



מסע אל תוך הקפלה: מיקרואורגניזמים השוכנים במערות ובמכרות

Cesareo Saiz-Jimenez*

המכון למשאבי טבע ולאגרוֹבִיולוֹגְיָה, IRNAS-CSIC סביליה, ספרד

סוקרים צעירים

JOHNSON
ELEMENTARY
SCHOOL
גיל: 9-10



MUHAMMAD
גיל: 13

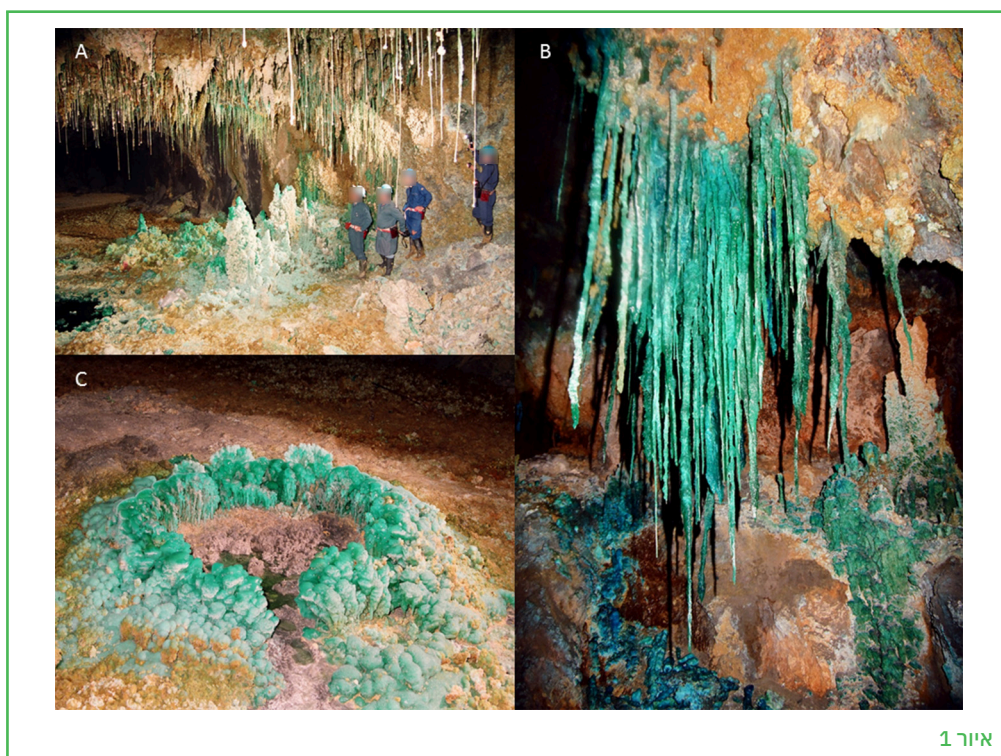


מיקרואורגניזמים חיים בכל מקום בכדור הארץ – על גבי חיות ובתוכן; על צמחים; בתוך האדמה ובמים. הם גם משגשגים בסביבות תת-קרקעיות. בני אדם מבקרים לעיתים קרובות במערכות אקולוגיות תת-קרקעיות, כמו מערות ומכרות. מיקרואורגניזמים מעניינים רבים התפתחו בצורה המאפשרת להם לשרוד במערכות האקולוגיות העוינות הללו, אשר בדרך כלל עניות בחומרי מזון. כדי להתחרות במיקרואורגניזמים אחרים על חומרי מזון, חלקם מייצרים סוגים שונים של אנטיביוטיקה – חומר שיכול להרוג סוגים מסוימים של חיידקים. אנו מכירים את האנטיביוטיקה כחומר המסייע לרפא זיהומים ולשמור על בריאותם של אנשים ושל בעלי חיים. אולם אנו זקוקים לסוגי אנטיביוטיקה חדשים, משום שישנם חיידקים המפתחים עמידות לסוגי האנטיביוטיקה שיש כיום בנמצא. חשוב לשמור על המערות והמכרות ולהגן עליהם מפני נזק שבני אדם עלולים להסב להם, כדי שנוכל להמשיך לחקור את המיקרואורגניזמים שחיים במערכות האקולוגיות המרתקות הללו. חלק מהמיקרואורגניזמים האלה עשויים לייצר סוגי אנטיביוטיקה שטרם התגלו, אשר יוכלו לרפא מחלות אנושיות!

