, כלכליים וחברתיים קשורים למידע וכיצד הם משפיעים על מהימנותו? בהמשך לכך, אזבדו ומרקוס (Azevedo & Marques, 2017) רואים חשיבות רבה בשילוב אסטרטגיות ממדעי התקשורת בטיפוח אוריינות מדעית אקלימית. הם טוענים כי אסטרטגיות אלה נחוצות לקידום חינוך לקיימות בהקשר של שינוי האקלים, להעמקת ההבנה של הציבור ביחס לקשרים שבין מדע, טכנולוגיה, חברה, סביבה והיבטים מוסריים ולחיזוק החשיבה ההוליסטית והביקורתית. בהתבסס על סקירת ספרות רחבה הנוגעת לחינוך בנושא שינוי האקלים, אנדרסון (Anderson, 2012) ממליצה על כמה אסטרטגיות וכיווני הוראה–למידה העשויים לחזק את האוריינות האקלימית של תלמידים:

1. **הוראת שינוי האקלים כחלק מתוכנית לימודים בינתחומית המעוגנת במדעי הסביבה**
תאפשר ללומדים לקשור בין היבטים סביבתיים שונים וכתוצאה מכך תחזק את ההבנה ההוליסטית שלהם לגבי שינוי האקלים ואחריותם לפעול בנושא. הוראת שינוי האקלים באופן אינטגרטיבי מחייבת הצגת הנושא בתחומי לימוד קיימים כמו מדעים, גיאוגרפיה, אזרחות, היסטוריה, מדע החברה, לימודי שפה, אומנות ותיאטרון.

2. **שילוב למידה פעילה הקשורה לפתרון בעיות מקומיות**
פעילויות למידה התנסותיות הקשורות לסוגיות מקומיות מעודדות תוצרי למידה משמעותיים. בנוסף, חיבור נושא שינוי האקלים להשלכות מקומיות ולהתנהגויות מסוימות של הלומדים מחזק את הרלבנטיות של הנושא לחיים האמיתיים שלהם ולכן יכול לעודד אותם לפעול.

3. **פיתוח מיומנויות של פתרון בעיות וחשיבה ביקורתית באמצעות הדגשת יכולת הפרט להגיע להישגים חיוביים**
התמקדות בבעיות ופתרונות מעודדת את מעורבות הלומדים ואת בחירתם לאמץ התנהגות סביבתית. הדגשת יכולת הלומדים להצליח בפתרון בעיות הקשורות לשינוי האקלים מחזקת את המסוגלות העצמית שלהם לפעול בתחום זה ומצמצמת את החששות ואי-הוודאות שלהם כלפי הנושא. אסטרטגיה זו חיונית במיוחד ללומדים צעירים העלולים לפתח תחושות של חוסר אונים וחוסר מוטיבציה לפעול, בעקבות חשיפת יתר לנושא שינוי האקלים, העלול להיתפס כמאיים מבחינתם.

4. **הצגת חלופות שונות לצמצום טביעת הרגל האקולוגית**
חשיפת הלומדים למידע שקושר באופן ישיר בין התנהלותם היומיומית לבין השלכותיה על הסביבה, לרבות שימוש במדדים כמותיים, עשויה לתרום לכך שהם יאמצו בהדרגה התנהגויות מתאימות יותר לעולם בר-קיימא.

5. **שימוש בטכניקות מגוונות, כגון דמיון מודרך וכתיבת טיעונים**
כלים אלה מסייעים להבנה של הלומדים ולמעורבותם הפעילה בלימוד נושאים הקשורים לשינוי האקלים, וכתוצאה מכך עשויים לשנות את עמדותיהם והתנהגותם בתחום זה (Niepold et al., 2007).

סיכום

שינוי האקלים כבר כאן. זה הזמן להתייחס לנושא בכובד ראש גם במערכת החינוך בישראל. יש לתת לאזרחי המחר את הידע, המיומנויות והכלים הנדרשים לקבלת החלטות מושכלות בהתמודדות עם השלכות משבר האקלים. ויפה שעה אחת קודם.

רשימת ספרות

AAAS. (2020). Atlas of Science Literacy. Project 2061.

Anderson, A. (2012). Climate change education for mitigation and adaptation. Journal of Education for Sustainable Development 6: 191-206.

Azevedo, J. & Marques, M. (2017). Climate literacy: a systematic review and model integration. International Journal of Global Warming 12: 414-431.

Cooper, C.B. (2011). Media literacy as a key strategy toward improving public acceptance of climate change science. BioScience 61: 231-237.

Bunten, R. & Dawson, V. (2014). Teaching climate change science in senior secondary school: Issues, barriers, and opportunities. The Journal of the Australian Science Teachers Association 60: 10–18.

European Commission. (2015). science education for responsible citizenship. Accessed 5 June 2020.

Foss, A.W. & Ko, Y. (2019). Barriers and opportunities for climate change education: the case of Dallas-Fort Worth in Texas. Journal of environmental Education 50: 145-159.

IPCC (2018). Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]

McCaffrey, M.S. & Buhr, S.M. (2008). Clarifying climate confusion: Addressing systemic holes, cognitive gaps, and misconceptions through climate literacy. Physical Geography 29: 512-528.

National Association for Media Literacy Education. (2009). Core principles of media literacy education in the United States.

NOAA, The National Oceanic Atmospheric Administration of the U.S. Department of Commerce (2014). What is climate science literacy?

Niepold, F., Herring, D. & McConville, D. (2007). The case for climate literacy in the 21st century. In 5th International Symposium on Digital Earth.

OECD - Organization for Economic Co-operation and Development (2012). PISA in focus. How "green" are today's 15-year-olds?.

OECD - Organization for Economic Co-operation and Development/Programme for International Student Assessment (OECD/PISA) (2013) PISA 2015 Draft Science Framework, OECD, Paris.

Stevenson, R.B. (2006). Tensions and transitions in policy discourse: recontextualizing a decontextualized EE/ESD debate. Environmental Educational Research 12 (3-4): 277-290.

UN. (2018). Sustainable development goals for 2030.

USGRP-U.S. Global Change Research Program (2009). Climate literacy framework.

חינוך בנושא שינוי אקלים כבר כאן, ובכל מקום אחר בעולם

ליאורה ביאלר, שרמן רוזנפלד וארנה פליק[1]

מאמר זה סוקר את הספרות ומתייחס לחינוך בנושא שינוי האקלים בעולם בקרב תלמידי ומורי חטיבות הביניים (חט"ב) ובגילים אחרים.

האתגר הגדול העומד בפני האנושות בשנים הבאות הוא התמודדות עם ההשפעות של שינוי האקלים. אתגר זה חל על בני דורנו, אך יותר מכך יחול על דור התלמידים המתחנכים היום בבתי הספר. לחינוך יש תפקיד חשוב בהכרה של תופעת שינוי האקלים, בהבנת המושגים והעקרונות המדעיים הקשורים לתופעה זו וכן בהבנת השלכותיה. תלמידים אלה יידרשו לקבל החלטות כדי לפתור בעיות שייגרמו כתוצאה ממשבר האקלים.

מאמר זה מתייחס לחינוך בנושא שינוי האקלים בעולם בקרב תלמידי ומורי חטיבות הביניים (חט"ב) ובגילים אחרים. הוא מבוסס על סקר ספרות ודן בסוגיות הבאות:

הרצוי: מהן מטרות הלמידה-הוראה של החינוך לשינוי האקלים?

המצוי: מהם המחסומים להגשמת מטרות אלו בקרב התלמידים, המורים ומחברי חומרי למידה?

המומלץ: מהן המלצות הספרות המקצועית ביחס לגישור הפער בין המצוי לרצוי, כדי לתת ביטוי ל"קול של התלמידים" בתהליך הלמידה בנושא שינוי האקלים?

הרצוי: מהן מטרות הלמידה-הוראה של החינוך לשינוי האקלים?

בשנת 1992 האו"ם קבע את חשיבותה ונחיצותה של פעילות למען העצמת הציבור לעסוק בסוגיית שינוי האקלים (Action for Climate Empowerment), לפי שלוש ההנחיות הבאות: (1) חינוך והכשרה; (2) מודעות ציבורית ונגישות ציבורית למידע; (3) שיתוף פעולה ציבורי ובינלאומי.

בשנת 2015 קבע האו"ם 17 יעדים לפיתוח בר-קיימא, (Sustainable Development Goals ובקיצור SDGs). יעד מספר 13 כוון לפעילות למען האקלים, וכלל מטרות לימודיות בשלוש קטגוריות: (א) מטרות לימודיות קוגניטיביות; (ב) מטרות לימודיות חברתיות-רגשיות; (ג) מטרות לימודיות התנהגותיות; כמפורט להלן (UNESCO, 2017).

א. מטרות לימודיות קוגניטיביות עוסקות בהבנה וידע של הלומד בנושאים:

1. אפקט החממה כתופעה טבעית הנגרמת על ידי שכבה מבודדת של גזי חממה.
2. שינוי האקלים הנוכחי כתופעה הנגרמת על ידי האדם

1 ד"ר ליאורה ביאלר, ד"ר שרמן רוזנפלד, ד"ר ארנה פליק, מרכז מורים ארצי למורי מו"ט בחט"ב, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע.

(פעילות אַנתרופוגנית), הנובעת מהעלייה בפליטות גזי החממה.

3. הפעילויות האנושיות – ברמה העולמית, הלאומית, המקומית והפרטנית – הן התורמות ביותר לשינוי האקלים.

4. ההשלכות האקולוגיות, החברתיות, התרבותיות והכלכליות העיקריות של שינוי האקלים באופן מקומי, ארצי וגלובלי, וכיצד השלכות אלה יכולות בעצמם להיות זרזים של גורמים לשינוי האקלים.

5. אסטרטגיות מניעה (prevention), הפחתה (mitigation) והתאמה (adaptation) ברמות שונות (עולמיות ופרטניות), וקשריהן עם תגובה לאסון ולהפחתת סיכון לאסון.

ב. מטרות לימודיות חברתיות-רגשיות העוסקות במסוגלות הלומד:

1. להסביר את הדינמיקה של המערכת האקולוגית ואת ההשפעה הסביבתית, החברתית, הכלכלית והאֶתית של שינוי אקלים.
2. לעודד אחרים לבצע פעולות להגנה מפני שנוי האקלים.
3. לשתף פעולה עם אחרים ולפתח אסטרטגיות מוסכמות נפוצות להתמודדות עם שינוי האקלים.
4. להבין את השפעתו האישית על האקלים העולמי, מנקודת מבט מקומית עד לנקודת מבט עולמית.
5. להכיר בכך שההגנה על האקלים העולמי היא משימה חיונית עבור כולם וכי עלינו להעריך מחדש את השקפת עולמנו ולשנות לחלוטין את ההתנהגויות היומיומיות שלנו לאור זאת.

ג. מטרות לימודיות התנהגותיות העוסקות במסוגלות הלומד:

1. להעריך אם פעולותיו ביום-יום ובעבודה מגינות על האקלים ולתקן את אלה שאינן כאלה.
2. לפעול לטובת אנשים המאוימים משינוי האקלים.
3. לצפות, לאמוד ולהעריך את ההשפעה של החלטות או פעולות אישיות, מקומיות ולאומיות על אנשים אחרים ועל אזורים עולמיים.
4. לקדם מדיניות ציבורית המגינה על האקלים.
5. לתמוך בפעילות כלכלית ידידותית לאקלים.

במאמר זה נשתמש במטרות הלימודיות הללו בלבד ובידיעה כי קיימים ניסוחים של מטרות נוספות בנושא.

המצוי: מהם המחסומים להגשמת המטרות שנזכרו לעיל בקרב התלמידים, המורים ומחברי חומרי למידה?

בסקר הספרות מצאנו כמה מחסומים להגשמת המטרות הלימודיות הקוגניטיביות, החברתיות-רגשיות וההתנהגותיות.

לגבי המטרות הלימודיות הקוגניטיביות, הרבה תלמידים בני 11–12 מבלבלים בין מושגים בסיסיים, כגון **שינויי אקלים עולמיים**, **התחממות עולמית** ו**אפקט החממה** (Svihla & Linn, 2012). המושג **שינויי אקלים עולמיים** מתייחס להתרחשות בעתיד ובהווה, להתחממות פליאו-אקלימית (שחזור האקלים) ולמגמות התקררות מסיבות טבעיות או אנתְרופוגניות. המושג **התחממות עולמית** מתייחס לעליית הטמפרטורה הממוצעת העולמית. התחממות כזו התרחשה פעמים רבות במהלך ההיסטוריה של כדור הארץ ומרבית הקהילה המדעית מאמינה שהיא מתרחשת כרגע. המושג **אפקט החממה** מתייחס למנגנון המרכזי ביותר של התחממות כדור הארץ, שבו גזים מסויימים קולטים ושומרים את אנרגיית השמש. התהליך הזה טבעי ויוצר את סביבות החיים על פני כדור הארץ, אך הוספת גזי חממה (בעיקר CO_2) על ידי שריפת דלקים פוסיליים יכולה להעלות את הטמפרטורה של כדור הארץ לרמות מסוכנות. תלמידים רבים בחט"ב קשרו במחקר זה את גזי אפקט החממה וההתחממות הגלובלית יחד, אך ההסברים לכך כללו תפיסות חלופיות, כמו: השמש עשויה מגזים, והיא המקור לאנרגייה בעולם, לכן גזים רבים יותר הופכים את העולם לחם יותר. ייתכן שהרעיון כאן מתקשר לגזי החממה הנוצרים מהפחם שנשרף, שזוהי פעולה אקסותרמית. הסבר נוסף הוא כי העולם מתחמם בשל שריפתו של הפחם הנשרף והוא מקור החום הגורם לשינויי אקלים. תלמידים אחרים קישרו את

ההתחממות לתהליך הנשימה, שבו נפלט CO_2 שכן, לטענתם, בשעה שנושמים יש יותר פחמן דו-חמצני באוויר, המעלה את החום. כאן ישנה הקבלה בין תהליך הנשימה לפעולת האגזוז במכונית.

כמו כן, תלמידים רבים הפגינו ידע מקוטע בנושאים הקשורים לשינוי האקלים. למשל, מחקר שבדק את הסיבות לשינוי האקלים בקרב 142 תלמידי ח'–י' מצא כי תלמידים התקשו בהבנת מחזור הפחמן וכי הם זיהו מספר קטן של מרכיבים במחזור הפחמן, אך עקבו אחר אטומי הפחמן רק ברמת האורגניזם. נוסף על כך, תלמידים התקשו לזהות את תרכובות הפחמן האורגניות, בעיקר במהלך התהליך שבו תרכובות הפחמן עברו שינויים (Düsing, Asshoff & Hammann, 2019). בנוסף, מתוך תשובות התלמידים ניכר כי הם התקשו ליישב את הרעיונות שלומדים בבית הספר עם רעיונות מחיי היום-יום שלהם. יש טווח של מקורות שמהם ניזונים התלמידים היוצרים סתירות, וכדי לגשר על פער זה התלמידים יוצרים צירוף והקשר משלהם (Svihla & ,Linn 2012). נמצא עוד כי חוסר הבנה ותפיסות נפוצות וטבועות אלה קיימים לא רק בקרב תלמידי חטיבות הביניים אלא גם בקרב תלמידי תיכון ואף בתלמידים הלומדים במכללות (Gowda, Fox & Magelky, 1997; Lombardi & Sinatra, 2012).

לגבי מורים, סקר מקיף שהתפרסם בעיתון המדעי היוקרתי Science והקיף 1,500 מורי חט"ב ותיכון הראה שמרבית המורים למדעים בארצות הברית משקיעים מעט זמן בהוראת שינויי אקלים בכיתותיהם, ושהבנתם בנושא – הן במושגים מדעיים והן בגורמים פוליטיים – היא "בלתי מספקת" ו"עשויה להפריע להוראה יעילה" (Plutzer et al., 2016).

