



## “מי מפחד ממים רותחים?” – מקומות מחייה של חיידקים חובבי-חום

Skander Elleuche<sup>1†</sup>, Carola Schröder<sup>1†</sup>, Nadine Stahlberg<sup>2</sup>, Garabed Antranikian<sup>1</sup>

<sup>1</sup>המכון למיקרוביולוגיה טכנית, אוניברסיטת המבורג לטכנולוגיה (TUHH), המבורג, גרמניה  
<sup>2</sup>המרכז להוראה ולמידה (ZLL), אוניברסיטת המבורג לטכנולוגיה (TUHH), המבורג, גרמניה

### סוקרים צעירים

ECOLE  
MOSER  
GENÈVE  
גיל: 13-15



These authors have<sup>†</sup>  
contributed equally to  
this work.

מיקרובים /  
מיקרואורגניזמים  
(Microbes/  
Microorganisms)

– בדרך כלל הכוונה היא  
לאורגניזמים חד-תאיים,  
ביניהם חיידקים, אצות  
מסוימות, ופטריית. שמרים הם  
דוגמה לפטרייה חד-תאית.

אוהבים לבלות בים ביום קיץ חם? להשתזף, לרבוץ על החול ולשחק על החוף? כשחם לכם מדי, אתם יכולים להתקרר מיד במי הים. הייתם מאמינים שעל הכוכב שלנו יש יצורים חיים שהיו קופאים גם ביום החם ביותר של השנה? יצורים זעירים אלה, הנקראים חיידקים חובבי-חום, כלל לא מסוגלים לגדול בטמפרטורות של פחות מ-50 מעלות – וטוב להם במיוחד במים הרותחים שליד הרי געש בקרקעית האוקיאנוס, או במעיינות חמים. הידעתם שהמקומות הלוהטים ביותר על פני כדור הארץ הם לא במדבר, אלא דווקא באיים געשיים באוקיאנוס האטלנטי וליד הקוטב הצפוני? ושחיידקים המותאמים לתנאים קיצוניים כאלה חשובים מאוד לתעשיות ולמעבדות מדעיות?

### יש חיידקים החיים בתנאים מאוד “לא נוחים” על פני כדור הארץ!

היצורים החיים הזעירים ביותר – הנקראים חיידקים, מיקרובים או מיקרואורגניזמים – אינם נראים לעינינו ללא מיקרוסקופ [1]. החוקר ההולנדי אנתוני ואן לֵוֵנְהוֹק היה הראשון שראה חיידקים תחת מיקרוסקופ, לפני יותר מ-300 שנה. חיידקים נמצאים בעצם בכל מקום על פני כדור הארץ. האדמה, המים והאוויר מלאים בהם, והם חיים גם במזון, בתוך בעלי חיים

ואפילו בגוף שלנו. מספר החיידקים במעינים של אדם גדול יותר ממספר כל תאי הגוף שלו! יש כמובן חיידקים הגורמים למחלות, כגון שלשול ודלקת גרון, אבל רוב החיידקים אינם מזיקים לבני אדם. בחלקם אנחנו גם משתמשים, בין השאר לייצור יוגורט או גבינה ולטיפול בשפכים. יש חיידקים המשגשגים בחושך, יש כאלה שתנאים של חוסר חמצן מתאימים להם במיוחד, ואחרים מעדיפים לחיות בפירות בזכות הסוכרים המתוקים, או בתוך גבינות מסריחות.

חיידקים החיים במי האוקיאנוס או בטמפרטורת הגוף הנעימה של 37 מעלות אולי לא מרשימים אתכם במיוחד; אבל יש קבוצות מדהימות של חיידקים המאכלסים מקומות שקשה להאמין שאפשר לחיות בהם. חיידקים אלה משגשגים בתנאים קיצוניים שונים, והם כנראה בין צורות החיים העתיקות ביותר על פני האדמה. הם היו הראשונים שהסתגלו לחיים בתנאים קיצוניים, וכיום הם מסוגלים לחיות בסביבות שלא מאפשרות הישרדות של צורות חיים אחרות. אורגניזמים כאלה נקראים **אֶקְסֵטְרֵמוֹפִילִים** – "חובבי תנאים קיצוניים". והשאלה הבאה היא: איפה אפשר למצוא אורגניזמים חובבי-חום כאלה?