מערות ומכרות – עולם מרתק

בספר 'הרפתקאות אליס בארץ הפלאות', כתב הסופר לואיס קרול: "אליס פתחה את הדלת ומצאה שהיא הובילה למַעְבֵּר קטן, לא גדול בהרבה מחור-עכברוש; היא כרעה על ברכיה והסתכלה אל תוך המַעְבֵּר, שבסופו נגלתה בפניה הגינה היפה ביותר שראתה מעודה." אולי הגינה היפה של אליס הייתה למעשה מערה או מכרה? כשאנו מבקרים במערות ובמכרות נפרש בפנינו עולם מרתק, המלא בתצורות מינרלים צבעוניות ומוזרות; המשתלשלות מהתקרה (נטִיפִים) או 'צומחות' מהקרקע (זְקִיפִים) (איור 1A–C). תצורות המינרלים הללו נוצרות כאשר מים מחלחלים דרך תקרת המערה ומתאדים לאט מאוד, על פני תקופה של אלפי שנים. הנטיפים והזקיפים עשויים מינרלים אשר גם מְקִינים להם את צבעם, כאשר המים המטפטפים מתאדים.

איור 1



איור 1

תצורות מינרלים (Mineral Formations)

מינרלים הנוצרים על ידי שיקוע, כאשר לִבְּה שמקורה בהרי געש מתקררת לאט, או על ידי אידוי של מים מתמיסות, כמו במקרה של נטיפים ושל זקיפים במערות.

נטיפים וזקיפים במכרות. מכרה פוזו אַלְפֵרְדוֹ, רִיוֹטִינְטוֹ, ספרד (Pozo Alfredo mine, Riotinto, Spain). מכרה זה נמצא באזור כרייה המשתרע לתוך פורטוגל, ומהווה את אחד ממקורות הברזל החשובים ביותר בעולם. גם מכרה לואזל (Lousal Mine) שבפורטוגל נמצא באותו אזור כרייה. הכרייה הנרחבת באזור זה מתוארכת לתקופה הרומית. (A) נטיפים (תקרה) וזקיפים (רצפה). (B) הנטיפים הירוקים עשויים מינרל בשם ברזל גופרתי הידרט (hydrated iron sulfate). (C) תצורות מינרלים על קרקעית המכרה (קרדיט לתמונות: Manuel Aragon).

מיקרואורגניזמים (Microorganisms)

צורות חיים שלא ניתן לראות ללא מיקרוסקופ, כגון חיידקים וזנים מסוימים של פטריות ושל אצות.

בני אדם שחיו בתקופת האבן המוקדמת השתמשו בקירות המערה כמשטחי קַנְבָס (אָרְיִג גס) עבור ציורים צבעוניים רבים, שבהם הופיעו חיות כמו בַּיְזוֹנִים, שוורים וסוסים (איור 2). בעקבות ביקורו במערת אלטאמירה שבספרד (איורים 2A, B), אמר הצייר פבלו פיקאסו כי "כל האומנות שבאה אחרי אלטאמירה, הלכה והתנוונה." איננו יודעים בוודאות אם סיפור זה נכון, אך הוא מדגים עד כמה האומנות של תקופת האבן הקדומה הייתה מדהימה. הציורים המעטרים את קירותיה של מערת לאסקו שבצרפת מרשימים לא פחות (איורים 2C, D). עם זה ישנו היבט נוסף הקשור במערות ובמכרות, שלעיתים קרובות אנשים אינם נותנים את הדעת עליו: העולם המיקרוסקופי שמתקיים במקומות אלה, המלא יצורים חיים זעירים שנמצאים בכל מקום – מיקרואורגניזמים. מיקרואורגניזמים שוכני מערות אלה מְכַסִּים את המינרלים, את ציורי המערה ואת קירותיה (איור 3).

