

שימוש בסימולציות ובמודלים להוראת נושא שינוי האקלים תום ביאליק¹

אחד הכלים החשיבתיים בו משתמשים מדענים הוא מודל מדעי. המודל מאפשר למדענים לייצג באופן מופשט תופעה בעולם האמיתי למטרה מסוימת ולהסביר כיצד מתרחשים תהליכים שונים. מודלים שונים משמשים את העולם המדעי לתאר ולהסביר את שינויי האקלים. המודלים מסייעים למקבלי ההחלטות להפעיל שיקול דעת בניסיון להתמודד עם שינויי האקלים על ידי הרצת סימולציות של תרחישים אפשריים בהינתן תנאים מסוימים. לפיכך, ישנו הכרח שתלמידים יבינו את תפקידם של מודלים בהתפתחות המדע, יכירו מודלים מרכזיים בהקשר לתכנית הלימודים במדע וטכנולוגיה. העיסוק בשינויי אקלים מזמן הכרות והתנסות בבניית מודלים מדעיים שיאפשרו לבחון השפעה של הפעלת דרכי התמודדות והיערכות שונות על התופעות הנובעות מההתחממות הגלובלית.

של מקצועות המדעים בבתי הספר - אם רוצים שהתלמידים ידעו להשתמש במודלים בצורה נכונה וביקורתית, וגם לפתח את ההבנה שלהם ביחס לטיבם של מודלים מדעיים, יתרונותיהם ומגבלותיהם.²

מה זה מודל מדעי?

בהגדרה הפשוטה ביותר, מודל מדעי הוא ייצוג מופשט של תופעה בעולם האמיתי למטרה מסוימת. מתוך הגדרה זו אנו מבינים שמודל אינו העתק מדויק של המציאות, אלא רק ייצוג של היבטים מסוימים מתוך התופעה הרלבנטיים למטרת המודל.³ כבר מכאן ניכרת אחת ממגבלות המודל: ההיבטים שהמודל מציג תלויים בהבנה ובתפיסה של מי שבנה את המודל.⁴ ייתכן שישנם היבטים חשובים נוספים המשפיעים על התופעה המיוצגת שבאופן מכוון או בטעות לא הובאו בחשבון במודל.

המודל המדעי הוא בעצם ייצוג של מערכת, הכוללת משתנים שונים ואת האינטראקציות ביניהם.⁵ לדוגמה, מודל של מולקולת פד"ח (פחמן-דו-חמצני) יכול להראות את האטומים המרכיבים את המולקולה ואת האופן שבו הם מסודרים. זהו מודל פשוט מאוד. רוב המודלים המדעיים מתארים תופעות ותהליכים הרבה יותר

"כל המודלים שגויים, אולם חלקם שימושיים"

משפט זה, שאמר הסטטיסטיקאי האמריקאי המפורסם ג'ורג' בוקס⁶, משקף את טיבם של המודלים המדעיים שהפכו להיות כלים מרכזיים לא רק בעולם המחקר המדעי, אלא כמעט בכל תחום שנדרשת בו קבלת החלטות. לדוגמה, אנשי מערכת הבריאות משתמשים במודלים לחיזוי קצב התפשטות של מגפות על מנת לקבל החלטות ביחס לצעדים הדרושים לבלימת ההתפשטות, כפי שראינו בתקופת הקורונה. חזאים משתמשים במודלים על מנת לספק לנו מידע ביחס למזג האוויר הצפוי בימים הקרובים. חברות האנרגיה משתמשות במודלים גאולוגיים על מנת להחליט היכן כדאי לחפש מאגרי גז חדשים.

גם בנושא שינוי האקלים המודלים המדעיים משחקים תפקיד משמעותי. מודלים אלה מסבירים לנו כיצד מתרחשים תהליכים שונים המשפיעים על האקלים, כמו הצטברות גזי החממה באטמוספירה או כריתת יערות המאיצים את ההתחממות הגלובלית. הם גם עוזרים למקבלי החלטות להפעיל שיקול דעת וחשיבה ביקורתית בניסיון להתמודד עם נושא שינוי האקלים, על ידי הרצת סימולציות של תרחישים אפשריים בהינתן תנאים מסוימים. לכן יש למודלים המדעיים חשיבות רבה בהוראה ולמידה

1 ד"ר תום ביאליק - מרצה בכיר במכללה האקדמית בית ברל.



