

הדו"ח השישי של ה-IPCC - סקירה ודגשים פדגוגיים

ד"ר הגר ליס, אגף מדעים במזכירות הפדגוגית, משרד החינוך

דו"ח האקלים שישי של הפאנל הבין-ממשלתי לשינויי האקלים (IPCC) פורסם ב- 9.8.21 ומסמן אבן דרך משמעותית: לראשונה מאז תחילת העבודה של ה-IPCC ב-1988, הפנאל הבינלאומי אינו מותיר מקום לספק - הקשר בין פעילות האדם בכלל, ופליטת גזי חממה לאטמוספירה בפרט, לבין שינויי אקלים גלובליים הוא חד משמעי וללא עוררין. הדו"ח מבהיר שלמעשים שלנו **היום** יש השפעה ישירה ומשמעותית על תרחישי העתיד. לא נוכל למנוע את התחממות כדה"א, אבל יש לנו חלון הזדמנויות לצמצם את מידת ההתחממות ולמזער את הנזקים הנלווים שלה. הזמן לפעול הוא **כאן ועכשיו** וחלק מפעולה זו הוא במסגרת מערכת החינוך. לימודים על אודות משבר האקלים בבתי הספר, בתחומי הדעת השונים כמו מדע וטכנולוגיה, גאוגרפיה אדם וסביבה, ביולוגיה, כימיה, מדעי הסביבה, מדעי החברה ואזרחות, היסטוריה, שפות, מורשת ואמנויות, חינויים לחינוכו של דור שיפעל להצלת האנושות על פני כדה"א.

המסמך הזה מציע רעיונות לדיון בכיתה במהלך הוראת משבר האקלים לאור פרסום דוח ה-IPCC האחרון. הסקירה כוללת תרגום והסבר לגרפים המופיעים בדו"ח (בסקירה למקבלי החלטות) והצעות לשאלות לדיון ודגשים פדגוגיים, שמוצגים כשאלות (באדום) ותשובות (בשחור). **הצעות אלו אינן מהוות מערך שיעור בפני עצמן** אלא יכולות להוות בסיס לתכנון מערכי שיעור העוסקות בנושא משבר האקלים עם דגש על התמצאות מדעית ומיומנות קריאת גרפים. ניתן לראות סקירה של הדו"ח בעברית באתר [מדע גדול בקטנה של מכון ויצמן](#).

שימו לב: מבחינה רגשית, תוכן דו"ח ה-IPCC קשה ועלול לעורר חרדה אצל חלק מהתלמידים. חשוב מאוד להיות ערים לרגשות התלמידים ולהדגיש שהעתיד הוא בידיים שלנו (כפי שמציין חוקר האקלים ד"ר [זאנג](#)) ושיש לכל אחת ואחד מאיתנו חשיבות בטיפול במשבר האקלים. ניתן לקרוא על חרדת אקלים ודרכי התמודדות איתה [כאן](#) או [כאן](#).

תודה גדולה לפרופ' איתי הלוי, פרופ' עינת אהרונב, ד"ר רוחמה ארנברג ושרית אמיתי על החשיבה המשותפת ועל העריכה המדעית והלשונית של המסמך.

תוכן:

(א) מהו ה-IPCC ומהו הדו"ח האחרון שפורסם?

(ב) שימוש בשפה חד משמעית בדו"ח

(ג) שינויים בטמפרטורה העולמית הממוצעת של פני השטח של כדור הארץ ביחס לטמפרטורה העולמית

הממוצעת בין השנים 1850-1900

(ד) השפעות של גורמים שונים על טמפרטורת כדה"א

(ה) ביצד העתיד האקלימי עשוי להראות?

(ו) שינויי טמפרטורה ומשקעים בעולם

(ז) השלכות נוספות

(א) מהו ה-IPCC ומהו הדו"ח האחרון שפורסם?

הפאנל הבין-ממשלתי לשינוי האקלים או ה-IPCC (באנגלית: Intergovernmental Panel on Climate Change) הוא גוף בינלאומי של האו"ם, שהוקם בשנת 1988. מטרתו לספק מידע מדעי אובייקטיבי על אודות שינויי אקלים הנגרמים על ידי בני אדם, ההשלכות והסיכונים הנבעים מכך והפעולות העומדות לרשותינו על מנת לצמצם את ההשלכות הללו. כיום כ-195 מדינות חברות ב-IPCC ובינן ישראל.

ה-IPCC אינו מבצע מחקר מקורי ואינו עוקב אחר שינויי האקלים. תפקיד ה-IPCC הוא לסכם ולסקור את כל המידע המדעי העדכני על אודות שינויי אקלים המצוי בפרסומים מדעיים אשר עברו ביקורת עמיתים. סיכום זה מתפרסם בדו"ח הנקרא Assessment Report, ובעברית דו"ח הערכה. גם דו"ח ההערכה עצמו עובר ביקורת עמיתים ע"י מומחים בתחום, שלא היו שותפים לכתיבה. עד כה, מאז שנת 1990, פרסם ה-IPCC שישה דוחות. כל דו"ח מורכב משלושה חלקים. החלק הראשון של הדו"ח השישי, המתמקד בבסיס המדעי הפיזיקלי של שינויי אקלים, הוא זה שהתפרסם ב-9 לאוגוסט 2021. הדו"ח הנוכחי סוקר למעלה מ-14,000 מאמרים מדעיים ובכתיבתו שותפים יותר מ-200 מחברים. בפברואר-מרץ 2022 צפויים להתפרסם החלק השני של הדו"ח השישי אשר יעסוק בהשפעות משבר האקלים, פגיעות במערכות כדה"א ודרכי הסתגלות (של מערכות אקולוגיות ושל החברה האנושית), והחלק השלישי, שיעסוק במיתון שינויי אקלים (מיטיגציה).

הצעה לשאלות לדיון ודגשים:

- למעלה מ-200 מדענים היו שותפים לכתיבת הדו"ח במשך שלוש שנים. מדוע מספר כה גדול של מחברים שותפים לכתיבת דו"ח אחד?
מערכת האקלים היא מערכת מורכבת. ההבנה שלה והמחקר בתחום מחייבים שיתוף פעולה בין מדענים העוסקים במגוון רחב של תחומים: פיזיקה, כימיה, גיאולוגיה, ביולוגיה, מתמטיקה, סטטיסטיקה, מחשבים ועוד... מעבר לכך, בכל שנה יוצאים אלפי פרסומים בנושא. תהליך הכתיבה עצמו מלווה בדיונים ממושכים במטרה להגיע להסכמות של כל המחברים.
- מדוע הסקירה כוללת רק פרסומים שעברו ביקורת עמיתים?
ביקורת עמיתים (peer review) היא הליך שיפוט חיצוני לבחינת מחקר מדעי. ההליך מהווה שלב חשוב לפני פרסום תוצאות המחקר כמאמר מדעי. בתהליך ביקורת עמיתים, מומחים בתחום שבו עוסק המחקר בוחנים האם הוא ראוי לפרסום, או האם הוא צריך לעבור תיקונים טרם פרסומו. ביקורת עמיתים תורמת לאמינות של הידע המדעי ומטרתה לאתר אי-דיוקים, טעויות והטיות בפרסומים מדעיים.
- למה הדו"ח עצמו עובר לביקורת עמיתים?
גם סינתזה של ידע מדעי עלולה להיות מושפעת מהטיות, טעויות או אי-דיוקים. לכן יש חשיבות לביקורת עמיתים שבוחנת את האמינות של התוצר הסופי. דו"ח ה-IPCC רגיש במיוחד מבחינה פוליטית, כלכלית וחברתית ולכן חשוב לשמור על אובייקטיביות במידה מירבית.
- מדוע ביקורת עמיתים על פרסום מסויים נעשית ע"י מומחים שלא שותפים לכתיבת הפרסום?
כדי למנוע ניגוד אינטרסים ולהעלות את מידת האובייקטיביות.

