



חקר ימים ואגמים לישראל  
Israel Oceanographic & Limnological Research

חקר ימים ואגמים לישראל  
המעבדה לחקר הכנרת ע"ש יגאל אלון

**ניטור ומחקרי כנרת לשנת 2020**

**דו"ח חיא"ל 2021 / T8**



צילום: יחידת עיטם, יוני 2020 - דיגום יער האשלים ליד המעבדה.



חקר ימים ואגמים לישראל בע"מ (חל"צ) Israel Oceanographic & Limnological Research Ltd. (PBC)  
המעבדה לחקר הכנרת ע"ש יגאל אלון The Yigal Alon Kinneret Limnological Laboratory  
ת.ד. 447 מגדל 14950, ישראל, טלפון: 04-6721444 Tel: 04-6724627 Fax: POB 447, Migdal, Israel  
[www.ocean.org.il](http://www.ocean.org.il)

# ניטור ומחקרי כנרת דו"ח שנתי 2020

**המעבדה לחקר הכנרת, חקר ימים ואגמים לישראל**

דו"ח חיא"ל T8/2021

בעריכת ד"ר גדעון גל ואיילה לובל - ילס  
יוני 2021



# עיקרי הדו"ח - תמונה כללית: הכנרת בשנת 2020

במהלך חורף 2019/20 ואביב 2020 מפלס האגם המשיך לטפס והשלים עליה של 5.77 מ' אשר החלה בדצמבר 2018. במאי 2020 נרשם מפלס של 208.89- מ' שהוא בסך הכל 9 ס"מ מהקו האדום העליון. לעליה המבורכת במפלס האגם היו מספר השלכות על האגם שאת חלקם ניתן היה לזהות במהלך השנה וחלקם, על בסיס הידוע לנו מהעבר, יחשפו בעתיד. העלייה במפלס לוותה בירידה בריכוז הכלוריד באגם עד לריכוז של 270 מג"ל באפילימניון בסוף השנה. הצמחייה החופית שהוצפה במהלך חורף 2018/19 נשארה מוצפת ובחלקה מתה והתפרקה במהלך השנה. לצמחייה החופית תפקיד חשוב בשמירה על אוכלוסיות הדגים, כגון האמנונים, התורמים רבות למערכת האקולוגית ואשר מנצלים את הצמחייה להגנה מפני טורפים במהלך תקופות ההטלה, דגירה, בקיעה ואימון של הצעירים. יחד עם זאת, הצמחייה מקשה על גישה של נופשים למים, עלולה ליצור מפגעי ריח ויתושים וכן לשחרר כמות גדולה של נוטריינטים לאגם עם ההתפרקות שלה במים. המעבדה לחקר הכנרת, פעלה יחד עם רשות המים ורשות ניקח כנרת לצמצם, מצד אחד, את הפגיעה בנופשים ובעלי החופים, ומצד שני, לשמור על אזורי צמחיה לטובת אוכלוסיות הדגים באגם. עליית מפלס חריגה כפי שנראתה בחורף 2018/19 התבטאה בעבר בהצלחת רביה משמעותית של דגי הלבנון שתורגמה לביומסה חריגה ולחץ טריפה כולל על הזואופלנקטון באגם. לרוב, עדויות לכך נראות כשנה וחצי לאחר עליית המפלס. ואכן, במהלך שנת 2020 נרשמה ירידה של כ-30% בצפיפות הכוללת של הזואופלנקטון באגם ביחס לשנת 2019. את שאר עיקרי ממצאי הניטור ניתן לראות בטבלה 1.

איכות המים בכנרת מכומתת באמצעות מדד ייחודי ("מדד הקיימות של הכנרת") שפותח במעבדה לחקר הכנרת. ערך המדד של 2020 היה גבוה מערך המדד בשנת 2019 ועמד על ערך של 55, מעט מתחת לערכים הגבוהים ביותר שנרשמו באגם במהלך השנים מאז שנת 2000. סף הערך הקביל (60) מעיד על שמירה של המערכת האקולוגית של האגם בתנאים דומים לאלו שנצפו עד לתחילת שנות ה-90. ערכי המדד עבור שנת 2020, ובשנים שקדמו לה, נמצאים מתחת לסף זה. בנוסף, ערכי המדד סובלים מחוסר יציבות בולטת, עם דפוס של עליות וירידות משמעותיות מאז אמצע שנות ה-90. גם בשנה החולפת הסיבה העיקרית לערך המדד הנמוך הייתה הריכוז הגבוה של כחוליות במים במהלך החורף-אביב. החצי הראשון של השנה היה בעל ערך גבוה (63) בעקבות פריחת הפרדיניום והיעדר פריחה של מיקרוציסטיס. בחודשי הקיץ והסתיו ריכזי הכלורופיל תורגמו לערכי מדד נמוכים.

חלק ניכר מנתוני הניטור מוצגים כיום ב"מרכז מידע כנרת" שבאתר היא"ל [www.ocean.org.il](http://www.ocean.org.il) (או בלינק ישיר: <http://kinneret.ocean.org.il/Default.aspx>). חלק מהנתונים מוצגים בזמן אמת וחלקם כנתונים היסטוריים. האתר אינטראקטיבי ומאפשר את בחירת הפרמטרים ופרקי הזמן עבורם יוצגו הנתונים. בנוסף, ניתן להתעדכן במצב האגם על בסיס נתונים המשודרים לאתר בזמן אמת וכן תמונה מהמצלמה המותקנת על הדבורה בתחנה A. את מצב האגם ניתן למצוא בלינק:

[http://kinneret.ocean.org.il/lake\\_state rtl.aspx](http://kinneret.ocean.org.il/lake_state rtl.aspx)



## טבלה 1: עיקרי ממצאי הניטור לשנת 2020.

משתנה	הממצאים
<b>מפלס</b>	מפלס המים באגם עלה במהלך חורף 2019/20 מנקודת המינימום של 211.90- בתחילת דצמבר 2019 ועד לרום של 208.89- ב- 15.5.2020, סה"כ 9 ס"מ מהקו האדום העליון. העלייה בחורף 2019/20 מבטאת עליה מצטברת של 5.77 מ' מאז דצמבר 2018.
<b>מדד הקיימות של הכנרת</b>	ערך המדד הכולל לשנת 2020 היה 55 - ערך גבוה מהערכים שנרשמו בשנים האחרונות. מאז שנת 2000 נרשמו בסה"כ 4 שנים שבהם ערכי המדד היו גבוהים יותר מהערך שנמצא בשנת 2020. בינואר-יוני הערך הכולל היה טוב (63) בזכות פריחת הפרידיניום והעדר פריחת מיקרוציסטיס. בחצי השני של השנה, ערך המדד הכולל היה נמוך והושפע מערכי מדד נמוכים של הכלורופיל.
<b>טמפ' המים</b>	תקופת השיכוב התרמי במהלך 2020 נמשכה 294 יום, בהשוואה לממוצע רב שנתי של $293 \pm 18$ יום. חודש ספטמבר התאפיין בטמפרטורות אויר גבוהות בכ-3 מעלות מהממוצע הרב שנתי ובאופן חריג היה החודש עם טמפרטורת המים הגבוהה ביותר בשנה. בעקבות השרב בספטמבר, טמפרטורת המים באפילימניון הייתה גבוהה בכ- 1.5 מעלות ביחס לממוצע ב- 10 השנים האחרונות.
<b>כלוריד</b>	בעקבות החורף הגשום ב- 2019/20 נמשכה הירידה זו השנה השנייה בריכוז הכלוריד באפילימניון עד לכדי 270 מג"ל בסוף שנת 2020.
<b>זרחן</b>	ערכי זרחן כללי, זרחן מומס וזרחן מומס מגיב באפילימניון בשנת 2020 היו דומים לערכים של הממוצע הרב שנתי. בהיפולימניון הייתה עליה מוקדמת יחסית בזרחן כללי מומס ומומס מגיב.
<b>חמצן</b>	באפילימניון ערכי החמצן בשנת 2020 היו דומים לממוצע הרב שנתי. שיא ריכוזי החמצן בשכבה זו היה מוקדם בחודשיים ביחס לשנה הקודמת. מגמת התפתחות החמצן בשכבת ההיפולימניון הייתה דומה למגמה הרב שנתי.
<b>חנקן</b>	ערכי חנקן כללי וניטראט באפילימניון היו גבוהים השנה מערכי הממוצע הרב שנתי ומייצגים שטפים גבוהים ומוקדמים יחסית מאגן ההיקוות. עליה מוקדמת של חנקן כללי ואמוניום בהיפולימניון מייצגת את השיכוב המוקדם השנה ותחילת תהליכי פירוק מסיבי של חומר אורגני, כפי שמתבטא גם בפרמטרים אחרים.
<b>קיבוע חנקן</b>	קיבוע החנקן ב- 2020 התפרס על פני עונה קצרה והיה נמוך מהרגיל. השיא בקצבי הקיבוע נמדד בסוף חודש אוקטובר, יחד עם שיא במספר ההטרוציסטים של הכחולית אפניזומנון. בסך הכל קובעו באגם כ- 32 טון חנקן אטמוספרי במהלך פריחת הכחוליות הקייציות.
<b>ייצור שניוני חיידקי</b>	בשנת 2020 נמדדה פעילות גבוהה של חיידקים הטרוטרופים באזור הפוטי לאורך רוב חודשי השנה. ערכי שיא שנתיים נרשמו בחודש מאי בעומק האגם ומבטאים תהליכי פירוק של פריחת הדינופלגלטים שהתרחשה באגם בחודשים שקדמו לכך.
<b>מאזני פחמן, חנקן וזרחן</b>	עבור הפחמן, ערכי היצרנות הראשונית והנשימה הקהילתית ירדו מעט אך היחס בין שני הפרמטרים נשאר דומה לשנה הקודמת. שטפי פחמן חנקן וזרחן לאגם ב- 2020 דומים לשנה הקודמת. השנה הייתה עליה משמעותית בערכי קבורה של חנקן לסדימנט בקרקעית האגם, אך ערכי הקבורה של זרחן ופחמן נותרו דומים לשנה הקודמת.
<b>פיטופלנקטון</b>	שנת 2020 הייתה שנה ראשונה עם פריחת פרידיניום אחרי 7 שנים ללא פריחה, ואחת מתוך 8 שנים בלבד עם פריחת פרידיניום מתוך 25 השנים מאז 1996. הפריחה הגיעה לשיא באפריל ודעכה במאי, עוצמתה הייתה נמוכה יחסית לפריחות עבר. בסתיו 2020 התפתחה פריחה מאסיבית של אצה ירוקית, מקבוצת הדסמידים - סטאורסטרום. יחד איתה פרחו אצות ציאנובקטריה חוטיות.



משתנה	המצאים
<b>כחוליות רעילות ורעלנים</b>	בשנת 2020 נרשמה בכנת נוכחות מצומצמת של מיקרוציסטיס בחודשי החורף-אביב, לצד פריחת הפרדיניום הגבוהה. בתקופה זו לא נמצאו רעלני מיקרוציסטינים במים, רק בביומסה הכללית. בחודשי הקיץ-סתיו נצפו פריחות של מיני ציאנובקטריה שונים (אפניזומנון, צילינדרוספרמופסיס, ולינגביה). נראה כי מקור אוכלוסיית האפניזומנון הינו בצפון מערב האגם, ושיאה בספטמבר-אוקטובר 2020. ריכח הצילינדרוספרמופסין שנמדד במים הגיע לשיא של 1.9 מיקרוגרם לליטר בחודש נובמבר 2020.
<b>זואופלנקטון</b>	נרשמה ירידה של כ-30% בצפיפות הכוללת של הזואופלנקטון במהלך שנת 2020 ביחס לשנת 2019. הירידה בצפיפות חופפת לעליה בצפיפות הדגים הקטנים (הלבנון) באגם, כצפוי, כשנה וחצי לאחר עליה משמעותית של מפלס האגם. ערכי צפיפות נמוכים במיוחד נרשמו במהלך חודש ספטמבר שהיה מהחודשים החמים ביותר שתועדו בכנת מאז תחילת הניטור ואף החודש החם ביותר בשנת 2020.
<b>דגים</b>	צפיפויות הדגים מכל קבוצות הגודל בכל העונות היו בסדר גודל קרוב לתחומים הנמוכים שנצפו בשנים 2011-2019. בשנת 2020 הצפיפות הממוצעת של דגים הגדולים מ-60dB הייתה 2.6 פרטים / מ"ר. הדגים היו מרוכזים בדרך כלל בחלקים הצפוניים והצפון מערביים של האגם. בפברואר 2020 נצפו ריכחים גבוהים יחסית של דגים גם באזור הדרום מערבי. בקיץ (יוני-יולי), הריכחים הגבוהים ביותר של הדגים נצפו קרוב מאד לחופי האגם, בעוד שבחודשי החורף (פברואר ודצמבר) הדגים נצפו גם במיקומים עמוקים יותר.
<b>חלזונות</b>	שינויי המפלס הגדולים הובילו להתמעטות קיצונית של החלזונות הטבעיים לכנת ולהופעת והשתלטות של מין פולש. מאז 2012 ועד היום החילזון הפולש, <i>Thiara scabra</i> , מהווה מעל 95% מסך החלזונות באגם, בריכחים של אלפי עד עשרות אלפי פרטים למ"ר בעומקים 2.5 ו-5 מ'. ניתן למצוא מינים טבעיים כמעט רק במים הרדודים ובריכחים נמוכים ב-3 סדרי גודל. גם צדפות הכנת (3 מינים) סובלות משינויי המפלס הקיצוניים ונמצאות בסכנת הכחדה.
<b>חומרי הדברה</b>	הריכחים של חומרי ההדברה נמוכים ביותר באגם וכולם מתחת ל-1ppb ועל כן לא היוו מקור לדאגה. מספר דגימות הדגים שהובאו כחשד למקרי הרעלה היה נמוך ביותר השנה. יחד עם זאת, דוגמאות דגים שהגיעו באוגוסט מאזור חוף גולן הצביעו על הרעלה בעזרת אנדוסולפן.
<b>אינדיקטורים לזיהום</b>	ב-2020 נמדדו ריכחים גבוהים של חיידקים אינדיקטורים לצואה בתקופת החורף, בדומה לאלו שנמדדו ב-2019. עיקר הזיהום נמצא מול שפך הירדן ובצפון האגם, אולם גם בנקודות נוספות כגון כניסת הירמוך נרשמו חריגות. מקור הזיהום נבחן בשיטות מולקולריות ונמצא שבמקרים רבים מדובר במעלי גירה, אולם נמצאו גם זיהומים ממקור ביוב וגם זיהום מחזירים.
<b>קצבי שיקוע</b>	בשנת 2020 קצבי הסדימנטציה בתחנות A, F, ו-K היו דומים לערכים הממוצעים שנרשמו בתקופה 2019-1999. קצבי הסדימנטציה בתחנה M היו גבוהים באופן מובהק מאשר בשנים הקודמות ומערכי הממוצעים הרב שנתיים. קצבי השיקוע בתחנות A, F, K, ו-M היו 3.4, 8.9, 16.6 ו-6.8 גרם חומר יבש/מ"ר/יום, בהתאמה.
<b>הנביעה בברבוטים</b>	במהלך 2020 ריכח הכלוריד היה בטווח שבין 1,395 מג"ל ועד 1,634 מג"ל והשתנה בהתאם למגמה העונתית שבה ריכח הכלוריד עולה בתקופת החורף-אביב ויורד לאחר מכן. במהלך 2020, ריכח הניטרט השתנה בין 0.19 מג"ל בחודש ינואר ועד למקסימום של 0.63 מג"ל בחודש נובמבר. המגמה ארוכת הטווח של הניטרט היא של ירידה מריכחים יחסית גבוהים (>1 מג"ל חנקן) לריכחים שהם בסדר גודל של 0.3 מג"ל.



# תוכן עניינים

1	<b>1 הקדמה: שילוב פעולות הניטור והמחקר במעבדה לחקר הכנרת</b>
	<b>2 ניטור הכנרת (במימון רשות המים)</b>
3	2.1 מבוא
8	2.2 מדד הקיימות של הכנרת
13	2.3 מאזני חנקן, זרחן ופחמן בכנרת
16	2.4 מפלס האגם
18	2.5 מטאורולוגיה ופיזיקה של האגם לשנת 2020
25	2.6 ממצאי הניטור הכימי
32	2.7 קיבוע חנקן
35	2.8 זרחן באבק
38	2.9 פחמן אורגני ואנאורגני מומס וחלקיקי
41	2.10 קצבי סדימנטציה
44	2.11 ניטור מתכות כבדות
50	2.12 מדידת פרמטרים בצינור הברבוטים
54	2.13 איתור נביעות מלוחות לא מוכרות בכנרת
61	2.14 חיידקים אינדיקטורים לזיהום צואתי
65	2.15 ייצור ראשוני, נשימה וכלורופיל
71	2.16 ייצור שניוני חיידקי
73	2.17 פיטופלנקטון
77	2.18 רעלני כחוליות
81	2.19 מעקב אחר פריחת ציאנובקטריה בעלות פוטנציאל רעילות
90	2.20 ניטור ציליאטים בכנרת
95	2.21 ניטור זואופלנקטון
102	2.22 אוכלוסיות הדגים - סקרים הידרואקוסטיים
106	2.23 ניטור חומרי הדברה באגם הכנרת
108	2.24 חלזונות וצדפות בליטורל
118	2.26 התקנת פרופיילר אוטונומי ותחנה מטאורולוגית בתחנה G
122	2.27 איכות מי הכנרת באמצעות צילומי לוויין המשולבים במערכת SISCAL
127	2.28 מרכז מידע כנרת
130	2.29 אתר האינטרנט של מרכז מידע כנרת



**3 מחקרי כנרת**

132	3.1 בדיקת הזרמת מי התפלה לכנרת באמצעות מודל תלת מימדי
136	3.2 הערכת ההשפעה של הזרמת מי התפלה על מרכיבים ביולוגיים באגם
140	3.3 גנים פונקציונאליים ודינמיקת תהליכי חמצון-חזור בכמוקלינה הפלאגית של אגם כנרת
143	3.4 השפעת המליחות בכנרת על התבססות מיקרואורגניזמים שמקורם באבק אטמוספרי השוקע באגם
149	3.5 פיתוח אינדיקטורים מיקרוביאליים להערכת איכות מים ומצב טרופי של מערכות מים טבעיות – הכנרת כמודל
154	3.6 אקולוגיה מולקולרית של החיידק הפתוגני ליגיונלה באגם הכנרת
158	3.7 גישות חדשניות לבקרה ומניעת פריחות של ציאנובקטריה רעילות בגופי מים
162	3.8 חומרים נדיפים כחתימה כימית יעילה לשינויים באוכלוסיות ציאנובקטריה בכנרת
167	3.9 מערכת ICT לזיהוי תגובת עמידות אקולוגית במערכות מים מתוקים
172	3.10 שימוש בציד אקוסטי מתקדם לזיהוי דגים והערכת ביומסה למטרת ניהול ממשק דייג אופטימלי בכנרת
176	3.11 השפעת הצומח החופי על האקולוגיה והפיתוח התיירותי של הכנרת
182	3.12 יערות אשלים מוצפים – בית גידול חדש
189	3.13 עיצוב מדיניות המים למטרות של ניהול בר קיימא
193	3.14 השפעת בצורות מתמשכות ושינויי אקלים על האקולוגיה
198	3.15 ברקוד גנטי של ביוטת הכנרת
202	3.16 אוסף התרבויות הלאומי של אצות ישראל (INCCA) Israel National Culture Collection of Algae

**4 מחקרי אגן ההיקוות של הכנרת וגופי מים אחרים**

207	4.1 גישה אינטגרטיבית לבדיקת השפעת גופי מים בעמק החולה על הכנרת
212	4.2 שימוש במודלים אקולוגיים לבחינת השפעות קידוחי הגז על מארג המזון במרחב הכלכלי הישראלי

**5 נספחים**

217	5.1 סטודנטים לתארים מתקדמים בהנחיית חוקרי המעבדה לחקר הכנרת 2020
219	5.2 פרסומי המעבדה בספרות הבינלאומית המבוקרת ב-21/2020
224	5.3 דו"חות המעבדה 2020
226	5.4 ייעוץ והשתתפות בוועדות ממשלתיות לאומיות ומקצועיות בישראל ובחו"ל



# 1 הקדמה: שילוב פעולות הניטור והמחקר במעבדה לחקר הכנרת

יעדיה העיקריים של המעבדה לחקר הכנרת, חקר ימים ואגמים לישראל, הינם, בראש ובראשונה, פיתוח כלים מדעיים לתמיכה בקבלת החלטות בנושא תפעול הכנרת במערכת אספקת המים הארצית, שימור המערכת האקולוגית והמשך פיתוח מרכז הידע הלימנולוגי, מהמובילים בארץ ובעולם. צוות המעבדה פועל להשגת יעדים אלו ע"י שילוב של תכנית ניטור מקיפה של האגם ופעילות מחקרית מדעית.

המעבדה לחקר הכנרת פועלת להבנת מכלול התהליכים הפיסיקליים, הכימיים והביולוגיים המשפיעים על מצב המערכת האקולוגית ועל איכות המים בכנרת. המשתנים המשפיעים באופן ישיר על מצב המערכת האקולוגית באגם הם ריכוז והרכב החומרים המזינים באגם, החומר האורגני המומס במים, כמות וסוגי האורגניזמים, והקשרים ביניהם, כפי שהם מתבטאים במחזורי הפחמן, הזרחן והחנקן באגם. באיור 1 מחזור הפחמן בכנרת מוצג באופן סכמתי. האיור מבטא את הגורמים המאלצים המשפיעים באופן ישיר על מרכיבים של המערכת האקולוגית הקיימת באגם. לדוגמה, נוטריינטים וגורמי גידול או עיכוב שנכנסים מאגן ההיקוות משפיעים על התפתחות האצות והחיידקים. כמון כן, מוצגים המרכיבים העיקריים של המערכת האביוטית: נוטריינטים (בסכמה זו מיוצג/מסומן רק פחמן אנאורגני מומס), חומר אורגני מומס, חומר אנאורגני חלקיקי, ורכיבי המערכת הביוטית: אצות, חיידקים, זואופלנקטון (ודגים שאינם מוצגים).

התהליכים הקושרים בין המרכיבים האלו מסומנים בחיצים.

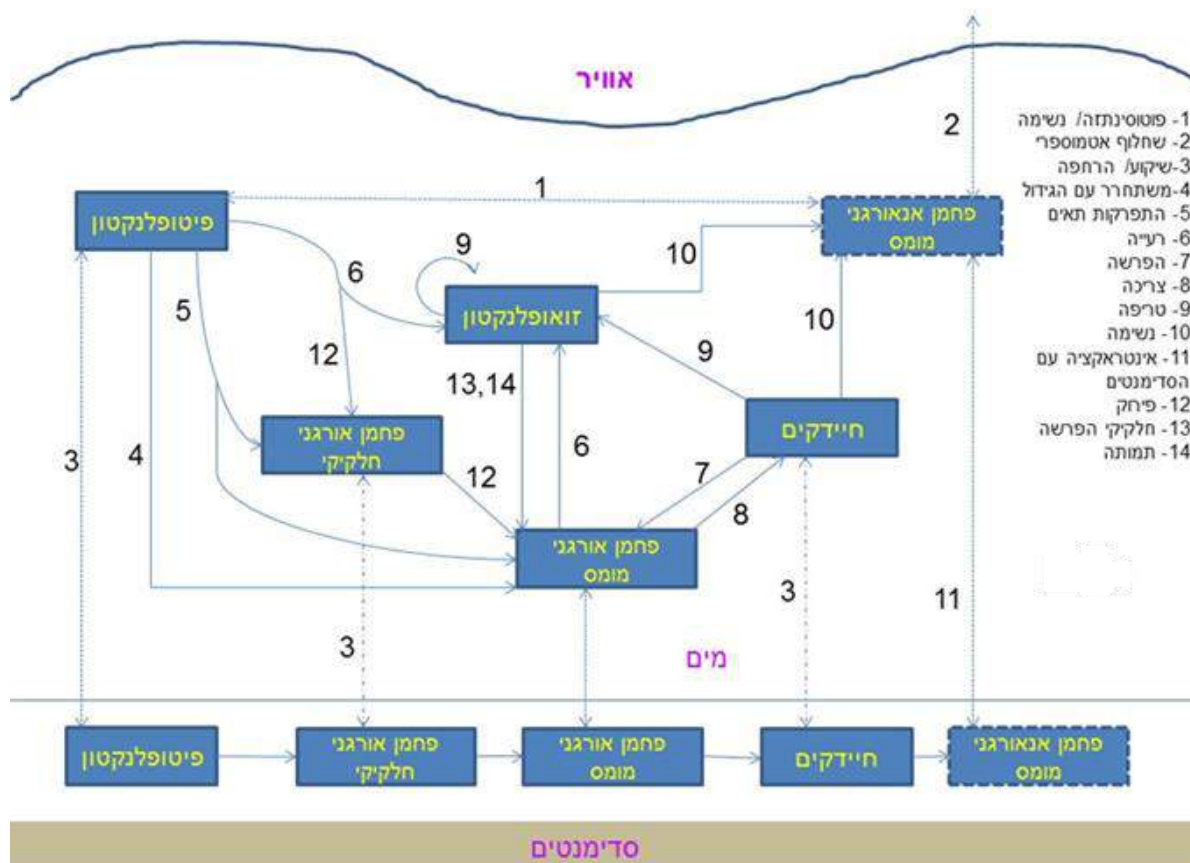
עבודות הניטור והמחקרים המתבצעים במעבדה לחקר הכנרת מיועדים בין השאר גם לשפר את המודלים הכמותיים ולהבהיר מה הם החלקים הקריטיים במערך מורכב זה. בעזרת המודלים ניתן להגיע להבנה טובה יותר של מידת ההשפעה של הגורמים השונים על רמת האיטרופיקציה, על איכות המים ועל מצב המערכת האקולוגית.

למרות מגבלות הקורונה והתקופה המתגרת במהלך שנת 2020, חברי צוות המעבדה לחקר הכנרת היו מעורבים בפעילות מחקרית, מתן חוות דעת למקבלי ההחלטות וגופים ממשלתיים שונים וכן בחינוך. ייעוץ מקצועי לממשלה ניתן ע"י השתתפות של נציגים בוועדות ממשלתיות, השתתפות בדיונים של פורומים ממשלתיים שונים והגשת חוות דעת מקצועיות בע"פ ובכתב. בשנה החולפת חוקרי המעבדה היו שותפים ביותר מ-10 פורומים ממשלתיים ומקצועיים, ישראליים ובינלאומיים. בנוסף, החוקרים היו פעילים כעורכים ב-13 כתבי עת מקצועיים בינלאומיים, פרסמו 30 מאמרים בכתבי עת מדעיים, הגישו 19 דוחות לגופים מממנים ולגופים ממשלתיים שונים. בנוסף לכל הפעילויות הללו, החוקרים היו מעורבים בהנחיית סטודנטים החל מפרויקטים של סטודנטים לתואר ראשון ועד להנחיית פוסט-דוקטורנטים. חוקרי המעבדה לחקר הכנרת הנחו במהלך שנת 2020 סה"כ 18 סטודנטים לתארים מתקדמים (מסטר, דוקטורט ופוסט-דוקטורט) ממגוון אוניברסיטאות בארץ ובעולם.

המעבדה לחקר הכנרת מפרסמת כבר שנים רבות את הדוח השנתי הכולל סקירה של הפעילות המחקרית והניטורית של צוות המעבדה. הפעילות המחקרית מתבססת על מימון המגיע מקרנות מימון שונות על בסיס הצעות המחקר המוגשות אליהם ובשנה החולפת חוקרי המעבדה היו פעילים ב-18 מחקרים ובמימון בהיקף של כ-2,000,000 ₪. הפעילות הניטורית ממומנת בעיקרה ע"י רשות המים ומשרד האנרגיה וכוללת את תכנית הניטור השוטף של הכנרת, על כל מרכיביה.



בנוסף לשנה המתגרת בעקבות מגפת הקורונה, שנת 2020 הייתה שנה חריגה מבחינת המעבדה לחקר הכנרת עקב יציאתם לגמלאות של חמישה עובדים וותיקים ביניהם עזרי מחקר, עובדי אחזקה וחוקרים. במהלך השנה קלטנו במקומם עובדים חדשים אשר מסייעים בפיתוח והרחבת היכולות המדעיות של המעבדה. ברצוני להודות בהזדמנות זאת לאיילה לובל-ילס, מזכירת המעבדה, אשר סייעה רבות בעריכת הדוח.



**איור 1:** תיאור סכימתי של מחזור הפחמן בכנרת, על מרכיביו הביזויים והאביוטיים העיקריים והקשרים ביניהם.

## 2 ניטור הכנרת (במימון רשות המים)

### 2.1 מבוא



בתמונה: רפסודת דיגום אוטומטית ורציפה בתחנה G

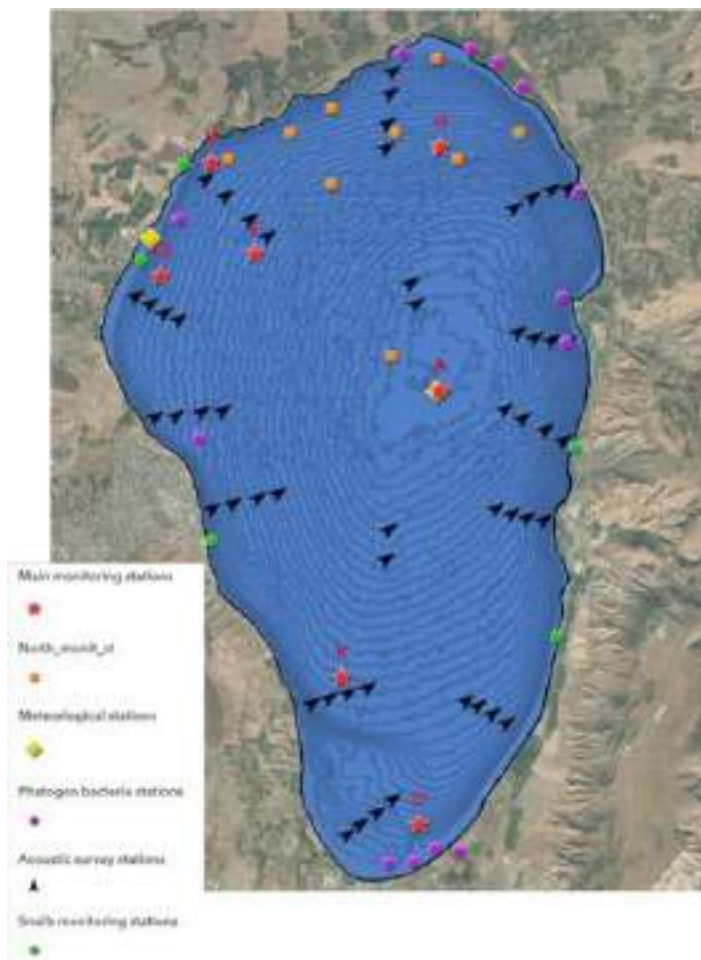
**במימון  
רשות  
המים**

#### צוות המעבדה לחקר הכנרת, חיא"ל

- נתוני הניטור שנאספו בכנרת במשך יותר מ- 50 שנה מהווים בסיס נתונים ומידע ייחודי באופיו, הן בשל רמת דיוק המדידות והן בשל רציפותן. בסיס הנתונים משמש לקבלת החלטות תפעוליות ומדיניות סביבתית.
- תכנית הניטור של הכנרת הורחבה במהלך שנת 2020 לכלול תחנה רציפה בצפון האגם, מול שפך הירדן.
- ניטור אדפטיבי של אוכלוסיות הכחוליות מופעל במסגרת ניטור "קשת צפונית". ניטור קשת צפונית מבוצע עם סימנים ראשוניים של התפתחות פריחת כחוליות עד דעיכת הפריחה ובמקביל למעברי לוויין מעל הכנרת.

תכנית ניטור הכנרת המבוצעת על ידי המעבדה לחקר הכנרת ממומנת על ידי רשות המים (הוצאות ישירות) ומשרד התשתיות (הוצאות עקיפות). מערך הניטור בכנרת פועל מעל חמישים שנה, ומטרתו לעקוב אחר איכות מי הכנרת, לעמוד על שינויים באיכות המים וללמוד על התהליכים המשפיעים על איכותם.

צוות המעבדה לחקר הכנרת אחראי לניטור האגם בעוד שיחידת אגן ההיקוות של חברת "מקורות" פועלת לכימות התרומות המגיעות אליו מאגן הניקוז והשירות ההידרולוגי אחראי על כימות כניסות המים לאגם. במתכונתה הנוכחית, תכנית הניטור השנתית, אשר התפתחה במהלך שנות הניטור, מבוססת על דיגום במספר תחנות בכנרת בעומקים שונים, ובדיקת מספר רב של משתנים פיסיקליים, כימיים וביולוגיים. ניתוח נכון שלהם מאפשר כימות השטפים של החומרים השונים, ביטוי של איכות מי האגם, קביעת מגמות של שינויים באיכות המים ובמערכת האקולוגית ואיתור מגמות של זיהום המערכת. יעדי תכנית הניטור קובעים במידה רבה את תדירות הדיגום, את מספר תחנות הדיגום ומיקומן בגוף המים ואת המשתנים הנבדקים. יתר על כן, אופי גוף המים, עומקו, משטר הזרמים שבו והטופוגרפיה של קרקעית האגם (בתימטריה) מכתיבים את מספר הדגימות שנאספות מעומק עמודת המים בכל תחנת דיגום ואת סוג הבדיקות שנערך בכל אחת מהדגימות. באיור 2 מוצג המיקום של תחנות הניטור העיקריות, על פי תכנית העבודה השנתית של המעבדה לחקר הכנרת. תחנה A, הנמצאת בנקודה העמוקה ביותר באגם, נדגמת בתדירות של אחת לשבוע ונבדקים בה מספר רב של משתנים כמפורט בטבלה 2. בנוסף, נדגמים בעזרת הפרופיילר מספר משתנים מכל מטר בעמודת המים 4-6 פעמים ביממה. בתחנות הדיגום הנוספות D, G, ו-K, הממוקמות לאורך ציר צפון-דרום, נבדק מספר משתנים מצומצם יותר. במהלך שנת 2020 נוספת הפסודת דיגום אוטומטית ורציפה בתחנה G אשר מורכבת מפרופיילר דומה למכשיר הקיים בתחנה A בתוספת של חיישנים המותאמים לאמידת ריכוז הכחוליות (ציאנובקטריה) במים. בתחנה H הקרובה לראש היניקה של המוביל הארצי נבדקים רק חלק מהמשתנים. ניתן לזהות במפה גם את תחנות הדיגום במה שמוכר כ"קשת הצפונית". הקשת הצפונית כוללת סדרת תחנות בצפון האגם המנטרות רק במהלך תקופות של פריחת כחוליות. עיקר הניטור נעשה בעזרת מכשיר ה-FluoroProbe ומטרת הניטור הינה הרחבת ההבנה, והמעקב אחר, ההתפתחות העונתית של פריחת הכחוליות. תחנות מטאורולוגיות ממוקמות במרכז האגם בתחנה A ועל החוף בגינוסר ותחנות דיגום אבק ממוקמות על גג המעבדה לחקר הכנרת ובחוף כינר. ישנם מספר משתנים הנמדדים ברזולוציה גבוהה כגון אלו הנמדדים ע"י הפרופיילרים בתחנות A ו-G, וטמפרטורה בעזרת שרשרות התרמיסטורים בתחנות A, F ו-D.



**איור 2:** מפה בתימטרית של הכנרת ותחנות הדיגום של תכנית ניטור הכנרת.

נתוני הניטור שנאספו בכנרת במשך יותר מ- 50 שנה מהווים בסיס נתונים ומידע ייחודי באופיו, הן בשל רמת דיוק המדידות והן בשל רציפותן, המשמש לקבלת החלטות תפעוליות ומדיניות סביבתית. יעדי הניטור ואופיו נשקלים אל מול יכולת הביצוע (תשתיות ותקציב) מחד, ומטרות וסוגיות שעולות לסדר היום, מאידך.

השמירה על תכנית ניטור לאורך השנים הינה חיונית לצורך קבלת תמונה מהימנה של השינויים המתרחשים במערכת האקולוגית ויחד עם זה עליה להיות דינמית במידה על מנת לתת מענה לבעיות ושינויים שמתרחשים באגם.

השינויים שחלו במערכת האקולוגית בשנים האחרונות, בעיקר התגברות תדירות, עוצמה ומשך פריחות הציאנובקטריה באגם מצריכים שיפור ביכולות הדיגום המרחביות. התקנת תחנת דיגום רציף נוסף בצפון האגם, האזור שבו מתפתחות לרוב הפריחות, היה צעד הכרחי. צעדים חיוניים נוספים כוללים הרחבה של אמצעי הדיגום המרחביים כגון ה- FluoroProbe שהחל לפעול במהלך שנת 2018. אך יש צורך בכלים נוספים כגון רחפן עם אמצעים אופטיים מתקדמים ועוד. המעבדה לחקר הכנרת תפעל לרכישת והטמעת כלים אלו ונוספים בשנים הקרובות.

תודתנו נתונה לחברת מקורות, לשירות ההידרולוגי ולשירות המטאורולוגי על העברת נתוני הניטור הנוספים הנאספים על ידם בכנרת ובאגן ההיקוות, וכן על שיתוף הפעולה לאורך השנים. צוות היגוי ניטור כנרת, בראשותם של פרופ' אורי שמיר מהטכניון ופיראס תלחמי מרשות המים, מלווה לאורך שנים את תכנית הניטור ותורם לשיפורה ולהכוונת דרכי פעולתה.

**טבלה 2:** ניטור הכנרת – משתנים, תחנות, ותדירות הדיגום. הבדיקות מתבצעות בעומקים שונים לאורך עמודת המים, מלבד פרמטרים מטאורולוגיים, פרמטרים ממערכות סינופטיות, ופרמטרים כמו חיידקים אינדיקטורים, עומק "סקי" וחומרי הדברה. (\* תחנות TZ,K - אחת לשבועיים - בים גדול).

סוג הבדיקה	תחנות דיגום	תדירות הדיגום
<b>מטאורולוגיה</b>		
טמפרטורת האוויר	גינוסר, A	כל 10 דקות
לחות יחסית	גינוסר, A	כל 10 דקות
טמפרטורת פני המים	A	כל 10 דקות
רוח (כיוון ומהירות)	גינוסר, A	כל 10 דקות
קרינה קצרת גל	גינוסר, A	כל 10 דקות
קרינה ארוכת גל	גינוסר, A	כל 10 דקות
לחץ ברומטרי	A	כל 10 דקות
קרינת אור, PAR	גג המעבדה	רציף (ממוצע שעות)
<b>פיסיקה</b>		
פרופיל טמפרטורה במים	*A, D, G, H, K*, TZ	אחת לשבוע
טמפרטורה במים שרשראות תרמיסטורים	A, F, D	כל 10 דקות
עומק סקי	*A, D, G, H, K*, TZ	אחת לשבוע
פרופיל חדירות האור	A	אחת לשבועיים
קצבי סדימנטציה	A, F, K, M	אחת לשבוע עד שבועיים
<b>כימיה</b>		
אלקליניות	A, D, G, H, K, TZ	אחת לשבועיים
כלוריד	*A, D, G, H, K*, TZ	אחת לשבוע
מוליכות חשמלית	*A, D, G, H, K*, TZ	אחת לשבוע
סידן	A, D, G, H, K, TZ	אחת לשבועיים
סולפיד	A, D, H, K	אחת לשבועיים
חנקן (קילדל) מסיס	*A, D*, G, H*, K*, TZ	אחת לשבוע
חנקן (קילדל) כללי	*A, D, G, H, K*, TZ	אחת לשבוע
אמוניה	*A, D, G, H, K*, TZ	אחת לשבוע
ניטריט	*A, D, G, H, K*, TZ	אחת לשבוע
ניטרט	*A, D, G, H, K*, TZ	אחת לשבוע
חמצן	A	אחת לשבוע
pH	D, G, H, K, TZ	אחת לשבועיים
זרחן כללי מומס	*A, D, G, H, K*, TZ	אחת לשבוע
אורטופוספאט	A	אחת לשבוע
	G, D, H, TZ	אחת לשבועיים
זרחן כללי	*A, D, G, H, K*, TZ	אחת לשבוע
סיליקה	A	אחת לשבועיים
גופרה (סולפאט)	A, D, G, H, K, TZ	אחת לשבועיים
מוצקים מרחפים TSS	A, D, G, H	אחת לשבועיים
עכירות	*A, D, G, H, K*, TZ	אחת לשבוע
פחמן אורגני	A	אחת לשבועיים
חמרי הדברה	A, D, G, H, K, גשר אריק	אחת לשבועיים
רעלני כחוליות	A	אחת לחודש
זרחן באבק	מעבדה, כינר	אחת לשבוע
<b>ביולוגיה</b>		
פיטופלנקטון	A	אחת לשבועיים
כלורופיל	A	אחת לשבועיים
יצרנות ראשונית	A	אחת לשבועיים
זואופלנקטון	A	אחת לשבועיים

תדירות הדיגום	תחנות דיגום	סוג הבדיקה
אחת לחודש	A	ריסניות (מיקרו-זואופלנקטון)
עונתי	10 חתכים באגם כולו	דגים
אחת לחודש	14 תחנות במים רדודים	חיידקים ממקור צואתי
אחת לחודש	A	יצרנות חיידקית
אחת לחודש	A	נשימה קהילתית
אחת לחודש בזמן פריחות	A	קיבוע חנקן
פעמיים בשנה	5 תחנות חופיות	חלזונות
אחת לשבוע	*A, D, G, H, K*, TZ	פלאורופרוב
		<b>ניטור סינופטי</b>
אחת ל-16 ימים	סינופטי באגם כולו	פיזור מרחבי של טמפ'[, כלורופיל ועכירות SISCAL -

## 2.2 מדד הקיימות של הכנרת

### KSI - 2020



**במימון  
רשות  
המים**

**גדעון גל, נעם שחר**

- למרות השיפור בשנה האחרונה במדד הקיימות, הכנרת ממשיכה להציג ערכים נמוכים מהערך הקביל.
- שני משתנים עיקריים היו בבסיס ערכי המדד הנמוכים בשנת 2020: הכחוליות והכלורופיל.