## היכן חיים חיידקים שזקוקים לסביבה לוהטת במיוחד?

רבים מהמקומות החמים ביותר על פני כדור הארץ נמצאים ליד הרי געש – ביבשה או במעמקי האוקיאנוס. במקום שבו נפגשים לוחות הסלע הענקיים שבקרקעית האוקיאנוס האטלנטי יש רכס בשם "הרכס המרכז-אטלנטי" (איור 1). לוחות הסלע האלה – הנקראים לוחות טקטוניים – גדולים כל כך שמעל כל אחד מהם יש כמה וכמה ארצות. הלוח הצפון אמריקאי, למשל, נמצא מתחת לקובה, ארה"ב, קנדה וגרינלנד, והלוח האירואסייתי משתרע מתחת ליבשת אירופה ורוב יבשת אסיה. במספר מקומות בעולם יש איים געשיים יפהיים שעלו מקרקעית האוקיאנוס בתהליך שארך שנים רבות. אחת מקבוצות האיים האלה נקראת "האיים האזוריים", ונמצאת באוקיאנוס האטלנטי בין ארה"ב לפורטוגל. גם איסלנד היא אי מסוג זה, והיא נמצאת בצפון הרחוק של כדור הארץ, בין גרינלנד לבין נורבגיה. באיים אלו יש שפע של **מעיינות חמים** טבעיים – מקומות שבהם מים מגיעים אל פני השטח אחרי שהתחממו במעמקי האדמה. אם תטיילו באיים האזוריים תראו סביבכם בריכות של מים רותחים ומהבילים (איור 1).

מרבית המעיינות החמים וה**גייזרים** – מזרקות של מים לוהטים וקיטור – נמצאים בפארק הלאומי ילוסטון שבמדינת ויומינג בארה"ב. שם התגלו לפני כמעט חמישים שנה החיידקים חובבי-החום הראשונים, על-ידי המיקרוביולוג תומס ברוק. עד אז האמינו המדענים בעולם שסביבות לוהטות כאלה הן סטריליות, כלומר שיצורים חיים לא מסוגלים להתקיים בהן, כי הטמפרטורות הגבוהות ודאי משמידות אותם. תומס ברוק היה הראשון שהצליח לבדוד ולתאר חיידק חובב-חום, ונתן לו את השם היפה "תֶרְמוֹס אֶקְוִוִּיטִיקוֹס" (*Thermus aquaticus*) [2] (איור 2). מאחר שלרוב החיידקים אין שמות בעברית, נשתמש במאמר זה בשמות המדעיים שלהם, שאותם נסביר בפירוט בתיבה 1.

### תיבה 1 - שמות מדעיים ומשמעותם

במדע יש מונחים רבים שלפעמים קשה להבין את משמעותם, ביניהם שמות לטיניים או יווניים של אורגניזמים מוכרים. קל לנחש, אמנם, ש-*Hippopotamus amphibius* הוא היפופוטם, ועוד יותר קל להבין

### מעין חם (Hot spring)

– מעיין שבו נובעים מהקרקע מים שהתחממו בעומק קרום כדור הארץ. במעיינות מסוימים המים חמימים, באחרים הם מגיעים לטמפרטורת רתיחה.

