

דו"ח חיא"ל 28/2026

09/09/2026

פריחה חריגה מול חופי הים התיכון – אוכלוסיות מיקרוביאליות לאורך החוף הישראלי אוגוסט-ספטמבר 2026

ד"ר מקסים רובין-בלום, ד"ר זויה הרבזוב, ד"ר יאנה יודקובסקי, מירב גלבוע, ד"ר אופיר ישראלי*, שירלי לזר*,
ד"רענבר גיחון*, ד"ר רות קפלן-לוי, ד"ר אור ביאליק, פרופ' תמר גיא-חיים

(*)המכון למחקר ביולוגי

סיכום

נדגמה פריחת פייטופלנקטון (פלנקטון פוטוסינתטי) מורכבת מול חופי ישראל, אשר החלה בסוף אוגוסט 2026 (דיגום ראשון 30/08/2026). הדו"ח הנוכחי מסכם דיגום מתמשך, על בסיס איסוף מים סמוך למתקני התפלה, והפלגות מדעיות של חיא"ל (01/09/2026, 05-6/09/2006).

ניתוח משולב של נתוני ציטומטריית זרימה (flow cytometry) וריצוף דנ"א הראו שחיידק מסוג *Synechococcus* (סינכוקוקוס, כחולית) הוא רכיב מרכזי בפייקופייטופלנקטון, ולצדו מופיעים פיקואוקריוטים, אצות ירוקות וצורניות. אנליזות דנ"א גילו נוכחות משמעותית של כחולית *Prochlorothrix*, אשר טרם נצפתה במי ים מלוחים. אנליזה גנומית הראתה שלחיידק פוטוסינתטי זה יש יכולת מסוימת להסתגל למליחות מי ים. החיידקים נמצאו במספרים רבים בעיקר בשכבות העליונות, כתגובה נלווית לפעילות הפוטוסינתטית ולחומר האורגני הזמין. מעבר לפייטופלנקטון, אאקוריוטים טפילים *Syndiniales* ו שט-רגליים (קופפודים) זעירים אוכלי-כול מהסוג *Oithona*. זוהתה פריחה פוטוסינתטית מגוונת המלווה בתגובה חיידקית ובסימנים של ויסות טרופי. המסקנה נשענת על שילוב בלתי-תלוי של שפע, הרכב מולקולרי והקשר פיזיקלי-כימי, ואינה מצדיקה בשלב זה קביעה של פריחה חד-מינית או רעילה.

ההקשר הפיזיקלי-כימי: תנאי רקע שמתאימים לפריחה

ההקשר הכימי מספק מפתח לפרשנות הביולוגית. בסקר החופי המצורף תוארו מליחות נמוכה יותר בדרום, ריכוזי חומרי הזנה גבוהים יותר בדרום ושכבת כלורופיל עבה במיוחד. באזור אשקלון נמדדה מליחות נמוכה בכ-0.8 יחידות מליחות ביחס לממוצע של חמש השנים האחרונות, סדר גודל שמתאים לתוספת של כ-2% מים מתוקים. במקביל, ריכוזי הפוספט הגיעו עד פי חמישה

מערכי הרקע וריכוזי הסיליקה עד פי שבעה, עם ירידה צפונה של כ-0.1 מיקרומולר פוספט וכ-6 מיקרומולר סיליקה. השילוב בין חריגת מליחות לבין העשרה בחומרי הזנה מצביע על גוף מים בעל היסטוריה פיזיקלית-כימית שונה מן הרקע האוליגוטרופי הרגיל של מזרח הים התיכון (Reich et al., 2021).

באותו מערך תואר שיא כלורופיל במרחק של כ-2-4 ק"מ מן החוף, שכבה עשירה בכלורופיל בעובי של כ-20 מטרים, וערכים מוגברים שנמשכו עד כ-15 ק"מ מן החוף. מצפון לדרום נצפו גם שינויים בעובי שכבת הפריחה ובעכירות, כאשר האות הביולוגי והעכירות היו בולטים יותר בדרום. מדידות של טמפרטורה נשארו בקירוב בתחום העונתי הצפוי, ולכן הטמפרטורה לבדה אינה מסבירה את האירוע. התמונה המשולבת מתיישבת עם פריחה המתפתחת בתוך מסת מים מועשרת ונעה לאורך החוף. היא אינה מוכיחה את מקור המים, אך מספקת מנגנון סביבתי סביר לאות החיידקי והפוטוסינתטי שנמדד.

