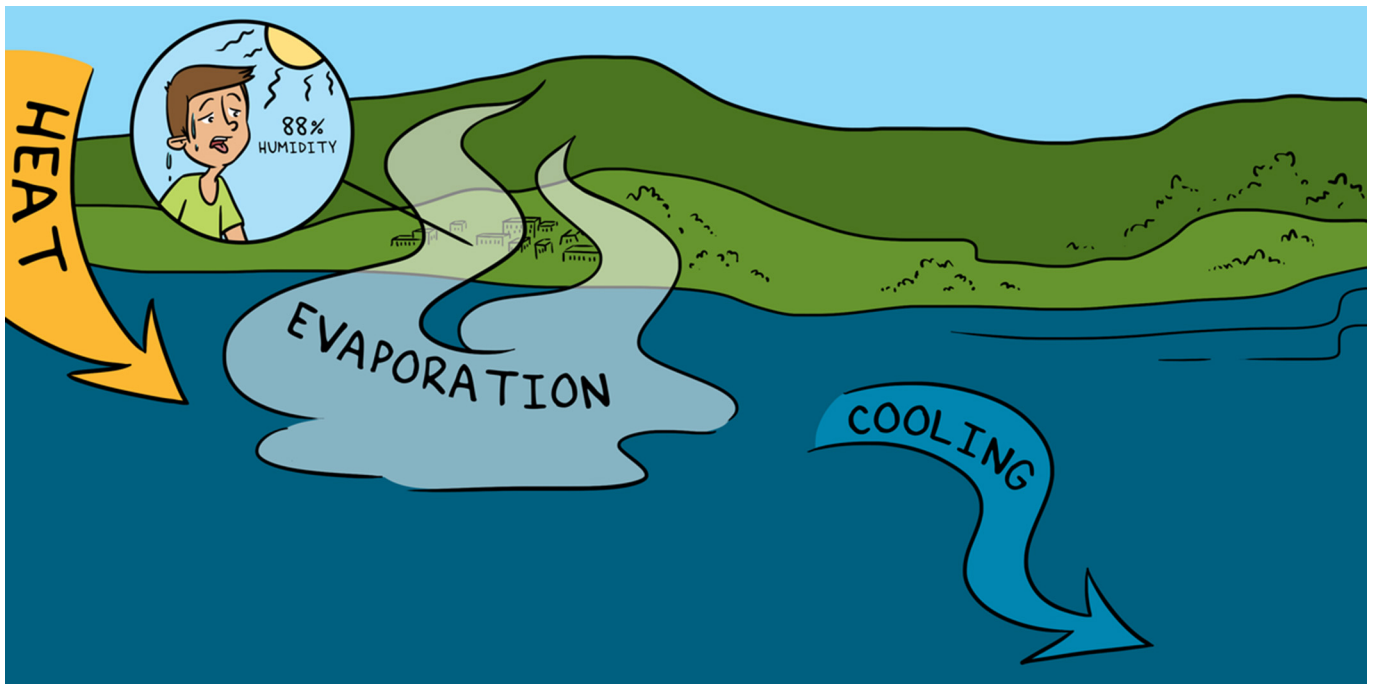




כיצד האוקיינוס עשוי להשתנות בעתיד?

Denise Tyemi Fukai^{1*}, Anna Beatriz Jones Oaquim² | Mauro Cirano^{1,3}

¹המעבדה לפיזיקה אוקיינוגרפית, התוכנית לתואר שני במטאורולוגיה, המכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה הפדרלית של ריו דה ז'נירו, ריו דה ז'נירו, ברזיל

²המעבדה לשינויים גלובליים ולרדיואקולוגיה, המחלקה לביופיזיקה ולביומטריה, המכון לביולוגיה על שם רוברטו אלקנטרה גומס, האוניברסיטה הלאומית של ריו דה ז'נירו, ריו דה ז'נירו, ברזיל

³המעבדה לפיזיקה אוקיינוגרפית, המחלקה למטאורולוגיה, המכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה הפדרלית של ריו דה ז'נירו, ריו דה ז'נירו, ברזיל

