

## חיים מיקרוביים מתחת לקרקעית הים – סיפור על התמדה

Man-Yin Tsang<sup>1\*</sup>, Fumio Inagaki<sup>2</sup>

<sup>1</sup>המעבדה לאיזוטופים של גיאוביולוגיה, המחלקה למדעי כדור הארץ, אוניברסיטת טורונטו, טורונטו, אונטריו, קנדה  
<sup>2</sup>משרד לקידום קדיחה בשכבת ה-mantle, המכון לחקר ולהנדסת חיים ימיים בכדור הארץ (MarE3), הסוכנות היפנית למדעים ולטכנולוגיות חיים ימיים בכדור הארץ (JAMSTEC), יוקהאמה, יפן

### סוקר צעיר

NICOLAS

גיל: 9



מתחת לקרקעית הים ישנם מיליארדי חיים מיקרוביים חד-תאיים. משקעים ימיים קוברים את המיקרואורגניזמים האלה עמוק יותר ויותר. בו בזמן המיקרואורגניזמים פוגשים לחצים וטמפרטורות גדולים וכמויות מופחתות של מזון ושל מים. אף על פי שהם חיים בתנאים קשים, המיקרואורגניזמים האלה נשארים בחיים ושומרים על החברות שלהם. נכון להיום, אנו יודעים שהחברות המיקרוביות האלה יכולות לשרוד במשך מיליוני שנים, בעומק של 2.5 קילומטרים מתחת לקרקעית הים, ובטמפרטורות של יותר מ-100 מעלות צלזיוס. מדענים משתמשים בגישות שונות כדי לחקור את המיקרואורגניזמים המרתקים האלה.

### מתחת לקרקעית הים: מקום שקשה לחיות בו

אתם קופצים לים ושוקעים לאט אל תוך המים המלוחים. נעשה חשוך יותר ויותר, כאשר האור לא יכול להגיע לעומק הים. אתם שוכבים על קרקעית הים עם דגים, דיונונים ותולעים. בקצב של פחות מסנטימטר אחד בכל 1,000 שנים, אבק מלמעלה קובר אתכם. אתם נעשים חלק מהמשקע, ואתם בקושי יכולים לזוז. כיצד משהו יכול לשרוד מתחת לקרקעית הים? בעוד שבני אדם אינם מסוגלים לחיות שם, מיקרואורגניזמים כן (איור 1). אתם יכולים למצוא אותם