### גייזר (Geyser)

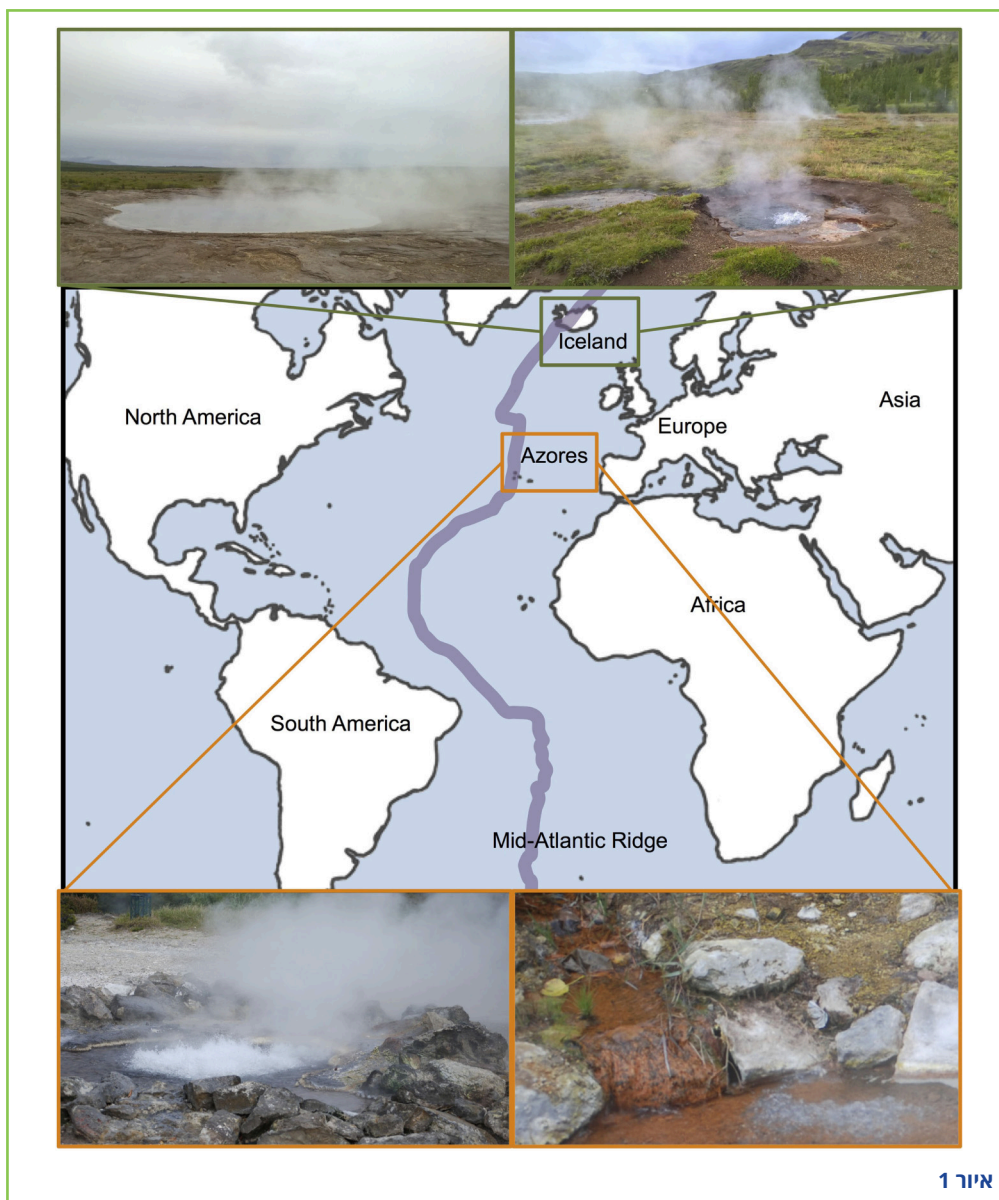
מעיין שממנו פורצים בדרך כלל מים חמים ואדים בזרם דמוי מזרקה. כמחצית מהגייזרים בעולם נמצאים בפארק הלאומי ילוסטון שבמדינת ויומינג בארה"ב.