סוקרים צעירים

AVIV
גיל: 9



האוקיינוס הוא אחד הרכיבים העיקריים של מערכת האקלים. הוא סופג חום ומפזר אותו, במטרה לווסת את האקלים בקני מידה שונים של זמן. הטמפרטורה והמליחות שולטות בדחיסות מים-מים. הבדלים בדחיסות המים חשובים עבור הסִירְקוּלַצְיָה (תנועה סיבובית היוצרת מעגל) של האוקיינוס – הבדלים אלו אחראים ליצירת זרמי מים מסוימים שנעים באוקיינוס. המסוּעֵ הימי הוא חלק חשוב בסירקולציה. הוא סופג חום, מאחסן אותו ומשנע אותו ברחבי העולם. שינויים בטמפרטורה מים האוקיינוס או במליחותם עשויים להשפיע על המסוע הימי, ולכן שינויי אקלים גם עלולים לשנות את הסירקולציה. תמורות בסירקולציית המים משפיעות גם על התהליכים הכימיים המתרחשים בתוך האוקיינוס ועל האורגניזמים שחיים בו. ראשית, נסביר כיצד מתרחשת סירקולציית האוקיינוס, ולאחר מכן נבחן כיצד שינויי האקלים עשויים להשפיע עליה.

כיצד האוקיינוס פועל?

האוקיינוס מכסה כ-70% מפני השטח של כדור הארץ, ומכיל 97% מהמים שבכוכב הלכת שלנו. המים הללו סופגים חום מהשמש, ומשנעים חום זה באמצעות זרמי האוקיינוס. נוסף על החום, זרמי האוקיינוס משנעים גם פחמן דו-חמצני, חומרי הזנה ואורגניזמים, כמו ביצי דגים, ברחבי כדור הארץ.

התעבורה הזו מכונה **זרם-ים**, ויש לה שני מרכיבים עיקריים. הראשון הוא זרם-הים העילי המהיר יותר, המונע על ידי רוח. הוא נוטה להתרחש רק באגנים אוקייניים מסוימים (בצפון האוקיינוס האטלנטי, או באגן האוקיינוס ההודי, למשל). זרם-הים העילי מסייע בתחלופת חום ולחות בין האוקיינוס לאטמוספירה, ולכן שינויים בזרם-ים זה עשויים להשפיע על מזג האוויר העולמי והאזורי.

המרכיב השני הוא זרם העומק העולמי. הוא איטי יותר ומונע על ידי הבדלים ב**דחיסות המים**. לזרם זה תפקיד מרכזי במסע הימי. למידע נוסף, ראו המאמר: **כאשר מים שוחים בתוך מים, האם הם יצופו או ישקעו? או, מה מניע זרמים באוקיינוס?** [1]. כמו כן, זרם העומק העולמי מפזר חום ואנרגיה ברחבי העולם, לאורך אגנים אוקייניים שונים. שינויים בזרם-ים זה מתרחשים על פני תקופות זמן ארוכות, ועשויים להשפיע על האקלים המקומי והעולמי, כפי שראינו לאורך 50,000 השנים האחרונות. כדאי לשים לב לכך שההבדל בין 'מזג אוויר' ובין 'אקלים' מתבטא בקנה מידה של הזמן. כשאנו מדברים על 'מזג אוויר', אנו מתייחסים לתהליכים בטווח הזמן הקצר, וב'אקלים' אנו מתכוונים למצב הטבע הממוצע, לאורך תקופות זמן ממושכות. לדוגמה, אם מתחיל לרדת גשם במדבר, ניתן לומר שאנו חווים מזג אוויר גשום, אך לאורך שנים, נוכחנו שבדרך כלל לא יורד גשם רב באזור זה, ולכן האקלים במדבר הוא יבש, למרות מזג האוויר הגשום הנקודתי.

כיצד ההבדלים בדחיסות המים מניעים את זרם העומק העולמי? דחיסות מים האוקיינוס משתנה בהתאם ל**מליחות** ול**טמפרטורה**, ולכן דחיסות המים אינה זהה בכל רחבי האוקיינוס. אזורים ועומקים שונים בו מתאפיינים במליחות ובטמפרטורה שונות, ועקב כך – בדחיסות שונה. ככל שהמים הנוזליים חמים יותר, כך הם קלים יותר ופחות דחוסים. עם זאת קרח מוצק הוא למעשה פחות דחוס ממים נוזליים, הודות למבנה של גבישי הקרח. מסיבה זו הקרח צף על פני המים למרות שהטמפרטורה שלו נמוכה מזו של המים הנוזליים שבהם הוא צף. כך, אזורים של מים קרים ומלוחים הם דחוסים יותר מאשר אזורים של מים חמימים ומתוקים. באוקיינוס, 'סוללות' של מים דחוסים יותר זורמות מתחת למים הקלים יותר. סוללות מים באוקיינוס מסודרות בשכבות בהתאם לדחיסותן, ממש כמו עוגת יום הולדת עם כמה שכבות ומילויים. כך נוצר **רביד האוקיינוס**, המוצג ב**איור 1**.