ראוי לציין כי קיימים הבדלים משמעותיים בחומרי הלמידה על שינוי האקלים, הן מבחינת רמת התמיכה בדעה הרווחת שבני האדם אחראים לשינוי האקלים עקב השימוש שלהם בדלקים פוסיליים (מגישה תומכת לגישה מהססת ועד לגישה לא תומכת) והן מבחינת השילוב של מושגים מדעיים עם חומרי הלמידה שמתייחסים לאֶמָנות בינלאומיות וחקיקות רגולטוריות (Casey, Brett, Levy & Collet-Gildard, 2018). לגבי יישום המטרות הלימודיות החברתיות-רגשיות, נראה כי תלמידים מושפעים הרבה מכלי התקשורת. בהקשר לכך, מחקר שנערך ב-2007 בקרב 600 ילדים בני 10–14 ברחבי אוסטרליה, ועסק בדאגות של ילדים ונוער, הראה כי 44% מהילדים מודאגים מאוד משינוי האקלים, בעוד ש-25% מהילדים מודאגים שהעולם יבוא אל קיצו בתקופת חייהם. החוקרים חושבים שמקור הדאגות נובע מהמדיה שאליה הם חשופים (Tucci, Mitchell & Goddard, 2007).

המחסום העיקרי של יישום המטרות הלימודיות ההתנהגותיות הוא שלפי מחקרים רבים – לגבי תלמידים ולגבי מורים – אין בהכרח קשר בין רכישת ידע בנושא שינוי האקלים לבין התנהגות הולמת בנושא. למשל, במחקר בהשתתפות 80 מורים, רובם הביעו דאגה מן המצב, אך המוכנות שלהם לפעול בהקשר של שינוי האקלים הייתה נמוכה יותר. (Seroussi, Rothschild, Kurzbaum, Yaffe & Hemo, 2019). החוקרים גם הבחינו בפער בשימוש במושגים בין העולם המדעי הפורמלי לבין שפת התלמידים. למשל, המושג "קיימות" נתפס אצל התלמידים כבלתי-משמעותי מאחר שאינו מסייע להם לקשר את הבעיות לחייהם.

המומלץ: מתן ביטוי ל"קול" של התלמידים בתהליך הלמידה בנושא שינוי האקלים

התוכניות והגישות המתוארות בספרות לחינוך בנושא שינוי אקלים מערבות חלק מהיעדים וחלק מהמחסומים שנסקרו עד כה. במחקר מקיף שזיהה בתוך מסד הנתונים האקדמי של EBSCOhost 959 ציטוטים העוסקים בחינוך בנושא שינוי אקלים, נמצאו אסטרטגיות לימודיות ש"יכולות להוביל להתערבויות מועילות". בתוך כך זוהו שש אסטרטגיות המשותפות לרוב התוכניות המועילות לחינוך הסביבתי בכלל ולחינוך בנושא שינוי אקלים בפרט: (1) התמקדות במידע רלבנטי, משמעותי ואישי; (2) שימוש בשיטות הוראה פעלתניות ומרתקות; (3) מעורבות הלומדים בדיונים; (4) אינטראקציה עם מדענים; (5) התייחסות לתפיסות חלופיות; (6) יישום פרויקטים במישור הבית-ספרי והקהילתי (Monroe et al, 2019). להלן מוצגות דוגמאות לכל אסטרטגיה.

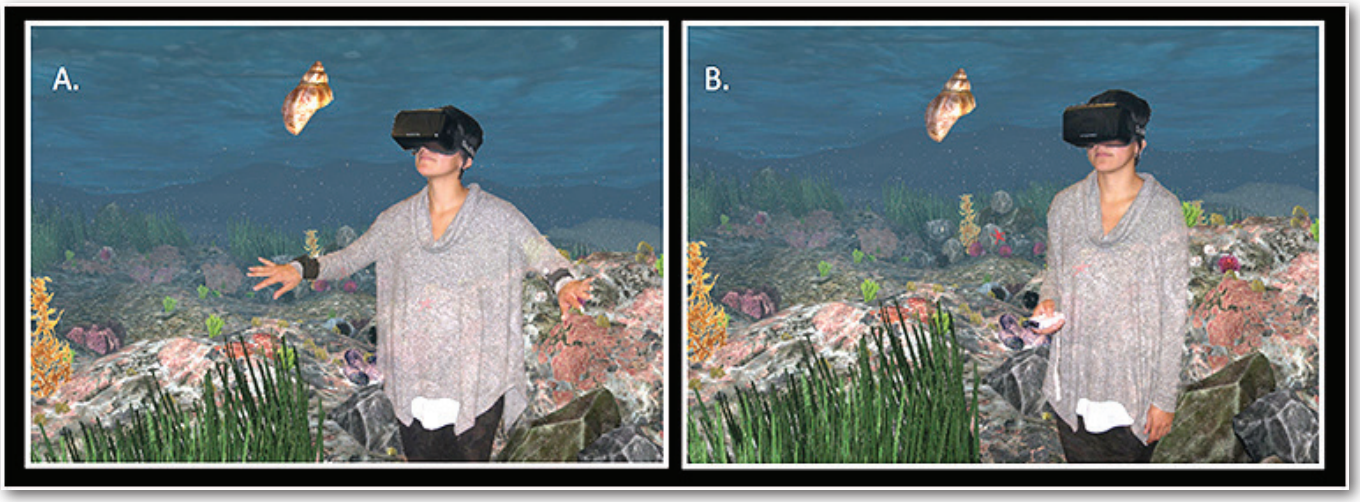
(1) התמקדות במידע רלבנטי, משמעותי ואישי

מה מעניין ורלבנטי לתלמידים בהקשר של שינוי האקלים? מחקר שבדק אילו סוגי שאלות שאלו תלמידי תיכון על אודות שינוי האקלים (Tolppanen & Aksela, 2018) מצא ש-355 השאלות שהעלו התלמידים התייחסו למורכבות והרב-תחומיות של הנושא. השאלות הראו התעניינות בפן המדעי של הנושא אך גם בהקשר של פוליטיקה, פסיכולוגיה, התנהגות והשלכות על הפרט. רוב השאלות עסקו בפתרונות מעשיים שהמשתתפים יכולים לתרום להם (69%), חלקן עסקו בתרומה של ידע מדעי וטכנולוגי ספציפי לפתרון הבעיה (19%) והיתר התייחסו לפתרונות המבוססים על אנרגייה ומשאבים מתחדשים (12%). לדעת החוקרים, שאלות של בני נוער יכולות להיות מנוף ללמידה רב-תחומית של נושא שינוי האקלים. הסוגיות שבהן עסקו השאלות נמצאו בהלימה עם סוגיות שהגדירו חוקרים כראויות ליישום בהוראת "שינוי האקלים". לדעת החוקרים, יש להתייחס לסוגיות הללו באופן הוליסטי, כדי לתמוך בחשיבה מערכתית. הוראת הנושא צריכה להתייחס לפחות להיבטים המדעי, הטכנולוגי, החברתי, האישי והמוסרי, ואף לקשרים שבין היבטים אלו. יש אף צורך להתייחס לאופיו של המדע, כדי לתת ללומדים כלים לבחון אמינות של מחקרים בנושא.

(2) שימוש בשיטות הוראה פעלתניות ומרתקות

מחקרים מלמדים כי שימוש במציאות מדומה, בסימולציות ובמשחקים מסייע ללמידה על שינוי אקלימי בהקשרים מקומיים או גלובליים. בכל האמצעים הללו יש אפשרות לתת לתלמיד חוויה שבה הוא יכול "לנסוע בזמן" ולחוות כיצד היו נראים חייו לו חי בעתיד (תמונה 1) (Nussbaum, et al., 2015; Markowitz, Laha, Perone, Pea & Bailenson, 2018).

המחקרים אף מציעים שימוש במשחק תפקידים המאפשר התנסות בדיון בינלאומי וקבלת החלטות תוך שמירה על האינטרסים הכלכליים של מדינתם של התלמידים, מחד גיסא, לבין קבלת החלטות הנוגעות לאקלים הגלובלי, מאידך גיסא. המעורבות ונטילת תפקיד במשחק מגבירים אמפתיה ומוטיבציה ומשפיעים על עמדות וערכים. הצורך הפסיכולוגי לנצח במשחקים משפיע על האופטימיות והנחישות למצוא פתרון לבעיות המוצגות בהם. המשחק מאפשר לבחון השלכות של פעולות, ללא הסיכון הקיים ביישום אמיתי שלהן (Mendler de Suarez, Suarez & Bachofen, 2012). נוסף על כך, שיטות הלמידה המפעילות הנהוגות בשיעורי מדעים, כמו ניסויי מעבדה ולמידה בדרך החקר, הומלצו אף הן על ידי כמה מהחוקרים ככאלה המשפיעות ומביאות לבניית ידע אישי והסקת מסקנות על בסיס החקר בנושא שינוי האקלים והשלכותיו (Karpudewan, Roth & Abdullah ,2015).



תמונה 1: דוגמה לשימוש בממציאות מדומה בלימוד על שינוי האקלים. בתמונה נראית קונכיה בשני מצבי תלת-ממד.
מתוך: Markowitz, Laha, Perone, Pea & Bailenson, 2018.

איור 1: דוגמה לאחד מתוצרי המחקר המשותף הוא ספר ערוך הכולל מאמרים, שירים, רישומים, סיפורים שנוצרו בשיתוף עם החוקרים. בתמונה השמאלית דמות מקומיקס המופיעים בספר (מצד ימין). מתוך: Cutter-Mackenzie & Rousell, 2019

(3) מעורבות הלומדים בדיונים

ביחידה על אפקט החממה וההתחממות הגלובלית צפו החוקרים בדיונים של תלמידים ובשינוי תפיסתם. החוקרים גילו שהדיונים אִפשרו לתלמידים להתייחס לפערים בהבנתם וליצור מודלים מנטליים מועילים. לדוגמה, ניכר שינוי בתפיסתם של התלמידים ביחס לשכבת האוזון כגורם המשפיע על שינוי האקלים, שנבע משיחותיהם עם תלמידים אחרים. באמצעות דיון והדרכת המורה, התלמידים הצליחו לזהות כיצד התיאוריות שלהם לגבי שינוי האקלים סתרו את התיאוריות המקובלות, ולשלול כמה מהרעיונות הראשוניים שלהם. החוקרים הצביעו על כך שתוצאות אלה תומכות בחשיבות של גירויים בדיונים קבוצתיים, המאפשרים לתלמידים להפוך את אמונותיהם האישיות לתפיסות מנומקות (Mason & Santi, 1998). אף שהמחקר נערך בקרב תלמידי כיתה ה', נראה שהמסקנות תקפות גם לגבי תלמידי חט"ב.

(4) אינטראקציה עם מדענים

במסגרת תוכנית אחת, שימשו תלמידים בני 9–14 חוקרים שותפים למדענים בחקר תופעות טבע המושפעות משינוי האקלים וקיימו סיורים לצורך איסוף נתונים. תלמידים אחרים היו חוקרים שותפים למדען בהערכת הידע ועמדות של אחרים בסוגיות של שינוי האקלים, וקולם נשמע בנושא בקהילות שלהם. במסגרת המחקר המשותף למדו תלמידים על אודות סוגיות סביבתיות, ובהן שינוי האקלים, וריאיינו עמיתים בנושא, צילמו סרטונים, תיעדו והכינו תערוכה מקיפה של תוצרי החקר, שהוצגה בשמונה ספריות ציבוריות ונחשפו אליה לפחות 10,000 בני אדם (איור 1). ההשתתפות בחקר המשותף, החופש בבחירת סוג התוצר והמעורבות באופן הצגתו חשפו ידע שאינו מוגבל ושגוי והראו כי התלמידים הם בעלי תובנות בנושא, יצירתיים ומעורבים פוליטית. מן הראיונות וניתוח התוצרים גילו החוקרים מה מעניין את התלמידים וכיצד הם מקשרים את הסוגיות לחייהם. ידע זה השפיע על עיצוב תוכנית הלימודים ההמשכית של הפרויקט. בנוסף מסקנת החוקרים היא כי יש להעמיק את הידע של המורים על אודות ההשלכות של שינוי האקלים על חיי היום-יום ועל הדרכים שיש לנקוט להאטה או עצירה של התהליך (Cutter-Mackenzie & Rousell, 2019).

(5) התייחסות לתפיסות חלופיות

חשוב לטפל במושגים מוטעים בצורה ישירה. למשל, מחקר חינוכי קבע את הקשיים של תלמידים בקשר למעגל הפחמן, והציע להשתמש באסטרטגיה שבה יידרשו התלמידים לעקוב אחר אטומי הפחמן ברמות שונות של מערכות ביולוגיות, תוך חיבור ל"ידע המקוטע" שלהם, על ידי שילוב של ידע מתחומים שונים כמו פיזיולוגיה, ביוכימיה ואקולוגיה כאשר נושא מחזור הפחמן נלמד (Düsing, Asshoff & Hammann, 2019). על בסיס מחקר זה, חוקרים אחרים קבעו תהליך למידה (learning

progression) מפורט על לימוד מעגל הפחמן שהצליח במידה רבה לחבר בין התחומים השונים בקרב התלמידים (Jin, Zhan & Anderson, 2013).

(6) יישום פרויקטים במישור הבית-ספרי והקהילתי

פרויקטים הקשורים בשינוי האקלים ובחינוך סביבתי הם מוצלחים ביותר כאשר הם מתמקדים בהיבטים מקומיים, מוחשיים ומעשיים, במיוחד כאשר אפשר להתייחס אליהם באמצעות שינוי ההתנהגות הפרטנית של התלמידים (Anderson, 2012). במסגרת פרויקט "Climate Change + Me" תלמידים בני 9–14 מאוסטרליה שימשו כחוקרים שותפים למדענים בחקר תופעות טבע המושפעות משינוי האקלים וקיימו בתוך כך סיורים בסביבה הקרובה לאיסוף נתונים הנוגעים לסוגיות סביבתיות, ובהן שינוי האקלים (Cutter-Mackenzie & Rousell , 2019).

סוף המאמר אך לא סוף דבר

אף שהיינו רוצים להאמין שהוא כבר כאן, ובכל מקום אחר בעולם, כיום שינוי האקלים אינו נושא לימוד חובה ברוב מדינות העולם. איטליה היא יוצאת דופן בהקשר זה: החל משנת הלימודים 2019–2020 הפך "שינוי האקלים" לנושא לימוד חובה בכל שכבות הגיל (Nace, 2019).

הצעד המעשי הראשון המשתמע מתוך סקירת הספרות במאמר זה, שנדרש כדי שמורים ישלבו מטרות לימודיות קוגניטיביות, חברתיות-רגשיות והתנהגותיות שיחנכו לשינוי האקלים, הוא פיתוחם המקצועי של המורים, אשר יכלול את הרחבת הידע והתובנות שלהם בנושא, ואת האֶמנות וההתנהגות הנוגעות לידע ולתובנות בנושא. בנוסף מומלץ להכיר תוכניות לימוד מועילות הקיימות בארץ ובעולם בחינוך בנושא שינוי אקלים.

כמו כן, כדי למנוע "ידע מקוטע" בנושא, מומלץ לפתח במורים מיומנויות של חשיבה מערכתית. חשיבה מערכתית היא חשיבה שיוצרת הבנת ידע על אודות הקשרים בין מרכיבים בתוך מערכת מסוימת כמו גם בין מערכות שונות. מכיוון ששינוי האקלים קשור למערכות רבות במדע ובחברה, נראה שפיתוח החשיבה המערכתית יכול להוביל להבנה טובה יותר של הנושא בקרב תלמידים. "כוכב הלכת הכחול" הוא דוגמה ליחידת לימוד שפותחה עבור תלמידי חט"ב במסגרת לימודי המו"ט ולוותה במחקר שהצביע כי תלמידים פיתחו חשיבה מערכתית בנושא (Assaraf & Orion, 2005). אף שחוקרים רבים ממליצים על פיתוח כישורי חשיבה מערכתית (למשל Blonder & Rosenfeld, 2019), לפי סקר הספרות שלנו, כמעט ולא זוהו תוכניות בנושא שינוי האקלים שניסו לשלב חשיבה מערכתית ו / או שילוב בין תחומי הדעת החברתיים והמדעיים. תם ולא נשלם.

רשימת ספרות

Anderson, A. (2012). Climate change education for mitigation and adaptation. Journal of Education for Sustainable Development 6(2): 191–206.

Assaraf, O & Orion, N. (2005). Development of system thinking skills in the context of earth system education. Journal of Research in Science Teaching 42 (5): 518-560.

Blonder, R. & Rosenfeld, S. (2019). Integrating the human element in the responsible research and innovation framework into systems thinking approaches for teachers' professional development. Journal of Chemical Education 96: 2700-2703.

