

## חיים בים המלח – עבר, הווה ועתיד

אהרון אורן

כי בכל ומכל נובעים חיים אין קץ  
[...]  
חיה תחיה בכל, באשר תהיה שם.  
ח"נ ביאליק, בית עולם

המחקרים הרבים והשונים שנתפרסמו על ים המלח, החל מהמאה השמונה עשרה ועד היום, נוגעים רובם בתחומי הגאוגרפיה והגאולוגיה ומיעוטם בחימיה; לעומתם נעדרת הביולוגיה לגמרי מהשורה. שם 'המות' הקרוא עליו כאילו שם הסגר בפני החוקרים לא לחפש את החיים דרך שערי מות. וככה נשארה מערכת הביולוגיה שבתוכה לוח חלק.

כך פותח בנימין אלעזרי-וולקני (איור 1) את עבודת הדוקטור שלו, 'מחקר על החיים בים המלח', שהוגשה לאוניברסיטה העברית בירושלים בשנת ת"ש (1940). המאמר הראשון של וולקני, עדיין בשמו הישן, וילקנסקי, שהתפרסם בשנת 1936 בעיתון המדעי היוקרתי *Nature*, מתחיל כך:

עמידותם הגבוהה למלח של יצורים חד-תאיים שנמצאו בתוך  
אגם מלוח בריכוזי מלח גבוהים עד 19-26 אחוז נתן כלורי על  
ידי Baas Becking, T. Hoff, Ruben Tschik ואחרים גרמה

\* אהרון אורן הוא פרופסור במחלקה למדעי הצמח והסביבה, המכון למדעי החיים, וחוקר במרכז משה שילה לביוגאוכימיה ימית, האוניברסיטה העברית בירושלים.

לנו להטיל ספק בדיוק שבטענה המסורתית שים המלח מחוסר חיים. לכן נלקחו דגימות מי ים המלח בתנאים סטריליים במרחק 3-4 ק"מ משפך נהר הירדן מעומקים שונים עד 7 מטרים. הריכוז הכולל של מלחים בדגימות המים היה 28-29 אחוזים. היה ניתן לגדל חיידקים [...] מכל הדגימות שנאספו.

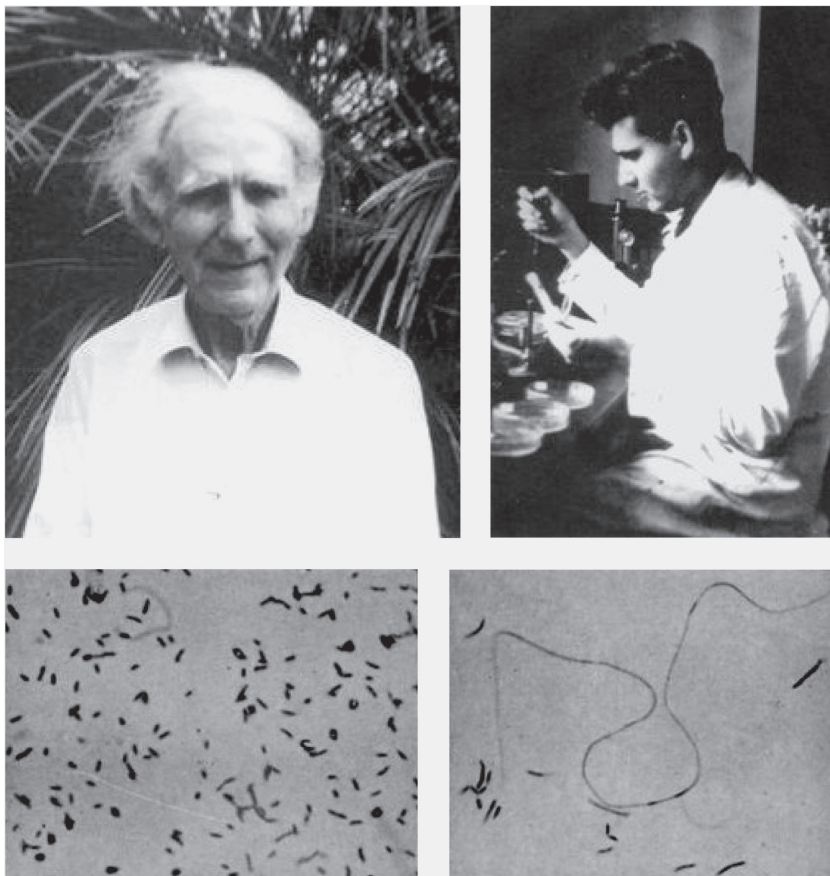
מאמר זה הוכיח אחת ולתמיד שאפילו בסביבה כה קיצונית כמו ים המלח קיימות צורות חיים המסוגלות לשרוד ואף לגדול שם.

שמו של ים המלח ברוב השפות הלועזיות (the Dead Sea, das Tote Meer, la Mer Morte וכו') מבטא את הדעה הרווחת אצל רבים עד היום שחיים אינם יכולים להתקיים שם. ואולם, יש לציין שהשם 'ים המוות' (Mare Mortuum) הופיע לראשונה אצל סופרים רומים במאות הראשונות לספירה, בעוד השמות המצויים במקורות היהודיים אינם מזכירים כלל את חוסר החיים בו. בתנ"ך מכונה האגם 'ים המלח' (בראשית יד 3), 'ים הערבה' (דברים ג 17) או 'הים הקדמוני' (יואל ב 20), ובתלמוד אנו מוצאים 'ימא של סדום' או 'ימא דמלחא'.

