

# חדירה והתבססות של ציאנובקטריה (אצות כחוליות) מסדרת ה- Nostocales בכנרת

אורה הדס, אהרון קפלן<sup>1</sup>, אלון רימר, אסף סוקניק

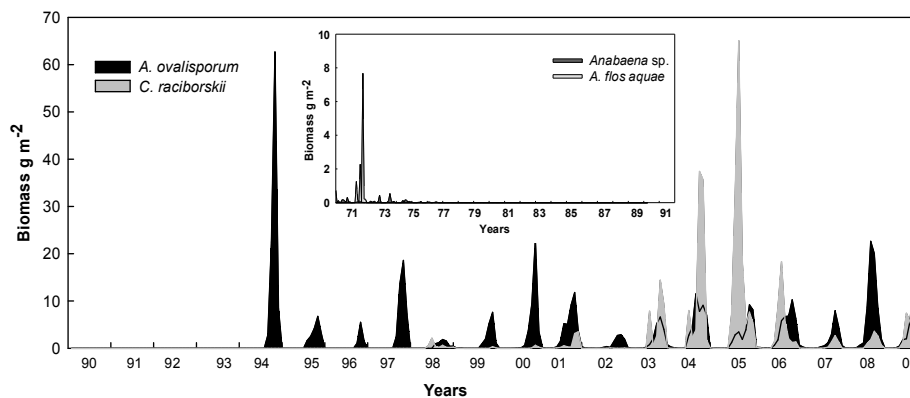
<sup>1</sup>האוניברסיטה העברית

## הקדמה

מזה למעלה מעשור מדווחים חוקרי הכנרת על חדירה והתבססות של מינים חדשים של אצות באגם מחד, ומאיך מינים אחרים אשר היוו מרכיב חשוב של אוכלוסיות הפיטופלנקטון נעלמו או שתפוצתם פחתה. היעלמות הפרידיניום מהכנרת והתבססות מספר מינים של ציאנובקטריה חוטיות מקבוצת ה- NOSTOCALES מהווים דוגמה לדינמיקה זו של אוכלוסיות הפיטופלנקטון בכנרת. פלישה (invasion) של ציאנובקטריה (אצות כחוליות) חוטיות רעילות, מהסוגים *Aphanizomenon* - 1 ו- *Cylindrospermopsis* ופריחתם בכנרת איננה אירוע מקומי. במהלך שני העשורים האחרונים דווח על אירועים דומים של הופעה והשתלטות מינים של NOSTOCALES בגופי מים רבים (אגמים, מאגרים) במקומות רבים בעולם. במאמר זה נבחן התנאים הסביבתיים והתכונות הביולוגיות המקנים לציאנובקטריה אלו את היכולת להתבסס בסביבות חדשות בהן לא נצפו קודם.

עד תחילת שנות ה-90 אצות כחוליות (ציאנובקטריה) לא היוו מרכיב משמעותי באוכלוסיית הפיטופלנקטון בכנרת. רק במספר מיקרים בודדים דווח על התפתחות אוכלוסיות של הכחולית *Microcystis*. בשלהי הקיץ של שנת 1994 היינו עדים לאירוע של פריחת כחולית חוטית מקבעת חנקן מהמין *Aphanizomenon ovalisporum*. ובשנת 2000 הופיעה באגם כחולית חוטית נוספת, אף היא מקבעת חנקן, *Cylindrospermopsis raciborskii*, שפרחה בשנת 2005 בעוצמה של האפניזומון ב-1994. מאז, שתי הציאנובקטריה מופיעות מדי שנה בקיץ ובסתיו. פריחה של אצות כחוליות בגופי מים מתוקים המשמשים כמקור למי שתייה, להשקיה חקלאית, לבילוי ונופש פעיל, היא מקור לדאגה לגופים התפעוליים האחראיים על איכות המים. זאת משום שבמקרים רבים פריחות אלו מלוות ביצירה של רעלנים בעלי טווח פעולה רחב והשפעות בריאותיות על בעלי חיים ובני אדם הבאים עמם במגע.

כריה ועיון מדוקדק בבסיס נתוני הכנרת גילה שבשנות השבעים המוקדמות (1971/2) (שנתיים לאחר השטפון הגדול בחורף 1969) הופיעו באגם ציאנובקטריה חוטיות מהסוגים *אנאבנה ואפניזומון* (איור 1) אם כי בביומסות קטנות פי עשרה ממה שצפינו בשנות ה-90 של המאה ה-20 והן נעלמו מן הכנרת.