Casey, R.M., Levy, B.L.M. & Collet-Gildard, L. (2018). Global climate change in U.S. high school curricula: Portrayals of the causes, consequences, and potential response. Science Education 102: 498–528.

Cutter-Mackenzie, A. & Rousell, D. (2019) Education for what? Shaping the field of climate change education with children and young people as co-researchers. Children's Geographies 17(1): 90–104.

Düsing, K., Asshoff, R. & Hammann, M .(2019) Students' conceptions of the carbon cycle: Identifying and interrelating components of the carbon cycle and tracing carbon atoms across the levels of biological organisation. Journal of Biological Education 53(1): 110-125.

Gowda, M.V.R., Fox, J.C. & Magelky, R.D. (1997). Students' understanding of climate change: Insights for scientists and educators. Bulletin of the American Meteorological Society 78: 2232–2240.

Markowitz, D.M., Laha, R., Perone, B.P., Pea, R.D. & Bailenson, J.N. (2018) Immersive virtual reality field trips facilitate learning about climate change. Frontiers in Psychology 30 (November 2018) https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02364

Mendler de Suarez, J., Suarez, P. & Bachofen, C. (eds) (2012). Games for a New Climate: Experiencing the complexity of future risks. Boston Univ., The Frederick S. Pardee Center for the Study of the Longer-Range Future.

Nussbaum, E.M., Owens, M.C., Sinatra, G.M., Rehmet, A.P., Cordova, J.R., Ahmad, S., et al. (2015). Losing the lake: Simulations to promote gains in student knowledge and interest about climate change. International Journal of Environmental & Science Education 10(6): 789–811.

Seroussi, D.-E, Rothschild, N., Kurzbaum, E., Yaffe, Y. & Hemo, T. (2019). Teachers' knowledge, beliefs, and attitudes about climate change. International Education Studies 12(8): 33–45.

Svihla, V. & Linn, M.C. (2012). A design-based approach to fostering understanding of global climate change. International Journal of Science Education 34(5): 651–676, http://dx.doi.org/10.1080/09500693.2011.597453

Tolppanen, S. & Aksela, M. (2018). Identifying and addressing students' questions on climate change. The Journal of Environmental Education 49(5): 375–389.

Tucci, J., Mitchell, J. & Goddard, C. (2007). Children's Fears, hopes and heroes: Modern childhood in Australia. Melbourne: Australian Childhood Foundation.

UNESCO (2017). Education for sustainabled development goals: Learning objectives.

Jin, H., Zhan, L. & Anderson. C.W. (2013). Developing a Fine-grained learning progression framework for carbon transforming processes. International Journal of Science Education 35 (10): 1663–1697, doi:10.1080/09500693.2013.782453

Karpudewan, M., Roth, W-M. & Abdullah, M.N. (2015). Enhancing primary school students' knowledge about global warming and environmental attitude using climate change activities."International Journal of Science Education 37(1): 31–54.

Lombardi, D. & Sinatra, G.M. (2012). College students' perceptions about the plausibility of human-induced climate change. Research in Science Education 42: 201–217, doi:10.1007/s11165-010-9196-z

Mason, L. & Santi, M. (1998). Discussing the greenhouse effect: Children's collaborative discourse reasoning and conceptual change. Environmental Education Research 4(1): 67–85.

Monroe, M.C., Plate, R.R., Oxarart, A., Bowers, A. & Chaves, W.A. (2019). Identifying effective climate change education strategies: A systematic review of the research. Environmental Education Research 25(6): 791–812, DOI: 10.1080/13504622.2017.1360842

Nace, T. (2019). Italian law to require climate change education In grade school. Forbes. Retrieved from: https://www.forbes.com/sites/trevornace/2019/11/19/italy-law-to-require-climate-change-education-in-grade-school/#17c478155dae

Plutzer, E., McCaffrey, M., Hannah, A.L., Rosenau, J., Berbeco, M. & Reid, A.H. (2016). Climate confusion among U.S. teachers. Science 351(6274): 664–665. Retrieved from: https://science.sciencemag.org/content/351/6274/664

עוזרים לגרטה להציל את העולם

נורית הוכברג, ליאת זלוצ'ובר הרנוי, שושי מנצור, קרן אריכא ומיכל שכטר[1]

מאמר זה מציג משימה שפותחה במסגרת קורס מובילי קהילות מדעים ארצי המתקיים במרכז המורים הארצי למורי מדע וטכנולוגיה בחטיבת הביניים, בנושא שינוי האקלים. המאמר סוקר את הצורך החינוכי בהוראת הנושא, מדגים הוראה דיפרנציאלית הנותנת מענה לשונות בין לומדים ומציג את המשימה המלווה בהנחיות למורה. משימה זו הופעלה בכיתות בהצלחה.

"אנחנו הדור הראשון שחווה את שינויי האקלים אבל גם הדור האחרון שיש לו את האפשרות לעצור זאת!" (ברק אובמה, 2015). לדברים אלה מצטרף האפיפיור פרנציסקוס: "אם אשתמש במילים חזקות, אומר שאנחנו נמצאים על גבול ההתאבדות" (Francis in Africa ,2015). משבר האקלים מוחשי מתמיד ובעל השפעה מקיפה בכדור הארץ בכלל, וכך גם בישראל. הרוב המוחלט של הקהילה המדעית תומך באמיתות התופעה וטוען כי עלינו לפעול באופן נחוש ומהיר (מגמה ירוקה, 2019).

שינוי האקלים אינו נחשב לתחזית מדעית בלבד, אלא למציאות מאוד מוחשית וממשית, שאנו חשים בתדירות גוברת של אירועי מזג אוויר קיצוני בכל העולם. גם בישראל אנחנו חווים את שינויי האקלים בצורה משמעותית בשנים האחרונות, עם גלי חום רבים יותר, שיטפונות קשים יותר ובצורת מתמשכת המחמירה משנה לשנה. לפיכך, אחד המכשולים העיקריים שעומדים בפני האנושות בהתמודדות עם האחריות הציבורית בנושא התחממות גלובלית, הוא הגדלת המודעות וההבנה של עומק התופעה והדחיפות הגדולה לטפל בה. חשיפת הילדים לתמונת המציאות ועידודם למעורבות ועשייה אקטיבית הם חלק מהצעדים הבסיסיים והחשובים ביותר הנחוצים כדי להתגבר על מכשול זה. בוודאי ובוודאי כאשר מבינים שהם בני הדור שיצטרכו להתמודד עם ההשלכות בעתיד לבוא. כחלק מהפעילות האזרחית שהולכת ותופסת תאוצה בשנים האחרונות, מתקיימים מדי שנה מצעדי אקלים במדינות רבות בעולם. גם בישראל מתקיים מצעד אקלים שמגיעים אליו אלפי אנשים שחשוב להם להביע את דעתם, להשפיע ולפעול למען העלאת המודעות לנושא שינוי האקלים והדחיפות לטפל בו.

אגף המדעים - מדע וטכנולוגיה שבמשרד החינוך בישראל מעודד שילוב תוכניות לימודים בנושא קיימות בכל מערכת החינוך הפורמלית והבלתי פורמלית (מגני הילדים ועד כיתות יב'). כך אפשר לפתח מודעות בקרב הלומדים במגוון סוגיות מקיימות, כגון: פיתוח בר-קיימא, אורח חיים מקיים, שינויי אקלים ופליטת גזי חממה, בעיית הפסולת ודרכים לפתרון, תרבות של צרכנות מקיימת, אנרגיות חלופיות, משק המים בישראל, מגוון ביולוגי ושטחים פתוחים – כפי שמפורסם באתר המשרד להגנת הסביבה.

דוגמה כזו לשילוב פעילות בנושא שינויי האקלים נתבקשנו לתכנן ולהפעיל במסגרת השתתפות בקהילת מורי המדע והטכנולוגיה. ההנחיה היתה לתכנן מערך לימוד שיכלול שילוב של ארבעה תכנים מתחום האקולוגיה והסביבה בעזרת מתודת הוראה של "לוחות בחירה" (Choice Boards), המאפשרת מענה דיפרנציאלי בהוראה ובלמידה. בחרנו להתמקד בנושא משבר אקלים וקיימות שהוביל אותנו לגבש את מערך הלימוד שיוצג במאמר זה.

1 ד"ר נורית הוכברג, ליאת זלוצ'ובר הרנוי, שושי מנצור, קרן אריכא וד"ר מיכל שכטר הן מובילות קהילות מורים אזוריות וחברות בקהילת מורי קהילות מו"ט בחט"ב הפועלת במחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע.

חינוך לקיימות

ידוע כי אנשים בעלי מחויבות סביבתית וחברתית גבוהה יהפכו על פי רוב לפעילים בסביבה וינהיגו פעילות למען מציאת מענה בנושאים השנויים במחלוקת. השיח בדבר חינוך לקיימות מוביל בהכרח לקבלת החלטות ובעקבותיהן לפעולות. הצלחתו של החינוך לקיימות תימדד לא רק בציון שיקבלו התלמידים או בידע שיצברו, אלא גם באופן שבו יפתחו מודעות ואחריות סביבתית וחברתית ויישמו את הנלמד בפועל בסביבתם הקרובה והרחוקה. הציר המארגן של החינוך לקיימות חייב להיות על בסיס ערכי, כך שהאמונות והתפיסות של הפרט יובילו אותו לראות את המכלול ולא רק מצבור של היבטים חברתיים-סביבתיים-כלכליים (Wals, 2002).

התפיסה המקיימת פועלת על פי גישת למידה לאורך החיים (LLL; Life Long Learning), זאת במטרה להפוך את התפיסה לדרך חיים (וולפסון, 2016).

למידה מתוך בחירה

מהי בחירה?

החלטה מתוך מחשבה מודעת היא נקיטת אחת מתוך כמה אפשרויות, בצורה שאינה ניתנת לגזירה באופן מוחלט מתוך מצב העניינים שהתקיים לפני רגע הבחירה. זו דרך להפוך תהליך המורכב מחלקים לא מודעים ואינטואיטיביים לשכלתני. הבחירה מחדדת ומעמיקה את תחושת החירות והאחריות ואת היכולת של כל מנהל ושל כל קהילת חינוך להיות שותפים לגיבוש העקרונות בתוכנית הלימודים בבית ספרם. בחירה היא כלי ולא ערך כשלעצמו; כלי ליישום אוטונומיה ולהעלאת מוטיבציה בקרב הלומדים והמלמדים. לפיכך יישום מושג הבחירה במודל המוטיבציה של הכִּוּוּנָה עצמית בא לידי ביטוי בכך שעל הבחירה להיעשות מתוך עניין ותוכן, כדי להוביל את התלמיד באופן שיאפשר לו לבחור שלא על פי התוצר (בארי וכהן אורנשטיין, 2014; Smit & Humpert, 2012).

מתודת "לוחות בחירה" מאפשרת ארגון נושא לימודי באופן המבקש מהתלמידים לבחור כיצד הם רוצים ללמוד נושא או רעיון מסוים. ההוראה בדרך זו מזמנת למורה התמודדות עם היכולות השונות של התלמידים בכיתה הטרוגנית בעלת גיוון בתחומי עניין וידע קודם, ובכך לתת מענה דיפרנציאלי לכל תלמיד. המורה מצידו מרכיב ומארגן את לוח הבחירה באופן שישרת את מטרותיו, לרבות הנושא הנלמד, קצב הלימוד, תרגול מיומנויות ויישומן. לוח הבחירה יכול להיות מאורגן כך שהתלמיד יידרש להשלים פעילות כלשהי לפי בחירתו ובסיומה יוכל להתקדם לפעילות הבאה, או לחלופין תוצע לו האפשרות לבחור משימה מסוימת מתוך המבחר הקיים בלוח. רמת הפעילויות יכולה להשתנות או להיות קבועה. לוחות בחירה מאפשרים לעורר עניין בלמידה ולהשיג מעורבות פעילה יותר של התלמיד כשעדיין מובטחת השלמה של מטרות לימוד הכרחיות (Reinken, 2012 ; Bell, 2017; גולן וקוקווקא,.ח.ת). המתודה מתאפיינת ביצירת מגוון משימות לאותו נושא ומאפשרת ללומדים אפשרויות בחירה לפי העדפותיהם. כל משימה עוסקת בהיבט אחר של הנושא הכללי וכוללת התנסות במיומנויות שונות שאותן מתרגלים התלמידים בכל אחד מהנושאים. המשימות מותאמות לצורכי הלומדים ולגיוון בדרכי ההערכה של הלמידה. אפשר לעשות שימוש בלוחות בחירה במהלך שיעור בודד כמטלה מתמשכת. המטלות המגוונות מאפשרות למידה של חומר הלימוד הנדרש מתוך התחשבות בעניין שהלומד מגלה בנושא. כמו כן הן מאפשרות ללומד בחירה במשימה או במשימות מתוך המגוון (King & Chapman, 2012).

הוראה דיפרנציאלית – מענה לשונות בין לומדים

יש עדויות ליעילות של הוראה דיפרנציאלית בהשגת יעדים לימודיים, בדרכים כגון עבודה בקבוצות ובחירת משימות על ידי התלמידים (עובדיה, 2018). עם זאת, חשוב להדגיש שהוראה מסוג זה מצריכה יצירתיות רבה של המורה בתכנון שיעורים מורכבים הנותנים מענה מותאם. ידוע כיום כי ההבדלים בין הלומדים מוסברים טוב יותר באמצעות העדפות הלמידה השונות של לומדים. העדפות אלו משתנות בין תחומי דעת שונים, בהקשרים ובזמנים שונים, ואינן יציבות במערכי למידה שונים.

בתהליך ההוראה הדיפרנציאלית כל תלמיד בונה את הידע החדש שלו בהתבססות על קשר לידע קיים שלו ולא על בסיס ידע ממוצע כיתתי. הבסיס להוראה דיפרנציאלית בנוי על הגישה הקונסטרוקטיבית (הבנייתית) שבה התלמיד מקבל הערכה ומשוב על מה שלמד ועל תוצרי הלמידה שלו, בתהליך רציף ומתמשך. היעדים הלימודיים צריכים להתאים לידע המוקדם

ולמאפייני הלמידה של כל אחד מהתלמידים או של קבוצות. כמו כן, המשימה צריכה להתאים ליעד הלמידה ולתחומי העניין של התלמידים (קשת-מאור, 2017).

איך מטמיעים הוראה דיפרנציאלית בכיתה?

עובדיה (2018) מדגישה כי ההוראה הדיפרנציאלית מצריכה שינויים: במבנה השיעור וחלוקתו, בהכנת תוכני הלימוד לפי רמות, באופן חלוקת הכיתה לקבוצות עבודה וכן בדרכי בחינת התקדמות התלמידים, לרבות בדיקת הידע שלהם ובקרה על הלמידה. לשם כך נדרש צוות ההוראה לבצע תהליך חשיבה ממוקד-פרט שיבחן את:

- התאמת התוכן לתלמיד – מה לומדים ומלמדים?
- התאמת התהליך – איך מלמדים את התלמידים השונים?
- התאמת התוצר – איך התלמיד יציג את ההבנה שלו בעקבות מה שלמד? האם על ידי מבחן, עבודה, פרויקט או תוצר אחר שיבטא את הבנתו והמסוגלות שלו?

המשימה – יצירת מענה לשונות לומדים באמצעות לוח בחירה

לוח הבחירה שקיבלנו בקהילת הלומדים מד"ר יעל שוורץ, ראש המרכז הארצי למורי מו"ט בחט"ב, המחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן למדע, כלל משימות מגוונות בתחום "אקולוגיה וסביבה". משימות אלה כללו בין היתר למידת מושגים מדעיים והגדרות בתחום האקולוגיה, הסביבה האקולוגית, אפיון מערכת אקולוגית המצויה בסכנה, מיומנויות בנייה וקריאה של גרפים בהקשר של שינוי האקלים, התאמת יצורים לסביבתם, מגוון המינים ומינים הנמצאים בסכנת הכחדה, חקלאות מקיימת, מינים פולשים, "אפקט החממה" ושינויי אקלים, התחממות גלובלית והעלאת המודעות לסכנה (איור 1).