וולקני בוודאי לא היה הראשון שחיפש חיים בים המוות. את העובדה שדגים אינם יכולים לחיות בים המלח ציין אריסטו כבר במאה הרביעית לפני הספירה. אולריך יאספר סיצן (Seetzen), חוקר גרמני שסייר באזור ים המלח בשנת 1807, משער שגם מיקרואורגניזמים אינם מצויים במי האגם, כשהוא כותב, כי למרות שמי ים מכילים עולם בלתי־נראה של בעלי חיים וצמחים למרות תכולת המלח שלהם, נראה שדרושה לכך רק דרגה מסוימת של מליחות; כאשר עוברים את הריכוז הזה, כל החיים נכחדים. וזה כנראה המקרה בים המלח.

המדען הראשון שחיפש חיים מיקרוסקופיים בים המלח היה ככל הידוע הצרפתי ז'וזף לואי גיילוסק (Gay-Lussac) (הידוע מחוקי הגזים שניסח). בשנת 1819 הוא ניסה, ללא הצלחה, לגלות יצורים חיים בדגימת מים שהביאו לו. גם הביולוג הדגול כריסטיאן ארנברג (Ehrenberg), שבדק מי ים המלח שנדגמו על ידי המשלחת האמריקנית המפורסמת בפיקודו של סרן ויליאם פרנסיס לינץ' (Lynch), ששטה על פני ים המלח בשנת 1848, לא הצליח לגלות סימני חיים.

במהלך המאה התשע עשרה היו ניסיונות נוספים להראות קיום של חיידקים במי ים המלח. בעקבות התוצאות השליליות הועלה הרעיון שאולי יהיה ניתן להשתמש במי ים המלח או בבוץ מקרקעית ים המלח כחומרי חיטוי. אך כאשר



איור 1: בנימין אלעזרי-וולקני כסטודנט צעיר ובגיל 74, והצילומים הראשונים של חיידקים שבודדו מים המלח כפי שפורסמו בעיתון *Nature* בשנת 1936 ובעבודת הדוקטור של וולקני בשנת 1940. מימין: מתגים ארוכים חוטיים ודמויי-קשת ממושבה בת עשרה ימים על אגה, בשר-פפטון, מי ים המלח. צביעת גרם. משמאל: מתגים קצרים ממושבה בת ששה ימים על אגה, בשר-פפטון, מי ים המלח. צביעת גרם.

מ"ל לורטט (Lortet), מיקרוביולוג מאוניברסיטת ליל בצרפת, הכניס, בעשור האחרון של המאה התשע עשרה, דגימות סדימנט מים המלח אל תוך מצעי הגידול שהוכנו במים מתוקים, הוא הבחין בהתפתחות המונית של חיידקים מסוג *Clostridium*, הגורמים למחלת הצפדת ולנמק גזי. חיידקים אלה אינם

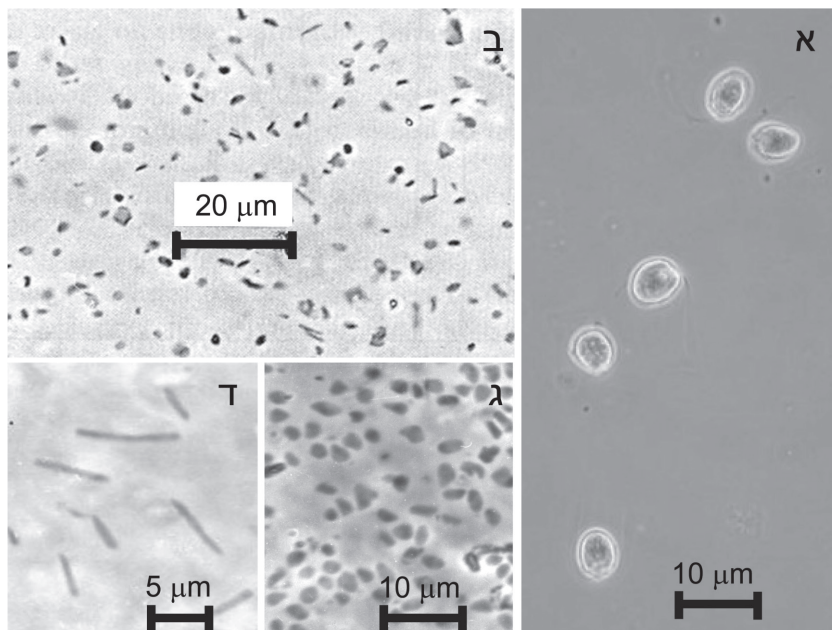
מסוגלים להתרבות במים המלוחים של ים המלח, אך הם בעלי יכולת ליצור נבגים (endospores) היכולים לשרוד זמן ממושך בסביבות עוינות. כאמור, עלינו להודות לוולקני על התגלית כי בים המלח קיימת אוכלוסייה של מיקרואורגניזמים המותאמים לקיום בתמלחות המרוכזות. בעבודת הדוקטור שלו הוא תיאר מגוון של חיידקים, אצות חד־תאיות ויצורים חד־תאיים אחרים כגון ריסניות ואמבות, כולם בעלי יכולת לגדול בריכוזי מלח גבוהים. רבים מאלה אף דרשו מליחות גבוהה ולא היו מסוגלים לשרוד ללא מלח. השיטה שבה השתמש וולקני קרויה 'תרביות העשרה'. בשיטה זו זורעים דגימה של מים או סדימנט אל תוך מצעי גידול שונים. אם קיים בדגימה חיידק או יצור אחר המסוגל להתרבות באותו מצע הגידול ובתנאי ההדגרה הנתונים, הוא יתפתח שם, ואחר כך ניתן לבודד אותו בתרבית טהורה ולחקור את תכונותיו. שיטה זו מלמדת על נוכחותם של טיפוסי אורגניזמים שונים, אך לא מספקת כל מידע על שכיוותם של אותם היצורים בדגימה.

