

האם זרמי אוקיינוס חמים ממיסים את הקרח באנטרקטיקה?

Mirjam S. Glessmer^{1*}, Nadine Steiger², Elin Darelus², Anna Wåhlin³

¹פסיכוסין, קייל, גרמניה

²הפקולטה למתמטיקה ולמדעי הטבע, המכון הגיאופיזיקלי, אוניברסיטת ברן, ברן, נורווגיה

³המחלקה למדעי הים, אוניברסיטת גוטנברג, גוטנברג, שוודיה

נסענו לאנטרקטיקה על גבי ספינת מחקר במטרה להציב כלי מדידה, שנשארו במים ומדדו במשך שנתיים. בזמן שכלי המדידה היו בים, הלכנו למרכז מחקר שהייתה בו בריכת שחייה מלאה במים שהסתובבה על קרוסלה גדולה במשך חודשיים. עשינו כל זאת במטרה להבין אם זרמים חמים ממיסים קרח באנטרקטיקה [1]. מה הייתה התשובה? בואו נתחיל מהתחלה...

קרה מאוד ורחוקה מאוד: יבשת קרה, והחשיבות שלה

אנטרקטיקה – מסת היבשה הענקית בקוטב הדרומי – היא היבשת היחידה שאף אדם לא חי עליה באופן קבוע (איורים 1A-D). היא קרה מאוד – הטמפרטורה הממוצעת שלה היא -10 מעלות צלזיוס ליד החוף, ו-60 מעלות בחלק הפנימי. אנטרקטיקה מכוסה כמעט לגמרי ביריעה של שלג וקרח. **יריעת הקרח** הזו מגיעה לגובה של עד חמישה קילומטרים, ומתעבה כאשר שלג נופל עליה. החלקים של יריעת הקרח שצפים על גבי האוקיינוס אולם עדיין מחוברים ליריעת הקרח נקראים **מדפי קרח**. הם יכולים להתפרש על פני קילומטרים רבים

סוקרות צעירות

ISABEL

גיל: 9



MARGARIDA

גיל: 12

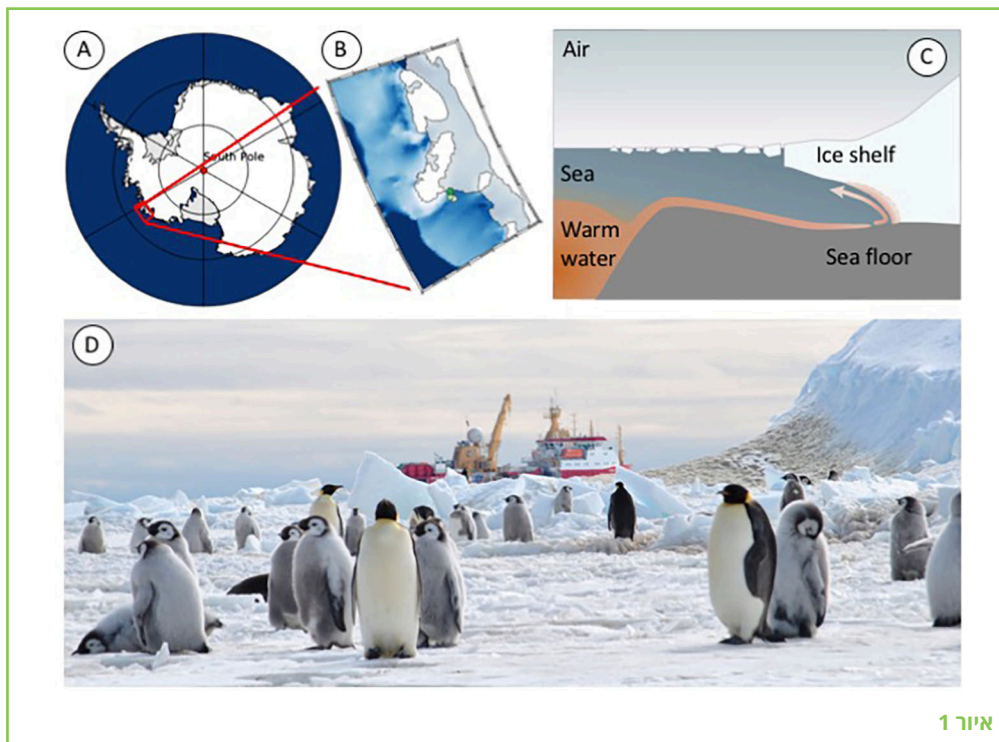


יריעת קרח (Ice Sheet)

מסות קרח גדולות שמכסות את גרילנד ואת אנטרקטיקה. הן נוצרות כאשר יורד שלג וגשם ומצטבר עוד ועוד קרח, ויכולות להגיע לעובי של עד 5 קילומטרים.