סוללת מים מוגדרת על ידי טווחי הטמפרטורה שלה ומליחותה. את הסוללות הללו אנו מכנים **מסות מים**. על ידי מחקר של מסות המים, ביכולתנו להבין מאיפה הן הגיעו ולכן הן הולכות. כך אנו מבינים את האוקיינוס טוב יותר, ומתארים אותו בצורה טובה יותר. כדי שמסות המים ייווצרו, יש צורך בשילוב התנאים הנכונים. התנאים הללו עשויים לכלול רוחות, קרינה מהשמש וזמינות של מלחים, והם עשויים להתרחש רק במהלך עונות מסוימות ובאזורים מסוימים ברחבי כדור הארץ – למשל בצפון האוקיינוס האטלנטי או באוקיינוס ההודי.

זרם-ים (Oceanic Circulation)

תנועה של מים בקנה מידה גדול, הנגרמת על ידי זרמי האוקיינוס.

דחיסות (Density)

גם: צפיפות. היחס שבין המסה של גוף מסוים לבין נפחו.

מליחות (Salinity)

כמות המלח המומס בגוף מים.

רביד האוקיינוס (Ocean Stratification)

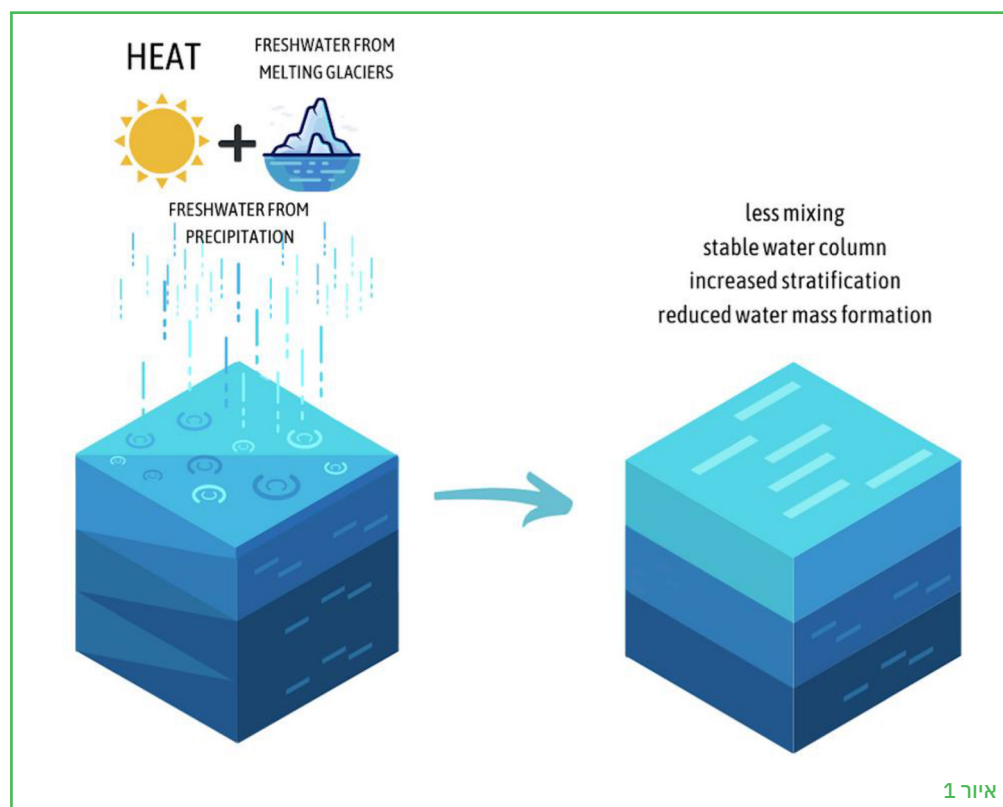
חלוקת מים האוקיינוס לשכבות בהתבסס על דחיסותם.