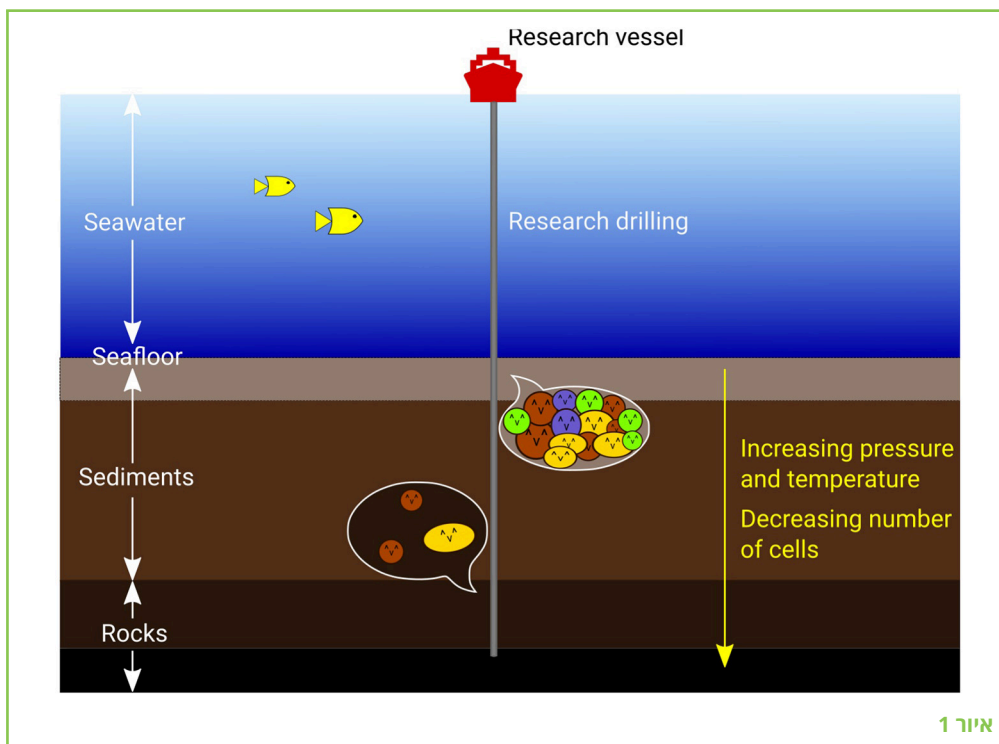
### משקע

(Sediment)

חומרים רכים ומוצקים ששוקעים בקרקעיתו של גוף המים. דוגמאות כוללות חול וחמר.

**איור 1**

הרבה מיקרואורגניזמים, שמוצגים כאן כעיגולים ואליפסות צבעוניים, חיים מתחת לקרקעית הים. תנאי החיים קשים יותר עם עומק משקע רב יותר וגיל גדול יותר, מאחר שהטמפרטורות והלחצים גדלים. מדענים קודחים לתוך קרקעית הים מתוך מכלי מחקר כדי לחקור את המיקרואורגניזמים והסביבות האלה.



במשקעים של כל רצפות האוקיינוס על כדור הארץ. המיקרואורגניזמים האלה כל כך זעירים שכל אחד מהם מורכב מתא אחד בלבד. מדענים מעריכים שישנם יותר אורגניזמים חד-תאיים מתחת לקרקעית הים מאשר שישנם כוכבים ביקום [1]!

האם קשה למיקרואורגניזמים לחיות מתחת לקרקעית הים? כן, זה קשה. המיקרואורגניזמים האלה מתמודדים עם לחצים גדולים, מחסור במים ובמזון וטמפרטורות גבוהות.

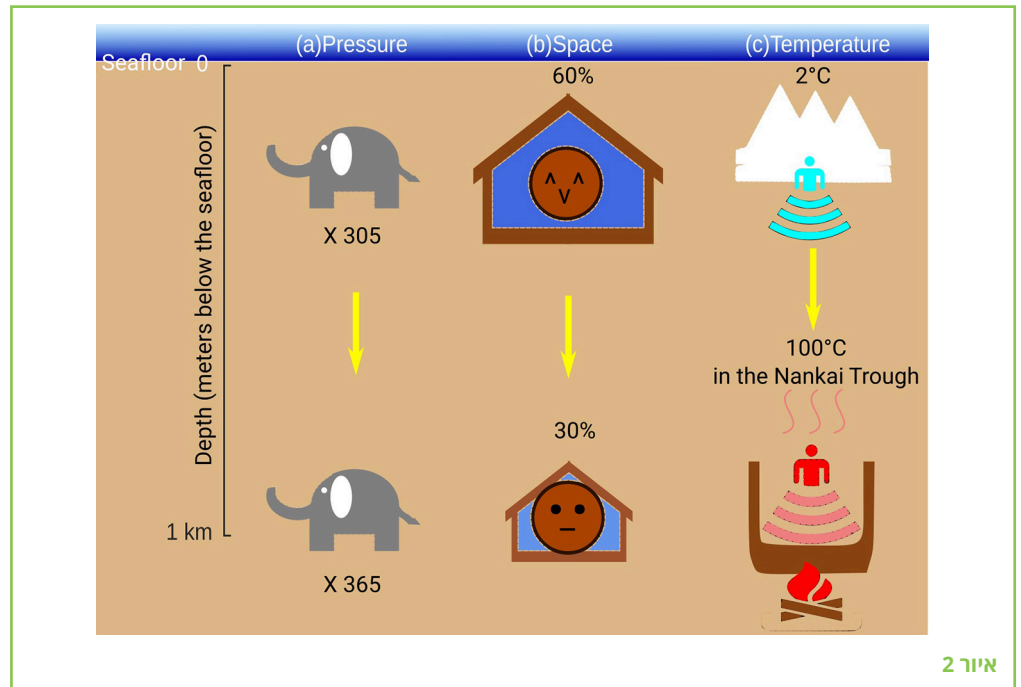
מיקרואורגניזמים בקרקעית הים צריכים להתמודד עם לחצים גדולים יותר ככל שהם קבורים עמוק יותר. במשקעים של עומק הים, המיקרואורגניזמים האלה עומדים בלחצים גדולים פי כמה מאות ממה שאנו חווים על פני השטח של כדור הארץ (איור 2a). לכן מדענים חוקרים את המיקרואורגניזמים האלה במטרה להבין את המגבלות של החיים [2], ואת האסטרטגיות שהמיקרואורגניזמים האלה משתמשים בהן כדי לשרוד. המיקרואורגניזמים האלה מעודדים אותנו להמציא חומרים ותרופות חדשים להתמודדות עם סביבות קיצוניות. הם גם ממלאים תפקיד בויסות פחמן וחמצן, ובאקלים כדור הארץ במהלך ההיסטוריה הארוכה שלו [3]. חלק מהמיקרואורגניזמים מייצרים כימיקלים מעניינים, כמו למשל מתאן, שאנו עשויים להשתמש בו כדי לייצר אנרגיה.