בשנת 1939 הצטרף וולקני למכון זיו ברחובות – כיום מכון ויצמן למדע – ובשנת 1959 עבר למכון סקריפס (Scripps) בסאן דייגו, קליפורניה. הוא הביא אתו כמה מבקבוקי תרביות ההעשרה שלו. כאשר פתח את הבקבוקים באמצע שנות התשעים, 54 שנים לאחר שהועמדו התרביות, התברר שאלו עדיין הכילו חיידקים חיים. כמה מהם אף תוארו לאחרונה כמינים חדשים. בנימין וולקני נפטר בפברואר 1999 בגיל 84.

חיבור זה מסכם את הדברים שניתן ללמוד מהמחקרים על החיים בים המלח מאז עבודתו החלוצית של וולקני עד ימינו. בסופו אנסה להביא תחזית איך יתפתח האגם מבחינה ביולוגית בשנים הבאות.

### מגוון מיני המיקרואורגניזמים בים המלח

ים המלח הוא סביבת חיים קיצונית ביותר, לא רק בגלל המליחות הגבוהה אלא גם בגלל הריכוזים הגבוהים של הקטיונים הדו־ערכיים, מגנזיום וסידן. ידועים לנו מיקרואורגניזמים 'הלופיליים' (halophilic = אוהבי מלח) רבים הגדלים בסביבות רוויות ב- $\text{NaCl}$  (נתרן כלורי, מלח בישול). וולקני אף הזכיר את העובדה הזאת במשפט הפתיחה של מאמרו הראשון (Wilkansky, 1936). ואולם, בגלל הרכב



איור 2: מיקרואורגניזמים שבודדו מעמודת המים של ים המלח: (א) האצה הירוקית החד־תאית *Dunaliella*; (ב) אוכלוסייה של חיידקים אדומים שנצפתה בשכבות העליונות של עמודת המים בשנת 1992; (ג,ד) שני מינים של חיידקים אדומים שבודדו מהאגם: (א) *Haloferax volcanii* ו־ (ג) *Halorubrum sodomense* (ד).

המים הייחודי של ים המלח (העושר ביוני מגנזיום וסידן) רובם אינם מסוגלים להתרבות בו. לפיכך אין זה מפתיע שרוב החיידקים והמיקרואורגניזמים האחרים שבודדו מים המלח הם מינים חדשים למדע, שלא תוארו במקומות אחרים. האצה החד־תאית *Dunaliella* (איור 2א), שכבר תועדה בתרביות ההעשרה של וולקני, היא היצרן הראשוני היחיד באקוסיסטמה של ים המלח, כלומר, היא מייצרת חומר אורגני על ידי קיבוע פחמן דו־חמצני בעזרת אנרגיית השמש ואינה זקוקה לחומר אורגני שיוצר על ידי אחרים. אורך תאי ה־*Dunaliella* הוא כ־8 מיקרומטר (שמונה אלפיות המילימטר), והם נעים בעזרת שני שוטונים. אנרגיית האור נקלטת על ידי הצבען כלורופיל, כמו בצמחים העילאיים, ולכן האצה היא בעלת צבע ירוק. קיימים מינים של *Dunaliella* הצוברים גם כמויות גדולות של הצבען הכתום בטא־קרוטין ( $\beta$ -carotene). חברת אן־בי־טי (NBT) באילת,

חברה בבעלות יפנית, מגדלת זני *Dunaliella* כאלה לצורך הפקה מסחרית של קרוטין. בים המלח מעולם לא נצפו זנים כתומים כאלה.

חלק גדול מהחיידקים שבודדו מים המלח הם בעלי צבע אדום-סגול, שמקורו בתכולה גבוהה של צבענים שונים. הצבען השולט הוא bacterioruberin, הדומה מבחינה כימית לקרוטין. תפקידם של הצבענים מקבוצת הקרוטינואידים הוא להגן על התא מפני עצמות אור גבוהות מדי. צבען נוסף המצוי לעתים קרובות בחיידקים אדומים אלה הוא bacteriorhodopsin, המאפשר לתא לקלוט אור שמש ולהשתמש בו להפקת אנרגיה. אולם, חיידקים אלה אינם קולטים פחמן דו-חמצני כפי שעושים הצמחים, והם זקוקים לחומרים אורגניים לתזונתם.

חיידקים אדומים אלה שייכים למשפחה של חיידקים אוהבי מלח הנקראת Halobacteriaceae (איור 2). היום אנו מכירים כ־50 מינים השייכים למשפחה זו. נציגים של הקבוצה מוכרים כבר יותר ממאה שנה. הצבע האדום-ורוד שרואים לעתים קרובות במימי אגמים מלוחים נגרם על ידי אוכלוסיות צפופות של חיידקים כאלה. הם גם מתפתחים לעתים על דגים מלוחים ועל חומרי מזון אחרים שאליהם נוספו כמויות גדולות של מלח לצורך שימורם. מים המלח בודדו ואופיינו עד כה ארבעה מינים חדשים של חיידקים אדומים כאלה: *Haloarculam marismortui* (על שם Mare Mortuum, השם הלטיני של ים המלח), *Haloferax volcanii* (הקריו על שמו של בנימין וולקני; איור 2), *Halorubrum sodomense* (איור 2) ו־*Halobaculum gomorense*, הקרויים, בהתאמה, על שם סדום ועמורה. סביר להניח שקיימים בים המלח מינים נוספים ממשפחת Halobacteriaceae שטרם בודדו ותוארו.

