



## גיבורי-העל האמיתיים: מיקרואורגניזמים שורדים הכול!

Julia M. Otte<sup>1,2,3†</sup>, Katja Laufer-Meiser<sup>3†</sup>

<sup>1</sup>אקולוגיה וטכנולוגיה של עומק הים, מכון אלפרד וגנר, מרכז הלמהולץ למחקר קוטב ולמחקר ימי, ברמרהייבן, גרמניה  
<sup>2</sup>אקולוגיה וטכנולוגיה של עומק הים, מכון מקס פלנק למיקרוביולוגיה ימית, ברמן, גרמניה  
<sup>3</sup>המרכז לגיאומדע יישומי, גיאומיקרוביולוגיה, אוניברסיטת טובינגן, טובינגן, גרמניה

### סוקרים צעירים

LICEO  
COCCHETTI  
גיל: 15



האם ידעתם שמיקרואורגניזמים יכולים לחיות רחוק למעלה בעננים, ועמוק בתוך קרום כדור הארץ? האורגניזמים הזעירים האלה הסתגלו לכל סביבות המחיה המיוחדות על כדור הארץ. במטרה לחקור סביבות מחיה שונות, מדענים יכולים להתמקד במיקרואורגניזמים ובתגובותיהם הביולוגיות, או ברכיבים לא חיים בסביבתם, כמו מינרלים ותגובות כימיות. לעיתים, עשוי להיות קשה להפריד ביניהם! מאחר שהיה ידוע מעט על הדרך המיטבית להסיר מיקרואורגניזמים מדגימות סביבתיות בלי לשנות את התכונות של הרכיבים הלא-חיים של הדגימה. לכן החלטנו לערוך ניסוי במטרה לחקור זאת. במחקרנו חשפנו משקעים ימיים לשלוש שיטות שונות של סטריליזציה, כדי לבחון איזו שיטה הייתה הטובה ביותר בחיסול מיקרואורגניזמים. כמו כן בדקנו אם שלוש השיטות השפיעו על התכונות הכימיות של הדגימות שלנו. גילינו כי מאתגר ליצור תנאים סטריליים כיוון שחלק מהמיקרואורגניזמים מסוגלים לשרוד לחץ גבוה, טמפרטורה גבוהה, קרינה וכימיקלים רעילים!

## מיקרואורגניזמים יכולים לחיות בכל מקום!

מיקרואורגניזמים היו צורות החיים המוקדמות ביותר על כדור הארץ. הם גם צורות החיים הקטנות ביותר על כוכב הלכת שלנו. המונח "מיקרואורגניזמים" מתאר קבוצה מגוונת של אורגניזמים חד-תאיים שכוללים חיידקים, אֶרְכָאונים, פטריות מסוימות, אצות, פרוטוזואונים ווירוסים. בשל גודלם הזעיר כל כך ביכולתנו לראות את האורגניזמים האלה רק באמצעות מיקרוסקופים. מיקרואורגניזמים חיים בבטננו ועל עורנו, אך גם בכל מקום אחר – מהאזורים העמוקים ביותר בקרום כדור הארץ, ועד למרומי העננים. חלקם אפילו חיים מתחת לקרח באזור הארקטי, או בסלעים געשיים בני 3.5 מיליארדי שנים, או במעיינות חמים (איור 1A). ניתן למצוא אותם בטמפרטורות קיצוניות, חמות וקרות; במליחות קיצונית בים המלח; בקרינה קיצונית בכורים גרעיניים; תחת לחציו הגדולים של עומק הים; ביובש המוחלט של מדבריות, ובנהרות חומציים ובסיסיים. אף על פי שחלק ניכר מהתנאים הקיצוניים האלה רעילים למרבית צורות החיים האחרות, חיידקים פיתחו דרכים להישאר עמידים כנגד התנאים הקשים, ולשרוד.

## סודות השרדות של מיקרואורגניזמים שחיים בתנאים קיצוניים

מיקרואורגניזמים פיתחו כמה אסטרטגיות מרתקות שמסייעות להם לשרוד בסביבות מחיה קיצוניות (איור 1B). נסביר על כמה מהן:

### גמישות מטבולית

מיקרואורגניזמים רבים פיתחו יכולת לשנות את סוגי המזונות שהם אוכלים, כתלות בזמינות. חלקם גם יכולים לִסְגֵל את **חילוף החומרים** שלהם לתנאים משתנים, כמו חום או קור [1].