תוצאות ציטומטריית זרימה: שפע החיידקים במרחב ובעומק

ראינו שינוי עקבי בכמות החיידקים לפי עומק; ברוב החתכים, שפע החיידקים גבוה בשכבת פני הים או בשכבה הרדודה ויורד בדגימות העמוקות (איור 1). בדגימות מסוימות השפע מתקרב ל-5.5 מיליארד תאים לליטר, ולכן מדובר בתגובה מיקרוביאלית ברורה ולא בתנועה זניחה. הדפוס מתאים לכך ששכבות מוארות מקבלות תוצרים אורגניים מיצרנים ראשוניים, ושבהן מתקיימת זמינות גבוהה יותר של מצע לפעילות חיידקית.

העומק אינו המשתנה היחיד. גודל העיגולים באיור 1 משתנה בין תחנות ובין חתכי חוף, ולכן אותו עומק יכול לשאת שפע שונה באתרים שונים. שונות זו מתאימה להשפעה של חזיתות, זרמים, ערבול מקומי, זמן שהייה וזמינות חומר אורגני. במילים אחרות, מתקבלת חתימה דו-ממדית: מפל אנכי ברור המוטבע על גבי הטרוגניות אופקית. מבחינה אקולוגית, זהו מאפיין של מערכת דינמית שבה התאים אינם מפוזרים באופן אחיד, אלא מרוכזים בתוך שכבות וגופי מים בעלי תנאים שונים.

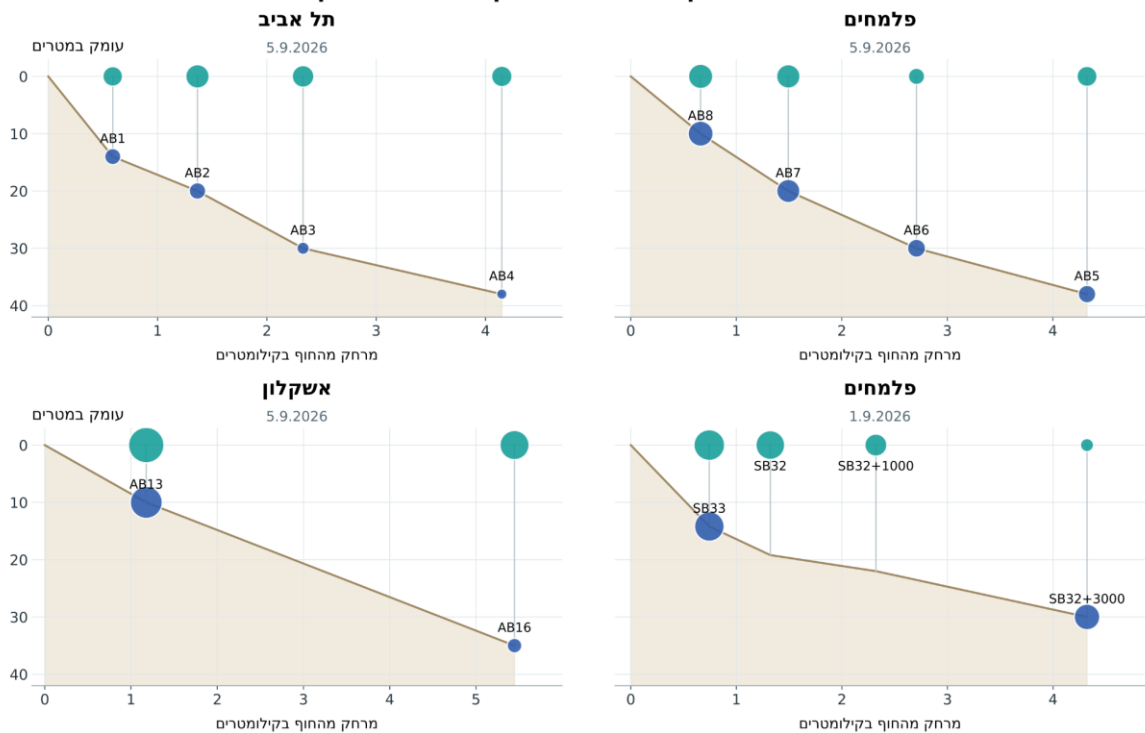
שפע חיידקים גבוה משקף פירוק של חומר אורגני שמקורו בפריחה, ושימוש בתוצרים שהפרישו האצות, או תגובה לשינוי בזמינות הפחמן המומס. המערכת הביולוגית אינה מסתיימת ביצרנים