איור 2

אומנות מערות מתקופת האבן הקדומה (A, B)

פרטים על תקרת אולם המבואה הצבעוני במערת אלטאמירה שבספרד. (C) קיר השוורים, מערת לאסקו שבצרפת. (D) קיר הפרה השחורה, מערת לאסקו שבצרפת. על קירות מערות אלה ותקרותיהן ניתן למצוא מגוון ביולוגי גדול של חיידקים, פטריות ומיקרו-אצות. בעבר, התפרצויות מיקרוביאליות מסוכנות הסבו נזק לציורים [1, 2].



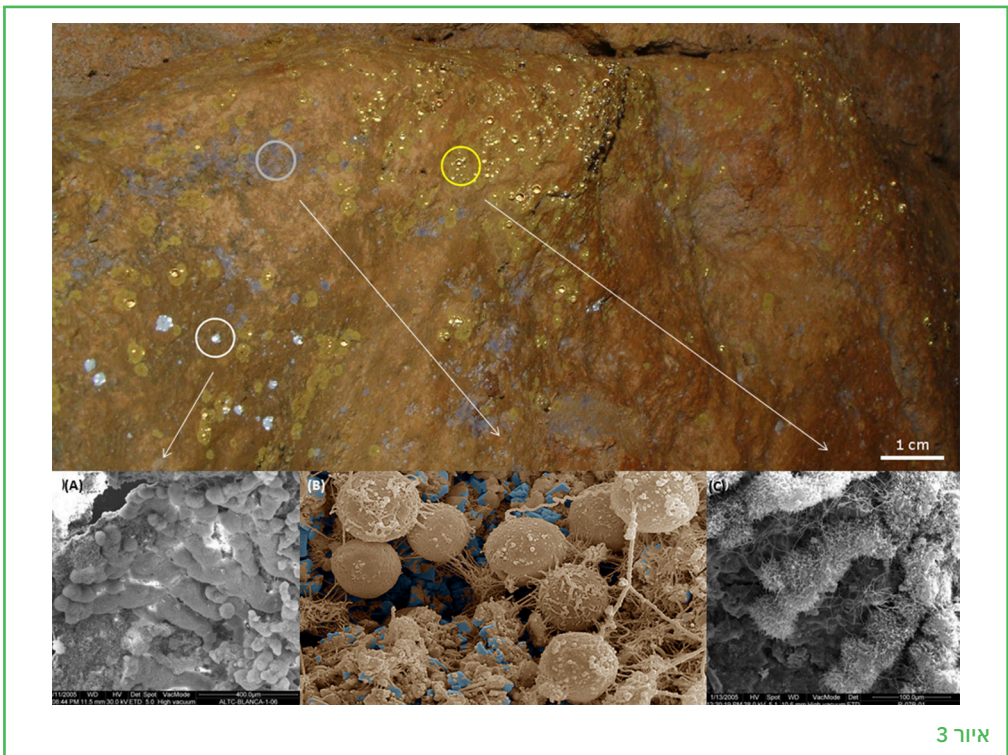
איור 2

לעריכת סיור וירטואלי במערות אלטאמירה שבספרד ולאסקו שבצרפת, ולהתרשמות מהציורים שצוירו בהן, לחצו כאן וכאן.

איור 3

על קירות מערת אלטאמירה שבספרד ניתן למצוא

קהילות מיקרואורגניזמים מגוונות. ביופילמים בצבעים שונים – לבן, אפור וצהוב – מוקפים בעיגולים. (A) תמונה שצולמה על ידי מיקרוסקופ אלקטרוני סורק (SEM), המציגה ביופילם לבן עם מיקרואורגניזמים, וכדורים העשויים מינרל בשם סידן פחמתי. (B) תמונת SEM (צבעה באופן מלאכותי) של ביופילם אפור המורכב מחיידקים (חוטים) וממשקעי מינרלים של כדורי סידן פחמתי, וכן מקריסטלים קטנים של סידן פחמתי (בכחול). (C) תמונת SEM של ביופילם צהוב המורכב מסוגים רבים של חיידקים, אשר מסודרים בעיקר בצורת חוטים.