גרטה - מה הסיפור שלה?	זהירות פלישה	לאן נעלמה ה...?	חמסה חמסה
מתקפת הגרפים (2)	חקלאות מקיימת	יוצרים יצור	אורזים את התיקים
מתקפת הגרפים (1)	הצילו!	שלא נעבור את השתי מעלות (1)	שלא נעבור את השתי מעלות (2)
אין לי מושג...			

איור 1: דוגמה ללוח בחירה בנושא אקולוגיה וסביבה כפי שהוצג בקהילת הלומדים

גרטה - מה הסיפור שלה?

הנערה השוודית גרטה טונברג נחשבת לאחת ממובילות המאבק ופועלת להעלאת המודעות לסכנת ההתחממות הגלובלית. גרטה ביקשה מתלמידכם לכתוב לה מניפסט המציג בקצרה מי היא, ואת עיקרי המסר שלה, כולל עובדות מדעיות.

כתבו פעילות (כולל מקורות מידע) שתעזור לתלמידכם לכתוב את המניפסט.

החליטו מראש מי יהיה קהל היעד (פוליטיקאים? מדענים? בני נוער? ציבור רחב? אחר?).

מדוע חשוב להחליט מראש מי קהל היעד?

כל קבוצה יכולה לעבוד על מניפסט המיועד לקהל יעד אחר.

למידע על אינפוגרפיקה

איור 2: דף ההנחיות לנושא "גרטה, מה הסיפור שלה?"

אנו בחרנו לעסוק בנושא "גרטה, מה הסיפור שלה? " וקיבלנו דף הנחיה כמוצג באיור 2. כאמור, בחרנו להתמקד בפיתוח יחידת הוראה שתסייע להגדיל את המודעות לתופעת שינוי האקלים. כפי שאפשר לראות, השתמשנו במאבק שמובילה גרטה טונברג [בנושא משבר האקלים]. זאת מתוך הבנה שמדובר בנערה שגילה קרוב לגיל הלומדים שיחידת ההוראה מכוונת אליהם. הפעילות שתוכננה מוצגת במלואה בהמשך ומלווה תחילה בהנחיות למורה.

הנחיות למורה

מטרות הפעילות

- התלמידים יכירו את סיפור חייה של גרטה – איתור ועיבוד מידע, והצגתו במנשר (מידענות).
- התלמידים יחקרו תופעות אקלים – ארגון והסברת מושגים הקשורים למשבר האקלים והשפעתם על הסביבה (איתור מידע ועיבודו, הסקת מסקנות).

מבנה הפעילות ורכיביה

1. לוחות בחירה בנושא אקולוגיה (איור 1).
2. לוחות בחירה [בנושא] שינויי האקלים – מצגת מלווה לפעילות שהועברה בקהילה (נספח 1).
3. פעילות לתלמידים – מותאמת למתן אפשרויות בחירה ללומדים תוך כדי בניית משימה ובה דרכים מרובות לפתרון ובהתאמה לעבודה בקבוצות (נספח 2).

ציוד וחומרים

לכל קבוצת תלמידים

- כרטיסיות עבודה לפי השלבים המפורטים בדף המשימות לתלמיד.
- 3 משולשי נייר בצבעים שונים (משולש שווה שוקיים, כל פאה באורך 15 ס"מ).
- מצגת שיתופית (על המורה להכין את דף השער במצגת שיתופית ולהוסיף שקפים נוספים ריקים שבהם התלמידים יוסיפו את התוצרים שלהם. אפשר להוסיף בשקף השני הנחיה לשימוש במצגת כדי שהתלמידים לא ימחקו תוצרים של תלמידים אחרים. בכל שקף יש להכין מקום לכתיבת שמות חברי הקבוצה. את המצגת השיתופית יש להכין בעזרת הפלטפורמה שאיתה המורה עובד: google slide, PowerPoint שיתופי בענן של אופיס).

זמן הוראה מומלץ

כ-4–5 שיעורים לביצוע המשימות באופן היררכי במסגרת שיעורי מדע טכנולוגיה בכיתת הלימוד, לפי הפירוט הבא:

חלק א: סיפור חייה של גרטה – כחצי שעה פעילות.

חלק ב: המשגה של מושגים חשובים שהוזכרו בסרטון – כשעה עד שעה וחצי פעילות.

חלק ג: מציאת גורמים העשויים לעזור לגרטה – כחצי שעה עד 45 דקות פעילות.

חלק ד: פנייה לגורמים וכתיבת הצעדים המומלצים – כשעה פעילות.

הצעת לשילוב הפעילות בתוכנית הלימודים בחטיבת ביניים

בכיתה ז' - נושא: חומרים (כימיה).

נושא משנה: השפעת השימוש בחומרים על הפרט, על החברה, על הסביבה (הרחבה).

בכיתה ח' - נושא: מערכות אקולוגיות.

נושא משנה: מעורבות האדם במרכיבי הסביבה: השלכות, בעיות ופתרונות.

בכיתה ט' - נושא: מערכות אקולוגיות.

נושא משנה: מעורבות האדם במרכיבי הסביבה – השלכות, בעיות ופתרונות.

המלצות והצעות

1) מומלץ להפעיל את המשימות בקבוצות של 2–3 תלמידים.
2) מומלץ לעודד את התלמידים להציע פתרונות אפשריים בגישת הקיימות להקטנת הנזק הסביבתי. התלמידים יציעו פתרונות לצמצום הנזקים הסביבתיים הנגרמים כתוצאה משימוש בחומרים, יעריכו את הפתרונות המוצעים ויצדיקו את הפתרון המועדף. הפתרונות יכולים להיות בתחומים שונים, ובהם: צבאי, קהילתי, פוליטי, ויכללו העלאת אפשרויות מגוונות לפתרון בעיות והטיעונים המתאימים.
3) בלוחות הבחירה קיימות הצעות נוספות לפיתוח לצורך למידת הנושא. אפשר לפתח גם אותן ולאפשר לתלמידים לבחור בפעילויות אחרות.

נספחים

נספח 1 - מצגת מלווה: לוחות בחירה – שינויי האקלים

לוחות בחירה - משבר האקלים

איך אנחנו עוזרים לגרטה להציל את העולם?

מגישות:

ליאת הר-נוי, שושי מנצור, קרן אריכא, ד"ר מיכל שכטר, ד"ר נורית הוכברג

משבר האקלים

- עד לפני כשני עשורים, השיח על משבר האקלים אפיין בעיקר מדענים ומספר פוליטיקאים.
- כיום, יותר ויותר אנשים, ובהם בני נוער מכל קצות תבל מבינים, שיש צורך קיומי בשיטת יצור האנרגיה – נפט, פחם וגז, האחראיות לפליטת גזי החממה ומעבר לאנרגיה מתחדשת.
- יתרה מזאת – חייב להיות שינוי באורחות חיינו, את אופן צריכת האנרגיה ואת האופן בו אנחנו פועלים כצרכנים, הרי שבמו ידינו נביא אסון על כדור הארץ ונפגע בחייהם של רבים.

סרקו את הברקוד לכניסה ליוזמה אזרחית

אתם מוזמנים למסע בדרך של מדע אזרחי

הכל התחיל מתנועה של אדם אחד. גְרֵטָה טוּנְבֶרִי נואמת בהפגנת אקלים ברומא.

חודש מודעות לבעיית האקלים

הוועידה העסקית במובילה לקידום ושיפור התעשייה והתשתיות בתחום הגנת הסביבה

מצעד האקלים

כנס תשתיות ה-12 לענף האנרגיה בישראל בניית תכנית העתיד לעשור הקרוב

תופעת מחאות התלמידים למען בלימת ההתחממות הגלובלית מתרחבת

חלק קטן מהתופעות רחבות ההיקף של המשבר.

ההתחממות הגלובלית - או בשמה הנוכחי, "משבר האקלים" - היא כבר מזמן עובדה מוסכמת.

עשור שלם של בצורת בישראל ובמקומות רבים נוספים.

גלי חום קטלניים באירופה ובאוסטרליה.

שריפות ענק ברחבי העולם.

שקיעה הדרגתית של מדינות איים.

ליאו מצטרף להציל את העולם

לאונרדו דיקפריו הצטרף למאבק נגד שינויי האקלים, זה לא חדש, אבל המפגש המרגש שלו עם גרטה תונברג אותו שיתף באינסטגרם, הוא כבר עניין נדיר. והוא גם כתב: "היא ואני התחייבנו לתמוך זה בזה, בתקווה להבטיח עתיד בהיר יותר לכוכב הלכת שלנו".
Greta Thunberg

אני אזרח מודאג

ליאונרדו דה-קפריו נואם בשם אזרחי העולם על בעיית האקלים בפני נציגי האומות המאוחדות [האו"ם], 2014.

לוחות בחירה - איך הופכים מפסיבי לאטיבי

ואפשר להעביר את המודעות הלאה...

ספרי ילדים חדשים היוצאים לאור בעקבות פעולתה של גרטה טורברג מטרתם להנגיש את הרקע המדעי של בעיות האקלים והסביבה לדור הצעיר, שעה שהמסר הוא: "אף אחד לא קטן מדי לחולל שינוי, ובכוחות משותפים אפשר באמת להציל את העולם".

מצטרפים לגרטה

מצעד האקלים 27.3.2020

שומרים על האקלים

איך אנחנו עוזרים לגרטה להציל את העולם?

דף לתלמיד

חלק א': משימה אישית – מה הבעיה? (45 דקות)

צפו בסרטון (בלחיצה על הקישור או בסריקת הקוד)
https//:www.youtube.com/watch?v=cREDB7DRBAs

והשלימו את המשימות הבאות:

1. רשמו 5 עובדות על חייה של גרטה – בגישה של מנשר.
2. מִנְשָׁר (בלועזית: **מָניפֶסט**) הוא גילוי דעת או הצהרה פומבית המתארים רעיונות, עקרונות, אמונות, ערכים או מטרות של אדם, תנועה או ארגון. מניפסט בדרך כלל עוסק בתחום הפוליטי והחברתי או בתחום התרבותי.
3. רשמו את המסר העיקרי שגרטה מובילה וציינו את ההקשרים: החברתי, המדעי והכלכלי.

ציינו 5–7 עובדות מדעיות שהוצגו בסרטון.

חלק ב': משימה בקבוצות קטנות 2–3 משתתפים
(עוררו סקרנות לגבי הבעיה **(60 דקות)**

בסרטון מופיעים מושגים רבים. בחרו לפחות 5 מושגים ובנו עבורם תשבץ/תשחץ /תפזורת. תוכלו להוסיף מושגים משלכם/ (פנו למורה לאישורם).

- אפשר להיעזר בטבלה הבאה לארגון ההגדרות.
- אפשר להיעזר בביבליוגרפיה המופיעה בסוף המסמך או בכל מידע מהימן מהמרשתת.
- לבניית תשבץ אפשר לעשות שימוש באתר הבא: מחולל תשבצים.

המושג	הסבר	ההשפעה הסביבתית
התחממות גלובלית		
הכחדת מינים		
זיהום אוויר		
זיהוי חומצי		
פליטת גזי חממה		
מחזור		
הרס יערות		
משבר קיימות		
המסת קרחונים		
שינויי אקלים		

שומרים על האקלים

חלק ג': בואו נחשוב - איך אנחנו יכולים לפתור את הבעיה? (60 דקות)

משימה זו תתבצע בקבוצות הקטנות, ובתומה כל קבוצה תכתוב על הלוח את עיקרי המלצותיה.
לפעילות זו שני חלקים: הראשון – הצעדים שיש לנקוט לצמצום זיהום הסביבה; והשני – חלוקת הצעדים לגורמים השונים שיכולים לסייע ביצירת פתרון.

המשימה

א. לפניכם טבלה הכוללת גופים שונים אשר היכולים לבצע הליכים או פעולות מגוונות כדי לצמצם את הזיהום הסביבתי.

■ בחרו שלושה גופים לפחות וציינו בצד שמאל של הטבלה הצעות לצעדים שגורמים אלה יכולים לנקוט כדי לצמצם את הזיהום הסביבתי

הגורם	הצעדים שאתם מציעים לגורם לנקוט לצמצום הזיהום הסביבתי
צבא	
פוליטיקאים	
כלכלנים	
מגזר עסקי	
מדענים	
מגזר ציבורי [ערים / מועצות]	
האזרח הפשוט	
מורים	
בני נוער	
אחר...	

ב. לרשותכם 3 סוגי משולשי נייר שעברו למינציה.

- בחרו בשלושה צבעים שונים של משולשים. כל משולש ייצג גורם אחד שבחרתם.
- על כל משולש רשמו את הגורם וכן את הצעדים שאתם מציעים לנקוט.
- אפשר לקחת יותר ממשולש נייר אחד.
- הניחו את המשולשים והשלימו תרשים עוגה, כך שכל הפתרונות בעלי אותו צבע ימוקמו יחדיו, לפי הדוגמה הבאה:

- הניחו את המשולשים יחדיו וצלמו את "עוגת הפתרונות" שהצעתם.
- צלמו את עוגת הגורמים והפתרונות שהצעתם והעלו את אותה למצגת השיתופית.
- לאחר שנחשפתם למגוון פתרונות כפי שאלה מוצגים במצגת השיתופית שהכנתם, עיינו שוב במצגת וגבשו פתרון שהייתם תומכים בו. הסבירו מדוע בחרתם במגזר זה ובפתרון שאתם מציגים.

שומרים על האקלים

חלק ד': דיון בפתרון מקומי וגלובלי (60 דקות)

במשימה זו תיחשפו לשני פתרונות אפשריים לצמצום הבעיה האקלימית שמציעים מדענים. עליכם להציג 2 שיקולים בעד ביצוע פתרונות אלו ו-2 שיקולים נגדם.

גלובלי

1. עיינו בשתי הכתבות הבאות בנושאים:
   - "הקרן להחזרת כדור הארץ לאחור".
   - "סטופ כדור הארץ".
2. כתבו שלושה פתרונות גלובליים אפשריים המוצעים בכתבות.
3. בחרו פתרון אחד, ועבורו ציינו:
   א. שני יתרונות.
   ב. שני אתגרים.
4. בחרתם להיות הגורם המדעי בוועדה שתידרש לקבל החלטה על מימוש הפתרון שבחרתם.
   א. כיצד תציגו את הפתרון לחברי הוועדה? עליכם להציג מגוון טיעונים המייצגים עמדה רחבה.
   ב. אילו מקורות מידע או נתונים הייתם מבקשים לבחון? (על אילו נתונים אתם מתבססים, מהו המקור המפרסם ומה מידת המהימנות שלו, מה מידת הרלבנטיות [של המקורות ו/או הנתונים]).
   ג. מה הייתה עמדתכם ביחס לפתרון שהוצג בוועדה?
   ד. אילו משרדים, גורמים מדיניים, פרטיים וציבוריים אתם מציעים לגייס לטובת הפעלת פתרון זה?

מקומי

אתרו מקור מידע ברשת האינטרנט המלמד על עשייה פרטית, עסקית, קהילתית, חברתית, ציבורית, מדינית, העשויה לתת מענה לצמצום תהליכי ההתחממות הגלובלית.

חברו מנשר של 10–15 שורות ובו הסבירו כיצד אפשר לקיים פעולות יומיומיות פשוטות למען השגת היעד המשותף. (ראו דוגמה למניפסט בנושא צמצום הצריכה.)

שומרים על האקלים

הפניות למקורות מידע נוספים ופעילויות

התחממות גלובלית

- התחממות כדור הארץ – המשרד להגנת הסביבה
- כדור הארץ הקודח – מכון דוידסון
- דו"ח האו"ם: משבר האקלים מתחיל בצלחת שלנו

הכחדת המינים

- 191 לווייתנים על הכוונת, ענת עינב – זווית סוכנות ידיעות למדע ולסביבה
- הכחדת מינים, חגית מאור – הספרייה הווירטואלית של מט"ח
- מה קורה למינים החיים על פני כדור הארץ? – סבבה, שומרים על הסביבה

זיהום אוויר

- יותר אוזון, פחות ירקות – ד"ר דניאל מדר
- זיהום אוויר בעולם: מדד איכות האוויר בזמן אמת
- זיהום אוויר מתחבורה בישראל, הספרייה הווירטואלית של מט"ח

רשימת ספרות

בארי, ד., כהן אורנשטיין, ט. (2014). אוטונומיה ובחירה - כלי מכוון בחירה. מדינת ישראל, משרד החינוך, המנהל הפדגוגי אגף א' חינוך על יסודי.