ב) שימוש בשפה חד משמעית בדו"ח

מחברי הדו"ח השישי של ה-IPCC מסיקים כי קיים קשר סיבתי "חד-משמעי" בין פעילות האדם בכלל, ופליטת גזי חממה לאטמוספירה בפרט, לבין התחממות כדור הארץ, וזו גורמת לשינויים במערכות כדה"א שהם "חסרי תקדים" בהשוואה למאות או אפילו אלפי השנים האחרונות. למעשה, מאז פרסום הדו"ח הראשון של ה-IPCC ב-1990, זוהי הפעם הראשונה שדברי ה-IPCC הם חד משמעיים ואינם מותירים מקום לספק.

מעניין להשוות את ניסוח הדו"ח הנוכחי לניסוחים בדו"חות הקודמים בהקשר של הקשר הסיבתי בין התחממות כדה"א לפליטת גזי חממה ע"י האדם. בשנים קודמות השתמשו במילים כמו "מסוגל" (1990), "עשוי" (1995), "כנראה" (2001), "התכנות סבירה" (2007) ו"התכנות גבוהה" (2013). אבל בדו"ח הנוכחי מופיע המונח "**חד משמעי**" (2021). [בקישור](#) תוכלו למצוא טבלה המפרטת את הביטויים המדויקים באנגלית.

הצעה לשאלות לדין ודגשים:

- **מדוע מדענים בדרך כלל זהירים בתיאור המסקנות שלהם (שימוש במילים כמו "ייתכן" או "עשוי" או "מרמז")?**
בהרבה מקרים אפשר למצוא יותר מהסבר אחד לתוצאות מסוימות. כמו כן יש יותר מדרך אחת לקשר בין גורמים (האם X גורם ל Y או אולי Y גורם ל X או אולי X ו-Y קשורים לגורם שלישי וכו...). ניתן לתת דוגמה מניסויים שהתלמידים עצמם עשו בכיתה: למשל, בניסוי הבוחן את השפעת מלח על נביטת זרעים ניתן למצוא כמה וכמה הסברים לכך שבטיפול מסוים הזרעים לא נבטו - הזרעים לא נבטו כי הוספתי מלח, או הזרעים לא נבטו כי שכחתי להשקות, או הזרעים לא נבטו כי היה חורף והטמפרטורה הייתה נמוכה וכו... ולכן חשוב מאוד לבודד משתנים עד כמה שאפשר בניסוי בקרה. במקרה של מערכות אקלים והשפעת האדם אין את האפשרות להעמיד קבוצת בקרה ובנוסף, ככל שמדובר על מערכות יותר מורכבות, כך גם יותר קשה להראות קשרים חד משמעיים בין הגורמים. כמו כן, רעיונות מדעיים מתעדכנים כל הזמן כשמתגלים ממצאים חדשים.

- **מה מלמד אותנו השימוש במונח "חד משמעי" בדו"ח ה-IPCC השישי?**
השימוש במונח "חד משמעי" נדיר בשפה המדעית. השימוש במונח מעיד על מידת הוודאות ועל ההסכמה הרחבה בקרב מדעני אקלים. כמו שתיאוריית האבולוציה או הקשר בין עישון סיגריות לבין הסיכוי לחלות בסרטן ריאות מקובלים כעובדה בעולם המדעי, כך גם הקשר הסיבתי בין פליטת גזי חממה ע"י האדם לבין התחממות גלובלית ומשבר האקלים. מידת הוודאות עולה כיוון שקיים גוף נתונים הכולל ראיות רבות ובלתי תלויות, אשר תומכות באותה המסקנה. כאן ההזדמנות לחזק את ההבנה של המונחים - עובדה, השערה, תיאוריה מדעית וכו... [\(ראו יחידת הוראה דיגיטלית מבוא למשבר האקלים שיעור 8, ראו סרטון\).](#)

- **האם יש קונצנזוס מדעי לגבי הקשר בין בעירת דלקים פוסילים ע"י האדם לבין שינויי אקלים? כדאי לדון במה המשמעות של הביטוי "קונצנזוס מדעי".**

קונצנזוס מדעי אינו הצבעה. אלא הצטברות של ראיות וממצאים התומכים בתיאוריה, ניסיונות רבים וחזקים להפריכה שנכשלו וסימולציות ומודלים שהניבו תחזיות שהתממשו. הטלת ספק היא חלק חיוני של התהליך המדעי. תיאוריות מדעיות כמעט אף פעם לא מגיעות לוודאות מלאה ותמיד יש לעודד את הניסיונות להפריכן. לעומת זאת, כאשר יש לקבל החלטות של מדיניות ציבורית אין צורך לחכות לביטחון של 100% וגם 90% מספיקים במיוחד כאשר הסיכון הטמון באי קבלת החלטות ושינוי המדיניות הוא גדול.

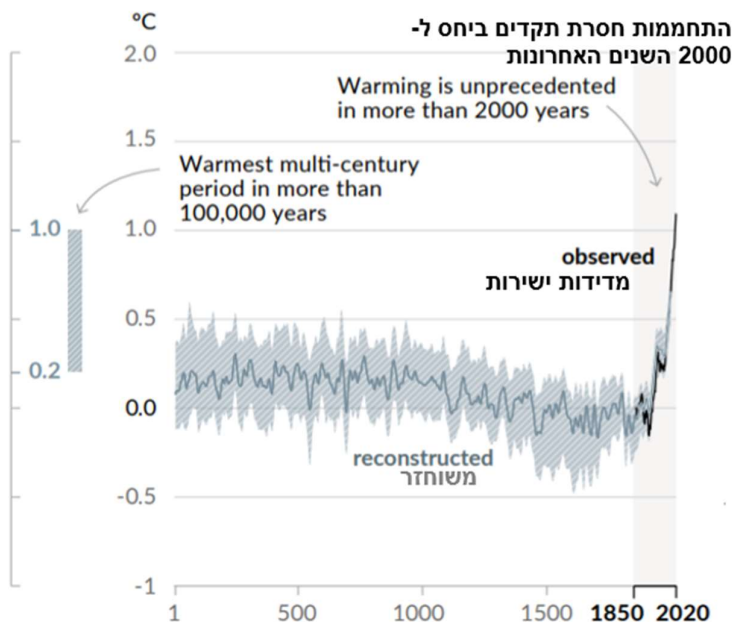
**ג) שינויים בטמפרטורה העולמית הממוצעת של פני השטח של כדור הארץ ביחס
לטמפרטורה העולמית הממוצעת בין השנים 1900-1850**

הסבר מקדים: מדעני אקלים בדרך כלל מציגים את השינוי בטמפרטורה (או מה שמכונה אנומליית טמפרטורה) במקום טמפרטורה מוחלטת. השינוי בטמפרטורה מציג את הסטייה של הטמפרטורה הנמדדת מערך מוגדר - בדרך כלל ממוצע ארוך טווח. ערכים חיוביים מעידים על עלייה בטמפרטורה ביחס לממוצע בעוד שערכים שליליים מעידים על ירידה. להסבר נוסף, היכנסו [לקישור](#) (אנגלית) או צפו [בסרטון](#) בין 3:40 - 5:26 דקות (אנגלית, ניתן להפעיל תרגום אוטומטי).