איור 3

קהילות מיקרואורגניזמים במערות ובמכרות

מיקרואורגניזמים נמצאים בכל מקום בכדור הארץ. אפשר למצוא אותם בכל סביבות היבשה והמים, מתוך גְּזָרִים רותחים, ועד מתחת לשכבות קרח עבה באנטרקטיקה. כיצד קהילות מיקרואורגניזמים חיות במערות ובמכרות ומשגשגות בהם? במקרים רבים,

ביופילם (Biofilm)

שכבה רבגונית של מיקרואורגניזמים הצמודים בחוזקה אל משטחים נייחים. לגדילתם, הם מסתמכים על חומרי הזנה המצויים בסביבתם.

פחמן אורגני (Organic Carbon)

פחמן הנמצא באורגניזמים.

תרכובות אנאורגניות (Inorganic Compounds)

ישנם מיקרואורגניזמים המשתמשים בתרכובות אנאורגניות כמקור אנרגיה. אלה כוללות מימן גופרי; אמוניה או גז מימן, כדי לייצר פחמימות מפחמן דו-חמצני.

כלורופיל (Chlorophyll)

צבען (פיגמנט) ירוק, הקיים בצמחים; באצות ובחיידקים מסוימים, אשר לוכד את אנרגיית השמש לצורך ביצוע פוטוסינתזה.

מיקרואורגניזמים יכולים לחלוק חומרי מזון כשהם גדלים יחד ב**ביופילם**. זהו מבנה רב-שכבתי מורכב, שנוצר על ידי מגוון אורגניזמים הנצמדים אל פני השטח של המערה ויוצרים עליהם מושבות (**איור 3**). במערכות אקולוגיות של מערות ומכרות יש מעט מאוד **פחמן אורגני**, המהווה בדרך כלל את מקור האנרגיה של המיקרואורגניזמים. רוב המיקרואורגניזמים דגרי המערות שנחקרו, משתמשים במגוון רחב של מצעים אורגניים כמקור לאנרגיה, בכלל זה פחמימות; חומצות אמינו (אבני הבניין של חלבונים), ותרכובות אחרות מכילות פחמן, המתמוססות במים שמחלחלים למערה דרך הקרקע. פחמן אורגני זה שמתמוסס במים יכול לסייע לגדילת מיקרואורגניזמים.

מערות שבני אדם לא נכנסו אליהן, הן סביבות שהשתמרו במצבן הקדמוני. חומרי המזון המגיעים לתוך סביבות אקולוגיות אלה הם מעטים, וכפי שציינו, תלויים בכמויות התרכובות האורגניות המתמוססות במים המטפטפים. חלק מהמיקרואורגניזמים שחיים במערות הללו יכולים להשתמש גם ב**תרכובות אנאורגניות**, כמו מימן; מתאן; תרכובות גופרית; אמוניה או ברזל.

מצד אחר, מערות שבני אדם מבקרים בהן (שאותן אנו מכנים 'מערות-ראווה') מאוכלסות בצפיפות על ידי מיקרואורגניזמים המשתמשים בחומרים אורגניים לייצור אנרגיה. מניין המיקרואורגניזמים משיגים את החומרים האורגניים הללו? ראשית, מערות ראוה מחוברות לעולם שבחוץ באמצעות הכניסה למערה. מיקרואורגניזמים הנמצאים מחוץ למערה יכולים להיכנס אליה דרך הפתח הזה – חלקם נישאים באוויר, ואחרים מועברים במים. פרט לכך, חיות עשויות לחפש מקלט בתוך מערות פתוחות אלה. חרקים; מכרסמים ועטלפים, למשל, הם מקורות לשיער; פסולת (שתן וצואה) וגופות – כל אלה תורמים להימצאות פחמן אורגני במערה. מערות ראוה מושפעות גם מביקוריהם של בני אדם. מבקרים הנכנסים למערה מביאים עימם חומר אורגני רב (תאי עור; שיער; סיבי בגדים; עפר וכד'). חומר אורגני זה עשוי לשנות באופן מהותי את מארג המזון במערכת האקולוגית של המערה, ולעודד את גדילתם של אותם מיקרואורגניזמים הניזונים מחומר אורגני.