גולן, ש., קוקווקא, ד. לוחות בחירה ומתודת האיקס-מיקס-דריקס (פורטל עובדי הוראה):

וולפסון, ע. (2016). צריך לקיים. הוצאת פרדס.

עובדיה, מ. (2018). "איך מקיימים הוראה דיפרנציאלית בכיתה הטרוגנית?" הגיע זמן חינוך.

קשת-מאור, ג. (2017). הוראה דיפרנציאלית במאה ה- 21. בתוך: נ' מנדל-לוי (עורכת). שווים: תמיכה בית ספרית בשוויון הזדמנויות (עמ' 7–12). מכון אבני ראשה.

המשרד להגנת הסביבה, הרשת הירוקה, משרד החינוך מזכירות פדגוגית אגף א' מדעים, החברה להגנת הטבע. ערכת פעילות חווייתית ליום כדור הארץ.

מגמה ירוקה, הש"ל, הרשת הירוקה. (2019). תוכנית בנושא התחממות גלובלית ושינויי אקלים, לבתי ספר יסודיים.

Bell, K. (2017). Interactive Learning Menus (Choice Boards) with G Suite – FREE Templates.

Differentiated Assessment Strategies: One Tool Doesn't Fit All. Chapman, C. (2012). King, R. &

Reinken, C. (2012) How to Use Choice Boards to Differentiate Learning.

Smit, R. & Humpert, W. (2012). Differentiated instruction in small schools. Teaching and Teacher Education 28(8): 1152-1162.

Wals, A.E. & Jickling, B. (2002). "Sustainability" in higher education: from doublethink and newspeak to critical thinking and meaningful learning. International Journal of Sustainability in Higher Education (3)3: 221-232.

מחוללי עתיד:
כיצד מערבים תלמידים בלימודי קיימות ושינויי האקלים

גולן צוקרון[1]

כיצד ניתן לייצר למידה אפקטיבית וחיובית סביב סוגיית שינוי אקלים? סיפור מסעו פורץ הדרך של בית ספר בישראל, שצורף לרשת בתי הספר העולמיים, המלמדים לאור יעדי הקיימות של האומות המאוחדות.

"הבורות האקלימית היא האויב הגדול ביותר של האנושות בדרך להבלת החיים על כדור הארץ כפי שאנו מכירים אותם. יש צורך באמאנל ערוך של מערכת החינוך, שתאפשר את צמצום פערי הידע הגדולים בציבור הישראלי."

במילים אלו פנו ב-28.12.2019 נציגי הארגונים הסביבתיים בישראל לשר החינוך ולנשיא המדינה בבקשה לחייב את בתי הספר בארץ ללמוד על השינויים הסביבתיים. היו אלה מנכל"י ארגוני הסביבה, ובראשם מאיה יעקבס מעמותת צלול, איריס האן מהחברה להגנת הטבע, עמית ברכה מאדם טבע ודין וגדעון ברומברג מאקופיס אשר ניסחו את המכתב, במילים שהמשמעות שלהן היא צופן לשאלה מהותית ורחבה, שראוי שכל מוסד חינוכי יתחבט בה בימים אלה: עד כמה בית הספר שלי מכין את התלמידים לאתגרי העתיד? או בצורה הכֵּנָה והבוטה ביותר – מהי מידת הרלבנטיות של בית הספר בעידן הנוכחי?

שינוי האקלים אמור להעסיק מאוד את בני הנוער שיושבים היום על ספסל הלימודים. רק לאחרונה פורסם מחקר מקיף הקובע כי בעוד 50 שנה לכל היותר הטמפרטורה הממוצעת בחלק גדול מן האזורים המיושבים בכדור הארץ תעמוד על למעלה מ-30 מעלות, ולמעשה תקשה מאוד על קיומם של למעלה מ-2 מיליארד בני אדם. על פי המחקר, מדינת ישראל בהחלט עשויה להיות במוקד האירועים, מכיוון שמדינות אפריקה ומדינות המזרח התיכון הן אלו שיסבלו מההתחממות הגלובלית (Xu, Timothy, Timothy, Svenning & Scheffe, 2019).

מחקר מקיף של ארגון ההומניטריות הגלובלי מסביר את הקשר הישיר בין ההתנהגות האנושית לבין שינוי האקלים ומזהיר מפני השלכות הרות גורל מפאת האדישות המאפיינת את ההתייחסות למשבר האקלים(Annan, 2009).

מדוע אפוא כמעט ולא מלמדים את הנושא או מעמיקים בו כראוי?

מהם האתגרים העומדים בפני ההוראה בנושא שינוי האקלים?

כמורה לגיאוגרפיה לימדתי על המשבר הסביבתי תלמידים רבים בשכבות גיל שונות. כאשר ביקשתי מהתלמידים משוב על הלמידה ועל הנושאים שלמדנו, תגובותיהם נעו בין אפתיה של חלקם לנושאים הנלמדים לבין תחושת חוסר אונים מהמצב הנוכחי שחלקם חוו במהלך הלמידה. מחקרים רבים בתחום הפסיכולוגיה הסביבתית מתייחסים בדיוק לאותן התחושות ומספקים אולי סיבות אפשריות להתעלמות מהמשבר הסביבתי החשוב והמורכב הזה. דוגמה לכך היא מחקר שנערך בארצות הברית ובריטניה, אשר מציג את הקושי הפסיכולוגי של האדם לתפוס את איום ההתחממות הגלובלית כחמור. זאת בשל

1 גולן צוקרון, מחנך ורכז תוכנית "מחוללי עתיד" בבית הספר ברנקו וייס "הרצוג", בית חשמונאי, בית הספר הראשון בישראל שהאו"ם צירף לרשת בתי הספר הגלובליים שמלמדים לאור יעדי הקיימות.

מקבץ מאפיינים המתקיימים בו יותר מבכל סוג אחר של איום, כגון: היותו תהליך חסר תקדים, לא מוחשי, מלווה באי-ודאות, נוגע למספר גדול של אנשים במקומות רבים ומרוחקים ומתפתח בהדרגתיות (Moser & Dilling, 2004). ישנם מחקרים המצביעים על ההשפעות השליליות של הלמידה הסביבתית על נפש האדם. ארגון הפסיכולוגים האמריקני (APA) פרסם בשנת 2017 דו"ח המעריך שלמודעות סביבתית שאינה מתווכת כראוי יכולה להיות השפעה מרחיקת לכת לרעה על נפש האדם, שיכולה לבוא לידי ביטוי בהתקפי חרדה, בהתקפי זעם ובתחושת חוסר אונים קשה העלולה להוביל אף לנטיות אובדניות. מחקר נוסף מייחס לבני האדם נטייה מוכחת להתייחס לאיומים בני זמננו ולהזניח איומים עתידיים. הראשון שהתייחס לכך היה אדוארד וילסון (Wilson, 1980), אבי הסוציו-ביולוגיה, שטען כי אנו מתוכנתים לדאוג לצרכינו ולכשירותנו המרבית רק בטווח הנוגע להתרחשויות המתחוללות במהלך חיי הפרט ולא בטווחים אחרים. במילים אחרות – דור המורים ייפגע פחות משינוי האקלים, אך עליו ללמוד ולהעמיק בנושא זה כדי שיוכל להתוות את הדרך לתלמידיו. מחקר נוסף מציע נקודת מבט נוספת על הסוגיה ומדבר על "ספירלת השתיקה של האקלים", הנובעת מחוסר האמונה של האדם ביכולתו להשפיע בנושא גדול ומורכב. ספירלת השתיקה היא תיאוריה שנועדה להסביר כיצד פרטים בחברה נמנעים מלהביע עמדה כאשר הם תופסים עצמם בעמדת מיעוט ובסביבה אחידה הנוגדת את הלך רוחם (Heald, 2017). אלברט בנדורה, מהפסיכולוגים המשפיעים בדורנו, מסביר את היעדרו של משבר האקלים מהשיח הציבורי בארצות הברית על ידי תיאוריית היעילות העצמית, שעל פיה בני אדם לא ישאפו למצוא פתרונות לבעיה אלא אם כן קיימת בהם האמונה שביכולתם להשפיע. אחת המסקנות ממחקרו של בנדורה, שהתמקד בשינוי האקלים, הייתה כי אדם השואף להניע פעולות לצמצום המשבר חייב לתקשר את הידע שבאמתחתו בדרכים הבונות את תחושת היעילות של הנמען. משימה זו היא מורכבת ועשויה לייצר מצב של חוסר אמון בין המוען לנמען במקרה של כישלון הפעולה (Heald, 2017). לפיכך נוצרת מעין ספירלת שתיקה סביב נושא שינויי האקלים.

איך בכל זאת אפשר לייצר למידה אפקטיבית וחיובית סביב סוגיה כל כך מורכבת כמו המשבר הסביבתי? במאמר זה אנסה להשיב לשאלה זו באמצעות המסע של תיכון ברנקו וייס ע"ש "הרצוג", בית חשמונאי, מסע של פורצי דרך בחינוך, שזכיתי להיות שותף לו.

מ"תכנית סינגולרית" לחטיבת מחוללי עתיד

"הרצוג" הוא תיכון אזורי ששייך למועצה האזורית גזר ומונה כ-1200 תלמידים בכיתות ז׳-י"ב. בשנת 2018 יצא תיכון "הרצוג" למסע של בחינת זהותו כבית חינוך במאה ה-21. המסע החל די במקרה, עם שילובה של התוכנית הסינגולרית[2], שכללה תכנים רבים מעולם הקיימות, כחלק מתוכנית הלימוד בחטיבת הביניים. התוכנית המהפכנית הוצגה לראשונה בפני מנהלת חטיבת הביניים, הגב׳ הילה אלון, על ידי חברת הקהילה, הגב׳ מלי מרטון. שיתוף הפעולה והדיאלוג המפרה בין הקהילה לבית הספר יצרו חוויית למידה ששינתה את נקודת המבט של הצוות על תפקידו של בית הספר.

התוכנית נמשכה כחודשיים, והשתתפו בה כ-220 תלמידי כיתות ח׳ שחוו בין היתר שלושה שבועות של למידה אחרת. הילקוטים נשארו בבתים, ובמקומם הצטיידו התלמידים ביצר סקרנות וברוח של חדשנות. הלמידה כללה:

- "**חוכמת ההמונים**" – שבוע של הצפת-ידע באמצעות הרצאות מפי מומחים, יזמים, פורצי-גבולות ומגשימי חלומות אמיצים וחדשניים בתחומים שונים ומגוונים, ובעיקר מעולם הקיימות.
- "**מגלים עולם**" – שבוע של סיורים ברדיוס של עד 40 קילומטר מבית הספר, במגוון רחב של בתי-עסק, משקים חקלאיים עצמאיים, מפעלי תעשייה, בנקים, חברות ומוזיאונים; הרעיון המוביל היה חשיפת התלמידים אל "מאחורי הקלעים" של סביבת חייהם.

2 בגיליון מס׳ 32 של "קריאת ביניים" מסביר ד"ר עודד קינן את המונח סינגולריות באופן הבא: "סינגולריות (singularity) הוא מונח השאול מעולם הפיזיקה ומתאר נקודת אל חזור. סינגולריות כבידתית, לדוגמה, עומדת בבסיסה של תאוריית המפץ הגדול ומתארת את הנקודה שבתחילתו של הזמן, הנקודה שבה צפיפות החומר ועיקום המרחב-זמן הם אינסופיים. בהשאלה לעולמנו היום, נקודה סינגולרית – משמעה קץ המציאות כפי שאנו מכירים אותה."

כיום אפשר לומר שהתוכנית הסינגולרית פרי הגותו של היזם והמדען מר ארז ליבנה הייתה הנקודה הסינגולרית של תיכון "הרצוג".

- "**שבוע יזמות**" – למידה מעשית במיפוי בעיות ואתגרים, איתור ראשוני של פתרונות אפשריים, גיבוש צוותים סביב תחומי עניין משותפים ותחילת פיתוח. בהמשך חווה כל תלמיד שעתיים סינגולריות במערכת השעות אשר הוקדשו לקידום ופיתוח המיזמים שהתלמידים הגו.

איור 1: 17 יעדי פיתוח בר-קיימא של האו"ם (Sustainable Development Goals – SDG's) נקבעו בשנת 2015 בתהליך התייעצות בין ממשלות, גופים בינלאומיים, הבנק העולמי, ה-OECD, האקדמיה, המגזר העסקי וארגוני חברה אזרחית. בית הספר הציב יעדים אלה בחזית הלמידה, כבסיס הידע וכמערכת של ערכים.

התהליך כולו נעשה בשיתוף אנשי הקהילה המקומית ועל בסיס התנדבותי, ללא עלות. המועצה האזורית התגייסה לביצוע הרעיון ותמכה במימון הסיורים. בתום השנה נערך היריד היזמי הסינגולרי הראשון של חטיבת הביניים. ערך השיתופיות הפך מרעיון למעשה והיה המצע העיקרי להצלחת התוכנית. בית הספר ביסס את הרלבנטיות שלו ורתם קהילה שלמה להתרגשות מסוג חדש.

בניצוחו של מנהל התיכון בשנתיים האחרונות, מר איציק שחר, ולאור הצלחת התוכנית הסינגולרית, העמקנו בבחינת זהותנו כבית חינוך במאה ה-21. הצורך, כפי שהגדירו מר שחר, היה צו השעה. השאיפה הייתה להטמיע גישה פדגוגית מוטת עתיד. לצד הרצון לצייד את התלמידים בארגז כלים של מיומנויות הרלבנטיות לעולם העבודה של המאה ה-21, בחנו גם את רלבנטיות עולם התוכן של הלומדים. המסקנה שהגענו אליה הייתה שתוכן הלמידה צריך אף הוא להיות מוטה עתיד ולעסוק באתגרים הקיומיים של האנושות כולה. לפיכך בחרנו כבסיס הידע ב-17 יעדי הקיימות של האו"ם, יעדים שהגדירו מנהיגי העולם בוועידת האקלים בפריז בשנת 2015 (איור 1).

כדי להתוות כיוון ודרך למסע נעזרנו, בצוות החשיבה, במצפן החינוכי של ארגון ה-OECD לבוגר מערכת החינוך של שנת 2030. (איור 2)

המצפן מגדיר את הכשירות הנדרשת לתלמידים לצורך הגשמת יעד השלומות (well-being) האישי והקולקטיבי בכל ממדי החיים. מצפן הלמידה נבנה במטרה לקדם את יעדי הקיימות בקרב אוכלוסיית הלומדים ולהעלות על נס את חשיבותם. הכשירויות שמצפן הלמידה מגדיר מבוססות על שלושה אבני בניין מרכזיים: מיומנויות, גישות וערכים.

כשירויות אלו עלו בקנה אחד עם אותם ערכים ומיומנויות שזיקקנו מתוך התוכנית הסינגולרית המקורית, ובראשם ערכי הקיימות והשאיפה ל"תיקון עולם".

המסע לגיבוש הזהות החינוכית הפגיש אותנו עם אנשי חינוך רבים וטובים. ניב הורוביץ, יזם חינוכי ואיש סביבה, הוא אחד מהם. ניב העמיק את הקשר של בית הספר לעולם הקיימות ועסק בפיתוח תוכניות הלימוד וליווי צוותי ההוראה. המפגש עם ניב חידד את הצורך לייצר שינוי תודעתי נרחב בבית הספר, ובראייה רחבה יותר, להשפיע על הקהילה. במשפט קצר הצליח ניב לזקק עבורי את מהות תפקידי כהורה וכאיש חינוך, ואת

איור 2: פרויקט "חינוך 2030" של ה-OECD נולד כדי להטמיע שינוי ולבסס את הלמידה סביב יעדי הקיימות. זהו המצפן החינוכי שמוביל את בית הספר הרצוג בתהליך השינוי. תורגם מתוך OECD, 2018. (ל- OECD אין קשר לתרגום זה והוא איננו אחראי לתרגום זה בשום צורה שהיא).

תקשורת מקררת

אוסטרליה בוערת. בצורת ממושכת ייבשה את האדמה ואת שדות הקוצים והובילה למוות של עצים. הטמפרטורות הגבוהות, הרוחות והלחות הנמוכה במזרח אוסטרליה הם תופעות הקשורות ככל הנראה להתחממות הגלובלית. או שלא?