מורכבות בצורה יעילה. חשוב לזכור, עם זאת, שגם מודל ממוחשב ונתוני הסימולציה שהוא מספק אינם המציאות עצמה. הם תלויים באיכות הנתונים שבהם בחר להשתמש מי שבנה את המודל, ותמיד יש לזכור שבכל מודל יש רכיבים ידועים ולא ידועים של "רעש", אי-ודאות סטטיסטית וכן סטיות הסתברותיות אקראיות. לכן מודלים ממוחשבים יכולים לעזור לנו מאוד בחקר תופעות, אך הם תמיד יהיו רק השערה כללית ולא מדויקת של תרחישים אפשריים בעתיד, בעיקר כשמדובר בתופעות מורכבות כמו שינויי אקלים.

למה משמשים מודלים מדעיים?

מודלים מדעיים משמשים כלי לחקירה, הסבר וחיזוי של תופעות מדעיות. מדענים משתמשים במודלים על מנת לחלוק את ממצאי המחקרים שלהם עם עמיתיהם ועם הקהל הרחב, ועל ידי כך הם מקבלים ביקורת ומשוב המסייעים להם לשפר את המודלים שבנו. בשיעורי המדעים אנו רוצים שהתלמידים יתנסו בתהליך החקר וילמדו עם מודלים ובעזרתם, כמו שעושים המדענים⁶. אולם, ברוב שיעורי המדעים כיום נעשה שימוש מוגבל במודלים,

מורכבים ברמות ארגון שונות - כמו מודלים של מעברי אנרגיה בין חלקיקים תת-אטומיים ועד מודלים של התפשטות היקום בחלל. ואכן, ככל שהמודל המדעי מציג תופעה גדולה יותר, מורכבת יותר, המכילה יותר משתנים ואינטראקציות, כך רמת הדיוק של המודל נעשית מוגבלת יותר.

מודלים מדעיים יכולים להופיע במגוון צורות. בצורתו המתמטית, המופשטת ביותר, מודל מדעי יכול להיות משוואה, אלגוריתם, או פונקציה מתמטית. מודל יכול להופיע גם כצויר, גרף, מפה, אובייקט פיזי, או תרשים - המתארים תופעות ותהליכים שונים. בתקופה האחרונה, מודלים רבים מופיעים כמודלים ממוחשבים, מה שמאפשר שימוש קל, זמין ורחב יותר במודל. בעזרת מודלים ממוחשבים אפשר להריץ סימולציות של המודל. בסימולציה מציבים ערכים נבחרים למשתנים המשפיעים במודל, מריצים אותם בנוסחה האלגוריתמית של המודל, ובוחנים את השפעתם על הפלט, כלומר, בוחנים מהם ערכי המשתנים המושפעים, המייצגים תוצאות של תרחישים אפשריים בהינתן תנאים מסוימים של התופעה הנחקרת. כך מעריכים את המודל וחוקרים תופעות





מהו תהליך המידול?

תהליך המידול כלל מעגלים חוזרים ליצירת מודלים מדעיים, לרבות: בנייה, בחינה, הערכה, שינוי, ושימוש (איור 1). במסגרת שיעורי המדעים בבית הספר, השלב הראשון מצריך חשיפה לתופעה או לבעיה שאותה אנו רוצים לייצג, ורצוי גם לכלול איסוף ראשוני של נתונים היכולים לשמש בסיס ליצירת המודל. בשלב הבא אפשר להתחיל לבנות את המודל. לאחר מכן עלינו לבחון ולהעריך את המודל שבנינו. אם בנינו מודל ממוחשב, אנחנו יכולים גם להריץ סימולציות ולבחון אם הן מתאימות להשערות שלנו ומספקות תחזיות הגיוניות. אלו יישמו לבחינת ההתאמה והדיוק של המודל לנתונים החדשים שנאספו. על בסיס הבחינה וההערכה של המודל עלינו לשקול לבצע שינויים והתאמות במודל שבנינו כדי לשפר את רמת הדיוק והאמינות שלו, ויש לחזור על תהליך זה כמה שיותר פעמים על מנת להגיע למודל המדויק ביותר.