### תרדמה

כאשר התנאים אינם מועדפים, חלק מהמיקרואורגניזמים יכולים להיכנס למצב של **תרדמה**, אשר דומה ל"מצב שינה". אז הם מאיטים את חילוף החומרים שלהם כך שהם אוכלים פחות וגדלים פחות, עד שהתנאים משתפרים.

### נבגים

כאשר התנאים אינם מועדפים, חלק מהמיקרואורגניזמים יוצרים כיסוי מיוחד סביב עצמם, שמורכב מחלבונים יוצאי דופן. הצורות המוגנות האלה נקראות **נבגים**, אשר יכולים לסייע למיקרואורגניזמים לשרוד במשך אלפי שנים בתנאים קשים!

### מנגנוני תיקון

תנאים קיצוניים יכולים להזיק לחומר הגנטי של מיקרואורגניזמים. החומר הגנטי כולל דנ"א ורנ"א, אשר נקראים **חומצות גרעין**. חלק מהמיקרואורגניזמים פיתחו מנגנוני תיקון מיוחדים במטרה לתקן נזקים בחומצות גרעין.

### עמידות לחום

לחלק מהמיקרואורגניזמים יש חלבונים ושומנים מיוחדים שיכולים להגן עליהם מפני טמפרטורות גבוהות מאוד. התחיליות היווניות תֶרְמֵ- (thermo-) ו-פִירו- (pyro-) אומרות לנו שמיקרואורגניזמים ששמותיהם פותחים בהן, יכולים לחיות בקרבת חום ואש.

### חילוף חומרים (Metabolism)

כל התהליכים הביולוגיים ששומרים על חייו של אורגניזם. במילים פשוטות, חילוף חומרים הוא סך כל האכילה, השתייה, העיכול והגדילה.

### תרדמה (Dormancy)

כאשר מיקרואורגניזמים מכבים את חילוף החומרים שלהם, כלומר כשהם נכנסים למצב של שינה עמוקה, וגדילתם, התפתחותם ופעילותם הפיזית מופסקות באופן זמני.

### נבג (Spore)

מצב שבו מיקרואורגניזמים יכולים לשרוד במשך זמן רב תחת תנאים קשים. זאת כאשר הם יוצרים מעטפת מיוחדת סביבם, שדומה לזרע של צמח.

### חומצות גרעין (Nucleic acids)

מולקולות מורכבות שמאחסנות מידע גנטי. שני סוגי חומצות הגרעין הם דנ"א ורנ"א. דנ"א מצביע על נוכחותם של מיקרואורגניזמים, ורנ"א יכול להראות אם הם פעילים.

איור 1

תפוצתם של מיקרואורגניזמים, ושיטות הישרדותם בסביבות מיוחדות. (A) מיקרואורגניזמים יכולים לשרוד בכל מקום על כדור הארץ, אפילו במקומות המתאפיינים בתנאים קיצוניים – כמו עומק קרום כדור הארץ – וכן בסביבות שלפני כן נחשבו כמקומות סטריליים לחלוטין, שהוא החדר הנקי של נאס"א, פני כדור הארץ, אך גם הוא מכיל עקבות של מיקרובים. (B) מיקרואורגניזמים שחיים בסביבות המתאפיינות בתנאים קיצוניים פיתחו אסטרטגיות הישרדות מרתקות.

**A) Microorganisms live everywhere on our Planet!**

Acidic Mine Drainage	Hydrothermal Vent	Clouds	Soda Lake
NASA Clean Room	Nuclear Reactor	Hot Springs	Sea Ice
Mount Everest	Dry Desserts	Mariana Trench	Earth Deep Crust
Ophiolites	Human Brain	Canned Food	Crude Oil

**B) General survival strategies of microorganisms in special habitats**

<p>i) Metabolic flexibility</p> <p>Different food sources and adaption to changing conditions (e.g. cold, heat)</p>	<p>ii) Sleeping mode</p> <p>Reduced metabolism Less growth, less eating, less digesting,...</p>	<p>iii) Special sleeping blanket</p> <p>Thick cell wall of special proteins Extremely resistant (over thousands of years)</p>
<p>iv) Repair mechanisms</p> <p>Repair system for nucleic acids breaks</p>	<p>v) Heat-resistance</p> <p>Special nucleic acids Special proteins Special lipids (increase membrane fluidity)</p>	<p>vi) Radio-resistance</p> <p>Gamma-rays Multiple genetic information copies per cell Special pigments (e.g. carotenoids/melanin)</p>

איור 1

עמידות לקרינה

קרינת גמא היא סוג של קרינה המיוצרת על ידי דעיכה של חומר רדיואקטיבי. מאחר שקרני גמא יכולות לחדור רקמות ותאים, הן מסוכנות מאוד למרבית האורגניזמים. חלק מהמיקרואורגניזמים מייצרים פיגמנטים יוצאי דופן שפועלים כמגן אל מול קרני גמא. מיקרואורגניזמים אלה, שעמידים בפני קרינה, מכילים גם כמה עותקים של המידע הגנטי שלהם, מה שמסייע להם לשרוד אם עותק אחד ניזוק על ידי קרינה.