ש-*Gorilla gorilla* היא הגורילה המערבית; דוברי אנגלית יבינו גם ש-*Rattus rattus* הוא שמה המדעי של החולדה המצויה. אבל איך מבינים מהו תרמוס אקוויטיקוס (*Thermus aquaticus*)? צריך לדעת שהמילה הראשונה בשם מדעי מתארת את **סוג** האורגניזם, כלומר הקטגוריה שאליה הוא שייך. בפעם הראשונה שמזכירים אותו בטקסט, הוא מופיע בשמו המלא, ובשאר הפעמים מתקצרת המילה הראשונה לאות אחת (*T. aquaticus*), במקרה זה). המילה השנייה מתייחסת ל**מין** האורגניזם המסוים. סוג אחד יכול לכלול כמה מינים - *Rattus norvegicus*, למשל, היא חולדת החוף.

"תרמוס" פירושו "חם" ביוונית, ו"אקווא" הם "מים" בלטינית. תרמוס אקוויטיקוס שוכן בכמה מהמעיינות החמים בפארק ילוסטון ובמקומות אחרים שבהם הטמפרטורה היא סביב 70 מעלות צלזיוס. מעניין לדעת שבטמפרטורות שמתחת ל-40 מעלות החיידק קופא ואינו יכול לצמוח. טמפרטורה של מעל 79 מעלות היא קטלנית בשבילו. תומס ברוק גילה אמנם חיידק חובב-חום, אך לא כזה השורד מים רותחים. בעקבות תגליתו החלו מדענים בכל העולם לחפש

**איור 1**

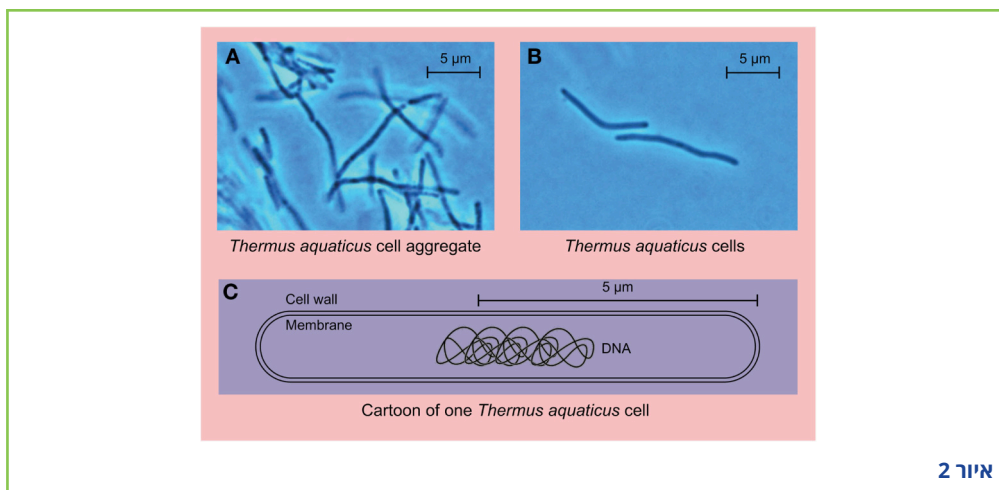
מקומות מחייה של חיידקים חובבי חום באיים האזוריים ובאיסלנד. הרכס המרכז-אטלנטי נמצא באוקיאנוס האטלנטי, בקו שבו מתנגשים באיטיות שלושה לוחות טקטוניים - האמריקאי, האירו-אסיאתי והאפריקאי. במפה זו הוא מסומן בקו סגול. מופיעים בה גם האיים האזוריים ואיסלנד, שהם איים געשיים. במסגרות הירוקות תראו צילומים של מעיינות חמים באיסלנד, ובמסגרות הכתומות - צילומים של מעיינות חמים בסאן מיגל שבאיים האזוריים.