מים המלח בודדו מיני חיידקים נוספים, שאינם בעלי צבע אדום. ארבעה מאלה תוארו כמינים חדשים: (1) *Halomonas halmophila*, מין שתואר על ידי וולקני בשם *Flavobacterium halmophilum*; (2) *Chromohalobacter marismortui*, גם הוא בודד על ידי וולקני בשנות השלושים של המאה העשרים, והיה ידוע בעבר בשם *Chromobacterium marismortui*; (3) *Salibacillus marismortui*, חיידק שבודד לאחרונה מתוך הבקבוקים שנשמרו במעבדתו של וולקני במשך יותר מ־50 שנה; (4) *Chromohalobacter israelensis*, חיידק שבודד בשנות השישים מברכות האידוי להפקת מלחים בדרום ים המלח. לא ידוע עד כמה המינים האלה נפוצים בים המלח ובאיזו מידה, אם בכלל, הם מהווים חלק מהאוכלוסיות היוצרות מדי פעם פריחות מיקרוביאליות באגם.

כל החיידקים שהוזכרו כאן הם חיידקים אווירניים (aerobic), התלויים לקיומם בנוכחות חמצן. מהסדימנטים שבקרקעית האגם בודדו גם חיידקים אל-אווירניים (anaerobic), שעבורם חמצן הוא רעיל. מידע על טיבם ועל תפקידם של חיידקים אלה באקוסיסטמה של ים המלח ניתן למצוא להלן.

בעשר השנים האחרונות בודדו מעמודת המים של ים המלח גם מינים רבים של פטריות. עדיין לא ברור אם מקורן של הפטריות שבודדו הוא מנבגים שהגיעו מהאוויר וממים מתוקים ונכנסו לים המלח, או אם אכן פטריות אלה יכולות לגדול ולהתרבות בסביבה העל-מלוחה של מי ים המלח. רוב המינים שתוארו מהאגם מוכרים לנו גם מקרקעות לא מלוחות, אך בודד מים המלח גם מין חדש, *Gymnascella marismortui*, הדורש ריכוז גבוה יחסית של מלח לקיומו.

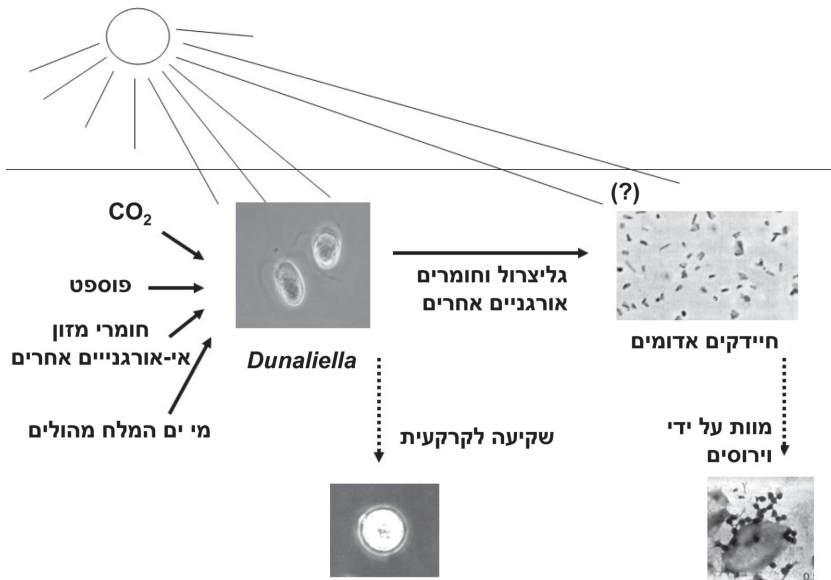
### האוכלוסיות המיקרוביאליות בים המלח – היבטים כמותיים

בשנים 1980 ו-1992 היה לים המלח כולו גוון ורוד-אדמדם. צבע זה היה חזק במיוחד בחודשים מאי-יולי 1992. תיירים שבאו לרחוץ בים בחוף עין גדי שאלו אם צבע זה נגרם על ידי זיהום המים. מדובר כאן בהתפתחות המונים ('פריחה') של חיידקים אדומים. מספרם בשכבות המים העליונות הגיע עד 20 מיליארד תאים לליטר בשנת 1980, ואף ל-35 מיליארד לליטר בקיץ 1992. ייתכן שהפסוקים בספר מלכים 'וישכימו בבוקר והשמש זרחה על-המים וראו מואב מנגד את-המים אדומים כדם. ויאמרו דם זה [...] מתייחסים לפריחה דומה של חיידקים אדומים בימים ההם (מלכים ב ג 22-23).

כדי להבין מה גורם לתופעת הפריחות, עלינו להכיר כמה מהתכונות המיוחדות של החיידקים האדומים ושל האצה הירוקית, *Dunaliella*. ה-*Dunaliella* היא יצור פוטוטרופי – יצור המשתמש באור השמש כמקור אנרגיה ובפחמן דו-חמצני כמקור פחמן. שני הגורמים האלה זמינים בשפע בים המלח. אולם, יש שני גורמים אחרים המגבילים בדרך כלל את היקף התפתחותה של אצה זו. הראשון הוא המליחות הגבוהה מדי של מי ים המלח. ה-*Dunaliella* אכן מותאמת טוב יותר מכל אצה אחרת לקיום בסביבות על-מלוחות, אך גם עבורה המליחות של ים המלח כיום גבוהה מדי, והיא סובלת במיוחד מרעילותם של ריכוזי המגנזיום והסידן שבתמלחות ים המלח. לכן תנאי ראשון להתפתחות המונית של האצה