#### מטרת המחקר

איכות המים בכנרת מכומתת באמצעות מדד ייחודי שפותח במעבדה לחקר הכנרת. המדד המקורי פותח בסוף שנות ה-90, ובמהלך שנת 2014 עבר שינויים עפ"י בקשת רשות המים. בדוח השנתי של 2014 דווח על שינויים אלה. על מנת להבדיל בין המדדים, שונה שם המדד המעודכן, והוא נקרא עתה מדד הקיימות של הכנרת - Kinneret Sustainability Index (KSI).

השם החדש משקף היטב את משמעות המדד, דהיינו, הניסיון לשמר את המערכת האקולוגית בדומה לתקופת ייחוס שנחשבה תקופה יציבה ורצויה. מדד הקיימות מתבסס על ערכים מדודים של תשעה משתנים שונים, אשר מחושבים ביחס לתחום הערכים הנחשב כקביל. ערכים אלו נקבעו על בסיס טווח הערכים במהלך תקופת הייחוס (למידע נוסף ראה Gal and Zohary 2017<sup>1</sup>). בנוסף לערך מדרג המחושב עבור כל אחד מהמשתנים, מחושב ערך כולל של המדד. הערך הכולל מחושב על בסיס ממוצע משוכלל עם משקולות למשתנים עם הערכים הנמוכים ביותר. ככל שהערך נמוך יותר כך גובה המשקולת עולה. ערכי מדרג של 60 ומעלה נחשבים כערכים קבילים המצביעים על כך שהריכזים של המשתנים השונים קרובים לערכים הרצויים. ערכי מדד הנעים בין 40-59 נחשבים ללא קבילים ומצביעים על כך שחלק מהמשתנים שונים באופן מהותי מהמצב הרצוי. ערכי מדד נמוכים מ-40 מצביעים על מערכת אקולוגית רחוקה מאוד ממערכת אקולוגית של הכנרת ששואפים לשמר. במצב כזה, קריטי להפעיל צעדי ממשק שיסייעו בהחזרת המערכת האקולוגית למצב הרצוי.

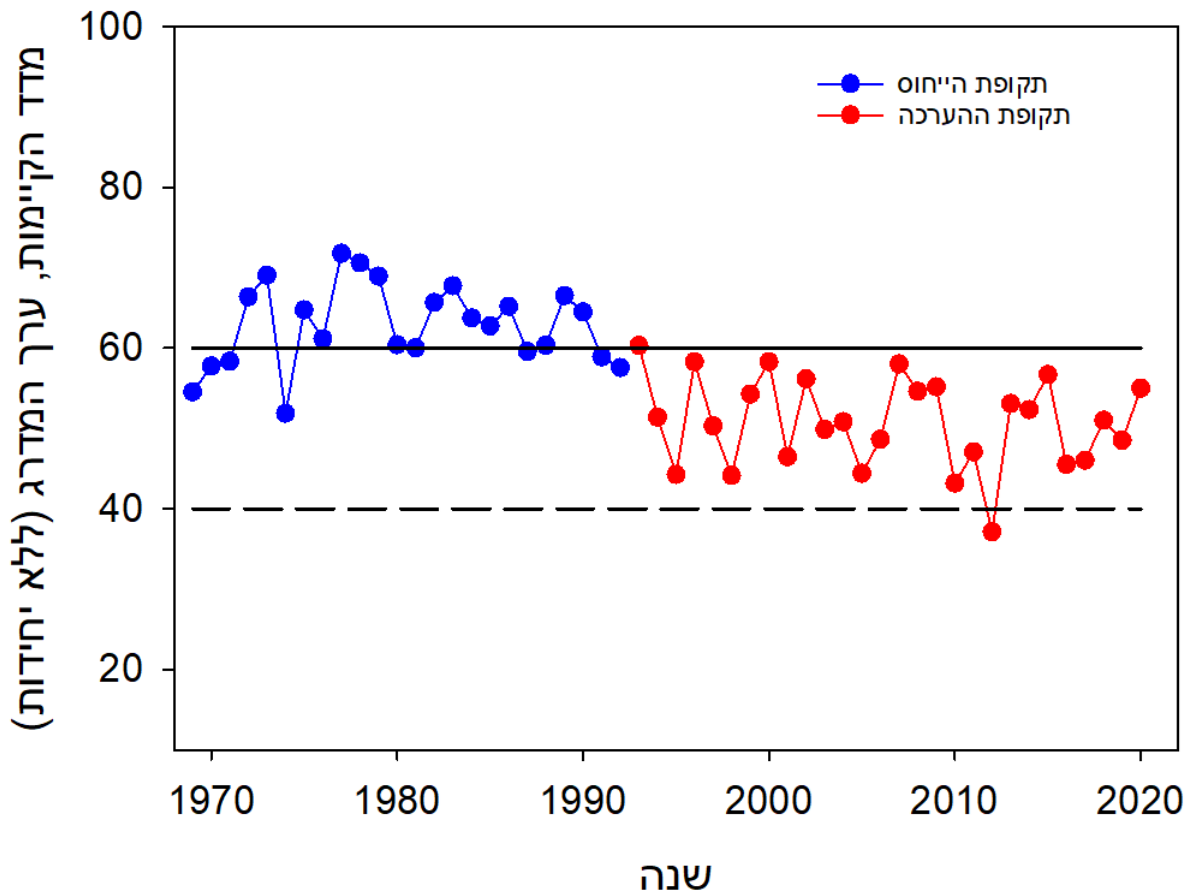
### **תוצאות ודין**

ערך המדד הכולל לשנת 2020 היה 55. ערך זה הינו ערך גבוה מהערכים שנרשמו בשנים האחרונות. למעשה בין השנים 2016-2019 ערכי המדד הכולל לא השתנו באופן מהותי משנה לשנה ונעו בין 45-50 שהם ערכים נמוכים ביותר (איור 3). בנוסף, למעשה בעשור האחרון, רק בשנת 2015 נרשם ערך גבוה יותר (56.7) מהערך בשנת 2020. מאז שנת 2000 נרשמו בסה"כ 4 שנים שבהם ערכי המדד היו גבוהים יותר מהערך שנמצא בשנת 2020 וערכים אלו נעו בין 56-58. המשמעות היא שבשני העשורים האחרונים המערכת האקולוגית של הכנרת נמצאת מרחק רב מהמערכת האקולוגית שאנו שואפים לשמר לאורך זמן. בבחינה מעמיקה יותר של ערכי המדד לשנת 2020 יש לשים לב להבדלים בין שתי התקופות החצי-שנתיות ולגורמים שהשפיעו לרעה על ערכי המדד (איור 4). בתקופה ינואר-יוני הערך הכולל היה טוב (63) ובסך הכל הפעם השלישית מאז אמצע שנות ה-90 שתקופת החורף-אביב זוכה לערך מעל הסף הקביל (60). הערך בתקופה זו היה מעל 60 בעקבות שילוב של ערכים גבוהים במספר משתנים בהם אצת הפרידיניום שפרחה בעיקר בחודשים מרץ ואפריל. אולם, גם משתנים כגון עומק הסקי, הייצור הראשוני וריכוזי הכלורופיל זכו לערכים גבוהים. בעקבות היעדר פריחת כחוליות (מיקרוציסטיס) בחודשי החורף ערך המדד של הכחוליות היה גבוה ביחס לשנים קודמות. בחצי השני של השנה, ערך המדד הכולל היה נמוך והושפע מערכי מדד נמוכים של הכלורופיל. ערכי המדד של הכלורופיל בתקופת הקיץ-סתיו היו בערכי המינימום (10) בארבעה מתוך ששת החודשים ובעוד חודש נוסף, היו מתחת לערך 60. ערכים אלו נובעים מריכוזי כלורופיל גבוהים במיוחד. בניגוד לריכוזי הכלורופיל הגבוהים, ערכי הייצור הראשוני לא חרגו במרבית החודשים מהטווח הקביל המצביע על כך שלא מדובר בקצבים השונים מאוד מהקצבים שתועדו בתקופת הייחוס. למידע נוסף יש לראות את הפרק בדוח העוסק בכלורופיל וייצור ראשוני.

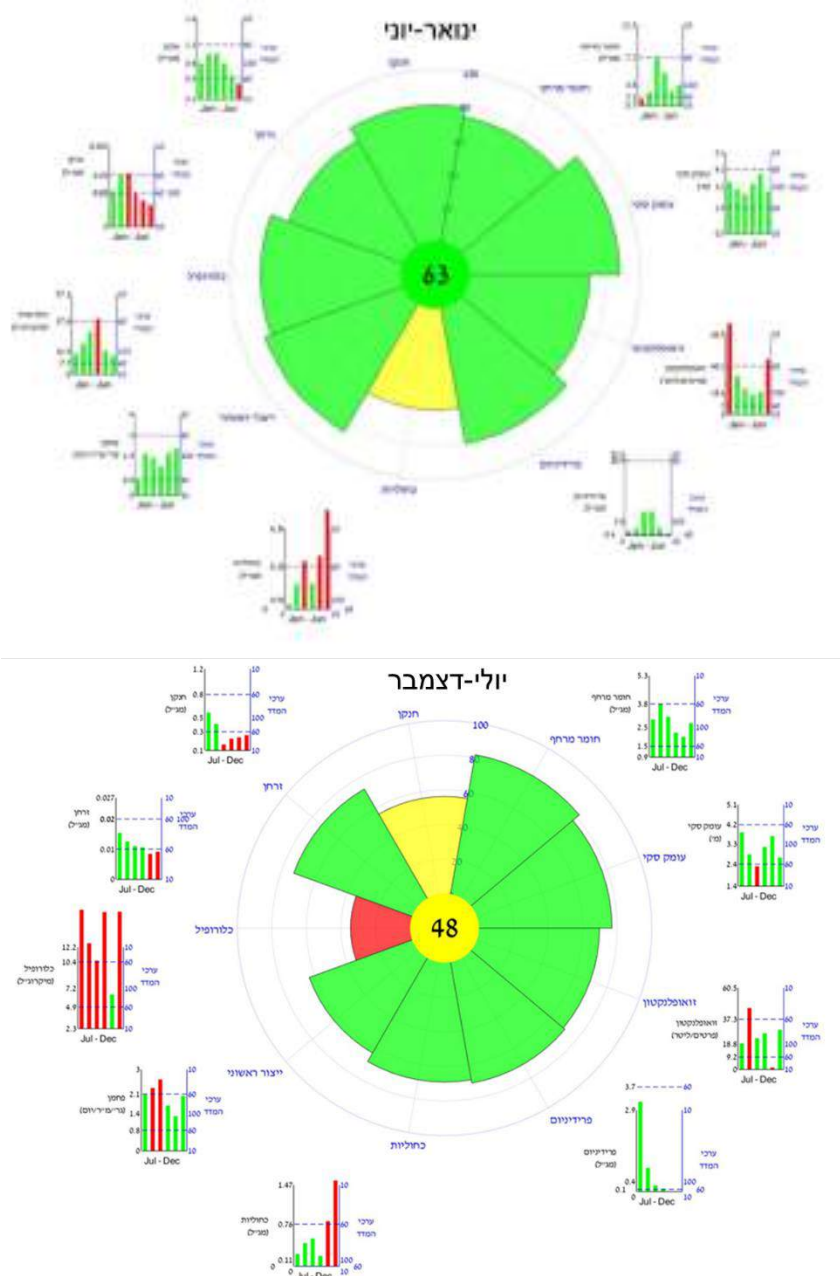
<sup>1</sup> Gal, G.; Zohary, T. Development and application of a sustainability index for a lake ecosystem. *Hydrobiologia* 2017, 800, 207-223, doi:10.1007/s10750-017-3269-1.







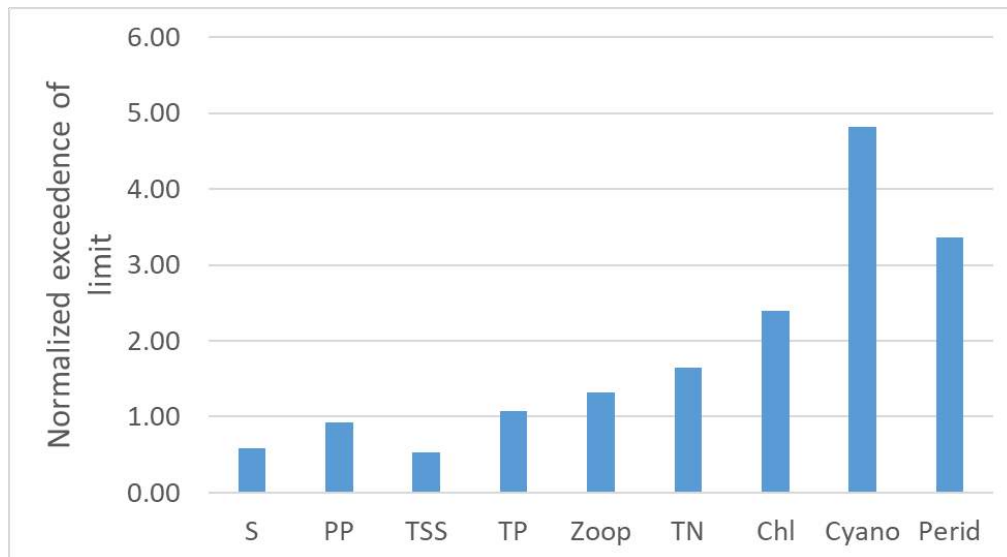
**איור 3:** תיאור גרפי של מדד הקיימות של הכנרת (KSI) עבור תקופת הייחוס (1969-1991 בכחול) ועבור התקופה 1992-2020 (באדום). הקו האופקי השחור מציין את התחום הקביל של הערכים כך שכל ציון הנופל מתחת לערך 60 נחשב לערך לא קביל ומצב לא רצוי המקשה על שימור המערכת האקולוגית. הקו המקווקו מציין ערך מדד של 40. ערכים מתחת לערך 40 מצביעים על מערכת אקולוגית רחוקה מאוד מהמערכת שרוצים לשמר והצורך ביישום בצעדי ממשק.



**איור 4:** מדד הקיימות של הכנרת (Kinneret Sustainability Index) לשנת 2020. ערכי המדד מחולקים לשתי תקופות של חצי שנה: ינואר-יוני ויולי-דצמבר. במרכז האיוורים ניתן לראות את הערך הכולל, כאשר ערכים מעל 60 נחשבים בתחום הקביל. צבעי הרקע הינם צבעי רמזור: ירוק עם ערכים של 60 או יותר, צהוב בין 40-60 ואדום מתחת ל-40. הערך הכולל מבוסס על חישוב ערכי 9 משתנים הנמצאים בהיקף, כאשר ערכו של כל משתנה מוצג הן מספרית, הן בצבעי הרמזור והן בגודל הגזרה. ככל שהגזרה גדולה יותר כך ערכו מתקרב לערך המקסימלי של 100. לצד כל משתנה מופיע גרף המציג את הערכים החודשיים של כל משתנה (ציר אנכי שמאלי) ואת ערכי המדד (ציר אנכי ימני). צבעי העמודות בגרפים הינם ירוק (אם בתחום הקביל) או אדום אם מחוץ לתחום זה. פרטים נוספים על המדד ניתן לקרוא בדוח השנתי של 2014.

מתוך בדיקה של התפלגות ערכי מדד חריגים ( $<60$ ) של כלל המשתנים בכל תקופות החצי שנתיות בין 1993-2020 עולה כי ישנם בעיקר שני משתנים שחורגים מהערכים הקבילים. ריכוזי הכחוליות והפרדיניום סוטים מהריכוז הצפוי בתדירות גבוהה. ואכן, אם מחשבים את היחס שבין מספר החודשים שבהם ערכי המדד של המשתנים היה נמוך מ-60 לבין מספר החריגות הצפוי על בסיס אופן חישוב המדרגים עולה כי הכחוליות והפרדיניום חורגים כמעט פי 5 ופי 3.5 יותר מהצפוי (איור 5), בהתאמה.

החריגות נובעות מריכחים גבוהים מהרצוי במקרה של הכחוליות וריכחים נמוכים מהרצוי במקרה של הפרידיניום. במבט ארוך טווח על מדד הקיימות של הכנרת ברור שהמערכת האקולוגית אינה במצב יציב או במצב הרצוי. חוסר היציבות במערכת האקולוגית, הבא לידי ביטוי במספר אינדיקטורים כגון המדד שמוצג כאן, מצביע על השינוי הגדול שחל במערכת האקולוגית מאז שנות ה-90. העובדה שבעשור האחרון ערכי המדד השנתיים היו בין 37-55 (למעט 2015 עם ערך של 57) מעידה על המצב הקשה של המערכת האקולוגית של הכנרת וההתרחקות מהמערכת האקולוגית שאותה אנו שואפים לקיים ולשמר לאורך זמן. חוסר היציבות מקשה מאוד על ניהול נכון שיאפשר שיפור במצב המערכת האקולוגית של האגם.



**איור 5:** החריגות של המשתנים השונים בתקופה 1993-2020 ביחס לערך המירבי הצפוי. ערך של 1 מבטא אחז החריגות החודשיות השווה ערך לאחז הצפוי על בסיס חישוב עקומות המדרג. ערכים מעל 1 מבטאים אחז חריגות גבוה מהמצופה, למשל אחז החריגות החודשיות של הכחוליות כמעט פי 5 מהמצופה.

## 2.3 מאזני חנקן, זרחן ופחמן בכנרת



**במימון  
רשות  
המים**

**ירון בארי-שליון, שירה ניניו, ורנר אקרט**

- עבור פחמן ערכי ה-GPP וה-CR ירדו מעט השנה אך היחס GPP/CR נשאר דומה לשנה הקודמת.
- שטפי הפחמן, החנקן והזרחן לאגם ב- 2020 היו דומים לשנה הקודמת.
- בשנת 2020 הייתה עליה משמעותית בערכי קבורה של חנקן לסדימנט בקרקעית האגם, אך ערכי הקבורה של הזרחן והפחמן נותרו דומים לשנה הקודמת.

### מטרת המחקר

הערכת מאזנים שנתיים של פחמן, זרחן וחנקן בכנרת.

### רקע

מאזני חנקן, זרחן ופחמן חושבו השנה כדי לבחון את התהליכים השונים המעורבים בשטפים של יסודות אלו פנימה והחוצה מהאגם, ולבדוק את רמת אי הודאות לגביהם. המאזנים מוצגים באיור 6 כאשר כל המספרים הינם בטונות לשנה. עבור רב השטפים, פנימה והחוצה, ישנה הערכה סבירה לגודל השטף הנובעת ממדידה ישירה של פרמטרים. לצורך הפשטת חישוב השטפים והאינוונטרים בחרנו להתייחס לחנקן כללי (TN) זרחן כללי (TP) בכל המערכת למרות שעבור שני פרמטרים אלו לא כל השטף זמין לפעילות הביולוגית.

**שיטות**

מאזני חנקן זרחן מחושבים מנתוני ריכוזים וספיקות מים בכניסות וביציאה (שאיבה) מהאגם, מהערכות לגבי שטפים נוספים כגון שטף החנקן אל האגם בגשם ובאבק, שטף החוצה של חנקן זרחן בדגים וכן מהערכה של דניטריפיקציה במאזן החנקן בהתבסס על ערכי מקסימום של ניטראט בהיפולמניון בתחילת השיכוב התרמי.

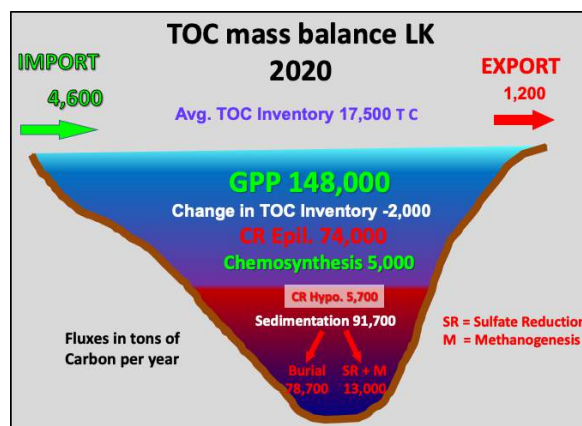
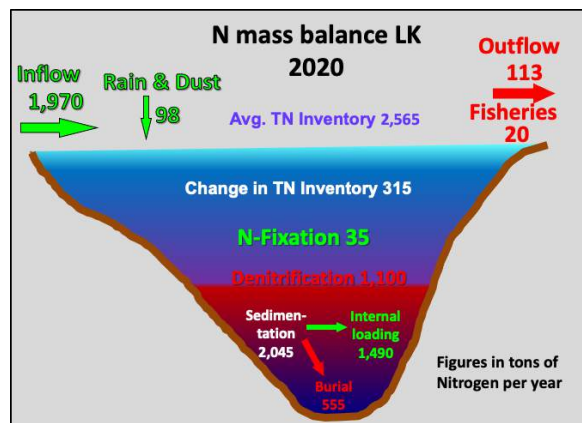
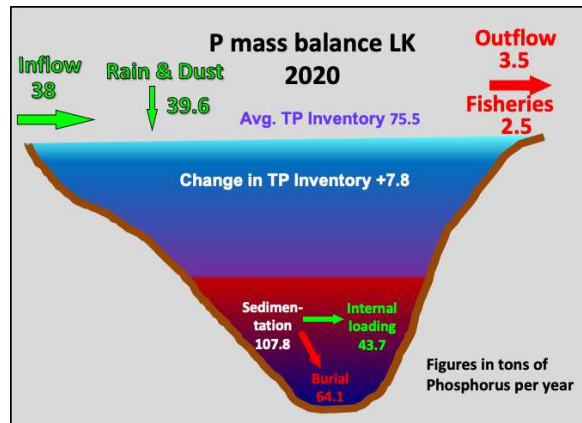
מאזן הפחמן האורגני (OC) בכנרת עבור 2020 חושב מנתונים דו-שבועיים של יצרנות ראשונית (PP) נשימה קהילתית (CR), ריכוזי פחמן אורגני מומס (DOC) וחלקיקי (POC), מהערכות קודמות לגבי כמוסינטזה, מכניסות ויציאות (תוך שימוש בריכוזי OC) ומהשינוי בזמן של מקבלי אלקטרוניים למינרליזציה של פחמן אורגני (חמצן מומס, ניטראט וסולפאט) בתחתית האגם. עבור שלושת המאזנים סך הערכים המחושבים או המוערכים מסוכם כך שנישאר פרמטר אחד: קבורה לסדימנט, קרי סדימנטציה נטו, שאינו ידוע והוא המשלים את המאזן.

**תוצאות ודיון**

במקרה של מאזן הזרחן הכללי, ערכי הכניסה והיציאה מוערכים בצורה טובה למעט קבורה לסדימנט (סדימנטציה נטו). המיחזור הפנימי מהסדימנט, 43.7 טון, מתבסס על ערכי מקסימום של זרחן כללי בהיפולמניון וערך של כ- 64.1 טון עבור הקבורה לסדימנט (סדימנטציה נטו) משלים את המאזן הכללי. על כן, ערכים אלו מובילים לערכי סדימנטציה של כ- 107.8 טון בשנה. בהשוואה לשנה הקודמת ערכי הסדימנטציה (שקיעת חלקיקים) גבוהים יותר בכ- 20 טון אך אלו מאוזנים בערכי מיחזור פנימי גבוהים יותר בערך באותו היקף. כך, התוצר הסופי של ערך הקבורה לסדימנט (סדימנטציה פחות הרחפה/ מיחזור פנימי). דומה מאד לזה של השנה הקודמת. מאזן החנקן מורכב יותר. כמות החנקן שעובר דניטריפיקציה בתהליכים חידקיים וחוזר לאטמוספירה מחושב ל- 1,100 טון בהתבסס על ערכי מקסימום של ניטראט בהיפולמניון בתחילת השיכוב התרמי. המיחזור הפנימי בכנרת, 1490 טון, מבוסס על ערכי מקסימום של אמוניה בהיפולמניון. הקבורה המוערכת בכ- 555 טון סוגרת את המאזן. ערכים אלו מובילים לערכי סדימנטציה בסך של כ- 2,045 טון בשנה. בהשוואה לשנה הקודמת ערך הסדימנטציה גבוה בכ- 700 טון ואילו המיחזור הפנימי גבוה במידה דומה: 600 טון, כך שהתוצר הסופי של ערך הקבורה לסדימנט גבוה מזה של 2019 בכ- 100 טון (כ- 20%). העלייה בערכי המיחזור הפנימי והסדימנטציה בשתי המערכות חנקן זרחן- מייצגת עליה מסוימת בפעילות הביולוגית באפילמניון בשנת 2020 אל מול זו של 2019. מגמה זו תואמת את מגמת העלייה הבולטת בכניסות הנוטריינטים לכנרת בשנים אלו ביחס לשנות הבצורת (-2014-2018) בעקבות עליה חדה במשקעים באגן בחורף 2018/2019 ובחורף 2019/2020. בניגוד למחזורי החנקן והזרחן באגם, מאזן הפחמן מושפע באופן ניכר מיצרנות אוטוגנית. הערכה של יצרנות ראשונית ברוטו (GPP) ב- 2020 הינה 148,000 טון פחמן. ביחס למספר זה, הכניסות והיציאות לאגם (4,600 ו- 1,200 טון פחמן אורגני, בהתאמה) הינן זניחות. בהשוואה למוצעים של השנים 2011-2001, עם יצרנות ראשונית של כ- 127,000 טון C, נראה שישנה עליית בקצבי היצרנות ראשונית בשנים האחרונות. אכן היצרנות הראשונית ב- 2020 הייתה דומה מאד לזו של 2019, ותהליכי קיבוע פחמן אחרים (כמוסינטזה ובקטריות פוטוטורפיות) הינם הרבה פחות חשובים. אקסטרפולציה של ערכים מהספרות לשנת 2020 נותנת סדר גודל של כ- 5,000 טון פחמן אורגני עבור תהליכים אלו. כמו בשנים קודמות עיקר המסה של ה-GPP נצרכת בתוך האזור הפוטי בנשימה קהילתית אם כי השנה היחס GPP/CR עלה מעט ביחס לשנה הקודמת.



בהיפולימיניון הידלדלות בחמצן מומס וניטראט תואמת מינרליזציה של 5,700 טון פחמן אורגני בהתבסס על ריכוזים במים בתחילת השיכוך התרמי באגם. הצטברות של סולפיד בהיפולימיניון כתוצאה של חיזור בקטריאלי של סולפאט (SR) ושל מתאן, כ- 70% מחיזור הסולפאט בכנרת) מעידה על פירוק של 13,000 טון פחמן אורגני בדומה לשנת 2019. מכיוון ששני התהליכים מתחילים באזור הסדימנט הם מייצגים חלק משטף שקיעת הפחמן האורגני החלקיקי. ההערכה הכוללת שלנו עבור שטף השקיעה – 91,700 טון פחמן. מאזן הפחמן שלנו נסגר ע"י ייחוס שארית של 78,700 טון פחמן אורגני לקבורה בסדימנט תוך התחשבות בירידה באינוונטר באגם של כ- 2,000 טון.



**איור 6:** מאזני חנקן, זרחן ופחמן בכנרת עבור שנת 2020. בירוק שטפים פנימה ובאדום שטפים החוצה מהאגם. השטפים הינם בטונות לשנה.

## 2.4 מפלס האגם



נחל צלמון 8.1.2020 צילום: גדעון גל

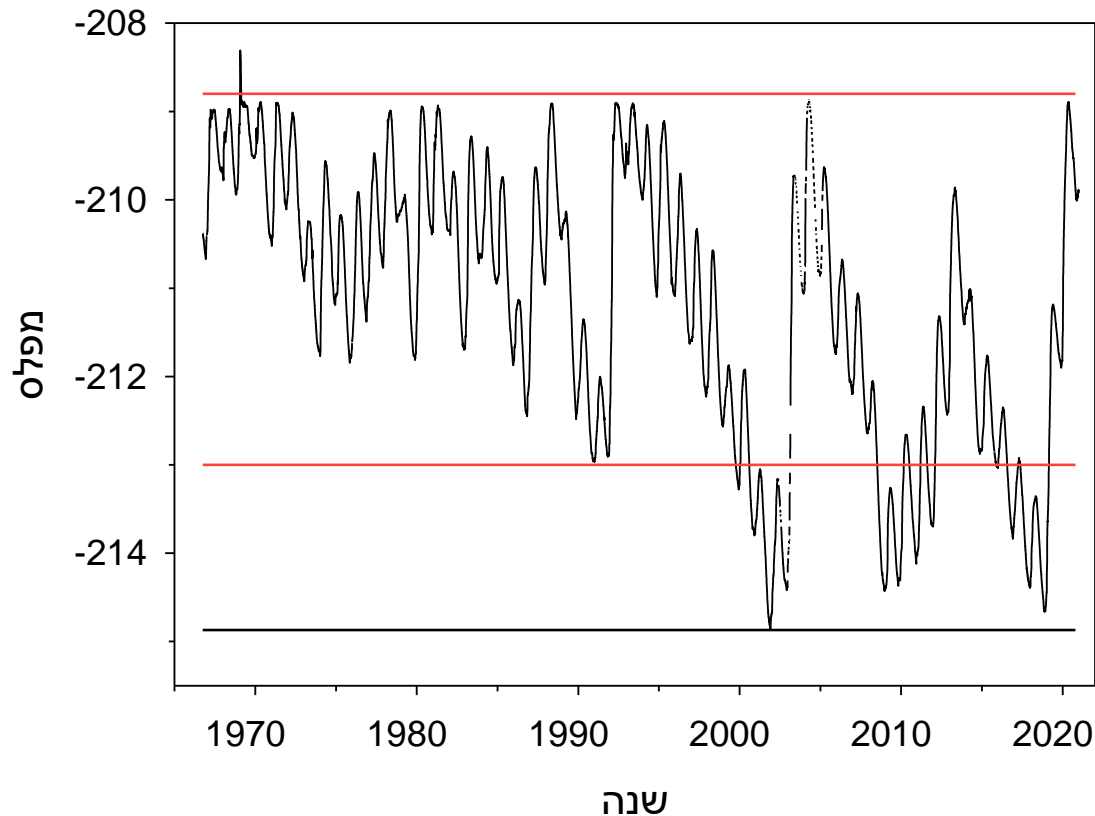
**במימון  
רשות  
המים**

**גדעון גל**

- **משרעת מפלס האגם במהלך שנת 2020 עמדה על 2.65 מ' בהשוואה ל- 3.28 מ' בשנת 2019 ו-1.31 מ' במהלך שנת 2018.**
- **בחורף 2019/20 המפלס עלה ב-3.46 מ'.**
- **הרום המקסימלי בשנת 2020 (25.12.2020) הגיע לכדי 9 ס"מ בלבד מהקו האדום העליון.**

מפלס המים בכנרת משפיע במגוון דרכים על המערכת האקולוגית של האגם ועל כן ישנה חשיבות רבה במעקב לאחר השינויים במפלס לאורך השנה ולאורך תקופה של שנים. רבים מהפרקים בדו"ח מתייחסים למצב המפלס ולכן הנתונים מוצגים כאן (באדיבות השירות ההידרולוגי). בשנים האחרונות אנו עדים לשינויים קיצוניים במפלס האגם. לאחר החורף הגשום של 2012/2013, שהסתיים עם מפלס 209.86- מ' בתחילת מאי 2013 (איור 7) חווינו את שנת הבצורות הראשונה מתוך רצף של חמש שנים. כך העדר הגשמים בחורף 2013/14 החזיר את הכנרת לכיוון הקו האדום התחתון. עליית המפלס החורפית ב-2014 הייתה זעומה, 40 ס"מ בלבד, ובאפריל המפלס הגיע לערך מרבי של 211.01- מ'. ארבע שנות בצורת נוספות שהסתיימו בחורף 2018/19 הביאו לירידה מתמשכת של מפלס האגם כמעט עד כדי השפל ההיסטורי שנרשם בנובמבר ודצמבר 2001.

ואכן, ב-18.11.2018 ושוב ב-3.12.2018 נרשם מפלס של -214.65, רק מעט מעל השפל של -214.87 שנרשם בסוף שנת 2001. ירידת המפלס במהלך חמש שנות הבצורת הייתה מתונה יותר מהירידה הצפויה בעקבות ההחלטה לצמצם למינימום את השאיבה למוביל הארצי. חורף 2018/19 וגם חורף 2019/20 היו מהחורפים הגשומים שנרשמו באגן ההיקוות של הכנרת ובעקבותיהם הייתה עליית מפלס משמעותית. המפלס הגבוה ביותר, -208.89, תועד ב-15.5.2020 ובכך נרשמה סה"כ עליית מפלס של 5.77 מ' בתקופה של 18 חודשים שמתוכם 2.65 מ' במהלך שנת 2020 (חורף 2019/20). העלייה היממתית המקסימלית בחורף 2019/20 הייתה גבוהה יותר (0.23 מ') מאשר העלייה שנרשמה בחורף 2018/19 (0.11 מ').



**איור 7:** מפלס הכנרת, מה-1.10.1966 ועד ה-31.12.2020. מוצגים "הקווים האדומים", העליון (-208.80 מ') והתחתון (-213 מ'), וכן הקו השחור (-214.87 מ'), המינימום של כל הזמנים שנרשם בכנרת בנוב' 2001. הנתונים באדיבות השירות ההידרולוגי, רשות המים.



# 2.5 מטאורולוגיה ופיזיקה של האגם לשנת 2020



במימון  
רשות  
המים

יורי לצ'ינסקי

- במהלך חודש ינואר 2020 כמות הגשם החודשית הייתה כפולה מהממוצע הרב שנתי.
- במהלך השנה הורחב הניטור המטאורולוגי-מרחבי של האגם, נוספה תחנה מטאורולוגית בצפון האגם.
- חודש ספטמבר התאפיין בטמפרטורות אויר גבוהות בכ-3 מעלות מהממוצע הרב שנתי.

## ניטור מטאורולוגי-פיזיקלי של האגם

באחריות המעבדה לחקר הכנרת נמצאות שלוש תחנות מטאורולוגיות המודדות כל 10 דקות את המשתנים המטאורולוגיים הבאים: גשם, טמפרטורת אויר, לחות יחסית, מהירות וכיוון רוח, קרינה קצרת גל (-305 nm) וקרינה ארוכת גל (2800 nm) (5-25  $\mu\text{m}$ ). בסיס הנתונים המטאורולוגי של הכנרת כולל כעת נתוני מדידה מטאורולוגית לפי הפירוט הבא:

- משנת 1996 תחנת טבחה (כעת ממוקמת על המזח בקיבוץ גינוסר).
- משנת 2003 על האקו-ראפט בתחנה A (מופעלת בשיתוף עם השמ"ט).
- משנת 2020 תחנה מטאורולוגית בצפון האגם (תחנה-G הקרובה לשפך של הירדן).

ניטור מרחבי של טמפרטורת עמודת המים - שלוש שרשראות הטרמיסטורים שממוקמות במרחב האגם (תחנות A, D, F) למפה של תחנות הניטור ראה:

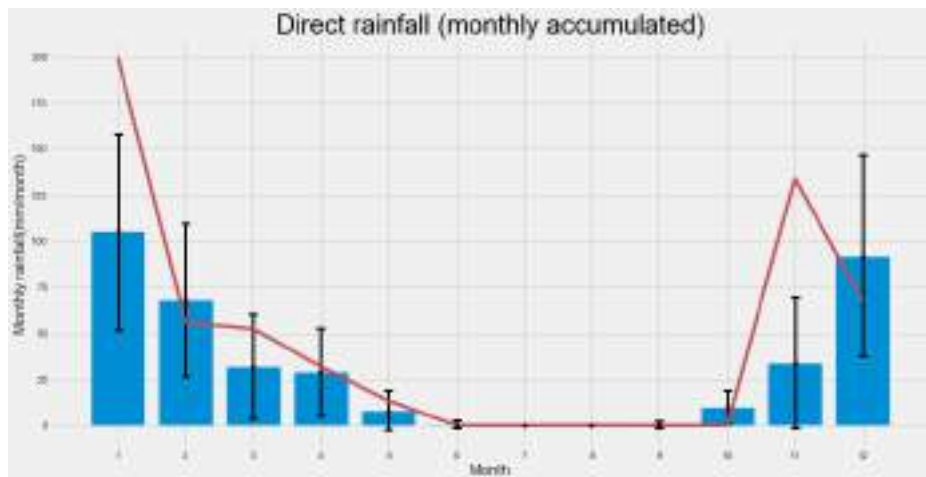
<https://iolr.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=08aa9a423cbb4a1aba63aa3e7524e18b>

### סיכום שנתי של מדידת פרמטרים מטאורולוגיים

סיכום המדידות המטאורולוגיות לשנת 2020 מיוצג ע"י ממוצע שעתי (ייצוג התנודה היומית) ע"פ חודשי השנה (ייצוג התנודה העונתית). הפרמטרים שסיכום המדידה השנתי שלהם יוצג הם: 1. טמפרטורת אוויר (רום 3 מטר מעל פני האגם); 2. טמפרטורת המים (כ-20 ס"מ עליונים); 3. קרינה קצרת גל; 4. קרינה ארוכת גל; 5. לחות יחסית; 6. מהירות הרוח. ממוצע המדידות לשנת 2020 השווה לסיכום הרב שנתי לשנים 2019-2010. ההשוואה נעשתה ע"י חישוב ההפרש בין ממוצע שעתי לחודש משנת 2020 לעומת ממוצע דומה עבור כל העשור הקודם, ושרטוט מפת הפרשים בין שני הממוצעים.

### גשם ישיר על הכנרת

בסיכום עונתי (שנה הידרולוגית) ל-2019-2020 מתקבלים כ-533.85 מ"מ על פני האגם (כ-80 מלמ"ק). כמות זו גדולה בהרבה מממוצע הגשמים הרב-שנתי באזור הכנרת (הממוצע הרב שנתי הוא 481.2 וסטיית תקן 125.9). חריג במיוחד היה חודש ינואר, אשר במהלכו כמות הגשם החודשית הייתה כפולה מהממוצע הרב שנתי (איור 8).

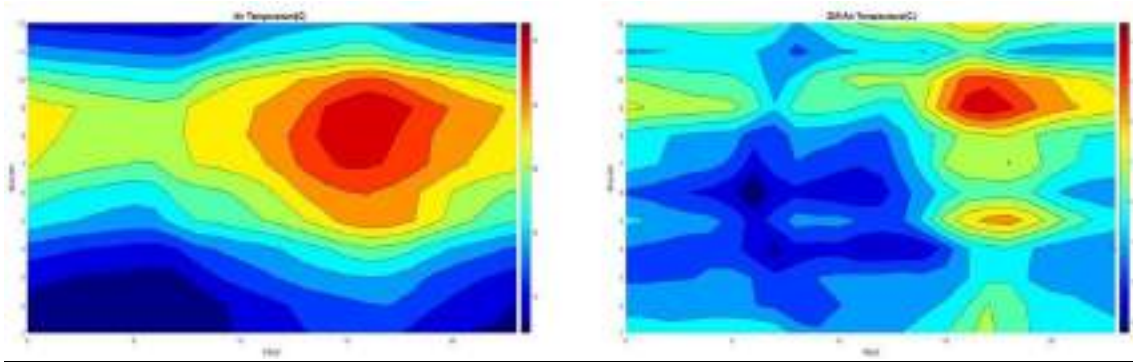


**איור 8:** גשם חודשי ממוצע כפי שנמדד בתחנות מסביב לכנרת בשנת 2020 (קו רציף), בהשוואה לגשם חודשי ממוצע על הכנרת (עמודות).