איור 1

**איור 2**

החיידק "תרמוס אקוויטיקוס".  
**A.** תצלום מיקרוסקופי של צבירי תאים של "תרמוס אקוויטיקוס" שהתרבו במעבדה עד לצפיפות גבוהה. **B.** שני תאים בודדים. **C.** שרטוט מופשט של המבנה התאי. מיקרומטר (µm) הוא מיליונית מטר.



**איור 2**

קרובי משפחה של תרמוס אקוויטיקוס וחיידקים חובבי-חום אחרים, וכל אחד מהם קיווה לגלות את החיידק העמיד ביותר בחום. במהרה התגלו במקומות שונים בעולם חיידקים כאלה, שלא דווקא היו קשורים לחיידק הראשון. מהר מאוד הבינו המדענים שחיידקים החיים בתנאים קיצוניים הם נפוצים מאוד. כל כך נפוצים, בעצם, שאין דרך לשער כמה מינים נוספים יתגלו בעתיד.

עוד צעד חשוב בחקר האֶקְסֵטְרֵמוֹפִילִים היה תגליתו של המדען הגרמני קארל שְׁטֶר. הוא והצוות שלו גילו חיידק חדש במעמקי הים, בנקודה שבה מים לוחטים פורצים מתוך ארובה שמתחת ללוחות הטקטוניים. הם קראו לחיידק זה "פירולובוס פומארי" (*Pyrolobus fumarii*). הוא מתאפיין במבנה תאי גושי מוזר, והמבנה הזה, יחד עם סביבת המחיה וההעדפה לטמפרטורות גבוהות, מתבטאים בשם שקיבל: "פירו" היא אש ביוונית, "לובוס" הוא גוש, ו"פומארי" היא ארובה מעשנת. החיידק הזה חובב חום עוד יותר מתרמוס אקוויטיקוס! בעקבות התגלית הזאת אנו יודעים עכשיו שהטמפרטורה הגבוהה ביותר שבה יכולים חיים להתקיים היא 113 מעלות – יותר מטמפרטורת הרתיחה של מים! בתשעים מעלות ומטה כבר קר מכדי שפירובולוס פומארי יוכל לצמוח (איור 3) [3].

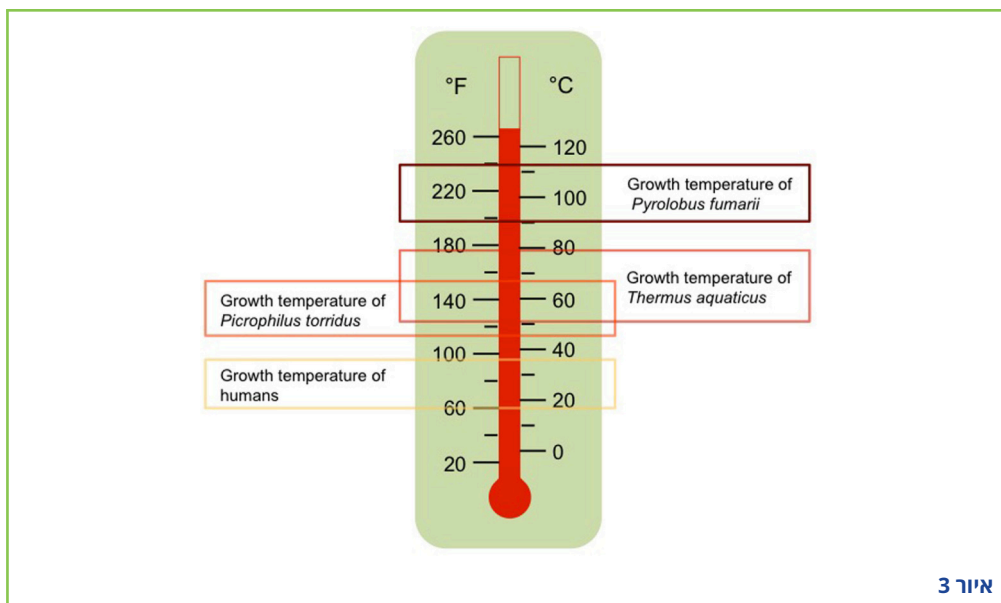
**האם יש סביבות אחרות המתאימות לחיידקים מסוימים אך לא לבני אדם?**