הראשונים: היא מלווה בתגובה חיידקית חזקה, בעיקר בשכבות שבהן אות הפריחה צפוי להיות מרוכז.

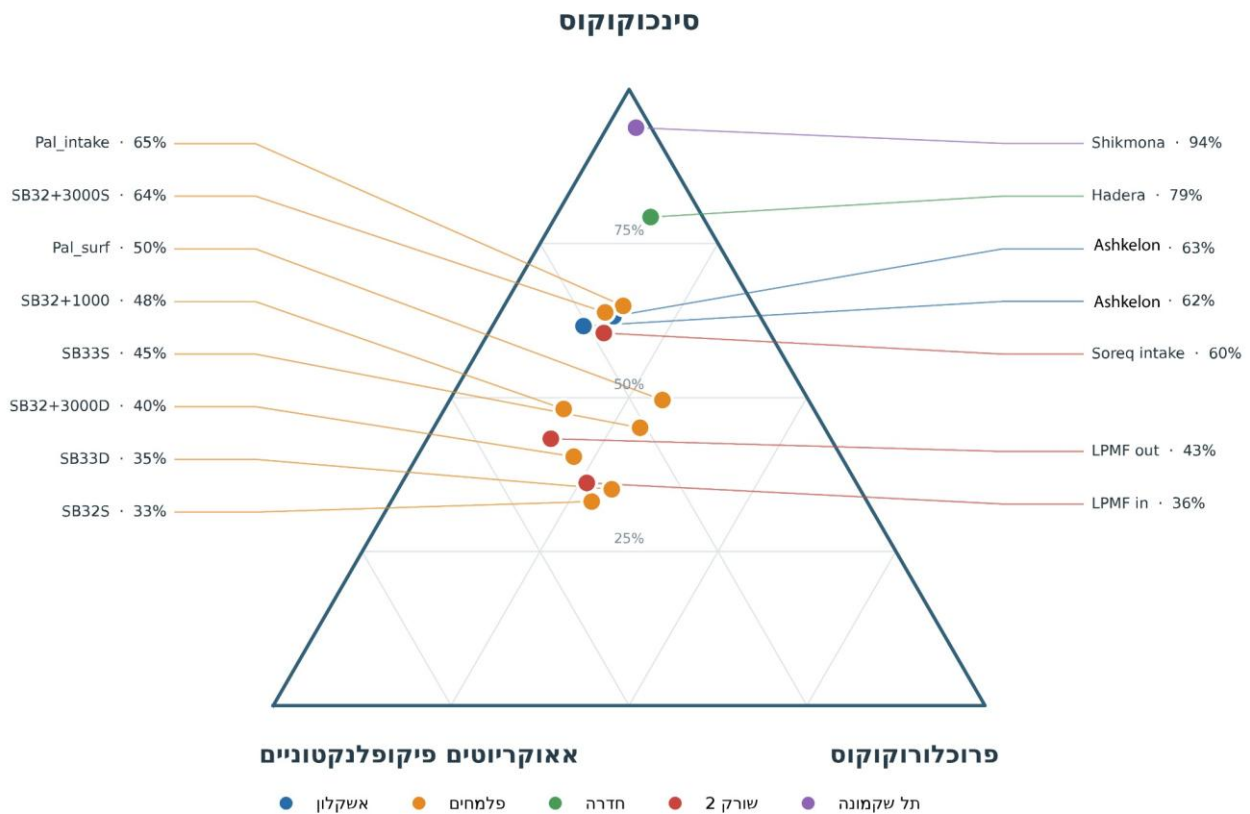
הרכב הפיקופיטופלנקטון: דומיננטיות של *Synechococcus* עם שונות מרחבית