מבקרים ואור – מסיבי נזק למערות

מערות אלטאמירה ולאסקו, שתיים מבין מערות הראווה המפורסמות ביותר, נאלצו להיסגר עקב הידרדרות מוגברת שנצפתה במצבם של ציורי הקיר שבהן. הידרדרות זו הייתה תוצאה של ריבוי מבקרים במערות, וכן של התאורה המלאכותית בהן. אור מעודד צמיחה של ביופילמים העשויים סוגים מסוימים של חיידקים ושל אצות [1, 2]. תאורה מלאכותית יוצרת בעיה מוכרת היטב במערות ראוה. אזורים נרחבים לאורך הקירות, הקרקע ותצורות המינרלים שבמערה, הופכים ירקקים כתוצאה מהיווצרות פיגמנט ירוק שנקרא **כלורופיל** על ידי מיקרואורגניזמים ואצות. אלה משתמשים באנרגיה שמספק האור, בדומה לצמחים. הכתמה ירוקה זו שונה למדי מהצבע הירוק שנצפה במכרות, הקיים שם הודות להימצאות מינרלים ירוקים (**איור 1**). אם מסתכלים מקרוב על קירות של מערת ראוה, אפשר לראות נקודות מזעריות בצבעים שונים (**איור 3**). הנקודות הן ביופילמים, שעליהם חיים בצוותא כמה סוגי מיקרואורגניזמים, הפועלים יחד במגוון דרכים.

מיקרואורגניזמים מועילים ומסוכנים

אַנְטִיבִּיּוֹטִיקָה (Antibiotics)

תרופה המיועדת לטיפול
חיידקים, משמשת לטיפול
בזיהומים חיידקיים.

לפי ארגון הבריאות העולמי, ישנו מחסור חמור בסוגי אַנְטִיבִּיּוֹטִיקָה חדשים, הדרושים לנו כדי להיאבק באיום הגובר מצד חיידקים העמידים לסוגי האנטיביוטיקה הרגילים. מסיבה זו, ישנה חשיבות רבה לחיפוש אחר סוגי אנטיביוטיקה חדשים שחיידקים מסוימים מייצרים במטרה לחסל את החיידקים המתחרים בהם [3]. סְטְרֶפְטוֹמִיֶס (Streptomyces) הוא סוג של חיידק הכולל יותר מ-800 זנים. בין השנים 1980 ל-1940, זני הסטרפטומיזס היוו מקור משמעותי לסוגי האנטיביוטיקה שבהם רופאים השתמשו. למעשה, כשני שלישי מכלל סוגי האנטיביוטיקה המוכרים (סְטְרֶפְטוֹמִיֶס וְטֶטְרָצִיקְלִין, למשל), יוצרו בעיקר על ידי זנים של סטרפטומיזס שאותם בודדו מהאדמה. למרבה הצער, בעת האחרונה לא התגלו סוגי אנטיביוטיקה חדשים שמקורם בחיידקי אדמה [3].

פרט לסוגי אדמה שונים, מדענים חוקרים מערכות אקולוגיות אחרות במטרה למצוא סוגי אנטיביוטיקה חדשים. הם פונים למקומות פחות מוכרים בעולמנו, שבהם יש מגוון ביולוגי נרחב מאוד: אלה הם המערות והמכרות שמתחת לפני השטח של כדור הארץ. מערכות אקולוגיות אלה מכילות מינים רבים של חיידקים ופטטריות שטרם התגלו, וחלקם עשויים להיות אלה שייצרו סוגי אנטיביוטיקה חדשים [4]–[1]. בין החיידקים הללו אנו עשויים למצוא זני סטרפטומיזס שטרם נחקרו, המצויים בשפע במערות ובמכרות, כמו גם מיקרואורגניזמים נדירים אחרים [5].