באגם היא ירידה במליחות. חורף 1979-1980 היה גשום במיוחד, וכמויות גדולות של מי שיטפונות גרמו למיהול ולירידה של כ-10 אחוזים במליחות בחמשת המטרים העליונים של עמודת המים. חורף 1991-1992 היה גשום אף יותר, עד כדי כך שהיה צורך לפתוח את סכר דגניה למשך כשלושה חודשים. התוצאה הייתה היווצרותה של שכבת מים עליונה בעובי כ-5 מטרים, שבתום החורף הכילה כ-240 גרם לליטר מלחים, כלומר כ-30 אחוזים פחות ממי ים המלח של היום. ירידה זו במליחות בהחלט מספקת כדי לאפשר את התפתחות האצה של *Dunaliella*, כפי שהוכח גם בניסוי מעבדה. הגורם הנוסף הקובע את היקף פריחת האצה באגם הוא מידת הזמינות של זרחן. אצות זקוקות, פרט לאור ולפחמן דו-חמצני, לחומרי מזון נוספים, שהעיקריים ביניהם הם מקור חנקן ומקור זרחן. חנקן זמין נמצא בשפע במי ים המלח בצורת יוני אמוניום, אך ריכוזי הזרחן (כיוני פוספט) נמוכים ביותר. לכן מידת התפתחותן של אצות תלויה באופן ישיר בכמויות הפוספט שמי השיטפונות מכניסים לים המלח. מספרי ה-*Dunaliella* שנצפו במי השטח של ים המלח הגיעו לערכים של 8.8 מיליון תאים לליטר באוגוסט 1980 ול-15 מיליון תאים לליטר באפריל 1992.

החיידקים האדומים חיים על חשבון חומר אורגני שהאצות יוצרות במהלך תהליך הפוטוסינתזה. בין החומרים האלה החשוב ביותר הוא קרוב לוודאי גליצרול (גליצרין), מולקולה קטנה שתאי ה-*Dunaliella* יוצרים כדי לתת מענה לעקה הנגרמת על ידי המליחות הגבוהה בסביבתה. צפיפות החיידקים בשכבות העליונות של ים המלח הגיעה ל-20 מיליארד ( $20 \times 10^9$ ) תאים לליטר בשנת 1980 ואף ל-35 מיליארד תאים לליטר בשנת 1992 (איור 2). כיוון שאין בים המלח בעלי חיים הטורפים חיידקים ואצות, יכולות האוכלוסיות להגיע לצפיפויות אדירות כאלה כשתנאי המליחות וזמינות הזרחן מאפשרים זאת. הפריחות לא נשארו בגוף המים זמן ממושך. בתום פריחת ה-*Dunaliella* בשנת 1992 ראינו שהתאים איבדו את השוטונים, יצרו דופן עבה ושקעו לקרקעית. כנראה זו תגובה לתנאי סביבה לא מתאימים – מליחות גבוהה מדי ו/או מחסור בחומרי מזון כמו פוספט. כמו כן נמצאו במי ים המלח וירוסים (בקטריופאגים) הגורמים למותם של חיידקים. איור 3 מסכם את האירועים המסבירים את עלייתן ודעיכתן של פריחות המיקרואורגניזמים, כפי שדווחו ב-1980 ו-1992. לצערנו התחיל המעקב אחר צפיפותן של אוכלוסיות האצות והחיידקים בים המלח רק בשנת 1980. אין לנו כל מידע על מספרי המיקרואורגניזמים בשנים קודמות, למעט כמה מדידות

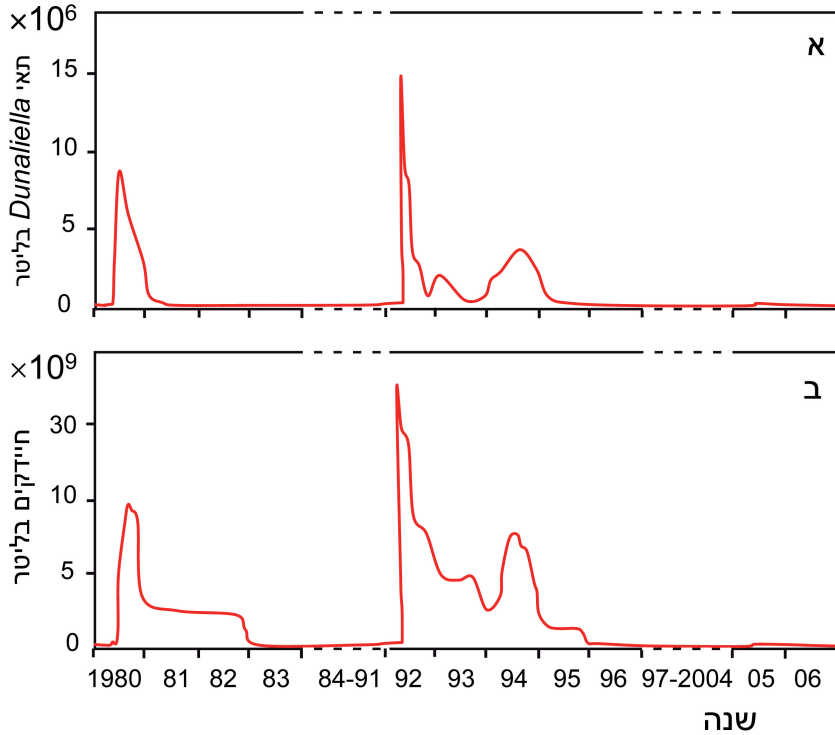


איור 3: סיכום האירועים המובילים להתפתחותן ולדעיכתן של פריחות אצות (*Dunaliella*) וחיידקים אדומים בים המלח, כפי שנצפו בשנים 1980 ו-1992.