בני אדם אינם יכולים לשרוד בטמפרטורות שסביב מאה מעלות צלזיוס, אלא לפרקי זמן קצרים מאוד בסאונה – ולעומתם, חיידקים חובבי חום מבלים בהצלחה את כל חייהם בטמפרטורות כאלה. אבל יש גם תנאים קיצוניים מסוגים אחרים שחיידקים מסוימים מותאמים להם. תנאים כאלה מתקיימים בסביבות כמו מעמקי הים, אגמים מלוחים מאוד, או קרחונים. והאם שמעתם על החיידקים המעדיפים לחיות בתוך חומצה לוחטת?

את החיידק האֶקְסֵטְרֵמוֹפִילִי שהוא אולי המרשים מכולם גילה הצוות של וולפראם צילינג. החיידק, פיקרופילוס טורידוס (*Picrophilus torridus*), משגשג בטמפרטורות חמות למדי, בין 55 ל-65 מעלות צלזיוס – וזקוק גם לסביבה חומצית מאוד. אפשר לומר בקיצור שסביבת המחיה המושלמת שלו דומה לחומצת בטרייה מדוללת ומחוממת. חיידק זה התגלה

### איור 3

הטמפרטורות המתאימות לצמיחת אורגניזמים שונים. מלמעלה למטה: פירולובוס פומארי; תרמוס אקוויטיקוס; פיקרופילוס טורידוס; בני אדם.



איור 3

באדמה חומצית וחמה ביפן [4]. גם לו נתנו שם המשקף את סביבת וסגנון החיים שלו: ביונית, "פיקרוס" היא חומצה ו"פילוס" פירושו אוהב, ובלטינית "טורידוס" פירושו מיושב ושרוף.

יש גם חיידקים שבזכות התכונות שלהם הם מתאימים באופן מושלם לסביבות מלאכותיות מסוימות. הם משגשגים בתוך שפכים תעשייתיים הרעילים לבני אדם, או ליד כורים גרעיניים. כמה חיידקים כאלה נמצאו אפילו ליד הכור הגרעיני בצ'רנוביל, שבו אירע אסון גרעיני מחריד. חיידקים אלה חשופים לקרינה המסוכנת מאוד לבני אדם, אבל הם מצליחים להפוך אותה לאנרגיה המשמשת אותם לצמיחה [5].

### האם אפשר להשתמש בחיידקים אקסטרמופילים לטובת בני אדם?

בזכות היכולת שלהם לעמוד בתנאים קיצוניים שונים, חיידקים אלה – וחומרים כימיים מסוימים הנמצאים בגופם – יכולים להיות שימושיים מאוד בתעשיות מסוימות. החיידק תרמוס אקוויטיקוס מכיל חלבון מסוים (אנזים, ליתר דיוק) שמסייע מאוד למדענים בתחום המיקרוביולוגיה. הוא נקרא **פולימראז** ובעזרתו מייצרים במעבדות מיליוני עותקים של מולקולות דנ"א, בתהליך הנקרא "תגובת שרשרת פולימראז" (PCR). אחד השלבים בתהליך מתרחש בטמפרטורה של 95 מעלות צלזיוס – טמפרטורה שבה אנזימים רגילים מפסיקים לפעול; אבל האנזים הזה מצליח להמשיך ולתפקד. כיום משתמשים בו רבות בתחום מדעי החיים, בחקירות פליליות, ובאבחון מחלות. חיידקים חובבי תנאים קיצוניים משמשים גם בתהליך הנקרא ביו-רמדיאציה, שבו מטהרים סביבה מזוהמת על-ידי פירוק הרעלנים. חיידקים אחרים מכילים אנזימים שבהם משתמשים בתעשייה לפירוק עמילנים או פסולת ממקור צמחי, כדי לייצר ביו-אנרגיה או תרכובות כימיות יקרות. חיידקים חובבי-קור, לעומת זאת, מייצרים אנזימים שאפשר להוסיף לאבקת כביסה, למשל, וכך לכבס בטמפרטורות נמוכות ולחסוך אנרגיה. חשוב לדעת שאקסטרמופילים הם לא "חיידקים רעים"! מאחר שהם חיים בסביבה שאינה מתאימה לבני אדם, הם לא מסוגלים