### טמפרטורת האוויר

חודשים ינואר-אפריל היו קרים יותר מהממוצע הרב שנתי. מאי היה חם מהממוצע, במהלך החודש שרר גל חום כבד וממושך (איור 9 חודש 5 שעות אחה"צ), שהיה חריג במשכו ובעוצמתו. טמפרטורת האוויר בחודשי הקיץ הייתה קרובה לממוצע הרב שנתי. ספטמבר היה חם מהממוצע במידה ניכרת כאשר בחלקו הראשון של החודש שרר גל חום ששבר שיאים הן בערכי הטמפרטורה שנמדדו בו והן במשכו (טמפרטורות בשעות הערב במהלך גל חום זה היו גבוהות בכ-4 מעלות צלסיוס ביחס לממוצע הרב שנתי), כתוצאה מגל חום של חודש זה גם טמפרטורת שכבת מים עליונה הייתה גבוהה מהממוצע.

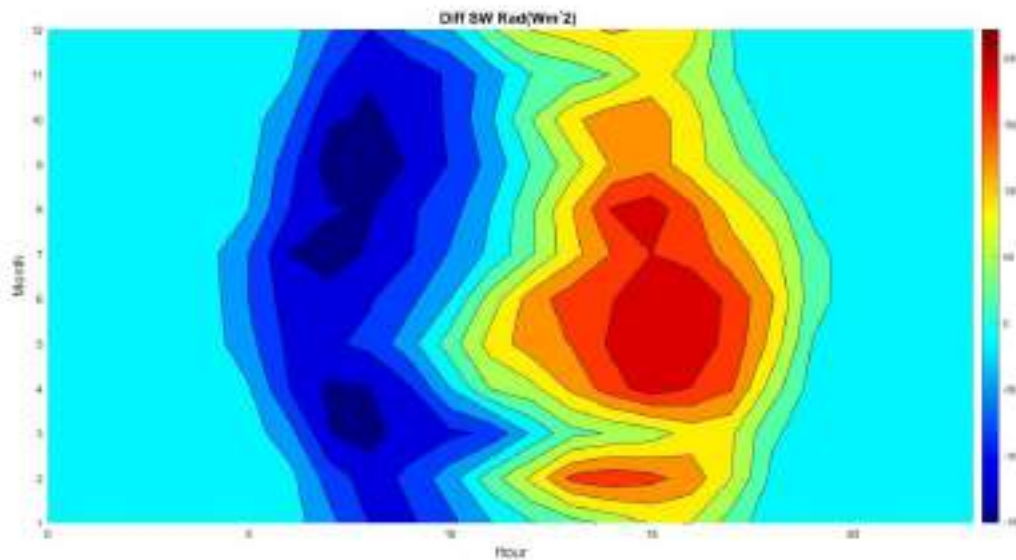
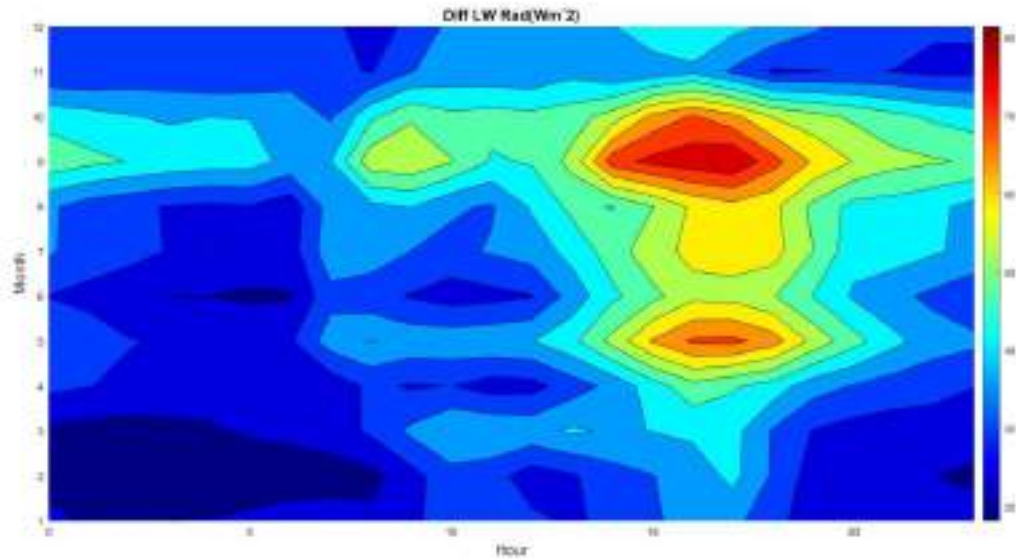
אוקטובר היה חם מהממוצע ונטול משקעים כמעט לחלוטין (איור 8). הטמפרטורות בנובמבר היו קרובות לממוצע ובחודש דצמבר היו גבוהות מהממוצע.



**איור 9:** סיכום שנתי של ממוצעים שעתיים וחדשיים של טמפרטורת האוויר ברום של 3 מטר מעל פני האגם (ימין), וההפרש בין ממוצע שעותי לחודש בשנת 2020 לעומת ממוצע דומה עבור השנים 2010-2019.

### קרינה קצרה וארוכת גל

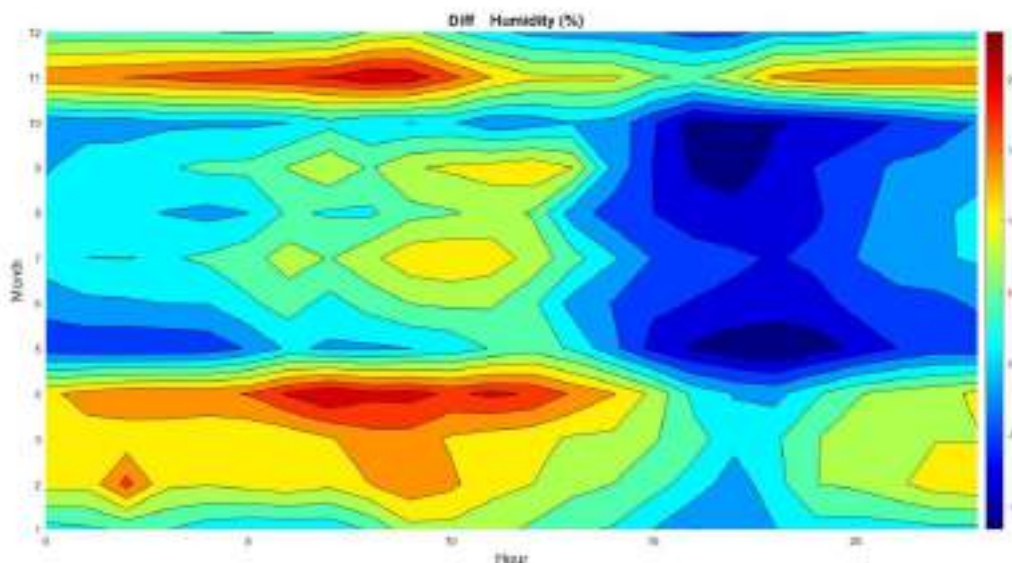
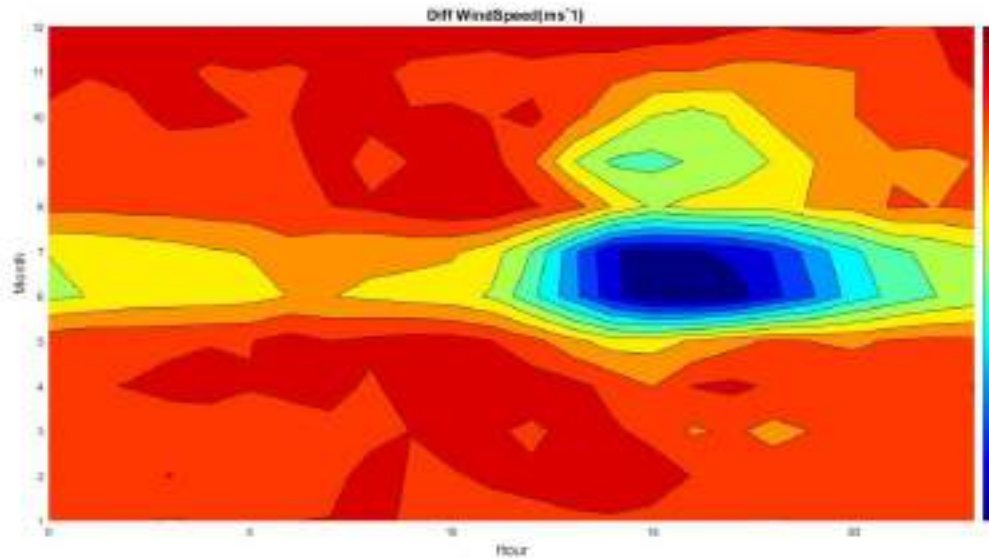
מדידות קרינה קצרת גל (nm 305-2800) מראות באופן קבוע ערך מקסימאלי יומי בשעות הצהריים 12:00-14:00 (שעון חורף). בסקלה העונתית הקרינה המקסימאלית חלה בחודשים מאי-ספטמבר (איור 10), כאשר חודשים מאי וספטמבר חריגים מהבחינה הזו (השפעה של גלי חום חריגים שהזכרו לעיל). ההפרש של מדידות הקרינה קצרת הגל מהקרינה הרב שנתית הממוצעת (איור 10) במהלך השנה מעיד על קרינה קצרת גל נמוכה יחסית ביחס לממוצע משעות הבוקר ועד הצהריים, וקרינה גבוהה יחסית לממוצע משעות הצהריים ועד השקיעה, במיוחד במהלך חודשים מאי וספטמבר, מה שתואם למדידות של טמפרטורת האוויר.



**איור 10:** ההפרש בין ממוצע שעותי לחודש משנת 2020 לעומת ממוצע דומה עבור השנים 2019-2010. למעלה: קרינה ארוכת גל ( $Wm^{-2}$ ), למטה: קרינה קצרת גל ( $Wm^{-2}$ ).

### לחות יחסית ומהירות רוח

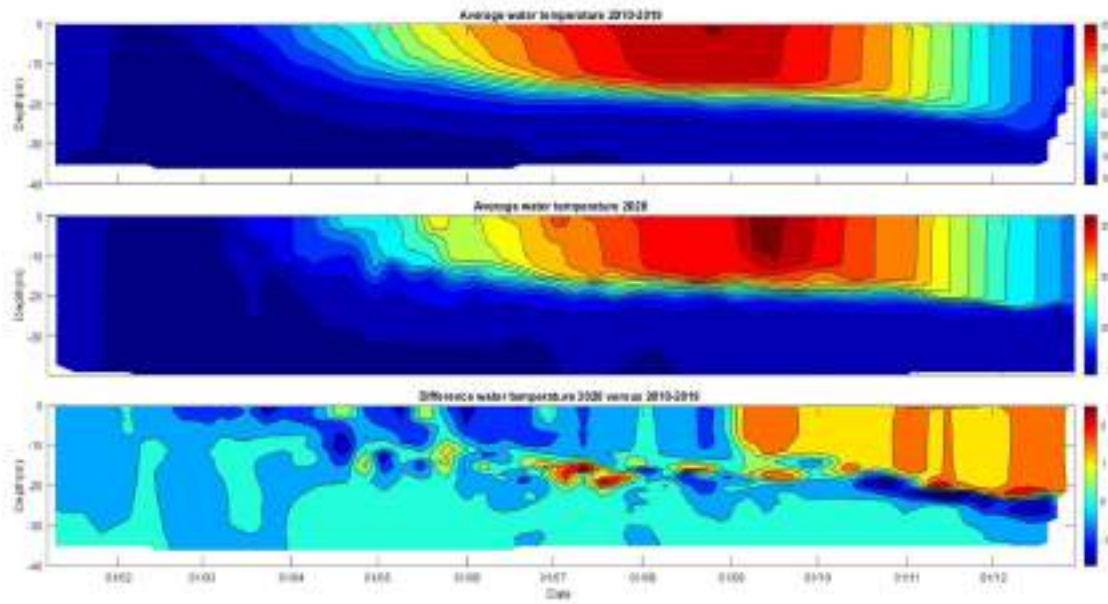
ההפרש בין הממוצע השנתי של ממוצעי מהירות הרוח והלחות היחסית (איור 11) מדגים את ההשפעה הרבה של גלי החום של חודשים מאי וספטמבר. קיים הפרש חיובי מסוים בין נתוני הרוח השנתיים (2020) לנתונים ההיסטוריים (2010-2019) במהלך רוב השנה ושעות היום למעט השעות והתקופות שבהם הרוח נושבת בעוצמה (בין 12:00-20:00 בחודשים מאי-אוגוסט). הלחות היחסית על פני המים (תחנה A) הייתה נמוכה (כ- 10%) בשנת 2020 בעיקר בשעות נשיבת הרוח.



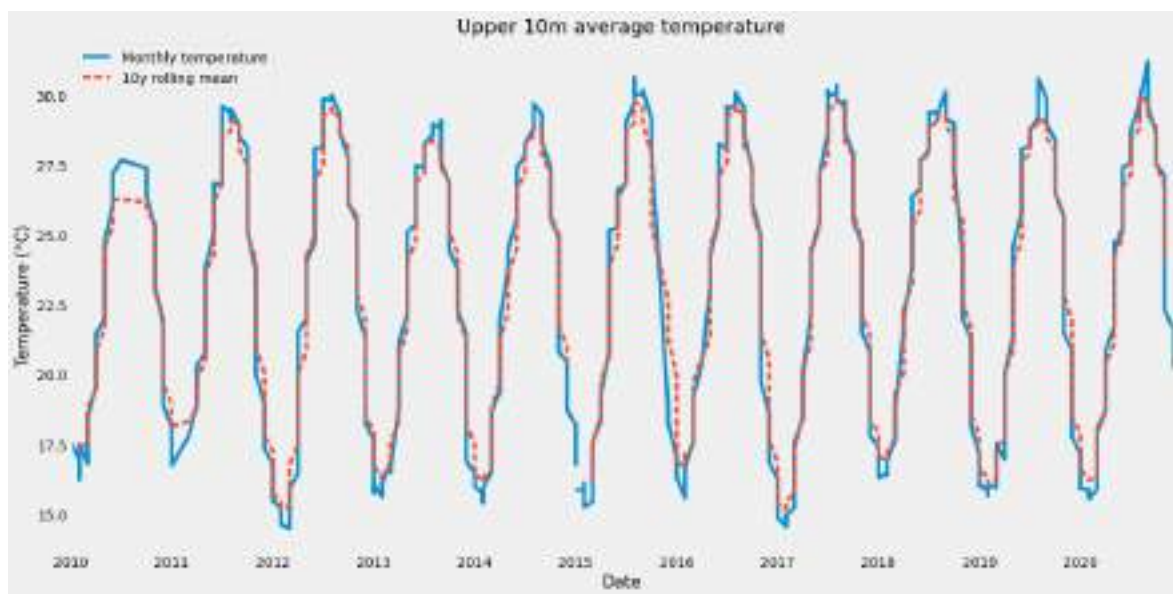
**איור 11:** ההפרש בין ממוצע שעתי לחדש משנת 2020 לעומת ממוצע דומה עבור השנים 2019-2010. מלמעלה: מהירות רוח ( $ms^{-1}$ ), מלמטה: לחות יחסית (%).

### סיכום שנתי של טמפרטורת האגם

פרופיל טמפרטורת גוף המים נבנה על בסיס מדידות שבועיות, באמצעות CTD במספר תחנות דיגום וברזולוציה אנכית של 0.1 מטר. שרב חריג בעוצמתו אשר פקד את ישראל במהלך חודש ספטמבר גרם להתחממות חריגה של השכבה העליונה של עמודת המים, טמפרטורת המים הגיעה למקסימום במהלך חודש ספטמבר (איורים 12,13,14). שנת 2020 התאפיינה בטמפרטורה גבוהה למדי באפילימניון מחדש ספטמבר עד דצמבר (איור 12), ובהשוואה לשנים קודמות ניכר כי: 1. טמפרטורת המים באפילימניון הייתה גבוהה בכ – 1.5 מעלות ביחס לממוצע ב – 10 השנים האחרונות; 2. השיכוב במהלך שנת 2020 היה רדוד יותר. בדיקת השיכוב התרמי במהלך 2020 העלתה כי הוא נמשך כ- 294 יום, בהשוואה לממוצע רב שנתי העומד על  $293 \pm 18$  יום בממוצע רב שנתי של 50 השנים האחרונות.



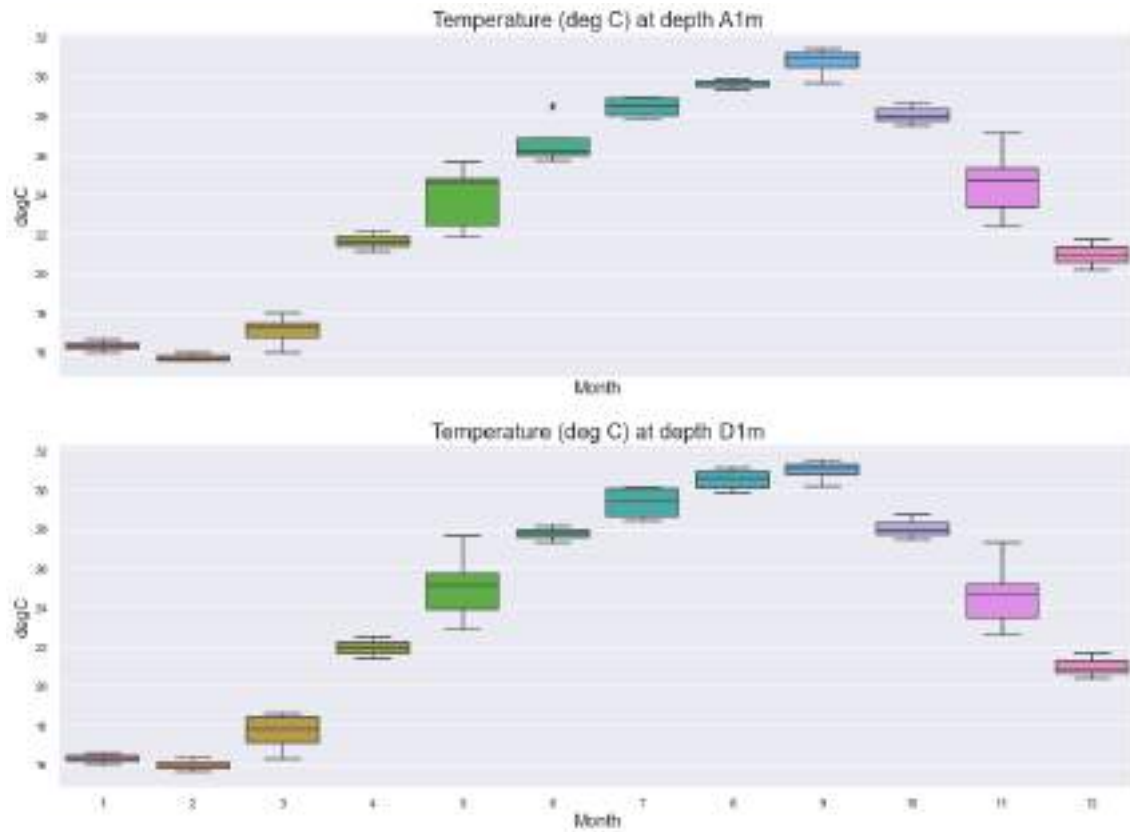
**איור 12:** פרופיל טמפרטורה של עמודת המים במרכז האגם, למעלה-ממוצע לשנים 2010-2019, אמצע-פרופיל טמפרטורה לשנת 2020 ולמטה הפרש טמפרטורות בין שנת 2020 ל-10 שנים קודמות.



**איור 13:** טמפרטורה חודשית ממוצעת של השכבה העליונה של עמודת המים (0-10 מטר).

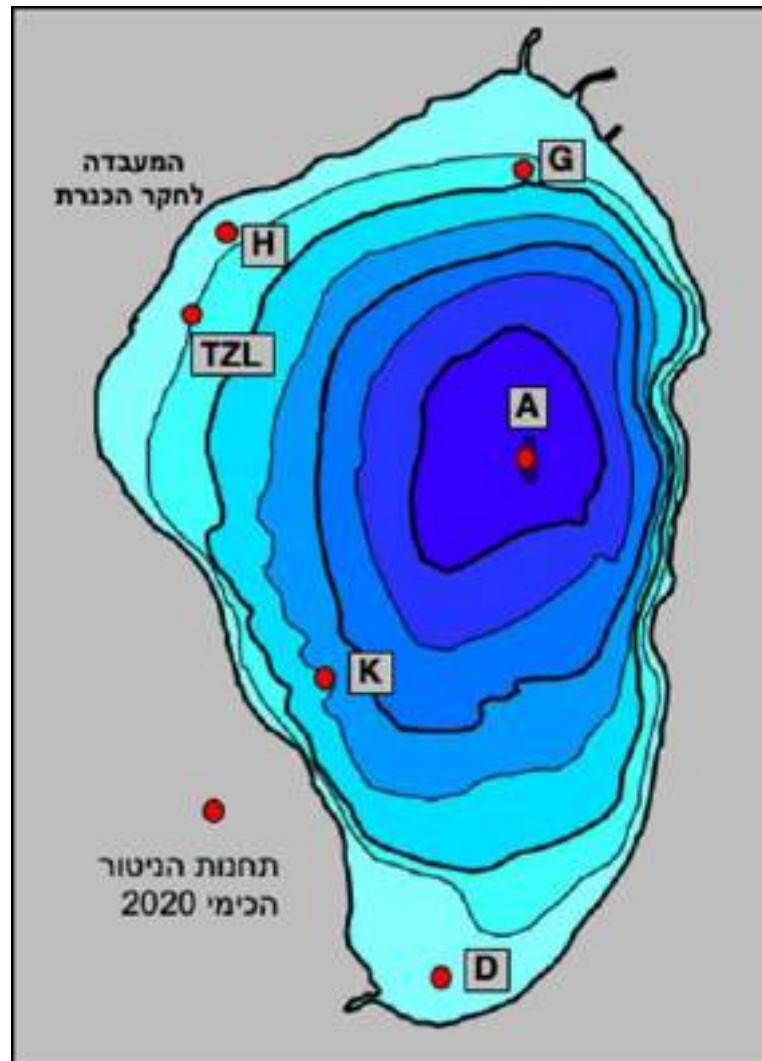
### ניטור מרחבי של טמפרטורת האגם

בכדי לשפר את הניתוח המרחבי של טמפרטורת האגם במהלך השנה הותקנו שתי שרשראות טרמיסטורים חדשות, בדרום האגם (תחנה D), ומול קיבוץ גינוסר (תחנה F). שרשראות אלו מודדות את פרופיל הטמפרטורה ברזולוציה של כל 10 דקות (איור 14).



**איור 14:** טמפרטורת מים בעומק 1 מטר, תחנה A- למעלה, תחנה D- למטה.

## 2.6 ממצאי הניטור הכימי



במימון  
רשות  
המים

ירון בארי-שלוין, אדית לייבוביץ, מיקי שליכטר

- פעילות יחסית מאוחרת במספר רב של פרמטרים-בשתי השכבות באביב.
- התייצבות לקראת סוף השנה לערכי הממוצע הרב שנתי.
- ירידה בולטת במליחות האגם.

### מטרות ורקע

מטרת חלק זה של ניטור הכנרת הינו מעקב שוטף אחר הגיאוכימיה במרחב האגם.



**שיטות**

דיגום לגיאוכימיה נעשה פעם בשבוע כאשר בשבוע אחד נדגמות 4 תחנות (A, D, G, H) ובעוקב 6 תחנות (A, D, G, H, K, TZL) (ראה גם איור כותרת לפרק זה). בכל תחנה דוגמים מספר עומקים. האנליזות הכימיות מתבצעות במעבדת מקורות עם השלמות לעיתים במעבדת הגיאוכימיה של המעבדה לחקר הכנרת, היא"ל. כמו בשנים קודמות מוצגים נתוני הניטור הכימי משכבת האפילימניון וההיפולימניון בתחנה A בשנת 2020 בהשוואה לממוצעים רב שנתיים (עשר שנים: 2009-2018) וכן לשנה הקודמת, 2019.

**תוצאות ודין**

להלן סיכום הממצאים לגבי שנת 2020 (ראה איור 15):

**כלוריד:**

לאחר מספר שנות בצורת באגן ההיקוות של הכנרת מ-2014, חורף 2018-2019 היה גשום במיוחד וחורף 2019-2020 היה דומה לו. ריכוז הכלוריד התאפיין החל מ-2014, שהייתה שנה שחונה במיוחד, בעלייה רב שנתית באפילימניון, ובכנרת בכלל. שנת 2020 מראה המשך מגמת שיפור/ירידה במליחות האגם כתוצאה מכניסות גדולות של מים מתוקים מהאגן וכן מעליה מסוימת בשאיבות. התבנית של ריכוז כלורידים באפילימניון 2020 מראה ירידה עד מאי ואז התחלת עליה מתונה עד סוף השנה. בהיפולימניון ישנה ירידה עד פברואר ואז מגמה יציבה עד סוף השנה. ריכוז הכלורידים הממוצע בכנרת בסוף 2020 עמד על 271 מ"ג/ליטר.

**אלקליניות וסידן:**

התפתחות ערכי האלקליניות והסידן בשכבת האפילימניון בחצי הראשון של 2020 ובעיקר הירידה החריפה בערכים אלו באביב מבטאת שקיעת קלציט בעקבות פעילות ביולוגית. פעילות זו צפויה כל שנה בתקופת האביב, בדרך כלל בין מרץ למאי. השנה, ערכי קלציום בשתי השכבות, ולאורך כל השנה נמוכים משמעותית מערכי השנה הקודמת ומהממוצע הרב שנתי. תופעה זו מייצגת תנאי פתיחה בתחילת השנה עם ריכוזים נמוכים, אשר נוצרו מדצמבר 2019 ועד פברואר 2020 כתוצאה של כניסות גדולות של מים מתוקים לאגם בתקופה זו תוך כדי ערבוב האגם. למרות שהירדן הינו ספק חשוב של קלציום לאגם, כניסות גדולות של מים מתוקים, לא רק מהירדן בתקופה זו, באות גם מול כניסות של מי נביעות מלוחות וכתוצאה מכך נוצר אפקט של מיהול בהקשר לקלציום באגם. משלב זה במרץ 2020 התנהגות קלציום בשתי השכבות באגם תואמת באופן כללי את הקצב וההיקף של מגמות ההתפתחות בשנים קודמות. באפילימניון ירדת ריכוזי קלציום ואלקליניות באביב הינה מעט יותר משמעותית בהשוואה לשנים קודמות (ירידה ב- 14 מ"ג/ל קלציום בתקופה זו בהשוואה לערכים בין 11-13 בין 2016 ל-2019), כנראה כתוצאה של פעילות ביולוגית נרחבת יותר השנה ומכאן גם שקיעה מסיבית יותר של קלציט. על כן, למרות שקצבי העלייה בריכוזים בקיץ דומים לאלו של שנים קודמות, ערכי קלציום ואלקליניות נותרים נמוכים לאורך כל חודשי המחצית השנייה של השנה בהשוואה לממוצע הרב שנתי. בהיפולימניון מגמת התפתחות ריכוזי הקלציום דומה לאפילימניון עם ערכים נמוכים מהממוצע הרב שנתי. זאת כנראה בעיקר תוצאה של הדומיננטיות של תנאי הפתיחה הנמוכים של תחילת השנה (ראו למעלה) זאת למרות ששיכוב מוקדם יחסית גורם להצטברות של חומרי פירוק, חומר אורגני והמסת קלציט כבר מאפריל (ראה גם בהמשך).

בניגוד לקלציום, אלקליניות, כמו מספר צורונים נוספים (ראה למשל אמוניום בהמשך) מראה עליה מוקדמת כתוצאה מההיפוך המוקדם ועל כן ריכוזים גבוהים מעל הממוצע הרב שנתי לאורך מספר חודשים.



אולם, בסוף השנה מגמות אלו מתמזגות עם המגמה הרב שנתית וריכחי אלקליניות באוקטובר - נובמבר 2020 בתוך טווח זה.

#### חמצן:

ערכי החמצן בשנת 2020 דומים לממוצע הרב שנתי באפילימניון לאורך רב השנה, אם כי שיא ריכחי החמצן בשכבה זו במרץ מוקדם יחסית לשנים קודמות בכחודש ומוקדם בכחודשיים מ-2019. גל העלייה בערכי החמצן, האופייני לאביב, מוסבר באופן רגיל בפעילות פוטוסינטטית גבוהה באביב. מגמת התפתחות החמצן בשכבת ההיפולמניון דומה באופן כללי למגמה הרב שנתית עם הגעה יחסית מוקדמת לערכי מינימום סביב מאי, אם כי מעט מוקדם יותר מאשר בשנת 2019 בגלל השכוב המוקדם יותר בשנת 2020 לעומת 2019.

ערך הגבה (pH):

ערכי ההגבה באפילימניון ב-2020 נמצאים רב הזמן בתחום הטווח הרב שנתי אך ביולי מעט מתחת לטווח זה. שיא ערך ההגבה במרץ, כמו בפרמטרים אחרים, מוקדם בכחודשיים מהשנה הקודמת ומייצג פעילות ביולוגית מוגברת מוקדמת יחסית השנה.

בהיפולימניון, המחצית השנייה של השנה מאופיינת בערכים נמוכים מאד – עד אוקטובר נובמבר, משם מתייצבים ערכי ההגבה בשכבה זו עם טווח הממוצע הרב שנתי. ערכי ההגבה הנמוכים באופן חריג של קיץ 2020 ביחס לממוצע הרב שנתי (עשור אחרון) אופייניים לכנרת גם בתקופות אחרות במחזוריות של מספר שנים. טווח ערכים נמוך בקיץ מלווה כנראה שינויים גדולים בטמפרטורת ההיפולימניון בשנים קודמות. השנים 2016 עד 2019 התאפיינו בתנודתיות גדולה בטמפרטורת ההיפולימניון (כמעלה ויותר בין חורפים). שינויי טמפרטורות אלו גרמו כנראה לתהליכים ארוכי טווח במערכת חימצון חוזר ומחזור סדימנטים וחומר אורגני בקרקעית אשר מאופיינים בירידת ערכי ההגבה לאורך מספר שנים עד לשנת 2020.

#### זרחן:

ערכי זרחן כללי, זרחן מומס חרחן מומס מגיב באפילימניון של שנת 2020 דומים ברב השנה לערכים של הממוצע הרב שנתי. גם בהיפולמניון ההתנהגות של זרחן כללי, מומס ומומס מגיב דומים לערכי הממוצע הרב שנתי, עם הצטברות מוקדמת המתחילה כבר במעבר בין אפריל למאי, כתוצאה של שיכוב מוקדם יחסית באגם. התוצר של הצטברות מוקדמת הינו, כמו גם בפרמטרים אחרים, ערכים בטווח הגבוה של הממוצע הרב שנתי או אף מעליו לאורך מספר חודשים בקיץ. יחד עם זאת, מגמת העלייה, כלומר קצב ההצטברות, נשאר דומה לשנים קודמות.

#### חנקן:

ערכי חנקן כללי וניטראט באפילימניון מדגימים בצורה הטובה ביותר את השטפים המוקדמים של נוטריינטים השנה מנחלי אגן ההיקוות, ומכאן גם התוצר של פעילות ביולוגית יחסית מוקדמת (ראו למשל חמצן וערך הגבה לעיל). ניטריט אינו מראה שיא מוקדם כמו בשנה הקודמת 2019, אלא שיא מרוח לאורך מספר חודשים הדועך למינימום באוגוסט.

בהיפולימניון המחצית הראשונה של השנה מאופיינת בשיא מוקדם של ניטראט הדועך עד למאי יוני. ניטריט אינו מראה שני שיאים כמו ב-2019 אלא שיא אחד.

במחצית השניה של השנה נראית בשכבה זו עליה מוקדמת של חנקן כללי ואמוניום המייצגת את השיכוב המוקדם השנה ותחילת תהליכי פירוק מסיבי של חומר אורגני, המתבטא גם במספר ערכים אחרים בהיפולמניון. כאמור לעיל, עבור זרחן ואלקליניות בשכבה זו בקיץ, העלייה המוקדמת מתבטאת בערכים

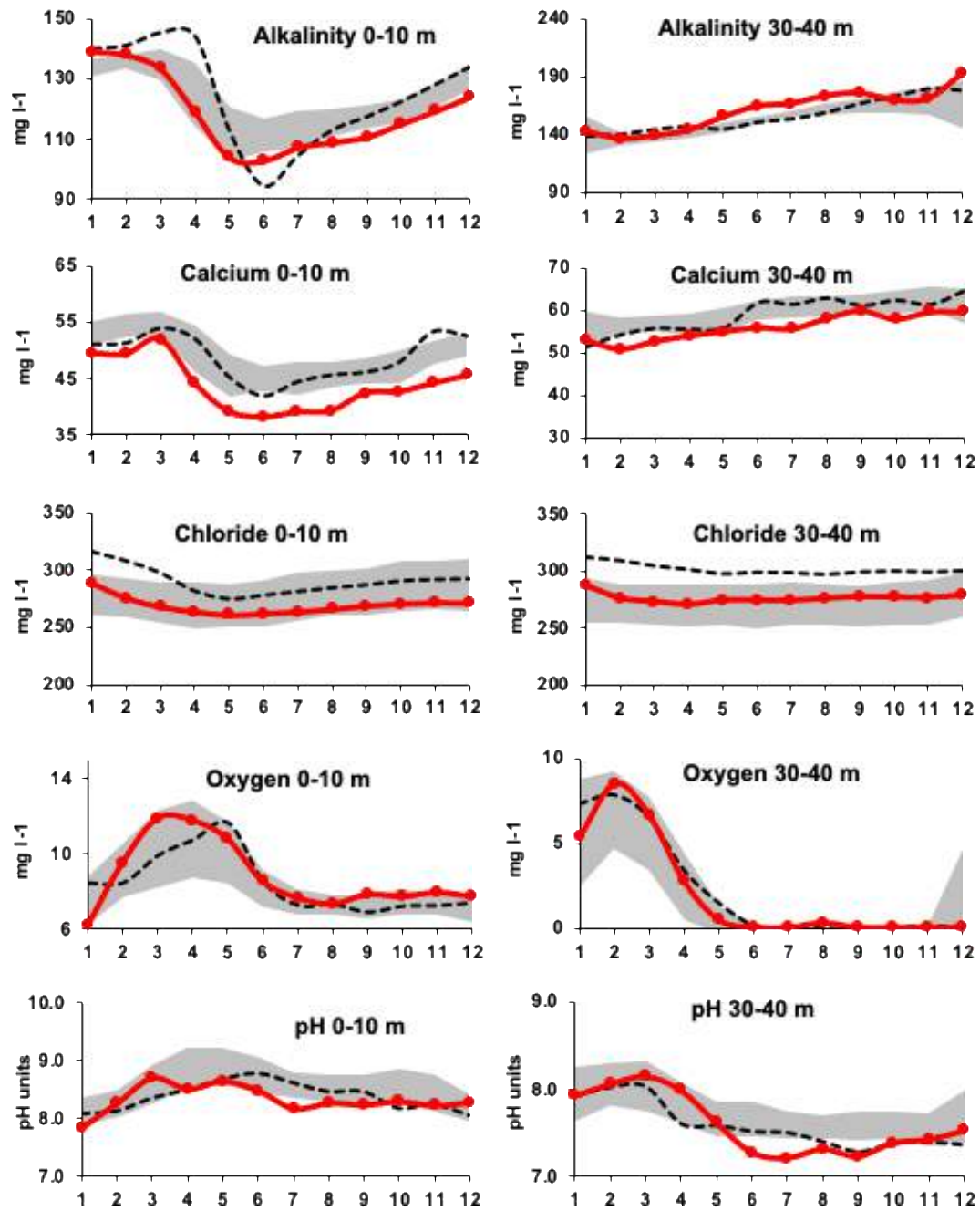
גבוהים מהטווח הרב שנתי לאורך מספר חודשים בקיץ, אך קצבי ההצטברות נשארים דומים לאלו של שנים קודמות.

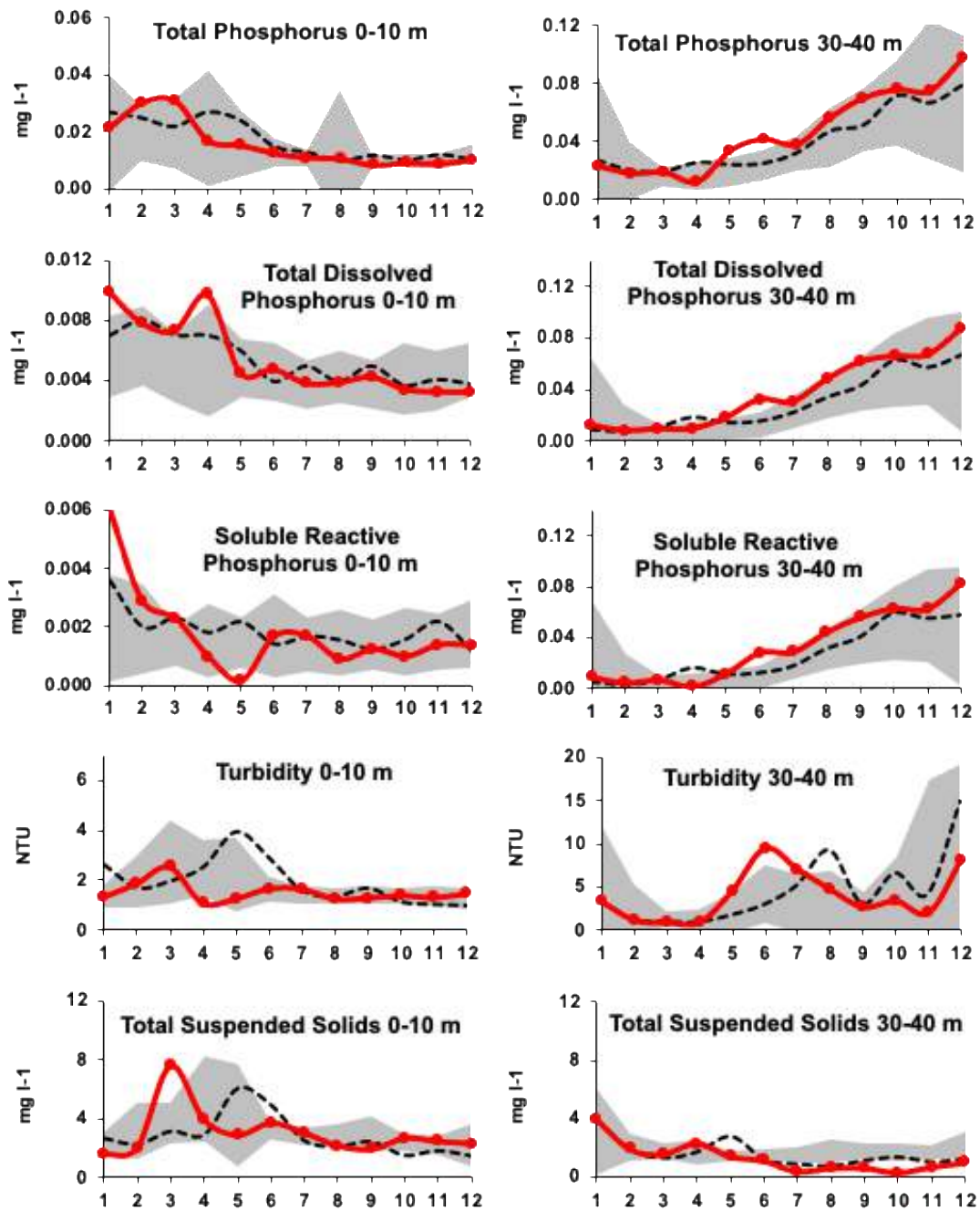
עבור חנקן כללי ואמוניום בהיפולמיניון 2020, הערכים חוזרים לטווח הממוצע הרב שנתי כבר באוקטובר. עכירות ומוצקים מרחפים:

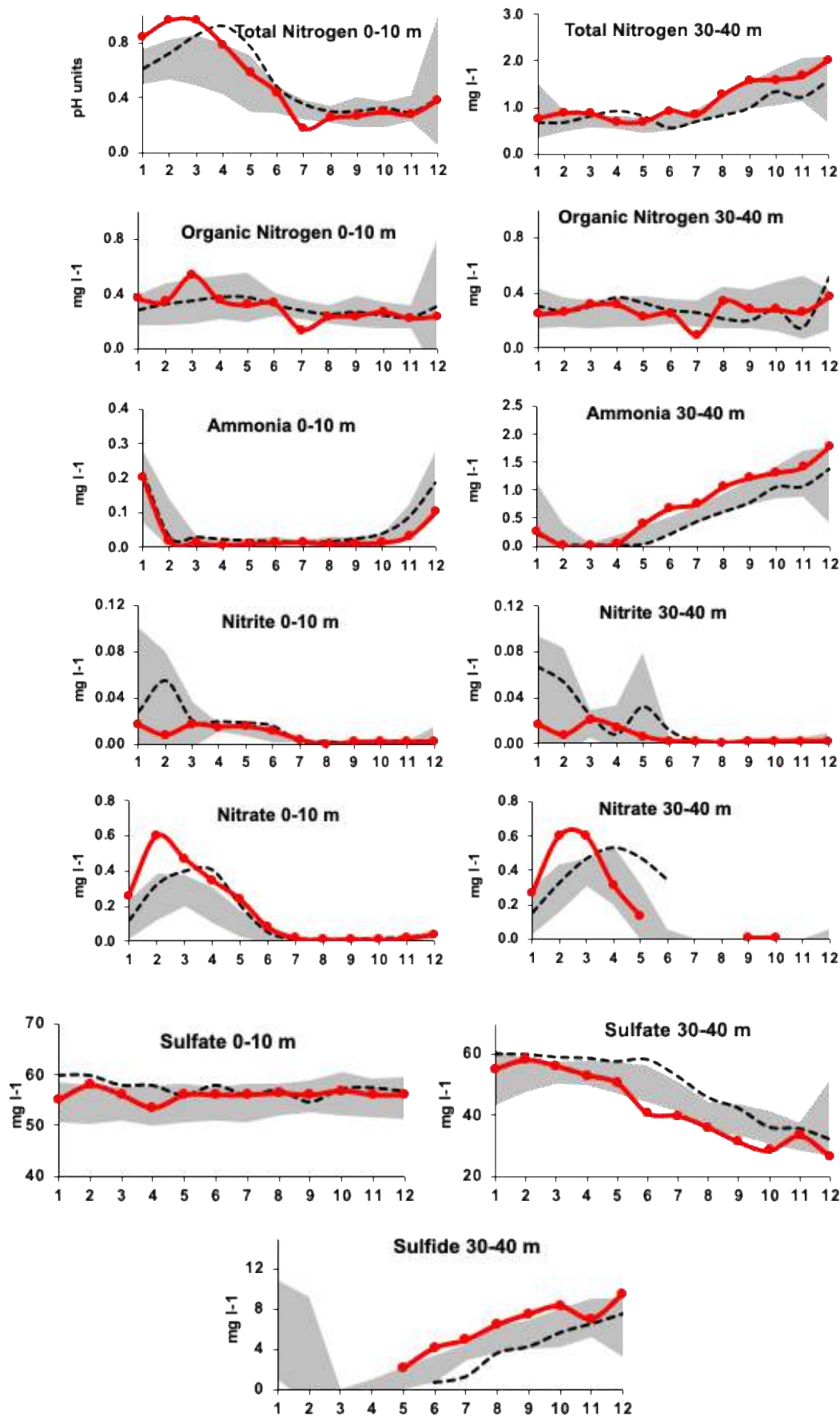
ערכי עכירות וסך המוצקים המרחפים ב- 2020 נמצאים בתוך טווח הממוצע הרב שנתי, רב השנה, בשתי השכבות. באפילימיניון, השיאים בעכירות ובמוצקים מרחפים, הינם מוקדמים ומייצגים שטפי נוטריינטים מוקדמים מאגן ההיקוות, ופעילות ביולוגית בהתאמה. בהיפולמיניון שיא בעכירות ביוני אשר אף חורג מטווח הממוצע הרב שנתי עשוי לייצג קריסה מוקדמת של הפעילות הביולוגית ושקיעת התוצרים להיפולמיניון.