## מהי הדרך הטובה ביותר להרוג מיקרואורגניזמים?

### תהליכים ביולוגיים (Biological processes)

כל התהליכים שמבוצעים על ידי אורגניזמים חיים.

### תהליכים גיאוכימיים (Geochemical processes)

כל התהליכים שמתרחשים בסביבה, אשר מונעים רק על ידי תגובות כימיות.

### איור 2

#### שיטות סטריליזציה לדגימות

**סביבתיות (A)** במשקעים סביבתיים מורכבים נרצה להפריד האם התהליכים הינם ביולוגיים שמתחילים למשל על ידי

מיקרואורגניזמים או שהתהליכים גיאוכימיים

ומבוצעים על ידי כימיקלים. **(B)** מדענים מחטאים דגימות סביבתיות במטרה לחקור את התכונות הכימיות של הדגימה ללא התערבותן של תגובות ביולוגיות של

מיקרואורגניזמים. שיטות לסטריליזציה כוללות שימוש באוטוקלב; קרינה באמצעות קרני גמא, או טיפול באמצעות כימיקלים רעילים.

**(C)** יעילותן של שיטות סטריליזציה יכולה להיות

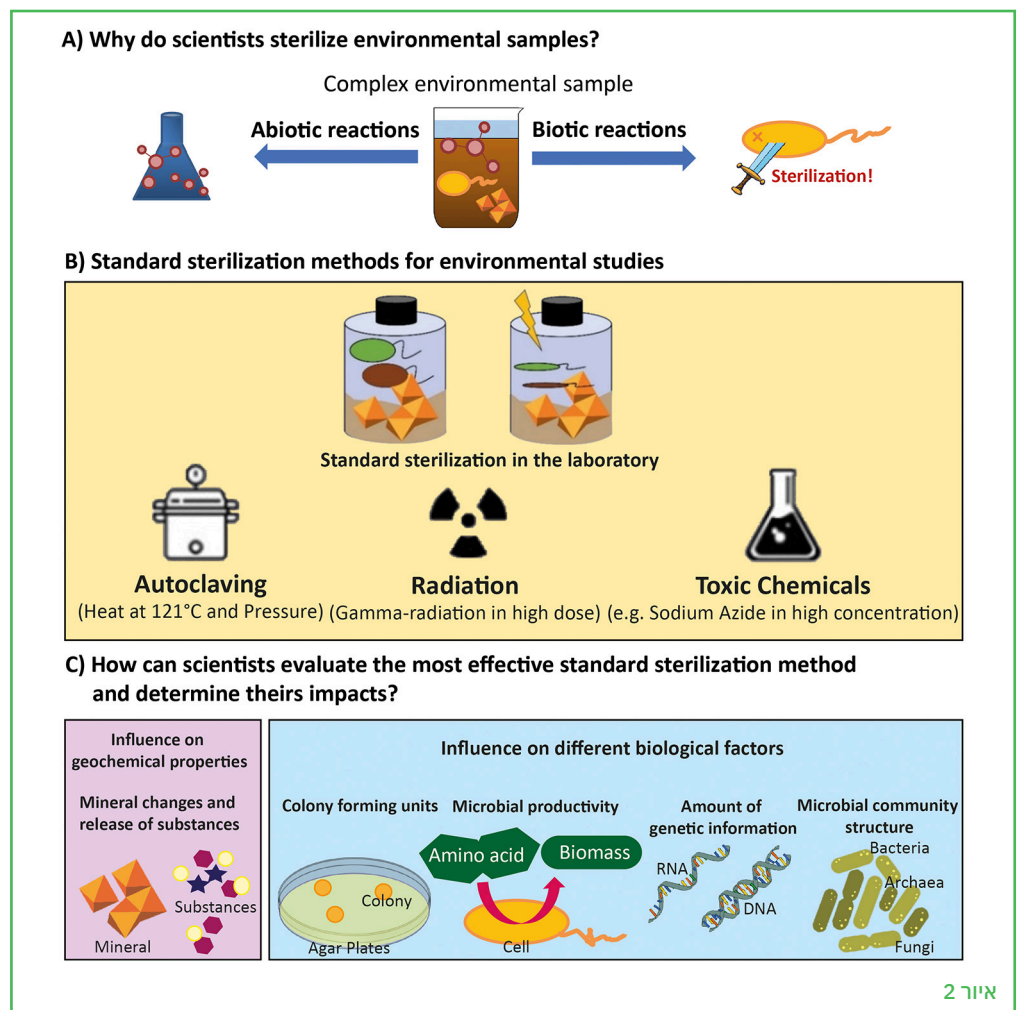
מוערכת על ידי מדידת גורמים ביולוגיים, כמו למשל גדילה