ברוב הדגימות המוצגות *Synechococcus* הוא הרכיב המוביל (איור 2). בדגימות אשקלון הוא מהווה כ-63% ו-62% מן ההרכב המנומל. בדגימות פלמחים מופיעים ערכים של כ-50% בדגימת פני הים וכ-65% בדגימת לאורך החוף נרשמו ערכים שבין כ-33% לכ-94%, ולכן הדומיננטיות אינה קבועה במרחב. *Prochlorococcus* והפיקואוקריוטים יחד יכולים להגיע לכמחצית מן ההרכב בדגימות מסוימות, במיוחד כאשר שיעור *Synechococcus* נמוך יותר. השונות בין פני הים לבין מים רדודים בפלמחים מדגישה את החשיבות של עומק, אור ומסת מים. שתי דגימות מאותו אזור אינן בהכרח דומות אם הן מייצגות שכבות שונות או מים שנעו במסלולים שונים.

שפע חיידקים במרחב ובעומק – הפלגות החוף



איור 1. שפע חיידקים לאורך מפל של מרחק מן החוף ועומק בדגימות 1.9 ו-5.9.2026. גודל העיגול מייצג את השפע היחסי כפי שמופיע בגרף המקורי.



הרכב הפיקו-פיטופלנקטון ואחוז סינכוקוקוס

איור 2. ההרכב היחסי של פיקופיטופלנקטון בשלוש קבוצות: פיקואוקריוטים, *Prochlorococcus* ו-*Synechococcus* האחוזים מנורמלים לסכום של שלוש הקבוצות בלבד ולכן אינם מייצגים שפע מוחלט. הערך שלו הוא בהצגת היחסים הפנימיים בתוך רכיב הפיקופיטופלנקטון: האם הדגימה נמשכת לכיוון *Synechococcus*, לכיוון *Prochlorococcus*, או לכיוון האוקריוטים הפיקופלנקטוניים.

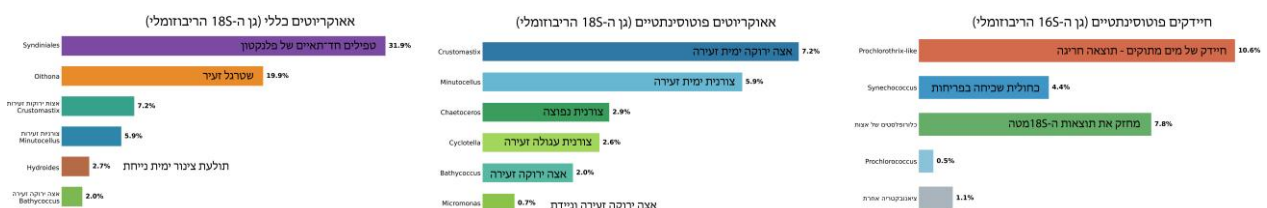
הרכב הקהילה לפי סמנים גנטיים

אפיון טקסונומי לפי גנים ריבוזומליים 16S ו-18S נעשה על בסיס ריצוף רצפים ארוכים במכשיר Nanopore, בדוגמאות שנאספו ליד מתקני ההתפלה באשקלון (30.08.2026) ובפלמחים (31.08.2026) (איור 3). אנליזות גן ה-16S בתוך מצביעות על אוכלוסיה מורכבת, עם נוכחות

משמעותית של כחולית מהסוג *Prochlorothrix* (10.6%), כלורופלסטים של אצות (7.8%) ו-*Synechococcus* (4.4%) כאשר *Prochlorococcus* מהווה כ-0.5% (איור 2). הופעת כלורופלסטים בתוך 16S מתייחסות לרצפים שמקורם באברוני כלורופלסט, ולכן הן משמשות כאן סמן לקבוצות אאוקריוטיות פוטוסינתטיות.