כאשר מיקרואורגניזמים נקברים, הכמות העצומה של מי ים ומשקעים שנמצאים מעליהם דוחסים את סביבת המחיה שלהם. ככל שהמיקרואורגניזמים קבורים עמוק יותר, כך פחות מים נמצאים בסביבה המיידית שלהם (איור 2b). על כן, בעוד שקרקעית הים נמצאת ממש מתחת למי הים, המיקרואורגניזמים שמתחת לקרקעית הים יכולים לחוות מחסור במים.

אתגר אחר של המיקרואורגניזמים העמוקים האלה הוא מחסור במזון. פחות מ-10% מהמזון האורגני מפני השטח של הים מגיע בסופו של דבר לקרקעית הים [3]. אם תאכלו בננה,

**איור 2**

שינויים בתנאים הפיזיים מתחת לקרקעית הים, שנמדדו ב-Nankai Trough שבמזרח יפן [2]. (a) בקרקעית הים (4.8 קילומטרים מתחת למים), הלחץ כבר גדול – דמיניו 305 פילים שעומדים על החזה שלכם! כשורדים עוד קילומטר למטה מתחת לקרקעית הים, הלחץ גדל מאוד, עד ללחץ שווה ערך ל-365 פילים שעומדים על החזה שלכם – 60 פילים נוספים! (b) מיקרואורגניזמים שחיים בחלל עם מים בין גרגרי חול וחרמ. בקרקעית הים, 60% מהמשקע הוא חלל. בעומק של קילומטר אחד מתחת לקרקעית הים, מחצית מהחלל שיכול להחזיק מים איננו. הטמפרטורה גדלה מ-2 מעלות צלזיוס בקרקעית הים, לכ-100 מעלות צלזיוס בעומק של קילומטר אחד מתחת לקרקעית הים. זהו ההבדל שבין שחייה במים הארקטיים לבין מים רותחים. המשקע העמוק ב-Nankai Trough הוא חם במיוחד. הטמפרטורה של משקעים רגילים בעומק של קילומטר אחד היא כ-20 מעלות צלזיוס.