ביום שישי האחרון סיקרו מהדורות החדשות בארץ ובעולם את השריפות באוסטרליה. רק 2% מהסיקורים כללו את המושג "התחממות גלובלית". מדינת קליפורניה בארה"ב סבלה באוקטובר האחרון מגל שריפות שגם הוא תוצאה של שינויי האקלים. ארגון אמריקאי בחן את האזכורים בנושא ההתחממות בתקשורת וגילה שרק 3% מהסיקורים הזכירו את הנושא.

גל החום שפקד את העולם בשנת 2018 זכה ליחס דומה: רק אחת מ 127 כתבות שעסקה בנושא, הזכירה את ההתחממות הגלובלית.

הפרופ׳ איילת ברעם-צברי, מהפקולטה לחינוך ומדע בטכניון מסבירה מדוע התקשורת מתעלמת מההתחממות הגלובלית: "תפיסה פוליטית וכלכלית של בעלי המניות בתקשורת תגרום להתעלמות במודע. בנוסף, חלק מהקהילה המדעית אינה יודעת לתקשר את הנושא לציבור."

קשה לקשור בין אירוע בודד לבין תופעה עולמית, אולם אירוע ועוד אירוע מייצג תופעה כלל עולמית. נוסף על כך, השריפות עצמן תורמות להתחממות הגלובלית בפליטת פחמן והרס יערות. האם גם בפעם הבאה שנשמע על כך בתקשורת נצטרך לייצר את הקשר בעצמנו?

הדרך הטובה ביותר לחזות את העתיד היא לחולל אותו.

איור 3: הודעת "בוקר סביבתי". רוב תלמידי בית הספר מגיעים ללימודים בהסעות ומבלים זמן רב בנסיעה אל מול מסך הטלפון. מכאן נולד מיזם הודעות הוואטסאפ, שמטרתו לחשוף אותם לידע ולפתח בהם חשיבה ביקורתית.

החשיבות הטמונה בהעמקה בנושא הסביבתי ושינויי האקלים בתהליך הלמידה. משפט זה נצרב בזיכרוני והפך את המסע לשליחות של ממש: "יותר משאני חושש ממשבר האקלים אני חושש מהיום שבו בתי תשאל אותי למה לא פעלתי כשעוד יכולתי לשנות משהו."

שעות וימים ארוכים של עבודה בצוותי חשיבה הולידו בסופו של דבר מהלך גדול, מורכב ומאתגר, שבא לידי ביטוי במספר צירים מרכזיים. לצד הנראות הבית-ספרית שהולידה סביבות עבודה בעלות אוריינטציה סביבתית-חברתית מובהקת, נוצרה בבית הספר גם שפה שמגדירה מחדש את מידת המסוגלות וההשפעה של כל אחד מהבאים בשערי המוסד. חטיבת הביניים שינתה את שמה ל"חטיבת מחוללי העתיד". פרוזדור החטיבה הפך למרחב למידה שיתופי ובו פינות ישיבה מוגבהות ומותאמות לעבודה קבוצתית. בקירות הפרוזדור נתלו מסכים אשר מתעדכנים תדיר בחדשות סביבתיות ואקלימיות, בשיתוף עם הטכניון, כמו מסך המראה את קצב גידול האוכלוסייה בעולם, מסך המראה את כמות הפסולת המוזרמת לאוקיינוס ומסך המציג הרצאות טד בנושאי אקלים וקיימות. חלק מהמסכים משמשים את התלמידים עצמם להפצת תוכן שהם יצרו ברוח יעדי הקיימות. בנוסף, חלק ממורי בית הספר עברו השתלמות בנושא קיימות מטעם הרשת הירוקה, שהובילה לאחר מכן לשיתופי פעולה רבים ומגוונים עם נציגי הרשת, ובייחוד עם הגב׳ הילי אגין, שהתמסרה לחלוטין לתהליך השינוי. בית הספר עבר הסמכה לבית ספר ירוק, ותלמידי ההנהגה הירוקה קידמו פרויקטים סביבתיים בתוך בית הספר. התלמידים קיבלו מדי בוקר פוסט בוואטסאפ, "בוקר סביבתי", ובו חשיפה של ידע והצגת דילמות מוסריות ואקטואליות מעולם הקיימות (איור 3).

שמחנו לראות כיצד מורים בבית הספר הושפעו אף הם מהשינוי, והחלו להשתמש בידע מעולם הקיימות כדי לפתח את המיומנויות הנדרשות בשיעוריהם. מורות ללשון בחרו בטקסטים מעולם הקיימות ללימוד מיומנויות שפה, לכתיבת טיעונים ולניתוח טקסטים. מורות לאנגלית הטמיעו את כישורי השפה של תלמידיהן בעזרת מצגות שהתלמידים התבקשו להכין על נושאים כמו שינויי האקלים, יום כדור הארץ ועוד.

שיעורים "מחוללי עתיד"

עיקר השינוי התמקד ביצירת שעתיים שבועיות ייחודיות לנושא הקיימות ורכישת מיומנויות של המאה ה-21. שיעורים אלה נקראים במערכת השעות "מחוללי עתיד"; ולצורך קיומם נבנתה תוכנית לכל אחת משלוש שכבות חטיבת הביניים. כל שכבה התמקדה בפעילויות ותכנים שונים ומגוונים:

כיתות ז׳ הכירו את יעדי הקיימות דרך עולם האומנות, במטרה להעמיק את החקר ממקום א-פורמלי ורצוני, וכן להפיג חששות מפני העתיד לבוא, להבנות את הידע בצורה הוליסטית ולשמור על ה-well being שלהם. זהו תהליך של למידה מבוססת פרויקטים (Project Based Learning; PBL), שעל יתרונותיה אין צורך להרחיב.[3] בסופו של התהליך נדרשו התלמידים ליצור יצירה אומנותית מבוססת חקר על היעד שחקרו ובהתאם לכלי האומנותי שבחרו (קולנוע / עיצוב / אומנות או מוזיקה) ולהציגה בתערוכה.

כיתות ח׳ עסקו ביעדי הקיימות דרך "למידה מבוססת אתגר" (Challenge Based Learning; CBL). בדומה ל-PBL, גם כאן נדרש הלומד ליצור פרויקט, אלא שבמקרה זה התוצר הוא מודל שמהווה מענה לצורך הקיים בתוך הקהילה שהתלמיד איתר, תוך ביצוע מחקר אמפתי במטרה להעמיק את הידע, לטפח מיומנויות ולטעת תחושת מסוגלות והבנה שהמציאות איננה גזירת גורל (Johnson, Smith, Smythe, Varon, 2009).

כיתות ט׳ – בשנת הלימודים תשפ"א יחוו תלמידי כיתות ט׳ תהליך יזמי מלא, ויחתרו לפיתוח פתרון ישים לאתגר קהילתי שזיהו המתכתב עם אחד או יותר מיעדי הקיימות.

תמורות ואתגרים במהלך הפעלת התוכנית

המסע החינוכי זימן עבורנו לא אחת גם אתגרים מהותיים. התוכנית נבנתה כתוכנית צומחת. בחזוננו ראינו כיצד הזרעים שנזרעו בכיתה ז׳ ינביטו בסוף כיתה ט׳ בוגר חטיבה בעל יכולת התבוננות אמפתית, ראייה גלובלית, תחושת מסוגלות גבוהה ורצון להשפיע ולעצב את העתיד. ההטמעה המיידית של התוכנית בכל שכבות החטיבה עוררה התנגדויות בקרב חלק מהתלמידים, בעיקר בשכבה ט׳. לדידם, בית הספר מחויב למשימה אחת – תעודת הבגרות. שמחנו לגלות שהדבקות בתהליך הצליחה לייצר שינוי פרדיגמה בקרב חלק לא מבוטל מהלומדים.

אתגר נוסף נבע ממרחב הלמידה הא-פורמלי שהשתדלנו לספק במסגרת השיעורים הייחודיים, "מחוללי עתיד".

תמונה 1: תלמידי מחטיבת הביניים ברנקו ויס "הרצוג" שהשתתפו בהאקתון.

לצד הרצון שלנו לשמור על המסגרת ולקדם שיח מפרה ובגובה העיניים, הקדשנו זמן ניכר לתהליך של בניית אמון ותיאום ציפיות עם התלמידים. כמו כל תהליך של לידה בריאה, הקשיים התגמדו אל מול התרוממות הרוח שחשנו נוכח התמורות שיצרה התוכנית. ראינו כיצד תלמידים חוקרים מרצונם את הקשר שבין מדבור לשינויי אקלים, מנסים להבין את מידת ההשפעה של התופעה על חייהם הפרטיים בעזרת ראיונות עם מומחים וקריאת חומר אקדמי. שמחנו לראות קבוצת נערות שיוצאות נרגשות משיעור לאחר שקבעו ריאיון עם חברת הכנסת תמר זנדברג, כדי ללמוד על אי השוויון המגדרי בישראל. הביטוי העמוק ביותר עד כה להצלחת התהליך היה אירוע סביב יעדי הקיימות שיזם צוות בית הספר. כ-150 תלמידים מחטיבת הביניים התנדבו להשתתף בהאקתון (תמונה 1) לילה לבן, ולנסות לייצג את בית הספר בתחרות של ארגון ה-ISDG (Israel sustainability development goals). במהלך הלילה נתבקשו התלמידים לפתח מיזם שיוכל לסייע למדינות מתפתחות לקדם בתחומן אחד או יותר מיעדי הקיימות. כתנאי מקדים להשתתפות

3 למידה מבוססת פרויקטים היא שיטת הוראה המבוססת על למידה אקטיבית, ובמסגרתה התלמידים מעצבים, מתכננים ומבצעים פרויקט מורחב המוביל ליצירת תוצר המוצג בפני קהל. קיימות גישות שונות לשילוב למידה מבוססת פרויקטים. אנו נוקטים בגישה שבה המורה משמש מנחה ומפקח על הנעשה בכיתה, תוך יצירת אווירה של אחריות משותפת. המורה מעלה שאלות ונושאים אשר יכוונו את התלמידים לחומרים מבוססי תוכן. על ידי הצבת מטרות זמניות, מתן משוב וביצוע הערכה שוטפת, המנחה מבטיח שהתלמידים נשארים ממוקדים ומבינים לעומק את המושגים הנחקרים. בסיום הפרויקט מעריך המנחה את התוצר הסופי ואת הלמידה שהוא משקף.

בהאקתון, התלמידים שרצו להשתתף נתבקשו לכתוב עבודת חקר על המדינה שבה בחרו להתמקד ומצבה ביחס ליעד שהם שואפים לקדם. במשך הלילה עבדו התלמידים מרצון, ללא הפסקה, בכיתות הלימוד, בהנחיית מנטורים מהקהילה. לקראת הבוקר הציגו כל התלמידים מיזמים ברוח יעדי הקיימות. המיזם שזכה בתחרות הבית-ספרית אף עלה לשלב הגמר של התחרות הארצית, שנכון לכתיבת שורות אלו, טרם נערכה.

הזדמנות נוספת שנוצרה בעקבות השינוי היא שיתופי הפעולה הבינלאומיים שהתוכנית יצרה עבורנו. החיבור ליעדי הקיימות פתח בפנינו ערוץ חדש ובלתי-צפוי של שיתופי פעולה וידע בינלאומיים. עוד בתחילת התהליך, שזכה לתהודה רבה בעשייה החינוכית המקומית, שמחנו להתבשר שהפכנו לבית הספר הראשון בישראל שהאו"ם צירף לרשת בתי הספר הגלובליים המלמדים לאור יעדי הקיימות (איור 4). החיבור לרשת כבר הוליד שיתופי פעולה ושיעורים משותפים עם בני נוער ברחבי העולם, גם בתקופת הקורונה.

לסיכום, תיכון "הרצוג" נמצא בעיצומו של מסע משמעותי. אנו עוסקים כל הזמן בבחינה מחודשת וחשיבה איך להעמיק ולחולל שינוי בכלל מקצועות הלימוד, הן בגישה הפדגוגית והן בתפיסת הקיימות כנושא אקוטי לחיים טובים על פני האדמה. אנו מבינים את חשיבות הלמידה על שינויי האקלים והצבת הנושא בראש סדר העדיפויות. ברצוני להודות לאלו שהעניקו לי את הזכות לקחת חלק במסע והיו שותפים מרכזיים לכל אורך התהליך: מחלקת החינוך של המועצה האזורית גזר, מכון ברנקו וייס, אגף מו"פ במשרד החינוך, הנהגת ההורים הבית-ספרית, שהעניקה רוח גבית לתהליך השינוי לכל אורכו; ניב הורוביץ, ארז ליבנה ועוד רבים וטובים מצוות בית הספר שמובילים את התהליך ושותפים לו במידה רבה.

מסע של שינוי אינו יכול להתחולל ללא מנהיגות איתנה, חזון עמוק ורתימת שותפים רבים ככל שניתן. צוות ההנהלה של בית הספר בחר להתבונן על המציאות בראייה רחבה ככל האפשר והחליט להציב את שינויי האקלים ואת יעדי הקיימות בחזית הלמידה, בניגוד למקומם בשיח הישראלי. הצוות גייס את הנהגת ההורים ואת התלמידים ופועל ללא לאות לקידום יעדי הקיימות, מתוך אמונה שבזכות הדברים שאנו עושים היום בוגרינו יהיו מוכנים יותר לעתיד. אני שמח לקחת חלק במסע של חטיבת "מחוללי העתיד" וגאה להיות שותף בצוות שמאמין ביכולתם של תלמידיו להשפיע על עתידם.

איור 4: תעודה לבית הספר ברנקו וייס ע"ש הרצוג, בית חשמונאי, כחבר בבתי הספר הגלובליים המלמדים לאור יעדי הקיימות של האומות המאוחדות

אנו חיים בעידן של הצפת ידע שמייצר לא פעם אדישות למצב הקיים. תפקידנו למגר את האדישות ולפתח מעורבות של הלומד, בעיקר בנושאים מורכבים ורלבנטיים לחיים. הבחירות ללמד ולעסוק בנושא מורכב כמו שינויי האקלים בפרט, וביעדי הקיימות בכלל, עולות בקנה אחד עם האני מאמין של בית הספר, שלפיו "הדרך הטובה ביותר לחזות את העתיד היא לחולל אותו." (פיטר דרוקר)

רשימת ספרות:

Annan, K. (2009) . Human impact report on Climate Change. Global humanitarian forum, Geneva.

APA (American Psychological Association). (2009). Psychology & Global Climate Change addressing a multifaceted phenomenon and set of challenges. Report by the American Psychological Association´s task force on the interface between psychology and global climate change, available at: Heald, S. (2017). Climate Silence, Moral Disengagement, and Self-Efficacy: How Albert Bandura´s Theories Inform Our Climate-Change Predicament, Environment: Science and Policy for Sustainable Development 4-15, available at: doi.org/10.1080/00139157.2017.1374792

Johnson, L.F., Smith, R.S., Smythe, J.T. & Varon, R.K. (2009). Challenge-Based Learning: An Approach for Our Time. Austin, Texas: The New Media Consortium

Moser, S.C. & Dilling, L. (2004). Making climate hot. Environment: Science and Policy for Sustainable Development 46(10): 32-46.

OECD. (2018). The future of education and skills, education 2020.

Wilson, E.O. (1980). Comparative social theory. In S.M McMurrin (E.D) The tanner lecture of human values, pp. 49-119. Salt lake city. Ut: univ. Utah press.

Xu, C., Timothy, A.K., Timothy, M.L., Svenning, J.C. & Scheffe, M. (2019). Future of the human climate niche. PNAS, 1-6. DOI:/10.1073/pnas.1910114117

מפסיקים לפחד ומתחילים ללמד

גילה לוי הוברמן ויעל ברקי גטניו[1]

משבר האקלים לא נלמד כיום כנושא חובה במערכת החינוך. מאמר זה מדגיש את חשיבותה של הוראת משבר האקלים בחטיבות הביניים ומציע כיצד לשלב זאת בתכנית הלימודים הקיימת בתחומי מדע וטכנולוגיה. המאמר מביא דוגמאות להוראת משבר האקלים המיושמות בחטיבות ביניים בארץ.