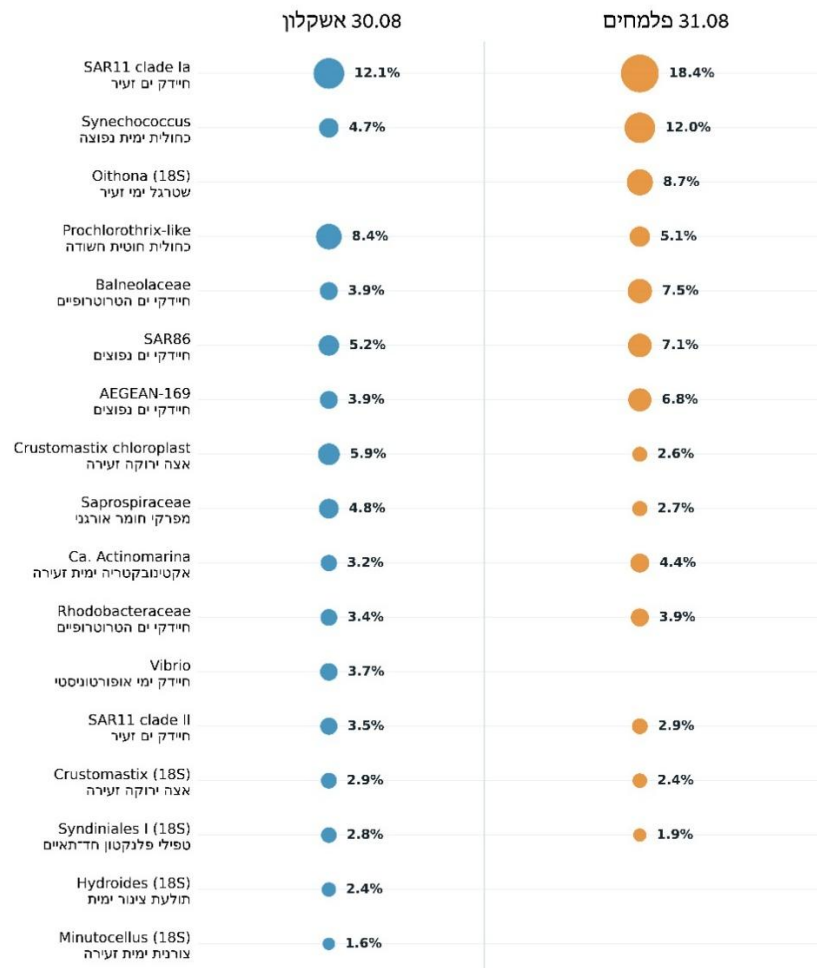
אנליזות ה-18S הראו אאוקריוטים הפוטוסינתטיים בולטים *Crustomastix*, בשיעור של כ-7.2%, צורניות קטנות *Minutocellus*, *Chaetoceros* ו-*Cyclotella*, בשיעורים של כ-5.98%, 2.9% ו-2.6%, בהתאמה. *Bathycoccus* ו-*Micromonas* מופיעים בשיעורים נמוכים יותר. התבנית הזו מחזקת את המסקנה שהפריחה אינה נשענת על קבוצה פוטוסינתטית יחידה; היא כוללת אצות ירוקות, צורניות וציאנובקטריה. בגלל ההבדלים במספר עותקי הגנים ובהטיות השיוך, יש לפרש את המספרים כחתימת הרכב יחסית ולא כמפת ביומסה מדויקת.

בסיכום האאוקריוטים הכללי, *Syndiniales* היא הקבוצה הבולטת ביותר (31.9%), ואילו שט-רגליים *Oithona* מזוהה כאות משני, עם 19.9%. יש לפרש את שני האותות בהקשר הטרופי: *Syndiniales* הם טפילים ימיים, ו-*Oithona* הוא שטרגל ימי הרועה על חלקיקי פלנקטון. לכן נוכחותם אינה מגדירה את הפריחה ואינה מעידה שהם הרכיב הפורח; היא מצביעה לכל היותר על צריכה, טפילות וסילוק ביומסה במערכת שבה הפיטופלנקטון הוא מקור המזון והאנרגיה המרכזי.