### פולימראז TAQ-פולימראז (TAQ-Polymerase)

אנזים המסוגל לשכפל דנ"א בטמפרטורות גבוהות. אנזימי פולימראז חיוניים לשכפול של דנ"א תאי, ובתהליכי מעבדה רבים משתמשים בהם כדי לייצר מיליוני עותקים של דנ"א.

בדרך כלל לגרום לנו למחלות – טמפרטורת הגוף שלנו, 37 מעלות, פשוט קרה מדי בשבילם.

## מימון

פרויקט ה-OER (משאבי חינוך פתוחים) של הכותבים, "מיקרואורגניזמים אקסטרמופילים", ממומן על-ידי רשויות המבורג שבגרמניה, במסגרת פרויקט האוניברסיטה הפתוחה המקוונת של המבורג (<http://www.hoou.de/>).

## מקורות

1. Kopf, A., Schnetzer, J., and Glöckner, F. O. 2016. Marine microbes, the driving engines of the ocean. *Front. Young Minds* 4:1. doi: 10.3389/frym.2016.00001
2. Brock, T. D., and Freeze, H. 1969. *Thermus aquaticus* gen. n. and sp. n., a nonsporulating extreme thermophile. *J. Bacteriol.* 98(1):289–97. doi: 10.1126/science.230.4722.132
3. Blöchl, E., Rachel, R., Burggraf, S., Hafenbradl, D., Jannasch, H. W., and Stetter, K. O. 1997. *Pyrolobus fumarii*, gen. and sp. nov., represents a novel group of Archaea, extending the upper temperature limit for life to 113 degrees C. *Extremophiles* 1:14–21. doi: 10.1007/s007920050010
4. Schleper, C., Pühler, G., Klenk, H. P., and Zillig, W. 1996. *Picrophilus oshimae* and *Picrophilus torridus* fam. nov., gen. nov., sp. nov., two species of hyperacidophilic, thermophilic, heterotrophic, aerobic Archaea. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 46:814–6. doi: 10.1099/00207713-46-3-814
5. Dadachova, E., Bryan, R. A., Huang, X., Moadel, T., Schweitzer, A. D., Aisen, P., et al. 2007. Ionizing radiation changes the electronic properties of melanin and enhances the growth of melanized fungi. *PLoS ONE* 2(5):e457. doi: 10.1371/journal.pone.0000457

פורסם אונליין: 31 בינואר 2019

נערך על ידי: Berend Smit, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland

ציטוט: Elleuche S, Schröder C, Stahlberg N and Antranikian G (2019) "מי מפחד ממים רותחים?" – מקומות מחייה של חיידקים חובבי-חום. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2017.00001-he

## תורגם והותאם:

Elleuche S, Schröder C, Stahlberg N and Antranikian G (2017) "Boiling water is not too hot for us!"—Preferred living spaces of heat-loving microbes. *Front. Young Minds* 5:1. doi: 10.3389/frym.2017.00001



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

Elleuche, Schröder, Stahlberg and Antranikian 2017 © **COPYRIGHT** 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.