איור 1

(A) מפה של אנטרקטיקה והאזור שאנו מתעניינים בו במיוחד (תיבה אדומה). (B) הנקודות הירוקות מסמנות את המיקומים של המעגנים שלנו. (C) כך היה נראה מדף קרח במבט מהצד, אם הוא היה נחתך ונפתח. חלק ממנו נח על היבשה ועל קרקעית הים. הוא צף לכיוון האוקיינוס הפתוח, ובסופו של דבר נעשה דק יותר כתוצאה מהימסות. חלקים ממדף הקרח נשברים וצפים למקום אחר. זרם של מים חמים יחסית זורם לעבר מדף הקרח בקרקעית הים. (D) ספינת המחקר RV Shackleton במסעותיה לאנטרקטיקה, בעת הצבת מעגן ליד מדף קרח.



איור 1

מדפי קרח (Ice Shelves)

יריעות קרח גדולות שזורמות החוצה מהיבשה וצפות על פני האוקיינוס, אולם עדיין מחוברות לקרח שנח על היבשה. הם יכולים להיות בעובי של מאות מטרים.

קרח ים (Sea Ice)

קרח שנוצר כאשר מי הים קופאים. הוא צף על פני האוקיינוס (ראו <https://kids.frontiersin.org/article/10.3389/frym.2019.00079>).

עלייה במפלס הים (Sea-level Rise)

עלייה ממוצעת ארוכת טווח במפלס המים של האוקיינוס. ההימסות של כיסוי הקרח באוקיינוס האנטרקטי ובגרילנד תורמת לעלייה במפלס הים.

שינוי אקלים (Climate Change)

השינוי ארוך הטווח בתבניות האקלים כמו טמפרטורות, משקעים, זרמי אוקיינוס ומפלסי ים. שינוי אקלים מתרחש באופן טבעי ומוביל לתקופות חמות וקרות, אולם לאחרונה הוא נגרם גם על ידי בני אדם.

הרחק מהיבשה. שם, קרחוני קרח גדולים נשברים ומשאירים דפנות קרח, שמגיעות לעומק של 250-500 מטרים אל תוך האוקיינוס.

חשוב להבחין בין מדפי קרח וקרחונים לבין **קרח ים**, אף על פי שכל השלושה צפים על גבי האוקיינוס [2]. קרח ים נוצר כשהמים באוקיינוס קופאים, באופן דומה לקרח שנוצר על פני נהרות. כאשר קרח הים נמס, הוא לא מוסיף עוד מים לאוקיינוס, ולכן מפלס הים לא משתנה. אולם, קרח שמקורו ביבשה, גורם **לעלייה במפלס הים** כשהוא נמס. הקרחונים באנטרקטיקה מתחילים כיריעת קרח שנחה על האדמה, אולם החלקים שלהם שמחוץ לחוף צפים על גבי האוקיינוס. החלקים האלה פועלים כמעצורים ששומרים את שאר הקרח על היבשה. אם הקרח הצף נמס, קרח רב יותר יחליק מהיבשה אל האוקיינוס ויגרום לעלייה במפלס הים.

ההערכות השליליות ביותר חוזות שעליית פני הים תגיע ל-5 סנטימטרים בשנה. זה מהר מאוד! דמיינו נקודה קרובה לאוקיינוס שבה האצבעות שלכם נרטבות מעט כיום. בעוד 40 שנים, מפלס המים יכול להגיע מעל לראשכם! חשוב להיות מסוגלים לחזות כמה מהירה תהיה עליית מפלס הים, כך שנוכל להתכונן. לכן אנו צריכים להבין כמה קרח נמס בפועל, ומה גורם להימסות.