של מיקרואורגניזמים על צלוחיות אָנָר; יצרנות (צריכת מזון כמו חומצות אָמינו, עיכול ויצירת ביומסה), ונוכחות של חומצות גרעין. סטריליזציה גם יכולה להשפיע על תכונות גיאוכימיות של הדגימה, מה שגורם למינרלים בדגימה להשתנות או מביא לשחרור של חומרים מסוימים.

### סטריליזציה (Sterilization)

תהליך אשר הורג מיקרואורגניזמים, מסיר אותם, או מנטרל אותם.

למיקרואורגניזמים יש השפעה עצומה על הסביבה שלנו – הם מאפשרים את החיים על כדור הארץ. מרבית סביבות המחיה המיקרוביות לא נחקרו עדיין לעומק. לדוגמה, 95% מהאוקיינוס עדיין אינו מאופיין היטב. המשמעות היא שלחוקרים שסוקרים סביבות מחיה ימיות עדיין יש הרבה עבודה לעשות! כאשר אנשי מחקר חוקרים דגימות מהסביבה, לעיתים קרובות הם רוצים לדעת אם התהליכים שמתרחשים בדגימות האלה הם תהליכים ביולוגיים, כלומר מונעים על ידי פעילות ביולוגית של מיקרואורגניזמים חיים, או שהם תהליכים גיאוכימיים, כלומר מונעים על ידי תגובות כימיות אָבִי־וֹיִטוֹת, ללא פעילותם של אורגניזמים חיים (איור 2A). אחת הדרכים לדעת אילו סוגי תהליכים מתרחשים, היא לחסל את כל המיקרואורגניזמים בדגימות הסביבתיות כך שניתן יהיה לחקור את התהליכים הגיאוכימיים לבדם. חיסול כל המיקרואורגניזמים בדגימה נקרא סטריליזציה (איור 2B) [2].



איור 2

במטרה לחקור תהליכים גיאוכימיים ביעילות, שיטות הסטריליזציה שמשמשות לחיטוי דגימות נדרשות שלא להשפיע על תהליכים גיאוכימיים. לפני הניסוי שלנו, לא הרבה היה ידוע על אם שיטות סטריליזציה משנות תכונות גיאוכימיות של דגימות סביבתיות. לכן, החלטנו לחקור את ההשפעות של שיטות סטריליזציה שכיחות על משקעים ימיים. במהרה מצאנו שהסוגיה אינה פשוטה כפי שהיא נראית!

## כיצד ביכולתנו להוכיח שדגימה סביבתית היא סטרילית?

מהי המשמעות של "סטרילי"? לפי הגדרה, הפונוה היא למשהו שהוא נקי לגמרי ואינו מכיל מיקרואורגניזמים חיים. כשאנו מעוניינים להסיר מיקרואורגניזמים מדגימות הניסוי שלנו, עלינו לחשוב על האופן שבו נוכל לבחון את נוכחותם של מיקרואורגניזמים. כיצד אנו יודעים אם המיקרואורגניזמים חיים? תכונות ידועות של תאים חיים כוללות מבנה מסודר של תא; מְמִבְרַנַת תא שלמה; היכולת להגיב לגירוי כמו לכימיקלים או לאור, והיכולת לגדול ולהתרבות. ביכולתנו למדוד חלק מהתכונות האלה בקלות במעבדה (איור 2C). אנו יכולים לבחון את ההתרבות של מיקרואורגניזמים על ידי ספירת מספר התאים החיים מתחת למיקרוסקופ, או על ידי גידולם בצלוחיות אָנְגֶר, אשר מכילות מזון עשיר בחומרי מזון. אנו יכולים לבחון יצרנות מיקרובית על ידי מעקב אחר פעילות מיקרובית במעבדה, על ידי כמות כמות המזון שהמיקרואורגניזמים אוכלים, מעכלים ומייצרים. לדוגמה, באפשרותנו למדוד כמה חומצות אמינו מיקרואורגניזמים אוכלים בזמן שהם מייצרים ביומסה לגדילה. ישנן גם שיטות מעבדה למדידת כמויות חומצות הגרעין (רנ"א ודנ"א) בדגימה, מה שמספק מידע לגבי הרכב המיקרואורגניזמים הפעילים.