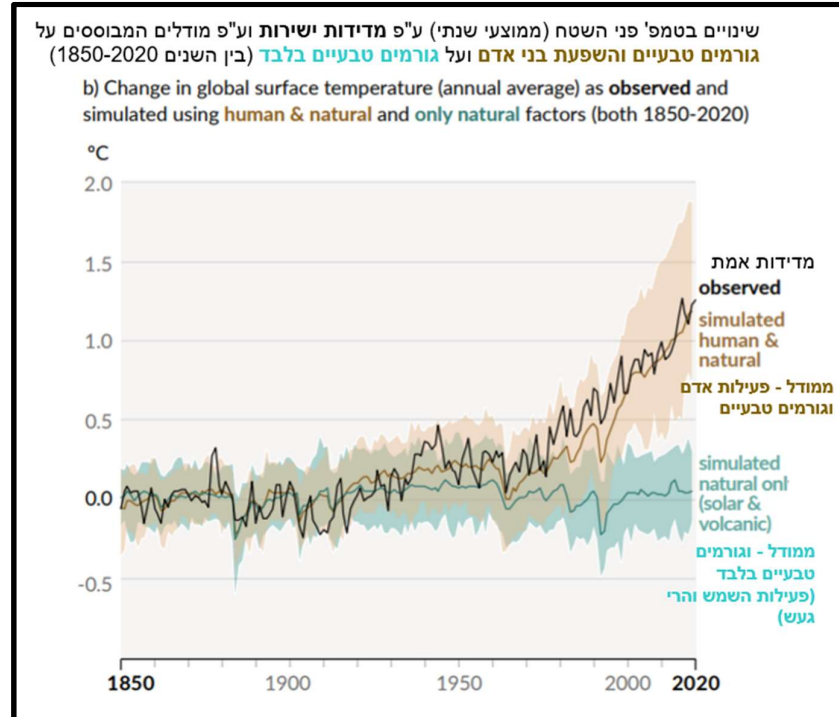
בכל דו"ח של ה-IPCC הטמפרטורה העולמית הממוצעת (להלן טמפרטורה ממוצעת) בין השנים 1900-1850 מהווה קו-ייחוס, שמולו מכמתים את מידת התחממות. בחירה זו אינה שרירותית. כדי לכמת את השפעת פעילות האדם על טמפרטורת כדור הארץ, צריך להשוות את הטמפרטורות הנמדדות היום לאלו ששררו על פני כדור הארץ לפני התערבות האדם (אך עדיין בנוכחותו). מוסכם על מדענים להשוות לתקופה שקדמה למהפכה התעשייתית. חשוב לזכור כי ככל שהולכים אחורה בזמן, יש בידינו פחות נתונים על מדידות ישירות של טמפרטורה. לכן הגדרת קו הייחוס של ה-IPCC היא פשרה בין האמינות של המדידות הישירות של הטמפרטורה לבין בחירת תקופה שמייצגת את כדור הארץ לפני המהפכה התעשייתית. לדיון יותר מעמיק ראו את [התשובה של צוות ה-IPCC](#) (עמוד 7, אנגלית)

שינוי בטמפ' פני השטח (ממוצע של עשור) ע"פ נתונים משוחזרים (1-2000) ומדידות ישירות (1850-2020)

a) Change in global surface temperature (decadal average) as reconstructed (1-2000) and observed (1850-2020)



הסבר גרף 1a : ציר ה-X מתאר זמן (בשנים) משנת 1 לספירה ועד הווה. ציר ה-Y מציג את השינוי בטמפרטורה ביחס לטמפרטורה הממוצעת בין השנים 1900-1850. ערכים חיוביים מעידים על התחממות ביחס לטמפרטורה הממוצעת וערכים שליליים מעידים על התקררות ביחס אליה. הקו האפור מייצג [טמפרטורות משוחזרות מהעבר](#). האזור הצבוע סביב הקו מציג את טווח האי-וודאות של שחזור זה. הקו השחור מתאר שינויים בטמפרטורה שהתקבלו ממדידות ישירות. ההתחממות בהווה היא חסרת תקדים בהיסטוריה של 2000 השנים האחרונות. ניתן לראות שעד 2020, כדור הארץ התחמם מעל מעלה אחת ביחס לטמפרטורה הממוצעת בין השנים 1900-1850.



הסבר גרף 1b: ציר ה-X מציג זמן בין השנים 1850 ל-2020. ציר ה-Y מציג שינוי בטמפרטורה ביחס לטמפרטורה הממוצעת בין השנים 1850-1900. כל נקודה מייצגת ממוצע שנתי של טמפרטורה. הקו השחור מראה מדידות ישירות, בעוד שהקווים האחרים (ירוק וחום) מייצגים תוצאות חישוביות המבוססות על מודלים שלוקחים בחשבון גורמים שונים אשר משפיעים על טמפרטורת כדור הארץ:

- * הקו הירוק מייצג מודל בו שינויים בטמפרטורת כדור הארץ מושפעים רק מגורמים טבעיים - פעילות הרי געש ושינויים בפעילות השמש. ניתן לראות שמודל זה אינו צופה שינוי משמעותי בטמפרטורה ממוצעת.
- * הקו החום מייצג מודל בו שינויי הטמפרטורה מושפעים הן מגורמים טבעיים והן מפעילות האדם.
- * האזורים הצבועים מראים את טווח אי-הוודאות של הנתונים.

הצעה לשאלות לדיון ודגשים:

- תארו את הגרפים: מה מייצג ציר X? מה מייצג ציר Y? מה מייצג כל עקום?
 - מהי המשמעות של ערכים שליליים/חיוביים בשינוי בטמפרטורה (ציר Y)?
- התשובות לשאלות הנ"ל נמצאות למעלה. עם זאת, כיוון שהגרפים מורכבים לפני דיון על המסקנות והפרשנות כדאי להקדים ולהבין מה הם מציגים.
- בגרפים ניתן לראות אזורים צבועים אשר מסמנים את טווח האי-וודאות. מה הכוונה לאי-וודאות במובן המדעי? ביומיום כאשר אנו אומרים שמהו לא ודאי, אנחנו מתכוונים למשהו שלא יודעים או בטוחים לגביו. בעולם המדע, לביטוי "אי ודאות" יש משמעות שונה, המתארת את רמת הביטחון שיש למדענים בממצא או בתוצאה מסוימת. האי ודאות יכולה לנבוע ממכשירי המדידה, למשל כאשר מודדים טמפרטורת גוף האי וודאות נובעת מחוסר הדיוק במדידה. הערכים המתקבלים במדידות חוזרות מפוזרים לרוב סביב הערך האמיתי שמנסים לאמוד וטווח הערכים המתקבל הוא אי הוודאות של המדידה.

- **מדוע מציגים שינוי בטמפרטורה ולא טמפרטורה ממוצעת?**
השינוי בטמפרטורה (או מה שמכונה אנומליית טמפרטורה) היא דרך נוחה להציג סטייה (עלייה או ירידה) ביחס לנקודת ייחוס מסוימת. נקודת הייחוס שהוחלט עליה היא ממוצע הטמפרטורה הרב-שנתית בין השנים 1850-1900 (ראו שאלה הבאה). בנוסף, כאשר אנו מחשבים ממוצע של טמפרטורות באזור מסוים, למיקום תחנות המדידה יש השפעה משמעותית על החישוב. למשל, בתחנות הממוקמות באזורים גבוהים או באזורים כפריים נמדדות בדרך כלל טמפרטורות יותר נמוכות מאלו הנמדדות בתחנות הממוקמות בעמקים או באזורים עירוניים.. אבל כאשר אנו מסתכלים על שינוי הטמפרטורה ביחס לממוצע, הגורמים הללו פחות משמעותיים. להמחשה - הטמפרטורות בהר ובעמק יהיו שונות זו מזו במהלך הקיץ. אבל, הסטייה מהממוצע בשני המקומות לעומת עונות הקיץ בשנים קודמות יכולה להיות זהה, כלומר, מדובר באותו הפרש טמפרטורות.

- **בכל דו"ח של ה-IPCC, נעשית השוואה לטמפרטורה הממוצעת בין השנים 1850-1900. והיא מהווה "קו ייחוס" או קו להשוואה של מידת ההתחממות. מה החשיבות של קו ייחוס? מדוע קו-הייחוס קבוע לכל אורך דו"ח ה-IPCC?**
קו ייחוס מאפשר לנו לכמת שינויים ביחס אליו. בבחירת קו הייחוס כדאי לבחור ערך שהוא בעל משמעות. במקרה של ממוצע הטמפרטורה הגלובלית, לקו הייחוס ישנה משמעות: האיזון בין מהימנות מדידות טמפרטורה לבין השפעת האדם על האקלים, כפי שהוסבר למעלה. לאורך כל דו"ח ה-IPCC יש השוואה לתקופה בה בני אדם היו קיימים אבל עדיין לא השפיעו בצורה משמעותית על האקלים.