האוקיינוס ממיס את הקרח של אנטרקטיקה

קרח נמס מהר יותר בעשורים האחרונים בשל **שינוי האקלים**, כתוצאה מטמפרטורות חמות יותר ומאחר שיותר קרח נשבר וצף הרחק, אולם גם כתוצאה מהמים החמים יותר סביב אנטרקטיקה [3]. **זרם האוקיינוס** החזק ביותר בעולם סובב סביב אנטרקטיקה. במקומות מסוימים, הוא מביא מים חמים יחסית (1-2 מעלות צלזיוס) לכיוון מדפי הקרח [4], מספיק חמים כדי להמיס קרח אם המים והקרח באים במגע זה עם זה. אולם, האם זה קורה?

זרם אוקיינוס (Ocean Current)

התנועה הממוצעת של המים באוקיינוס. זרמי אוקיינוס יכולים להיות מונעים על ידי תהליכים שונים, כמו למשל רוח או הבדלי צפיפות במים (ראו את הכתבה שלי <https://kids.frontiersin.org/article/10.3389/frym.2019.00085>).

מאחר שקרקעית הים ברחבי אנטרקטיקה מלאה בעמקים צרים ועמוקים, הקניונים האלה יכולים לתעל מים חמים לכיוון הקרח, באופן דומה למגלשות מים שמתעלות אתכם למטה אל בריכת השחייה. אם הזרמים מצליחים לזרום מתחת למדפי הקרח, זה יכול להגביר את ההימסות מלמטה. ככל שמדפי הקרח נעשים דקים יותר, כך הקרח יחליק מהר יותר מאנטרקטיקה.

אולם קשה לזרמים חמים להיכנס מתחת למדפי הקרח הצפים. בחלקים הדקים ביותר שלהם, הם עדין מגיעים לעומק של 250-500 מטרים אל תוך המים. דמיינו את האוקיינוס בתור חדר כשפני השטח של האוקיינוס הם התקרה שלו: התקרה הייתה צונחת לפתע ב-250-500 מטרים במקום שבו מדפי הקרח מתחילים. שינוי הגובה הזה מקשה על זרמים לזרום מתחת לתקרה בחדר הדמיוני שלנו, ואנשים שרוצים להיכנס מתחת לתקרה שצנחה צריכים להתכופף או אפילו לזחול, פעולות שאנשים טובים בהן יותר או פחות. באופן דומה, ישנם סוגי זרמים שונים – אלה שנשארים קרובים לקרקעית וצוללים מתחת למכשול, ואלה שלא יכולים לעשות זאת. אולם אלו סוגי זרמים יש לנו ברחבי אנטרקטיקה, והאם המים החמים מתקרבים מספיק לקרח כדי להמיס אותו? ישנן כמה דרכים לגלות זאת.

פענוח של כמה מהר הקרח נמס, ומדוע

נדמה שאנו יכולים בקלות לקחת ספינת מחקר, להפליג לאנטרקטיקה, ולצפות בזרמים באופן ישיר. אולם ישנן כמה סיבות לכך שזה לא פשוט. מזג האוויר שם קשה והאוקיינוס מכוסה בקרח במהלך החורף, מה שמאיים על ספינות ועל צוותים. לכן, נתונים שנאספים מספינות מחקר קיימים רק במיקומים נבחרים ולאורך תקופות זמן קצרות, ורק בקיץ.

חלופה אחת היא כלי מדידה שנשארים באוקיינוס לאורך תקופות זמן ארוכות (איור 2). **מעגנים** מקובעים למיקום מסוים על קרקעית האוקיינוס, ולכן מספקים מדידות בדיוק באותו המקום. מצופים נסחפים עם הזרמים, ולכן מספקים נתונים רק במקום שאליו הזרמים לוקחים אותם. כלי מדידה יכולים גם להיות מחוברים לאריות ים, מה שמספק נתונים על המקומות שאליהם אריות ים שוחים. גלשונים הם כמו צוללות קטנות, והם נעים לאט דרך המים בעודם נשלטים מרחוק, אולם הם דורשים את נוכחותה הקרובה של ספינת מחקר. נוסף על כך אפילו עבור כלי מדידה מסוכן להיות קרובים מדי לקצה הקרח – הרבה כישורים ומזל מעורבים במיקום ובאיסוף של כלי מדידה! זה נשאר מלהיב עד הסוף: האנו נמצא שוב את כלי המדידה, ניקח אותם חזרה על הספינה, ואז – האם הם באמת פעלו בכל תקופת הזמן שהם היו באוקיינוס? הנתונים יכולים להיקרא מכלי המדידה רק כשהם מוחזרים בבטחה אל הספינה.