איור 3. הרכב יחסי של הקהילה הפרוקריוטית והאאוקריוטית לפי סיכומי 16S ו-18S מוצגות הקבוצות המרכזיות בלבד; האחוזים הם יחסיים בתוך כל סיכום נתונים.

נתונים של ריצוף מטאגנום - כלל הדנ"א בדוגמאות אשקלון ופלמחים



איור 4. תוצאות מתוך נתוני מטאגנומיקה בדגימות אשקלון מ-30.8.2026 ופלמחים מ-31.8.2026. התרשים מסכם את השינויים היחסיים של רצפי גנים ריבוזומליים שנקראו מתוך כלל הדנ"א.

מטאגנומיקה – גנים ריבוזומליים מתוך ריצוף כלל הגנום

שתי דגימות מים שנאספו סמוך למתקני ההתפלה באשקלון ב-30.08.2026 ובפלמחים ב-31.08.2026 עברו ריצוף מטאגנומי, כלומר ריצוף בלתי-ממוקד של כלל מקטעי הדנ"א בדגימה. מתוך הנתונים המטאגנומיים שחזרו רצפי גני ה-16S וה-18S הריבוזומליים. הם שימשו לאפיון ראשוני של הרכב הקהילה המיקרוביאלית (איור 4). השחזור בוצע באמצעות תוכנה המאתרת ומרכיבה רצפים ריבוזומליים מתוך נתוני ריצוף מטאגנומיים ומשווה אותם למסדי נתונים טקסונומיים (Gruber-Vodicka et al., 2020).

בשונה מריצוף אמפליקונים, גישה זו אינה תלויה בבחירת זוג פריימרים המכוון לקבוצה מסוימת, ולכן אינה סובלת מאותן הטיעות הנובעות מהבדלים ביעילות ההגברה ב-PCR. עם זאת, שיעור הרצפים אינו מדד ישיר לשיעור התאים: התוצאה מושפעת מעומק הריצוף, מיעילות שחזור הגנים, ממספר עותקי הבגן בגנום ומהייצוג של כל קבוצה במסד הנתונים. לכן, האחוזים באיור מתארים את ההרכב היחסי של רצפים, ולא בהכרח את התרומה המדויקת של כל קבוצה לביומסה או לשפע התאים.

הקבוצות המרכזיות ומשמעותן האקולוגית:

SAR11 clade Ia חיידקים המותאמים למים דלי נוטריינטים. קבוצה זו היוותה כ-12.1% מהרצפים באשקלון וכ-18.4% בפלמחים. SAR11 היא אחת הקבוצות החיידקיות הנפוצות ביותר באוקיינוסים, ובאזורים רבים היא מהווה חלק ניכר מהחיידקים במים העליונים. חבריה מתאפיינים בתאים קטנים, בגנומים מצומצמים וביכולת לנצל ביעילות תרכובות אורגניות בריכוזים נמוכים. לפיכך, השיעור הגבוה של SAR11 בשתי הדגימות תואם את הרקע האולטיגורופי הטבעי של מזרח הים התיכון ואינו, כשלעצמו, סימן לפריחה או לזיהום. חיידקי SAR11 משתתפים במיחזור חומר אורגני מסיס, ובחלק מהמקרים תלויים בתרכובות גופרית מחוזרות שמקורן בפיטופלנקטון, כגון DMSP (Rappé et al., 2002).

Synechococcus הוא יצרן ראשוני חופי מרכזי. שכחיחותו הגיע לכ-4.7% באשקלון ולכ-12.0% בפלמחים. זוהי ציאנובקטריה פוטוסינתטית זעירה ונפוצה, התורמת לייצור הראשוני ולמיחזור הפחמן בימים ברחבי העולם. בניגוד ל-*Prochlorococcus*, הנפוץ במיוחד במים אוקייניים דלי נוטריינטים, אוכלוסיות רבות של *Synechococcus* משגשגות במים חופיים ובאזורים שבהם זמינות הנוטריינטים גבוהה יחסית. במין שנמצא בפריחה משוייך ל-clade II, הנפוץ בעיקר במים חמים באזורים טרופיים וסובטרופיים, ובכלל זה בסביבות אולטיגורופיות; תפוצתו מושפעת גם מזמינות מקרו-נוטריינטים וברזל (Sohm et al., 2016).