- **ביחס לממוצע טמפ' בין השנים 1850-1900, כדור הארץ התחמם במעט יותר ממעלה אחת (גרף 1a, גרף 2a). מדוע עליה של מעלה אחת כל כך חמורה ומדאיגה? (אפשר לומר למשל, "מי מרגיש את ההבדל בין 24 ל-25 מעלות?").**
*חשוב להבהיר שלא מדובר על הבדל בין 24 ל-25 מעלות במהלך היום אלא על עלייה ממוצעת של מעלה אחת בכל העולם. כפי שגרף 5 מראה (ראו בהמשך), חלק מהאזורים בעולם יתחממו ביותר ממעלה אחת וחלק יתחממו בפחות ממעלה אחת (ניתן לראות בגרף 5 למשל, שהאזור הארקטי מתחמם הרבה יותר מאזור קו המשווה). לדוגמה, האזור בו ישראל נמצאת צפוי להתחמם ביותר ממעלה אחת.

*אנחנו כבר עדים לנזק שגורמת עלייה ממוצעת של מעלה אחת. לפי הערכות המדענים, אירועי מזג האוויר הקיצוניים ואסונות הטבע שהתרחשו בקיץ 2021 הם תוצאה של שינוי במערכת האקלים המלווה את עליית הטמפרטורה הממוצעת בעולם. על פי התחזיות אפילו עלייה בחצי מעלה בממוצע עולמי היא משמעותית. לדוגמה ההבדל בין עלייה של 1.5 מעלות צלזיוס לעלייה של 2.0 מעלות צלזיוס, הוא בקיום או כליה של שוניות אלמוגים, בקיום או בהיעדר קרח ימי בקיץ באזור הארקטי. (אפשר למצוא דוגמאות נוספות מלוות באירועים באתר של ה-[New York Times](http://www.nytimes.com))

- **בגרף b1 אנו רואים תחזיות על פי מודלים שונים. מודלים הם כלי חיוני בחקר מערכות מורכבות כמו מערכת האקלים. מהו מודל וכיצד הוא משמש מדענים לחקר האקלים?**
מודל הם ייצוג של מערכות מורכבות או תהליכים מורכבים. מודל הינו מערכת פשוטה יחסית המדמה במאפייניה החשובים מערכת מסובכת יותר, כמו מערכת אקלים. חשוב להדגיש שמודל הינו קירוב של המציאות ולא המציאות כולה. במדע מודלים הם כלי רב עוצמתי שמסייע לנו להבין ולהסביר תהליכים וגם לעשות תחזיות לעתיד. הם אחד מהכלים של מדענים, לצד ביצוע ניסויים ותצפיות (ראו יחידת הוראה מבוא למדעים, משבר האקלים שיעור 6).

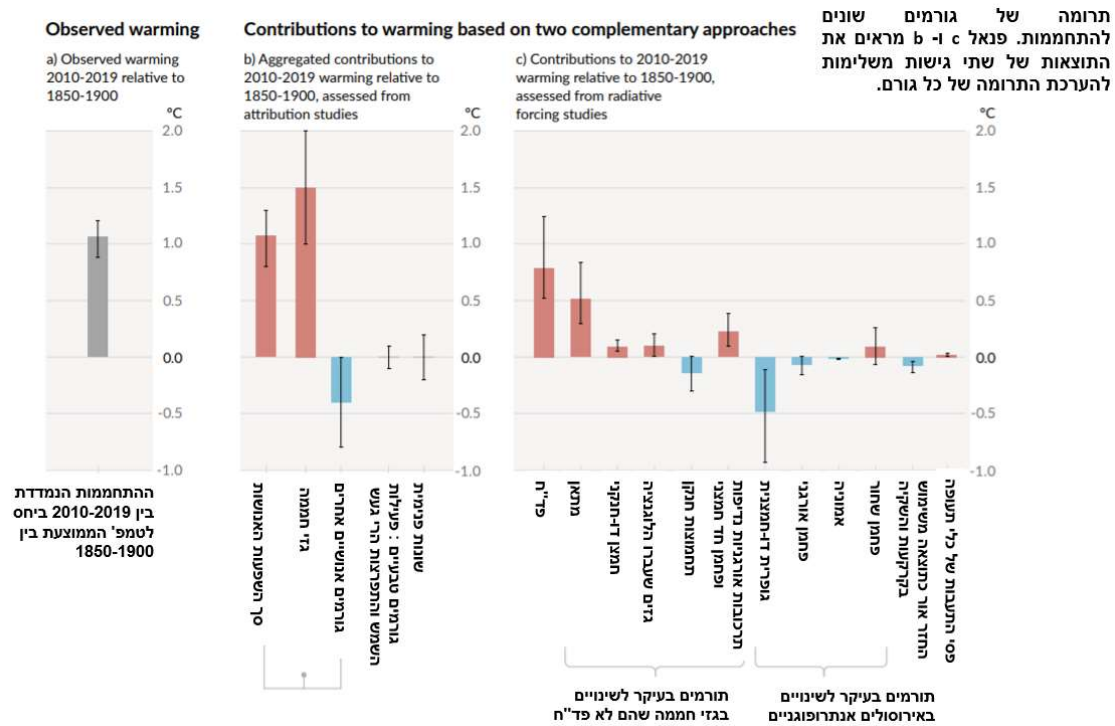
מודלים של אקלים הם חלק מרכזי ובלתי נפרד מחקר אקלים כדור הארץ. הם מסייעים למדענים להבין את מערכת האקלים בעבר הרחוק ובהווה, וגם לחזות את האקלים העתידי. המודלים מתארים תהליכים פיזיקליים, כימיים וביולוגיים במערכת כדור הארץ באמצעות משוואות. ישנן רמות מורכבות שונות של מודלים. הפשוטים ביותר מבוססים על מאזני אנרגיה בין קרינת אור המגיעה מהשמש לבין קרינת חום הנפלטת מכדור הארץ. מודלים מורכבים יותר כוללים מעברי חומר ואנרגיה באטמוספירה ובאוקיינוסים, ייצוג של עננים ומשקעים,

ייצוג של קרחונים, וכן לולאות משוב בין האקלים לצמיחה ולמחזור הפחמן. עם השנים המודלים נעשים מורכבים ומדויקים יותר הודות לחקר האקלים בעבר הגיאולוגי של כדור הארץ, הבנה עמוקה יותר של הגורמים ושל התהליכים המשפיעים על האקלים, ושיפור בכוח המחשוב. חשוב לזכור שמודלים של אקלים אינם מושלמים ואינם "המציאות", אלא קירוב של המציאות.

- בגרף 1b מוצגים שלושה עקומים - מה מבטאת כל עקומה? מדוע לדעתכם. כל שלושת העקומות מוצגות על מערכת צירים משותפת?

בשחור מופיעות מדידות ישירות (של שינויים בטמפרטורה), ובחום וירוק תוצאות שהתקבלו מחישובים של מודלים. העקומות מוצגות על מערכת צירים משותפת כדי להשוות את התחזיות של מודלים לנתוני אמת. זאת במטרה להעריך את איכות המודל ואת התרומה היחסית של גורמים שונים להתחממות כדה"א. במקרה שלפנינו, ניתן לראות כי מדידות הטמפרטורה במאה וחמישים השנים האחרונות אינן ניתנות להסבר על ידי מודלים הכוללים אך ורק תהליכים טבעיים (הקו הירוק וטווח אי-הוודאות שלו). על מנת לשחזר את המדידות במודלים האקלימיים, יש לקחת בחשבון גם שינויים הנובעים מפעילות האדם כמו פליטות של פד"ח וגזי חממה אחרים לאטמוספירה, (הקו החום וטווח אי-הוודאות שלו).