מסות מים (Water Masses)

'סוללות' מים בעלות מאפיינים דומים כמו טמפרטורה ומליחות, הנוצרות באותו אזור ונעות ממקום למקום.

איור 1

ריבוד האוקיינוס הוא היפרדות המים לשכבות כתלות בדחיסותם. מליחות המים והטמפרטורה שלהם תורמות לדחיסותם. כאשר יורד יותר גשם, או כאשר קרחונים נמסים, וכן כאשר השמש מחממת את מי האוקיינוס, דחיסות המים יורדת (צד שמאל). במצב זה, יכולות להיווצר שכבות יציבות של מים (צד ימין). בתנאים אלו, קשה יותר למסות המים להיווצר. מקרא: צד שמאל: חום – מים מתוקים מקרחונים נמסים – מים מתוקים ממשקעים. צד ימין: פחות ערבוב – עמוד-מים יציב – ריבוד מוגבר – הפחתה בהיווצרות מסות המים.



האוקיינוס והאקלים – תעבורת חום

ההיווצרות של מסות מים-עומק היא הדלק למה שמכונה **המסוע הימי**. הזרם האטלנטי המזרחי המתהפך, הידוע גם כ-AMOC (The Atlantic Meridional Overturning Circulation), הוא נדבך חשוב של המסוע הימי. זהו זרם-מים בעל כיוונית של צפון-דרום, אשר משנע חום בתוך האוקיינוס האטלנטי. כשמתחילים מפני השטח, ה-AMOC מורכב ממים חמימים ומלוחים מגבהים נמוכים (ליד קו המשווה). לאחר מכן, הוא זורם לעבר צפון האוקיינוס האטלנטי, שם ממלא תפקיד חשוב זרם ימי נוסף בשם זרם הגולף. כאשר ה-AMOC נע צפונה, הוא פולט חום לאטמוספירה באיטיות, בשל ההבדל הגדול בין טמפרטורת האוויר לזו של האוקיינוס. לאחר איבוד החום, המים הופכים דחוסים יותר ושוקעים, וזורמים חזרה דרומה (איור 2).

בו בזמן, האוויר החמים והלח שמעל לזרם ה-AMOC נישא על ידי הרוחות. דבר דומה קורה כשאתם שוכחים את כוס התה שלכם – היא מתחילה להתקרר באיטיות, עד שהיא מגיעה לטמפרטורת החדר. כדי להגיע לאיזון, על התה לפלוט חום ולחות לאוויר ממש מעל לספל שלכם, אך האוויר החמים והלח הזה אינו מתרכז מעל לספל שלכם לצד. במקום זאת, הוא מתפזר בחדר עד שלא ניתן עוד לעקוב אחריו. באופן דומה, הרוחות נושאות את האוויר החמים והלח מה-AMOC על פני מרחקים ארוכים, והוא מגיע אפילו לערים רחוקות כמו לונדון. עקב כך מזג האוויר בלונדון נעשה חמים ולח יותר בהשוואה לערים אחרות באותו קו רוחב.

המסוע הימי (Thermohaline Circulation)

חלק מסירקולציה ימית בקנה מידה גדול, המונעת על ידי הבדלים בדחיסות. נוצר כתוצאה מההשלכות המשולבות של הטמפרטורה והמליחות על הדחיסות.

איור 2

סירקולציית החום בצפון האוקיינוס האטלנטי.

האוקיינוס סופג חום מהשמש בקרבת קו המשווה, ומשנע אותו צפונה. כשהמים נעים, הם מתאדים ומתקררים. האידוי גורם לחום וללחות לעבור מהמים אל האוויר שמעליהם. הסירקולציה של האטמוספירה מפזרת את החום ואת הלחות. כאשר הזרם ממשיך צפונה, הוא הופך הרבה יותר קר ומלוח. לבסוף, הוא מתערבב ויוצר מסת מים חדשה בעלת דחיסות גבוהה יותר, אשר שוקעת לשכבות העמוקות יותר וזורמת חזרה דרומה (קרדיט לאיורים: Thiago Sales).