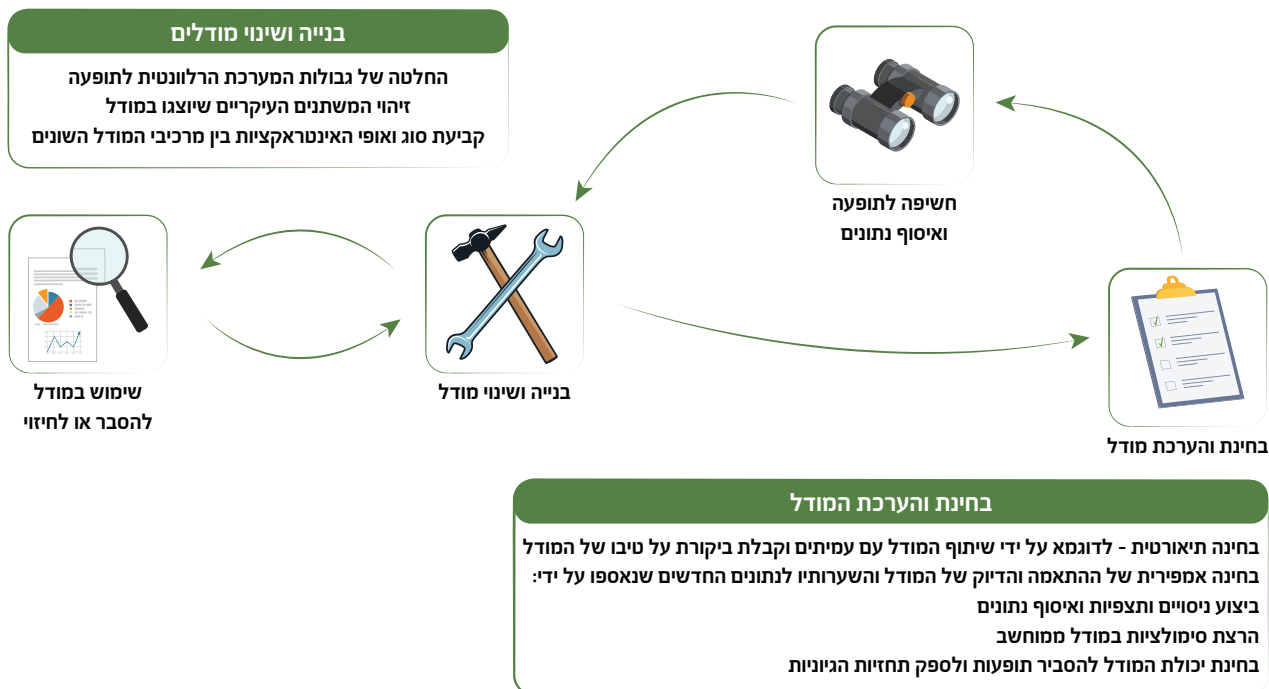
שלב חשוב נוסף של תהליך המידול הוא השימוש במודל להסבר או חיזוי של תופעות. אנו יכולים להסביר תופעות שונות או להציע פתרון לבעיות בעזרת המודלים שיצרנו, לחלוק את הבנתנו עם עמיתים, ולדון בטיבם ואיכותם של המודלים שיצרנו. אנו יכולים גם להריץ סימולציות של מודלים ממוחשבים על מנת לחזות אילו שינויים עתידיים יכולים להתרחש בהינתן תנאים מסוימים, ומה אפשר לעשות על מנת למנוע בעיות או סכנות אפשריות.

תהליך המידול הוא מתמשך ומעגלי, ומצריך כל הזמן בחינה מחודשת ושינוי של המודלים הקיימים בהתאם לידע ולהבנה הנמצאים בדינמו. מכאן אפשר להבין שמודלים מדעיים לעולם אינם תוצר סופי ומושלם. הם תמיד משתנים ומייצגים את ההבנה שלנו בזמן נתון. מדענים משנים כל הזמן את המודלים שלהם ואת תחזיותיהם בהתאם לתאוריות, לנתונים ולחישובים חדשים שהם עושים. לדוגמה, המודל המקובל כיום של מבנה האטום אינו דומה למודל שהיה מקובל לפני מאה, חמישים או אפילו עשרים שנים. כמו שהידע המדעי הולך ומתפתח עם הזמן, כך משתנים גם המודלים המדעיים המייצגים את הידע המקובל בכל תקופה. זו נקודה חשובה מאוד שיש להדגיש לתלמידים. ההתנסות בתהליך המידול קריטית לפיתוח הבנה זו. ככל שיהיו להם יותר הזדמנויות להתנסות במודלים בשיעורי המדעים - לבנות, לבחון, לשנות

בעיקר ככלי להדגמת תהליכים ותופעות (חשבו על תרשימים המשווים בין רכיבי התא הצמחי מול תא של בעל חיים התלויים ברוב כיתות המדעים, או על מודל מערכת השמש המציג את תנועת כוכבי הלכת סביב השמש שמעלה אבק בארון התצוגה בכל מעבדת בית ספר). מחקרים מראים שתלמידים זוכים בהזדמנויות מעטות להשתמש במודלים ככלי לבניית טיעון מדעי המסביר תופעות שונות או לחיזוי תרחישים עתידיים אפשריים⁵. כאן טמון גם הפוטנציאל הרב של הוראת מדעים עם ובעזרת מודלים - על ידי שילוב פעילויות הכוללות את כל שלבי תהליך המידול - מה שיאפשר לתלמידים לפתח ידע, הבנה ומיומנויות של מידול מדעי ולמידה מעמיקה יותר של הנושא המדעי עצמו. גם במסמך [מיומנויות דמות הבוגר 2030](#) של משרד החינוך מצוין שיש צורך לפתח את יכולתם של התלמידים "לזהות, להשתמש ולבנות מודלים לתיאור, הסבר וחיזוי תופעות" (עמ' 13).