(ד) השפעות של גורמים שונים על טמפרטורת כדור הארץ



הסבר גרף 2: התחממות כדה"א נגרמת בעיקר מפליטת גזי חממה לאטמוספירה כתוצאה משריפת דלקים מאובנים. גרף a2 מראה שבעשור האחרון כדה"א ההתחמם במעלה אחת בממוצע לעומת הטמפרטורה הממוצעת בין השנים 1850-1900. גרפים b2 ו-c2 מציגים את הגורמים השונים אשר משפיעים על טמפרטורת כדה"א ואת התרומה של כל אחד מגורמים אלו להתחממות. ההבדל בין גרפים b2 ו-c2 הוא השיטה להערכת התרומה של כל אחד מהגורמים להתחממות כדה"א. בגרף b2 מוערכת התרומה על ידי בחינת ההבדלים בטמפרטורה בין מודלים הכוללים את הגורם שאותו רוצים להעריך לבין מודלים שאינם כוללים אותו. בגרף c2 מוערכת התרומה של כל גורם על ידי השפעתו על

מאזן האנרגיה של פני השטח והאטמוספירה של כדה"א. גורם בעל השפעה חיובית על מאזן האנרגיה (למשל, לכידת יותר קרינת חום) יגרום להתחממות, בעוד שגורם בעל השפעה שלילית (למשל, החזר יותר מאנרגיית השמש לחלל) יגרום להתקררות.

הצעה לשאלות לדיון ודגשים:

- **הסבירו מה ההבדל בין העמודות הכחולות לבין העמודות האדומות בגרפים b2 ו-c2?**
העמודות האדומות מייצגות גורמים התורמים להתחממות של כדה"א (כגון פד"ח ומתאן) בעוד שהעמודות הכחולות מייצגות גורמים התורמים להתקררות של כדה"א (לדוגמה אירוסולים).
- **פעילות האנושות, ובפרט שריפת דלקים פוסיליים, גורמת להתחממות של כדה"א. בדו"ח כותבים שכיום ריכוז הפד"ח באטמוספירה הוא הגבוה ביותר בשני מיליון השנים האחרונות וריכוזי המתאן הם הגבוהים ביותר ב-800,000 השנים האחרונות. בגרף b2 העמודה השנייה משמאל מראה את צפי ההתחממות כתוצאה מעליה בריכוז גזי החממה באטמוספירה, על פי מודלים אקלימיים. צפי ההתחממות גדול יותר מההתחממות שנמדדה בפועל (עמודה שחורה בגרף a2). הציעו הסבר לממצא.**
- **כפי שניתן לראות בגרף b2 וגרף c2, ישנם גורמים התורמים להתקררות של כדה"א (עמודות כחולות). התקררות זאת גורמת להקטנת מידת ההתחממות הנגרמת כתוצאה מפליטת גזי חממה. כך, אם נחסיר מהעמודה האדומה המייצגת את השפעת גזי החממה (עמודה שנייה משמאל בגרף b2) את העמודה הכחולה השלילית (עמודה שלישית משמאל בגרף b2), תתקבל העמודה האדומה השמאלית ביותר (בגרף b2), המייצגת את ההשפעה הכוללת, והיא דומה מאד בגודלה לעמודה השחורה בגרף 2a. דוגמה לפעילות אנושית הגורמת לקירור, היא פליטת גופרית דו-חמצנית (ראו גרף b2). חומר זה מזהם אוויר הפוגע בבריאות האדם וכשהוא מתחמץ עם מים, הוא אף מעורב ביצירת גשם חומצי וחלקיקים אטמוספריים. חלקיקים אלו מחזירים קרינת שמש לחלל (במקום שזו תיבלע על ידי פני השטח ותיפלט כחום) וכך מקררים את כדה"א (למידע נוסף אודות חלקיקים והשפעתם על אקלים [לחצו כאן](#)). בנוסף לחלקיקים, גם לפליטת אוזון (נמצאת תחת הכותרת של גורמים אנושיים אחרים בגרף b2) יש השפעה מקררת.**
נקודה נוספת שמעניינת לדיון היא השינוי בשימושי קרקע (מה שמכונה באנגלית "land use"). מצד אחד חקלאות וכריתת יערות יכולים לגרום לעלייה בריכוז הפד"ח באטמוספירה. מצד שני, לכריתת יערות יש השפעה על הצבע של פני השטח של כדה"א, שהופך מירוק כהה (בולע יותר קרינה) לבהיר יותר (בולע פחות קרינה), ובכך תורם להתקררות. למידע נוסף על צבע פני השטח של כדה"א והשפעתו על התחממות גלובלית, ראו [כתבה של מכון דוידסון על אלבדו](#) או [סרטון](#) על אלבדו (עברית).
- **כדאי להקדיש זמן לדיון במאפיינים של גזי חממה שונים ומקורם. ניתן גם לעשות פעילות בנושא טביעת רגל פחמנית. בהקשר של הגרף - מלבד פליטת פד"ח משריפת דלקים מאובנים, פליטת גזי חממה אחרים כגון מתאן וחמצן דו חנקני (גזי חממה הרבה יותר חזקים מפד"ח אך נמצאים בריכוזים יותר נמוכים באטמוספירה) תורמים אף הם להתחממות. ריכוז גז המתאן באטמוספירה עלה בחדות בשנים האחרונות בעיקר כתוצאה מפעילות חקלאית תעשייתית (בקר), והובלה של נפט וגז טבעי. למידע נוסף אודות מתאן קראו את [הכתבה של מכון דוידסון](#) והעזרו במחשבון טביעת הרגל הפחמנית במוזיאון הטבע באוניברסיטת תל אביב [בקישור](#).**

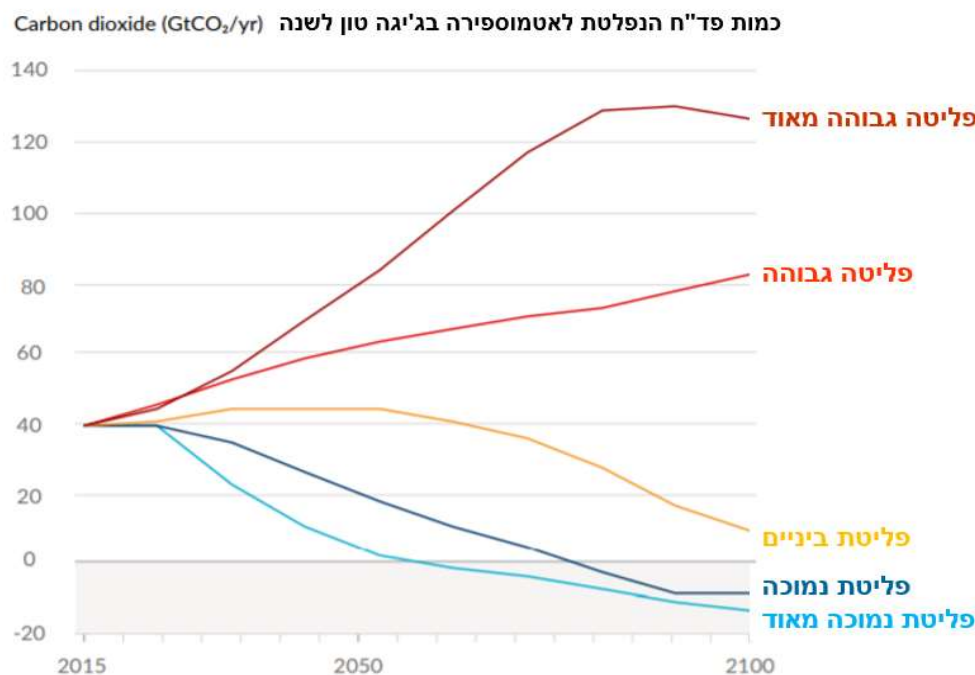
ה. כיצד העתיד האקלימי עשוי להראות?