איור 2

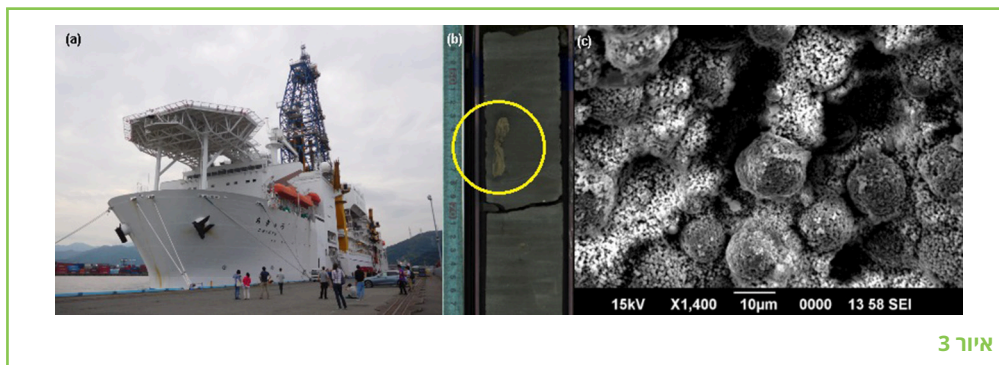
איזה חלק מהבננה תאכלו, את הבשר המתוק או את הקליפה הקשה? מרביתנו יבחרו בבשר המתוק. זו סיטואציה דומה בעומק הים. כאשר מזון שוקע מפני השטח של הים, אורגניזמים מעל לקרקעית הים לוקחים את מה שקל לעכל ומפיק הכי הרבה אנרגיה. החתיכות האחרונות של מזון שמגיע לקרקעית הים הן האפשרויות הפחות מועדפות, "קליפת הבננה" שנשארה על הצלחת. מאחר שיש להם מזון עם מעט מאוד חומרי מזון, מיקרואורגניזמים שנמצאים עמוק מתחת לקרקעית הים צריכים לשמור על האנרגיה שלהם, כך שהם לא מאוד פעילים. הם יכולים רק להרשות לעצמם להשקיע אנרגיה שהכרחית להישרדות, לדוגמה, כדי לתקן נזק לגוף ולתמוך בתפקודים הבסיסיים של החיים.

מאחר שהמיקרואורגניזמים העמוקים האלה אינם פעילים, אתם עשויים לדמיין אותם "מסתלבטים" מתחת לקרקעית הים! אולם "הסתלבות" אינה ממש המילה הנכונה, מאחר שהבתים שלהם יכולים להיות חמים מאוד! ככל שהמיקרואורגניזמים עמוקים יותר, כך טמפרטורת הסביבה גבוהה יותר (איור 2c). מדוע? טוב, ישנו חום שמגיע מהחלק הפנימי של כדור הארץ. משקעים מעל למיקרואורגניזמים הם כמו שמכות שכולאות חום, כך שהטמפרטורות עולות. ככל שהשמיכה עבה יותר, כך הסביבה נעשית חמה יותר. הטמפרטורה בדרך כלל עולה ב-2 מעלות בכל 100 מטרים (אולם באזורים מסוימים כמו Nankai Trough במזרח יפן, הטמפרטורה יכולה לגדול ב-10 מעלות בכל 100 מטרים). מבחינת נפח, למחצית מהמשקעים הימיים בכדור הארץ יש טמפרטורות גבוהות מ-40 מעלות צלזיוס; ולרבע מהם יש טמפרטורות גבוהות מ-80 מעלות צלזיוס [4].

אחרי שלמדנו על כל האתגרים האלה, אנו יכולים להסיק שהחיים קשים מתחת לקרקעית הים. אנו עשויים לחשוב שכל אורגניזם היה מתקשה אם היה צריך לשרוד בתנאים האלה, אולם לתדהמתנו מצאנו אורגניזמים חיים עם יותר מ-2.5 קילומטרים של משקעים שערומים מעליהם! [5]. ניסויי מעבדה מצאו שחלק מהמיקרואורגניזמים יכולים לגדול אפילו ב-122 מעלות צלזיוס [6]. אף על פי שהן רק מקיימות את התפקודים הבסיסיים שנדרשים לשרוד,

### איור 3

(a) ה-Chikyu, כלי קידוח מחקרי הפלטרומה המשושה בחרטום מיועדת להליקופטר, והמגדל הגבוה שמאחורה הוא כלי קידוח. (b) חלק מליבת קידוח משקעים (IODP Site C0023 [2]). העיגול מצביע על מינרל של אבן אש שצבעו ירוק-צהוב ואורכו כ-5 סנטימטרים, שנוצר ממוצרי פסולת של מיקרואורגניזמים. (c) תמונה מוגדלת של אבן האש (מוגדלת פי 1,400) ממיקרוסקופ אלקטרוני סורק [2]. אבן אש מתחת לקרקעית הים לעיתים קרובות נראית בצורת פטל כשהיא מוגדלת.



