



חיים בתוך מי ים קפואים ומתחתיהם

David N. Thomas^{1*}, Hermanni Kaartokallio²

¹ בית הספר למדעי האוקיינוס, אוניברסיטת בנגור, בנגור, בריטניה
² בית הספר הפיני לסביבה (SYKE), המרכז לחקר הים, הלסינקי, פינלנד

מי ים קופאים בטמפרטורה של מתחת ל-2°C מעלות צלזיוס, ולכן בחלק מסוים מהשנה קרח מכסה אזורים נרחבים באוקיינוסים הצפוניים. ראשית, גבישי קרח צפים על פני השטח; לאחר מכן, נוצרת שכבת קרח שיוצרת נוף קפוא על פני השטח של האוקיינוס. הקרח הצף הזה נע עם הרוח ועם הזרמים, ויכול ליצור פיסות גדולות של שברי קרח, או לחשוף מים פתוחים, כששכבות הקרח הצפות מתרחקות זו מזו. כשמי הים קופאים, כיסי מי מלח נכלאים ברשת של תעלות זעירות וכיסים ברחבי הקרח. הרשת הזו היא מקום מחיה עבור אורגניזמים מיקרוסקופיים של קרח כמו חיידקים, אצות, חיות זעירות, תולעים קטנות וסרטנאים. אצות קרח גדלות הכי טוב בחלק הפנימי של הקרח, שבו חיות יכולות לאכול אותן. קרח ים הוא אתר חשוב לייצור מזון עבור אורגניזמים רבים באוקיינוסים ובימים הצפוניים. כאשר הקרח נמס הוא יכול לתמוך בחיים על פני קרקעית הים, בעומק של אלפי מטרים מתחת לפני הים.

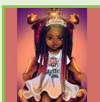
כיצד נוצר קרח ים?

מים מתוקים מאגם, מנהר או מהברז קופאים ב-0°C מעלות צלזיוס. אם נוסף מלח למים, נקודת הקפיאה יורדת. משמעות הדבר היא שמי ים, שהם בדרך כלל בעלי מליחות (תכולת

סוקרות צעירות

PRICE

גיל: 12



PRINCESS

גיל: 14



PROVIDENCE

גיל: 8



מליחות

(Salinity)

תכולת המלח של מים - למים ללא מלח יש מליחות של 0, למי ים שמכילים 35 גרם של מלח בכל ליטר של מים יש מליחות של 35, ולמי מלח יש מליחות של 200.

מלח) של 30-35 גרם של מלח לכל ליטר של מים, לא מתחילים לקפוא עד לסביבות (2-) מעלות צלזיוס.

באזורי הקוטב במהלך הסתיו (אוגוסט/ספטמבר באזור הארקטי, מרץ/אפריל באנטרקטיקה), טמפרטורות האוויר צונחות מהר ומקררות את פני השטח של המים מתחת לנקודת הקיפאון. שכבות פני השטח של האוקיינוסים, עד לכמה מאות מטרים מתחת לפני השטח, מתערבבות כל הזמן על ידי תנועת הרוח והמים. כשהקפיאה מתחילה, גבישים זעירים של קרח מופיעים בכל מקום בשכבת המים של פני השטח, וצפים לפני השטח. זוהי תחילתו של מה שמכונה **קרח צף**: המחוזות הקפואים אשר ליבו את דמיונם של חוקרים והרפתקנים במשך מאות שנים [1].

קרח צף (Pack Ice)

קרח שנע על ידי זרמי האוקיינוס והרוח.