#### גופרית:

סולפאט באפילמיניון של 2020 מראה מגמת יציבות בערכים לאורך רב השנה, סביב 55 מ"ג/ליטר. בהיפולמיניון, ירידה מוקדמת של סולפאט ועליה מקבילה מוקדמת של סולפיד מאפריל מאי מייצגת את התייצבות השיכוב המוקדם השנה כפי שהודגם לגבי מספר פרמטרים אחרים לעיל.







**איור 15:** ממוצעים חודשיים של ריכוזי הפרמטרים השונים בכנרת בשנת 2020 (קו אדום) בהשוואה לשנה הקודמת (2019, קו שחור מרוסק) ולממוצע הרב שנתי  $\pm$  סטיית תקן אחת של עשר השנים שלפניה (2009-2018, קו גרע אפור). הנתונים מוצגים בנפרד עבור שכבת המים העליונה (1-10 מ' עומק) והתחתונה (30-40 מ' עומק).

## 2.7 קיבוע חנקן



במימון  
רשות  
המים

שירה ניניו, נחמה רושנסקי, עכסה לופו וזהר פריימן

- קיבוע החנקן ב- 2020 התפרס על פני עונה קצרה והיה נמוך מהרגיל.
- השיא בקצבי הקיבוע נמדד בסוף חודש אוקטובר, יחד עם שיא במספר ההטרוציסטים של הכחולית אפניזומנון.
- בסך הכל קובעו באגם כ-32 טון חנקן אטמוספרי במהלך פריחת הכחוליות הקייציות.

### רקע

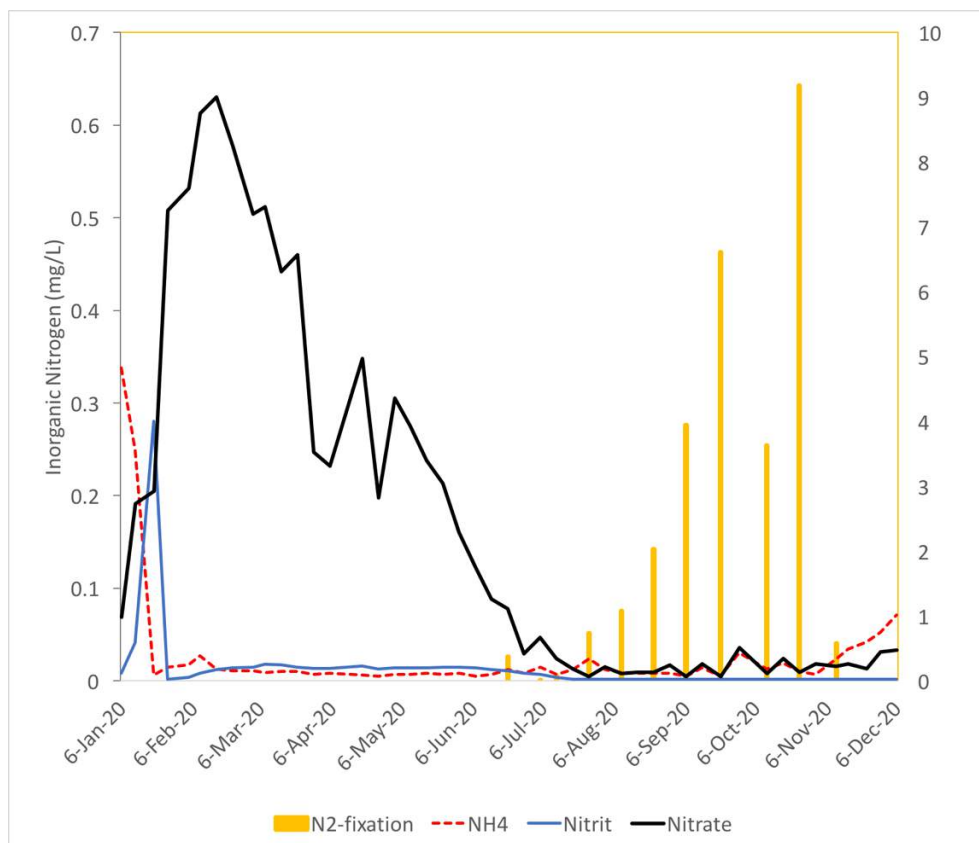
מאזן החנקן באגם מושפע ממספר תהליכים התורמים לכניסה ויציאה של חנקן מהמערכת האקולוגית של הכנרת. אחד מתהליכים אלו הינו תהליך ביולוגי של קיבוע חנקן אטמוספרי המתרחש בחודשי הקיץ אז ניתן לצפות בפריחות של ציאנובקטריה מקבעות חנקן כמו אפניזומנון וצילינדרוספרמופסיס המתרכזות באזור הפוטי. ללא מדידה אמינה של רכיב קיבוע החנקן במאזן האגמי, תחזיות ומאזנים עונתיים ושנתיים לוקים בהערכה חסרה. לפיכך יש חשיבות רבה לבחון את התרומה היחסית של קיבוע החנקן במאזנים העונתיים במדידות סדירות של קיבוע חנקן בכנרת. מדידות של קצבי קיבוע החנקן במי הכנרת החלו בקיץ של שנת 2001 ומאז מהווים חלק מהניטור באגם בקיץ ובסתיו.

**שיטות**

בדיקת פוטנציאל קיבוע החנקן במי כנרת מתבצעת על ידי הדגרה בעומקים שונים *in situ*. המדידה מסתמכת על פעילות האנזים ניטרוגנאז, המצוי בתאים מיוחדים הקרויים הטרוציסטים, והאחראי על קיבוע החנקן האטמוספרי. המעקב במעבדה נעשה ע"י תהליך חיזור גז האצטילן לאתילן ע"י הניטרוגנאז, ומדידת שעורי האתילן הנוצרים על ידי כרומטוגרף גזים. בעזרת שיטה זו נמצא שקיבוע החנקן העונתי בכנרת תלוי באנרגיית אור, עולה עם הזמן, מעוכב על ידי אמוניה ומתרחש רק באור.

**תוצאות ודיון**

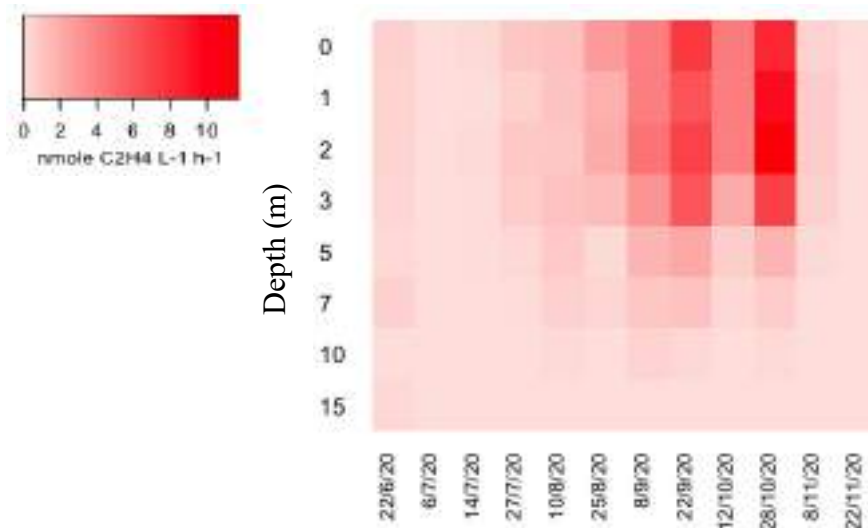
קיימת תלות בין הפריחות של ציאנובקטריה מקבעות חנקן באגם לבין ההרכב הכימי של עמודת המים. עונת הקיבוע מתחילה באופן טיפוסי בחודש יוני כאשר אוגר הניטראט באגם מגיע לערכים נמוכים מאוד כתוצאה מתהליכי דניטריפיקציה המתרחשים בחורף ובאביב. הקיבוע מפסיק כאשר מגיע לאפילימניון חנקן מקובע מאגן ההיקוות או משכבת ההיפולימניון. גם בשנת 2020 נצפתה תלות זו אולם בשל ריבוי הגשמים והזרימות החזקות בנחלים, אוגר החנקן באגם היה גבוה ועונת הקיבוע התקצרה באופן משמעותי. רק בסוף חודש יולי ירד ריכח הניטראט לערכים נמוכים מספיק, המעודדים פעילות קיבוע משמעותית. עונת הקיבוע הגיעה לשיאה בסוף אוקטובר עם קצבי קיבוע של  $9.2 \text{C}_2\text{H}_4 \text{ L}^{-1} \text{ h}^{-1}$ , ובתחילת נובמבר החלה עליה בריכח החנקן באפילימניון והסתיימה עונת הקיבוע (איור 16).



**איור 16:** קיבוע חנקן (קצב ממוצע בעומקים 1-3 מ') וריכחי חנקן אי-אורגני מסיס ב-3 מ' (מיליגרם לליטר) ב-2020.



בדומה ל- 2019, גם ב- 2020 נמדדו ערכי קיבוע חנקן נמוכים יחסית לשנים שקדמו להן, וסה"כ קיבוע החנקן לשנת 2020 הסתכם ב- 32 טון לאגם, בהשוואה ל- 47.3 טון ב- 2019, 70.66 בשנת 2018, ו- 94.53 טון בשנת 2017 (טבלה 3). עונת הקיבוע הגיעה לשיאה בסוף אוקטובר עם קצבי קיבוע של 0.6 טון חנקן מקובע לאגם ליום, כשבאותו הזמן נספרו גם ערכי השיא העונתיים בריכוז ההטרוציסטים של הכחולית אפניזומנון. ניתוח של פיזור פעילות הקיבוע מלמד שב- 2020 קצבי הקיבוע הגבוהים ביותר נרשמו בעומק של 2 מ' (איור 17).



**איור 17:** מפת חום המייצגת את הפיזור האנכי של קצבי קיבוע החנקן בעמודת המים מ- 1-15 מ' בשנת 2020. הגוון מייצג את קצב הקיבוע שנמדד ביחידות  $\text{nmole C}_2\text{H}_4 \text{ L}^{-1} \text{ h}^{-1}$ , על פי הסרגל שמשמאל.

**טבלה 3 :** קיבוע חנקן בכנרת בשנים 2001-2020

Year	N2 Fixed, tons per lake
2001	97.5
2002	12.5
2003	0.5
2004	83.4
2005	123.0
2006	35.1
2007	1.6
2008	59.0
2009	81.1
2010	21.0
2011	6.9
2012	79.0
2013	5.3
2014	50.5
2015	78.3
2016	51.2
2017	94.5
2018	70.7
2019	47.3
2020	32.0

## 2.8 זרחן באבק



במימון  
רשות  
המים

ירון בארי-שלוין, אדית לייבוביץ', ניר קורן

- שטפי זרחן זמין באבק בטבחה: 26.2 טון/שנה ובכינר 53.1 טון שנה. ממוצע לכנרת-39.7 טון/שנה.
- תחנת כינר מראה שונות גבוהה יותר הן עונתית והן רב שנתית ביחס לטבחה.
- תרומות זרחן מאבק לאגם בתקופת הקיץ: 12-19 טון.

### מטרת המחקר

ניטור שוטף של תרומת הזרחן באבק לכנרת.

### רקע

שטפי זרחן מאבק לכנרת מנוטרים באופן רציף מזה כמה שנים מכיוון שאלו הם שטפים משמעותיים מבחינת זרחן ביחס למקורות אחרים כדוגמת שטפים מאגן ההיקוות בעיקר בתקופת הקיץ. בתחילת שנת 2013 עברנו למתכונת ניטור שגרתי של הזרחן באבק במסגרת מערך הניטור של האגם ומפברואר 2014 נוספה גם תחנה קבועה במזרח הכנרת (בכינר). על כן, זו השנה השביעית בה קיימות שתי תחנות ניטור זרחן באבק סביב הכנרת.

**שיטות**

דיגום האבק מבוצע ע"י הצבת 4 דליים מלאים במים מזוקקים, מורעלים בסודיום אזיד על גג המעבדה לחקר הכנרת (תחנת טבחה), וכן עוד 2 דליים בחוף כינר (תחנת כינר) במזרח האגם. נפח הדלי המלא הוא כ- 18 ליטר ושטח הפנים העליון שלו 650 סמ"ר. הדליים נדגמים למדידת זרחן מומס אחת לשבוע לערך ומים מזוקקים לקיזוז הפסדי אידי מוספים בהתאם לעונה ולצורך.

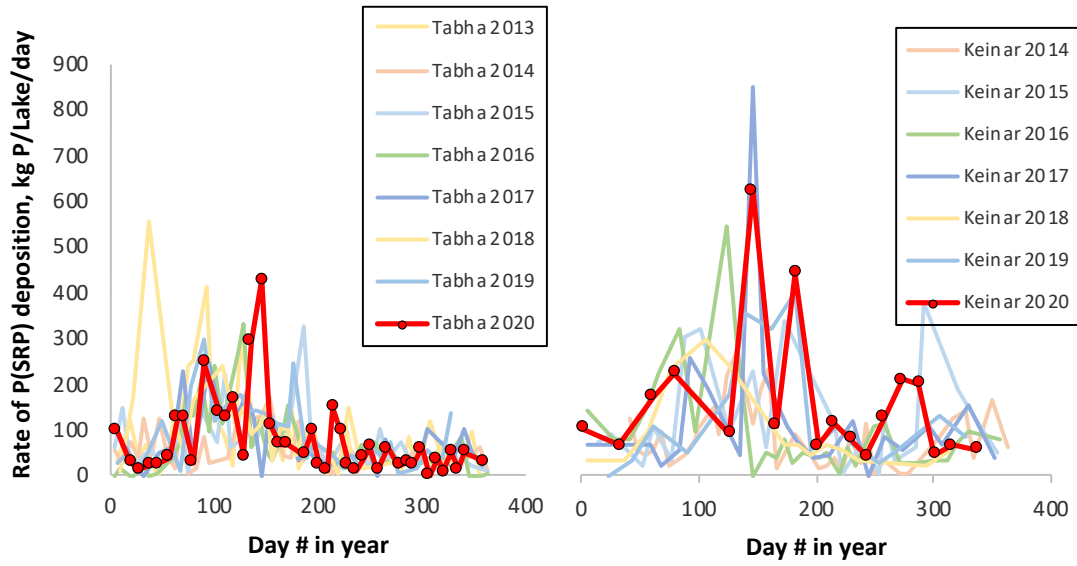
**תוצאות ודין**

בתחנת טבחה ניתן להבחין בשתי תקופות עיקריות של שטפי זרחן באבק בשנת 2020 (איורים 18 ו-19): אביב מאוחר עד תחילת קיץ עם שטפים גדולים יחסית וקיץ-סתיו-חורף עם שטפים נמוכים יותר. שיא השטפים מעט מאוחר (גלישה אל תחילת הקיץ) ביחס לשנים קודמות. כמו בשנים קודמות, תקופת שיא זו מאופיינת לא רק בשטפים גדולים יחסית, אלא גם בתנודתיות רבה והיא נעה בין ערכים של כ- 50 עד כמה מאות ק"ג זרחן מומס זמין לאגם ליום. השוואה בין שנת 2020 לשנים הקודמות (איור 18) מראה כי למרות השינויים בגודל השטפים בתקופת האביב ומיקום שיא השטפים מעט מאוחר יותר השנה ביחס ל- 2019, הרי שמגמת החלוקה העיקרית נשארת וכך גם גודל השטפים בקיץ, כאשר בתחנת טבחה ניתן לראות מגמה ברורה של דעיכה עד התייצבות לערכי קיץ של כ- 10-50 ק"ג זרחן ליום. תחנת כינר מאופיינת השנה כמו גם ברב השנים הקודמות בשטפים שנתיים גבוהים יותר מתחנת טבחה ובתבנית חלוקה שנתית מעט שונה. שיא השטפים, כמו בטבחה, מאפיין את סוף האביב אבל נמשך עד סוף יוני. תקופת הקיץ-סתיו מאופיינת ברקע נמוך של כמה עשרות ק"ג ליום אך מספטמבר עד אמצע אוקטובר ישנו גל עליה של שטפים, עד כ- 200 ק"ג ליום, ושוב דעיכה לערכי רקע. האביב המוקדם של שנת 2020 בכינר מאופיין בשטפים בינוניים – בין 100 ל- 200 ק"ג זרחן ליום (איורים 18 ו- 19).

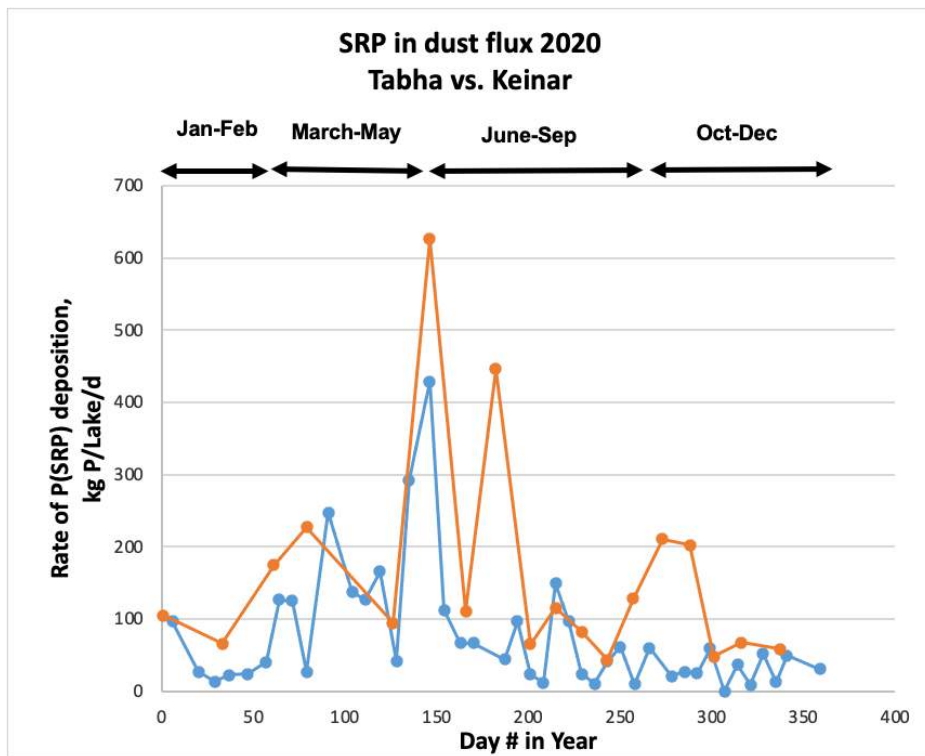
סך השטף השנתי ל- 2020 ממדידות בתחנת בטבחה הינו כ- 26.2 טון, כ- 85% ביחס ל- 2019 ו- 95% ביחס לממוצע של 28 טון שחושב לתחנה זו עבור השנים 2013-2019. תחנת כינר מאופיינת בשונות לא קטנה ביחס לתחנת טבחה, זאת לא רק ברמה העונתית אלא גם ברמה הבין שנתית (איורים 18 ו- 19). סך השטף השנתי ל- 2019 ממדידות בתחנת בכינר הינו כ- 53.1 טון, כ- 120% ביחס ל- 2019 ו- 140% ביחס לממוצע של 37.4 טון, אשר חושב לתחנה זו עבור השנים 2014-2019. ממוצע בין שתי התחנות נותן ערך של 39.7 טון/שנה זרחן מאבק לכנרת שדומה מאד לממוצע שהתקבל בשנת 2019.

בחינה של תרומת האבק לזרחן מומס זמין לכנרת 2020 מראה כי גם השנה שטפים בסדר גודל של 12-19 טון בתקופת הקיץ (טון וחצי עד 9 טון לחודש), התקופה בה שטפי הזרחן מאבק נמוכים יחסית, הינה כמות משמעותית לאגם, שכן בתקופה זו שטפים ממקורות אחרים נמוכה מאד. תצפיות אלו לאורך השנים האחרונות מראות כי לאבק תרומה חשובה ועיקרית למאזן הזרחן באגם בקיץ ובתקופות בצורת גם בשאר השנה.

**SRP in dust fluxes 2013 - 2020**



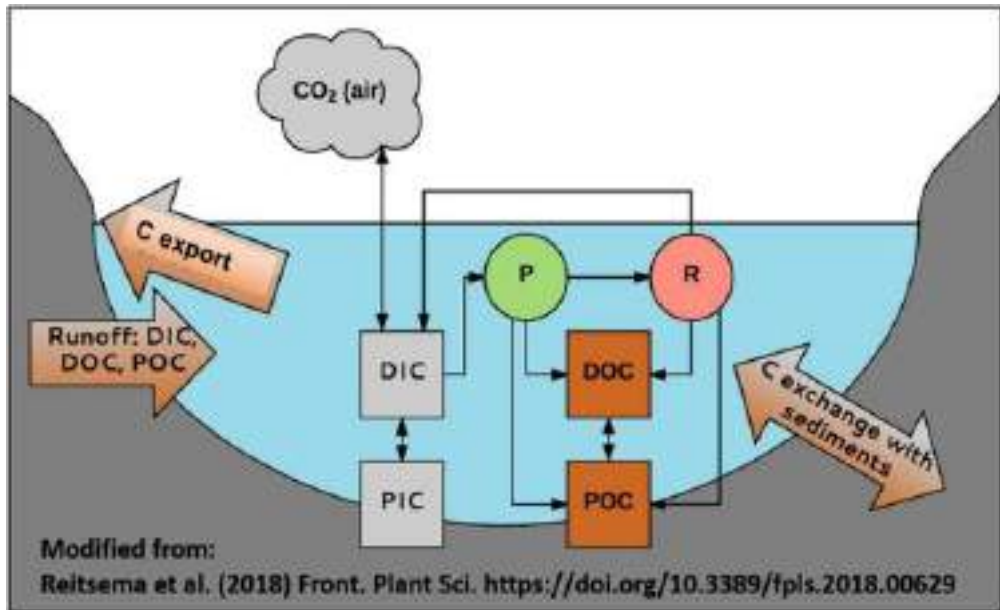
**איור 18:** השוואת שטפי זרחן מומס עבור השנים 2013-2020 בתחנות טבחה (גג המעבדה לחקר הכנרת) והשנים 2014-2020 בתחנת כינר.



**איור 19:** שטפי זרחן מומס בכנרת כפי שנמדדו בתחנות טבחה (גג המעבדה לחקר הכנרת): קו כחול, וכינר: קו אדום בשנת 2020.



## 2.9 פחמן אורגני ואנאורגני מומס וחלקיקי



במימון  
רשות  
המים

ורנר אקרט, בני סולימני

- ריכוזי הפחמן האורגני המומס בעמודת המים של הכנרת הראו הבדלים קטנים בין העומקים השונים, אך היו נמוכים בכ- 0.3 מג"ל בהשוואה ל- 2019.
- ב-2020, הערכים המרביים של הממוצעים החודשיים של כלל המוצקים המרחפים והפחמן האורגני החלקיקי היו בחודש מאי.

### רקע

פחמן אורגני מומס (DOC) ופחמן אורגני חלקיקי (POC) הם מרכיבים חשובים במעגל הפחמן באגם. DOC משוחרר על ידי פייטופלנקטון חי וכן במהלך פירוקו, ומספק את בסיס ההזנה לכל המיקרואורגניזמים ההטרוטרופיים, אשר גם משחררים DOC. בשל כך הוא נחשב כמקור מזון בסיסי במארגי מזון מימיים. שני הרכיבים מוגדרים על פי יכולתם לעבור דרך פילטר של סיבי זכוכית בגודל חור של  $0.7 \mu\text{m}$ .

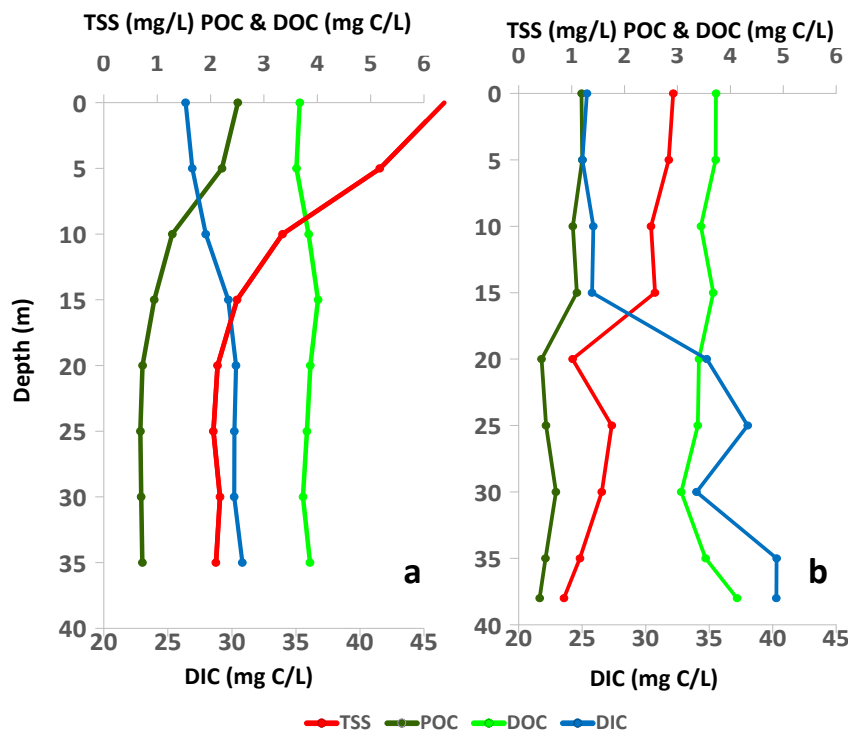
### שיטות

במסגרת הניטור מדדנו את ריכוזי הפחמן המומס בעמודת המים של הכנרת ב-8 עומקים, פעם בשבועיים, זאת במקביל למדידה של החומר החלקיקי באותם העומקים. הדיגום בוצע במקום העמוק באגם, בתחנת הדיגום השגרתי (תחנה A). החומר החלקיקי נאסף ע"ג פילטר סיבי זכוכית (GF/F), בעל קוטר נקב ממוצע של  $0.7 \mu\text{m}$  מיקרון ואילו התסנין של דוגמאות אלה שימש לקביעת ריכוז הפחמן האורגני (DOC) והאנאורגני המומס במים (DIC).

המדידה בוצעה באמצעות מכשיר של חברת SHIMADZU, המודד את ערכי הפחמן ע"י חישן אינפרא אדום. השתמשנו בפילטרים שקולים ושרופים מראש על מנת לקבוע את סך כמות המוצקים המרחפים (TSS) לאחר ייבוש ב-110°C למשך הלילה, ולשם קביעת תכולת החומר האורגני על פי השינוי במשקל לאחר 4 שעות שריפה ב-540°C. לפי זה, כמות הפחמן האורגני החלקיקי (POC) הינה מחצית החומר השרוף.

### תוצאות ודין

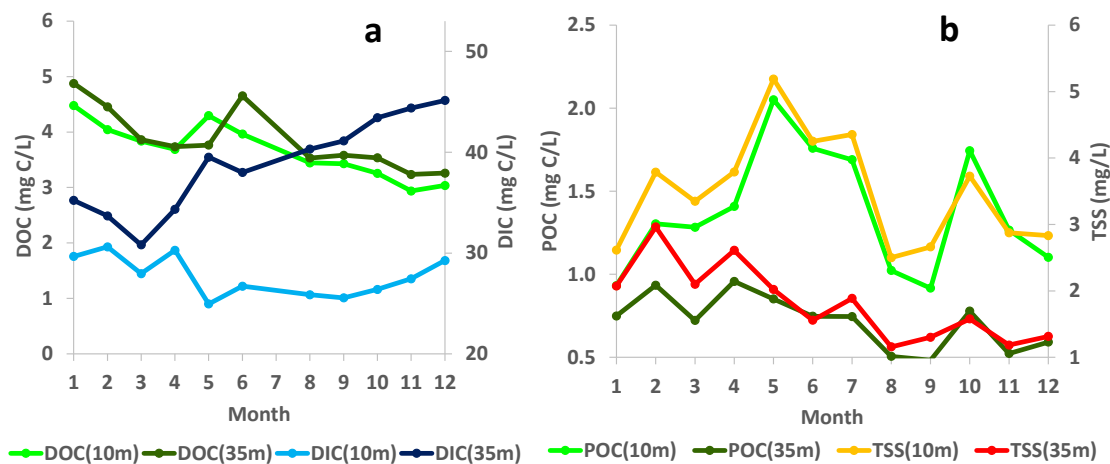
במהלך 2020 ריכזי ה-DOC החודשיים הממוצעים בעמודת המים של הכנרת היו  $0.46 \pm 3.70$  מג"ל פחמן (n=197), 0.3 מג"ל פחות מאשר ב-2019. כמו בשנים קודמות, גם השנה ערכי ה-DOC היו די קבועים לאורך עמודת המים, כפי שניתן לראות מהממוצעים החודשיים ממאי עד ספטמבר (איור 20a ו-b). הפרופילים של ריכזי ה-DIC השתנו בין החורף לקיץ, כפי שכבר דווח בעבר, כאשר הריכזים בהיפולימניון עלו, בתקופת השיכוב התרמי, מ-30 ל-40 מג"ל כתוצאה מתהליכי שקיעה, המסה ומינרליזציה של חומר חלקיקי. תוצאות אלו נתמכות גם בערכים גבוהים יחסית של כלל המוצקים המרחפים (TSS) בחודשי האביב לעומת הסתיו. באפילימניון ריכזי ה-TSS היו הגבוהים ביותר בזמן פריחת הפרידיניום באפריל והגיעו ל-7.5 מג"ל. הריכזים ירדו עם העומק עד ל-2 מג"ל. באוגוסט, ערכי ה-TSS היו בסביבות 3 מג"ל בפני המים ו-1 מג"ל בקרבת הקרקעית. כמו ה-TSS, גם ריכזי הפחמן האורגני החלקיקי (POC) הראו מגמה דומה והערכים שנמדדו היו בממוצע 38% מריכזי ה-TSS.



**איור 20:** ממוצעים חודשיים של TSS, POC, DOC, ו-DIC בעמודת המים של הכנרת שנמדדו: a. במרץ 2020. b. באוגוסט 2020.

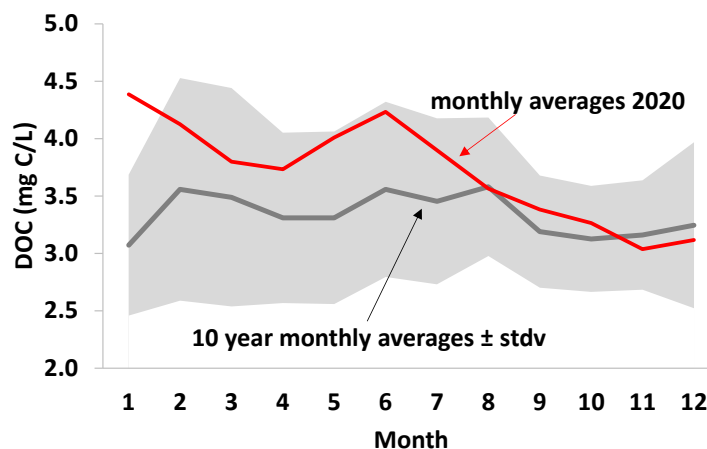
הפרופילים של פחמן אורגני מומס (DOC) בעמודת המים לא הראו הבדלים משמעותיים במהלך השנה כפי שניתן לראות מהגרפים של שינויי הריכזים כפונקציה של הזמן בעומקים 10 ו-35 מטר (איור 21a).

באופן כללי, ניתן לומר שריכחי ה-DOC הראו מגמת ירידה מ-5 מג"ל בינואר ל-3 מג"ל בדצמבר, עם קפיצות חריגות במאי (10 מטר) וביוני (35 מטר) שכנראה קשורות לפירוק של פריחת הפרידיניום. שלא כמו ה-DOC, השינויים במרחב ובזמן של ריכחי ה-DIC הראו הבדלים עונתיים כתלות בעומק עם ערכים שנעו בין 25 ל-30 מג"ל באפילימניון וריכחים שהולכים ועולים בהיפולימניון עד ל-45 מג"ל בסוף תקופת השיכוב. מגמה זאת היא בקורלציה הפוכה לריכחי ה-TSS וה-POC בעומק 35 מטר, ששניהם ירדו בקביעות מהאביב לסתיו (איור 21b). ייתכן וההסבר לתופעה זו הוא שקיעה של קלציט כתוצאה מעליה ב-pH בזמן פריחת הפיטופלנקטון והתמוססותה בהיפולימניון. באפילימניון ערכי ה-POC וה-TSS עקבו במדויק אחר התפתחות פריחת הפרידיניום, הגיעו לשיא בחודש מאי (POC=2.3 ו-TSS=5 מג"ל) ודעכו במהלך חודשי הקיץ.



**איור 21:** שינוי עיתי בממוצעים חודשיים של: פחמן מומס אורגני ואנאורגני (a) ופחמן חלקיקי וחומר מרחף (b) במהלך 2020 בעומקים 10 ו-35 מטר.

שלא כמו ב-2019, ב-2020 הממוצעים החודשיים של ריכחי ה-DOC בעמודת המים של הכנרת היו שונים בתכלית מהממוצע הרב שנתי. במהלך 2020 הערכים נשארו בתוך טווח השונות הרב שנתי אך עם מגמת ירידה מ-4.3 בינואר ל-3.2 בנובמבר (איור 22). העלייה הקלה בערכי ה-DOC ביוני כנראה קשורה לפירוק של פריחת הפרידיניום.



**איור 22:** ממוצעים חודשיים של ריכחי פחמן אורגני מומס בעמודת המים של תחנה A שבמרכז האגם ב-2020 בהשוואה לערכי הממוצעים הרב שנתיים.

## 2.10 קצבי סדימנטציה



**במימון  
רשות  
המים**

**איליה אוסטרובסקי, ניר קורן**

- תהליך הסדימנטציה הינו תהליך חשוב בסילוק חומר חלקיקי מעמודת המים ואחד התורמים העיקריים ליציבות מערכות אקולוגיות אגמיות.
- המטרה העיקרית של הניטור הינה מעקב אחר הדינמיקה העיתית והשינויים המרחביים של קצבי הסדימנטציה בכנרת.
- מדידות מפורטות של קצבי הסדימנטציה מוצגות עבור ארבע תחנות ניטור.

### מטרת המחקר

מעקב אחר הדינמיקה העיתית והשינויים המרחביים של קצבי סדימנטציה בכנרת.

### רקע

סדימנטציה הינה תהליך חשוב לסילוק חומר חלקיקי מעמודת המים ואחד הגורמים העיקריים התורמים ליציבות מערכות אקולוגיות מימיות. קצבי הסדימנטציה הגולמיים בכנרת מנוטרים באופן קבוע החל משנת 1999 באמצעות מלכודות סדימנטים, והראו שונות עתית ומרחבית משמעותית. תנודות מפלס גדולות באגם בשנים האחרונות השפיעו על תהליכי ההרחפה של הסדימנטים ועל שינויים בפיזור המרחבי של החלקיקים. אלה גרמו לשינויים בולטים במשטר הסדימנטציה באזורים השונים של קרקעית האגם. ניתן לקשור את השינויים בקצבי הסדימנטציה לתנודות בעומסי הסדימנטים המגיעים לאגם מאגן ההיקוות ועקב התנודות המשמעותיות במפלס פני האגם.

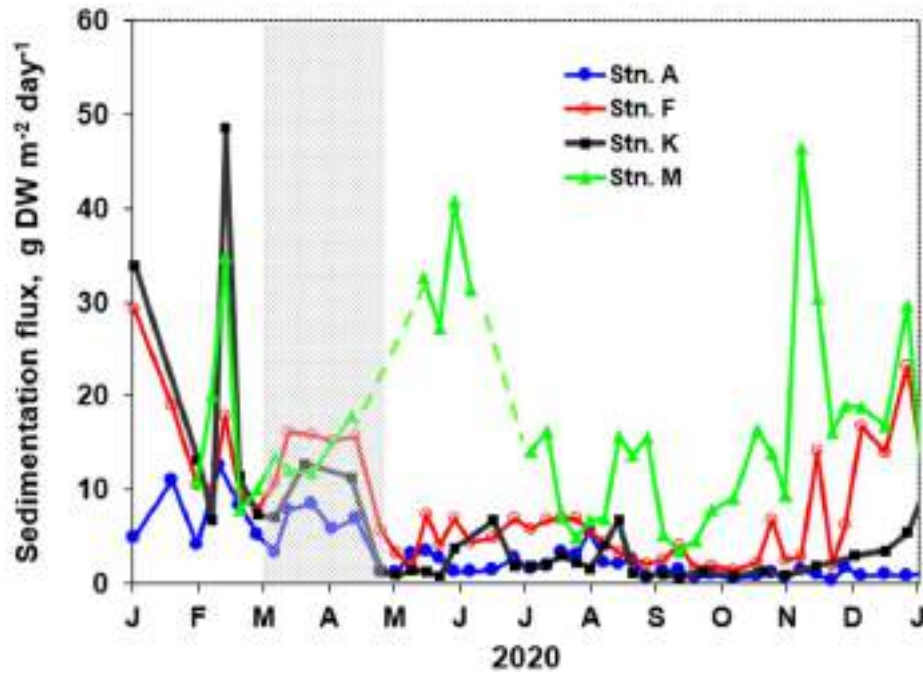


**שיטות**

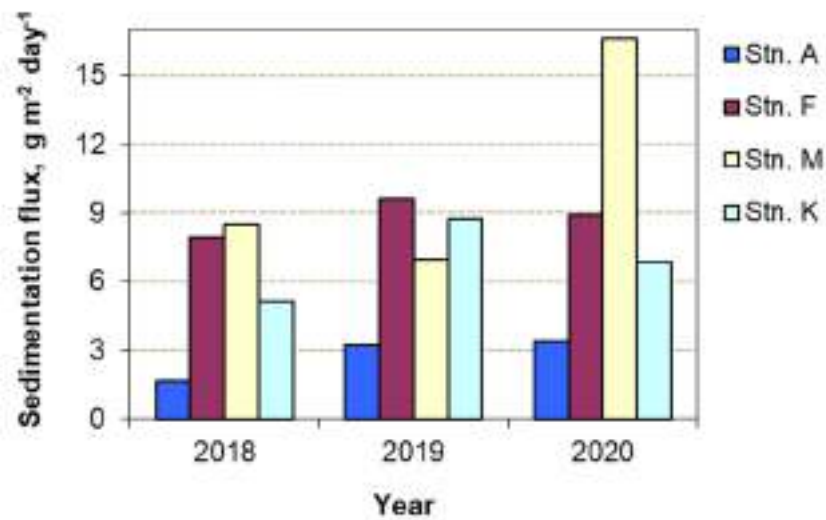
קצבי סדימנטציה נבדקו ב- 4 תחנות באגם: A, F, M, ו- K. המלכודות הסטנדרטיות מורכבות מ- 4 (8 בתחנה A) צינורות בעלי קוטר של 5 ס"מ ואורך - 50 ס"מ. בתחנות A ו-F מוקמו המלכודות 2.5 מ' מעל הקרקעית, בעוד שבתחנות M ו-K המלכודות מוקמו 1.5 מ' מעל הקרקעית. חומר שוקע נאסף אחת לשבוע עד שבועיים. דוגמאות (בדופליקטים) של סדימנט מצטבר סוננו על גבי פילטר GF/F. תכולת חומר יבש נקבעה על ידי שקילת הדוגמאות לאחר חימום ב- 80°C למשך 4 ש'. קצבי הסדימנטציה השנתיים בתחנות השונות חושבו כממוצעים משוקללים של תאריכי הדיגום השונים. בנוסף, החומר שנאסף בתחנה A סורכז, יובש בהקפאה ונשמר עבור אנליזות עתידיות של ריכחי נוטריינטים בחלקיקים.