## סוקרים צעירים

### 15-13, ECOLE MOSER GENÈVE, גילאים:

אנחנו כיתה ביוכימיה והמורה שלנו הוא מר Bustamante. אנחנו לומדים בבית ספר שווייצרי בשם Moser. אנחנו בני 13 עד 15. בחרנו ביוכימיה כמקצוע נוסף, כי כולנו מאוד אוהבים מקצוע זה. אנחנו עוסקים בנושאים מדעיים שונים ועובדים במעבדה פעם בשבוע.

## הכותבים

### SKANDER ELLEUCHE

אני מיקרוביולוג/ביולוג מולקולרי בהכשרתי, ומאז ומתמיד הייתי סקרן מאוד לגבי ביולוגיה. הקריירה המדעית שלי החלה בחטיבת הביניים, כשהתחלתי לערוך תצפיות קפדניות על התנהגות ההשרצה של הדגים באקווריום שלי, ולנסות לשלוט בה. עכשיו אני מרצה וראש פרויקט במכון למיקרוביולוגיה טכנית שבאוניברסיטת המבורג לטכנולוגיה, ואני חוקר חיידקים החיים בתנאים קיצוניים. בזמני הפנוי אני נהנה לקרוא, להיפגש עם חברים, ולטייל למקומות עם אתרי טבע עתיקים ומעניינים, כמו גרינלנד ואיסלנד.  
\*skander.elleuche@tu-harburg.de

### CAROLA SCHRÖDER

כשהתחלתי ללמוד ביולוגיה, חלמתי להקים גן חיות עם סוסי פוני וחמורים לליטוף. באוניברסיטה למדתי יותר ויותר על חיידקים. המגוון והיכולות של האורגניזמים הזעירים שנמצאים בכל מקום ריתקו אותי. לכן התחלתי לעבוד בתחום המיקרוביולוגיה, והתמנתי לעמיתת מחקר במכון למיקרוביולוגיה טכנית שבאוניברסיטת המבורג לטכנולוגיה. אני עדיין נהנית לבלות זמן עם חיות גדולות יותר, כמו הפוני שלי, אבל בעבודתי אני עוסקת באורגניזמים שאינם נראים לעין ללא מיקרוסקופ.

### NADINE STAHLBERG

אני עובדת במרכז להוראה ולמידה (ZLL) שבאוניברסיטת המבורג לטכנולוגיה. כאן אני עוסקת בפיתוח חומר לימוד להשכלה גבוהה, בייחוד בתחום המחקר והכתיבה. בעבודתי אני מנסה לענות על השאלות איך לשפר שיטות הוראה ולמידה, להמריץ תלמידים ללמוד על מדע וטכנולוגיה, ולהשתמש בקריאה ובכתיבה ככלי תמיכה בלימוד. מוצא חן בעיניי הרעיון לחלוק ידע מדעי עם תלמידים צעירים, על ידי כך שמאפשרים להם לקחת חלק פעיל בתהליך הפצת הידע – כמו שעושה למשל המגזין המקוון הזה.

### GARABED ANTRANIKIAN

הוכשרתי כמיקרוביולוג באוניברסיטה האמריקאית של בירות בלבנון, ובאוניברסיטת גיאורג-אוגוסט שבגטינגן, גרמניה. מאז 1990 אני ראש המכון למיקרוביולוגיה טכנית שבאוניברסיטת המבורג לטכנולוגיה. אנחנו מתמחים בחקר מיקרואורגניזמים החיים בתנאים קיצוניים, בייחוד באיים האזוריים ובמעמקי הים סמוך לִיפֿן;



ואנחנו גם חוקרים את האפשרויות להשתמש בחיידקים כאלה בתחום התעשייה. מאז 2009 אני מכהן גם כסגן הנשיא לענייני אקדמיה, התמניתי לנשיא האוניברסיטה. בזמני הפנוי אני נהנה לבשל מאכלים מהמטבח הארמני וממטבחים אחרים בעולם.

Hebrew version  
provided by

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