מקרא (מלמעלה למטה):

= Heat & Moisture export

ייצוא חום ולחות;

Heat & Moisture

redistribution = פיזור

מחדש של חום ולחות;

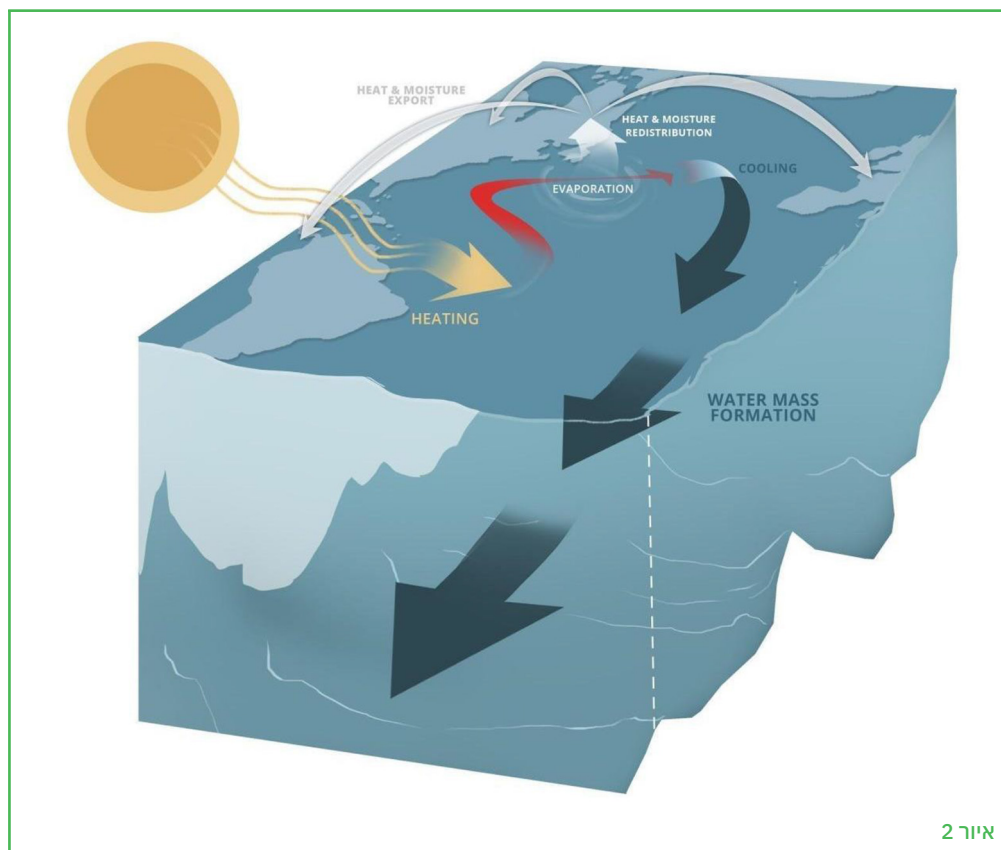
Cooling = קירור;

Evaporation = התאדות;

Heating = חימום;

Water mass formation

= היווצרות מסת מים.



איור 2

כעת ביכולתכם להבין מדוע ה-AMOC הוא רכיב חיוני במערכת האקלים של כדור הארץ – זאת כיוון שהוא ממלא תפקיד מכריע בתעבורת החום. ה-AMOC אחראי לחמימות היחסית של חצי הכדור הצפוני [2].

אבל, כיצד האוקיינוס ישתנה?