**תוצאות ודיון**

במהלך חודשי החורף ובתחילת האביב (התקופה שבה עמודת המים מעורבת) בתחנות A, F, M, ו- K, קצבי הסדימנטציה היו גבוהים משמעותית מאלו שנמדדו בקיץ ובסתיו (איור 23). ערכי השיא שנצפו במחצית פברואר נגרמו עקב סערה שגרמה להרחפה משמעותית של סדימנטים. בתקופת ההשקעה של הקלציות (מרץ ואפריל) שיעורי השקיעה בתחנות A, F, ו- K היו גבוהים יותר מאשר בחודשי הקיץ. בתחנות ההיקפיות F, K, ו- M, קצבי השקיעה היו גבוהים בשיעור ניכר מאלה שבתחנה A. קצבי הסדימנטציה בתחנה F בדרך כלל קצת גבוהים מאלו שבתחנה K. למרות זאת, בסתיו ובתחילת החורף גדלו קצבי הסדימנטציה בתחנה F מהר יותר מאלו שבתחנה K. תופעה זו נגרמה עקב ההעמקה המהירה של התרמוקלינה, אשר גרמה להרחפה של סדימנטים טריים, עשירים בחומר אורגני. סדימנטים אלו הצטברו בהיפולימיניון, בקרבת מיקומי המלכודות הפריפריאליות, בחודשי הקיץ והסתיו. ההבדל בין תחנות F ו- K, הממוקמות בעומקים דומים, עשוי להיות קשור להבדל בין הצטברות חלקיקים אורגניים קלים ולתנועות המים ליד הקרקעית בדרום (תחנה K) ובצפון (תחנה F) האגם. למרות שהמידות בתחנה M לא היו רציפות, התוצאות עדיין מראות שקצבי הסדימנטציה באזור זה היו הרבה יותר גבוהים מאשר במיקומים אחרים ממאי עד דצמבר. ב- 2020 קצבי הסדימנטציה הממוצעים בתחנות A, F, K, ו- M היו 3.4, 8.9, 16.6 ו- 6.8 גרם חומר יבש/מ"ר/יום, בהתאמה (איור 24). בשנים 2019-1999 קצבי הסדימנטציה הממוצעים בתחנות A, F, ו- M היו  $0.2 \pm 3.2$ ,  $0.5 \pm 9.4$  ו-  $1.1 \pm 12.3$  גרם חומר יבש/מ"ר/יום, בהתאמה. בשנת 2020 קצבי השקיעה בתחנות A ו- F היו דומים לממוצעים הרב שנתיים שלהם. בניגוד לכך, קצבי הסדימנטציה בתחנה M היו גבוהים באופן מובהק מאשר בשנים הקודמות ומערכי הממוצעים הרב שנתיים. הדבר עשוי להיות קשור ליצירת אזור רדוד נרחב שבו צמחיה יבשתית הוצפה, וחלקיקים, המורחפים בקלות, עשויים היו להצטבר בו לאחר עלית מפלס האגם לגבולו העליון.



**איור 23:** דינמיקה עונתית של קצבי הסדימנטציה בתחנות השונות ב- 2020. תקופת השקעת CaCO<sub>3</sub> באפריל והחצי הראשון של מאי מודגשת. הקו הירוק המקווקו הינו הערכה לינארית של קצבי הסדימנטציה בתחנה M בתקופות בהן לא בוצעו מדידות.



**איור 24:** קצבי סדימנטציה ממוצעים במיקומים השונים ב- 2018-2020.

## 2.11 ניטור מתכות כבדות



בתמונה: מכשיר Perkin Elmer ICP-MS המחלקה לגיאוכימיה, המכון הגיאולוגי

**במימון  
רשות  
המים**

### ירון בארי-שלוין, גלית שרעבי (המכון הגיאולוגי)

- עבור הרוב המוחלט של היסודות הנמדדים לא התגלו חריגות ריכוז ביחס לתקנות מי שתיה.
- חריגות בהשוואה לתקנות מי שתיה התגלו עבור היסודות אלומיניום ואבץ, בעיקר בפאזה החלקיקית.
- מספר יסודות (Al, Mo, Pb, Zn) מראים שונות מרחבית גדולה בריכוז הכללי ועבור אבץ נראית גם שונות גדולה במומס.
- פרופילי מנגן ובריום מצביעים על זיקה בין תפוצתם בעמודת המים לבין משטר החימצון-חיזור באגם.

#### מטרת המחקר

ניטור שוטף של מתכות קורט באגם ובמוצא הירדן והמשושים.

#### רקע

הדו"ח הנוכחי מציג את פעולת ניטור מתכות קורט באגם הכנרת לשנת 2020. עבודה זו מתבצעת במסגרת פרויקט הניטור הרב שנתי, הנעשה בשיתוף פעולה בין המכון הגיאולוגי לבין המעבדה לחקר הכנרת (חיא"ל), במימון רשות המים. מטרתה הינה ניטור ריכוזי מתכות קורט במי הכנרת ובמספר נחלים.

מחקר זה מדווח מידי שנה לרשות המים. תוצאות ניטור המתכות הכבדות משוות בדו"ח לרמות המותרות במי שתיה ע"פ תקנות בריאות מים מעודכנות לשנת 2013 (תקנות בריאות העם 2013) למרות שמי הכנרת אינם מי שתיה אלא מי גלם לשתיה.

תקופת הניטור המדווחת הינה ינואר עד דצמבר 2020. פעולת הניטור כללה שלושה פרופילי עומק במרכז האגם (תחנה A) במאי, אוגוסט ודצמבר וכן מספר פרופילים בתחנות שונות במרחב האגם: בדרומו (D) בצפונו (G) ליד שאיבת טבריה (ShT) ובין שפך הצלמון לשאיבת טבריה (GY) באוגוסט ובדצמבר (איורים 25-27). במקביל נדגמו מי הירדן (גשר אריק) ומי נחל המשושים (סמוך לשפכו של הנחל לאגם) במאי.

### **שיטות**

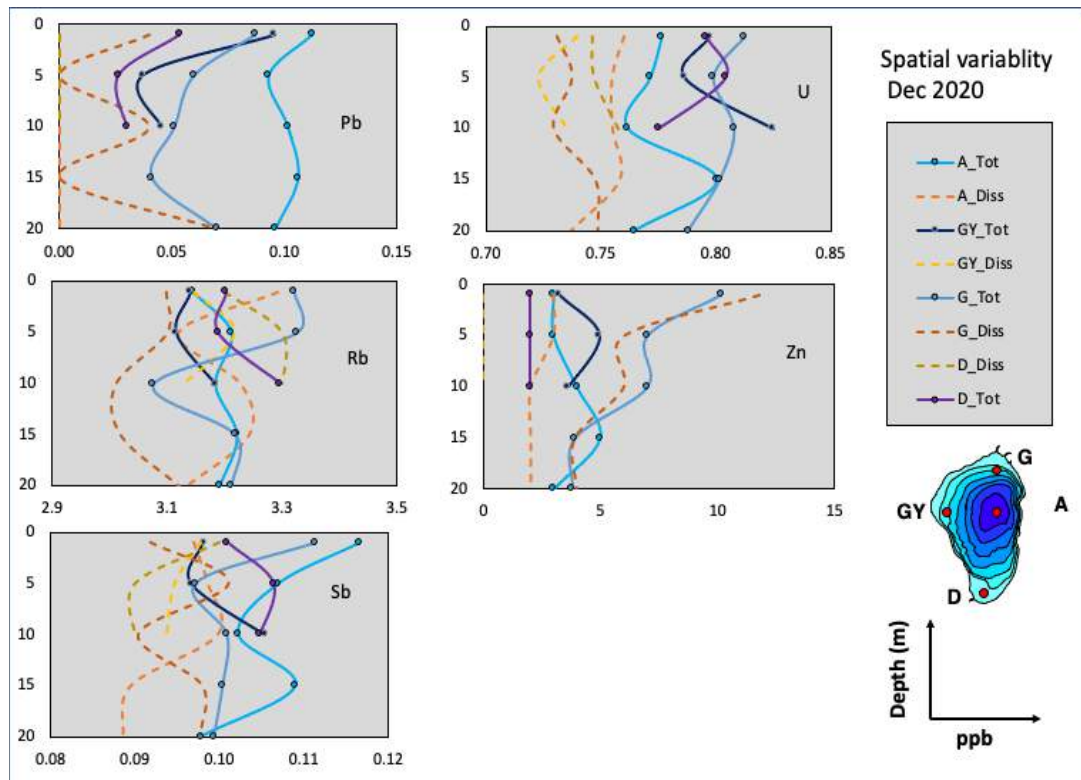
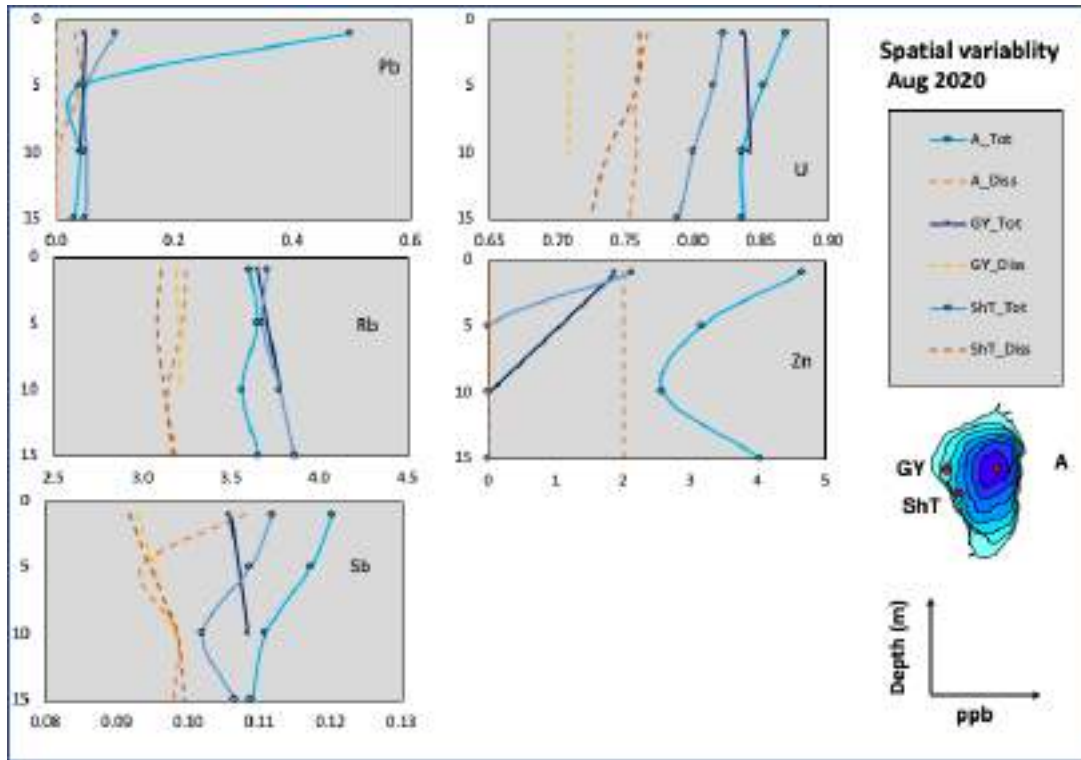
דוגמאות מים נאספו באמצעות משאבה פריסטלטית (Masterflex L/S® Easy-Load Head) במרווחים של 5m וברחלוציה גבוהה יותר בתקופת השיכוב, סביב האוקסיקלינה. דוגמאות מים לדיגום יסודות עיקריים נאספו בבקבוקי פלסטיק בנפח של 100mL אשר נשטפו 3 פעמים במי הדוגמה ומולאו עד תומם למניעת בריחת גזים מהמים. הבקבוקים נשמרו בקירור (4°C) עד למדידה. דוגמאות מים לדיגום יסודות קורט נאספו בבקבוקי LDPE 125mL שנשטפו מראש עם ANALYTICAL GRADE HNO<sub>3</sub> 15.6 N HNO<sub>3</sub> (1:4), כאשר עבור ריכוז מתכות כללי נוספו מיד 15mL חומצה חנקתית מרוכזת (Backer INSTRA-ANALYZED HNO<sub>3</sub>). עבור ריכוז מתכות מומס, המים סוננו במהלך השאיבה באמצעות פילטר סטרילי חד פעמי (Whatman 0.45 micron cellulose nitrate) אל תוך בקבוק המכיל 5mL של חומצה חנקתית 0.3N. מטרת הליך דיגום זה הינה לזהות את ריכוז יסודות הקורט בדוגמה, כולל מתכות ספוחות. דוגמאות אלו לא נשמרו בקירור.

אנליזות המים בוצעו באגף לגיאוכימיה וגיאולוגיה סביבתית במכון הגיאולוגי. קטיונים עיקריים ויסודות קורט, כגון Ba, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Sr, נמדדו באמצעות ICP-OES, Optima 5300, Perkin Elmer. הדוגמאות הוחמצו עם חומצה חנקתית ו-5 ppm Sc המשמש כסטנדרט פנימי. דיוק השיטה עבור יסודות עיקריים וקורט הינו ±0.5% ו-±10% בהתאמה. יסודות קורט נוספים, כגון As, Mo, Zn, נמדדו באמצעות ICP-MS NexION 300D, Perkin Elmer. דיוק השיטה הינו ±10%.

### **תוצאות ודיון**

#### **שונות מרחבית בכנרת**

הסטטים של דיגומי אוגוסט ודצמבר כוללים פרופילים בתחנה A, אך גם בתחנות אחרות, ומאפשרים לבחון את השונות המרחבית באפילימניון של הכנרת. איור 25 מציג את השונות של מספר יסודות עבורם רב הערכים היו מעל סף הגילוי בדיגומים של אוגוסט ודצמבר 2020. עבור יסודות אלו חושבה שונות ממוצעת לכלל העומקים המדודים.



**איור 25:** שינויים לדוגמא בריכחי יסודות קורט: U, Pb, Rb, Sb, Zn בין תחנות שונות בכנרת. פאזה כללית: קיום מלאים, פאזה מומסת: קיום מקווקים. פאנל עליון באוגוסט, ותחתון דצמבר 2020.

עבור רב היסודות, השונות המרחבית בין טווח הערכים האופייני לפרופילי העומק בתחנות השונות הן בפאזה הכללית והן במומסת, קטנה מאד - כאחחים בודדים (U, Sb, Rb, Li, Ba, B). עבור בריום - Ba, השונות המרחבית במומס עולה בין אוגוסט לדצמבר בעיקר כתוצאה של ירידה כללית בריכחי המומס בליטוראל לעומת ריכח דומה בין אוגוסט לדצמבר בתחנה A. מספר יסודות מראים שונות מרחבית גדולה (מוליבדן - Mo) עד גדולה מאד (Al, Pb, Zn) בריכח הכללי.

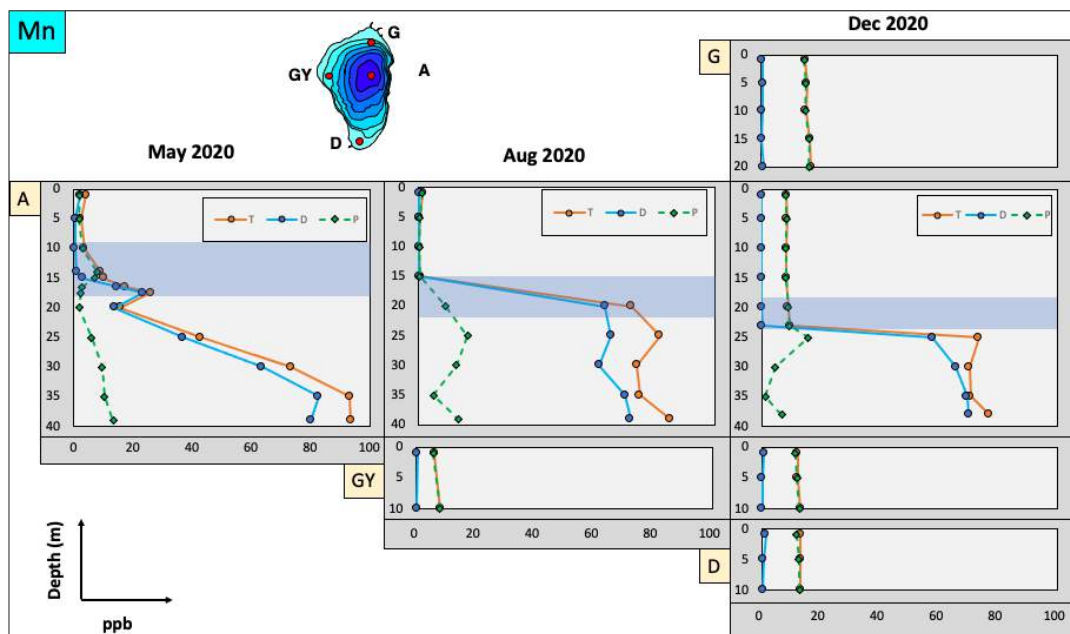
עבור אבץ-Zn, נראית גם שונות גדולה במומס. עבור רב היסודות האלו, השונות מתבטאת בין מרכז האגם לליטוראל חו ניתנת להסבר כנראה על ידי המגע הנרחב יותר של תחנות הליטוראל עם קרקעית האגם. לא נמצאה עקביות ביחס בין ריכוזי תחנה A לאלו של הליטוראל, הן בין היסודות המראים שונות גדולה והן ביסודות שונים (למשל אבץ-Zn, או אלומיניום-Al) בין עונות הדיגום השונות.

#### השוואה לתקן מי שתיה

השוואה לתקן מי שתיה מתקיימת בדו"חות של השנים האחרונות למרות שמי הכנרת הינם מי גלם לשתיה ואינם אמורים לעמוד בתקן זה. כמו בשנים האחרונות, החריגות השנה הם בערכי אבץ-Zn ואלומיניום-Al. עבור אלומיניום-Al, החריגות במאי הם בפאזה החלקיקית (עד כ- 260% מהתקן) בדוגמאות משפכי הירדן והמשושים לכנרת חו מייצגת כנראה הסעת חרסיות אל האגם. עבור אבץ-Zn, החריגות קיימות הן בפאזה החלקיקית והן בפאזה המומסת בכנרת בתחנה A (מאי 2020, 170%-110) ובתחנה G (דצמבר 2020, 240%-120). יש לציין כי בכמה דוגמאות, הן במאי והן בדצמבר, ריכח המומס גבוה מעט (אך מעל לשגיאה הנלווית למדידות) מהריכח הכללי. מספר החריגות הכללי השנה בשני היסודות, ובעיקר באבץ-Zn (18) אינו גבוה בצורה משמעותית מזה של 2019 (16).

#### דוגמאות להתנהגות של יסודות לא קונסרבטיביים באגם

השנה בחרנו, לצורך הדיון, להדגים התנהגות של שני יסודות שאינם מתנהגים בצורה קונסרבטיבית באגם לאורך השנה וריכחם משתנה באפילמניון ובהיפולימניון עם המעבר בין העונות. איורים 26 ו-27 מראים את פרופילי מנגן-Mn ובריום-Ba בעונות השונות ובתחנות השונות באגם. היסוד מנגן-Mn, מראה כבכל שנה התנהגות התלויה באופן חזק בשני גורמים: (א) מצב החימצון-חיזור בשתי השכבות לאורך השנה, (ב) מיחזור סדימנטים ותנועת חלקיקים משולי האגם למרכזו- בין היתר תנועה אופקית באזור התרמוקלינה.

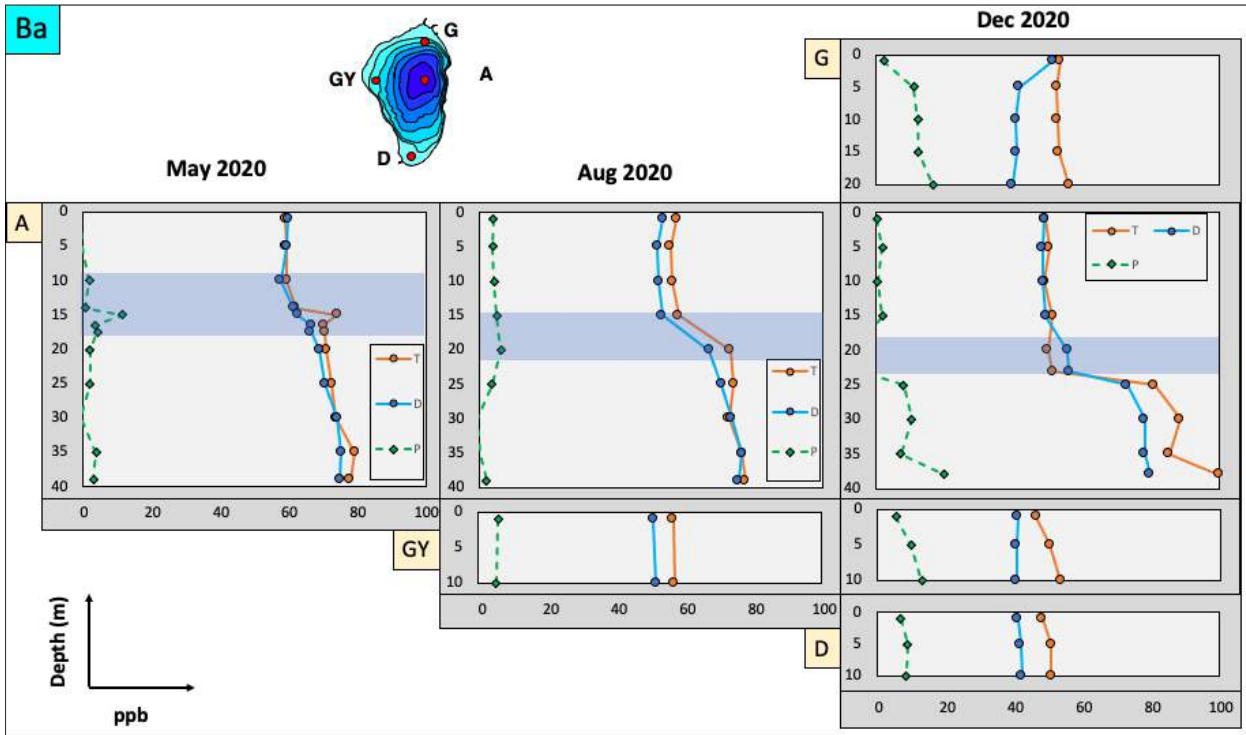


**איור 26:** פרופילי מנגן-Mn בעונות השונות ובתחנות השונות באגם. ריכח כללי: קו ועגולים כתומים, ריכח מומס: קו ועיגולים כחולים, ריכח חלקיקי (מחושב): קו מקווקו וריבועים ירוקים. פס כחול-אפור אופקי בפרופילי תחנה A במאי, אוגוסט ודצמבר מייצג את אזור המטלימניון בחדשים אלו.

בתנאים מחמצנים כמו באפילימניון, מנגן-Mn, נוטה להיות בערכיות +3 או +4 ויוצר תחמוצות קשות תמס. ניתן לראות באיור 26 כי באפילימניון ריכח המומס נמוך לאורך כל השנה. השיא האופייני של מנגן-Mn בתחתית המטלימניון או מעט מתחתיה, מתפתח ממאי (ריכח כללי -20 ppb) ועד לכ- 80 ppb באוגוסט ובדצמבר.

במאי ניתן לראות שיא קטן של ריכח חלקיקי, כ- 7 ppb בעומק 14 מ'. זאת ככל הנראה כתוצאה של הצטברות חומר חלקיקי השוקע באזור זה' המאופיין במעבר בין צפיפויות מים שונות. בתנאים המחזרים של ההיפולימניון, מנגן-Mn עובר למצב דו ערכי – מומס. ניתן לראות כי גרידאנט המומס משתנה ממאי כאשר רק תחתית ההיפולימניון מאופיינת בתנאים מחזרים כולל הימצאות סולפיד אל אוגוסט כאשר כל עמודת המים של ההיפולימניון מחזרת בנוכחות סולפיד, אז הריכח הכללי והמומס של מנגן-Mn גבוה והומוגני יחסית בעמודת המים התחתונה. בדצמבר הערכים דומים בהיפולימניון, עם עליה מסוימת של המומס על חשבון החלקיקי. כפי שתואר לעיל בפרק שונות מרחבית בכנרת, הריכח הכללי של מנגן-Mn באפילימניון גבוה יותר בליטוראל והוא מורכב בעיקרו מהפאזה החלקיקית, ואילו ריכחי המומס קטנים מאד בדומה לתחנה A.

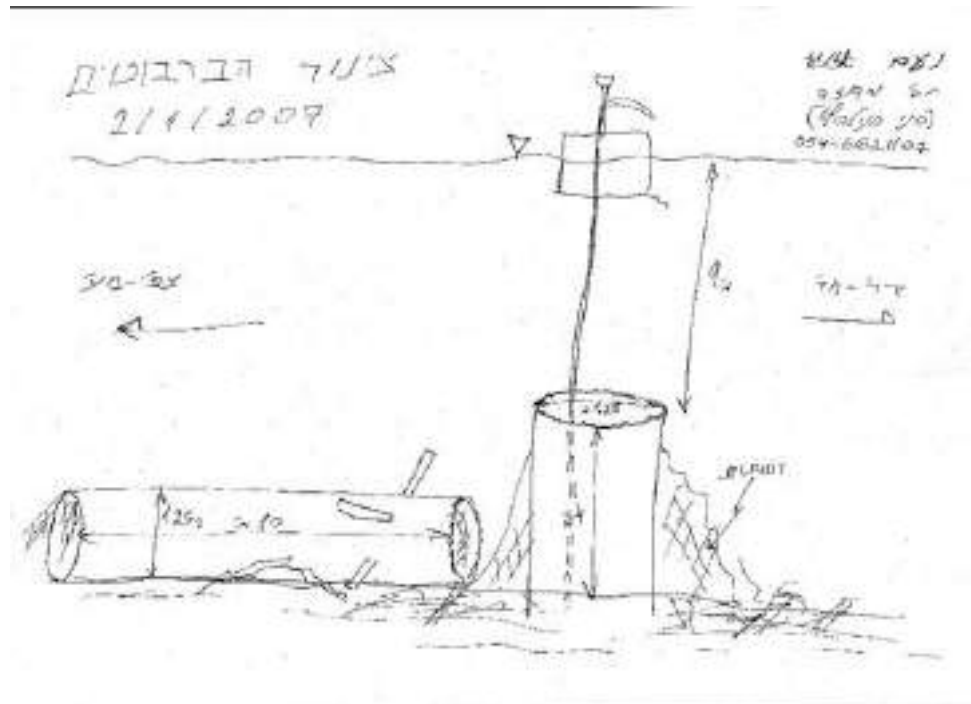
הערכים הגבוהים יותר של הפאזה החלקיקית כנראה קשורים למגע הנרחב יותר של עמודת המים של אזורי הליטוראל עם קרקעית האגם ומייצגת הרחפת סדימנטים והסעה אופקית למרכז האגם. תוך כדי תהליך זה שוקעים מרבית החלקיקים ונעצרים במטלימניון. מכניזם זה עשוי להסביר את הריכחים הגבוהים יותר של הפאזה החלקיקית יותר באפילימניון בדצמבר בתחנה A. היסוד בריום-Ba, מהווה דוגמה מעט שונה בהקשר להשפעה של תנאי חימצון-חיזור בעמודת המים על ריכחי המומס, החלקיקי והכולל. יסוד זה נחשב פחות מושפע מתנאי חימצון-חיזור בתנאי ה-pH של האגם, והוא מופיע בעיקר בפאזה המומסת. ניתן לראות באיור 27 כי ב- 2020 הריכח של המומס והכולל נמצא ממאי ועד דצמבר באותו סדר גודל של ערכים (50-80ppb). הפאזה החלקיקית של בריום-Ba עולה מעט באוגוסט במרכז האגם (עד ל- 5ppb) ואז שוב יורדת בדצמבר. הליטוראל מאופיין בערכי בריום-Ba כללי דומים למרכז האגם, אך הפאזה החלקיקית גבוהה יותר (10-15ppb) על חשבון ריכחי המומס. תופעה זו מוסברת כמו עבור מנגן-Mn ויסודות אחרים, על ידי המגע הנרחב של אזורי הליטוראל עם הקרקעית והרחפת סדימנטים. הסעה אופקית של חלקיקים למרכז האגם מלווה כנראה הן בשקיעה והן במעבר לפאזה מומסת. תופעה זו עשויה להסביר את הריכחים הגבוהים יותר של בריום-Ba כללי ומומס בהיפולימניון ביחס לאפילימניון של מרכז האגם. שטף מוגבר של חלקיקים בתקופת הסתיו/ תחילת החורף ושקיעה אל היפולימניון בעל נפח קטן יותר בדצמבר בהשוואה לאוגוסט, עשויה להסביר את הופעת הפאזה החלקיקית (כ-10ppb) בהיפולימניון והעליה של הריכח הכולל בתקופה זו. יש לציין כי הריכח של בריום-Ba מומס בתקופה זו נשאר זהה לזה של מאי ואוגוסט: כ- 80ppm. תופעה זו עשויה הייתה להעיד על תנאי גבול המסיסות של בריום-Ba בשכבה זו, אך זהו אינו המקרה שכן סקירת נתונים משנים עברו מראה כי ערכי Ba בפאזה המומסת עברו בהרבה את ה-80ppb בהיפולימניון.



**איור 27:** פרופילי בריום - Ba, בעונות השונות ובתחנות השונות באגם. ריכוז כללי: קו ועגולים כתומים, ריכוז מומס: קו ועיגולים כחולים, ריכוז חלקיקי (מחושב): קו מקוקו וריבועים ירוקים. פס כחול-אפור אופקי בפרופילי תחנה A במאי, אוגוסט ודצמבר מייצג את אזור המטלימנין בחודשים אלו.



## 2.12 מדידת פרמטרים בצינור הברבוטים



במימון  
רשות  
המים

גדעון טיבור, תמי זילברמן (מכון גיאולוגי), אדית לייבוביץ', עמי נשרי

- המגמות ארוכות הטווח מצביעות על ירידה התחלתית חריפה בריכוז הכלוריד בין 2009 לבין סוף 2011.
- קיימת גם מגמה עונתית, כאשר ריכוז הכלוריד בברבוטים עולה בכל שנה בתקופת החורף-אביב ויורד לאחר מכן.
- במהלך 2020 ריכוז הכלוריד היה בטווח שבין 1,395 מג"ל ועד 1,634 מג"ל.
- המגמה ארוכת הטווח של הניטרט היא של ירידה מריכוזים יחסית גבוהים ( $> 1$  מג"ל חנקן) לריכוזים שהם בסדר גודל של 0.3 מג"ל.
- במהלך 2020 ריכוז הניטרט השתנה בין 0.19 מג"ל בחודש ינואר ועד למקסימום של 0.63 מג"ל בחודש נובמבר.
- החל משנת 2021 תחזור להימדד מהירות הזרימה והמוליכות החשמלית בצורה רציפה.

### מטרות הניטור

- א. קביעת שטפי מים ומליחים מצינור הברבוטים לכנרת.
- ב. ניסיון לקביעת המנגנונים ששולטים בשפיעת נביעה זו.

**רקע**

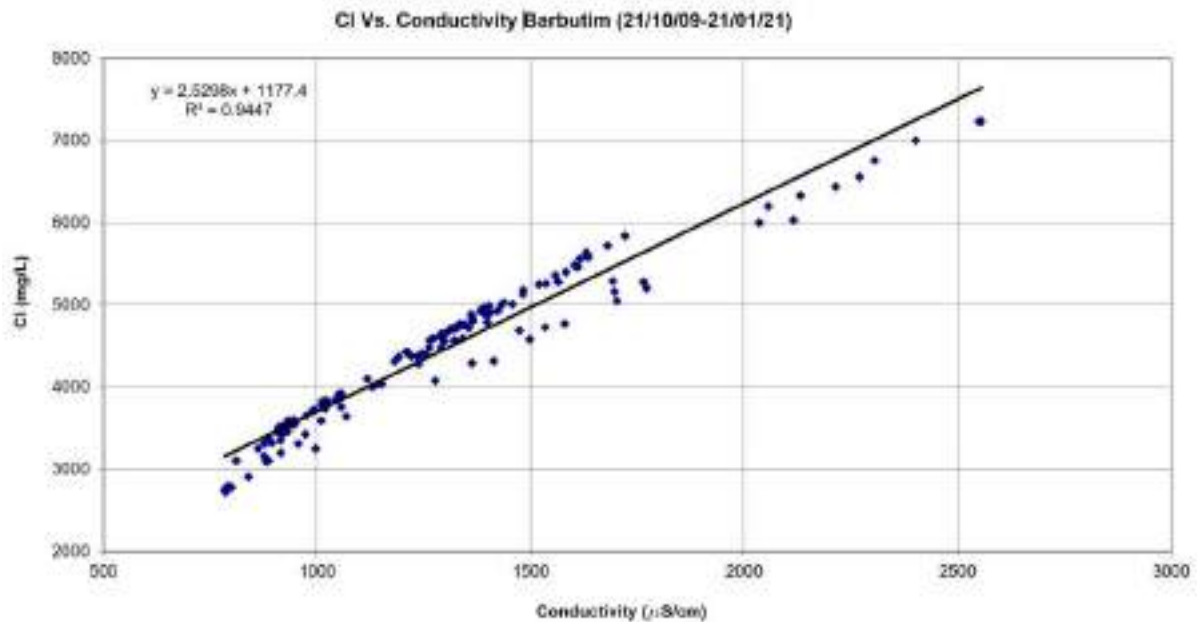
ניטור נביעת הברבוטים ע"י המעבדה לחקר הכנרת, חיא"ל, החל בדצמבר 2007 וכלל מגוון של פרמטרים. ניטור רציף של ספיקת המים בצינור הברבוטים החל בדצמבר 2007 והסתיים בסוף נובמבר 2016 עקב תקלה במכשיר. בשנים הראשונות לפרויקט, נוטרו ברציפות שעתית גם המליחות (מוליכות חשמלית) והטמפרטורה של המים. לאורך כל תקופת הניטור (מסוף 2007 עד 2020) בוצע דיגום חודשי שלאחריו קביעה מעבדתית של ריכחי כלוריד, ניטרט והרכב האיזוטופי של חמצן 18 במים. בשנים הראשונות כלל ניטור זה גם קביעת ריכחי מומסים עיקריים כגון סידן, מגנזיום, אלקליניות קרבונטית, נתרן, אשלגן סטרונציום ובריום. אנליזה של כלורידים ניטרט ואלקליניות מבוצעת במעבדה לחקר הכנרת, חיא"ל, ואילו אנליזות לפרמטרים אחרים (קטיונים עיקריים והרכב איזוטופי) מבוצעים במכון הגאולוגי בירושלים. בשנת 2020 בוצע הניטור במתכונת מצומצמת וכלל רק דיגום חודשי ואנליזות של כלוריד וניטרט במעבדת חיא"ל. דיגום דצמבר לא בוצע מאחר וצינור השאיבה נקרע והוחלף בתחילת ינואר 2021. החל משנת הניטור 2021 נחזור למדוד בצורה רציפה את מהירות הזרימה בצינור וכן מוליכות חשמלית.

**תוצאות ודין**

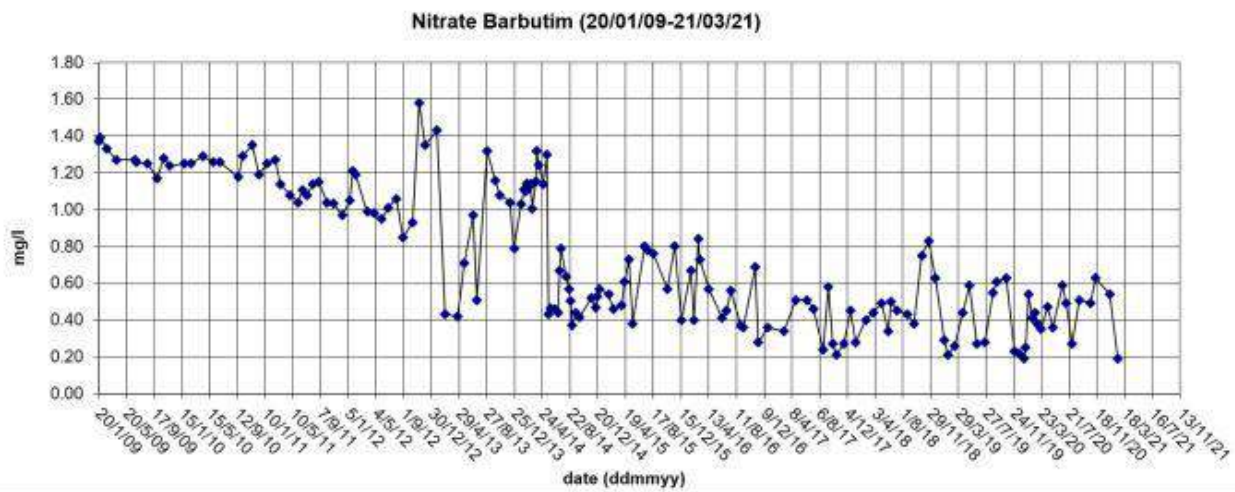
בין ינואר לתחילת מרץ 2020 ריכחי הכלורידים בצינור הברבוטים עלו מ-1,350 ל-1,636 מג"ל ולאחר מכן החלו בירידה מתונה עד 1,298 מג"ל בראשית ינואר (איור 28). המוליכות החשמלית מצויה במתאם גבוה עם ריכח הכלוריד (איור 29) והיא עוקבת אחרי המגמה שהתקבלה בכלוריד. ריכחי הניטראט (איור 30) נעו בין 0.19 בחודש ינואר עד 0.63 מג"ל בחודש נובמבר כאשר ערכים גבוהים היו גם בחודשים ינואר ויוני. המגמות ארוכות הטווח (ינואר 2009 - דצמבר 2020) מצביעות על ירידה התחלתית חריפה בריכח הכלוריד בין 2009 לבין סוף 2011 מכ- 2700 מג"ל עד כ-800 מג"ל. מסתבר שמעבר למגמות הרב-שנתיות קיימת בכל שנה גם מגמה עונתית, כאשר ריכח הכלוריד בברבוטים עולה בכל שנה בתקופת החורף-אביב (עגולים צהובים באיור 28) ויורד לאחר מכן. המגמה ארוכת הטווח של הניטראט (איור 30) היא של ירידה מריכחים יחסית גבוהים ב-2009 (בערך 1.4 מג"ל) לבין כ-0.6 מג"ל כיום. לדעתנו, ירידה זו משקפת השתתפות פחותה והולכת של האקוויפר האאוקני הפריאטי בזרימות לנביעה בטבחה בד בבד עם עליה יחסית בספיקה שמוצאה באקוויפר חבורת יהודה העליונה שהוא כלוא באזור זה. גם לספיקת המים מתכונת עונתית (איור 31) כאשר בחורף-אביב היא גדולה יותר מאשר בקיץ-סתיו. ההתנהגות העונתית הברורה היא מפתח להבנת ההידראוליקה של הנביעה ולכן היא גם מספקת הסבר להתנהגות הרב-שנתית. כך בברבוטים גשמים ועלית המפלסים באקוויפרים המזינים מתבטאים בעליה בריכח הכלוריד ובספיקת המים של הנביעה. מאידך במעיינות טבחה היבשתיות עונת הגשמים מביאה אמנם גם כן לעליה בספיקה אבל גם למיהול עם מים מתוקים ולירידת ריכח הכלוריד. השנים שבין 2009 עד סוף 2011 אופיינו כתקופה של בצורת מתמשכת וכמו כן היוו את העידן שבו החלה שאיבה מוגברת של הבארות המפיקות שנקדחו מצפון מערב לכנרת ובד בבד נפילה חריפה (כמה עשרות מטרים) במפלסי מי התהום שסמוכים לאגם. דהיינו, תקופה שבה ניתן היה לצפות לספיקות שנתיות ירודות של מים מתוקים מהאקוויפרים ולמעשה זו אמורה להיות תמונת ראי של האפקטים שבהם ניתן לצפות בברבוטים בחורף-אביב.