בודדות בשנים 1963-1964, ואלו הראו מספרי *Dunaliella* גבוהים אף מאלה שדווחו ב-1992 (עד 40 מיליון לליטר) ומספרי חיידקים בסביבת תשעה מיליארד לליטר.

מהו מצבן של האוכלוסיות המיקרוביאליות בים המלח כעת? בעשר השנים האחרונות נכנסו רק כמויות קטנות באופן יחסי של מי שיטפונות אל תוך ים המלח, כמויות שאינן מספיקות לעורר את תאי ה-*Dunaliella* ואת החיידקים מתרדמתם. כבר לא ניתן למצוא תאי *Dunaliella* בעמודת המים, ומספרי החיידקים נמוכים מאוד (איור 4).

המחקר נמשך. בפברואר 2006 התקיימה הפלגה שבה השתתפו חוקרים ישראלים מהאוניברסיטה העברית ומהטכניון, יחד עם חוקרים מירדן ומאמצות הברית. מטרתה של הפלגה זו, הפלגת המחקר הישראלית-ירדנית המשותפת הראשונה על ים המלח, הייתה לאפיין את טיבן של האוכלוסיות המיקרוביאליות



איור 4: עשרים ושש שנות מעקב אחר צפיפותן של אוכלוסיות האצות והחיידקים בשכבת המים העליונה של ים המלח. (א) האצה *Dunaliella*; (ב) צפיפות חיידקים.

הקיימות היום באגם, זאת תוך שימוש בשיטות מולקולריות, שיטות שלא היו קיימות בתקופה שבה נצפתה הפריחה המיקרוביאלית האחרונה באגם.

### חיים אל-אווירניים בקרקעית ים המלח

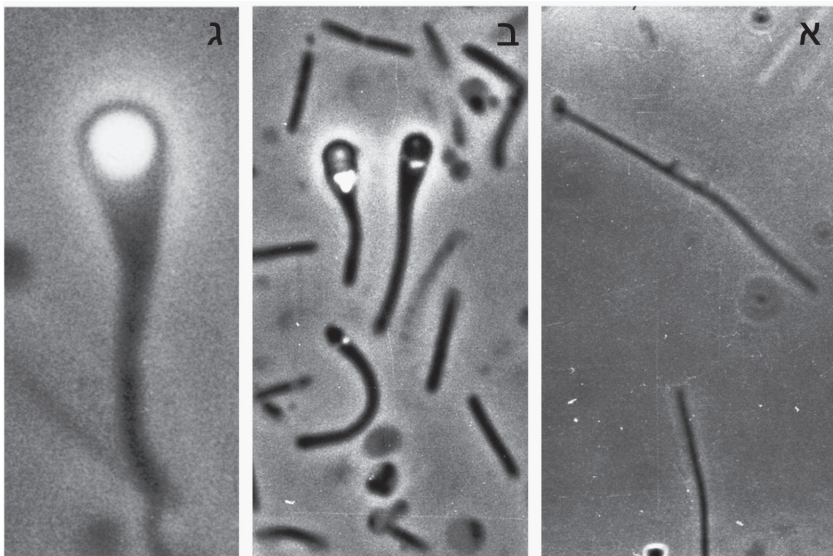
עד לפני פחות משלושים שנה הייתה עמודת המים של ים המלח משוכבת, כאשר המים בארבעים המטרים העליונים היו מלוחים פחות ממי העומק. המים העמוקים היו מחוסרי חמצן והכילו מימן גפריתי ( $H_2S$ ). עקב התייבשות הים והעלייה שחלה בריכוזי המלחים במי השטח (גבריאלי וביין, 2005), בוטל

הפרש הצפיפויות שהיה אחראי לשיכוב. מאז שנת 1979 מתערבבים מי ים המלח עד לקרקעית כמעט מדי חורף, אך גם היום קיימים תנאים אל-אווירניים בסדימנטים.

לכן אין זה מפתיע שקיימים בים המלח גם יצורים שאינם תלויים בחמצן לקיומם. וולקני, במחקריו בסוף שנות השלושים של המאה הקודמת, קיבל מגוון של חיידקים אל-אווירניים בתרבויות ההעשרה שהעמיד. לצערנו, החיידקים שבודדו בדרך זו לא נשמרו.

הנוכחות של סולפיד (יון  $S^{2-}$ ) במי העומק של ים המלח לפני היעלמות השיכוב יכולה לרמוז על קיום חיידקים אל-אווירניים. הגפרית מגיעה אל ים המלח בעיקר כיוני סולפט ( $SO_4^{2-}$ ), ומחוזרת ליוני סולפיד על ידי חיידקים אלו המשתמשים בסולפט כקולט אלקטרוני בתהליך הנשימה שלהם.