רצפים שסווגו כ-*Prochlorothrix* היוו כ-8.4% באשקלון וכ-5.1% בפלמחים. זהו ממצא חריג, משום שמני *Prochlorothrix* המוכרים הם ציאנובקטריות חוטיות של מים מתוקים או מליחים ואינם נחשבים מותאמים למליחות של מי הים במזרח הים התיכון. בניסויי תרבית נמצא כי ריכוזי מלח

מתונים מעכבים את גידול *P. hollandica*, אף שהרכב יונים מתאים והצטברות סוכרוז עשויים להגדיל את סבילותה. רצפים קרובים ל-*Prochlorothrix* נמצאו בעבר במים מליחים, אך הוצע כי לפחות חלקם מייצגים אוכלוסיות שהוסעו ממקורות יבשתיים (Bergmann et al., 2008). אנליזה השוואתית של גנום (metgenome-assembled genome) של מין ה-*Prochlorothrix* מפריחה ל-*Prochlorothrix hollandica* הראתה מספר ממצאים: ב-*Prochlorothrix* מתוך הפריחה נמצאו גנים נוספים הקשורים לאגירה ולקליטה של מומסים תואמי-מליחות, ובהם סוכרוז, בטאין, פרולין וכולין, לצד מערכות לשמירת מאזן הנתרן והאשלגן. ממצאים אלה מצביעים על פוטנציאל מוגבר להסתגלות למליחות, אך המסלולים אינם שלמים באנוטציה ולכן עדיין אינם מוכיחים יכולת לגדול במי ים. מערכת הפיגמנטים של *Prochlorothrix* מתוך הפריחה דומה מאוד לזו של *Prochlorothrix hollandica* וכוללת גנים לייצור כלורופיל a ו-b, אנטנת Pcb וקרוטנואידים, התומכים בשיוכו לציאנובקטריה פוטוסינתטית דמוית *Prochlorothrix*.

קבוצות נוספות כללו את SAR86 (קבוצה ימית שכיחה המנצלת חומר אורגני, לצד שימוש בפרוטאורודופסין להפקת אנרגיה מאור), AEGEAN-169 במותאמים למים אוליגוטרופיים ולניצול יעיל של מקורות אנרגיה וחומרי מזון זמינים, Rhodobacteraceae - משפחה מגוונת זו כוללת חיידקים חופשיים, חיידקים הקשורים לחלקיקים ואוכלוסיות המגיבות לחומר אורגני המופרש במהלך פריחות, ומשפחות Balneolaceae ו-Saprospiraceae המעבדות חומר אורגני מורכב. הריצוף זיהה חיידקים ימיים אופורטוניסטיים מהסוג *Vibrio*. קבוצה זו כוללת מגוון גדול של חיידקים הטרוטרופיים הנפוצים בסביבות ימיות וחופיות. חלקם חיים באופן חופשי ואחרים קשורים לחלקיקים, לפלנקטון או לבעלי חיים. אוכלוסיות מסוימות מסוגלות להגיב במהירות לעלייה בזמינות החומר האורגני. רק מיעוט מהמינים והזנים הם פתוגניים. לכן, זיהוי *Vibrio* ברמת הסוג אינו מעיד על סכנה בריאותית ואינו מאפשר לזהות פתוגנים ללא ריצוף ברזולוציה גבוהה ובדיקת סמני אלימות ייעודיים (Sampaio et al., 2022).

ההרכב המטאגנומי מצביע על מערכת חופית רב-רכיבית. לצד היצרן הראשוני *Synechococcus* נמצאו חיידקים אוליגוטרופיים נפוצים, ובראשם SAR11, וכן קבוצות בעלות פוטנציאל לעיבוד חומר אורגני שמקורו בפיטופלנקטון. התמונה מתאימה לקהילה שבה ייצור ראשוני ומיחזור חיידקי של חומר אורגני מתקיימים במקביל. היא אינה תומכת בפריחה חד-מינית ואינה מאפשרת לייחס את האירוע לקבוצה יחידה.