גישה שנייה להבנת הזרמים החמים ומדפי הקרח היא לדמות את המערכת על ידי כך שבונים אותה באופן מיניאטורי (דמיינו מודל של פסי רכבת). לאחר מכן, אנו יכולים לשנות את הצורות של מדפי הקרח או של הקניונים במודל שלנו, לדוגמה, כדי להבין את ההשפעה של כל שינוי על התנהגות הזרם בעולם האמיתי.

מדידה ישירה באוקיינוס

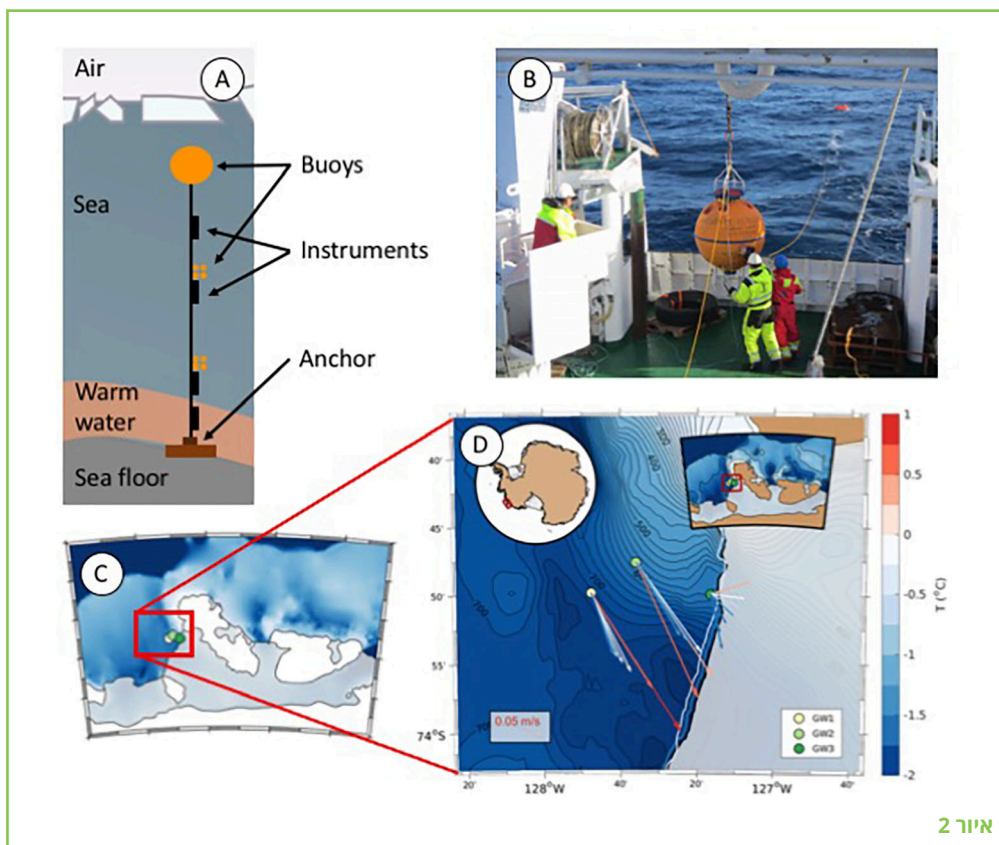
הצבנו מעגנים עם כלי מדידה שמדווחים לנו על טמפרטורת המים ועל הכיוון של זרמי אוקיינוס ועוצמתם בשלושה אתרים, לתקופה של שנתיים: אחד ממול למדף קרח, ושניים לאורך קניון

מעגנים (Mooring)

כלי מדידה אוקיינוגרפיים שמעוגנים לקרקעית הים ונשארים באוקיינוס למשך תקופת זמן מסוימת במטרה לאסוף נתונים. מעגנים יכולים למדוד זרמי אוקיינוס, ואת הטמפרטורה של מי הים ומליחותם.