עדות למקור הביולוגי של הסולפיד התקבלה באנליזה איזוטופית של הסולפיד והסולפט שהיו מצויים בעמודת המים בשנות השבעים של המאה הקודמת. הסולפיד היה מועשר באיזוטופ הקל של גופרית ( $^{32}S$ ), בהשוואה



איור 5: מיקרואורגניזמים א-אווירניים שבודדו מהסדימנטים שבקרקעית ים המלח: Orenia (ג); Sporohalobacter lortetii (ב); Halobacteroides halobius (א).marismortui

לסולפט שהיה כבד יותר בגלל תכולה גדולה יותר של האיזוטופ הכבד (<sup>34</sup>S). חיידקים מחזרי סולפט מעדיפים להשתמש בסולפט 'קל', ולכן הפרש כזה בהרכב האיזוטופי של תצורות הגפרית בדרך כלל מעיד על מעורבות של תהליך ביולוגי בהיווצרות הסולפיד. עד היום לא הצליחו לבודד ולאפיין חיידקים המסוגלים לחזר סולפט בתנאים אל־אווירניים במליחות ובהרכב המלחים של מי ים המלח. ואולם, הניסיונות לבודד חיידקים כאלה הובילו לבידודם של מגוון של חיידקים אל־אווירניים אחרים מקרקעית ים המלח, חיידקים שאינם מחזרים סולפט אך מפיקים את האנרגיה שלהם בתהליכי תסיסה (פרמנטציה) ובדרכים אחרות. כך בודדו מהסדימנטים של ים המלח החיידקים, *Halobacteroides halobius*, *Sporohalobacter lortetii*, *Orenia marismortui* ו־*Selenihalanaerobacter shriftii*. מינים אלו שייכים למשפחות שמתקיימות רק בסביבות על־מלוחות אך אינם מוכרים מסביבות על־מלוחות אחרות בעולם. איור 5 מראה כמה מהחיידקים האלה. השם *Sporohalobacter lortetii* (שבשנת 1983 תואר בשם *Clostridium lortetii*) מכבד את זכרו של מ"ל לורטט (Lortet), שבודד חיידקי צפדת מסדימנט ים המלח בסוף המאה התשע עשרה.

### ומה בעתיד?

המחקרים בשבעים השנים האחרונות, מעבודותיו הראשונות של בנימין וולקני עד ימינו, הראו שאף על פי שים המלח נחשב אחת הסביבות הקיצוניות ביותר לחיים, קיים מגוון רב של מיקרואורגניזמים המותאמים לחיים בסביבה העל־מלוחה הזאת. המעקב הכמותי אחר אוכלוסיות האצות והחיידקים, שהחל בשנת 1980 (איור 4), נתן לנו תמונה ברורה על הגורמים הקובעים את התפתחותן של אוכלוסיות המיקרואורגניזמים באגם. ברור שהגורמים החשובים ביותר הם מליחותה של שכבת המים העליונה וזמינות של זרחן (איור 3). שיטפונות החורף שבשנים 1979-1980 ו־1991-1992 סיפקו לנו ניסויי רב היקף שבו ניתן לראות שמהול מי השטח גרם להתפתחות אצות חד־תאיות וחיידקים אדומים עד כדי כך שאלה גרמו לצבע אדמדם במים. השנים השחונות היו ניסויי 'ביקורת', שהראו שמליחותו של ים המלח היום גבוהה מדי אף ליצורים המתמחים בקיום באגמים על־מלוחים. ניסויי הדמיה במעבדה, וגם ניסויי הדמיה בקנה מידה גדול

יותר, בבִּרְכוֹת בנפח 900 ליטר, שנעשו במתקן ניסיוני בשטח מפעלי ים המלח בסדום, מאששים מודל זה.

כיום הפך ים המלח לסביבה קיצונית יותר ויותר לקיום מיקרואורגניזמים אוהבי מלח. כפי שהוסבר לעיל, קיימים מיקרואורגניזמים רבים המסוגלים לחיות בסביבה רוויה בנתרן כלורי, ואף מעדיפים סביבה כזאת על פני כל סביבה אחרת. ואולם, קטיונים דו־ערכיים כמו מגנזיום וסידן רעילים כשהם נמצאים בריכוזים גבוהים. היום עולים ריכוזי הקטיונים הדו־ערכיים על ריכוזי הקטיונים החד־ערכיים. מי ים המלח מכילים כ־1.98 מול לליטר מגנזיום וכ־0.47 מול לליטר סידן, לעומת כ־1.54 מול לליטר נתרן וכ־0.21 מול לליטר אשלגן. בימינו מי ים המלח רוויים ב־NaCl, ועם התייבשות הים והירידה החזקה במפלס המים בעשרים השנים האחרונות חלה שקיעה מסיבית של NaCl מגוף המים אל הקרקעית בצורת גבישי הליט (halite). הקטיונים הדו־ערכיים מסיסים יותר ונותרים במי הים. כך עלו ריכוזי המגנזיום והסידן, בעוד ריכוזי הנתרן ירדו: היום היחס המולרי Mg/Na הוא כ־1.28 בהשוואה לערכים של 1.04 שנמדדו בשנת 1977 ו־1.19 בשנת 1996.

ניתן לצפות שמפלס ים המלח ימשיך לרדת בשנים הבאות, ושהים ילך ויתייבש, תוך השקעת מלח בישול מגוף המים ועלייה נוספת בריכוזם של הקטיונים הדו־ערכיים. בתנאים האלה יהפוך ים המלח לסביבה קיצונית מדי לקיום חיים – בדומה למצב הקיים היום בבִּרְכוֹת האידוי של מפעלי ים המלח בשטח שפעם, לפני התייבשותו, היה האגן הדרומי של ים המלח: לא ניתן להראות פעילות מיקרוביאלית בסביבה זו. למרות העובדה שהתנאים בים המלח נעשים קשים יותר ויותר עבור יצורים חיים, יש לצפות שחורף גשום במיוחד יביא כמויות מספיקות של מים מתוקים שימהלו את שכבות המים העליונות של ים המלח במידה מספקת, ואז נוכל לצפות בפריחות מחודשות של *Dunaliella* ושל חיידקים אדומים באגם. גם היום עדיין יש אוכלוסיות קטנות של חיידקים במי ים המלח, ותאי האצות נמצאים בצורות בנות קיימא בסדימנטים. האירועים של שנת 1992 מראים שגם לאחר עשר שנים של 'תרדמה' התעורר העולם המיקרוביאלית לחיים ברגע שהתנאים שוב היו מתאימים. ניסויי ההדמיה בבִּרְכוֹת הניסיוניות בסדום מראים תופעה זו בברור.