בהקשר של שינוי האקלים, מודלים מדעיים משמשים לחקירה, הסבר וחיזוי של תופעות אקלימיות, השפעות של שינויי אקלים על הסביבה, והשפעתן של התנהגויות אנושיות על מערכות האקלים. מדעני אקלים בונים מודלים ממוחשבים, על בסיס הנתונים והידע הקיימים בידיהם, המאפשרים להם להריץ סימולציות המתארות תרחישים עתידיים בהינתן תנאים מסוימים, כמו אילו שינויים צפויים בטמפרטורה הגלובלית אם נמשיך לפלוט גזי חממה, לכרות יערות, או להשתמש במקורות אנרגיה בלתי-מתחדשים. חשוב לציין שלמודלים אלה יש מגבלות רבות. אנו לא יודעים מספיק על כל הגורמים המשפיעים על שינוי האקלים, מפני שמדובר בתופעה מורכבת מאוד הכוללת אינספור משתנים הנמצאים באינטראקציות ושינויים מתמידים.

המודלים המדעיים של שינוי האקלים מספקים לנו השערות לגבי השלכות אפשריות של תרחישים סביבתיים בהינתן תנאים מסוימים, ואנו יכולים להשתמש בהם על מנת לדון, לחשוב, ולהחליט אילו צעדים כדאי לנקוט על מנת לצמצם את הנזקים והסכנות האפשריים של שינוי האקלים - אך עלינו גם להתייחס אליהם בספקנות מסוימת ולהבין שהמודלים, כמו הידע וההבנה שלנו על תופעות מורכבות, כל הזמן משתנים.



איור 1. תיאור תהליך המידול

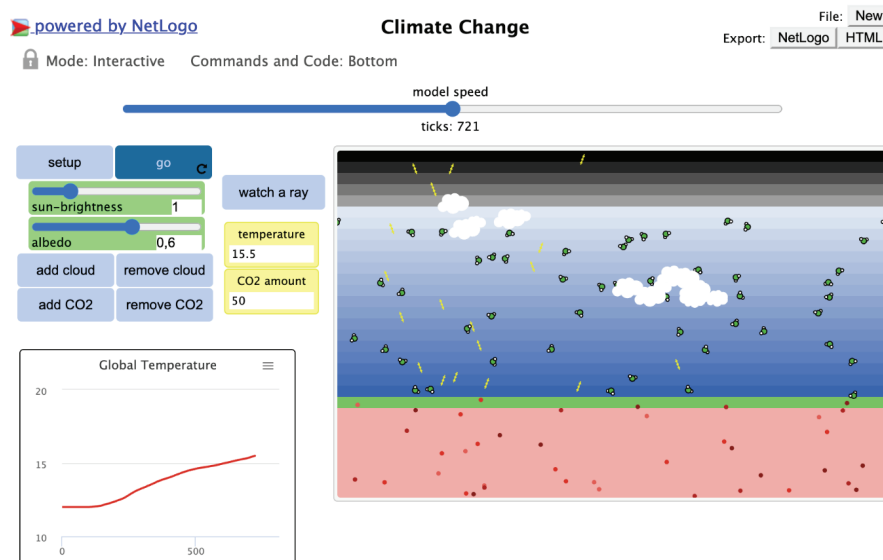
סוג אחד של מודלים ממוחשבים הוא מודלים מבוססי-סוכן (Agent-Based Models). במודלים אלה, ישנם סוכנים, כלומר ישויות בודדות אוטונומיות הפועלות לפי כללים מסוימים ברמת המיקרו. בעת הרצת הסימולציה הסוכנים השונים מתחילים לפעול ולהיות באינטראקציה זה עם זה או עם רכיבים אחרים במודל, וכתוצאה מכך מתקבלת תוצאה המדגימה תופעה מתהווה (Emergent Phenomenon) ברמת המיקרו. לדוגמה, במודל של התנהגות נמלים בעת איסוף מזון, כל נמלה מייצגת סוכן בודד הפועל לפי כללים מסוימים (למשל, לעקוב אחרי פרומון של נמלים אחרות או לנוע בקו ישר עד למפגש עם נמלה נוספת). כשמביטים בהתנהגות המיקרוסקופית של קבוצה גדולה של נמלים, אנו רואים את התופעה המתהווה, שהיא טור ארוך ומסודר של נמלים הנעות מהקן למקור המזון ובחזרה.