## מחקרנו אודות משקעים ימיים

במטרה לקבוע את השיטה היעילה ביותר לחטא דגימות של משקעים ימיים, בחנו את ההשפעות של שיטות סטריליזציה שונות על משקעים אלה. מצוידים במגפי גומי, אָנְי חפירה, כפפות ודליים, צוות המחקר שלנו אסף משקעים ימיים בדנמרק, על חוף הים הַבְּלִיטִי. חיטאנו את הדגימות האלה באמצעות שלוש שיטות: שימוש במכשיר אוטוֹקְלֶב – שיטה שבה הדגימות נחשפו לחום גבוה (121°C) וללחץ גבוה; שימוש בקרינת גמא; או שימוש בריכוז גבוה של כימיקל רעיל שנקרא אָזיד הנתרן (איור 2B) [2].

אחרי טיפולי הסטריליזציה, חיפשנו נוכחות של מיקרואורגניזמים בדגימות על ידי ספירה ישירה שלהם בצלוחיות האגר; איתור מידת גדילתם ומדידת כמויות חומצות הגרעין הנוכחות. ערכנו את המדידות האלה מייד לאחר הסטריליזציה, ושוב שבועיים מאוחר יותר. באותן שתי נקודות זמן, הערכנו את התכונות הגיאוכימיות של הדגימות, במטרה לבדוק אם חומרים שוחררו מהדגימות, או אם התרחשו שינויים במינרלים כתוצאה מתהליכי הסטריליזציה (איור 2C).

## חומצות גרעין עדיין נמצאות בדגימות שעברו סטריליזציה!

באופן מפתיע, מצאנו חומצות גרעין מייד בתום כל הליכי הסטריליזציה (איור 3A) [2]. עד כה, ידוע שדנ"א ממיקרואורגניזמים מתים יכול להישאר במשקעים ימיים במשך שבועות עד שנים [3]. רנ"א נמצא לרוב בעיקר במיקרובים חיים, אך ישנם רמזים לכך שרנ"א נותר גם זמן רב אחרי מותם של אורגניזמים, וכי הוא עשוי להיות יציב יותר במשקעים באוקיינוס ממה שהניחו בעבר [3]. חומצות גרעין יכולות להיות מפורקות על ידי חלבונים מיוחדים שנקראים אנזימים, אשר פועלים כמו מספריים מולקולריים. לאחר חיטוי באמצעות אוטוקלב, ידענו שאנזימים שחותכים דנ"א עדיין פועלים מאחר שכמות הדנ"א קטנה אחרי