איור 2

(A) מעגן באוקיינוס, שמראה את העוגן (anchor) ששומר עליו במקום, את המצופים (buoys) ששומרים עליו ישר, ואת כלי המדידה השונים שנדרשים למדידת הטמפרטורה של המים, כמה מלח יש במים, והכיוון והמהירות של הזרמים. (B) מעגן שמורם מעבר לירכתי סירת המחקר. הכדור הכתום הגדול שתלוי על המנוף הוא מצופ שנושא את כלי המדידה שימדדו את הזרמים, ושומר על המעגן זקוף במים. מאחורי ספינת המחקר, אתם יכולים לראות חלקים אחרים של המעגן שכבר צפים במים. (C) מפה של אתרי המעגן שלנו (כמו באיור 1B, רק מסובבת). (D) התוצאות משלושת המעגנים שלנו: חיצים מראים את הכיוון שבו הזרמים נעים, והצבעים מראים את הטמפרטורות של הזרמים האלה.



איור 2

שמתעל מים לכיוון מדף הקרח. נתונים משני מעגנים הראו מים שזורמים לכיוון מדף הקרח. המעגן השלישי, הקרוב ביותר למדף הקרח, הראה את הזרם הופך כיוון ממש לפני הגעה למדף הקרח. משמעות הדבר היא שהמים החמים של הזרם לא ממשיכים ישר מתחת למדף הקרח. במקום זאת, הם מתהפכים וזורמים לאורך חזית מדף הקרח, לפני שהם זורמים חזרה אל תוך האוקיינוס הפתוח. לכן, הקרח אינו נמס בכמות שהיה נמס אם הזרם היה נכנס מתחת למדף הקרח.

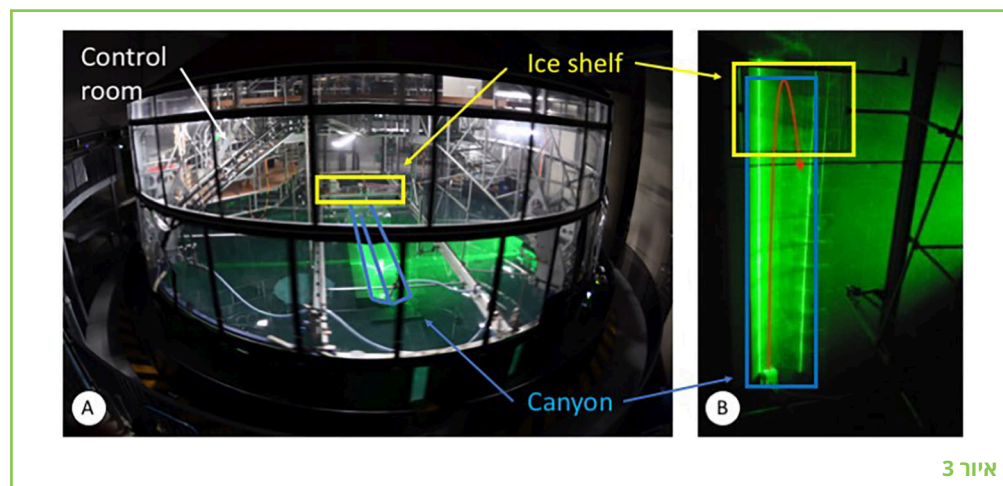
שחזור זרמי אוקיינוס בעולם מיניאטורי

במעבדה בגרנובל, צרפת, מצאנו הסבר לשאלה מדוע זרמי האוקיינוס הסתובבו (איור 3). השתמשנו בבריכה מסתובבת בקוטר 13 מטרים, אשר מדמה את סיבוב כדור הארץ. בנינו קניון מפלסטיק שייצג את האזור שאנו מתעניינים בו באנטרקטיקה. לאחר מכן, פמפנו מים אל תוך הקניון כדי ליצור זרם. קצה הקניון כוסה ב"מדף קרח" מפלסטיק שיכולנו להרים, להוריד ולהטות כדי ליצור תנאים שונים. הפכנו את הזרמים לניתנים לראייה על ידי ערבוב חלקיקי פלסטיק אל תוך המים, והארטם עם לייזרים. על ידי מעקב אחרי תנועת חלקיקי הפלסטיק בין תמונות של חלקיקים מוארים בלייזר, יכולנו לשחזר את הזרמים.