סיכום:

מכלול הנתונים מצביע על אירוע פיטופלנקטוני חופי נרחב אך לא אחיד, שהתפתח בתוך מסת מים חריגה יחסית: בדרום נמדדו מליחות נמוכה והעשרה בחומרי הזנה, ולצדן שכבת כלורופיל עבה ושפע גבוה של חיידקים ופיקופיטופלנקטון. *Synechococcus* היה יצרן ראשוני מרכזי, אך האצות הירוקות, הצורניות והפיקואאוקריוטים מראים שלא מדובר בפריחה חד-מינית. השפע הגבוה של החיידקים ההטרוטרופיים והופעת קבוצות המפרקות חומר אורגני מצביעים על תגובה מהירה לייצור הראשוני ועל צימוד הדוק בין יצירת ביומסה לבין מחזור במארג המזון המיקרוביאלי.

הממצא החריג ביותר הוא האות של *Prochlorothrix*. הגנום המשוחרר מכיל מערכת פיגמנטים הדומה לזו של *Prochlorothrix hollandica*, ובה גנים ליצירת כלורופיל a ו-b, אנטנת Pcb וקרנואידים. במקביל נמצאו בו גנים נוספים הקשורים לסוכרוז ולקליטת בטאין, פרולין וכולין, העשויים לשפר את ההתמודדות עם מליחות. שילוב זה תומך באפשרות שמדובר בקרוב ימי מותאם יותר של *Prochlorothrix*, אך אינו מוכיח שהאורגניזם היה חי, פעיל או אחראי לפריחה. אימות הממצא ידרוש בדיקה פילוגנומית של הגנום, מיפוי קריאות לקונטיגים הרלוונטיים, מדידה ישירה של כלורופיל b ועדות מיקרוסקופית או ביטויית ברמת הרנ"א. עד אז, *Synechococcus* נותר הרכיב הפוטוסינתטי המאומת והמשמעותי ביותר באירוע.

מקורות

Bergmann, I., Geiß-Brunschweiler, U., Hagemann, M., and Schoor, A. (2008). Salinity tolerance of the chlorophyll b-synthesizing cyanobacterium *Prochlorothrix hollandica* strain SAG 10.89. *Microb. Ecol.* 55, 685–696. doi:10.1007/s00248-007-9311-5.

Gruber-Vodicka, H. R., Seah, B. K. B., and Pruesse, E. (2020). phyloFlash: Rapid small-subunit rRNA profiling and targeted assembly from metagenomes. *mSystems* 5, e00920-20. doi:10.1128/msystems.00920-20.

Rappé, M. S., Connon, S. A., Vergin, K. L., and Giovannoni, S. J. (2002). Cultivation of the ubiquitous SAR11 marine bacterioplankton clade. *Nature* 418, 630–633.

doi:10.1038/nature00917.

Reich, T., Ben-Ezra, T., Belkin, N., Tsemel, A., Aharonovich, D., Roth-Rosenberg, D., et al. (2021). A year in the life of the Eastern Mediterranean: Monthly dynamics of phytoplankton and bacterioplankton in an ultra-oligotrophic sea. *bioRxiv*, 2021.03.24.436734. doi:10.1101/2021.03.24.436734.

Sampaio, A., Silva, V., Poeta, P., and Aonofriesei, F. (2022). *Vibrio* spp.: life strategies, ecology, and risks in a changing environment. *Diversity* 14, 97. doi:10.3390/d14020097.

Sohm, J. A., Ahlgren, N. A., Thomson, Z. J., Williams, C., Moffett, J. W., Saito, M. A., et al. (2016). Co-occurring *Synechococcus* ecotypes occupy four major oceanic regimes defined by temperature, macronutrients and iron. *ISME J.* 10, 333–345. doi:10.1038/ismej.2015.115.