איור 3

החברות המיקרוביות האלה יכולות לשרוד מתחת לקרקעית הים במשך עשרות מיליוני שנים. מדענים קודחים לתוך קרקעית הים במטרה לדגום את החברות המיקרוביות העתיקות האלה. לעיתים קרובות, כשאנו לוקחים את המיקרואורגניזמים האלה חזרה למעבדה, אנו מזינים אותם במזון מזין, והם משגשגים שוב! מדהים לחשוב על האופן שבו האורגניזמים הזעירים האלה חיו בתנאים קשים, והמשיכו לחיות כך במשך מיליוני שנים. אם יום אחד תהיה להם הזדמנות להתאושש, הם ינצלו אותה עד תום.

### כיצד מדענים חוקרים מיקרואורגניזמים מתחת לקרקעית הים?

כדי לחקור את המיקרואורגניזמים הקבורים האלה, ראשית אנו צריכים לקחת דגימות של משקע או של סלע מתחת לקרקעית הים. כאשר חוקרים מיקרואורגניזמים באזורי חוף, אנו יכולים להפליג על סירה קטנה ולקחת דגימות. בעומק הים, עם עומק של קילומטרים של מים, אנו זקוקים לכלים מתמחים שיכולים לקדוח בקרקעית הים (איור 3a).

ברגע שאנו מקבלים את הדגימות, אנו מסירים את השכבה החיצונית של הדגימות כדי להיפטר מ**זיהומים** ממי ים במהלך הקדיחה. לאחר מכן, אנו מעבדים עוד את הדגימות כדי לשמר אותן למחקרים מאוחרים יותר. לדוגמה, חלק מהמחקרים הביולוגיים והכימיים דורשים שהדגימות ישארו טריות, ולכן אנו מאחסנים אותן במקפיאים מתחת ל-0 מעלות, לפעמים אפילו ב-80- מעלות צלזיוס. כאשר חוקרים מיקרואורגניזמים שלא אוהבים חמצן מהאוויר, אנו צריכים לעבד את הדגימות בתוך קופסאות שמכילות חנקן במעבדה. אנו מנקים ומחטאים את הציוד ותמיד לובשים כפפות כדי למנוע זיהום של הדגימות עם מיקרואורגניזמים מהגוף שלנו. חלק מהמעבדות אפילו מעוצבות בצורה שמונעת מאבק באוויר לזהם את הדגימות.

כדי לספור את כמות המיקרואורגניזמים בכל דגימה אנו יכולים להסתכל על הדגימות עם מיקרוסקופים חזקים. במטרה ללמוד על מיהם המיקרואורגניזמים, אנו יכולים לנתח את ה**חומרים הגנטיים** (דנ"א או רנ"א) שנמצאים בדגימות. במטרה לחקור כמה המיקרואורגניזמים פעילים, אנו מזינים את חלקם עם מזון שהוכן באופן מלאכותי באמצעות תגיות כימיות. לאחר מכן, אנו מודדים את מספר התגיות הכימיות במוצרי הפסולת של המיקרואורגניזמים, כדי לחשב כמה מזון המיקרואורגניזמים צורכים.

אנו גם יכולים לחקור את הפעילויות של המיקרואורגניזמים על ידי התבוננות בשינויים הסביבתיים שהם יוצרים במשקעים. לדוגמה, כמות גדולה של מיקרואורגניזמים מתחת

### חומר מזהם (Contaminant)

חומר שגורם לדגימות להיות פחות טהורות.

### חומרים גנטיים (Genetic Materials)

דנ"א ורנ"א. חומרים גנטיים שולטים על האופן שבו התא מתפתח ומתנהג. לסוגים שונים של מיקרואורגניזמים יש חומרים גנטיים שונים.