כאשר יותר ויותר גבישי קרח מצטברים על פני השטח של המים, הם יוצרים שכבה שמידת סמיכותה היא כשל דייסה דקה. "קרח דייסה" נע על ידי הרוח ויוצר אזורים ענקיים של משטחי גבישים של קרח, שיכולים לכסות קילומטרים רבועים רבים (איור 1). על פני השטח, הקרח נמצא במגע עם האוויר הקר, והגבישים קופאים יחד ויוצרים שכבת קרח קשיחה יותר. כשקור מחלחל דרך הקרח, הקרח גדל בעיקר מהתחתית, ומקפיא את מי הים שנמצאים במגע עם החלק התחתון של שכבת הקרח. בתוך כמה שבועות, הקרח יכול להגיע לעובי של יותר ממטר.

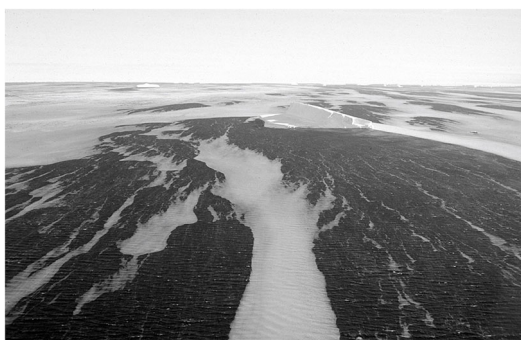
מי האוקיינוס נעים כל הזמן, וקרח נשבר לפיסות גדולות שנקראות **שכבות קרח צף**, שצפות על פני השטח של האוקיינוס. שכבות אלה עשויות להיות ברובן של כמה מטרים ועד יותר מ-100 מטרים. שכבות קרח צף רבות יכולות לקפוא יחד וליצור שכבות רציפות ברוחב של עד כמה קילומטרים. אלה, בתורן, עשויות להישבר שוב לשכבות קטנות יותר כשהקרח נע עם הזרמים, עם הגאות ועם הרוח. כאשר שכבות הקרח נצמדות זו לזו מכוחם של הרוח והזרמים, הן יכולות להיערם אחת על גבי השנייה וליצור ערימות ענקיות של קרח, שנקראות "רכסי קרח" (איור 2B). כמו כן הרוח יכולה להרחיק שכבות של קרח זו מזו, ולחשוף מרחבים גדולים של מים שנקראים "leads". הקרח שזז כל הזמן יוצר נוף קפוא שמשתנה מיום ליום, ואפילו משעה לשעה (איורים 2A,B).

שכבת קרח צף (Ice Floe)

אזור רציף של קרח ים. גודלו עשוי להיות בין כמה מטרים רבועים לכמה קילומטרים רבועים.

איור 1

כשקרח מתחיל להיווצר, אזורים נרחבים של מה שמכונה "קרח שומני" יוצרים אזורים חלקלקים על פני השטח של האוקיינוס.



איור 1

איור 2

הקרח הצף באוקיינוסים הארקטי והאנטרקטי הוא סביבה משתנה שיכולה להיות עוינת לחיים. (A) נופי קרח קרים שנישאו על ידי הרוח, יוצרים את פני השטח שנראים נטולי חיים. (B) פיסות גדולות של קרח נדחפו לאוויר ויצרו רכסים, כאשר שכבות של קרח צף התנגשו זו בזו.



איור 2

בתוך קרח הים

גבישים גדלים של קרח ומים טהורים לא מכילים מלחים או תרכובות אחרות שבדרך כלל מומסים במי הים. לכן, כאשר גבישי הקרח קופאים יחד ויוצרים קרח קשיח יותר, כל החומרים המומסים במי הים מוצאים החוצה, מה שיוצר נוזל מלוח מאוד שנקרא **מי מלח**. מי המלח האלה אוספים רשת של תעלות קטנות מאוד, שנקראות **תעלות מי מלח**, וחורים שנקראים **נקבוביות** בתוך הקרח הגדל. ההשוואה הטובה ביותר היא לגבינה שוויצרית או ספוג, שבהם החלקים המוצקים הם קרח, והחורים מלאים בתמיסת מי מלח.