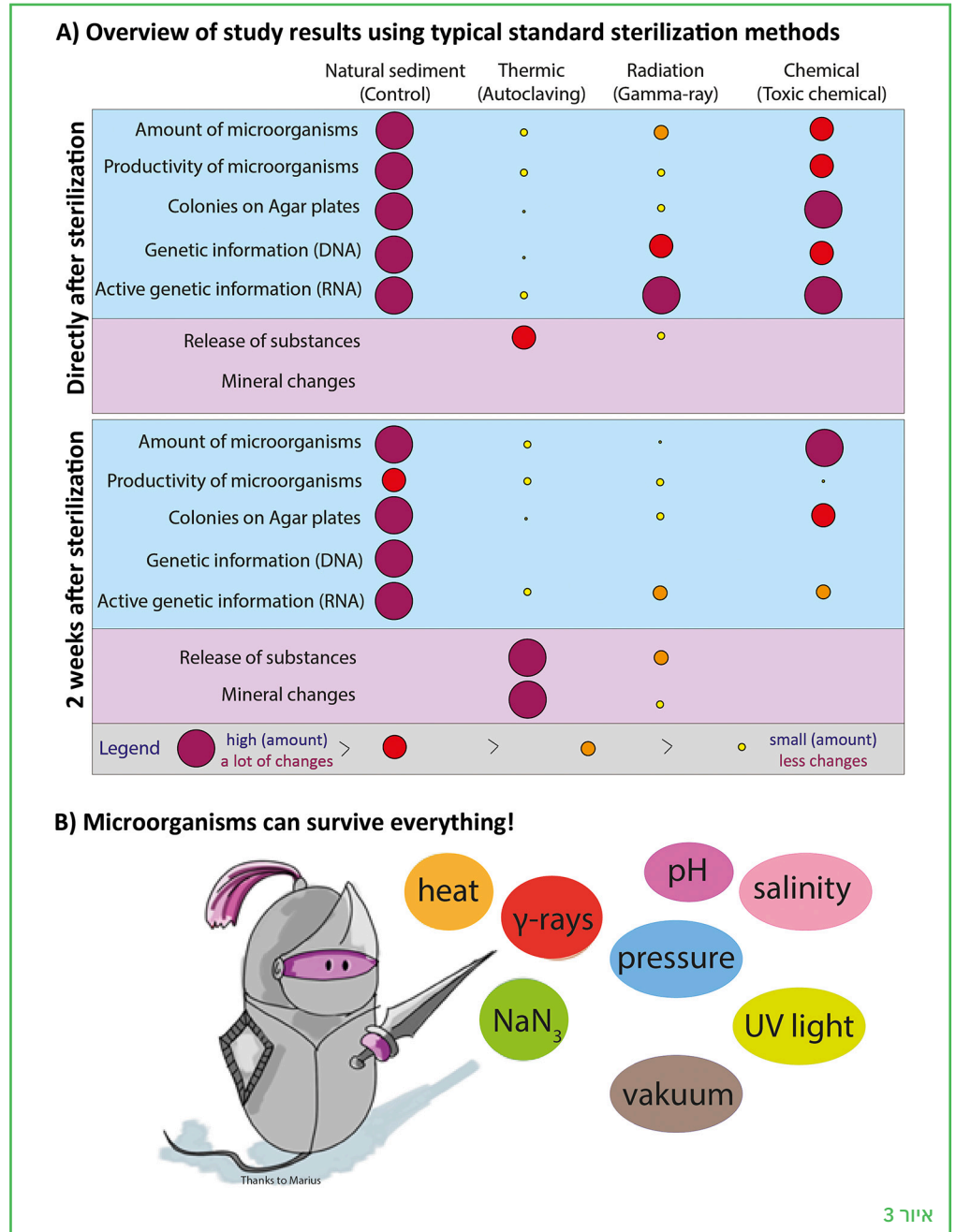
### אוטוקלב (Autoclave)

מכשיר שמייצר חום ולחץ, ומשמש להריגת מיקרואורגניזמים.

שבועיים. כימיקלים כמו אזיד הנתרן אינם משפיעים על מרבית האנזימים שחותכים חומצות גרעין, מה שמודגם על ידי הפחתה של דנ"א ורנ"א בנקודת הזמן שבה נבדקו הדגימות כעבור שבועיים. אולם, בדגימות שהוקרנו על ידי קרינת גמא, כמויות נמוכות של רנ"א עדיין נמצאו אחרי שבועיים. ייתכן כי האנזימים שחותכים רנ"א ניזקו על ידי הקרינה, וכבר לא היו מסוגלים לפרק את הרנ"א. האם נוכחותן של חומצות גרעין משמעותה שהדגימות הן סטריליות, או לא?

איור 3

שיטות סטריליזציה שכיחות, ושרידותם הגבוהה של מיקרואורגניזמים. (A) שיטות סטריליזציה שכיחות נחקרו במטרה לקבוע את השפעותיהן על דגימות סביבתיות ומיקרואורגניזמים. שימוש באוטוקלב הינה השיטה הטובה ביותר בהסרת כל עקבותיהם של מיקרואורגניזמים, ואזיד נתרן הינה השיטה הגרועה ביותר. אולם, שימוש באוטוקלב גרם לשינוי הגדול ביותר בדגימה הסביבתית, בפרט שבועיים לאחר הסטריליזציה. (B) למיקרואורגניזמים יש "שריון אבירים" מיוחד שמסייע להם לשרוד כל דבר לרבות טמפרטורות גבוהות; מינורים גבוהים של קרני גמא וריכוזים גבוהים של כימיקלים. ממחקרים אחרים אנו יודעים שמיקרואורגניזמים יכולים לשרוד גם בחומציות (pH) נמוכה וגבוהה; תחת לחץ; בוואקום; תחת קרינה אולטרה-סגולה; במליחות גבוהה ובתנאים קשים רבים אחרים.