עבור מדף קרח שמתחיל עם מדרגה חדה, הזרם מכרסם את חזית מדף הקרח, אולם הוא מאולץ להסתובב אחורה בלי לזרום מתחת למדף. עם תנועת מים מעטה ביותר מתחת לקרח, יש שם המסה מועטה. אולם אם צורת המדף משתנה כך שהוא מתחיל בפני השטח של הים ואז בהדרגה מגיע עמוק יותר אל תוך המים, קל יותר לזרמים לנוע מתחת לקרח. מדף

איור 3

(A) מבט מבחוץ על בריכת השחייה המסתובבת שקוטרה 13 מטרים. שימו לב לחדר הבקרה (control room) שמסתובב עם הבריכה, כמו גם ל"מדף הקרח" (ice shelf) ול"קניון" (canyon) במים. (B) מבט מלמעלה של מודל הקניון (בכחול) מתחת למדף הקרח (בצהוב). הזרם (באדום) זורם מתחת למדף הקרח, ואז מסתובב וזורם שוב החוצה.



איור 3

קרח מהצורה הזו יימס מהר יותר. כמו כן, אם המבנה של הזרם משתנה כך שרק החלקים הנמוכים יותר נעים, הוא עשוי להתנהג אחרת, ויותר מים עשויים להיות מסוגלים להיכנס מתחת למדף הקרח.

חיזוי העתיד

עכשיו, משאנו יודעים כיצד צורתם של מדפי הקרח, כמו גם סוג הזרמים שמגיעים אליהם, משפיעים על המהירות שבה הקרח נמס, אנו יכולים להשתמש בידע הזה כך שסייע לחזות מפלסי ים עתידיים. **מודלים ממוחשבים**, בדומה לאלה שמשמשים עבור תחזיות מזג אוויר, יכולים לחשב במדויק לאן זרמי האוקיינוס נעים וכמה קרח הם ממיסים. המידע הזה נהפך לחתיכה אחת בפאזל של חיזויי אקלים, שיכולים לסייע לקבל החלטות מדיניות הן במטרה למנוע שינויים במפלסי הים והן כדי להסתגל אליהם.

תודות

המחברות רוצות להודות לק. דאי על עזרתה עם האיורים. הניסויים שלנו נתמכו על ידי תוכנית H2020 של האיחוד האירופי דרך מענק Hydralab-plus, חוזה מספר 654110. אנו מוקירים בתודה את התמיכה של המענק עבור המחקרות, באופן הבא: ED ו-NS ממועצת המחקר הנורווגית דרך המענקים 267660 (TOBACO) ו-231549 (WARM); AW ממועצת המחקר השוודית ומהאיגוד השוודי למחקר אסטרטגי דרך מרכז הרובוטיקה הימית השוודי (SMaRC); אנו מודות לא. פר עבור השאלת הציוד עבור GW1 ו-GW2.

מאמר המקור

Wählin, A. K., Steiger, N., Darelus, E., Assmann, K. M., Glessmer, M. S., Ha, H. K., et al. 2020. Ice front blocking of ocean heat transport to an Antarctic ice shelf. *Nature* 578:568–71. doi: 10.1038/s41586-020-2014-5

מודל מחשב

(Computer Model)

דרך לייצג תהליך פיזי על מחשב, שמאפשרת למדענים להבין את הסביבה, או לחזות את ההשפעות של שינויים עתידיים. תחזיות מזג אוויר הן דוגמה למודל מחשב. להסבר טוב, ראו <https://kids.frontiersin.org/article/10.3389/frym.2019.00161>

מקורות

1. Wåhlin, A. K., Steiger, N., Darelius, E., Assmann, K. M., Glessmer, M. S., Ha, H. K., et al 2020. Ice front blocking of ocean heat transport to an Antarctic ice shelf. *Nature* 578:568–71. doi: 10.1038/s41586-020-2014-5
2. Glessmer, M. S. 2019. How does ice form in the sea? *Front. Young Minds* 7:79. doi: 10.3389/frym.2019.00079
3. Shepherd, A., Fricker, H. A., and Farrell, S. L. 2018. Trends and connections across the Antarctic cryosphere. *Nature* 558:223–32. doi: 10.1038/s41586-018-0171-6
4. Assmann, K. M., Darelius, E., Wåhlin, A. K., Kim, T. W., and Lee, S. H. 2019. Warm circumpolar deep water at the western getz ice shelf front, Antarctica. *Geophys. Res. Lett.* 46:870–8. doi: 10.1029/2018GL081354