האם באמת ייכחדו החיים מים המוות' תוך מספר שנים? אם אכן יימשך תהליך ההתייבשות בקצב הנוכחי, ניתן לצפות שזה יקרה. ואולם, המצב ישתנה

לחלוטין אם יוחלט בעתיד הקרוב להגשים את התכניות הקיימות להזרים כמויות גדולות של מי ים ממפרץ אילת אל תוך ים המלח דרך 'מובל השלום'. מאז נחתם חוזה השלום בין ישראל לירדן, בשנת 1994, עוסקות שתי המדינות בתכנון מובל המים – תעלה או צינור. בוועידת הפסגה העולמית שהתקיימה ביוהנסבורג, דרום אפריקה, בספטמבר 2002 חתמו ישראל וירדן על הסכם לבדיקת כדאיותה של התכנית לקראת ביצועה בעתיד. התכנית מיועדת לעצור את הירידה של מפלס ים המלח. חלק ממי הים שיוזרמו ממפרץ אילת יותפלו בתהליך של אוסמוזה הפוכה, כאשר הפרש הגובה של יותר מ-400 מטר בין מפרץ אילת ובין ים המלח יספק את האנרגיה הדרושה לתהליך ההתפלה. כך יוזרמו לים המלח כמויות גדולות – לפי התכניות בין 1.2 ל-2.5 מיליון מטר מעוקב של מי ים (המכילים רק כ-40 גרם מלח לליטר) ו/או מי הרכוז הנוצרים בתהליך ההתפלה, כלומר מי ים מרוכזים פי שניים עד פי שלושה, אל תוך ים המלח (המכיל יותר מ-340 גרם מלחים לליטר). יישום תכנית 'מובל השלום' יביא ללא ספק לשיכוב מחודש של עמודת המים של ים המלח, כשמי מפרץ אילת או מי הרכוז הנפלטים ממפעל ההתפלה יתערבבו עם מי השטח של ים המלח וייצרו שכבת מים בעלת מליחות וצפיפות נמוכות באופן יחסי. לפי ניסיון העבר עשוי השיכוב להוביל לחידוש גידולם של המיקרואורגניזמים בים המלח. צפיפות האוכלוסיות תיקבע במידה רבה על ידי רמת הזמינות של פוספט החיוני להתפתחות האצה *Dunaliella*. לא ניתן לחזות היום אם אכן הפעלת 'מובל השלום' תוביל להופעת פריחות אדומות של חיידקים שיישארו בים המלח במשך שנים רבות ושישנו את מראה הים בצורה משמעותית.

'מובל השלום' בוודאי לא יביא לירידה כה חזקה במליחותם של מי ים המלח כך שגם יצורים עילאיים יוכלו לחיות באגם. אין פירוש הדבר שבעתיד רחוק יותר לא יגדלו דגים בים המלח. על פי הנבואה המפורסמת של יחזקאל הנביא מחכה עתיד מזהיר לחיים בים המוות' (יחזקאל מז 9-10):

והיה כל־נפש חיה אשר ישרץ אל כל־אשר יבוא שם נחלים יחיה  
והיה הדגה רבה מאד כי באו שמה המים האלה וירפאו וחי כל־  
אשר יבוא שמה הנחל. והיה יעמדו עליו דוגים מעין גדי ועד־עין  
עגלים משטוח לחרמים יהיו למינה תהיה דגתם כדגת הים הגדול  
רבה מאד.

## רשימת מקורות וקריאה נוספת

- אלעזריי-וולקני, ב' 1940. 'מחקר על החיים בים המלח'. עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית בירושלים.
- אורן, א' 1981. 'צורות החיים בים המלח', מדע 25: 168-171.
- אורן, א' 1996. 'חיים בים המוות', גלילאו 18: 36-43.
- גבריאלי, א' וביין, ע' 2005. 'מאזן המים של ים המלח: תמונת מצב, תהליכים ומגמות', מלח הארץ 1: 53-69.
- Oren, A. 1988. 'The Microbial Ecology of the Dead Sea', Marshall, K. C. (Ed.), *Advances in Microbial Ecology*, Vol. 10. Plenum Publishing Company, New York: 193-229.
- Oren, A., & Ventosa, A. 1999. 'Benjamin Elazari-Volcani (1915-1999): Sixty-Three years of Studies of the Microbiology of the Dead Sea', *International Microbiology* 2: 195-198.
- Oren, A. 1999. 'Microbiological Studies in the Dead Sea: Future Challenges Toward the Understanding of Life at the Limit of Salt Concentrations', *Hydrobiologia* 405: 1-9.
- Oren, A. 2003. 'Biodiversity and Community Dynamics in the Dead Sea: Archaea, Bacteria and Eucaryotic Algae', Nevo, E., Oren, A., & Wasser, S. P. (Eds.), *Fungal life in the Dead Sea*, Ruggell: A.R.G. Gantner Verlag: 117-140.
- Oren, A., Gavrieli, I., Gavrieli, J., Lati, J., Kohen, M., & Aharoni, M. 2004. 'Biological Effects of Dilution of Dead Sea Water with Seawater: Implications for the Planning of the Red Sea – Dead Sea "Peace Conduit"', *Journal of Marine Systems* 46: 121-131.
- Wilkansky, B. 1936. 'Life in the Dead Sea', *Nature* 138: 467.