נטלוגו (Netlogo) היא פלטפורמה פתוחה המאפשרת בניית סוג כזה של מודלים ושימוש בהם ונמצאת בשימוש רב בהוראת המדעים⁷. בהקשר של שינויי אקלים, אפשר להשתמש במודל זה הבוחן את השפעתם של גורמים שונים - כמו עוצמת קרינת השמש, רמת החזריות פני כדור הארץ, כמות העננים, וכמות הפד"ח באטמוספירה - על הטמפרטורה הגלובלית (תופעה

ולהשתמש - כך תתפתח הבנה זו לגבי טיבו של תהליך המידול המדעי וחשיבותו להתפתחות המדע והידע האנושי.

מודלים ללמידה והתמודדות עם תופעת שינוי האקלים

ישנו מגוון רחב של מודלים המסבירים את תופעת שינוי האקלים ויכולים לשמש כלי לחיזוי תרחישים אפשריים, לבחינת השלכותיהם ולקבלת החלטות שיאפשרו להתמודד עם סכנות ובעיות הקשורות לשינויים המתרחשים. רוב המודלים הללו הם מודלים ממוחשבים המאפשרים למ להריץ סימולציות ולבחון תרחישים עתידיים אפשריים של שינויי אקלים וההשפעה האפשרית של פעילויות אנושיות שונות להתמודדות איתם. רובם של מודלים אלה זמינים לציבור הרחב, לפעמים בצורת מפות וגרפים ולפעמים כמודלים ממוחשבים אינטראקטיביים המאפשרים שינוי של משתנים מסוימים במודל. בחלק הבא נבחן כמה דוגמאות של מודלים ממוחשבים הזמינים לשימוש מקוון: ננתח את סוגי המודלים ואפשרויות השימוש בהם בשיעורי המדעים, את יתרונותיהם ואת מגבלותיהם.



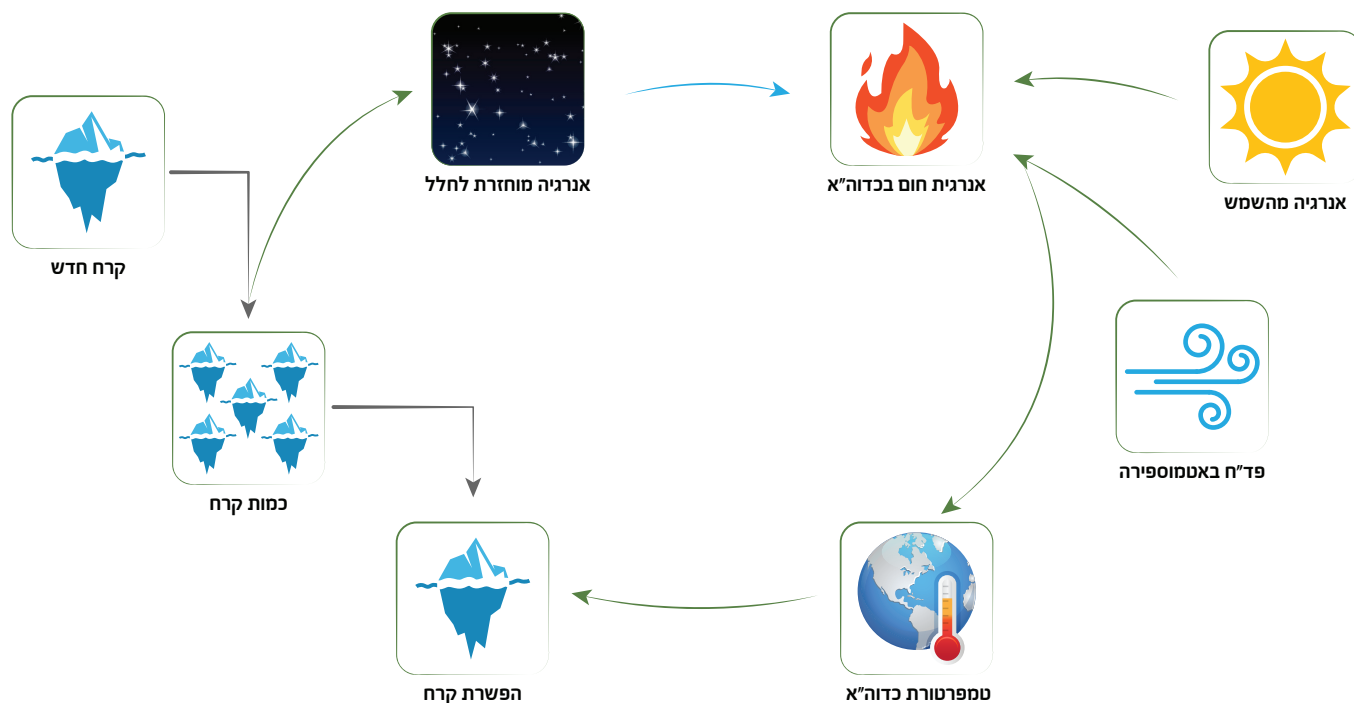
איור 2: צילום מסך מתוך מודל נטולוגו לשינוי אקלים
להבנת המודל לשינוי אקלים הכנסו ל- Model Info [באתר](#) של NetLogo