כשקרח נעשה קר יותר, גודלן של תעלות הקרח והגבשושיות קטן, ומליחות מי המלח בתוכן גדלה. הקרח בתחתית שכבת הקרח הצף ימצא בנקודת הקפיאה של מי הים [בסביבות (-2) מעלות צלזיוס], והקרח בחלק העליון של שכבת הקרח הצף יהיה קרוב לטמפרטורת האוויר. מאחר שטמפרטורות האוויר במהלך חורפים בקוטב יכולות להגיע עד ל-(-30) מעלות צלזיוס, יהיה שיפוע טמפרטורות בין החלק העליון של הקרח ליד האוויר, לבין החלק התחתון של הקרח. בשל השיפוע הזה, הקרח הקר יותר בחלק העליון של שכבת הקרח הצף יכיל יותר תעלות מי מלח וגבשושיות קטנות שמלאות במי מלח עם מליחות גבוהה יותר, מאשר אלה שנמצאות בקרח נמוך יותר.

מי מלח (Brine)

תמיסה עם ריכוז גבוה של מלח.

קיום חיים בקרח

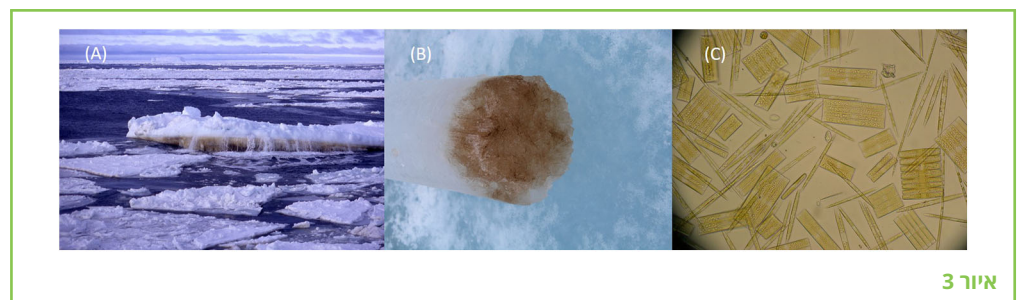
בסתיו, כשגבישי הקרח צפים למעלה דרך המים, הם תופסים חלקיקים בינם לבין עצמם, ואוספים אותם לצורה של "דייסת קרח" שנוצרת על פני השטח של האוקיינוס. דברים קטנים שצפים על פני המים כמו מיקרו-פלסטיקים או משקעים, וכן יצורים מיקרוסקופיים חיים דוגמת חיידקים, מיקרו-אצות, זחלים וסרטנאים קטנים, יכולים להיתפס על ידי גבישי הקרח. למעשה, כל מה שנדבק לגבישי הקרח ולא מסוגל לשחות הלאה, יכול לנוע מהמים הפתוחים אל הקרח.

אורגניזמים שמסוגלים לחיות בקרח נדרשים לשרוד בטמפרטורות של קפיאה, ולהתמודד עם מליחויות מי מלח שמשנתנות כל הזמן. הם גם צריכים להיות מספיק קטנים כדי שלא להיתקע ולקפוא בתוך תעלות קטנות של מי מלח. זו אינה בעיה בטמפרטורות חמות יותר מ-10 מעלות צלזיוס, אולם בטמפרטורות קרח קרות יותר, בסביבות (-20) מעלות צלזיוס, המרווחים שבין גבישי הקרח כל כך קטנים שיש מקום רק לחיידקים הקטנים ביותר [2].

בחלק התחתון של שכבות הקרח הצף שקרוב למי הים, הקרח עשוי להיות דחוס במיקרואורגניזמים. ריבוי החיים שבו צובע לפעמים את הקרח בצבע צהוב או בצבע קפה עשיר (איורים 3A, B). היצורים השכיחים ביותר בחלק התחתון של קרח הים הם אצות זעירות. ישנם גם חיידקים רבים שחיים בליחה שמויצרת על ידי אצות קרח ושאריות של אורגניזמים מתים. קבוצת אצות הקרח שמכנה **דיאטומים** היא השכיחה ביותר (איור 3C). דיאטומים גדלות בתוך קליפות קשיחות שנראות כמו קופסאות מקושטות בתבניות שבנויות מסיליקט, שהוא כמו זכוכית קשיחה.