איור 3

איזו שיטת סטריליזציה היא הטובה ביותר?

שיטת האוטוקלב משמשת באופן נרחב לסטריליזציה מאחר שהיא מנטרלת את מרבית הפטריות והפרוטוזואונים. אולם, חיידקים וארכאונים רבים שרדו אוטוקלב בניסוי שלנו

(איור 3A) [2]. נוסף על כך שיטת האוטוקלב שינתה את המינרלים בדגימות המשקעים שלנו, וגרמה לשחרורם של מגוון סוגי חומרים שונים מהדגימות. סטריליזציה באמצעות קרינת גמא חיסלה את מרבית המיקרואורגניזמים, אך גם גרמה לשחרורם של חומרים מדגימות המשקעים שלנו ושינתה מינרלים (איור 3A) [2]. אוטוקלב וקרינה עשויים שלא להיות שיטות הסטריליזציה הטובות ביותר לשימוש עבור דגימות סביבתיות, כיוון ששיטות אלה שינו את התכונות הגיאוכימיות של הדגימה. סטריליזציה באמצעות אזיד נתן הרגה רק מעט מיקרואורגניזמים, אך בלמה גדילה של מיקרואורגניזמים עד לנקודת המדידה בשבוע השני [2,4]. אזיד נתן לא שינה את שחרורם של חומרים מהדגימות שלנו, או את המינרלים בדגימות האלה.

## מסקנה: מיקרואורגניזמים שורדים הכול!

כדי להבחין בהירות בין תהליכים ביולוגיים לתהליכים גיאוכימיים בדגימות סביבתיות, צריך לבחור שיטת סטריליזציה מיטבית. אך נדמה שלכל השיטות יש חסרונות, ולכן חוקרים נדרשים להתפשר כתלות בשאלות המחקר שהם מבקשים לענות עליהן. ראוי ששיטת אוטוקלב תשמש במחקרים שמתמקדים בתכונות ביולוגיות, בעוד שכימיקלים וקרינת גמא עשויים להיות שיטות טובות יותר לחיטוי דגימות שאנו מעוניינים לנתח את תכונותיהן הגיאוכימיות.

הניסויים שלנו מבהירים שמיקרואורגניזמים הם גיבורי-על שקופים, חזקים הרבה יותר ממה שאנו חושבים (איור 3B)! בעוד שכישורי ההישרדות שלהם מדהימים ביותר, כישורים אלה מקשים על מדענים לחקור את התכונות הגיאוכימיות של משקעים ימיים ושל סביבות מחיה אחרות. מאחר שמיקרואורגניזמים יכולים לשרוד כמעט כל תנאי מאתגר שהם נתקלים בו לרבות טמפרטורה גבוהה; לחץ קיצוני; קרינה חזקה וכימיקלים רעילים, עשוי להיות קשה להסיר את כל עקבותיהם מדגימות סביבתיות. כמו כן מאתגר לבחור את שיטות הסטריליזציה המתאימות מאחר שחלק מהשיטות יכולות להשפיע גם על התכונות הגיאוכימיות של הדגימות. תוצאות הניסויים שלנו מדגימות שיצורים חיים, בפרט מיקרואורגניזמים, קשורים באופן הדוק לסביבתם. מיקרואורגניזמים והסביבות שלהם משפיעים אלה על אלה כל הזמן בדרכים מורכבות, שמאפשרות את קיום החיים על כדור הארץ!

## מאמר המקור

Otte, J. M., Blackwell, N., Soos, V., Rughöft, S., Maisch, M., Kappler, K., et al. 2018. Sterilization impacts on marine sediment - are we able to inactivate microorganisms in environmental samples? *FEMS Microbiol. Ecol.* 94:12. doi: 10.1093/femsec/fiy189

## מקורות

- Otte, J. M., Harter, J., Laufer, K., Blackwell, N., Kappler, A., and Kleindienst, S. 2018. The distribution of active iron cycling bacteria in marine and freshwater