מאחר שפלטפורמת סייג'מודלר מאפשרת לתלמידים לבנות, לשמור ולשנות מודלים בעצמם, אפשר להשתמש בה להדגמה ולמידה של תהליך המידול. התלמידים יכולים לבנות מודל ראשוני של תופעה, לדוגמה של הגורמים המשפיעים על התחממות כדור הארץ. לאחר מכן התלמידים יבצעו פעילויות למידה שונות וישתמשו בסביבות ממוחשבות המאפשרות לבחון את המודלים השונים (כמו בפלטפורמת נטולוגו שהוצגה למעלה) על מנת לחקור לעומק את התופעה. בהמשך אפשר לתת לתלמידים הזדמנות לחזור למודל שבנו בסייג'מודלר ולבצע בו שיפורים על מנת שיהיה מעמיק ומדויק יותר. על ידי איסוף המודלים של התלמידים בשלבי הלמידה השונים אפשר גם להעריך את הידע וההבנה שלהם לאורך התהליך.

סוג נוסף של מודלים הוא אלה המציגים תהליכים של מעברי חומר או אנרגיה בתוך מערכות מורכבות, כמו מודל ממוחשב זה של חברת פנתאון המציג את מחזור הפחמן בטבע. המודל מאפשר לבחון את מצבורי הפחמן בספרות השונות בכדור הארץ ואת ההשפעה של שינוי רמת השימוש במקורות אנרגיה מאובנים מתכלים ורמת כריתת היערות על מעברי הפחמן בין הספרות. מודל זה גם מאפשר לנו לבצע תחזיות לעתיד לגבי כמות הפד"ח באטמוספירה כתוצאה משימוש במקורות אנרגיה מאובנים או

מתהווה). השימוש במודל זה אינו מצריך ידע בתכנות, אך מהצד האחר, המודל פשטני מאוד ואינו מציג את מורכבותה הרבה של תופעת שינוי האקלים (איור 2). מודל נוסף הממחיש את תופעת השפעת העוצמה של קרינת השמש והחזריותה אפשר למצוא במודל של PHET [בקישור זה](#).

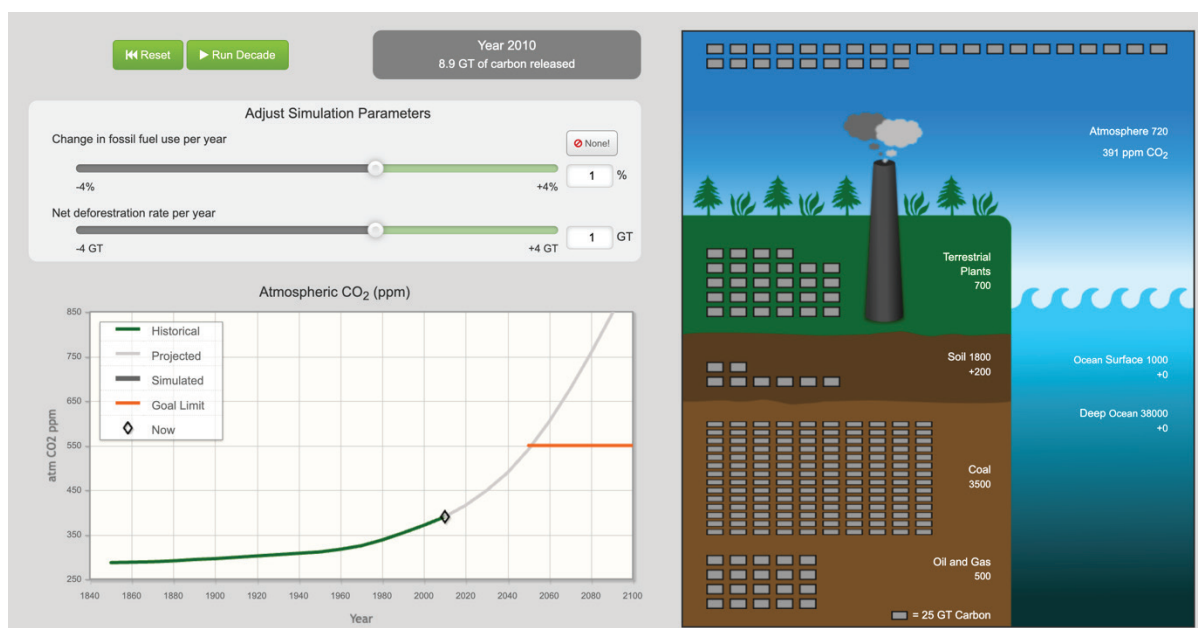
סוג נוסף של מודלים ממוחשבים הוא מודלים של דינמיקה מערכתית (System Dynamics Models). מודלים מסוג זה מאפשרים בחינה של שינויים לאורך זמן והשפעה של מעגלי משוב (פידבק) המעצימים או מחלישים את התופעה הנחקרת. סייג'מודלר ([SAGEMODELER](#)) היא פלטפורמה פתוחה, מתורגמת לעברית, המאפשרת בנייה של מודלים ושימוש בהם לבחינת קשר בין משתנים⁸. פלטפורמה זו מאפשרת לתלמידים להתנסות במודלים בצורה פשוטה (לבנות, לבחון, לשנות ולהשתמש), ללא צורך בתכנות בהקשר של שינוי אקלים, אפשר לתת לתלמידים לבחון ולשנות מודל [כזה](#) או לאפשר להם לבנות בעצמם מודל דומה לבחינת הגורמים המשפיעים על הטמפרטורה הגלובלית. גם במודלים אלה ישנה המגבלה של הפשטות-יתר של תופעה מורכבת כמו שינוי אקלים, אך היתרון הוא שהתלמידים יכולים בקלות לשנות את סוג ואופי הקשר בין המשתנים ובכך לקדם את הידע שלהם לגבי טבעם של מודלים (איור 3).