אצות, כמו צמחים, משתמשות בפוטוסינתזה כדי לתפוס אנרגיית שמש ולגדול. בתחתית של שכבת קרח צף די חשוך, במיוחד אם היא מכוסה בשכבת שלג. לכן, האצות שגדלות בקרח הים טובות בגדילה בתנאים של מעט אור. כדי לעשות זאת, עליהן להכיל כמות גדולה יותר של פיגמנט כימי, כך שיוכלו לכלוא את האור שמתניע את תהליך הפוטוסינתזה. הכמות הגדולה של הפיגמנטים כולאי האור האלה היא שיוצרת את צבעו של הקרח.

כדי לשרוד את הטמפרטורות הנמוכות ואת המליחויות הגדולות של מי המלח, האצות צריכות לכווון את הסביבה הפנימית שלהן כך שתוכל לאזן את השינויים בסביבה החיצונית, על ידי הגדלה של חלק מהכימיקלים שבתוך התאים שלהן או הפחתתם. חלק מהכימיקלים האלה שולטים בלחץ שבתוך תאי האצה, כך שהן לא מתכווצות או מתפוצצות מההבדלים במליחויות. כימיקלים אחרים יכולים להתנהג כ"סוכני אנטי-קפיאה". הרבה מהאצות ומהחיידקים שמשגשים בקרח מכסים את החלק החיצוני של התאים בכיסויים דמויי-ג'ל, אשר מגינים על התאים מנזק שיכול לנבוע מגבישי הקרח, ומהשינויים הקיצוניים ביותר בטמפרטורה ובמליחות.



איור 3

דיאטומים (Diatoms)

אצות חד-תאיות שכיחות במי ים ובמים מתוקים. הן מאופיינות על ידי כך שהן עטופות בכיסוי חיצוני קשיח שעשוי מסיליקט (דמוי זכוכית).

איור 3

(A) צָבָרִים עשירים של יצורים חיים מכתמים את החלק התחתון של שכבות קרח צף בצבע חום. (B) דגימה של קרח ים חום שנלקחה באמצעות מחורר קרח בקוטר של 10 סנטימטרים. (C) תמונת מיקרוסקופ של דיאטומים של קרח ים, מוגדלת פי 1,000 (התמונות צולמות על ידי J. Stefels).

אצות קרח ים – יכולות להוות מזון עבור אורגניזמים רבים

המספרים הגדולים של אצות ושל חיידקים בקרח יוצרים קרקע עשירה של הזנה עבור אורגניזמים אחרים שאוכלים אותם. סרטנאים שטרגליים הם יצורים קטנים דמויי שרימפ שניתן למצוא בכמויות גדולות בשכבות הנמוכות, ה"חמות" יותר של הקרח, שם הם אוכלים אצות קרח וחיידקים. בחלקים הקרים יותר של הקרח, שבהם תעלות מי המלח קטנות יותר, יכולות לחיות במספרים גדולים חיות עם גוף גמיש יותר כמו למשל תולעים שטוחות שנקראות תולעי ריסים, תולעים עגולות שנקראות נמטודות, ואורגניזמים פשוטים שנקראים ריסניות. חיות אלה יכולות להתכווץ במים במליחות גבוהה ולהתנפח במים במליחות נמוכה יותר, מה שמסייע להן לנוע דרך מערכת של תעלות מי מלח.