איור 1: ביומסת ה- Nostocales בכנרת בשנים 1990-2009. באיור הפנימי הביומסה בשנים 1969-1991.

לפיכך עולה השאלה האם אירועי חדירה והיעלמות של מינים חדשים (מיני פיטופלנקטון במקרה זה) היא תופעה אקראית? ומה הם התנאים הנדרשים שתהליך החדירה יצליח והאורגניזם הפולש יתבסס בסביבה החדשה עם או על חשבון מינים אחרים? או במילים אחרות מה גרם להצלחת הציאנובקטריה בשנות ה-90 לעומת הכישלון שלהן בתחילת שנות השבעים? להלן ננסה לענות על שאלות אלו ברמה המורפולוגית פיסיולוגית של ציאנובקטריה מקבוצת ה Nostocales ובהתחשב בשינויים סביבתיים שמתקיימים במערכת הכנרת הן כתוצאה מתהליכים גלובליים והן כתוצאה משינויים אזוריים מקומיים.

### א. מורפולוגיה ופיסיולוגיה של ציאנובקטריה מסדרת ה Nostocales

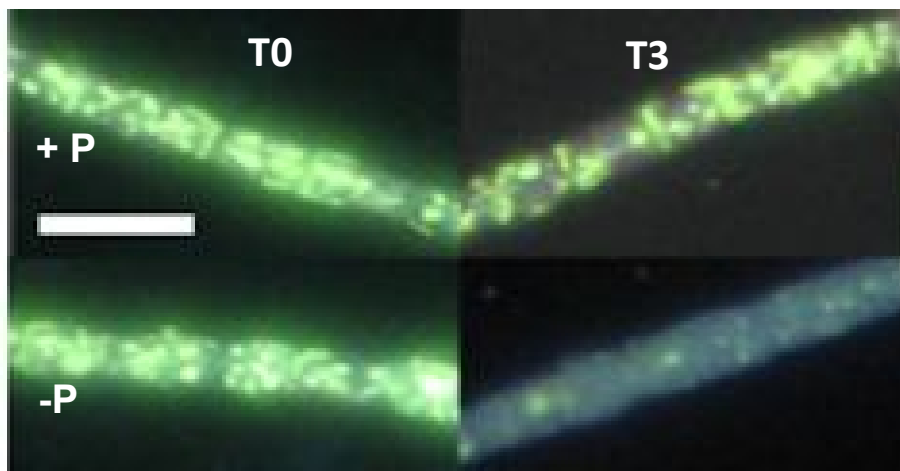
ברגע שציאנובקטריה מסדרת ה Nostocales פולשים לסביבה מסוימת הם נשארים שם לתקופות ארוכות עקב:

1. כושר התאים להתמין א. להטרוציסטים – תאים ייחודיים במ מתבצע קיבוע חנקן אטמוספרי – מה שמאפשר קיום בתנאים של חסר חנקן מקובע והמופיעים תוך כדי השלב הלוגריתמי של הגידול; ב. לאקינטים – תאים בני קיימא השורדים בתנאים קשים (יובש, חסר בנוטריאנטים ועקות סביבתיות אחרות) המתחילים להופיע בשיא הפריחה ובשלב הדעיכה.



איור 2: א. אפניזומנון אובליספורום עם הטרוציסטים (תאים עגולים שקופים); ב. אפניזומנון אובליספורום עם הטרוציסטים ואקינטים (מעובבים); ג. שרשרת אקינטים של אפניזומנון אובליספורום.

2. יוצרים גופי פוליפוספט בתא כשהזרחן זמין, המשמשים כמאגרי זרחן בתנאים של חסר זרחן.



איור 3: אפניזומנון שגודל במצע עשיר בזרחן (+P) ויצר גופי פולי פוספט הועבר למצע עם זרחן ולמצע ללא זרחן (-P). בתחילת הניסוי (T0) נראים גופי פוליפוספט בתוך הפילמנטים. כעבור 3

ימים (T3) במצע ללא זרחן גופיפי הפוליפוספט נעלמו כלומר התאים שהיו בהרעבה השתמשו בזרחן. צביעת DAPI. על פי BarYosef et al. 2010 Current Biology 20: 1-5.