## סולפאט (Sulfate)

כימיקל שכיח במי ים. הוא מורכב מאלמנטים של גופרית וחמצן. חלק מהמיקרואורגניזמים לוקחים סולפאט ומייצרים אנרגיה.

לקרקעית הים נושמים פנימה **סולפאט** מומס במקום חמצן. במקום שבו קבוצת המיקרואורגניזמים הזו פעילה, אנו יכולים לצפות בתכולת סולפאט מופחתת במים של הדגימות שלנו. קבוצת המיקרואורגניזמים האלה גם מייצרת גז מימן סולפיד,  $H_2S$ , כפסולת.  $H_2S$  מגיב עם ברזל בקרקעית הים, ויוצר את המינרל אבן האש – מינרל ירוק-צהוב הידוע בכינוי "זהב של שוטים" (איורים 3b,c). על ידי חקירת אבן האש שנוצרת בתהליכים מיקרוביים, אנו יכולים ללמוד על המיקרואורגניזמים עצמם. היתרון של חקירת מינרלים הוא שמינרלים יכולים להיות יציבים במשקעים ובסלעים במשך מיליוני שנים. לכן באמצעות מינרלים אנו יכולים לחקור את הפעילות של מיקרואורגניזמים שחיו בעבר הרחוק.

## מסקנות

במהלך העשורים האחרונים, למדנו על הרבה חיים מיקרוביים עמוק מתחת לקרקע הים, אולם הרבה שאלות נשארות ללא תשובה. השאלות האלה כוללות: מהו העומק והגיל המקסימליים שבהם המיקרואורגניזמים האלה יכולים לחיות? מהם הטמפרטורה והלחץ המקסימליים שהם יכולים לסבול? האם סוגים שונים של מיקרואורגניזמים מסייעים אחד לשני לשרוד במשקעים עמוקים? האם ישנן דרכים כימיות בלתי ידועות שמיקרואורגניזמים משתמשים בהן כדי להפיק אנרגיה? מתחת למשקעים ימיים נמצאות אבני תחתית, כמו למשל בזלת. האם המיקרואורגניזמים בסביבות הסלע האלה זהים לאלה שנמצאים במשקעים שמעליהן? מדענים מנסים בלהיטות לענות על השאלות האלה. מיקרואורגניזמים עמוקים הפתיעו אותנו בהתמדתם וביכולתם להסתגל. האורגניזמים הזעירים האלה עמוק מתחת לקרקעית הים מלמדים אותנו שיעורים גדולים, והם ימשיכו להפתיע אותנו בעתיד.

## תודות

אנו מודים למאריס וויקס, וירג'יניה פרייס, יסמין פראט, כריסטי ה. ת. טסה, הסוקרים הצעירים, המנטור המדעי שלהם והעורכים, עבור הערותיהם המצוינות שעושות את המאמר הזה מעניין ואינפורמטיבי יותר לקוראים צעירים. אנו גם מודים לבטאני ברוקשייר שהכירה לנו את פרונטיר – מדע לצעירים, ונתנה טיפים מצוינים על כתיבה לקוראים צעירים. הכתבה הזו בהשראת Canada C3 Expedition and ComSciCon 2019, the International Ocean Discovery Program (IODP), וה-International Ocean Discovery Program Expedition 370 עם כלי הקדיחה המחקרי Chikyū. זוהי תרומה ל-CIFAR, Earth 4D Science and Exploration, קנדה.