משבר הקורונה הוא דרמטי וחסר תקדים. תושבים בכל העולם הסתגרו בבתיהם, הכלכלה נעצרה, מערכת החינוך נאלצה לעבור בבת אחת ללמידה מרחוק... אבל האמת היא שהקורונה היא רק "קדימון" למשבר עולמי גדול בהרבה: משבר האקלים.

משבר האקלים (או משבר שינוי האקלים) הוא עובדה קיימת ויש לגביו הסכמה כמעט מוחלטת בקרב הקהילה המדעית העולמית. ההערכה היא שתוך שנים ספורות צפויים שינויי האקלים להציב בפני החברה ככלל, ובפני כל אדם כפרט, אתגרים חסרי תקדים: מחסור במזון ובמים לשתייה, התמודדות עם עקות חום ועם אירועי מזג אוויר קיצוניים, המסת קרחונים ועליית מפלס פני הים, שיגררו שינויים גיאוגרפיים ודמוגרפיים, גלי פליטים ואי שקט פוליטי, היעלמות מינים של צמחים ובעלי חיים ופלישת מינים לאזורים. כבר כיום אפשר לראות ברחבי העולם תופעות הנובעות ממשבר האקלים: בצורות ממושכות, שריפות משתוללות, סופות בעוצמות שלא נראו בעבר ועוד. יחד עימן מתגבר חוסר הוודאות לגבי מציאות חיינו בעתיד(NASA, 2020; IPCC, 2014).

אל מול תחזיות אלה נדרש כל אחד מאיתנו לשאלה: איך יכולה מערכת החינוך לתת מענה לאתגרי העתיד המורכבים הללו? לאילו כלים ומיומנויות יזדקקו התלמידים בבואם להתמודד עם השינויים הצפויים, ומהי הדרך הנכונה ביותר להעביר אליהם את הידע הקיים על משבר האקלים, באופן שיאפשר עיבוד רגשי של המידע הקשה שאליו הם נחשפים?

לנו, ברשת הירוקה, העוסקת בחינוך לקיימות ובהוראת משבר האקלים, אין ספק כי נושא זה חייב להפוך במהירות לראשון בחשיבותו בתוכנית הלימודים, בוודאי החל מחטיבות הביניים.

הכול נמצא בתוכנית הלימודים

כיום נלמד נושא האקלים במסגרת שיעורי "גיאוגרפיה – אדם וסביבה" ו"מדעי כדור הארץ". גם תוכנית הלימודים המעודכנת במדע וטכנולוגיה לכיתות א' עד ט' (משרד החינוך, 2019) כוללת נושאים שהם מהותיים להוראת משבר האקלים, כמו מערכות אקולוגיות (סביבות בכדור הארץ, מגוון מינים ועוד), מעורבות האדם במרכיבי הסביבה ופתרונות טכנולוגיים. בנוסף, בפרק העוסק בהיבטים בין-תחומיים בהוראת מדע וטכנולוגיה נקבע כי "אוריינות סביבתית" היא חלק בלתי נפרד מהלמידה. כותבי התוכנית הגדירו "אוריינות סביבתית" כך:

- ידע בנושאי סביבה ואקולוגיה.
- עמדות בנוגע לטבע, לסוגיות הסביבה ולנכונות לפעול.
- התנהגויות הכוללות דפוסי צריכה, חיסכון ואקטיביזם סביבתי.

כותבי התכנית גורסים כי אוריינות סביבתית היא אמצעי להגשמת **תפיסת הקיימות**, שאותה הם מגדירים כהתנהלות המאפשרת

1 גילה לוי הוברמן וד"ר יעל ברקי גטניו, עובדות ברשת הירוקה, המובילה את החינוך לקיימות בסדר היום של מערכות חינוך, נוער וקהילה ברשויות ובכל המגזרים בישראל.

קיום ושיפור איכות החיים של האדם בהווה, תוך התחשבות בצורכי הדורות הבאים. לדבריהם, תוכנית הלימודים במדע וטכנולוגיה היא הבסיס הרציונלי הדרוש לאוריינות סביבתית. עוד הם מדגישים כי בהוראת נושאים במדע וטכנולוגיה הקשורים באוריינות סביבתית נדרשים המורים להתייחס גם להיבטים ערכיים והתנהגותיים.מצטייר אפוא כי החיבור בין הוראת המדעים והטכנולוגיה לבין הוראת משבר האקלים הוא טבעי ומתבקש. כדי ליצור את החיבורים, על המורה להכיר לעומקן את העובדות הקשורות במשבר ולבנות עבור התלמידים אתגרים לימודיים.

מניסיוננו, כל נושא לימודי במדעים ובכלל צריך לעסוק בשאלה או סוגיה הרלבנטית לחייהם של התלמידים. נושא המעסיק או מטריד אותם ואת הקהילה שבה הם חיים. המחקר אינו מסתיים בדיון בממצאים ובמסקנות המדעיות, אלא בשאלה: מה אנחנו יכולים לעשות ואיך אנחנו יכולים להשפיע על המצב? כלומר, אחריותם של התלמידים ויכולתם ליצור שינוי במקום שבו הם חיים ונקיטת פעולה הן חלק בלתי נפרד מהלמידה.

להלן כמה דוגמאות לשילוב של הוראת "משבר שינויי האקלים" במסגרת לימודי המדע והטכנולוגיה בחטיבות הביניים. מדובר בתוכניות חקר שהנחתה ד"ר יעל ברקי גטניו, המנהלת הפדגוגית של הרשת הירוקה, בחטיבות ביניים בעכו ובנתניה, ועסקו בניטור פסולת בחוף הים.

חוקרים את הפסולת בחוף הים

א. חטיבות הביניים אורט רוז ואורט עלייה שנייה, בהובלת המורות למדעים איילת עמית ואורלי מנשרוב, [יחד] עם אשכול הפיס בעכו, הפעילו בשנים תשע"ה-תשע"ז פרויקט משותף לכיתות ז' בשם "חקר בחוף הים – פלט ים טבעי ומלאכותי". במסגרת הפרויקט יצאו התלמידים לסיורים בחוף הים, אספו פלט ים מסוגים שונים, למדו מתודה של ניטור ומיון לקטגוריות, הן של פלט ים טבעי (קונכיות, שלדי בעלי חיים, אצות ועוד) והן של פלט ים מעשה ידי אדם.

בהמשך מיינו התלמידים את מה שאספו בחוף, ספרו וחילקו לקטגוריות. את כל הנתונים הכניסו לטבלאות אקסל, למדו על סוגי גרפים ובחרו את הגרף הנכון ביותר כדי לתאר את הממצאים.

בנוסף, במהלך הסיורים בחוף חוו התלמידים גם למידה מזדמנת, לדוגמה, מפגש עם מינים פולשים של דגים, כמו דג "אבו נפחא" שהגיע לים התיכון מים סוף, ודיון בהשפעתם על המערכת האקולוגית.

הפרויקט לא הסתיים במסקנות על כמויות פסולת וסוגי פסולת שנמצאו. השלב הבא היה דיון ערכי והתנהגותי בכיתה. התלמידים נשאלו מה אפשר לעשות (אקטיביזם) נוכח גילוייהם על הפסולת הימית. הם העלו רעיונות לצמצום בעיית הפסולת בים ואף יישמו חלק מהם: ליצור בבית הספר קיר מידע עם דוגמאות למה שאספו בחוף ועם קריאה לא לזהם, להעביר הרצאות לתלמידים צעירים יותר, חלק הציגו את המסרים שלהם בצורת שיר ועוד.

ב. **ביה"ס אורט יד ליבוביץ בנתניה, בהובלת המורה גלית בן נתן**: בשנת 2015 העברנו פרויקט בשם "מפליאה לחקר ושינוי בתרבות הצריכה" לתלמידי החטיבה. גם כאן התלמידים יצאו לחוף הים, אספו פסולת מסוגים שונים ומיינו אותה. במקביל יצרו התלמידים קשר עם בית ספר בדרום צרפת שעבד על פרויקט דומה בשיתוף עמותת "אקואושן". התלמידים משתי הארצות השוו נתונים על חופים בחלקים שונים בים התיכון וקיימו מפגש מקוון שבו הציגו את הממצאים (איור 1).

מקומם של המורים למדעים הוא בחוד החנית: הם אלה שמנגישים לתלמידים את העובדות הרלבנטיות בתחומי הידע השונים, את עקרונות החשיבה המדעית ואת הכלים למציאת פתרונות; כל זאת לצד ההבנה שעליהם לתת גם מענה רגשי לתלמידים, לחבר אותם ליוזמות אקטיביסטיות מעוררות השראה ולעודד אותם לנקוט פעולה בעצמם.

בפרויקטים אלה אפשר למצוא חיבורים להוראת משבר האקלים, כמו:

א. למידה והבנה של עומק **הנזק שגורמת תרבות הצריכה המערבית**, וחשיבה איך אפשר לצמצם צריכה דרך היכרות עם הפסולת הימית, מקורותיה והשפעותיה על מגוון המינים בסביבה הימית.

איור 1: דוגמה שנאספה בחוף היום (אילוסטרציה). צילום: יעל ברקי גטניו

ב. הבנה ש**כל אחד מאיתנו הוא חלק מהבעיה** – ושהפתרון נמצא בידיים של כל אחד מאיתנו.

ג. **חינוך לפרו-אקטיביות ולאקטיביזם** – החקר לא הסתיים בכתיבת מסקנות עד כמה המצב לא טוב, אלא בדיון באופן שבו התלמידים יכולים להשפיע על המצב.

אפשרויות נוספות: יעדי הקיימות כבסיס ללמידה

הצעות נוספות להוראת משבר האקלים במסגרת שיעורי מדעים:

- במהלך סיור בחוף אפשר לבדוק ולהבין את המשמעות של עליית מפלס מי הים בחצי מטר, מטר וכולי. הנושא כולל למידה של תכונות המים, המסת הקרחונים ועוד.
- במסגרת למידה על מגוון המינים, על בתי גידול ועל התאמת בעלי חיים לסביבת המחיה שלהם – לבדוק מה יכולות להיות ההשלכות של שינוי בתנאים, כמו עליית הטמפרטורה או החומציות של מי הים, מדבור וקיטון בכמות המשקעים ועוד.
- בית הספר יכול להפוך בעצמו למרכז ידע סביבתי מקומי. למשל, דגימה חוזרת שנה אחר שנה של נתונים יוצרת מאגר מצטבר, המראה שינויים והשפעה על הסביבה.

דוגמה נוספת אפשר לראות בתוכנית הלימודים הייחודית "we start", העוסקת בטיפוח גישה יזמית ופרו-אקטיבית סביב יעדי הקיימות של האו"ם (Sustainable Development Goals ובקיצור SDGs). מדובר ב-17 יעדים עולמיים שקבע האו"ם ב-2015, והכוללים נושאים חברתיים וכלכליים כמו עוני, רעב, בריאות, חינוך, התחממות עולמית, אי-שוויון מגדרי, מים, סניטציה, אנרגייה, עיור, הגנת הסביבה וצדק חברתי (המשרד להגנת הסביבה, 2019).

תוכנית הלימודים "we start", המיועדת לחטיבות הביניים, מזמינה חקירה והעמקה בצוותים סביב כל אחד מהיעדים, בפדגוגיה של למידה מבוססת-אתגרים. התהליך מתחיל בזיהוי צורך או אתגר מתוך עניין אישי של כל תלמיד. סביב האתגר

שנבחר מבצעים התלמידים חקר עמוק, הכולל חיפוש במקורות מדעיים, תצפיות, סקרים וכולי. בסופו של התהליך, הצוותים מציגים פתרונות לאתגרים שחקרו וכן צעדים ראשונים ליישום.

הנה כמה דוגמאות לחיבור בין התוכנית לנושאים מדעיים, מתוך ההאקתון שהתקיים בחטיבת הביניים של בית הספר בית חשמונאי ועסק בפיתוח פתרונות למדינות מתפתחות בהקשר של יעדי הקיימות.

הפרויקט הזוכה הציע בניית מתקן לזיקוק אתנול מקני סוכר, לצורך הפקת חומרי חיטוי למרכזים רפואיים מרוחקים (הפרויקט נוגע במגוון תחומים, כמו טכנולוגיה, כימיה, ביולוגיה ועוד).

פרויקט אחר עסק בהפקה של חומרי כביסה אקולוגיים מצמחייה מקומית בהודו, לשם הפחתת זיהום הנהרות עקב שימוש בכימיקלים (חקר צמחים, הפקת חומרים, מגוון מינים מקומי ועוד).

הפרויקט השלישי הציע פיתוח של דוחי יתושים טבעיים בקניה כדי להתגונן מפני מלריה. התלמידים זיהו שהתושבים המקומיים אוהבים לענוד תכשיטים רבים והציעו לטבול את התכשיטים בחומר דוחה יתושים טבעי (בדיקה של המנגנונים הביולוגיים שבחומרים השונים, בדיקה מה עובד ומה לא וכולי).

כל אחד משלושת הזוכים מזמין צוות של תלמידים בכיתות ח'-ט' ומורה מלווה להעמיק ולחקור בנושאים שנוגעים לעולם המדעים, תוך עמידה ביעדי הקיימות.

לסיכום, אין ספק כי מערכת החינוך צריכה "לקרוא את המפה" ולהיערך להוראת משבר האקלים בצורה אינטנסיבית. מקומם של המורים למדעים הוא בחוד החנית: הם אלה שמנגישים לתלמידים את העובדות הרלבנטיות בתחומי הידע השונים, את עקרונות החשיבה המדעית ואת הכלים למציאת פתרונות; כל זאת לצד ההבנה שעליהם לתת גם מענה רגשי לתלמידים, לחבר אותם ליוזמות אקטיביסטיות מעוררות השראה ולעודד אותם לנקוט פעולה בעצמם.

רשימת ספרות

המשרד להגנת הסביבה (2019). SDG שיתוף פעולה לעולם טוב יותר

משרד החינוך (2019). חינוך לקיימות, חומרי למידה לחטיבות הביניים. המזכירות הפדגוגית, אגף מדעים – מדע וטכנולוגיה, קדם יסודי וחטיבת ביניים.

NASA, (2020). The effects of climate change. Climate Global climate change, vital signs of the planet.

IPCC (2014). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

זווית בחינוך
מחברים סביבה לכיתה: לומדים על שינוי האקלים

דקלה גיש[1]

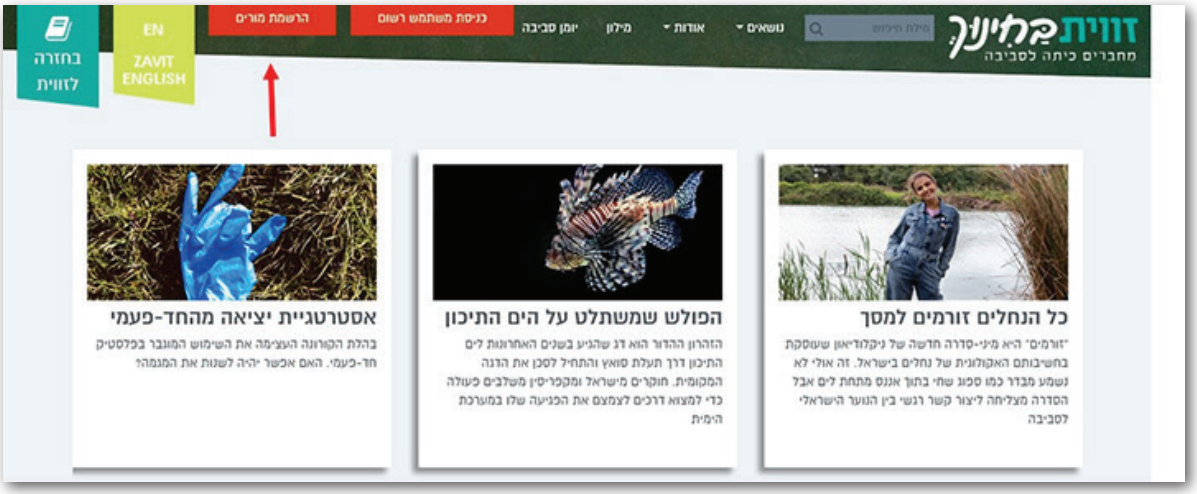
"זווית" היא פלטפורמת תוכן מבית האגודה הישראלית לאקולוגיה ולמדעי הסביבה הכוללת תכנים בנושאי סביבה ובכלל זה תכנים על שינוי האקלים. המידע המפורסם הוא מהימן, מעניין ורלבנטי להוראת המדעים, הביולוגיה והסביבה. תכנים אלה יכולים לסייע לקידום הוראה עדכנית ומוחשית. המאמר משלב מערכי שיעור בנושא שינוי האקלים.