כיוון שהגורם העיקרי לשינויים באקלים כדה"א במאות השנים האחרונות הוא פעילות אנושית בכלל ופליטת גזי חממה כתוצאה משריפת דלקים מאובנים בפרט, העתיד האקלימי תלוי בעיקר בפעילות האדם. בדו"ח ה-IPCC בוחנים חמישה תרחישים שונים של פליטות פחמן עתידיות. התרחישים מבוססים על מודלים אקלימיים הכוללים גורמים כגון גידול האוכלוסייה, התפתחות כלכלית וחברתית במדינות העולם ומדיניות בנושא אנרגיות חלופיות ודלקים מאובנים.

תרחישי פליטות:

1. פליטה גבוהה מאוד של גזי חממה - הכפלה של ריכוז פד"ח באטמוספירה עד 2050.
2. פליטה גבוהה של גזי חממה - הכפלה של ריכוז פד"ח באטמוספירה עד 2100.
3. פליטת ביניים - פליטת גזי חממה נשארת כפי שהיא היום עד אמצע המאה הנוכחי ואז יורדת.
4. פליטה נמוכה - "net zero", אין הצטברות נוספת של גזי חממה באטמוספירה, וריכוזם נשאר קבוע.
5. פליטה נמוכה מאוד - ירידה בריכוז גזי החממה באטמוספירה "negative emissions" או "פליטות שליליות".

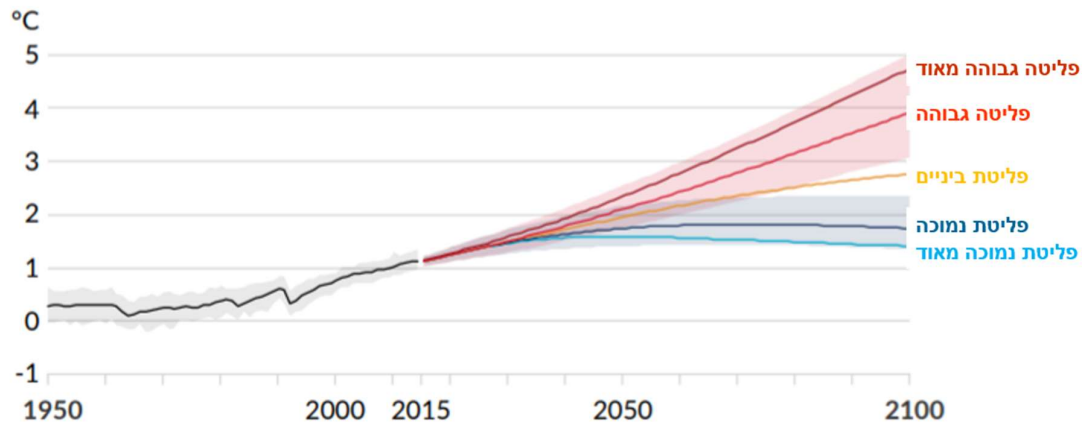
בגרפים הבאים ניתן לראות את כמות הפד"ח הנפלט לאטמוספירה מדי שנה על פי כל אחד מהתרחישים הללו (גרף 3) ואת התחזיות לשינויים בטמפרטורה הממוצעת של כדה"א על פי כל אחד מהתרחישים (גרף 4).



הסבר גרף 3: ציר X מתאר זמן משנת 2015 עד שנת 2100. ציר Y מתאר את כמות הפד"ח הנפלטת לאטמוספירה ביחידות של ג'יגה-טון לשנה (ג'יגה טון = 10^{12} ק"ג). בגרף מוצגים נתונים היסטוריים של פליטת פד"ח ותחזיות עתידיות. עלייה של כמות הפד"ח הנפלטת לאטמוספירה על פי כל אחד מתרחישי הפליטות מוצגת בצבעים שונים.

שינוי בטמפרטורת פני שטח ביחס לטמפ' ממוצעת בין השנים 1900-1850

a) Global surface temperature change relative to 1850-1900



הסבר גרף 4: הגרף מבוסס על תרחישי הפליטות המוצגים בגרף 3. ציר X מתאר זמן מ-1950 עד שנת 2100. ציר ה-Y מתאר את השינוי בטמפרטורה הממוצעת ביחס לזו של השנים 1900-1850. לכל תרחיש פליטות יש תגובת התחממות, המבוססת על מודלים אקלימיים. האזור הצבוע סביב כל עקום מייצג את תחום אי-הוודאות של המודל. העקום השחור מראה נתונים היסטוריים של טמפרטורה ממוצעת. עלייה של הטמפרטורה על פי כל אחד מתרחישי הפליטות מוצגת בצבעים שונים.

הצעה לשאלות לדיון ודגשים:

- כיצד ניתן להעריך את מידת ההתחממות הנגרמת על ידי ריכוז מסוים של פד"ח באטמוספירה? כלומר איך ניתן "לתרגם" עלייה בריכוז פד"ח לעלייה בטמפרטורה?

המודלים האקלימיים מביאים בחשבון את מכלול התגובות והמשוברים החיוביים והשליליים הנגרמים כתוצאה מעלייה בריכוז הפחמן הדו-חמצני והתחממות כדה"א. משוברים חיוביים גורמים להמשך ההתחממות (למשל ההתחממות גוררת עלייה בריכוז אדי המים באטמוספירה, אשר גורמים להתחממות נוספת בשל היותם עצמם גז חממה). משוברים שליליים בולמים את ההתחממות וגורמים להתקררות (למשל עלייה בעננות בעקבות התחממות גורמת להתקררות בגלל שהעננים מחזירים קרינה בחזרה לחלל). כאשר לוקחים את הגורמים הנ"ל בחשבון ניתן לבוא את תגובת מערכת האקלים - ממוצע הטמפרטורה והמשקעים בכל נקודה על פני כדה"א. השינוי בטמפרטורה הממוצעת מחושב על פי ממוצע השינויים המקומיים. בתוצאות המודלים משתמשים גם כדי להגדיר את רגישות לאקלים, שהיא שיעור ההתחממות הנובע מהכפלת ריכוז הפד"ח באטמוספירה, כלומר בכמה מעלות תשתנה הטמפרטורה אם ריכוז הפד"ח יוכפל מריכוז נתון. בנוסף למודלים, משתמשים המדענים במידע מהעבר הקרוב והרחוק של אקלים כדה"א, וכן בנתונים מההווה. היכולת להעריך את רגישות לאקלים הולכת ומשתפרת ככל שהמדענים מעמיקים את ההבנה במערכת האקלים.

- אם נצליח להוריד פליטות פד"ח ונתקדם ע"פ התרחיש של פליטות נמוכות או נמוכות מאוד, ניתן לראות שהטמפרטורה הממוצעת תתייצב (ראו גרף 4). מהסתכלות על גרף 3, מתי שינוי בפליטות חייב להתרחש כדי שנתקדם לפי אחד מהתרחישים הנ"ל?

בהווה או בעתיד המאוד קרוב (2025). זו סיבה אפשרית לאופטימיות, כיוון שיש עדיין זמן להימנע מהתרחישים הגרועים ביותר. מכאן, אפשר לעבור ולדון בשאלות המופיעות בהמשך.