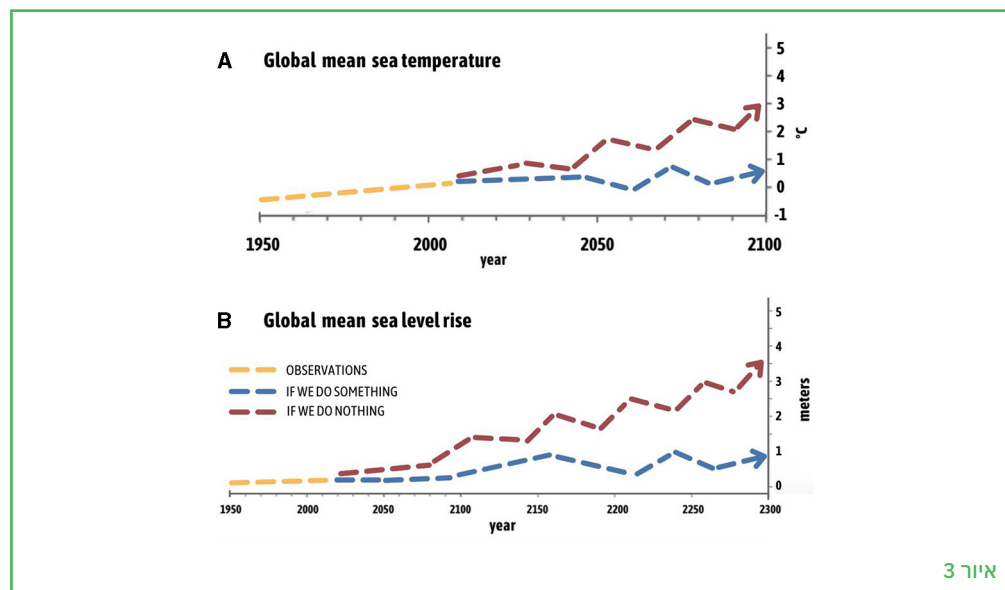
האוקיינוס סופג את מרבית אנרגיית השמש שמגיעה לכדור הארץ. האם ידעתם כי הוא סופג גם יותר מ-90% מהפחמן הדו-חמצני ומהחום העודף שבני האדם משחררים אל תוך האטמוספירה? אולם האם האוקיינוס יכול להמשיך לספוג חום ופחמן לנצח? כנראה שלא. למרות שהאוקיינוס משתנה כל הזמן, כיום הוא משתנה בקצב שעולה בהרבה על תחזיות המדענים (איור 3).

בכל פעם שאנו מוסיפים לאוקיינוס משהו שלא היה שם קודם לכן, כמו חום או פחמן, אנו גורמים לשינויים בו. אם כן, בין שינויי האקלים לפגיעות הנגרמות על ידי בני האדם, מה צופן בחובו העתיד לאוקיינוס?

טמפרטורת האוקיינוס הממוצעת נמצאת במגמת עלייה. אוקיינוס חם יותר יגרום לריבוד נוסף באוקיינוס, מה שיוביל לכך שיהיו יותר שכבות מים נייחות ופחות ערבוב. הדבר יקשה גם על היווצרות מסות מים, כפי שיש לנו היום, כיוון שהן זקוקות לערבוב כלשהו כדי להיווצר. שינויים בהיווצרות מסות המים ישפיעו על תעבורת החום, וכתוצאה מכך, על אקלים כדור הארץ. ישנם מקומות שיחוו את התחממות פני השטח יותר מאחרים. האוקיינוס הארקטי,

איור 3

קצב שינוי האוקיינוס. (A)
 הטמפרטורה הממוצעת
 העולמית של פני הים, וכן (B)
 גובה המפלס הממוצע של פני
 הים, צפויים להמשיך לעלות
 בעתיד. אם נפעל להפחתת
 פליטות הפחמן הדו-חמצני
 שלנו, השינויים יהיו נמוכים
 יותר (כחול), אך אם לא נפעל
 כלל להפחתת הפחמן
 הדו-חמצני (אדום), האוקיינוס
 עלול להתחמם מאוד, ופני
 הים יעלו משמעותית
 (התמונה הותאמה מ-[3]).
 מקרא:
 Global mean sea
 = temperature
 הטמפרטורה הממוצעת
 העולמית של הים;
 Global mean sea level rise
 = ממוצע עליית גובה מפלס
 פני הים בעולם;
 Observations = תצפיות;
 = If we do something
 אם נפעל;
 = If we do nothing
 לא נפעל;
 Year = שנה.



איור 3

למשל, יושפע יותר מאשר אזורים אחרים [4]. הבעיה היא שהאוקיינוס הארקטי הוא אחד מאזורי היווצרות מסות המים החיוניים ביותר. אם היווצרות מסות המים באוקיינוס הארקטי לא תתרחש באותה הקלות, זרמי הים ייחלשו, ככל הנראה. החוקרים כבר הצביעו על כך שה-AMOC הולך ונחלש, והם טוענים כי זו תוצאה של שינוי האקלים [5].