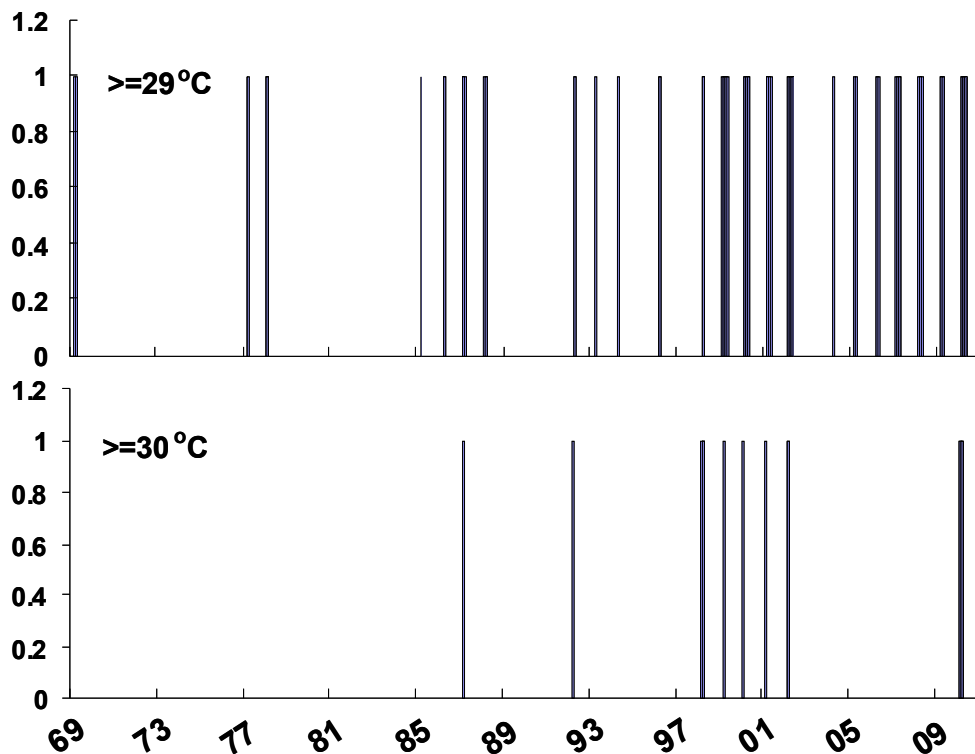
3. פעילות גבוהה של האנזים **alkaline phosphatase** ובנוסף יכולת ל"השפיע ולהכריח" אצות אחרות לייצר את האנזים הפועל על אורגנו-אסטרים ומספק זרחן אי אורגני.

**ב. שינויים בתנאים הסביבתיים שאפשרו פריחות של ציאנובקטריה**

1. **טמפרטורה** – נתונים של ממוצע הטמפרטורה בעומקים 0-5 מ' בעמודת המים באגם, שנאספו במשך 40 שנה, מראים שהחל משנות ה-90 חלה התחממות של עמודת המים העליונה. התחממות זו הגיעה לשיאה באוגוסט 2010 כשבמשך כ-3 שבועות רצופים טמפרטורת המים העליונה הייתה מעל  $31^{\circ}\text{C}$ . טמפרטורות גבוהות מיטיבות עם ציאנובקטריה ופריחות של ציאנובקטריה מופיעות בדרך כלל בטמפרטורות שמעל  $27^{\circ}\text{C}$ .

**טבלה 1:** מספר האירועים בהם נמדדו הטמפרטורות הגבוהות בעמודת המים עד שנת 1993 ומשנת 1993 ועד 2009.

Number of events (av 0-5 m depth)		
Temp $^{\circ}\text{C}$	1969-1993	1994 - Jul 2011
$\geq 29$	24	78
$\geq 29.5$	7	38
$\geq 30$	2	16



**איור 4:** ממוצע הטמפרטורה שנמדד בעמודת המים העליונה בכנרת בשנים 1969 עד 2009. בפנל העליון טמפרטורות מעל 29°C; בפנל התחתון טמפרטורות מעל 30°C.