- כיצד ניתן לפעול כדי להגיע לתרחיש של פליטות שליליות?
בדיון אפשר להתייחס לכיוונים שונים כגון (ראו יחידת הוראה בנושא משבר האקלים, יחידה 4, פתרונות

מניעת הפליטות - מיטיגציה (מיתון)

- צמצום פליטות עתידיות. זו פעילות שמטרתה למנוע, להפחית או לדחות שינויי אקלים בעיקר על ידי הפחתה של פליטות גזי חממה לאטמוספירה.
- ◀ שימוש באנרגיה נקייה
 - ◀ מדיניות (למשל מס פחמן, סבסוד אנרגיה נקייה)
 - ◀ התייעלות אנרגטית (תעדוף תחבורה ציבורית, מבנים חסכוניים באנרגיה וכו')
 - ◀ שינוי הרגלים (תחבורה, תזונה, צרכנות וכו')

הורדת פד"ח או טמפ' באמצעים של הנדסת אקלים

- הורדת ריכוז הפד"ח שכבר נוצר, או הורדה של הטמפרטורה באמצעים הנדסיים, לדוגמה:
- ◀ החזר אור השמש על ידי ייצור מכוון של חלקיקים בסטרטוספירה
 - ◀ לכידת פד"ח באמצעים כימיים ואיחסונו בתת הקרקע או בקרקעית האוקיינוס.
- יש לציין שהשפעות הלואי של התערבויות הנדסיות כאלו עדיין אינן מובנות לעומקן, עלותן הכלכלית מחייבת מעורבות ברמת הממשלות והקצאת תקציבים ייעודיים. כמו כן, ישנן סוגיות אתיות סביב חלק מהפתרונות המוצעים.

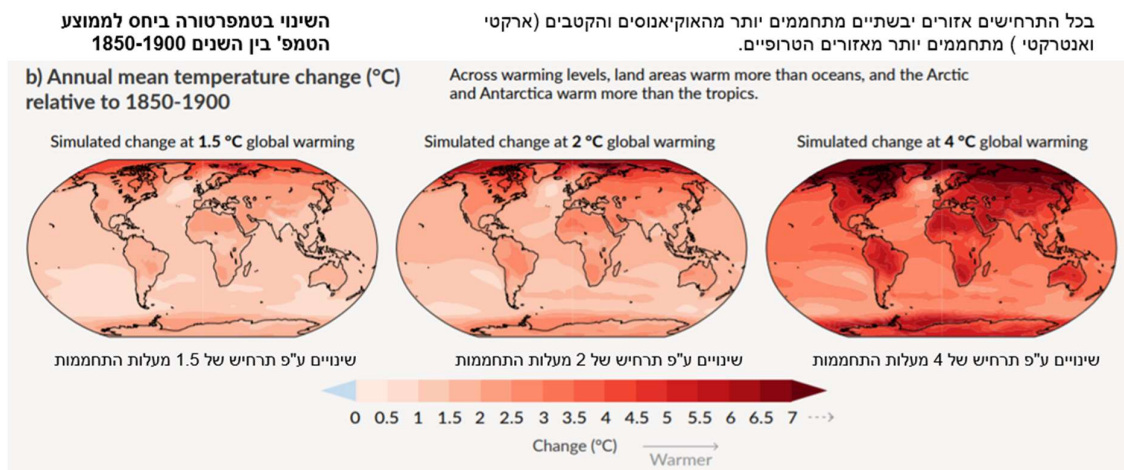
- בכל התרחישים נראה שהטמפרטורה הממוצעת תמשיך לעלות עד 2050 אף מעבר ל-1.5 מעלות. בהינתן שבדה"א יתחמם בעתיד במעלה וחצי לפחות, כיצד ניתן להתמודד עם השינויים?

היערכות (אדפטציה/הסתגלות, התמודדות)

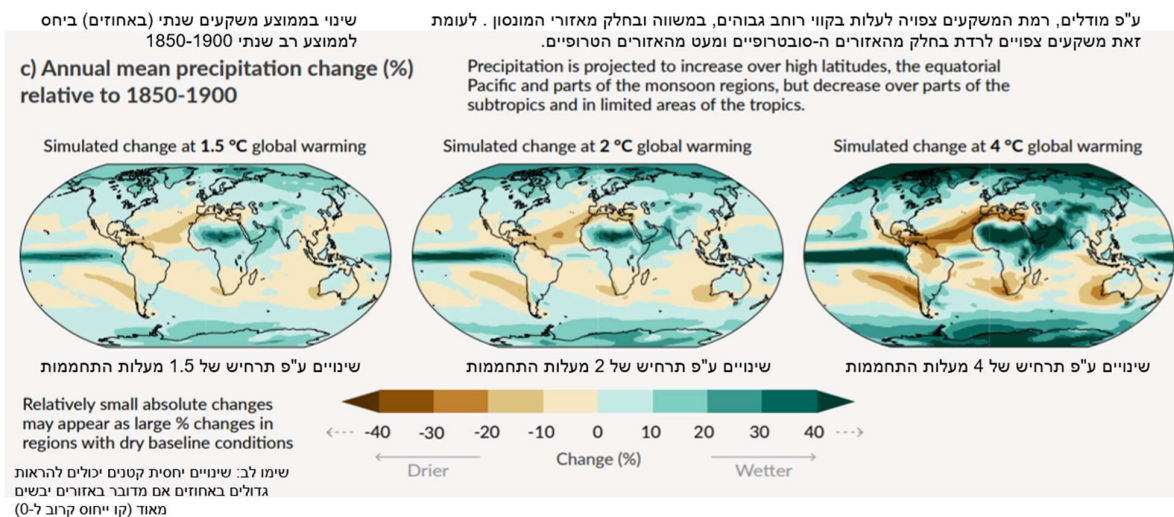
- תגובה לשינויי האקלים על מנת להתאים את עצמנו ואת פעולותנו לתנאים החדשים, מתוך הכרה באופיים הבלתי נמנע של השינויים או בעלות הגבוהה של מניעתם. לדוגמה הצללת חצר בית הספר, שיפור הניקוז של נחלים ליד אזורים המועדים להצפות.
- [-איך מתכוננים לעתיד האקלימי?](#)
[-הסתגלות לשינויי אקלים בישראל](#)
[-היערכות ישראל להסתגלות לשינויי אקלים: המלצות לאסטרטגיה ותכנית פעולה לאומית \(דו"ח של המשרד להגנת הסביבה\)](#)

- לדון בהבדל בין מיטיגציה (מיתון) ואדפטציה (היערכות או הסתגלות). אפשר לשאול את התלמידים. מה הפתרון היעיל ביותר לדעתם? לאיזה מהפתרונות יש את ההשפעה הכי מרחיקת לכת מבין הפתרונות המוצעים (למשל מדע וטכנולוגיה או מדיניות)? איזה מהפתרונות תלוי גם בהתנהגות שלהם ובמה הם מוכנים לשנות את התנהגותם כדי לתרום למאמץ הכולל למזער את ההתחממות?

1. שינוי טמפרטורה ומשקעים בעולם



הסבר גרף 5: המפות מראות שינוי בממוצע הטמפרטורה השנתית ביחס לממוצע בין השנים 1850-1900, בכל נקודה על פני כדה"א. שלוש המפות מראות את ההתחממות באזורים שונים של כדה"א בשלושה תרחישים שונים של התחממות ממוצעת - עליה ב-מעלה וחצי (צד שמאל), עליה ב-שתי מעלות (אמצע) ועליה ב-ארבע מעלות (צד ימין). הצבעים מסמלים את עוצמת ההתחממות - ככל שהצבע כהה יותר, כך גם העלייה בממוצע הטמפרטורה השנתית גדולה יותר.



הסבר גרף 6: שינויים בכמות המשקעים הממוצעת השנתית ביחס לממוצע רב שנתי בין 1850-1900. השינוי מוצג באחוזים. ממוצע משקעים גבוה יותר מוצג בצבעים כחולים יותר וכהים יותר, ממוצע משקעים נמוך יותר מוצג בצבעים חומים יותר וכהים יותר. שימו לב, שינויים יחסית קטנים מבחינת ערכים מוחלטים יכולים להראות גדולים באחוזים כאשר מדובר באזורים יבשים מאוד שמקבלים קצת יותר משקעים (קו ייחוס קרוב ל-0). חשוב להדגיש כי אף שהשינוי בכמות המשקעים עשוי להיות קטן באזורים מסוימים, חלוקתם לאירועי גשם על פני השנה עלול להשתנות משמעותית. למשל, מעט אירועי גשם חזקים מאד יכולים להוריד כמות משקעים זהה למספר רב של אירועי "טפטוף", עם השלכות על הצפות ושטפונות, הצורך בהשקיה חקלאית ועל משק המים באופן כללי.