## מקורות

1. Kallmeyer, J., Pockalny, R., Adhikari, R. R., Smith, D. C., and D'Hondt, S. 2012. Global distribution of microbial abundance and biomass in subseafloor sediment. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 109:16213–6. doi: 10.1073/pnas.1203849109
2. Heuer, V. B., Inagaki, F., Morono, Y., Kubo, Y., and Maeda, L. 2017. "The Expedition 370 scientists: temperature limit of the deep biosphere off Muroto," in *Proceedings of the International Ocean Discovery Program (College Station, TX: International Ocean Discovery Program)*, 370. doi: 10.14379/iodp.proc.370.2017
3. Bender, M. L., and Heggie, D. T. 1984. Fate of organic carbon reaching the deep sea floor: a status report. *Geochim. Cosmochim. Acta* 48:977–86. doi: 10.1016/0016-7037(84)90189-3

4. LaRowe, D. E., Burwicz, E., Arndt, S., Dale, A. W., and Amend, J. P. 2017. Temperature and volume of global marine sediments. *Geology* 45:275–8. doi: 10.1130/G38601.1
5. Inagaki, F., Hinrichs, K. U., Kubo, Y., Bowles, M. W., Heuer, V. B., Hong, W. L., et al. 2015. Exploring deep microbial life in coal-bearing sediment down to ~2.5 km below the ocean floor. *Science* 349:420–4. doi: 10.1126/science.aaa6882
6. Takai, K., Nakamura, K., Toki, T., Tsunogai, U., Miyazaki, M., Miyazaki, J., et al. 2008. Cell proliferation at 122°C and isotopically heavy CH<sub>4</sub> production by a hyperthermophilic methanogen under high-pressure cultivation. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 105:10949. doi: 10.1073/pnas.0712334105

**פורסם אונליין:** 20 באפריל 2022

**נערך על ידי:** Gianpiero Vigani

**מנחה מדעי:** Oscar Fernandez

**ציטוט:** Tsang M and Inagaki F (2022) חיים מיקרוביים מתחת לקרקעית הים – סיפור על התמדה. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2020.00070-he

**תורגם והותאם:** Tsang M-Y and Inagaki F (2020) Microbial Life Deep Under the Seafloor—A Story of Not Giving Up. *Front. Young Minds* 8:70. doi: 10.3389/frym.2020.00070

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

**COPYRIGHT** © 2020 © Tsang and Inagaki 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.

## סוקר צעיר

### NICOLAS, גיל: 9

גדלתי ביפן אולם אני חי בווינה. אני יכול לדבר גרמנית, אנגלית וספרדית. המקצוע האהוב עליי בבית הספר הוא מתמטיקה, והספורט האהוב עליי הוא כדורגל.

## הכותבים

### MAN-YIN TSANG

Man-Yin היא גיאומדענית באוניברסיטת טורונטו. התשוקה שלה היא להבין את האינטראקציות בין מיקרואורגניזמים לבין הסביבה הגיאולוגית. היא עברה מהונג-קונג לטורונטו כדי לחקור את הנושא הזה. בשנת 2016 היא ייצגה את קנדה כגיאומדענית על אונייה בפרויקט Expedition 370 של התוכנית



הבינלאומית לנילוי האוקיינוס, בשם "Temperature Limit of Life off Muroto". Man-Yin וצוות של כ-30 מדענים ממדינות שונות, בילו חודשיים בחלק הצפון-מערבי של טבעת האש הפסיפית, קדחו דרך 5 קילומטרים של מי ים ו-1.2 קילומטרים של משקעים במטרה לחקור מיקרואורגניזמים מתחת לרצפת הים העמוקה והחמה. \*my.tsang@mail.utoronto.ca



### FUMIO INAGAKI

Fumio הוא גיאומיקרוביולוג וראש המשרד לקידום קדיחה בשכבת ה-mantle בסוכנות היפנית למדעים ולטכנולוגיות של חיים ימיים בכדור הארץ (JAMSTEC). הוא הקדיש את עצמו להבנת החיים המיקרוביים העמוקים באוקיינוס במשך 20 שנים. הוא הוביל יוזמות מדעיות רבות הרחק מחופי הים, והמציא שיטות לחקור את המיקרואורגניזמים. Fumio קיבל את מדליית קופרניקוס, את פרס PNAS Cozzarelli, ואת פרס Scientific Ocean Drilling Research עבור עבודתו פורצת הדרך. בעתיד הקרוב, Fumio מכוון לחקור עוד על אינטראקציות חיים-כדור הארץ, אפילו בין החיים לבין שכבת ה-mantle.

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