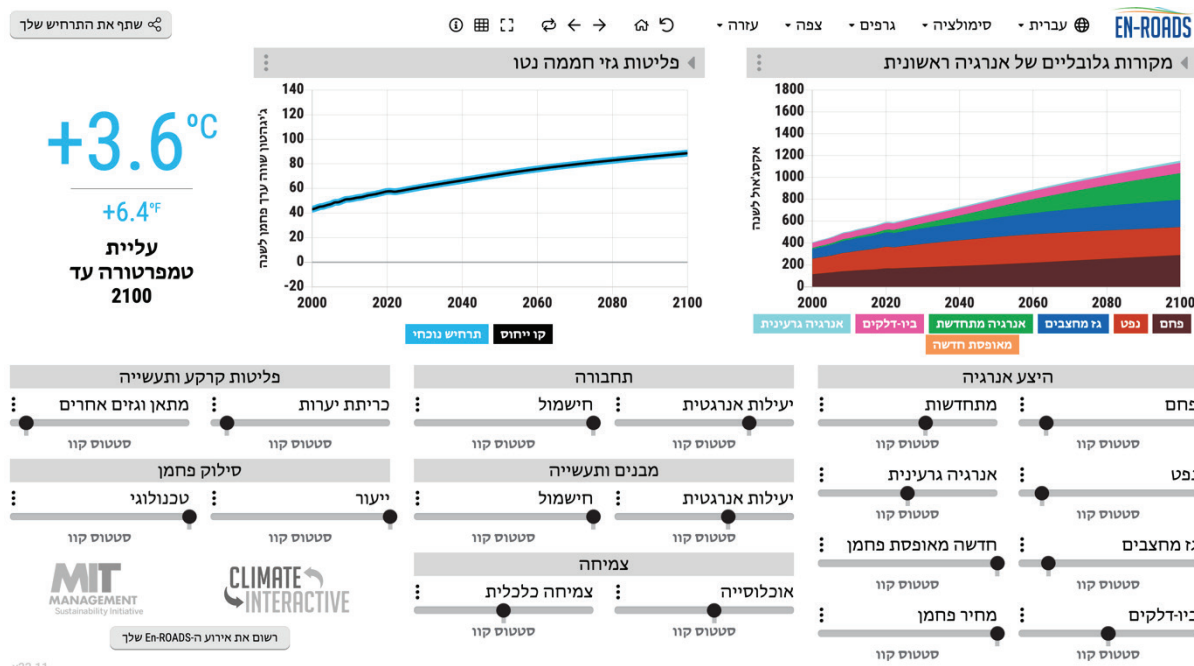
איור 3. צילום מסך מתוך מודל סייג'מודלר לטמפרטורה גלובלית

אך הוא מאפשר שימוש במודל ככלי לחיזוי תרחישים עתידיים אפשריים בצורה ויזואלית פשוטה (איור 4).