פורסם אונליין: 23 ביוני 2022

נערך על ידי: Carolyn Scheurle

מנחה מדעי: Rita Araujo

ציטוט: Glessmer MS, Steiger N, Darelius E and Wåhlin A (2022) האם זרמי אוקיינוס חמים ממסים את הקרח באנטרקטיקה? *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2020.00124-he

Glessmer MS, Steiger N, Darelius E and Wåhlin A (2020) Are Warm Ocean Currents Melting the Ice in Antarctica? *Front. Young Minds* 8:124. doi: 10.3389/frym.2020.00124

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

COPYRIGHT © 2020 © Glessmer, Steiger, Darelius and Wåhlin 2022. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון Creative Commons Attribution License (CC BY). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחבר(ים) המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקרות צעירות

ISABEL, גיל: 9

היי, אני Isabel, מפורטוגל. אני בת 9, אוהבת קריאה, כתיבה ומוזיקה. יש לי שלושה חתולים, ואני אוהבת ללמוד היסטוריה. אין לי מושג מה ארצה להיות כשאגדל. אני אוהבת מאוד ירקות (ופירות).



**MARGARIDA, גיל: 12**

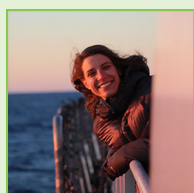
קוראים לִי Margarida, אני בת 12, אוהבת קריאה, טיפוס ונתיבה. אני אוהבת מדע, במיוחד כל מה שקשור לחורים שחורים, ואין לי שום מושג מה ארצה להיות כשאגדל. אני גם אוהבת מאוד ביולוגיה.

הכתבות**MIRJAM S. GLESSMER**

דוקטור Mirjam S. Glessmer היא אוקיינוגרפית פיזיקאית. היא מרותקת מהמים על כל צורתיהם: אוהבת ללכת "לצפות בגלים" על שלוליות, בזרמים, או בים, או לערוך ניסויים בפיזיקה של האוקיינוס באמצעות פריטי מטבח בלבד (אוקיינוגרפיה של המטבח). ל-Mirjam יש תשוקה לחלוק את הריתוק שלה ביחס לכל הדברים שקשורים לפיזיקה של האוקיינוס, ואתם מוזמנים ליצור איתה קשר אם יש לכם שאלות ב-www.mirjamglessmer.com/contact או דרך המייל. *mnglessmer@gmail.com

**NADINE STEIGER**

Nadine Steiger היא דוקטורנטית באוקיינוגרפיה פיזיקלית, והיא לומדת הרבה על האוקיינוס. היא אוהבת את הקסם של אזורי קוטב, עם כל הקרח היפה – כיצד הוא מתחבר לאוקיינוס ולשאר מערכות האקלים? עד כה, כבר הייתה לה הזדמנות לצאת להפלגת מחקר לאנטרקטיקה, והיא עבדה במשך חודשיים על פלטפורמה מסתובבת בצרפת, מרותקת מהאור הירוק שמדגיש את הזרמים במים.

**ELIN DARELIUS**

דוקטור Elin Darelius היא חוקרת קוטב ואוקיינוגרפית פיזיקאית שעובדת באוניברסיטת ברנן. היא אוהבת קרח ומים קרים (אולם לא לשחות בהם), והשתתפה בארבע הפלגות מחקר לאנטרקטיקה. היא סייעה להציב את המעגנים ששימשו במחקר הזה, והלכה לשחות בבריכת שחייה מסתובבת בצרפת (שם מדף הקרח היה פלסטיק, והמים היו נחמדים וחמים). אתם מוזמנים לבקר בבלוג שלה (<https://skolelab.uib.no/blog/>) (darelius/) ולקרוא עוד על מה שהיא עושה.

**ANNA WÄHLIN**

פרופסור Anna Wåhlin היא אוקיינוגרפית פיזיקאית. היא מרותקת ממים ומקרח, ומהאופן שבו מים וקרח מתקשרים בימים בקוטב של כדור הארץ. בכדי להבין את האוקיינוס, היא יוצאת להפלגות מחקר על מנתבמטרה לאסוף נתונים, אולם היא גם עובדת עם ניסויים במעבדה ומוזללים ממוחשבים. היא נהנית ללמד סטודנטים על הפיזיקה של האוקיינוס באוניברסיטה שלה, שממוקמות בגוטנברג, עיר קטנה בחוף המערבי של שוודיה.



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