- sediments is decoupled from geochemical gradients. *Environ. Microbiol.* 20:2483–99. doi: 10.1111/1462-2920.14260
2. Otte, J. M., Blackwell, N., Soos, V., Rughöft, S., Maisch, M., Kappler, K., et al. 2018. Sterilization impacts on marine sediment - are we able to inactivate microorganisms in environmental samples? *FEMS Microbiol. Ecol.* 94:12. doi: 10.1093/femsec/fiy189
  3. Torti, A., Lever, M. A., and Jørgensen, B. B. 2015. Origin, dynamics, and implications of extracellular DNA pools in marine sediments. *Mar. Genomics* 24:185–96. doi: 10.1016/j.margen.2015.08.007
  4. Bore, K. E., Apostel, C., Halicki, S., Kuzyakov, Y., and Dippold, M. A. 2017. Soil microorganisms can overcome respiration inhibition by coupling intra- and extracellular metabolism:  $^{13}\text{C}$  metabolic tracing reveals the mechanisms. *ISME J.* 6:1423–33. doi: 10.1038/ismej.2017.3

פורסם אונליין: 05 במאי 2023

נערך על ידי: Gianpiero Vigani

מנחה מדעית: Silvia Salati

**ציטוט:** Otte JM and Laufer-Meiser K (2023) גיבורי-העל האמיתיים: מיקרואורגניזמים שורדים הכול! *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2021.567078-he

Otte JM and Laufer-Meiser K (2021) The True Superheroes: **מ: תורגם והותאם** Microorganisms Survive it All! *Front. Young Minds* 9:567078. doi: 10.3389/frym.2021.567078

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

**COPYRIGHT** © 2021 © Otte and Laufer-Meiser 2023. 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.

## סוקרים צעירים

**LICEO COCCHETTI, גיל: 15**

אנחנו תלמידים מבית ספר תיכון מדעי במילנו, איטליה, וכולנו בני 15. אנו קשובים וחיוניים, וסקירת המאמר הזה סיפקה לנו הזדמנות לגלות היבט אחר במדע. אנו גם נרגשים להשתתף בתהליך הפרסום של מאמרים מדעיים.





## הכתבות

### JULIA M. OTTE

הוכשרתי בביו-מדע ובגיאומדע באוניברסיטת היידלברג (גרמניה) ובאוניברסיטת פרייבורג (גרמניה), עם התמחות בביו-מדע ובגיאומדע באוניברסיטת היידלברג ובמיקרוביולוגיה. בשנת 2018, סיימתי את הדוקטורט שלי באוניברסיטת טובינגן (גרמניה) עם התמחות בגיאומיקרוביולוגיה ובאקולוגיה מיקרובית, עם מיקוד בחיידקים ממחזרי-ברזל במשקעים ימיים. משנת 2018 ועד פברואר 2021, הייתי חלק מקבוצת HGF-MPG לאקולוגיה ולטכנולוגיה של עומק הים במכון אלפרד וגר במרכז הלמהולץ למחקר קוטב ולמחקר ימי בברמהייבן, ובמכון מקס פלנק למיקרוביולוגיה ימית בברמן (גרמניה). בתור חוקרת פוסט-דוקטורנטית, עסקתי בהשפעות של כרייה בעומק הים באוקיינוס השקט על מיקרואורגניזמים שחיים בעומק הים. מאז מרץ 2021, אני חוקרת במרכז לאלקטרו-מיקרוביולוגיה בארהוס (דנמרק).  
 \*[juliaotte@bio.au.dk](mailto:juliaotte@bio.au.dk) †המרכז לאלקטרו-מיקרוביולוגיה, אוניברסיטת ארהוס, ארהוס, דנמרק.

### KATJA LAUFER-MEISER

יש לי תואר ראשון בביו-מדע באוניברסיטת קיל, ותואר שני באוקיינוגרפיה ביולוגית מ-GEOMAR – מרכז הלמהולץ לחקר האוקיינוס בקיל (גרמניה). בשנת 2016 סיימתי את הדוקטורט שלי בטובינגן (גרמניה) בתחום של גיאומיקרוביולוגיה, וחקרתי מחזור-ברזל מיקרובי במשקעים ימיים. משנת 2016 עד 2019 עשיתי פוסט-דוקטורט בארהוס (דנמרק), וחקרתי מחזור-ברזל מיקרובי במשקעי פיורדים ארקטיים בסבאלבארד, נורבגיה. כיום אני פוסט-דוקטורנטית ב-GEOMAR, קיל (גרמניה), חוקרת מחזור-ברזל במשקעי פיורדים ארקטיים, כמו גם את המיקרוביולוגיה של סלפידים מאסיביים ופתחים ליציאת אדים לאורך הרכס ההודי.  
 †GEOMAR – מרכז הלמהולץ לחקר האוקיינוס, קיל, קיל (גרמניה).



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