בודדו מאות זני חיידקים ממערות, אשר נלקחו למעבדות מחקר במטרה להבין האם הם מייצרים אנטיביוטיקה. נחקרו גם זני חיידקים שמוצאם במכרות בדרום פורטוגל ובספרד. במערת אלטאמירה ובמערת געשיות, נמצא המספר הגדול ביותר של חיידקים המסוגלים לייצר אנטיביוטיקה. גם במכרות היו אחוזים גבוהים של חיידקים יצרני אנטיביוטיקה. לעומת זאת החיידקים שבודדו ממערות ימיות באַלְגָּאָרְבָּה שבפורטוגל כמעט ולא היו פעילים כלל. כל מערה או מכרה עשויים להכיל מיקרואורגניזמים שונים, לכן עלינו לחקור כמה שיותר מערכות אקולוגיות תת-קרקעיות שכאלה. כאשר מבודדים חיידק המייצר אנטיביוטיקה חדשה, הצעד הבא עבור המדענים הוא לפענח את המבנה הכימי של אותה אנטיביוטיקה, ולחקור את הגנים המאפשרים לחיידק לייצר את התרכובות הללו.

לרוע המזל, לא רק מיקרואורגניזמים מועילים המייצרים אנטיביוטיקה מאכלסים מערות ומכרות. במערת אלטאמירה התגלו שני זני חיידקים חדשים שעלולים להדביק בני אדם ולגרום למחלות [5]. בשל כך, לעיתים ביקורים בסביבות תת-קרקעיות עלולים לסכן את בריאותנו.

למה צריך להיות לנו אכפת ממערות וממכרות?

מערות ומכרות הם מאגרי מיקרואורגניזמים – מועילים ומסוכנים כאחד. עם זה הטבע מספק לנו חיידקים מועילים, יצרני אנטיביוטיקה, כדי להילחם בחיידקים מסוכנים, מחוללי מחלות. מערות ומכרות הם עולמות תת-קרקעיים מרתקים, שאנשים רבים אוהבים לפקוד. בד בבד עלינו להיות מודעים לכך שכניסה לסביבות אלה עלולה לסכן הן את המיקרואורגניזמים החיים שם, הן את בריאות האדם. עבודתם הקשה של המדענים לצד

היצירתיות שלהם, יכולות לסייע לנו להגן על מערכות אקולוגיות תת-קרקעיות אלה, ועל המיקרואורגניזמים יצרני האנטיביוטיקה שחיים בהן. באופן מתמשך, עלינו לנסות למצוא איזון בין ביקור במערות ובמכרות וחקירתם, לבין שמירה על סביבות אקולוגיות ייחודיות אלה מוגנות מפני נזק שבני האדם עלולים לגרום להן. זאת כדי שנוכל להמשיך לגלות סוגים חדשים של חיידקים מועילים המייצרים אנטיביוטיקה, שיסייעו לשמור על בריאות בני האדם גם בעתיד.

מימון

המימון למחקר זה בנושא מערות ומכרות הושג באמצעות פרויקט 0483_PROBIOMA_5_E, אשר מומן על ידי הקרן האירופית לפיתוח אזורי, במסגרת התוכנית הספרדית-פורטוגלית (POCTEP) 2014-2020, Interreg V-A.

תודות

מאמר זה מוקדש ל-Paula Saiz Esnaola, נפש סקרנית, שעניינה בביולוגיה ובגיאולוגיה היווה מקור השראה למאמר זה. במאמר נעשה שימוש במידע שסופק על ידי Irene Dominguez-Moãino ו-Jose Luis Gonzalez-Pimente. תודה ל-Diana E. Jennifer J. Marshall Hathaway, Northup, ו-Sonia Balasch ולסטודנטים שלה עבור הערותיהם המועילות לגרסה מוקדמת יותר של כתב היד. תודה ל-Manuel Aragón מנרבה, ספרד, על התמונות לאיור 1, ועל הרשות לעשות בהן שימוש במסגרת מאמר מדעי. הכותב מודה לפלטפורמה הנושאית הבין-תחומית של CSIC, 'מורשת פתוחה': מחקר וחברה (PTI-PAIS), על התמיכה המקצועית.