התחממות האוקיינוס עלולה להוביל גם להיעלמותם של כמה ערי-חוף ואיים, אשר תתרחש כתוצאה מהתפשטות תְּרָמִית. כשהטמפרטורה עולה, מים נוזליים מתפשטים ותופסים נפח רב יותר, דבר המוביל לעליית מפלס הים. מפלס הים יעלה גם כאשר מים נוזליים ינועו מהיבשה לים, בעקבות זרימת מים מוגברת מנהרות או עקב הפשטת הקרחונים. גם הפשטתן של יריעות קרח יבשתיות, במסגרת עליית הטמפרטורה, עשויה להוסיף נפח לאוקיינוס, ולתרום לעליית מפלס הים באזורים מסוימים. המשיכו לקרוא על כך כאן: **שינויים במפלס הים – מדוע הם מדאיגים?** [6]. במהלך השנים האחרונות כבר נצפתה עלייה במפלס הים. יש לחקור ביסודיות את התופעה, כיוון שהיא עלולה להשפיע על אנשים רבים סביב לעולם, ובמיוחד על אוכלוסיות החוף.

כיצד אנו יכולים לעזור?

המחקרים העוסקים בשינויי האקלים מלמדים אותנו כיצד ומתי האוקיינוס ישתנה, אם לא יעשה דבר כדי למנוע את התהליך. אם טמפרטורות האוקיינוס העולמיות ימשיכו לעלות, יהיו לכך השלכות חמורות רבות על האורגניזמים החיים בים ועל בני האדם. האוקיינוס הוא אחד המווסתים העיקריים של הגשם ושל ייצור החמצן. הוא מספק לנו מזון ועוזר לנו לנוע ברחבי כדור הארץ. כולנו תלויים בו! לכן, עלינו לצבור יָדַע על אודות האוקיינוס והסכנות העומדות בפניו, ולהפיצו. כדי לסייע בכך, האומות המאוחדות יצרו את תוכנית 'עשור מדעי האוקיינוס ופיתוח הקיימות', שהחל ב-2021 ומתוכנן עד 2030. יוזמה זו תסייע לנו ללמד אנשים מה עליהם לעשות, כיחידים וכציבור, כדי לנהל טוב יותר את משאבי האוקיינוס. אם לא נתחיל לשנות את הרגלינו ולשפר את מערכת היחסים שלנו עם הטבע, שינויי האקלים יתעצמו, ועימם יחמירו ההשלכות של עליית טמפרטורת האוקיינוס.

אולם, כוח השינוי נמצא בידינו! אנו יכולים לשנות את ההרגלים האישיים שלנו, לדוגמה להיות ערניים יותר לשימוש שאנו עושים במים ובאנרגיה; להפחית את השימוש בכלים חד-פעמיים, ולמלא תפקידי מפתח גם כאזרחים. לילדים יש תפקיד חיוני בהעלאת המודעות ובעיצוב העתיד. כשאנו מדברים על שינוי האקלים עם בני משפחותינו ועם חברינו, באפשרותנו להסב את תשומת ליבם לנושא זה. אנו יכולים לדון בדרכים להפגנת תמיכה במדיניות המגינה על האוקיינוס, ולחממת בשינוי האקלים. אנו גם יכולים לדרוש שממשלותינו והתעשיות שלנו יפעלו באופן אחראי וישתמשו במשאבי הטבע בחוכמה. ככל שנקדים לנקוט פעולה, כך גדלים הסיכויים להבטיח עתיד משופר ובהיר יותר עבור האוקיינוסים של העולם – ועבור כל החיות ובני האדם התלויים בהם.

הצהרת כלי בינה מלאכותית

טקסט חלופי הנלווה לאיורים במאמר זה נוצר על ידי פרונטירז בסיוע כלי בינה מלאכותית, ונעשו מאמצים על מנת להבטיח את דיוקו, כולל בדיקה על ידי כותבי המאמר כאשר הדבר התאפשר. אם ברצונכם לדווח על בעיה, אנו צרו איתנו קשר.