הצעה לשאלות לדיון ודגשים:

- **דיון בגרף 5 - אמנם צפויה התחממות בכל רחבי כדה"א, אך המפה ממחישה שהשינויים אינם אחידים. יהיו אזורים שיתחממו יותר וכאלו שיתחממו פחות.**

ניתן להשוות את המצב למשהו בקנה מידה יותר קטן. למשל, ההבדל בין התגובה על החרמון לבין התגובה בגליל הסמוך. על החרמון, הפשרה מוקדמת יותר של השלג ואולי אף שינוי בכמות השלג תשפיע על מאזן הקרינה המקומי ועל המערכות האקולוגיות. בגליל, מכיוון שאין שלג מלכתחילה, השינוי יהיה פחות מורגש.

ניתן לראות את השינויים בטמפרטורה במפה אינטראקטיבית של ה-IPCC.

- **מה הן המגמות הבולטות המשותפות לכל התרחישים המופיעים בגרף 5?**

* (1) עלייה חדה יותר בטמפרטורות ביבשה מאשר בים. למים יש קיבול חום יחסית גבוה והם מתחממים יותר לאט וגם מתקררים יותר לאט ולכן גופי מים גדולים מהווים מאגרי חום (אפשר לחשוב על המים החמימים בחוף הים בסוף של יום חם לעומת המים הקרירים בבוקר). בהקשר של הפשרת קרחונים, אגירה כזו של חום לפרקי זמן ממושכים ושחרורו האיטי תגרום להמשך הפשרת קרחונים גם כשתואט או תיעצר עליית הטמפרטורה (כי המים יישארו חמים ויתקררו יותר לאט מהאטמוספירה).

* (2) עלייה חדה יותר בטמפרטורות בקטבים מאשר באזורים טרופים. יש כמה גורמים להבדלים הללו. אחד החשובים הוא הסעת חום מן האזורים המשווניים אל אזורי הקטבים על ידי זרימה וערבול באוקיינוס ובאטמוספירה. גורם חשוב נוסף הוא הפשרת קרחונים על היבשה והים. ההפשרה מחליפה משטח בהיר (של הקרחון הלבן) במשטח כהה (של הקרקע/ים), בעיקר במקרה של קרחונים ימיים, וכתוצאה מכך יותר מקרינת השמש נבלעת על ידי פני כדה"א ומומרת לאנרגיית חום.

- **דיון בגרף 6 - גם במשקעים אנו רואים השפעה לא אחידה בעולם.**

יש אזורים שיקבלו הרבה יותר גשמים בממוצע (הצפות) וכאלו שיקבלו פחות משקעים (בצורות), כך שנראה מצבי קיצון לכאן ולכאן. כמו כן, פיזורם על פני השנה צפוי שלא להיות אחיד. למשל, מעט אירועי גשם חזקים מאד יכולים להוריד כמות משקעים זהה למספר רב של אירועי "טפטוף", עם השלכות על הצפות ושטפונות, הצורך בהשקייה חקלאית ועל משק המים באופן כללי. ככל שמידת התחממות תהיה יותר גדולה, כך גם השונות במשקעים תהיה יותר קיצונית. ניתן לדון בהשלכות של עודף/חסר משקעים על מערכות אקולוגיות, על חקלאות וביטחון תזונתי, על החברה ועל הכלכלה וכו'.

- **כמות המשקעים הממוצעת בעולם צפויה לעלות בהלימה להתחממות הגלובלית. הציעו הסבר.**

ככל שחם יותר, כך גם יש עלייה בקצב מחזור המים ולכן יש עלייה בכמות המשקעים העולמית הממוצעת.

ז. השלכות נוספות :

כל אחד מארבעת העשורים האחרונים היה חם יותר מקודמיו וצפויה התחממות נוספת בעתיד. התלמידים של היום נולדו לתוך עידן של התחממות מתמדת. דו"ח ה-IPCC מזכיר מגוון השלכות של התחממות גלובלית שניתן לדון בהן בכיתה, במיוחד בהקשר של ההשפעה על מערכות אקולוגיות וגם בהקשר של ההשפעות על האדם (כלכלי, חברתי, פוליטי, בריאותי). בנוסף חשוב לזכור כי ההשלכות המוצגות להלן קשורות זו בזו (לדוגמה: התחממות גוררת להפשרת קרחונים שגורמת לעלייה במפלס פני הים שגורמת להצפות אזורים מיושבים שמובילה להשלכות חברתיות). כאן מזכיר חלק מהן עם הצעות לדיון. שימו לב, העוצמה של כל אחת מההשלכות האלו הולכת ועולה ככל שדרגת ההתחממות עולה.

1. **נסיגת קרחונים** בעולם מאז שנות ה-90 של המאה הקודמת. ניתן לדון בהשלכות של הפשרת קרחונים וגופי קרח גדולים אחרים - למשל [אובדן בתי גידול](#) ועלייה [בגובה פני הים](#) שתוביל להצפות של אזורים מיושבים (ראו גם סעיף 3).
2. **התחממות והחמצה (ירידה ב-pH) של השכבה העליונה של האוקיינוסים** (700 המטרים העליונים). ניתן לדון בהשלכות אקולוגיות כמו ההשפעה על [שוכניות אלמוגים](#) (קישור [לפעילות](#) בנושא של השפעת החמצת המים על האלמוגים). כמו כן, התפשטות תרמית תורמת אף היא לעלייה במפלס פני הים.
3. **עלייה במפלס פני הים**. ניתן לדון בהשלכות [אקולוגיות](#), ובהשלכות [החברתיות וכלכליות](#) [קישור](#) נוסף) או במשמעות התופעה לערי החוף במדינת ישראל.
4. **שינויים בבריית גידול ועונות גידול**. בתי גידול הצפינו או הדרימו בעקבות התחממות כדה"א. ניתן לדון ב**פגיעה במגוון ביולוגי** או כיצד שינויים בתפוצה של יצורים חיים יכולה גם להוות גורם מאיץ להפצת [מחלות כמו קורונה](#) או מלריה או [מחלות זואוונטיות](#) אחרות.
5. **עלייה בתדירות ובעוצמה של אירועי ממוזג אוויר קיצוניים ואסונות טבע** כגון גלי חום ושריפות, גשמים חזקים והצפות, סופות טרופיות ובצורות.
6. **השלכות בריאותיות** בשלושה תחומים עיקריים: 1. מחלות מידבקות. 2. תמותה. 3. השפעות נשימתיות, קרדיווסקולריות (לב וכלי דם) או נירולוגיות (של מערכת העצבים). [מכתב מערכת ב-NEJM, על ידי עורכים של כתבי עת רפואיים](#).
7. **השלכות על הכלכלה, על החברה, על הפוליטיקה, על הביטחון התזונתי וכו'.**
 - a. חקיקה ורגולציה - [הרצאה של פרופ' אלון טל](#)
 - b. השפעה של משבר האקלים על הכלכלה והחברה - הרצאה של פרופ' שושנה שילה, יאיר קראוס.

מקורות מידע :

1. סיכום למקבלי החלטות [Summary for Policy Makers](#). בגרסת PDF. (אנגלית).
2. שאלות ותשובות - [IPCC Frequently Asked Questions](#)
3. [אתר The Carbon Brief](#)
4. [אתר אוניברסיטת Yale בנושא אקלים](#)

מקורות מידע נוספים

- [מדע גדול בקטנה של מכון ויצמן](#)
- [באתר הידען](#)
- [אקלים ישראל](#)
- [באתר משרד החוץ](#)
- [באתר השירות המטאורולוגי](#)
- [אתר של מכון למדעי כדה"א](#) באוניברסיטה העברית (יש שם קישורים נוספים)
- [סרטון מסכם](#) את הנקודות המרכזיות של הדו"ח בצורה בהירה (אנגלית).