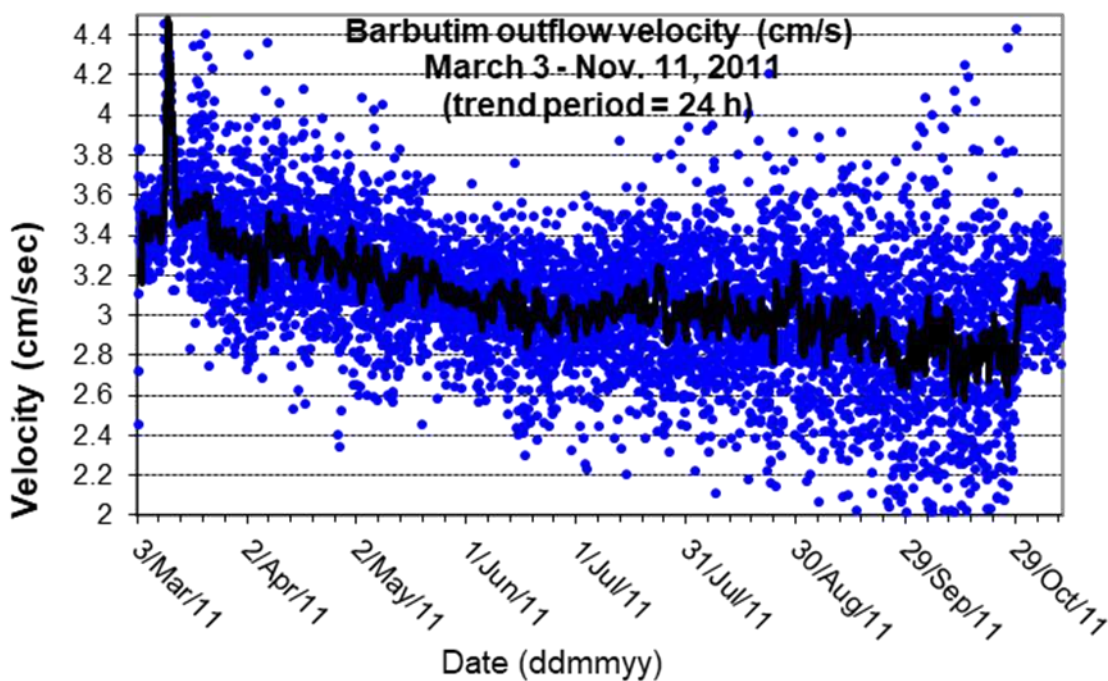
**איור 28:** ריכוז כלוריד בברבוטים 2009-2020 (במג"ל). עיגולים כתומים מציינים את החודשים ינואר-פברואר.



**איור 29:** ריכוז הכלוריד כנגד המוליכות החשמלית בברבוטים (מיקרו-סימנס לס"מ).



**איור 30:** ריכוז הניטרט בברבוטים 2019-2021 (במיליגרם חנקן לליטר).



**איור 31:** הדגם העונתי של המהירות של הברבוטים ("ספיקת מים") שנמדדה בצינור הברבוטים ממרץ עד אוקטובר 2011.

## 2.13 איתור נביעות מלוחות לא מוכרות בכנרת



מפת מיקום הבורות שהתגלו במיפויי המולטיביים השונים (ריבועים לבנים) ומיקום אנומליות תרמליות שפוענחו מלוויין Landsat 8.

**ניטור  
מורחב:  
במימון  
רשות  
המים**

**עמי נשרי, גדעון טיבור, ירון בארי-שלוין**

- המתאם בין הכלוריד לנתרן, בתחום הריכוזים שבהם השתנה ה"ברבוטים" בשלוש השנים האחרונות, הוא כמעט מושלם  $R^2=0.984$
- נביעות הברבוטים ממליחות בחורף.
- ניתן להשתמש ביחס  $Mg/Cl$  בכדי לאתר התגברות מרכיב מי התהום המתוקים בנביעת הברבוטים.

**מטרות המחקר**

- א. לאפיין את ההרכב הכימי והאיזוטופי של המקורות המלוחים השאריתיים בקרקעית הכנרת.
- ב. להגדיר לפי סקרי בתימטריה רשימת אתרים חשודים בכניסת תמלחות שאריותיות לכנרת (למשל: מכתשים פעילים).
- ג. למפות אנומליות תרמליות במי הכנרת תוך שימוש בצילומי לוויין ובמצלמה תרמלית על רחפן כדי לזהות אתרים חשודים נוספים.
- ד. לבחון באמצעות דיגום ואנליזה כימית-איזוטופית "אתרים חשודים" אלו כדי לבחון האם הרכב המים הדולף באתר זה מתאים לתמלחות השאריותיות העיקריות של הכנרת.

**רקע**

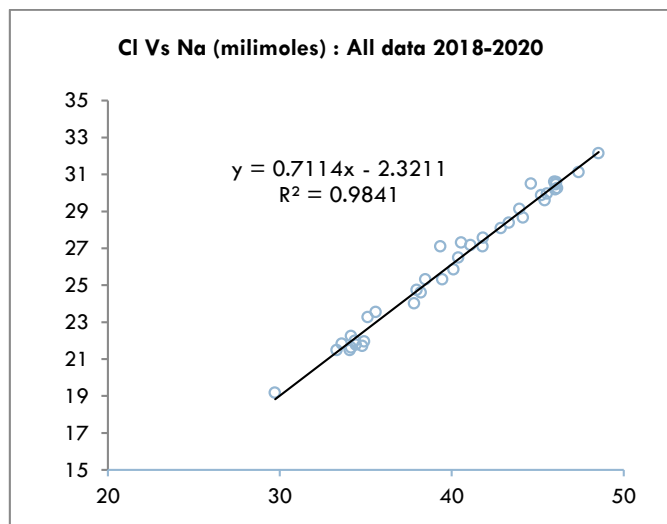
בעיית המלחת הכנרת מעסיקה את מנהלי משק המים כבר שנים רבות. אחד האפקטים הברורים של שנות הבצורת האחרונות, המלוות גם בירידה משמעותית בשאיבות מהכנרת, היא החרפה משמעותית בהמלחת הכנרת. מגמות אלו צפויות להמשיך אם לא יחול שינוי משמעותי באחד מהגורמים הבאים: כניסת מים מתוקים, שאיבות, ירידה בכניסת מים מלוחים. בהתחשב במצב זה, עולה הצורך לחדש את המאמץ להבין את פריסת השפיעות הלא מזוהות של מים מלוחים לכנרת, זאת כשלב ראשון לבחינת הפוטנציאל לטיפול וסילוק של לפחות חלק מהן מהאגם. לכנרת מקורות מליחות שונים שמרביתם תת-ימיים. הספיקה הכוללת של מים ועומסי הכלוריד הכוללים של מקורות אלה מוערכים באמצעות מאזני מים –מלח-חום. כיום, לאחר ההטיה של מעיין פוליה A בסוף שנת 2017 באמצעות כיפת הברזל, הכניסה הצפויה מוערכת ב-60,000 טון כלוריד לשנה. כרבע מעומס זה מקורו בנביעות שמיקומן והרכבן הכימי ידוע, אולם ספיקות המים בהם (ומכאן ספיקות המליחות) בלתי ידועות. מאידך, מיקום חלחול (כניסה) שלושת הרבעים הנוותרים, להלן התמלחות השאריותיות, אינו ידוע ואילו הרכבן הכימי הטיפוסי משוער. על מנת לאתר ולזהות את החשיבות היחסית של אזורים בהם דולפים מים מלוחים אל האגם דרך קרקעיתו, מוצע לשלב כלים גיאוכימיים ומדידות פיזיקליות (אנומליה תרמלית). הגדרה מדויקת יותר של ההרכב הכימי (ואולי גם האיזוטופי) של אתרי חלחול בלתי ידועים אלה יהיה חשוב במחקר לאיתורם. כלי נוסף שאנו מציעים לאיתורם הוא שימוש במיפוי אנומליות תרמליות של מי הכנרת בהנחה ששפיעות החלחול משפיעות על פני המים שסמוכים להם. זאת מכיוון שבמקורות ידועים שונים נראה שלמליחות מתלווה חום גבוה יחסית של המים. המחקר כולל ארבעה שלבים: (א) אפיון כימי איזוטופי של המערכת הכללית של הכנרת, (ב) בניית מאגר אתרים חשודים לנביעה מלוחה בכנרת, (ג) מיפוי אנומליות תרמליות בפני מי הכנרת (ו-ד) אפיון וסימון אתרים על סמך הרכב כימי ואיזוטופי של מים שנובעים באתרים אלו. בגלל מגבלות הקורונה בשנת המחקר 2020 בוצעו שני השלבים הראשונים בלבד.

**תוצאות ודין**

שלב א' כולל אנליזות כימיות ואיזוטופיות של מגוון מקורות מליחות כגון נביעת הברבוטים. האנליזה כוללת הן את ההרכב של היונים העיקריים ואילו באנליזה האיזוטופית נבדקו  $\delta^{18}\text{H}_2\text{O}$  והאקטיביות של הרדיו-איזוטופ  $^{14}\text{C}$  (DIC). הנחת הבסיס שלנו היא ששינויי מליחות במעיינות נובעים משינויים ביחס שבין ספיקות המים המלוחים למי תהום מתוקים. דהיינו, שינויים ביחס שבין תרומת מרכיב (י) הקצה המלוח (end member) לבין תרומת מרכיב (י) הקצה המתוק (ים). מאחר חזו איננה מדידה ישירה של ספיקה, רמת המליחות מספקת אך ורק אינפורמציה עקיפה שממנה ניתן לקבל רמז לשינויי הספיקה. האינפורמציה המוצגת בטבלה 4 כוללת מידע על מספר קטיונים שמסיבות שיפורטו להלן יש להם השפעה שונה על האינטרפרטציה שמתקבלת.



בהקשר זה בחנו שני מקרים: 1. של יונים קונסרבטיביים לחלוטין במערכת זו כגון כלוריד ונתרן שניתן להניח לגביהם שהמקור הכמעט בלעדי הוא מהתמלחת העמוקה, ו-2. של יונים שהאספקה שלהם לתערובת שיוצאת בנביעה היא גם מהמרכיב המתוק וגם מהמרכיב המלוח, כמו למשל מגנזיום וסידן. המתאם בין הכלוריד לנתרן, בתחום הריכחים שבהם השתנה ה"ברבוטים" בשלוש השנים האחרונות (בין ל-1053 ל-1721 מיליגרם לליטר) הוא כמעט מושלם  $R^2=0.984$  (איור 32). מאחר והאנליזות לשני יונים אלה בוצעו בשיטות אנליטיות בלתי תלויות ניתן להסיק מכך שהאיכות האנליטית של שניהם מעולה וששינויים בריכחיהם הם בעלי משמעות זהה. ריכחים נמוכים שלהם מצויים במרכב הקצה המתוק ומסיבות שונות, שלא יפורטו כאן, אנו סבורים שריכח הכלוריד במרכיב זה הוא בסדר גודל של 20 מג"ל ושל נתרן כ-10 מג"ל. במרבית תחום המליחויות הבינוניות והגבוהות של התמלחות המקומיות המתאם בין יונים אלה דומה וממנו היחס המולרי  $Na/Cl = 0.71$ .



**איור 32:** מתאם בין ריכח הכלוריד (X) לבין ריכח הנתרן (Y) בכלל הדטה של 2018-2020 דהיינו, בתחום ריכחי הכלוריד שבין 29.7 ל-48.5 מילימולר (1053-1720 מג"ל).

**טבלה 4:** ניטור כימי (קטיונים עיקריים) ואיזוטופי ( $\delta^{18}\text{H}_2\text{O}$ ) של נביעת הברבוטים בין השנים 2018-2020.

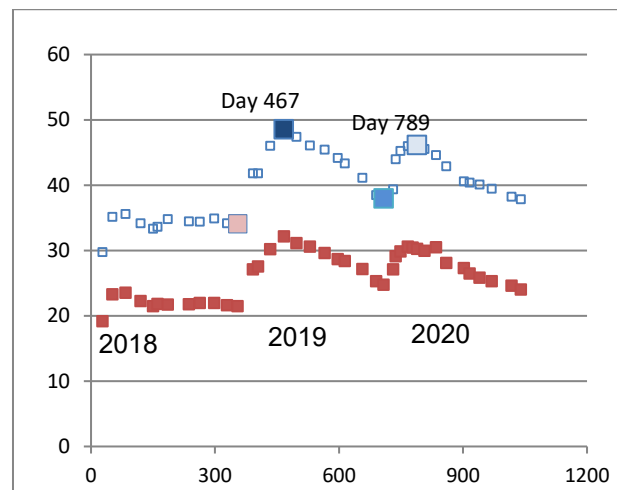
Cl	Na	K	Ca	Mg	Sr	d18O	תאריך
mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	‰	
1054	441	19	176	81	3.84		28/1/18
1245	535	23	181	90	4.40		21/2/18
1262	541	23	193	91	4.51		25/3/18
1211	511	21	199	87	4.35		1/5/18
1181	494	21	197	86	4.26		30/5/18
1192	502	23	199	88	4.32		11/6/18
1234	499	20	181	87	4.03	-5.54	5/7/18
1221	501	20	202	87	4.41	-5.48	22/8/18
1219	505	21	196	88	4.47	-5.42	17/9/18
1238	505	23	210	88	4.52	-5.62	22/10/18
1211	497	21	211	88	4.48	-6.46	21/11/18
1208	494	20	214	88	4.44	-6.09	19/12/18
1482	623	31	260	101	5.26	-6.28	28/1/19
1483	634	24	252	101	5.31	-5.55	12/2/19
1632	694	27	293	108	5.76	-5.48	##### #
1721	739	30	280	112	5.98	-5.69	16/4/19
1680	716	27	293	109	5.89	-5.82	15/5/19
1634	703	28	289	109	5.81	-5.59	18/6/19
1610	681	26	264	106	5.63	-5.56	23/7/19
1565	659	26	266	104	5.49	-5.60	25/8/19
1536	653	25	249	103	5.44	-5.48	12/9/19
1457	625	26	248	104	5.25	-5.36	23/10/19
1364	582	22	249	95	5.02	-5.94	27/11/19
1346	569	22	253	95	4.96	-5.71	15/12/19
1395	623	27	266	97	5.11	-5.48	8/1/20
1558	670	27	255	104	5.48	-5.37	14/1/20
1603	687	26	291	105	5.67	-6.26	26/1/20
1630	704	27	304	109	5.82		12/2/20
1633	700	28	307	108	5.85	-5.75	23/2/20
1636	696	27	305	108	5.81	-5.99	4/3/20
1615	689	26	302	106	5.77	-6.10	22/3/20
1582	701	27	298	104	5.65	-5.66	20/4/20
1520	646	26	291	102	5.52	-5.37	11/5/20
1438	628	24	279	100	5.29	-5.71	23/6/20
1432	609	24	281	100	5.24	-5.47	9/7/20
1422	594	27	276	98	5.14	-5.92	3/8/20
1399	582	24	272	97	5.07	-5.75	2/9/20
1355	566	22	267	96	4.98	-5.61	20/10/20
1341	552	26	265	95	4.93	-6.30	12/11/20
1520	<b>649</b>	<b>26</b>	<b>277</b>	<b>103</b>	<b>5.450</b>	<b>-5.717</b>	<b>ממוצע</b>





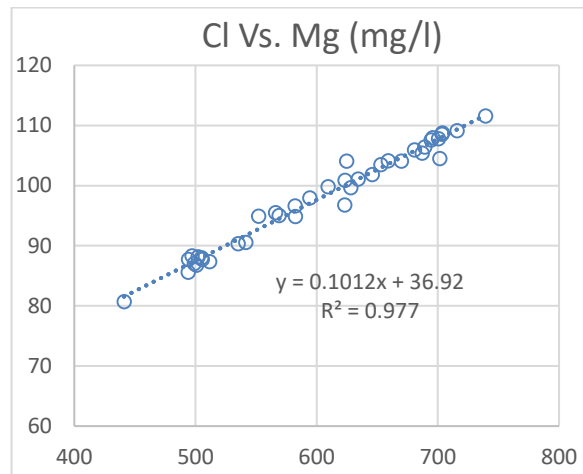
מאיור 33 מסתבר שאכן גם המגמות העיתיות של הכלוריד והנתרן דומות וניתן להבחין שבשנת הבצורת של 2018 כמעט ולא ניכרת מגמה עונתית ואילו בשנים ה"גשומות" של 2019 ו-2020 אובחנה מגמה עונתית ברורה. בתחילת החורף מובחנת עליה יחסית חדה במליחות, (איור 33- מעבר מריבוע כתום לריבוע שחור ב-2019 ומכחול לתכלת ב-2020). לאחר מכן, באביב-סתיו, חלה ירידה הדרגתית במליחות. ככלל שינויים במליחות בברבוטים מהווים אינדיקציה לשינוי היחס שבין ספיקות המקורות האקוויפריים המתוקים לבין אלה המלוחים.

במודלים שהוצעו בעבר עלית המליחות החורפית בפוליה A שימשה כאחת ההוכחות לקיום מודל הלחץ ההידראולי של מי הגשם על האקוויפר המלוח שמתחתם. הטענה הייתה שהעומד ההידראולי של גוף המים המלוח נקבע במרחקים של כמה קילומטר מחופי האגם, במקום שבו יש לאקוויפרים רצף הידראולי ורטיקלי שמאפשר זאת. איננו מסכימים עם מודל זה מסיבות שונות שלא כאן המקום לפרטם. ההבדלים העונתיים בגרדיאנטים וההבדלים שבין שנה לשנה מלמדים אותנו לגבי התגובה "ההידראולית" של מערכת מי התהום שמזינה את הנביעות. כאן המקום לציין שאין הבדלים גדולים בין הגרדיאנטים בשנים הגשומות 2019 ו-2020, אולם יש הבדל מאוד משמעותי ביניהם לבין שנת הבצורת של 2018. בשנה זו הקפיצה החורפית במליחות הייתה מינורית, וקטנה בסדר גודל מבשנים הגשומות.

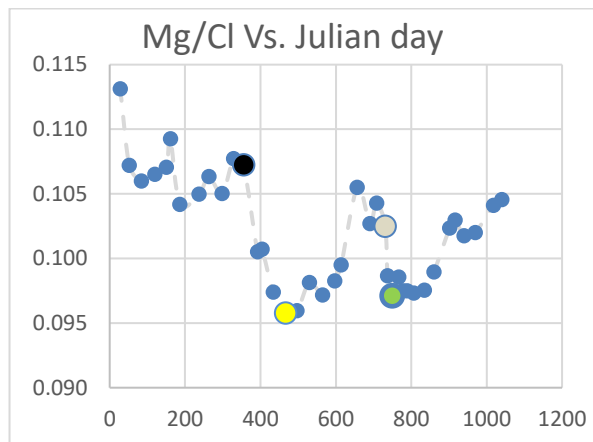


**איור 33:** הסדרות העיתיות (מספרי ימים יוליאנים בציר ה-X) של כלוריד (למעלה ריבועים ריקים) ונתרן (למטה באדום) ביחידות של מילימול בליטר בשנים 2018-2020. הריבועים הגדולים הצבעוניים מסמלים את תחילת העלייה החורפית ופסגת העלייה החורפית במליחות, בכל שנה.

הסידן והמגנזיום הם מומסים שכאמור ניתן להניח לגביהם שהריכזים שלהם במי התהום המתוקים הם משמעותיים אבל הם מצויים גם בריכז גבוה בתמלחות. במי התהום המתוקים הם עשויים להיתרם כתוצאה מאינטראקציה עם המסלע הקרבונטי. אולם, כאשר בוחנים את המתאם שבין ריכז הכלוריד לבין המגנזיום בברבוטים (איור 34) מתקבל מתאם גבוה (0.977) שמאפיין מומסים שאינם נתרמים מהמסלע. למרות זאת בסדרה העיתית של היחס  $Mg/Cl$  (איור 35) ניתן להבחין בשינויים עונתיים ברורים. למשל בחורף שבין סוף דצמבר 2019 (עיגול שחור) ועד סוף מרץ (עיגול צהוב) חלה ירידה ניכרת ביחס זה בד בבד עם ההמלחה של הברבוטים (איור 33). כמו כן, בחורף של שנת 2020, בין סוף ספטמבר 2019 לבין אמצע ינואר 2020 (עיגולים ירוקים), שוב חלה עליה במליחות הברבוטים בד בבד עם ירידה ביחס  $Mg/Cl$ . מכאן שהתרומה היחסית של מגנזיום מהמסלע למי התהום היא אמנם נמוכה יחסית, אבל בכל זאת מספיק גבוהה בכדי שניתן יהיה לאבחן אותה באמצעות היחס  $Mg/Cl$ .

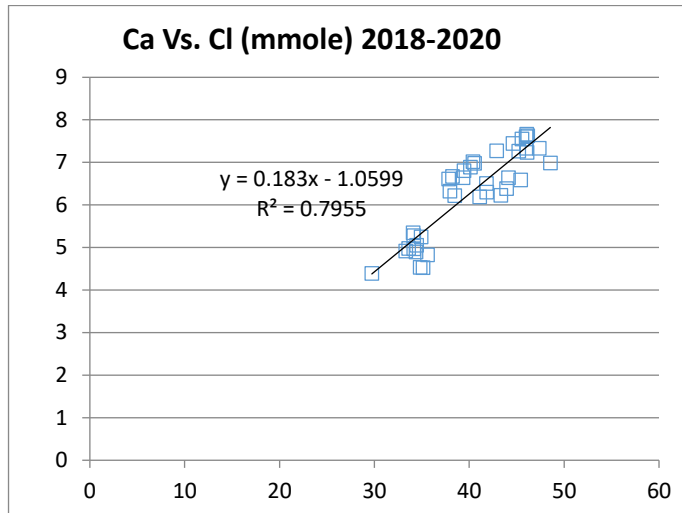


**איור 34:** מתאם בין ריכוז הכלוריד למגנזיום בכלל הדטה של 2008-2020.

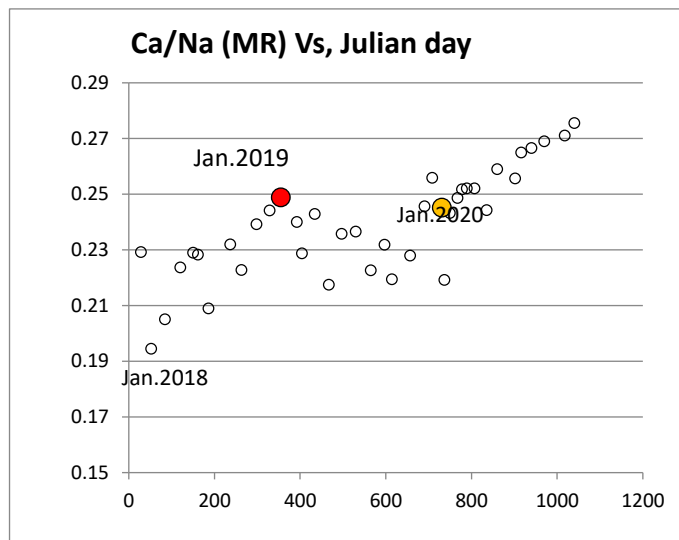


**איור 35:** סדרה עיתית (בסדר יומי עולה בין ראשית ינואר 2017 ועד לסוף דצמבר 2020) של היחס Mg/Cl בברבוטים. עגולים גדולים: תחילת וסוף החורף. במשך החורף נפילה חריפה ביחס Mg/Cl.

הסידן הוא קטיון שהריכוז שלו במי התהום המתוקים (מרכיב הקצה המתוק) הוא משמעותי והוא קרוב לוודאי בסביבות ערך הרוויה של מי התהום המתוקים לקלציט. דהיינו, בערך 1.4 מילימול (או קרוב ל-60 מג"ל). אי לכך העקום שמייצג את היחס שבין הסידן לבין מרכיב "מלוח טיפוסי" כגון כלוריד, אמור להתאפיין בשיפוע לינארי שאיננו מתכנס לראשית הצירים אלא לערך שונה. בניגוד למומסים אחרים כגון סודיום, המתאם הלינארי שבין קלציום לכלוריד הוא לא טוב (ראה איור 36) ולמעשה קיימת נטייה לנפילה של העקום המייצג יחסי Ca/Na במליחיות נמוכות יותר. במשך מרבית 2020 חלה ירידה רציפה במליחות (כלוריד או נתרן-איור 33) בברבוטים אולם בד בבד חלה עליה ביחס Ca/Na (איור 37). זהו מהלך עניינים הגיוני בהתחשב בכך שמי התהום הם עשירים יחסית ב-Ca.



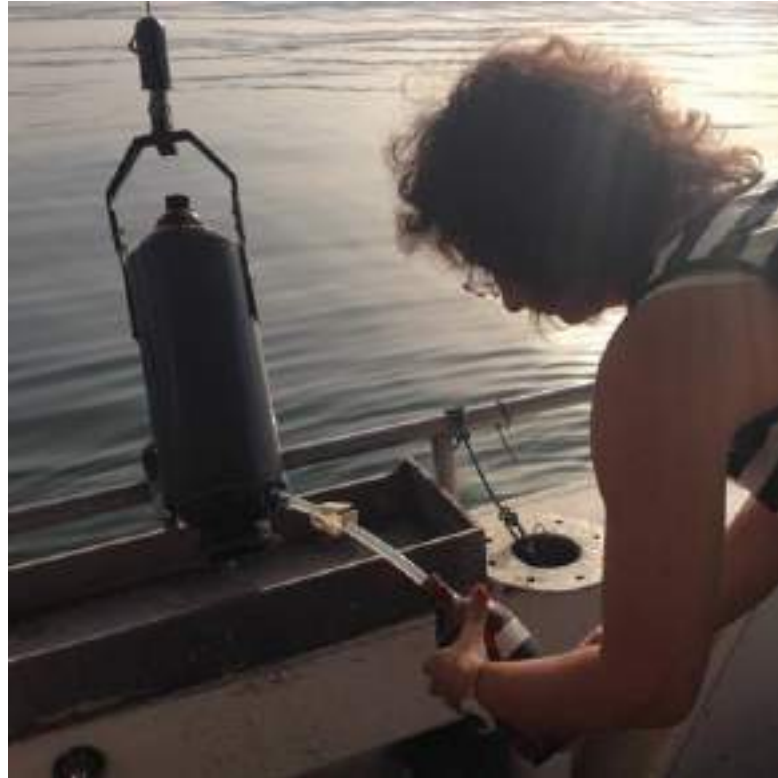
**איור 36:** מתאם כלוריד לסידן בין השנים 2018-2020.



**איור 37:** סדרה עיתית של היחס בין סידן לנתרן.

שלב ב כלל אינטגרציה במערכת GIS של כל הבורות הקיימים שזוהו במיפויי המולטיבים מהשנים 2008 (כל הכנרת), 2016 (חמי טבריה ובורות מעגן) ו- 2019 (אזור הברבוטים). לבסיס נתונים זה גם הוכנסו מיקום האנומליות התרמליות שזוהו מצילומי לוויין מסוג Landsat 8 באזורים בסמוך לחוף (תמונה בתחילת הדו"ח).

## 2.14 חיידקים אינדיקטורים לזיהום צואתי



**במימון  
רשות  
המים**

**עכסה לופו, נחמה רושנסקי, שירה ניניו**

- ב - 2020 נמדדו ריכוזים גבוהים של חיידקים אינדיקטורים לצואה בתקופת החורף, בדומה למה שנמדד ב- 2019. עיקר הזיהום נמצא מול שפך הירדן ובצפון האגם, אולם גם בנקודות נוספות כגון בכניסת הירמוך נרשמו חריגות.
- מקור הזיהום נבחן בשיטות מולקולריות ונמצא שבמקרים רבים מדובר במעלי גירה, אולם נמצאו גם זיהומים ממקור ביוב וגם זיהום מחזירים.

### רקע

במסגרת הניטור השגרתי נבחנו סמנים (אינדיקטורים) חיידקים לזיהום צואתי המצביעים על זיהום בקטריאלי של מי האגם. חיידקים מזהמים יכולים להגיע לאגם כתוצאה ממספר גורמים שונים, ביניהם פעילות של בעלי חיים באזור אגן ההיקוות, עבודות בניה או כשל של קו ביוב. מעקב אחר חיידקים אינדיקטורים מאפשר להתחקות אחר כניסת מזהמים אל הכנרת ולאמוד את תזמון הזיהום, מקורו, פיזורו וההשפעה שלו על האגם כגוף מים טבעי וכמקור למי שתיה ונופש. לצורך ניטור זה נדגמים מים בתחנות ייעודיות אחת לחודש. מוצגות תוצאות הבדיקות ב - 15 אתרים סביב הכנרת הכוללים:

- אתרי שאיבה.
- חופים מייצגים.
- אתרי כניסה של נחלים לכנרת.

### **שיטות**

התוצאות ניתנות כמספר חיידקים ל-100 מ"ל מים. הבדיקות נעשו בשיטת ה-Membrane filter והחיידקים שנבדקו: קוליפורמים צואתיים (Fecal coliform), אשריכיה קולי (*Escherichia coli*) ואנטרוקוקי (Enterococci).

### **תוצאות ודיון**

ברבעון הראשון של 2020 נרשמו ריכחים גבוהים מאוד של חיידקים אינדיקטורים לצואה בכנרת. הספירות הגבוהות ביותר של קוליפורמים צואתיים ל-100 מ"ל היו מול שפך הירדן: 1,197, 9500 ו-293 בחודשים ינואר, פברואר ומרץ בהתאמה (טבלה 5). התוצאות היו קרובות לאלו שהתקבלו ב-2019, וגבוהות בהרבה ממה שהתקבל שנה קודם לכן ב-2018. בתקופה זו של השנה נובע הזיהום מזרימות שיטפוניות באגן ההיקוות הכוללות גם נגר עילי, ובהתאם עיקר הזיהום ניכר מול שפך הירדן. עם זאת, גם בתחנות אחרות בצפון ודרום הכנרת התקבלו ספירות גבוהות יחסית של קוליפורמים צואתיים, למשל במסעודיה נספרו 2140 קוליפורמים צואתיים ב-100 מ"ל בחודש פברואר, ובתחנת הירמוך נספרו 360 קוליפורמים צואתיים ב-100 מ"ל בחודש ינואר (טבלה 5).

**טבלה 5 :** תוצאות ספירות אינדיקטורים חידיקים לזיהום צואתי (מספר חיידקים ב 100 מ"ל מים) בתחנות שונות ב- 2020. תקן מי שתיה מחייב 0 חיידקי צואה ל 100 מ"ל, ובחופי רחצה מותרים קוליפורמים צואתיים (Fecal c). עד 400 ל 100 מ"ל ואנטרוקוקים עד 105 ל 100 מ"ל.

STATION:JORDAN				STATION:TIBERIAS INTAKE				STATION:WATER CARRIER INTAKE				STATION:JORDAN VALLEY INTAKE			
	Fecal&C.	E.Coli	Enteroc.		Fecal&C.	E.Coli	Enteroc.		Fecal&C.	E.Coli	Enteroc.		Fecal&C.	E.Coli	Enteroc.
Jan.	1197	1130	234	Jan.	233	170	112	Jan.	107	50	32	Jan.	16	25	14
Feb.	9500	1800	423	Feb.	25	11	24	Feb.	13	4	12	Feb.	48	20	22
Mar.	293	112	na	Mar.	8	5	3	Mar.	6	1		Mar.	10	3	2
Apr.	70	18	19	Apr.	6	5	4	Apr.	11	0	8	Apr.	2	2	19
May.	6	8	9	May.	4	1	1	May.	1	0	4	May.	1	1	2
Jun.	6	2	3	Jun.	2	1	2	Jun.	4	0	4	Jun.	0	3	0
Jul.	17	5	23	Jul.	7	7	2	Jul.	2	0	1	Jul.	8	2	9
Aug.	8	1	1	Aug.	2	2	2	Aug.	3	2	1	Aug.	1	0	0
Sep.	2	1	1	Sep.	12	5	1	Sep.	2	0	1	Sep.	4	0	1
Oct.	0	5	0	Oct.	3	2	2	Oct.	13	4	1	Oct.	1	0	0
Nov.	7	3	2	Nov.	55	18	10	Nov.	6	5	5	Nov.	2	0	1
Dec.	6	2	3	Dec.	49	17	15	Dec.	3	1	4	Dec.	20	18	21

STATION:KURSY				STATION:GOLAN INTAKE				STATION:AMNUN				STATION:MASUDIA			
	Fecal&C.	E.Coli	Enteroc.		Fecal&C.	E.Coli	Enteroc.		Fecal&C.	E.Coli	Enteroc.		Fecal&C.	E.Coli	Enteroc.
Jan.	41	25	9	Jan.	34	19	7	Jan.	77	38	37	Jan.	475	97	226
Feb.	68	76	89	Feb.	32	22	24	Feb.	341	55	259	Feb.	2140	710	531
Mar.	30	15		Mar.	2	1		Mar.	13	7		Mar.	87	14	
Apr.	12	0	4	Apr.	13	0	0	Apr.	10	1	1	Apr.	25	8	9
May.	6	2	10	May.	1	0	3	May.	4	1	27	May.	3	2	27
Jun.	28	12	4	Jun.	17	6	8	Jun.	8	3	4	Jun.	5	4	1
Jul.	69	30	11	Jul.	2	0	1	Jul.	5	4	2	Jul.	4	4	1
Aug.	15	7	1	Aug.	0	0	5	Aug.	9	8	5	Aug.	5	3	2
Sep.	1	1	0	Sep.	3	0	1	Sep.	2	0	0	Sep.	2	0	1
Oct.	9	0	0	Oct.	10	0	2	Oct.	25	10	1	Oct.	1	0	0
Nov.	2	0	1	Nov.	33	8	17	Nov.	6	3	5	Nov.	5	5	9
Dec.	141	30	7	Dec.	10	5	14	Dec.	26	6	4	Dec.	5	2	3

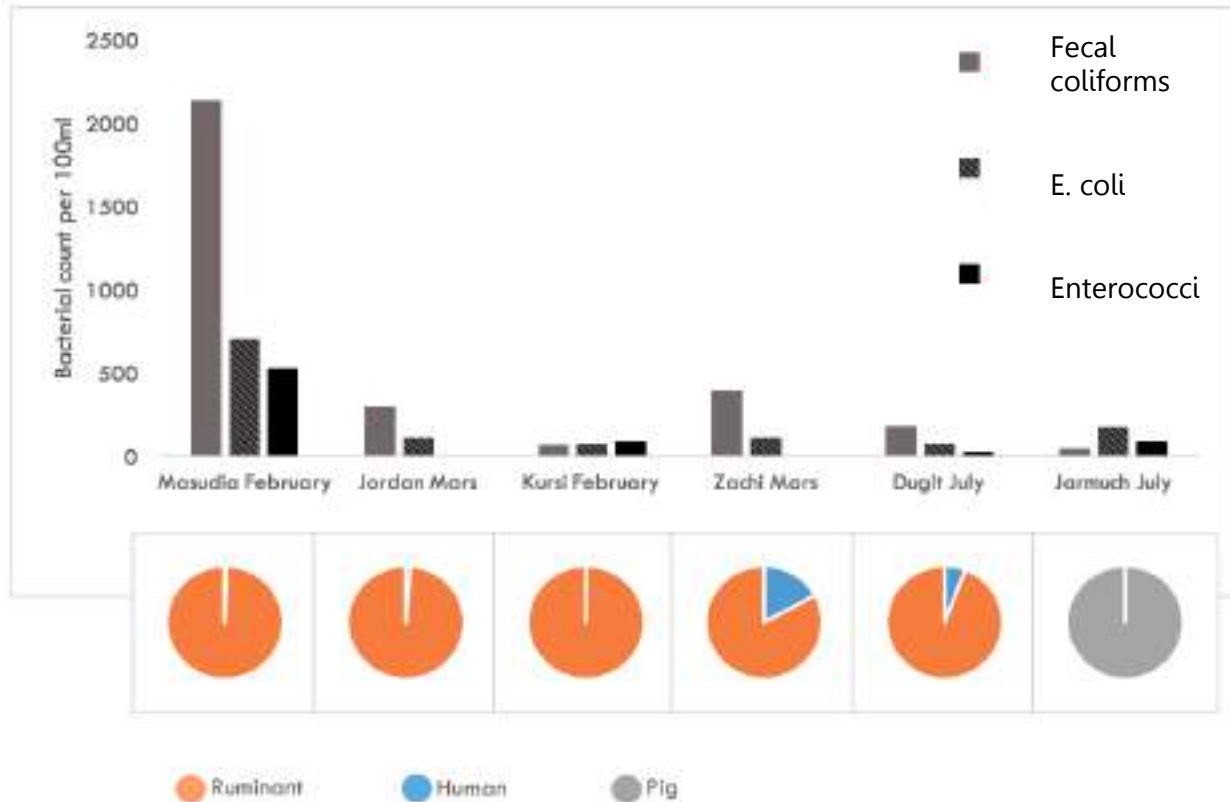
STATION:MAAGAN				TABLE 15 STATION:TZALMON				STATION:YARMUCH				STATION:AMUD			
	Fecal&C.	E.Coli	Enteroc.		Fecal&C.	E.Coli	Enteroc.		Fecal&C.	E.Coli	Enteroc.		Fecal&C.	E.Coli	Enteroc.
Jan.	15	23	9	Jan.	130	82	124	Jan.	360	275	186	Jan.	114	167	113
Feb.	12	18	14	Feb.	35	23	10	Feb.	83	39	73	Feb.	2	12	2
Mar.	22	8	1	Mar.	1	1	3	Mar.	18	12	4	Mar.	1	2	7
Apr.	3	7	5	Apr.	0	0	0	Apr.	6	10	2	Apr.	13	1	1
May.	0	0	2	May.	0	0	4	May.	0	0	2	May.	0	0	0
Jun.	0	0	0	Jun.	0	1	0	Jun.	1	0	2	Jun.	0	0	0
Jul.	8	12	3	Jul.	4	0	46	Jul.	45	175	90	Jul.	6	3	4
Aug.	2	3	1	Aug.	2	0	0	Aug.	2	1	0	Aug.	1	1	2
Sep.	2	0	1	Sep.	0	1	0	Sep.	1	0	0	Sep.	11	2	2
Oct.	3	1	0	Oct.	0	0	0	Oct.	5	5	1	Oct.	1	0	0
Nov.	1	2	1	Nov.	1	0	0	Nov.	4	3	2	Nov.	7	5	4
Dec.	28	46	29	Dec.	7	7	70	Dec.	65	79	70	Dec.	5	0	3

STATION:DUGIT				STATION:ALUMOT				STATION:ZACHI			
	Fecal&C.	E.Coli	Enteroc.		Fecal&C.	E.Coli	Enteroc.		Fecal&C.	E.Coli	Enteroc.
Jan.	19	19	10	Jan.	24	19	4	Jan.	53	38	65
Feb.	43	74	53	Feb.	9	7	9	Feb.	760	305	207
Mar.	3	5		Mar.	18	10	4	Mar.	396	113	
Apr.	3	0	5	Apr.	0	0	0	Apr.	47	34	5
May.	11	10	11	May.	0	1	1	May.	1	1	8
Jun.	8	5	1	Jun.	1	1	0	Jun.	14	5	5
Jul.	180	75	28	Jul.	8	5	0	Jul.	5	1	1
Aug.	11	6	6	Aug.	0	1	4	Aug.	16	6	3
Sep.	2	4	2	Sep.	3	0	0	Sep.	5	1	1
Oct.	4	3	0	Oct.	4	10	1	Oct.	2	0	1
Nov.	24	4	12	Nov.	5	3	4	Nov.	13	5	10
Dec.	2	3	4	Dec.	31	19	25	Dec.	3	5	4



במקרים שבהם נמצאו ערכים גבוהים של אינדיקטורים לצואה, מעל 100 חיידקים ל 100 מ"ל, הופעלה שיטה מולקולרית בשם Microbial source tracking (MST) על מנת לזהות את מקור הזיהום. איור 38 מביא מספר דוגמאות מהבדיקות שנערכו ב 2020. במקרים רבים נמצא שעיקר הזיהום מקורו במעלי גירה, למשל בשפך הירדן, במסעודיה ובכורסי. אולם היו גם מקרים בהם נמצא זיהום ממקור חזירים, לדוגמה בתחנת הדיגום מול הירמון. גם זיהום ממקור הומאני נמצא בחלק מהמקרים (זאכי ודוגית), ויתכן שהדבר מצביע על כשל במערכות ביוב או במחברים באזור אגן ההיקוות (איור 38).