השכבות הנמוכות יותר של קרח צף הן בדרך כלל המקום שבו ניתן למצוא את מרבית היצורים החיים (איור 3A). עקב כך נמשכים אורגניזמים גדולים יותר לחלק התחתון של הקרח, שם הם יכולים לאכול אורגניזמים שגדלים בין גבישים גדולים של קרח, שנתלים מתחתית הקרח כמו מְרֵעָה הפוך בצבע חום בהיר שזוהר מהשמש שלמעלה. אורגניזמים כאלה הם רבים ומגוונים דוגמת חשופיות ים, סרטנאים גדולים יותר כמו למשל קריל, ואפילו דגים. הקרח הוא מקור מזון חשוב מאוד עבור החיות הגדולות יותר האלה, במיוחד בחורף, שבו יש מעט מזון במים החשוכים שלמטה. החיות הקטנות שאוכלות אצות מתחת לקרח הים מהוות, בתורן, מזון עבור חיות גדולות עוד יותר כמו אריות ים, פינגווינים וציפורים ימיות אחרות. לכן, גדילת אצות קרח ים משמעותית לקיום הרבה מהחיים במים המכוסים בקרח.

אצות קרח ים יכולות לכסות לגמרי את החלקים התחתונים של שכבות הקרח הצף באביב ובראשית הקיץ (איור 3). חלק מהמינים יוצרים רצועות או גושים שנתלים מהחלק התחתון של הקרח. במוקדם או במאוחר, אספקת המזון העשירה הזו נופלת מקרח הים ושוקעת אל תוך המים, אם היא לא נאכלת, ויכולה להגיע לקרקעית הים, בעומק של אלפי מטרים מתחת לפני השטח של האוקיינוס. שם היא מהווה מזון לחיות גדולות וניידות כמו מלפפוני ים וכוכבי ים [3].

מערכות אקולוגיות של קרח ים הן פגיעות

אף על פי שקרח הים הוא מרחב מחיה חשוב עבור אורגניזמים בחורף, אורך חייו קצר. באביב ובראשית הקיץ, כשטמפרטורות האוויר והמים עולות, הקרח מתחיל להימס, כל האורגניזמים שחיים בתוכו משתחררים חזרה אל המים, שם הם נשארים עד שמתחיל המחזור הבא של קפיאה בסתיו. אף על פי שקרח הים בא והולך, האזורים העצומים שמכוסים על ידי קרח ים בסתיו ובחורף (בגודל של 15 מיליון קילומטרים רבועים באוקיינוס הארקטי, ו-22 מיליון קילומטרים רבועים באוקיינוס האנטרקטי), יוצרים את אחת הקהילות האקולוגיות הגדולות ביותר על פני כדור הארץ. האזור שמכוסה על ידי קרח ים בכדור הארץ הוא בעל שטח גדול מהשטח של סוונות או אדמות יבול. באוקיינוס הארקטי ובאוקיינוס האנטרקטי, אנו כבר רואים שהאקלים המשתנה משנה מאוד את התזמן שבו קרח ים נוצר ונמס, כמו גם את טבעו של אותו קרח. זיהוי חשיבותם של החיים שמשגשגים בתוך הקרח ועל גביו הוא קריטי להבנתנו את המשמעות של שינויי האקלים עבור מערכות אקולוגיות שקשורות לקרח הים.

מקורות

1. Glessmer, M. 2019. How does ice form in the sea? *Front Young Minds* 7:79. doi: 10.3389/frym.2019.00079
2. Thomas, D. N., and Dieckmann, G. S. 2002. Antarctic sea ice—a habitat for extremophiles. *Science*. 295:641–4. doi: 10.1126/science.1063391
3. Boetius, A., Albrecht, S., Bakker, K., Bienhold, C., Felden, J., and Fernández-Méndez, M., et al. 2013. Export of algal biomass from the melting Arctic sea ice. *Science*. 339:1430–2. doi: 10.1126/science.1231346

פורסם אונליין: 29 בספטמבר 2022

נערך על ידי: Kirsty C. Crocket

מנחה מדעי: Florence Awino

ציטוט: Thomas DN and Kaartokallio H (2022) חיים בתוך מי ים קפואים ומתחתיהם. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2020.537335-he

תורגם והותאם: Thomas DN and Kaartokallio H (2020) Life Inside and Under Frozen Seawater. *Front. Young Minds* 8:537335. doi: 10.3389/frym.2020.537335

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

COPYRIGHT © 2020 © Thomas and Kaartokallio 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 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.