**2. רוח –** בנייתוח נתוני הרוח באזור הכנרת בשלוש שנים רציפות בשנות השבעים לעומת שלוש שנים בשנות ה-90 מתברר שחלה ירידה במספר האירועים של מהירויות רוח גבוהות. כלומר עוצמת הרוח פחתה, מה שמעודד ומסייע לפריחת של ציאנובקטריה האוהבות מזג אויר שקט. אישוש לתצפיות שעיקרן הפחתה מסויימת בעצמת הרוח ניתן על ידי סערוני וחוב' שאכן מצאו השפעה של האפיק הפרסי ורוחות חלשות יותר באזורנו בחודשי הקיץ, זמן הופעת הציאנובקטריה באגם.

**3. ריכוז חנקן אנאורגני מומס (DIN - אמוניה, ניטריט, ניטראט) באגם וקיבוע חנקן –** התבנית השנתית של DIN בכנרת מאופיינת בריכוזים גבוהים בחורף-אביב, כתוצאה מזרימות וכניסות (שטפונות חורף) דרך הירדן לכנרת. ריכוזי ה-DIN יורדים במהירות בסוף האביב ותחילת הקיץ עקב תהליכי דניטריפיקציה ואסימילציה. בניגוד למוצע הרב שנתי עד 1993, כשחנקן מומס נצפה בעמודת המים גם בחודשי הקיץ, בשנים שלאחר מכן כמעט ואין חנקן אנאורגני מסיס בעמודת המים העליונה. כל החנקן המסיס נלקח על ידי הציאנובקטריה. בסתיו חלה עליה בריכוזי ה-DIN בכנרת. בנוסף, הירידה בריכוזי ה-DIN מתחילה מוקדם יותר (כבר בחודש אפריל) וחסר חנקן מושרה מוקדם יותר (יוני) מה שנותן יתרון לציאנובקטריה החוטיות מקבעות החנקן אטמוספרי שאינם תלויים בהספקת חנקן מקובע. ואכן נמדדו ערכי קיבוע חנקן גבוהים בעמודת המים בעומקים שבין 0 ל 7 מ' בקיץ ובסתיו והערכים פר אגם מגיעים למקסימום של 123 טון חנקן מקובע (ב 2005), ערכים השווים להספקת החנקן לאגם דרך הירדן בקיץ.

**4. מליחות –** מזמן הפעלת המוביל הארצי ועד שנת 1993 יש ירידה במליחות הכנרת מ כ 350 מג' כלור לליטר עד למינימום של 192 ו 210 מג' כלור לליטר בשנים 1988 ו 1993, בהתאמה. משנת 1993 יש עליה הדרגתית במליחות עם ירידות בשנים גשומות (2002 - 2003). בניסויים במעבדה (טבלה 2) נמצא שאפניזומנון מעדיפה ריכוזי נתון גבוהים ב pH-ים הנמדדים באגם. כלומר העלייה במליחות מסייעת לציאנובקטריה החוטיות בכנרת.

**טבלה 2:** גידול אפניזומנון אובליספורום בתרבויות מעבדה, בתוספת בופרים לשמירת ה pH, בריכוזי נתון שונים במשך 10 ימים. הגידול מבוטא כ חלבון מצטבר (מיקרוגרם למל').

pH = 9.5	pH = 8.5	pH = 7.6	Na+ (mM)
0	0	38	1
4	0	38	2.5
52	33	28	5
53	36	47	10
63	59	63	40

**5. תנודות במפלס –** בעקבות שנים שחונות רציפות ומדיניות תפעול התנודות במפלס גדולות. בעקבות זאת יש חשיפה וכיסוי של הליטוראל והרחפת סדימנטים באזור זה. גם האקינטים המצויים בשכבת הסדימנטים מורחפים, נובטים ומגיעים לעמודת המים בעזרת בועיות הגז שבתאים ויכולות להתחיל להתרבות בעמודת המים.

## **סיכום**

ציאנובקטריה מסדרת ה Nostocales מצוידים במגוון תכונות מורפולוגיות ופיסיולוגיות שיחד עם תנאי סביבה מתאימים מסייעים להתבססותם ופריחתם בכנרת.

**תודות:** לגב' ריקי פנקס, ולדר' נחמה רושנסקי –מלינסקי שהשתתפו במחקר על הציאנובקטריה בכנרת.