כריתת יערות. גם מודל זה אינו מציג במידה מספקת את מורכבות המערכות האקולוגיות והגורמים המשפיעים על מעברי הפחמן,



איור 4. צילום מסך של מודל פנתאון למחזור הפחמן



איור 5. צילום מסך של מודל אן-רואדס לשינוי האקלים

עם קישורים למודלים ממוחשבים נוספים והצעות לפעילויות מגוונות בנושא. חשוב לזכור שמודל זה מדגים היטב את מורכבות נושא שינוי האקלים ואת הגורמים הרבים המשפיעים עליו, ולכן הוא מתאים בעיקר לתלמידים בעלי יכולות גבוהות ויש להקדיש לשימוש במודל את זמן רב בתהליך הלמידה.⁴

בהקשר למודלים, עוד אמר הסטטיסטיקאי ג'ורג' בוקס¹, שסטטיסטיקאים (ומדענים..ת"ב), בדומה לאומנים, נוטים להתאהב במודלים שלהם. חשוב לזכור זאת כשאנו משתמשים במודלים מדעיים. עלינו להביא בחשבון שלמודלים יש יתרונות ומגבלות, ושהם תמיד משתנים ככל שהידע וההבנה שלנו מתקדמים. עם זאת, למידה על מודלים מדעיים ובעזרתם יכולה לתרום רבות לקידום הידע המדעי של התלמידים ולפיתוח ההבנה שלהם לגבי טבע המדע ואופי התהליך המדעי.

דוגמה אחרונה של מודל ממוחשב של שינוי האקלים הוא הפלטפורמה של אן-רואדס (En-ROADS)² הפתוח לשימוש גם בתרגום לעברית (איור 5). מודל זה מתאים לשימוש בכיתות הגבוהות למדעים, שכן הוא מורכב יותר וזיזאלי פחות. מודל זה משמש לחיזוי השפעות של החלטות, מדיניות וצעדים שונים על פליטת גזי חממה וטמפרטורה גלובלית. אפשר למצוא בפלטפורמה את מקורות הנתונים ששימשו לבניית המודל, וגם אפשר לשנות את סוג הגרפים המתקבלים. מודל זה יכול להתאים מאוד לפעילות כיתתית שבה כל קבוצת תלמידים תייצג קבוצה של בעלי אינטרס במהלך דיון על הצעדים הדרושים להתמודדות עם שינוי האקלים, כמו נציגי מדינות עולם שלישי, נציגי חברות האנרגיה, נציגי הארגונים הירוקים וכיוצא באלה. הסבר על פעילות בסגנון זה³ תמצא [בחוברת בנושא הוראת שינוי אקלים למורים בתיכון](#) שהכינו ד"ר נירית לביא-אלון וד"ר הגר ליס, יחד

2 ראו [סרטון הדרכה](#) לשימוש ב-En-ROADS.

3 בקובץ "פתרונות שינוי אקלים מעודכן עברית"

4 השימוש ב-En-Roads בחטיבת הביניים יצריך איפוס של חלק מן המשתנים ובחינת השינויים במעט משתנים על התופעה הנבחרת. עם זאת, בחינת מגוון המשתנים שמופיעים בסימולציה מלמדת על מורכבות שינוי האקלים.

מקורות

- 1 Box, G. E. P. & Hunter, W. G. (1978). *Statistics for Experimenters: An introduction to Design, Data analysis, and Model Building*. John Wiley & sons.
- 2 Bielik, T., Fonio, E., Feinerman, O., Golan R. T., & Levy S. T. (2021). [Working Together: Integrating Computational Modeling Approaches to Investigate Complex Systems](#). *Journal of Science Education and Technology*, 30 (40-57).
- 3 ארנברג ר. ואורעד י. (אוקטובר, 2018), [מודלים בהוראת המדעים](#). בלוג אגף מדעים, משרד החינוך.
- 4 Gouvea, J. & Passmore, C. (2017). [‘Models of’ versus ‘Models for’](#). *Science & Education*, 26, 49–63.
- 5 Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Achér, A., Fortus, D., ... Krajcik, J. (2009). [Developing a learning progression for scientific modeling](#): Making scientific modeling accessible and meaningful for learners. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 632–654.
- 6 Zangori, L., Peel, A., Kinslow, A., Friedrichsen, P., & Sadler, T. (2017). [Student development of odel-based reasoning about carbon cycling and climate change in a socio-scientific issues unit](#). *Journal of Research in Science Teaching*, 54, 1249-1273.
- 7 Samon, S., & Levy, S. T. (2017). [Micro–macro compatibility: When does a complex systems approach strongly benefit science learning?](#). *Science Education*, 101(6), 985-1014.
- 8 Bielik, T., Damelin, D., Krajcik, J. S. (2019). [Shifting the Balance: Engaging Students in Using a Modeling Tool to Learn about Ocean Acidification](#). *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 15(1).