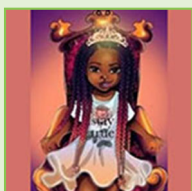
סוקרות צעירות

PRICE, גיל: 12

Price אוהבת להמציא סיפורים, כתבה ספר – “גברת זבלסון ואימפריית הפסולת”. היא אמיצה וקופצנית, נהנית מהתעמלות, אתלטיקה, כדורעף וכדורסל. Price נהנית גם מזמן איכות עם משפחתה, והיא יצירתית מאוד. בבית הספר שלה, היא חלק מ“הקבוצה הירוקה” שפועלת להגנה על הסביבה. היא אוהבת להשתתף בדיבייטינג, ויש לה תשוקה ללמוד ולהפוך לאקטיביסטית כנגד חוסר צדק חברתי.

PRINCESS, גיל: 14

Princess-14 יש הרבה רעיונות ומטרות, ותשוקה לסייע לאנשים אחרים להשתפר. היא חושבת לעומק בעת פתרון בעיות. Princess מצחיקה, ספורטיבית, קופצנית ואדם אדיב, אשר אוהב לחקור במטרה למצוא פתרונות. היא יצירתית, ספרותית ואוהבת לכתוב – כתבה ספר שנקרא “Sarah and the waste center”.



היא אוהבת כדורעף, מוזיקה, להקות, אומנות, צילום דיגיטלי וגם ללמוד דברים חדשים. היעד שלה הוא ללמוד עוד על מדע, ולשפר את כישורי הכתיבה והעריכה שלה.



PROVIDENCE, גיל: 8

Providence היא הצעירה ביותר מבין שלוש אחיותיה. היא שובבה וקופצנית, סקרנית, דברנית ואוהבת לשאול הרבה שאלות שגורמות לאחרים לצחוק. היא אוהבת להכיר חברים חדשים ולטייל, וגם ניסויים מדעיים. כחלק מכך היא עשויה להרוס, לתקן, או למחזר חלק מפריטי הבית. כך למשל היא תיקנה רמקול מקולקל, אך לאחר כמה שבועות בפעולה, היא עיצבה את חוטי הרמקול כדלגיות. יש לה תשוקה למוזיקה ולספורט.

הכותבים

DAVID N. THOMAS

David N. Thomas הוא פרופסור לביולוגיה ימית באוניברסיטת בנגור, בריטניה. המחקר שלו נפרש על טווח רחב של נושאים הקשורים לאקולוגיה ולפיזיולוגיה של אצות ימיות ופיטופלנקטון. עבודתו מצויה בממשק שבין ביולוגיה לכימיה במערכות של ים, שפכי נהר ונהרות. יש לו ניסיון ענף בחקר החיים בתוך קרח צף קפוא, על גביו ומתחתיו, באוקיינוסים הארקטי והאנטרקטי ובים הבלטי. *d.thomas@bangor.ac.uk ; david.thomas@helsinki.fi



HERMANNI KAARTOKALLIO

Hermanni Kaartokallio הוא חוקר ראשי במכון הפיני לסביבה (SYKE), במרכז לחקר הים, הלסינקי, פינלנד. המחקר שלו מתמקד בחיידקים ימיים, במיוחד בקרח ים ובסביבות קרות אחרות בימים הבלטי והארקטי, בכלל זה פעילות, ייצור, תהליכים קהילתיים ואינטראקציות של חיידקים עם סביבתם. הוא חוקר חיידקים במים כשהם עוברים מהאדמה דרך נהרות למי חופים, ואת האופן שבו חיידקים שורדים בסביבות ימיות קרות.



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