מקורות

1. Glessmer, M. S. 2019. When water swims in water, will it float, or will it sink? Or: what drives currents in the ocean? *Front Young Minds*. 7:85. doi: 10.3389/frym.2019.00085
2. Buckley, M. W., and Marshall, J. 2016. Observations, inferences, and mechanisms of the atlantic meridional overturning circulation: a review. *Rev Geophys*. 54:5–63. doi: 10.1002/2015RG000493
3. IPCC. 2019. "Summary for policymakers," in *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, eds H. O. Pörtner., D. C. Roberts., V. Masson-Delmotte., P. Zhai., M. Tignor., E. Poloczanska., et al. (IPCC).
4. Xie, S. 2020. Ocean warming pattern effect on global and regional climate change. *AGU Adv*. 1:e2019AV000130. doi: 10.1029/2019AV000130
5. Hu, S., and Federov, A. 2019. Indian ocean warming can strengthen the Atlantic meridional overturning circulation. *Nat. Clim. Change* 9:747–51. doi: 10.1038/s41558-019-0566-x
6. Siegert, M. 2017. Why should we worry about sea level change? *Front. Young Minds*. 5:41. doi: 10.3389/frym.2017.00041

פורסם אונליין: 28 בספטמבר 2025

נערך על ידי: Chris Jones

מנחים מדעיים: Yoed Kenett

ציטוט: Fukai DT, Oaquim ABJ I Cirano M (2025) כיצד האוקיינוס עשוי להשתנות בעתיד? *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2021.700622-he

Fukai DT, Oaquim ABJ and Cirano M (2021) How Might the Ocean Change in the Future? Front. Young Minds 9:700622. doi: 10.3389/frym.2021.700622

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כל המחקר נערך בהעדר כי קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

זכויות יוצרים © 2021 Fukai, Oaquim ו Cirano. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקרים צעירים

AVIV, גיל: 9

אני מעריצה ענקית של הארי פוטר! אוהבת לקרוא ספרים ומבלה שעות רבות בקריאה בקינדרל (קורא ספרים דיגיטלי) שלי, במיוחד הארי פוטר – קראתי את כל הסדרה 20 פעמים! אני גם נהנית לאלתר על הפסנתר החשמלי שלי, לקפוץ בחבל ולדלג כשאני שמחה. אוהבת לאכול סלטים וארוחות ביתיות, אבל גם אוהבת מאוד דברים מתוקים – שוקולד הוא כל כך טעים! בתור צמחונית, אני אוהבת את הטבע – ללמוד על אודותיו, להגן עליו וליהנות ממנו.

הכותבים

DENISE TYEMI FUKAI

אני אוקיאנוגרפית (חוקרת ימים ואוקיינוסים) שאוהבת מאוד פיזיקה! כעת אני מנסה ללמוד יותר לגבי כיצד האוקיינוס מיוצג במודלים אקלימיים, וכיצד שינוי האקלים ישפיע עליו. בימים אלו משלימה את התואר השני שלי במטאורולוגיה באוניברסיטה הפדרלית של ריו דה ז'נרו (UFRJ). אני עובדת עם סוג מעניין מאוד של מודלים שאמורים לייצג את התהליכים העיקריים בכדור הארץ (Earth System Models).
*denise.fukai@gmail.com

ANNA BEATRIZ JONES OAQUIM

אני אוקיאנוגרפית בעלת תואר שני במדעי כדור הארץ הסביבתיים. מתעניינת במיוחד בדרך שבה האקלים משתנה לאורך זמן, וכיצד הדבר יכול להשפיע על העתיד שלנו. כיום אני עובדת עם שחזורי אקלים באנטרקטיקה ובאזורים הרריים גבוהים שבהם מצאנו קרח ושלג. לְשֵׁם כֵךְ, אני משתמשת באורגניזמים זעירים כמו צורניות כאינדיקטורים לשינויים סביבתיים ואקלימיים, בשילוב עם ניתוח גיאוכימי ורדיולוגי.

MAURO CIRANO

כאוקיאנוגרף פיזיקאי, הקדשתי את שלושת העשורים האחרונים להבנת הסירקולציה באזורי חוף ובאזורי ים. זאת תוך התבססות על ניתוח נתונים אוקיאנוגרפיים, וכן באמצעות מודלים מספריים של סירקולציה. אני פרופסור חבר באוניברסיטה הפדרלית של ריו דה ז'נרו (UFRJ), נֶשֶׁם אני מלמד סטודנטים לתואר ראשון ושני, ומפקח עליהם. כמו כן מכהן כמתאם של שתי תוכניות אוקיינוגרפיות יישומיות בברזיל.



מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem



הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK



קרן משפחת
שעשוע
Shashua
Family Foundation