**איור 38:** ריכוז חיידקים אינדיקטורים לצואה ותוצאות MST בדגימות בהן אותר זיהום משמעות. גרף העמודות מציג את ריכוז האינדיקטורים ותחת העמודות מוצגים גרפים מסוג pie המבטאים את התפלגות מקורות הזיהום – מעלי גירה (כתום), הומאני (כחול) וחזיר (אפור), במספר דגימות, כפי שנקבע בשיטת ה-MST.

## 2.15 ייצור ראשוני, נשימה וכלורופיל



תמונת מיקרוסקופ של האצה פרידיניום שפרחה השנה בכנרת. צילום: אלה אלסטר.

**במימון  
רשות  
המים**

**תמר זהרי, ארקדי פרפרוב, דוד קמינגס**

- 2020 הייתה "שנת פרידיניום" עם פריחה אביבית טיפוסית של פרידיניום גטונזה.
- שיא הפריחה, באפריל, התבטא בשיא של ריכוז כלורופיל, אך לא בשיא של ייצור ראשוני. שיא נוסף בריכוז הכלורופיל נרשם בנובמבר.
- בחודש ספטמבר נרשמו ערכי מינימום של כלורופיל, ייצור ראשוני ונשימה.
- נמשכה המגמה של ערכי קצבי נשימה וייצור ראשוני נמוכים במקביל לעליה ביחס שביניהם, כל זאת לעומת התקופה 2001-2010.

### מטרת המחקר

מעקב רב שנתי אחר ריכוזי הכלורופיל וקצבי הייצור הראשוני והנשימה הקהילתית במרכז הכנרת.



**רקע**

ריכח כלורופיל, קצב היצרנות הראשונית וקצבי הנשימה הקהילתית באגם הינם מדדים בסיסיים חשובים למעקב אחר התהליכים המתרחשים בו. פרמטרים אלו מהווים מדדים לבימוסה וקצב פעילות בבסיס מארג המזון ושינויים בהם עשויים להצביע על שינויים מרחיקי לכת בתפקוד המערכת האקולוגית. ריכח הכלורופיל וקצבי הייצור הראשוני מנוטרים בכנרת מאז 1969 (כלורופיל) או 1971 (ייצור ראשוני). בשנות השבעים והשמונים שני פרמטרים אלו התנהגו לפי דגם שנתי טיפוסי שכלל שיא אביבי (אפריל-מאי) בזמן פריחת הפרידיניום, בעוד שבמחצית השנה השנייה נרשמו בדרך כלל ערכים נמוכים. דגם זה השתנה עם העלמות פריחת הפרידיניום. בעשור האחרון עקומת הפרודוקטיביות השתטחה בעוד שעקומת הבימוסה מראה שיא סתווי בנוסף לשיא האביבי. מדידות הנשימה הקהילתית בכנרת בוצעו בשנים 2001 – 2010 (Parparov and Berman 2014) וחודשו בשנת 2016.

**שיטות**

ריכחי כלורופיל (מיצוי באצטון 90% וקריאה פלואורומטרית) וקצבי ייצור ראשוני (שיטת הפחמן המסומן רדיואקטיבית) נמדדים כמו שדווח בעבר. קצבי הנשימה הקהילתית (CR) נמדדים ביחד עם מדידת היצרנות הראשונית (GPP) אחת לשבועיים. מים מעומקים 0, 1, 2, 5, ו-10 מטר הוכנסו לבקבוקים מוחשכים ובקבוקים חשופים לאור אשר נתלו על גבי מערך חבלים ומצוף והוחזרו לעומקיהם המקוריים להדגרה של 24 שעות. בנוסף לבקבוקי ההדגרה נדגמו גם סדרה של בקבוקי ערך זמן אפס, מאותם עומקים, אשר קובעו מיד. מדדי CR ו-GPP חושבו כדלהלן:

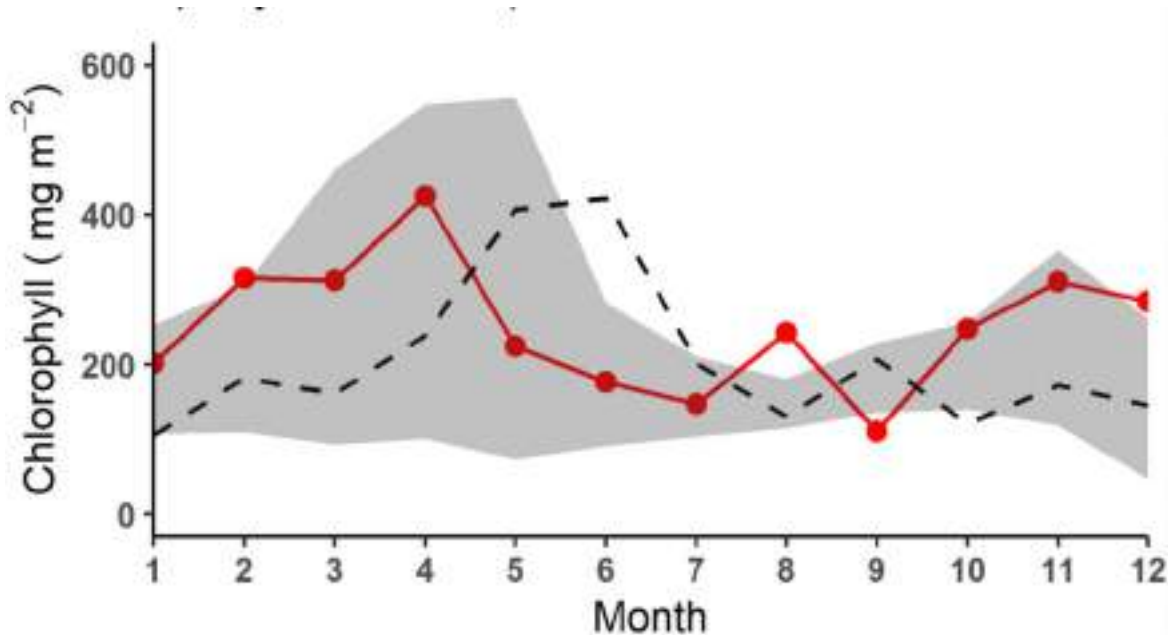
$$CR = [O_2]T0 - [O_2]dark \quad (1)$$

$$GPP = [O_2]light - [O_2]dark \quad (2)$$

כאשר OT הוא ריכח החמצן בבקבוקי זמן אפס, dark הוא ריכח החמצן בבקבוקי ההדגרה בחושך ו-light הוא ריכח החמצן בבקבוקי ההדגרה באור. התוצאות הסופיות מוצגות כגרם חמצן למטר מרובע ליום ( $gO_2 m^{-2} d^{-1}$ ) או כגרם פחמן למטר מרובע ליום ( $gC m^{-2} d^{-1}$ ). הנחנו כי 1 גרם C שווה ל-0.3 גרם  $O_2$ . יש להדגיש כי קצבי היצרנות הנמדדים בעזרת שיטת הפחמן המסומן שונים ונמוכים מקצבי היצרנות הראשונית GPP. עבור כלורופיל בלבד, נדגמים בנוסף מים מעומק התרמוקלינה בתקופת השיכוב ומעומקים 20, 30, 35 מ' כשהאגם לא משוכב.

**תוצאות ודיון**

שנת 2020 הייתה "שנת פרידיניום", כלומר שנה בה נצפתה פריחת פרידיניום אביבית, (איור 45 בפרק 2.17 – פיטופלנקטון). הדגם השנתי של ריכחי הכלורופיל (ממוצעים חודשיים) במים דמה לדגם הממוצע הרב-שנתי של העשור האחרון, עם שיא אביבי (אפריל) בזמן פריחת הפרידיניום ושיא נוסף, קצת יותר נמוך בסתיו (נובמבר), בזמן פריחת הירוקית סטאורסטרומ ולידה ציאנובקטריה חוטיות. ברוב שנת 2020 הממוצעים החודשיים של ריכחי כלורופיל נפלו בתוך טווח סטיות התקן של ערכי הכלורופיל בעשור האחרון, למעט ריכחים חריגים בחודשים אוגוסט וספטמבר (איור 39). באופן בולט, הדגם השנתי ב-2020 היה שונה מאד מהדגם השנתי ב-2019, שנה ללא פריחת פרידיניום. ריכחי הכלורופיל החצי-שנתיים והשנתיים ב-2020 היו גבוהים מאלו של 2019, ושל הממוצע הרב-שנתי, במיוחד בחצי השני של השנה, ולפיכך גם הממוצע השנתי היה גבוה יותר (טבלה 6, איור 39).

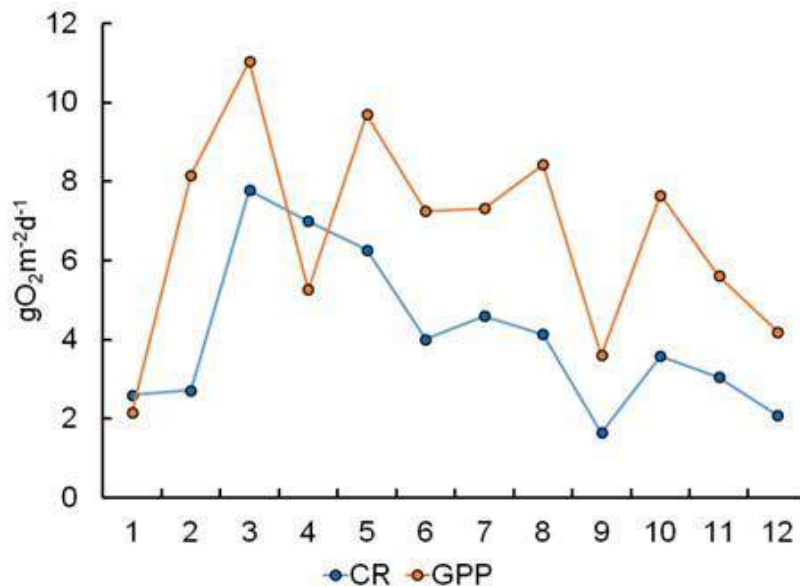


**איור 39:** המהלך השנתי של הממוצעים החודשיים של ריכוזי כלורופיל ב-2020 (קו אדום) בהשוואה ל-2019 (קו שחור מקוקוו) ולסטיות התקן סביב הממוצע לעשור 2009-2018 (ענן אפור). הערכים מוצגים ליחידת שטח, לאחר אינטגרציה לאורך 15 המטר העליונים של עמודת המים.

**טבלה 6:** ממוצעים ( $\pm$  שגיאת תקן) חצי שנתיים ושנתיים של ריכוזי כלורופיל וייצור ראשוני בעמודת המים 0-15 מ' בכנרת. השוואה של 2020 עם 2019 ונתוני העשור שקדם, 2009-2018.

ייצור ראשוני, מ"ג פחמן\מ <sup>2</sup> \יממה			כלורופיל, מ"ג פחמן\מ <sup>2</sup>			תקופה
2009-2018	2020	2019	2009-2018	2020	2019	
1654±95	2015±168	2000±425	238±21	267±42	253±54	ינו' - יונ'
1754±89	1494±161	1697±236	176±9	239±34	163±15	יול' - דצמ'
1695±65	1798±142	1848±236	207±12	254±27	208±30	ינו' - דצמ'

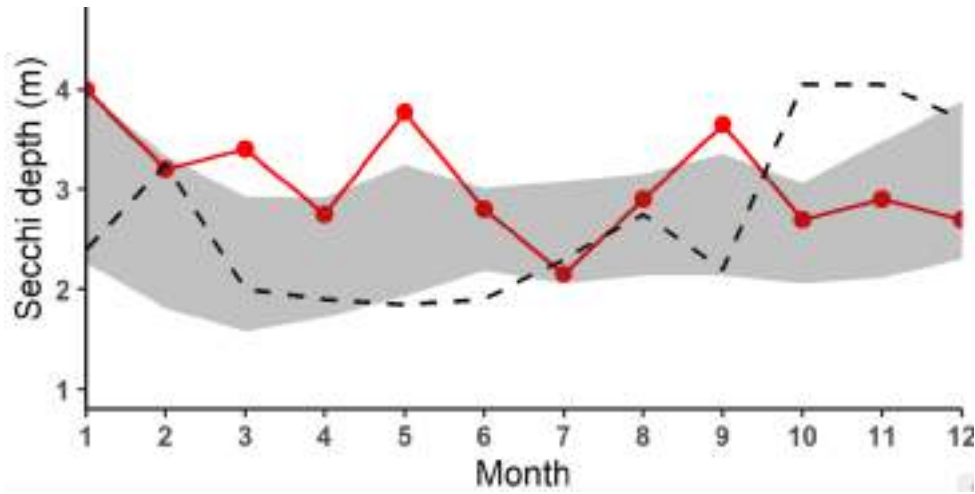
מבחינת קצבי הייצור הראשוני (איור 40), ב-2020 ראינו שוב את התופעה האופיינית לעשור האחרון של "יישור העקומה", כלומר ערכי ייצור ראשוני גבוהים באביב וגם בקיץ עם מגמת ירידה בסתיו-חורף. מפתיע שדווקא בשיא פריחת הפרידיניום באפריל נרשם שפל בייצור הראשוני, אבל אנחנו מייחסים אותו לכך שבשני תאריכי הדיגום באפריל השמים היו מעוננים ועצמת הקרינה הייתה נמוכה, ולכן גם קצב הייצור הראשוני. יתכן גם שהייתה הצללה עצמית בגלל ריכוזי תאי פרידיניום גבוהים, כלומר הגבלה נוספת על זמינות האור. הדבר מתבטא בשפל בעומק סקי באפריל 2020 (איור 41) וגם בערכי היחס של ייצור ראשוני לנשימה. ניתן לראות שנמדדו ערכי מינימום בייצור הראשוני ובקצב הנשימה בחודש ספטמבר שהיה, באופן חריג, החודש החם ביותר בשנה (ראה פרק מס' 2.5 "המטאורולוגיה והפיזיקה של האגם לשנת 2020") עם ערכי טמפרטורת מים גבוהים במיוחד. מבחינת הממוצעים החצי שנתיים, 2020 די דמתה ל-2019 ולממוצע הרב-שנתי (טבלה 6).



**איור 40:** הדינמיקה של נשימה קהילתית (CR) וייצור ראשוני (GPP) במהלך 2020 (ערכי ממוצעים חודשיים).

המאזן הביולוגי (מחושב כיחס  $GPP/CR > 1$ ) היה חיובי בשנת 2020 במהלך רוב חודשי השנה (טבלה 7). משמעות הדבר היא שקצב יצירת חומר אורגני ע"י פוטוסינתזה היה גבוה מקצב פירוק ע"י נשימה אירובית (בכ-63%). השוואת התוצאות העדכניות עם אלה מהעבר מצביעה על כך שבשנים 2016 – 2020 ירד הממוצע השנתי של ערכי GPP ובמיוחד CR, אשר ירד לכמעט חצי מהערכים של לפני עשור (טבלה 8). לאור העובדה שמדדים אלה מייצגים את השטף הגדול ביותר של חומר אורגני באגם שינויים אלה משפיעים באופן משמעותי על המאזן של המערכת כולה (Berman et al 2014). השינויים בערכים אלו והעליה המשמעותית ביחס  $GPP/CR$  אמורים להתבטא בהצטברות של חומר אורגני במי האגם (לכל הפחות בשכבות המים העליונות). הסיבות לשינוי המשמעותי כל כך ב-CR לא לגמרי ברורות. ישנם כמה הסברים אפשריים לשינויים שנצפו:

1. ירידה בכלל הפעילות המיקרוביאלית במי האגם לעומת השנים 2010 – 2001 מסיבות לא ברורות.
2. שינויים באופי החומר האורגני במי האגם. על פי הנתונים, בין השנים 2001 ו-2017 התקיימה מגמה של עלייה ביחס בין הריכוז של חומר אורגני מומס (DOC) לבין חומר אורגני חלקיקי (POC). בהינתן ש-DOC הינו רכיב זמין יותר לפירוק מיקרוביאלי מאשר POC העלייה ביחס הנ"ל עשויה להסביר את הירידה ב-CR והעלייה ביחס  $GPP/CR$ .
3. שינויים בחברת האצות מחברה הנשלטת ע"י Dinophyta לחברה הנשלטת ע"י Cyanobacteria (אם כי ב-2020 היית הפריחה של דיאנופיטה) אמורים להגביר יצרנות ראשונית ולהפחית את הנשימה של הפיטופלנקטון (Parparov and Gal in prep). מנתוני עבר עולה כי קיים קשר מובהק והפוך בין קצבי נשימה לבין אחוז הביומסה של אצות מקבוצת Dinophyta ו-Cyanobacteria מתוך הביומסה הכללית של הפיטופלנקטון (Parparov and Berman 2014, איור 42).



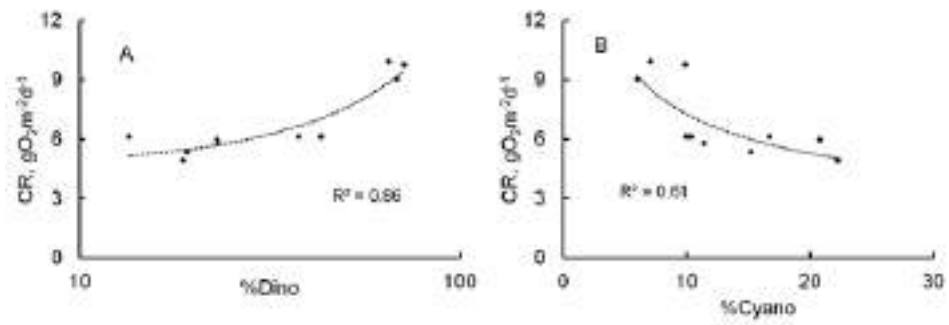
**איור 41:** כמו איור 1 עבור עומק סקי בתחנה A.

**טבלה 7:** ערכים חודשיים של נשימה קהילתית (CR) ויצרנות ראשונית כללית (GPP) במהלך 2020 בערכים חודשיים ממוצעים של גרם חמצן למטר מרובע ליום ( $\text{gO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) וממוצעים חודשיים של ערכי יצרנות ראשונית (GPP) אשר נמדדו בשיטת C14.

GPP/CR	יצור ראשוני (GPP)	נשימה (CR)	חודש
0.83	2.15	2.6	<b>1</b>
3.01	8.17	2.72	<b>2</b>
1.42	11.04	7.78	<b>3</b>
0.75	5.27	7	<b>4</b>
1.55	9.69	6.27	<b>5</b>
1.81	7.25	4.01	<b>6</b>
1.59	7.32	4.6	<b>7</b>
2.04	8.44	4.14	<b>8</b>
2.19	3.61	1.65	<b>9</b>
2.14	7.66	3.58	<b>10</b>
1.84	5.62	3.05	<b>11</b>
2.01	4.19	2.08	<b>12</b>
1.63	6.7	4.12	<b>ממוצע</b>

**טבלה 8:** השוואה של ערכי נשימה קהילתית (CR) ויצרנות ראשונית כללית (GPP) לאורך השנים האחרונות (נתוני ממוצעים שנתיים). הערכים הינם ביחידות של גרם חמצן למטר מרובע ליום ( $\text{gO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ).

GPP/CR	נשימה (CR)	יצור ראשוני (GPP)	שנים
1.17	6.63	7.73	<b>2001-2010</b>
1.9	3.29	6.26	<b>2016</b>
1.9	3.55	6.74	<b>2017</b>
1.63	4.12	6.7	<b>2020</b>



**איור 42:** קווי רגרסיה בין האחוז היחסי של אצות מקבוצת Dinophyta (Dino) ו- Cyanobacteria (Cyano) מסך הביומסה של הפיטופלנקטון וקצבי הנשימה. הערכים הם ממוצעים שנתיים לשנים 2001 – 2010.

## 2.16 ייצור שניוני חיידקי



צילום: שירה ניניו

**במימון  
רשות  
המים**

**שירה ניניו, נחמה רושנסקי**

- בשנת 2020 נמדדה פעילות גבוהה של חיידקים הטרוטרופים באזור הפוטי לאורך רוב חודשי השנה.
- ערכי שיא שנתיים נרשמו בחודש מאי בעומק האגם ומבטאים תהליכי פירוק של פריחת הדינופלגלטים שהתרחשה באגם בחודשים שקדמו לכך.

### רקע

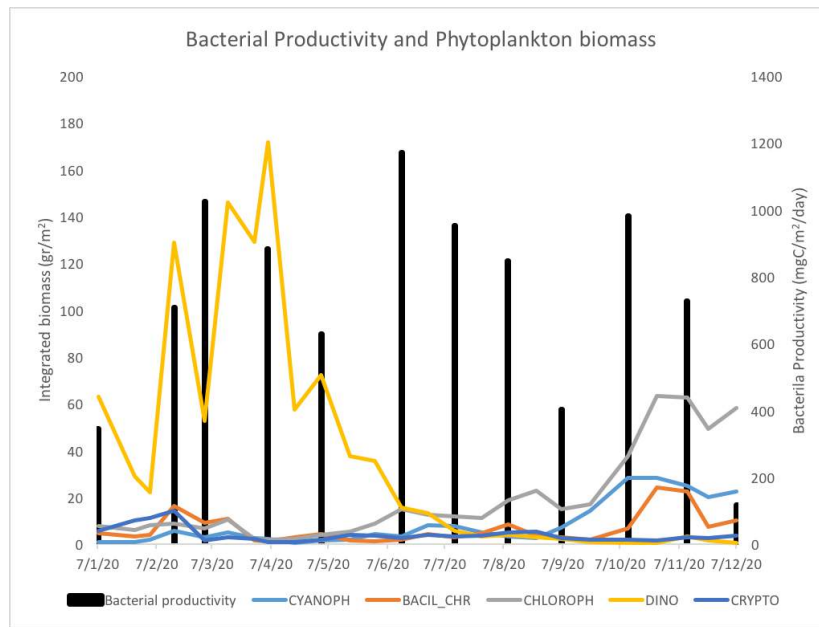
חיידקים הטרוטרופיים הם מרכיב חשוב במארג המזון, עם תפקיד מרכזי בפירוק חומר אורגני ומיחזור נוטריינטים. החיידקים מגיבים מהר לשינויים באגם כולל פריחות של אצות או עליה אחרת בביומסה. התחקות אחר פעילות חיידקית מאפשרת קבלת תמונה של פיזור תהליך הפירוק של חומר אורגני באגם בזמן. מעקב שגרתי אחר פרמטר זה חשוב בכדי לגלות שינויים בתפקוד הלולאה המיקרוביאלית בפרט, והמערכת האקולוגית של האגם בכלל.

### שיטות

הייצור החיידקי Bacterial Biomass Production (BBP) נמדד על ידי מעקב אחר קליטת החומצה האמינית לאוצין המסומנת רדיואקטיבית. ניטור של ייצור שניוני של חיידקים (ב-6 עומקים בתחנה A) החל ב-2001 ונמשך ב-2020 בתדירות של פעם בחודש.

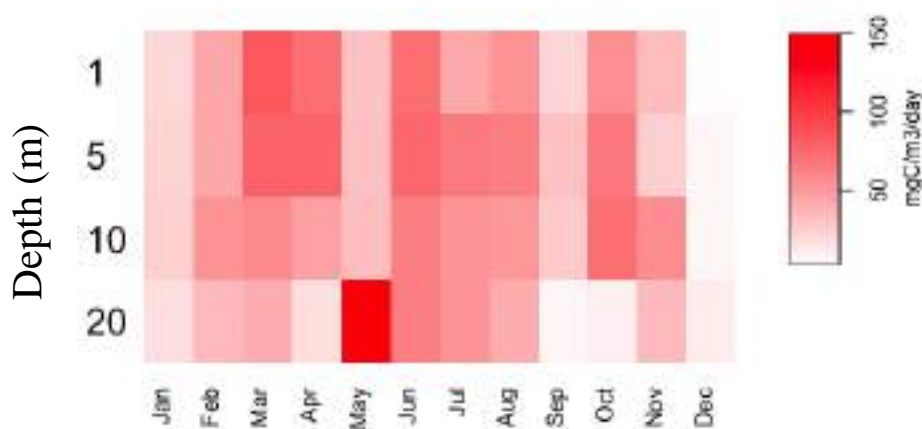
**תוצאות ודיון**

הייצור החיידקי הכולל שנמדד ב- 2020 היה דומה לזה שנמדד ב- 2019, אך הראה דינמיקה שונה במקצת. באזור הפוטי ערכי שיא שנתיים של כ- 900 מג' פחמן למ"ר ליום נמדדו בחודשים שונים לאורך השנה (איור 43) ולא בגל בודד. הנתונים מצביעים על פעילות של חיידקים הטרוטרופים באזור הפוטי המלווה את פריחת הדינופלגלטים בחודשים פברואר-אפריל (איור 43). בנוסף, נרשמה פעילות באזור הפוטי לאורך רוב השנה ללא תלות בפריחה של אצה מסוימת.



**איור 43 :** ביומסה של פיטופלנקטון וייצור חיידקי (מ"ג פחמן/מ"ר/יום). בעמודת המים האפילימנטית ב- 2020 הערכים מייצגים אינטגרציה של ערכים שנמדדו לאורך עמודת המים בעומקים 1-15 מטר.

עם קריסת פריחת הדינופלגלטים בחודש מאי נמדדה פעילות חיידקית גבוהה מאוד בעומק 20 מ' ומטה (איור 44). פעילות זו משקפת ככל הנראה תהליכי פירוק ביומאסה שוקעת של הפריחה, בשילוב עם תהליכי דניטרפיקציה הטיפוסיים לעונה זו באגם.



**איור 44:** מפת חום המייצגת את הפיזור האנכי של היצרנות החיידקית בעמודת המים מ- 1-30 מ' בשנת 2020. הגוון מייצג את קצב היצרנות שנמדד ביחידות מ"ג פחמן/מ"ר/יום, על פי הסרגל שמימין.

## 2.17 פיטופלנקטון



תצפית על הכנרת מפורייה עילית. הכתם הכהה הוא מים עם ריכוז גבוה של תאי פרידיניום. כתמים כאלו הם תופעה אופיינית לפריחות הפרידיניום בכנרת. צילום: תמר זהרי.

**במימון  
רשות  
המים**

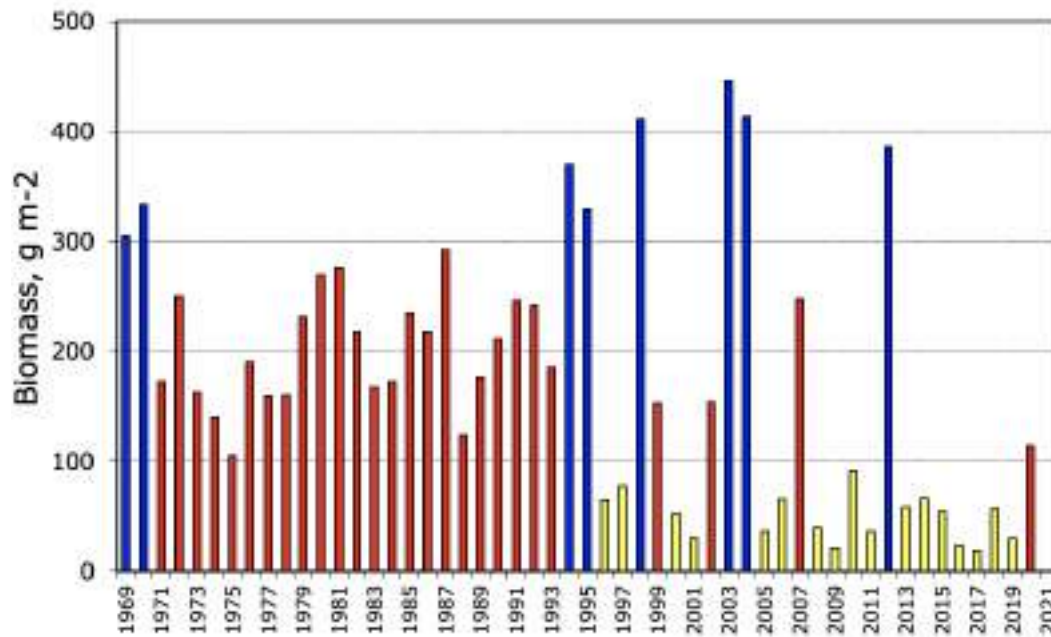
**תמר זהרי, אלה אלסטר**

- **שנת 2020 הייתה שנה ראשונה עם פריחת פרידיניום אחרי 7 שנים ללא פריחה, ואחת מתוך 8 שנים בלבד עם פריחת פרידיניום מתוך 25 השנים מאז 1996. הפריחה הגיעה לשיא באפריל ודעכה במאי, עוצמתה הייתה נמוכה יחסית לפריחות עבר.**
- **בסתיו 2020 התפתחה פריחה מאסיבית של אצה ירוקית, מקבוצת הדסמידים - סטאורסטרום. יחד איתה פרחו אצות ציאנובקטריה חוטיות.**

### **"שנת פרידיניום" 2020**

אחרי 7 שנים רצופות, 2019 – 2013, ללא פריחת פרידיניום, שנת 2020 הייתה "שנת פרידיניום". במילים אחרות, שנה שבה הממוצע החודשי של ביומסת הפרידיניום באחד מחודשי האביב עבר את ערך הסף של 100 גר' למ"ר (איור 45). כתמי פרידיניום נראו במים (ראו תמונה פותחת).



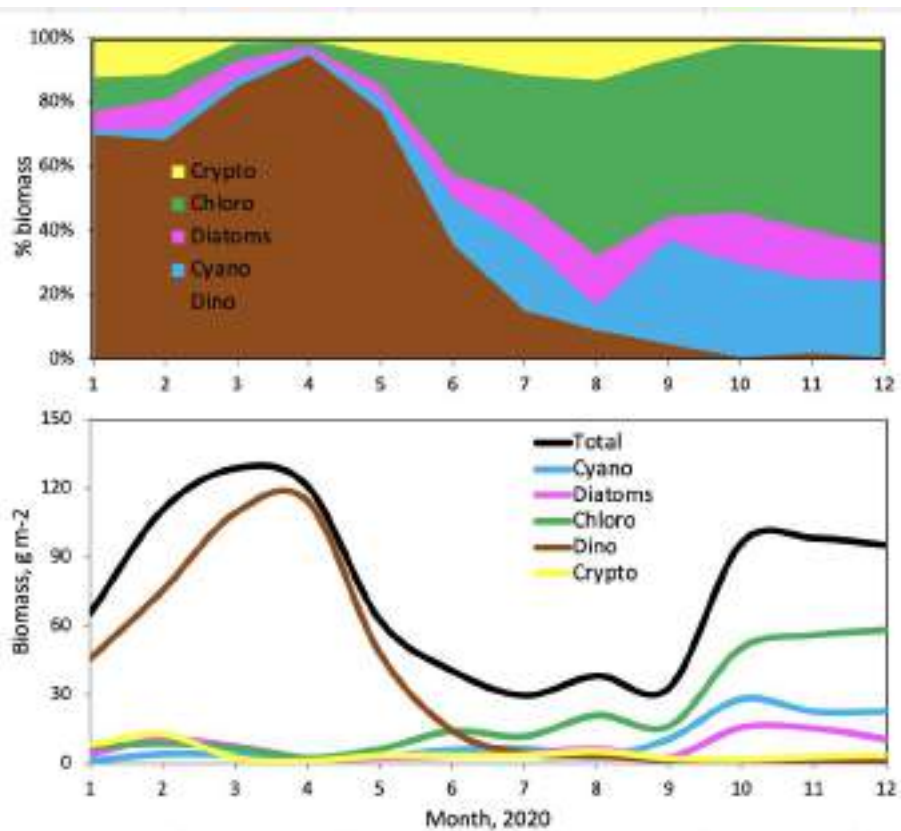


**איור 45:** עצמת פריחת הפרידיניום בשנים 1969-2020. עצמת הפריחה מבוטאת כממוצע חודשי של הביומסה בחודש בו ביומסת הפרידיניום הגיעה לשיאה השנתי (הערך המרבי בכל שנה). בהתאם לעוצמת הפריחה האביבית השנים חולקו לשלוש קטגוריות: שנים ללא פריחה (צהוב, ביומסה חודשית ממוצעת שלא עלתה על 100 ג' למ"ר), שנים עם פריחה ממוצעת (אדום, ביומסה בין 100-300 ג' למ"ר) ופריחה מאסיבית במיוחד (כחול, ביומסה מעל 300 ג' למ"ר). עד אמצע שנות ה-90 כל השנים היו ממוצעות (למעט השנתיים השטפוניות בתחילת הסדרה), ואילו מאז 1994 נצפו רק 4 שנים של פריחה ממוצעת (כולל 2020), 6 שנים של פריחה מאסיבית ו-17 שנים ללא פריחה.

שנת 2020 הייתה שנה גשומה, השנייה ברצף, עם עליית מפלס של 2.2 מעבר למפלס המרבי של 2019. שנה זו התאפיינה בהצפת אזורים חופיים שהיו מחוץ למים מאז 2004. במהלכה הוצפה צמחייה חופית עבותה, בעיקר של אשל או קנה, שהתפתחה במשך שנות המפלסים הנמוכים, וכן הוצף חומר אורגני רב שהצטבר למרגלות הצמחייה או שהגיע לכנרת עם הזרימות מאגן ההיקוות. לאצת הפרידיניום, כמו להרבה מינים של דינופלגלטים, יכולות מיקסוטרופיות שמאפשרות לה לנצל חומרים אורגניים מומסים כאשר התנאים לפוטוסינתזה לא טובים (כמו למשל בימי חורף מעוננים, או בסביבות דלות באור כמו בתוך יערות אשלים מוצפים). כנראה העושר בחומר האורגני במים בשנה זו נתן יתרון לפרידיניום על פני אצות אחרות. היתרון התבטא בעיקר במים הרדודים, שם מצאנו כתמי פרידיניום צפופים במיוחד, עם ריכוזי תאים של קרוב ל-2000 תאים למ"ל, ערכים גבוהים פי 5-7 מהריכוזים המרביים שנרשמו בתחנה A, (ראו פרק מס' 3.12 - "יערות אשלים מוצפים – בית גידול חדש בכנרת").

### **תרומה יחסית של קבוצת הפיטופלנקטון השונות**

המהלך השנתי של תרומת הקבוצות הטקסונומיות העיקריות השונות (דינופלגלטים, צורניות, ירוקיות, כחוליות וקריפטופיטה) לכלל הביומסה בכנרת (איור 46 למעלה) היה דומה לזה שמאפיין שנות פרידיניום, עם שלטון ברור של הדינופלגלטים (אליהם משתייכת פרידיניום) בחצי הראשון של השנה והעלמות שלהם בחצי השני. פריחת הפרידיניום של 2020 החלה להתפתח כבר בסוף 2019 ולפיכך כבר בינואר 2020 ביומסת הדינופלגלטים היוותה מעל 60% מסך הביומסה. בשיא הפריחה (אפריל) הדינופלגלטים תרמו מעל 90% לסך הביומסה, במקביל לתרומה שולית בלבד של כלל המינים האחרים.



**איור 46:** המהלך השנתי של ביומסת הפיטופלנקטון ושל ביומסת הקבוצות הטקסונומיות העיקריות בכנרת, 2020. למעלה: תרומה יחסית של כל אחת מהקבוצות. למטה: ערכים מוחלטים (גר' למ"ר) של ביומסה של כל קבוצה ושל הסה"כ.

לאחר דעיכת הפרדיניום במאי-יוני, השתלטו הירוקיות (35-60% מכלל הביומסה) ומספטמבר עד דצמבר גם לכחוליות הייתה תרומה משמעותית לסך הביומסה (23-32%). במהלך השנה, לצורניות הייתה תרומה קרוב לקבועה, של 7-15% מסך הביומסה למעט בזמן פריחת פרדיניום בה התרומה ירדה ל-1.6%. לאצות הקריפטופיטה הייתה תרומה של 11-13% בינואר-פברואר ושוב ביולי-אוגוסט.

#### סך הביומסה והביומסה של הקבוצות העיקריות

הממוצע השנתי של ביומסת הפיטופלנקטון ב-2020 היה 76.5 ג' למ"ר, ערך קרוב מאד לממוצע הרב-שנתי של 78 ג' למ"ר. הממוצע החצי-שנתי, לחצי השנה הראשון, ינואר עד יוני, היה 88 ג' למ"ר לעומת 65 ג' למ"ר ביולי עד דצמבר. בשנות ה-70, 80, 90 של המאה הקודמת למהלך העונתי של סך הביומסה היה דגם ברור של הצטברות ביומסה מתחילת השנה ועד לשיא אביבי גדול באפריל או מאי, ומשם דעיכה תלולה ביוני-יולי וערכי ביומסה נמוכים כל הקיץ. לעומת זאת, בעשורים הראשון והשני של המאה ה-21 הולכת ומתפתחת מגמה חדשה של שיא ביומסה שני בסתיו. גם ב-2020 צפינו בשיא ביומסה שני בסתיו שעוצמתו קרובה לזו של השיא האביבי (איור 46 למטה). הקבוצה התורמת העיקרית לשיא סתווי זה הייתה הירוקיות, עקב פריחה של *Staurastrum manfeldtii* (desmidiiales).

**הרכב המינים ודינמיקה עונתית**

מספר מועט יחסית של מינים תרמו את מרבית הביומסה בשנת 2020. שנה זו נפתחה, כמו רוב השנים בכנרת, בתרומה משמעותית של קריפטופיטה (כריפטומונס, רודומונס), במקביל להתפתחות פריחת הפרידיניום, שהופיעה במים כבר באוקטובר 2019. בפברואר-מרץ הופיעו צורניות (ציקלוטלה, אאולקוסירה). בספטמבר הופיעה החוטית הכחולית אפניזומנון, באוקטובר הופיעה צילינדרוספרמופסיס, והירוקית סטאורסטרום.

מינים שונים של הגנוס *Staurastrum* פורחים בשנים האחרונות בכנרת, מינים שלא הכרנו בעבר. ב-2019 פרח המין *Staurastrum pinge* ביוני-יולי. ב-2020 המין הדומיננטי היה *Staurastrum manfeldtii* (וריאנט קטן) שפרח בסתיו.

## 2.18 רעלני כחוליות



צילום: אסף סוקניק

**במימון  
רשות  
המים**

### פלאג אסטרון, אסף סוקניק, דיתי ויינר-מוציני

- באביב 2020, לא זוהו מיקרוציסטינים במים. עם זאת, נמצא ריכוז של עד 1 מ"ג לגרם בביומסה שנאספה מהאגם.
- מחודש אוגוסט 2020 זוהו צילינדרוספרמופסין באגם, ריכוזו עלה באופן הדרגתי עד לריכוז של 1.9 מיקרוגרם לליטר בנובמבר. לאחריו נרשמה ירידה מאוחרת יחסית בריכוז הרעלן העוקבת את היפוך האגם בפברואר 2021.

### מטרה

מעקב אחר רעלני כחוליות (ציאנובקטריה) בכנרת.

### רקע

פריחות ציאנובקטריה רעילות מופיעות בכנרת בקיץ ובסתיו מזה למעלה משני עשורים. המערך האנליטי לזיהוי ולכימות רעלני ציאנובקטריה בכנרת פועל ברציפות החל משנת 2000 ומדווח על ריכוזי הרעלנים במים ובחומר המרחף. ממצאים חריגים מדווחים מידית לרשות המים וספקי המים מהכנרת.

### שיטות

דגימות מים נאספות בתחנה A בכנרת מעומק מטר, בתדירות של אחת לחודש. כאשר עולה ריכוז הציאנובקטריה במים עולה גם תדירות הדיגום לרעלנים. באירועים של פריחת מיקרוציסטיס היוצרת משטחים צפים, נדגמים גם שטחי הציאנובקטריה בדלי ונמדד ריכוז הרעלנים בביומסה. לאחר מיצוי וריכוז, הדגימות נלקחות לאנליזה איכותית וכמותית לרעלנים משתי קבוצות: מיקרוציסטינים (שמקורם מיקרוציסטיס) וצילינדרוספרמופסין (שמקורם אפניזומנון).