מקורות

1. Saiz-Jimenez, C., Cuezva, S., Jurado, V., Fernandez-Cortes, A., Porca, E., Benavente, et al. 2011. Paleolithic art in peril : policy and science collide at Altamira Cave. *Science* 334:42–3. doi: 10.1126/science.1206788
2. Martin-Sanchez, P., Miller, AZ. and Saiz-Jimenez, C. 2015. "Lascaux cave : an example of fragile ecological balance in subterranean environments," in *Microbial Life of Cave Systems*, ed A. S. Engel (Berlin: DeGruiter). p. 280–301.
3. Martin-Pozas, T., Gonzalez-Pimentel, J. L., Jurado, V., Cuezva, S., Dominguez-Mo nino, I., Fernandez-Cortes, A. et al. 2020. Microbial activity in subterranean ecosystems : recent advances. *Appl. Sci.* 10:8130. doi: 10.3390/app10228130
4. Cheeptham, N., and Saiz-Jimenez, C. 2015. "New sources of antibiotics : Caves," in *Antibiotics. Current Innovations and Future Trends*, eds S. Sánchez and A. L. Demain (Portland, OR: Caister Academic Press). p. 213–27. doi: 10.21775/9781908230546.12
5. Jurado V., Laiz L., Rodriguez-Nava V., Boiron P., Hermosin B., Sanchez-Moral S., et al. 2010. Pathogenic and opportunistic microorganisms in caves. *Int. J. Speleol.* 39:15–24. doi: 10.5038/1827-806X.39.1.2

פורסם אונליין: 17 בדצמבר 2024

נערך על ידי: John T. Van Stan

מנחים מדעיים: Dalaq Aiysha | David Hiller

ציטוט: Saiz-Jimenez C (2024) מסע אל תוך האפלה: מיקרואורגניזמים השוכנים במערות ובמכרות. Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2022.739199-he

תורגם והתאם מ: Saiz-Jimenez C (2022) Journey Into Darkness : Microbes Living in Caves and Mines. Front. Young Minds 10:739199. doi: 10.3389/frym.2022.739199

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

זכויות יוצרים © Saiz-Jimenez 2024. 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.

סוקרים צעירים

JOHNSON ELEMENTARY SCHOOL, גיל: 9–10

אנו תלמידים משלוש כיתות בשכבה ד, הנלהבים מכל מה שקשור למדע. גרים בנטיק, מסצ'וסטס, ונהנינו לקחת חלק בתהליך הסקירה המדעית. למדנו כיצד מאמר מחקרי מתפתח, וכי מדע אינו מסתכם רק בניסויים, אלא כולל גם מחקר, סקירה ותהליכי בחינה שונים.



MUHAMMAD, גיל: 13

היי, אני Muhammad. התחלתי לגלות סקרנות לגבי מדע כשפרויקט המדע שלי זכה במקום הראשון בהיותי בכיתה ג. בחרתי למקד אותו בפוטוסינתזה, לאחר שלמדתי כי צמחים הם יצרני מזון אוניברסליים. ספרי הלימוד המדעיים חשפו בפניי לאורך השנים את הפלאים החבויים בסביבתי בחיי היומיום.



הכותבים

CESAREO SAIZ-JIMENEZ

Cesareo Saiz-Jimenez הוא פרופסור חוקר בִּדְיִמוֹס במכון למשאבי טבע ולאגרוֹבילוגיה של המועצה הלאומית הספרדית למחקר (CSIC). הוא בעל תואר דוקטור בבילוגיה (מאוניברסיטת קומפלוטנסה של מדריד, ספרד), וכן תואר בהנדסה כימית ובהנדסת חומרים (מהאוניברסיטה הטכנולוגית של דֵּלֶפֶט, הולנד). המחקר שלו עוסק בשימור מורשת תרבותית, בכלל זה בניינים (קתדרלות, כנסיות, מנזרים



ומוזיאונים) וסביבות תת-קרקעיות (מערות המכילות ציורי קיר מתקופת האבן הקדומה, וכן קברים ואולמות קבורה תת-קרקעיים אֶטְרוֹסְקִיִּים ורומיים). תחומי מחקר נוספים שלו כוללים ביוכימיה ומיקרוביולוגיה של אדמה. *saiz@irnase.csic.es

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