האם שאלתם את עצמכם מה הסיכוי שאחד מהתלמידים שלכם יהיה גרטה טונְבֶרִי הבא? האם שאלתם אותם אם הם שמעו על שינוי האקלים? האם הם יודעים מיהו השר להגנת הסביבה ומהו תפקידו של המשרד להגנת הסביבה? התלמידים שלי, בכיתה י', סיימו את חטיבת הביניים בלי שהיו חשופים לנושא באופן משמעותי. במקרה הטוב, זכרו אַנְסִין בנושא שניתן להם במבחן בעברית, או שעה אחת שבה דנו בנושא עם המורה לגיאוגרפיה או למדעים.

אולי זה הזיכרון הקצר של תלמידיי, אבל לא ייתכן שנושא סביבתי בעל חשיבות קיומית כמשבר האקלים יהיה תופעה שהתלמידים שלנו ישכחו שלמדו. מערכת החינוך מחויבת להוראה משמעותית, רלבנטית ומעמיקה של הנושא; הוראה שמובילה להפנמה של ערכים והתנהגות חברתית מוסרית של נושאים סביבתיים. חובתנו כאנשי חינוך לעסוק בסוגיות סביבתיות, ומתוך התפיסה הזו הגעתי לאתר "זווית".

"זווית"

"זווית" היא פלטפורמת תוכן מבית האגודה הישראלית



איור 1: דף הכניסה לאתר "זווית בחינוך". ממנו אפשר להיכנס לאתר כמורה. לשם כך דרושה הרשמה פשוטה וחינמית למורים

1 דקלה גיש היא מנהלת "זווית בחינוך", מורה ורכזת הביולוגיה בתיכון עירוני ה' בחיפה.

לאקולוגיה ולמדעי הסביבה. "זווית" הוקמה כדי לענות על הצורך הגדל והולך של הקהל הרחב בידע שנמצא ברשותם של מדענים וחוקרים, ועל הדרישה שהידע הזה יועבר בצורה מעניינת, פשוטה להבנה ואמינה. את כל התכנים המפורסמים באתר כותבים כתבים בעלי ניסיון בהנגשת מדע לקהל הרחב. הם עוברים בדיקה של עורך מדעי ומותאמים למי שאינם מדענים אבל רוצים לדעת יותר על הדברים שמתרחשים סביבם.

המאמרים שמצאתי ב"זווית" הוסיפו הרבה עניין וגיוון להוראה שלי. ההתעדכנות השוטפת בסיפורי "זווית" והכנסת התכנים החדשים והרלבנטיים הפכו את ההוראה שלי לדינמית יותר, אשר עוררה את סקרנותם של תלמידיי ובאופן כללי שיפרה באופן ניכר את העניין והמעורבות של תלמידיי בנושאי סביבה.

בנוסף, כתבות "זווית" אינן עוסקות רק בסוגיות סביבתיות מהעולם, הרחוקות מישראל, אלא גם ובעיקר בנושאים הקשורים לישראל, לתרבות ולקהילה המקומיות, מה שהופך את העיסוק בנושאים אלה לרלבנטי לסביבת החיים של התלמידים ולכזה המאפשר דיון משמעותי בסוגיות חברתיות וסביבתיות שונות.

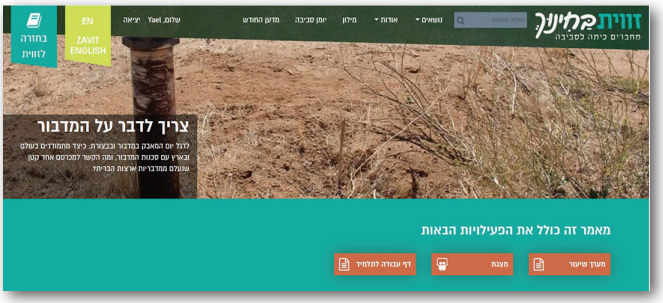
קצת אחרי שגיליתי את "זווית" כמקור בלתי נדלה של כתבות עדכניות ורלבנטיות הגיעה אליי הצעה להצטרף לצוות "זווית" ולפתח פלטפורמה ייעודית למורים. גילוי נאות: אמרתי כן! הצטרפתי, ובכתבה זו אני רוצה לספר לכם על "זווית בחינוך". באיור 1: דף הכניסה לאתר "זווית בחינוך".

"זווית בחינוך"

פלטפורמת "זווית בחינוך" מיועדת בעיקר למורי המדעים בישראל, אבל לא רק. ב"זווית בחינוך" אפשר למצוא מידע עדכני, מהימן, מעניין ורלבנטי להוראת המדעים, הביולוגיה והסביבה. באתר מפורסמים תכנים הכתובים בשפה ברורה ונגישה, שבמרכזם מחקרים חדשים מישראל ומהעולם בתחומי הסביבה המגוונים, מלווים בסרטונים, בתמונות ובאיורים. שימוש בתכנים אלה מסייע לקיים הוראה עדכנית ומוחשית יותר. לחלק מהכתבות באתר מצורפות פעילויות להעשרת החוויה הלימודית של התלמידים בנושאי אקולוגיה וסביבה.

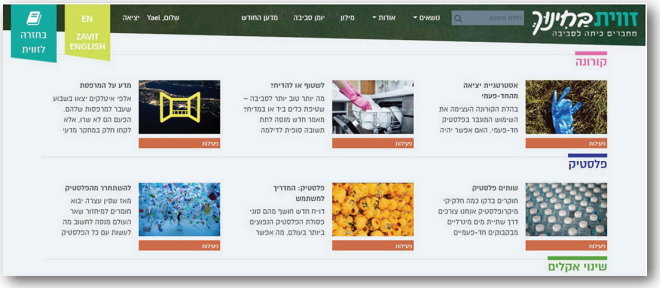
ההרשמה לחדר המורים של "זווית" היא חינמית ופשוטה, ואנחנו מעוניינים בכם כשותפים. אם יש לכם זוויות חדשות לשילוב ידיעות מהאתר בהוראה שלכם, אנא שתפו אותנו, ואם תרצו שנכתוב על נושא מדעי שמעניין אתכם, נשמח לשמוע ולסייע. בנוסף, אחת לחודש אנו שולחים ניוזלטר בנושא מסוים ובו קישורים לכתבות העוסקות באירועי לוח השנה בנושא חינוך לקיימות, הצעות לפעילויות, ריאיון עם מדען ישראלי והצגת פרויקט סביבתי ישראלי.

כאמור, ב"זווית בחינוך" מאגר גדול של מאמרים ומערכים במגוון נושאים סביבתיים. באיור 2 אפשר להתרשם מסוגי פעילויות שונים הקיימים באתר. הפעם נתמקד בנושא משבר האקלים, ונמליץ לכם על כתבות ומערכים בנושא שתוכלו לשלב בהוראה שלכם.



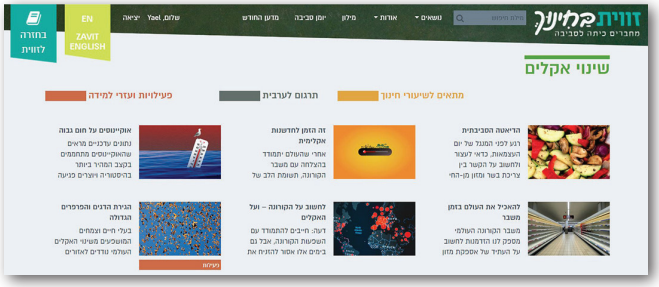
איור 2: לאחר שבוצעה הכניסה וההרשמה למורים תוכלו למצוא באתר מגוון גדול של מאמרים המלווים במערכי שיעור. אפשר לבחור מאמר לפי סוג הפעילות המלווה אותו

באתר "זווית" מאות כתבות, ותכנים חדשים מתפרסמים בו מדי יום. באתר "זווית בחינוך" מאות מאמרים הממוינים לפי נושאים הרלבנטיים לתוכנית הלימודים. באיור 3 מופיעה רשימה חלקית של הנושאים. בין הנושאים תמצאו נושאים חמים, כמו "קורונה", "פלסטיק", "שינוי האקלים"; וכן נושאים מתוך תוכנית הלימודים באקולוגיה, כמו "מערכות אקולוגיות", "הזנה בצמחים ובבעלי חיים" ועוד. תחת כל נושא תמצאו מגוון רחב של מאמרים העוסקים בנושא. המאמרים שמצורפת אליהם הצעה למערך שיעור מסומנים.



איור 3: רשימה חלקית של הנושאים שלפיהם ממוינים מגוון המאמרים באתר

תחת כל אחד מהנושאים מופיעה רשימה של מגוון כתבות בנושא. באיור 4 מוצגות כתבות בנושא שינוי אקלים.



איור 4: רשימה חלקית של כתבות בנושא שינוי האקלים. מאמרים המלווים במערך שיעור, תרגום לערבית או מותאמים לשיעורי חינוך מסומנים בהתאם למקרא

דוגמה לכתבה בנושא שינוי האקלים מוצגת באיור 5. המאמר "מה הסיפור של שינוי האקלים" נכתב על ידי כתבת "זוויות" עלינה פישמן-בר יהודה, שגם מפתחת מערכי שיעור ב"זוויות בחינוך".

איור 5: מציג דוגמה למאמר בנושא שינוי האקלים. נוסף על הטקסט במאמר, המופיע תחת הכותרת, מצד שמאל מוצגות מגוון הפעילויות ועזרי הלמידה הפתוחים לשימוש המורה

להלן רשימה של קישורים נוספים למאמרים הכוללים מערכי שיעור, דפי עבודה, משחקים, פעילויות וסרטונים בנושא שינוי האקלים הנמצאים באתר "זוויות בחינוך" לשימוש בעבודה עם התלמידים. על מנת לצפות בחומרים אלה ולהשתמש בהם עליכם להירשם כמורים לאתר "זוויות בחינוך".

את כתבות "זוויות" מחבר צוות הכתבים של האתר, המורכב מסטודנטים לתארים מתקדמים בתחומי הסביבה שעוברים הכשרה עיתונאית. התכנים עוברים עריכת תוכן ולשון וכן עריכה מדעית על ידי המנהל המדעי של האגודה הישראלית לאקולוגיה ולמדעי הסביבה, על מנת לשמור על הדיוק המדעי ועל מהימנות התכנים.

מזג אוויר אופייני לעתיד – מאמר ודף עבודה על שינויי האקלים בשנים האחרונות בעולם. נכתב ע"י יעל מור.

מה בוער? – מאמר ודף עבודה על הקשר של השריפות באוסטרליה למשבר האקלים. נכתב ע"י רן בן מיכאל.

אוקיינוסים לוהטים – מאמר ודף עבודה על התחממות האוקיינוסים, ומשחק בנושא השפעות שינוי האקלים על מחזור המים. נכתב ע"י רן בן מיכאל.

מסביב לעולם בשמונים מעלות – מאמר ודף עבודה העוסקים בהשפעת העלייה בטמפרטורות ברחבי העולם (כולל מיומניות לקריאה ולבניית גרפים). נכתב ע"י רן בן מיכאל.

ים חם – מאמר, סרטון ודף עבודה העוסקים בהשפעת התחממות האקוויינוסים וחדירת מינים פולשים. נכתב ע"י מאיה פלח.

מאה פתרונות למשבר האקלים – פעילות בקבוצות על פתרונות אפשריים הקיימים כבר למשבר האקלים. נכתב ע"י מאיה פלח.

חלב מכל דבר – מאמר ודף עבודה בגוגל פורמס על הקשר שבין חלב, תחליפי חלב ושינוי האקלים. נכתב ע"י רן בן מיכאל.

שינוי אקלים כנושא רב-תחומי להוראת מו"ט בחט"ב - אוגדן למורה

איתי ללזר ויעל שוורץ[1]

בימים אלה מפתח מרכז הארצי למורי מדע וטכנולוגיה בחטיבות הביניים אוגדן למורה בנושא שינוי האקלים. האוגדן מיועד למורים למדע וטכנולוגיה בחטיבות הביניים שמעוניינים להעמיק את ידיעותיהם בנושא לקראת הוראתו בכיתה וכן כלולות בו הצעות לרצף שיעורים ומעבדות המיועדים לתלמידים.

בשנים האחרונות אנו עדים לשינויים משמעותיים באקלים כדור הארץ, הבאים לידי ביטוי בעלייה בריכוז גזי החממה באטמוספרה, שינוי משטר הגשמים, עלייה בטמפרטורה הממוצעת, עלייה בקצב המסת קרחונים, ועוד. השילוב של שינויי אקלים והתחממות גלובלית הוביל לתהליך מתמשך של מדבור באזורים נרחבים בעולם. מדבור שנגרם בעקבות ניצול יתר של הקרקע מוביל לסחף קרקע, המלחת קרקע ולירידה בפוריות הקרקע לחקלאות. בנוסף, עדויות רבות מצטברות בשנים האחרונות, ולפיהן קצב הכחדת המינים הנוכחי גדול בהרבה מקצב ההכחדה הטבעי המצופה. פגיעה במגוון המינים משפיעה על כלל שירותי המערכת האקולוגית, כמו שירותי האבקה, טיהור מים, סחף קרקעות ופנאי. בעיות אלה יעמדו בפני התלמידים הלומדים היום בחטיבות הביניים (חט"ב) לכשיתבגרו. לכן חשוב לשלב את נושא שינוי האקלים בתוכניות הלימודים וכן בלימודי המדע והטכנולוגיה (מו"ט).

לשם כך המרכז הארצי למורי מו"ט בחט"ב מפתח בימים אלה אוגדן למורה. האוגדן מיועד למורים למדע וטכנולוגיה בחטיבות הביניים שמעוניינים להעמיק את ידיעותיהם בנושא לקראת הוראתו בכיתה. תהליך כתיבת האוגדן לווה בהרבה לבטים ביחס לבחירת הנושאים ודרך הצגתם, שכן תחומי הידע הקשורים לשינוי האקלים נוגעים לתחומי מדע שונים, ובהם פיזיקה, כימיה, ביולוגיה, גאולוגיה ומדעי כדור הארץ. לבסוף נבחרו נושאים בעלי זיקה ישירה לתוכנית הלימודים במו"ט חט"ב, לרבות נושאי הרחבה שמצאנו אותם הכרחיים להבנת הנושא. האוגדן מתמקד בהצגת עדויות מדעיות עדכניות לקיומו של שינוי אקלים ובהשפעת האדם על התהליך. כמו כן, מושם דגש על עקרונות פדגוגיים להוראת הנושא בכיתה, בלמידה חוץ כיתתית וגם בלמידה מרחוק – שכן אוגדן זה נכתב בעיצומו של משבר קורנה, פברואר-יולי 2020.

כל אחד מפרקי האוגדן מורכב מפרקי מידע המיועדים למורה, והצעה לרצף שיעורים ומעבדות המיועדים לתלמיד. באופן הזה האוגדן יכול לשמש כלי עזר מרכזי בהוראת הנושא בכיתה. משבר האקלים הוא כאן וצפוי להישאר. הוראת הנושא היא הזדמנות גדולה עבורנו, כמורים למדעים, ללמד נושא הרלבנטי מאוד לחיי התלמידים.

1 ד"ר איתי ללזר וד"ר יעל שורץ, מרכז מורים ארצי למורי מדע וטכנולוגיה בחטיבות הביניים, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע.

35-34

גיליון מס' 34-35 ■ אב תש"ף, יולי 2020

>קריאתביניים

ביטאון למורי מדע וטכנולוגיה בחטיבת הביניים

מכון ויצמן למדע
המחלקה להוראת המדעים

מרכז מורים ארצי
למו"ט בחט"ב

מינהלת מל"מ
המרכז הישראלי
לחינוך מדעי טכנולוגי
על-שם עמוס דה-שליט

משרד החינוך
המזכירות הפדגוגית
אגף מדעים
הפיקוח על הוראת מדע וטכנולוגיה