המדידות מבוצעות בשיטות HPLC מתאימות והתוצאות מוצגות כריכח הרעלן ליחידת נפח מים (בדגימות מים) או כריכח הרעלן בביומסה (ליחידת משקל יבש). במקביל נערכות מדידות נוספות באגם לבקשת גופים שונים.

### **תוצאות ודיון**

מיקרוציסטיס ומיקרוציסטינים:

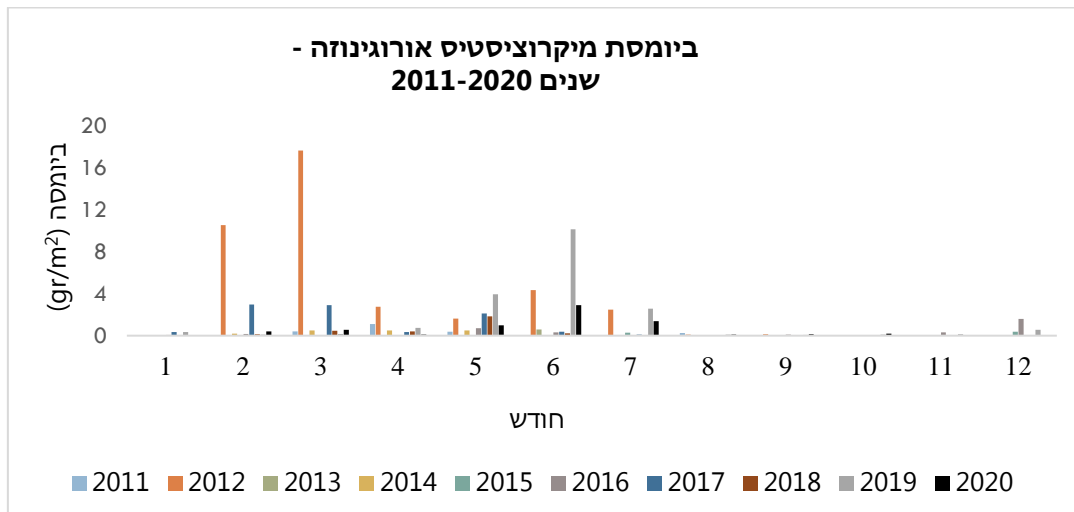
באביב 2020 לא זוהו מיקרוציסטינים בדגימות מים מהכנרת. לעומת זאת, נמדדו ריכחי מיקרוציסטיס בביומסה שנאספה מהאגם בריכחים של עד 1.3 מיליגרם לגרם חומר יבש (טבלה 9).

**טבלה 9:** ריכחי מיקרוציסטינים בתחנה A - שנת 2020

ריכח מיקרוציסטינים בביומסה (MC) ( $\mu\text{g/g dw}$ )	ריכח מיקרוציסטינים במים ( $\mu\text{g/L}$ )	תאריך דיגום
	תס"ג*	12.1.20
	תס"ג	3.2.20
MC. YR=85 MC. LR =38	תס"ג	23.2.20
MC. YR=42 MC. LR =67		24.2.20
	תס"ג	8.3.20
MC. YR=284 MC. LR=927 MC. RR=168 MC. Like=77		9.3.20
	תס"ג	22.3.20
	תס"ג	19.4.20
	תס"ג	18.5.20
	תס"ג	14.6.20
	תס"ג	12.7.20
	תס"ג	16.8.20
	תס"ג	7.9.20
		21.9.20
	תס"ג	11.10.20
		25.10.20
	תס"ג	8.11.20
		23.11.20
	תס"ג	13.12.20

\* תס"ג = תחת סף גילוי (0.1ppb)

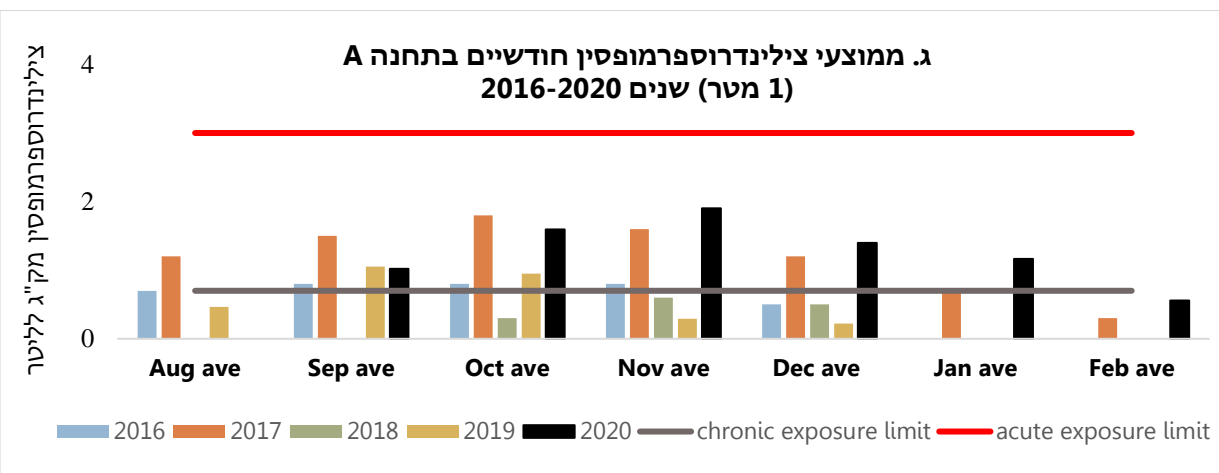
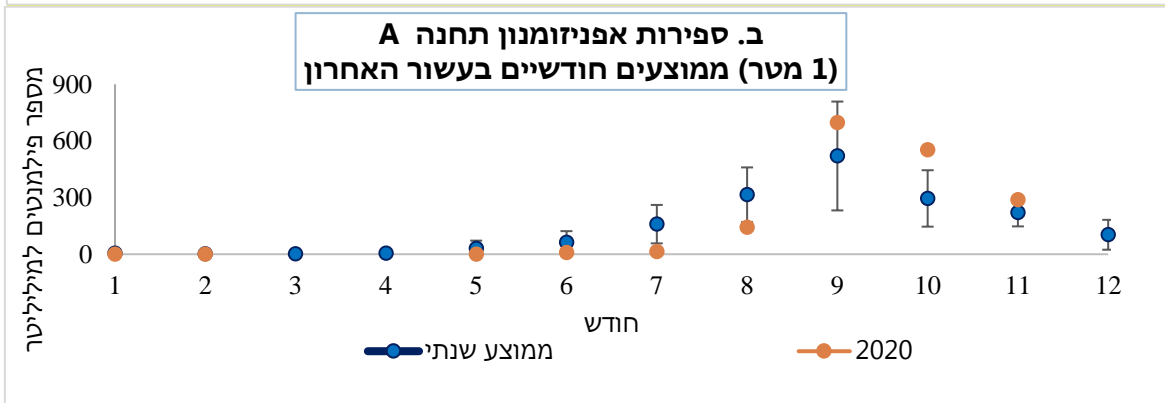
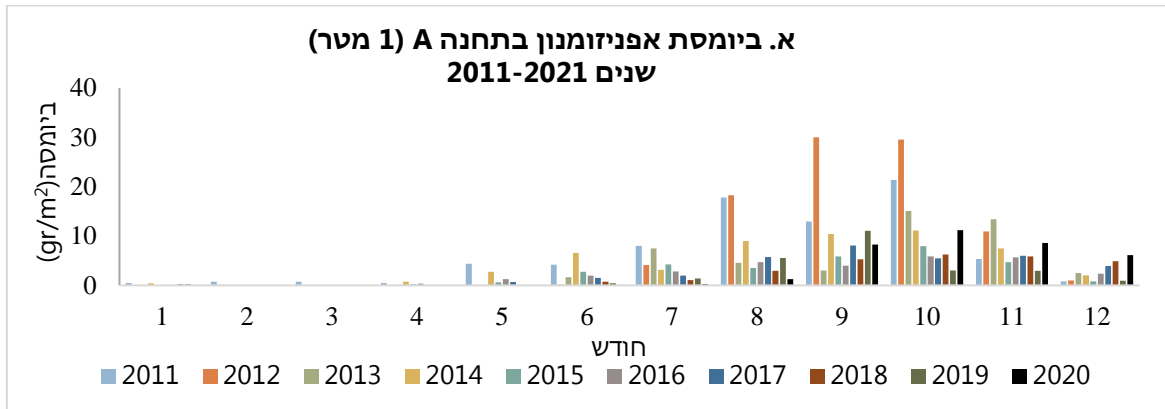
ערכים אלו אינם גבוהים מהערכים שנמדדו בשנה שעברה. כפי שניתן לראות באיור 47, גם ביומסת המיקרוציסטיס באגם לא הגיעה השנה לריכחים גבוהים בהשוואה לשנים שעברו.



**איור 47:** ביומסה ( $gr/m^2$ ) נמדדת *Microcystis aeruginosa* בתחנה A, שנים 2011-2020 (בשחור). (2020 בשחור).

#### אפניזומנון וצילינדרוספרמופסין

כמו בשנים קודמות, גם בחודשי הקיץ והסתיו של שנת 2020 נצפתה בכנרת אוכלוסייה של אפניזומנון שהגיעה לשיאה בספטמבר-נובמבר 2020, מאז דעכה האוכלוסייה פי 10 לערך (איור 48). מחודש ספטמבר 2020 נמדד הרעלן צילינדרוספרמופסין בכנרת. ריכוז הרעלן במים עלה בהדרגה ובנובמבר נמדד ריכוז של כ-1.9 מיקרוגרם לליטר. בחודש פברואר דעך ריכוז הרעלן לאחר היפוך האגם עד לריכוז של 0.56 מיקרוגרם לליטר (איור 48). כפי שניתן לראות, העלייה והירידה בריכוזי הרעלן אינן עוקבות ישירות את העלייה והירידה בביומסה. תוצאות אלו מעידות על יציבות הרעלן במים (נשאר גם לאחר ירידת הביומסה). איור 48' מראה כי ביומסת האפניזומנון הייתה גבוהה השנה יחסית לממוצע בשנים האחרונות. עם זאת, כפי שניתן לראות (איור 48ג'), הופעת הרעלן במים התעכבה ואף דעכה מאוחר יותר. כפי שידוע לנו מבדיקות מקבילות שבוצעו במקומות שונים באגם (בעבור ספקי מים שונים), ריכוזי הרעלן אינם הומוגניים באגם אך מגמת העלייה והירידה בזמן נשמרת.

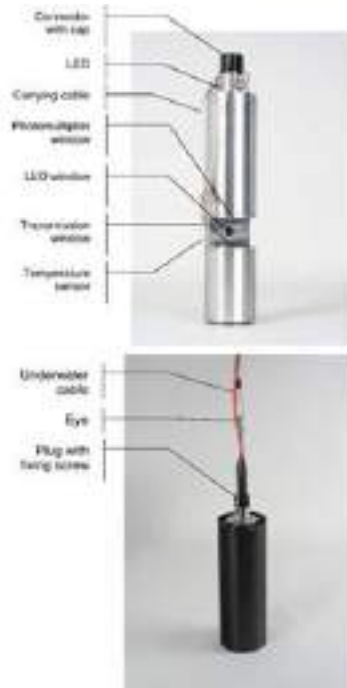


**איור 48:** ביומסה ורעלני אפניזומנון אובליספורום בשנים האחרונות, ערכים (א), ממוצעים חודשיים (ב) וריכוזי צילינדרוספרמופסין בתחנה A (עומק 1 מטר). ערכי הסף לריכוז הצילינדרוספרמופסין במי שתיה לחשיפה כרונית וחשיפה אקוטית, עפ"י הנחיות ארגון הבריאות העולמי (WHO), מסומנים באפור ובאדום, בהתאמה.



## 2.19 מעקב אחר פריחת ציאנובקטריה בעלות פוטנציאל רעילות

בתמונה: מימין מכשיר הפלואורופורוב בעת הורדתו לפרופיל דיגום על ידי מוטי דיאמנט, מצוות הים של המעבדה לחקר הכנרת. צילמה: יעל בנימיני. משמאל מפורטים חלקי המכשיר השונים.



**ניטור מורחב: במימון רשות המים**

נעמה לנג-יונה, אסף סוקניק, תמר זהרי, דוד קמינגס, אלה אלסטר, רותי קפלן-לוי, דיתי ויינר-מוציני, מיקי שליכטר, צוות ים המעבדה לחקר הכנרת, חיא"ל.

- פריחת פרידיניום גבוהה לצד פריחת מיקרוציסטיס מצומצמת נצפתה בחורף-אביב 2020.
- נצפו פריחות של מיני ציאנובקטריה (אפניזומנון, צילינדרוספרמופסיס, ולינגביה) בחודשי הקיץ והסתיו.
- ממעקב אחר התפתחות הפריחה, נראה כי מקור אוכלוסיית האפניזומנון הינו בצפון מערב האגם.
- נמצאה קורלציה בין ה- mRNA, לבין ריכוז הרעלנים בתרביות אפניזומנון ומיקרוציסטיס, המצריכה בחינתה בעת פריחה בכנרת.
- במיקרוציסטיס נמצא יחס קבוע בין רמת הגן לטוקסין ב- DNA לבין ה- mRNA, לכן בדיקת DNA עדיפה לחיזוי מיקרוציסטינים בתרבית, וצריכה להיבחן גם בדוגמאות מהאגם.

### רקע

שילוב התנאים הייחודי בכנרת בשנים האחרונות מדגיש את הצורך להתייחס לאחת הסכנות המידיות על איכות המים באגם - פריחות ציאנובקטריה ממינים שונים והפוטנציאל להפרשת רעלנים למים. הניטור השוטף בכנרת מכיל מרכיב של תיעוד אוכלוסיות פיטופלנקטון באופן כללי עם דגש מיוחד על אוכלוסיות ציאנובקטריה.





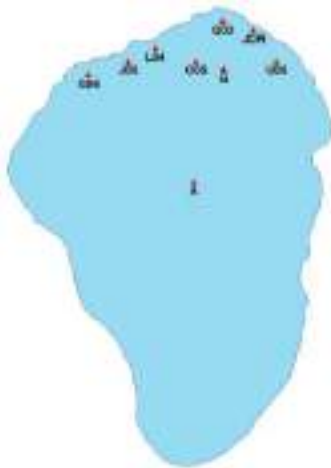
כמו כן, כאשר מזוהות פריחות של ציאנובקטריה מופעל נוהל בדיקות רעלנים במים. נוהל זה מתמקד בדגימות בעומק קבוע במרכז האגם ובהמשך, עבור ספקיות המים, גם נבדקים מים לפני ואחרי טיפול. המידע המתקבל בנוהל הקיים אינו מאפשר הבנה של התפתחות הפריחה בזמן - הן מבחינה מרחבית באגם והן בפיזור האנכי באתרים שונים. מידע זה חשוב בכדי להיות מוכנים טוב יותר למצב בו יאותרו רעלנים במים ברמות המסכנות אספקת מים בשאיבה. ניתן לאפיין את תבנית הפיזור התלת ממדי באגם (מרחבי ואנכי) על ידי מדידת הפיזור האנכי של אותות פלואורסנטיים שמקורם באוכלוסיית האצות במרחב הכנרת. המדידה נעשית בעזרת מערכת הפלאורופורב, פרופיילר המספק מידע ספקטרלי על התפוצה של אוכלוסיות פיטופלנקטון (אצות, ציאנובקטריה וחיידיקים פוטוסינתטיים) על פי הרכב הפיגמנטים שלהם. ביצוע מדידות בנקודות שונות, תוך שילוב דיגום משלים, ייתן תמונת פיזור מרחבית טובה של פריחה באגם בזמן נתון. ביצוע סט מדידות לאורך זמן יאפשר מעקב אחר התפתחות אירוע פריחה משלביו הראשוניים ועד דעיכתו וישדרג באופן ניכר את יכולת הניהול של אירוע פריחה במידה ויתפתח לאירוע המסכן את איכות המים בתחנות השאיבה.

### מטרות

- מעקב ואפיון ההתפתחות המרחבית של אירועי פריחה של אצות ציאנובקטריה בכנרת.
- בחינת שיפור יכולת לזיהוי מוקדם של נוכחות רעלני ציאנובקטריה במים בעזרת שיטות מולקולריות.

### שיטות

אפיון הדינמיקה המרחבית של אוכלוסיות הפיטופלנקטון- נוהל ניטור של אזור צפון הכנרת ("קשת צפונית") מבוסס על איסוף נתונים ספקטראליים בעמדות המים ב- 9 תחנות, מהן 8 באזור צפון הכנרת וכן תחנה A במרכז הכנרת כאתר ייחוס (איור 49). הנוהל מופעל בכנרת במועדים בהם מתפתחת אוכלוסייה של ציאנובקטריה. בכל תחנת דיגום בוצע פרופיל אנכי עם מערכת מסוג פלאורופורב (FluoroProbe, bbe Moldaenke GmbH, Germany), המודד את תפוצת הפיגמנטים בעמדות המים ומייחס אותה לקבוצות מוגדרות של פיטופלנקטון ירוקות, ציאנובקטריה, חומיות-צורניות-דינופלגלטים וקריפטופיטה-אדומיות.

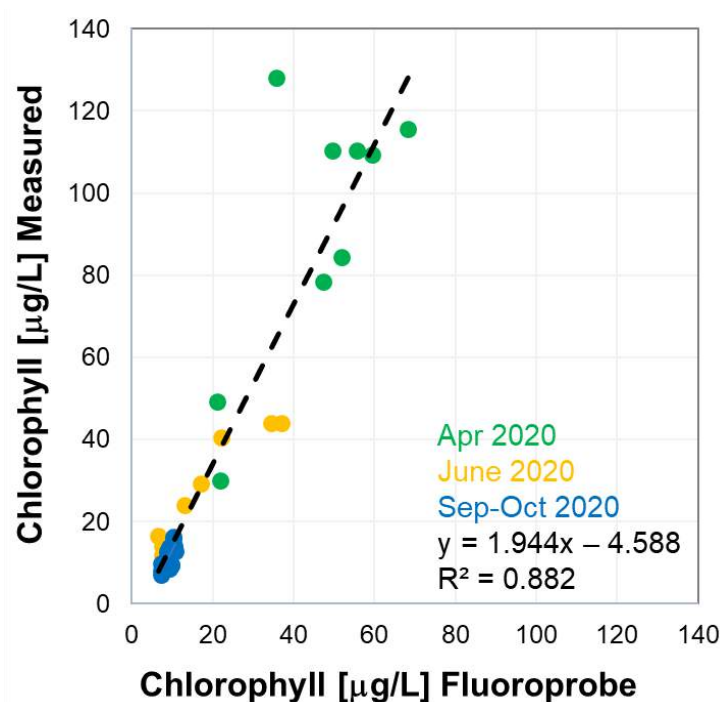


**איור 49:** תחנות הניטור במסגרת הרחבת הניטור "קשת צפונית": 8 תחנות ניטור במרחב צפון הכנרת, ו A במרכז האגם.

במקביל מבוצע דיגום מפני מים ומעומק של 3 מ' בכל אחת מתחנות הדיגום, לקביעת ריכוז כלורופיל לצרכי אימות וכיול המדידות בפלאורופורב. בשל מגבלות טכניות (שליחת המכשיר לתחזוקה וכיול אצל היצרן בסוף שנת 2019 וחזרתו למעבדה רק בסוף מרץ 2020 בתקופה של מגבלות הקורונה), פעילות ה"קשת הצפונית" ב- 2020 בוצעה במועד אחד בלבד באפריל, במועד אחד באמצע יוני ושלוש פעמים נוספות בספטמבר-אוקטובר, עם עליה בביומסה של ציאנובקטריה מסוג אפניזומנון, הידועה ביצירת טוקסינים. יכולת ההפרדה הספקטרלית של הפלאורופורב מאפשרת הבחנה בין קבוצות טקסונומיות של פיטופלנקטון על פי הרכב פיגמנטי העזר, אולם ההפרדה לא מלאה ובמקרים מסוימים לא ניתן להפריד בין אצות מקבוצת הצורניות (Diatoms) ובין דינופלגלטים כמו פרידיניום, או בין אצות מקבוצת הקריפטופיטה לבין ציאנובקטריה להן פיגמנטים מסוג פיקואירטרין (PE).

על מנת לפרש נכונה את האות הנמדד יש צורך בזיהוי מיקרוסקופי ראשוני של האוכלוסייה הנמדדת. כך לדוגמה, במהלך חודשי החורף זוהתה אוכלוסייה של מיקרוציסטיס המכיל PE כקריפטופיטה בעוד אוכלוסיית הפרידיניום מזוהה בטעות כצורניות בתקופת הקיץ (במקביל להתפתחות אוכלוסייה של ציאנובקטריה, אפניזומנון, צילינדרוספרמופסיס ולינגביה). הנתונים שנאספו בעזרת הפלאורופורב הועברו לבסיס הנתונים של המעבדה לחקר הכנרת, עברו סינון ועיבוד סטטיסטי ראשוני ומוצגים כמפות ריכחים לקבוצות הפיטופלנקטון העיקריות. השינויים בזמן ובמרחב מספקים מידע על התפתחות אוכלוסיות האצות וציאנובקטריה במרחב הצפוני של הכנרת.

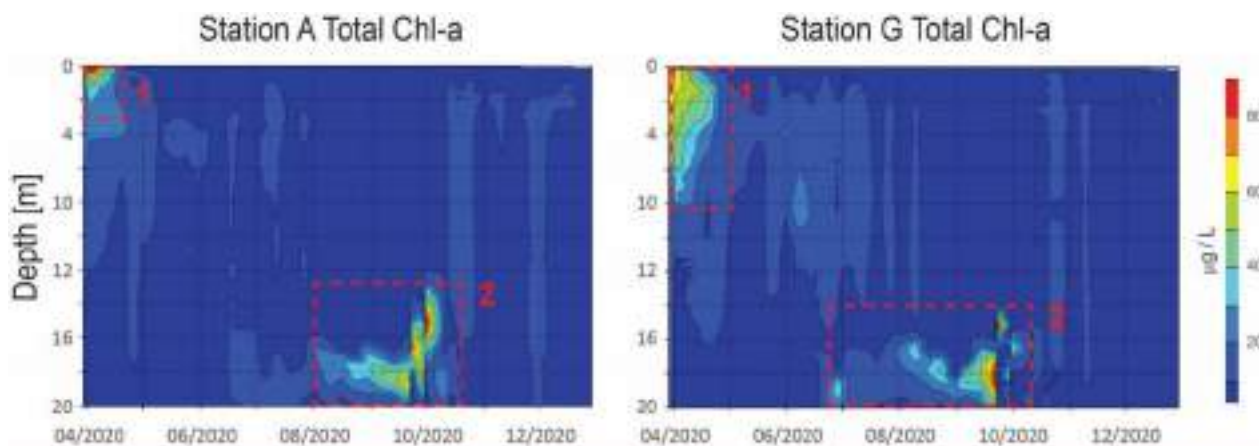
מערכת הפלאורופורב מחשבת את ריכח הכלורופיל הכללי כסכום הנתרם על ידי קבוצות הפיטופלנקטון השונות על פי הרכב הפיגמנטים שלהן ולכילה נדרשות תרבויות המייצגות את האוכלוסיות באגם. השוני בתכולת הכלורופיל והתפוצה היחסית של פיגמנטי העזר בקבוצות השונות הוא גדול ותלוי בתנאי הגידול, זמינות נוטריינטים, תאורה וכדומה. על מנת לוודא ולאמת את תוצאות הפלאורופורב נערכו לאורך תקופה מדידות ישירות של ריכח כלורופיל בדגימות מים מהכנרת במקביל למדידות הפלאורופורב. המדידה הישירה מבוססת על מיצוי אורגני של הפיגמנטים וקביעת הריכח בפלאורומטר מעבדתי המכיל לתמיסת כלורופיל סטנדרטית. התוצאות באיור 50 מציגות יחס של ריכח הכלורופיל הנמדד בשתי השיטות עבור 3 אירועי פריחה שנמדדו בקשת הצפונית. הסטייה מקו ישר נובעת מכך שכיול הפלאורופורב לא מתאים באופן מלא לאוכלוסיית הפיטופלנקטון באגם. בנוסף קיימת סטייה מ-1 ביחס בין שני המדדים, והערכה של ריכח הכלורופיל על פי הפלאורופורב מהווה כ-75% מערכי המדידה הישירה.



**איור 50:** השוואת ריכחי כלורופיל בדגימות מים שנאספו מהכנרת מעומק 3 מ' בתחנות הדיגום "קשת צפונית". נתונים התקבלו לאחר מיצוי (y-axis) או נקבעו על ידי מערכת הפלאורופורב (x-axis).

**תוצאות ודיון**פיזור אוכלוסיות דומיננטיות באגם לאורך השנה

הפיזור האנכי של הכלורופיל בתחנות A ו-G לתקופה שבין אפריל לנובמבר 2020 מוצג באיור 51. בשתי התחנות נצפה ריכח גבוה של כלורופיל במהלך אפריל (סימון 1 באיור A ו B), זוהה כאוכלוסייה דומיננטית של דינופלגלטים עם נוכחות של ציאנובקטריה (מיקרוציסטיס "חום"). התפוצה בזמן ובמרחב של אוכלוסיות אלו מציגה תבנית שונה עבור שתי התחנות. בתחנה G האוכלוסייה מתועדת עד לעומק של 6-8 מ' ונוכחת עד תחילת מאי בעוד בתחנה A האוכלוסייה מרוכזת ב- 4 מ' עליונים ונוכחותה מצטמצמת באמצע אפריל. מסוף יולי ועד סוף אוקטובר זוהתה במטלימניון אוכלוסייה של חיידקים - מסדרת הכלורוביה (סימון 2 באיור 51). התופעה מוכרת ותועדה בעבר ומתקיימת באזורים בהם התרמוקלינה יציבה. בקיץ 2020, כמו גם בקיץ הקודם אוכלוסיית הכלורוביה התבססה במועד מאוחר יחסית לשנים קודמות ככל הנראה בעקבות חורף גשום במיוחד ועליית מפלס האגם. תיאור של התופעה והאוכלוסיות המיקרוביליות המעורבות בה התפרסמה לאחרונה בכתב העת *Freshwater Biology*<sup>2</sup>.



**איור 51:** שינויים בריכח כלורופיל בעמדות המים בתחנות A ו-G בין אפריל לדצמבר 2020. ריכח הכלורופיל הכללי מיוצג בסקלת צבעים לפי המפתח שמימין בין 0 ל- 90 מיקרוגרם לליטר. המלבן המסומן 1 מייצג בעיקר אוכלוסייה של דינופלגלטים (פרידיניום) וציאנובקטריה מכילי פיקואריתרין PE- (מיקרוציסטיס "חום"). האוכלוסייה המסומנת 2 היא של כלורוביום.

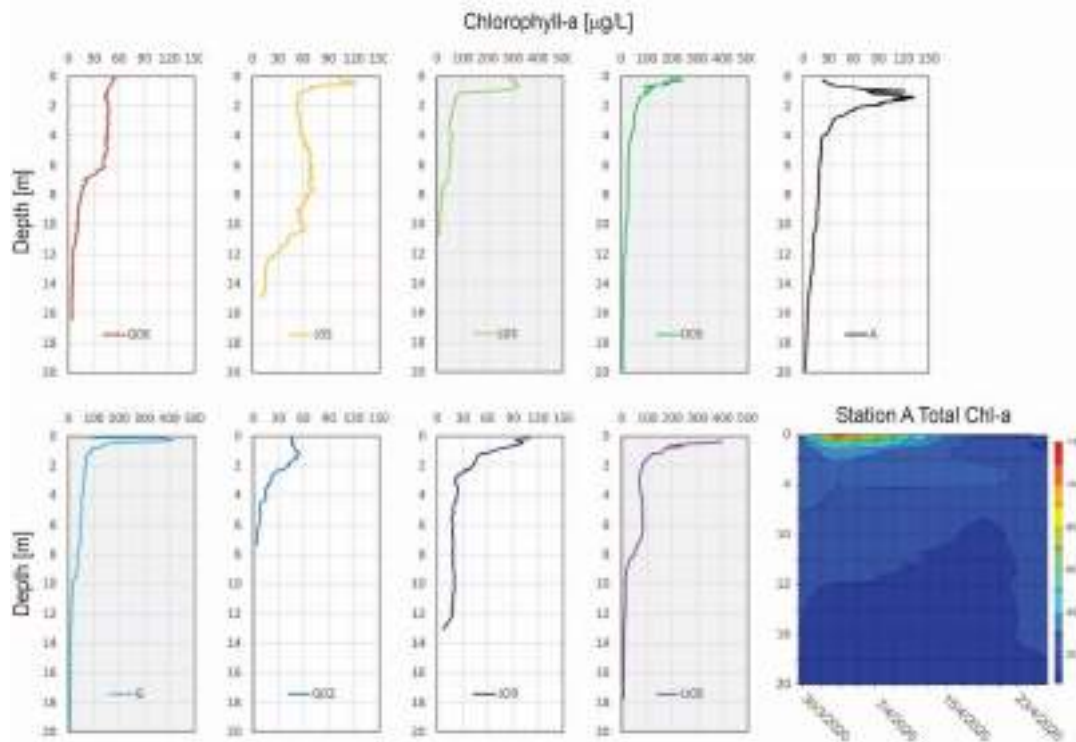
פיזור אוכלוסיות הפיטופלנקטון אביב 2020

תוצאות אופייניות לפיזור האנכי של הכלורופיל שנמדד באמצעות הפלאורופורב ב- 9 תחנות הדיגום מוצגות באיור 52 עבור מדידה שבוצעה ב- 2 באפריל 2020, מועד בו נצפתה בכנרת פריחה של פרידיניום עם נוכחות של ציאנובקטריה מהסוג מיקרוציסטיס (מופע חום). בנוסף, מוצגת תמונה כללית של פיזור הכלורופיל הכללי בחדש אפריל.

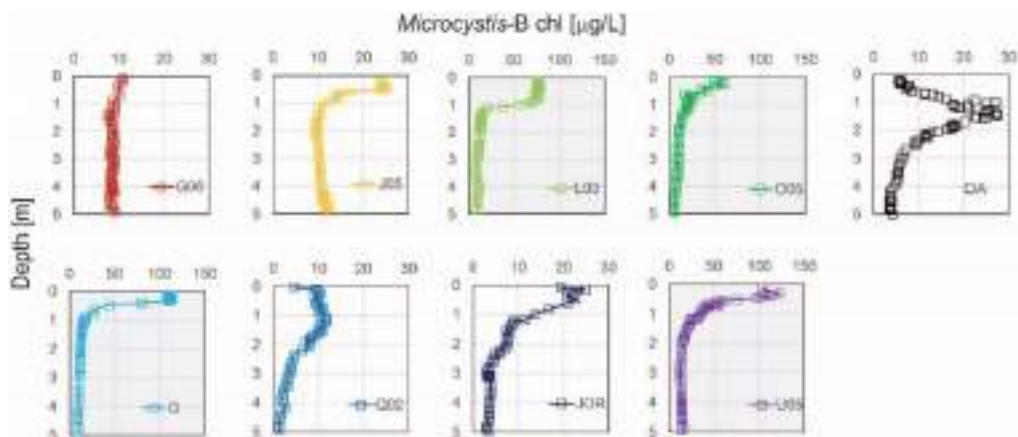
הפרופילים המוצגים באיור 52 מציגים שונות מרחבית מובהקת. תחנות G, O05, L04, ו-U05 (מוצגות עם רקע אפור וסקלה מרבית של 500 מיקרוגרם כלורופיל לליטר), מייצגות אזורים בהם ריכח גבוה במיוחד של פרידיניום אשר מתרכז בשכבת המים העליונה (0-1.5 מ'), אך באזורים אלו נמדד גם ריכח גבוה יחסית של ציאנובקטריה בשכבת המים העליונה (איור 53, ריכח כלורופיל המיוחס למיקרוציסטיס חום). בתחנות הדיגום

<sup>2</sup> Ninio, S, Lupu, A, Eckert, W, Ostrovsky, I, Viner Mozzini, Y, Sukenik, A. Metalimnetic chlorophyll maxima in Lake Kinneret - Chlorobium revisited. *Freshwater Biology*. 2021; 66: 468– 480.

G06, J05, Q04, JOR ו-A ריכח הכלורופיל נמוך יותר (בין 60 ל- 120 מיקרוגרם לליטר בשכבת המים העליונה) ופיזור אנכי אופייני לאזורים בהם אין פריחה. מפני המים ועד לעומק של כ- 2 מ' ריכח הכלורופיל מגיע לערך שיא ובהמשך הריכח דועך עם העומק. השונות בפרופילי הכלורופיל בתחנות המדידה השונות מייצגת שונות בתפוצת אוכלוסיית הפיטופלנקטון הנשלטת קרוב לוודאי על ידי המרכיב ההידרודינמי (זרמים) שבאזור המדידה ואופיינית לעונת האביב בה מתפתחת אוכלוסיות של פרידיניום ומיקרוציסטיס.



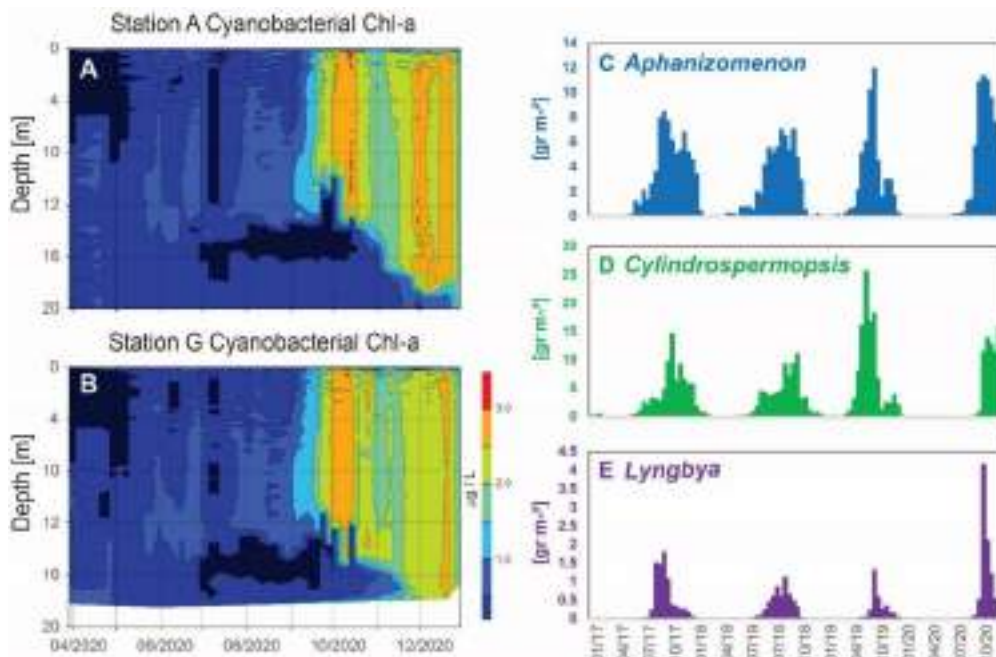
**איור 52:** פרופיל ריכח כלורופיל שנמדד במערכת הפלאורופורב ב- 2 באפריל 2020 בתחנות ה"קשת הצפונית" ובתחנה A. הסבר מפורט ראו בטקסט. בשל השונות הגבוהה בריכחי הכלורופיל בתחנות השונות סקלת ריכחים גבוהים 0-500 מיקרוגרם לליטר מסומנת ברקע אפור.



**איור 53:** פרופיל עומק של ריכחי כלורופיל המיוחס למיקרוציסטיס (חום) שנמדד במערכת הפלאורופורב ב- 2 באפריל 2020 בתחנות ה"קשת הצפונית" ובתחנה A. בשל השונות הגבוהה בריכחי הכלורופיל בתחנות השונות סקלת ריכחים גבוהים 0-150 מיקרוגרם לליטר מסומנת ברקע אפור. ההפרש בין הנתונים המוצגים באיור זה לאלו באיור 52 מייצגים את אוכלוסיית הפרידיניום. עיקר אוכלוסיית המיקרוציסטיס מתרכזת בסמוך לפני המים בדומה לאוכלוסיית הפרידיניום.

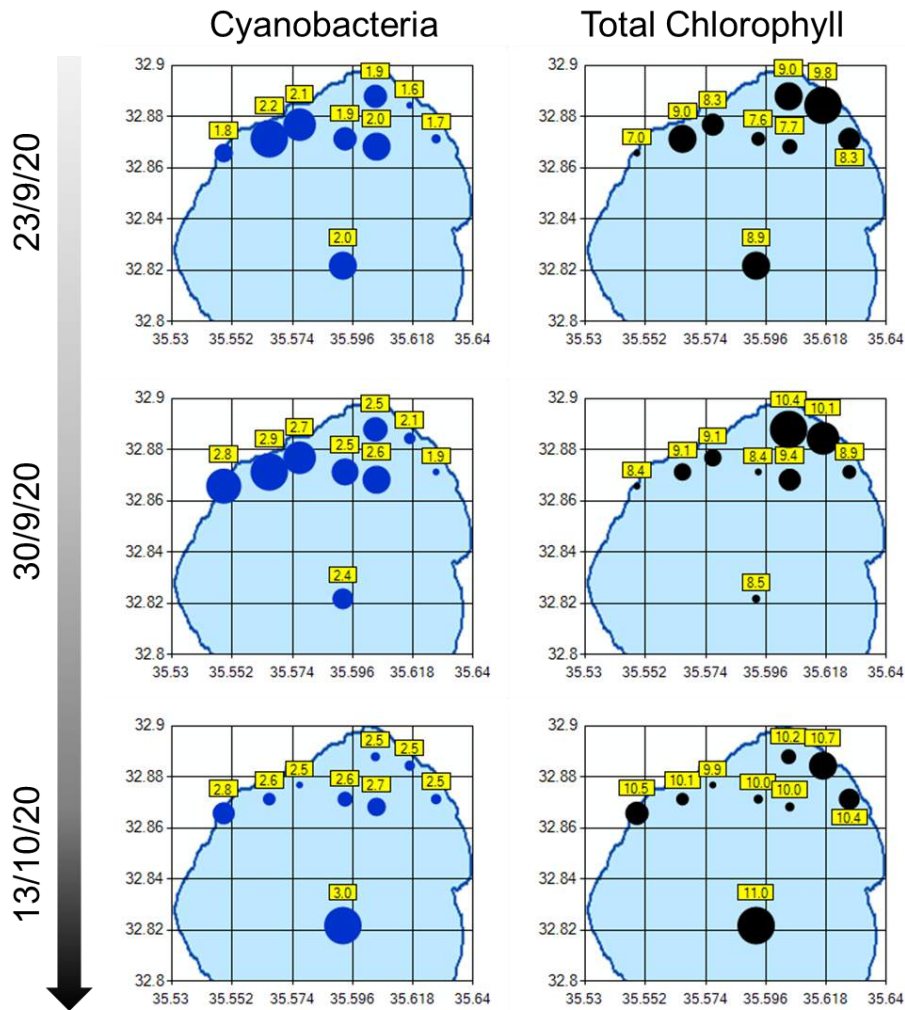
פיזור אוכלוסיות הפיטופלנקטון – קיץ סתיו 2020

פריחת ציאנובקטריה נצפתה באגם החל מתחילת ספטמבר 2020. עוצמת הפריחה והמינים העיקריים מוצגים באיור 54. הפריחות שנצפו בכמה שיאים התאפיינו בפיזור אנכי אחד, אך עומקן המרבי שונה מעט בין תחנה A (איור 54A) ל G (איור 54B) ככל הנראה בגלל הפרשי העומקים של הקרקעית וכן כתוצאה מתנודה מרחבית בעומק התרמוקלינה. בנוסף ניתן לראות שהתפתחות אוכלוסיות הציאנובקטריה בצפון האגם (תחנה G) מקדימות במעט את הנוכחות במרכז האגם. פיק הפריחה הראשון זוהה כאפניזומנון (איור 54C) מסדרת הנוסטוקאלס, הידוע ביצור טוקסינים מסוג צילינדרוספרמופסיס. שיא נרשם במהלך אוקטובר, עם ערכים של כ- 12 ג' למ"ר של ביומסה רטובה. מאמצע אוקטובר נרשמה דעיכת האפניזומנון. במהלך אוקטובר החלה להתפתח פריחה של צילינדרוספרמופסיס (איור 54D) גם היא מהנוסטוקאלס, מזן אשר אינו מיצר טוקסינים, ופריחתו המשיכה עד לינואר 2021 (לא מוצג בגרף). ערכים מקסימליים הגיעו ל~17 ג' למ"ר של ביומסה רטובה. במקביל לפריחה זו התפתחה פריחה של לינגביה (איור 54E) אשר ערכיה היו נמוכים יחסית לפריחת שני המינים הנ"ל (שיא של כ- 4 ג' למ"ר ביומסה רטובה), אך גבוהה משמעותית לעומת פריחות הלינגביה בשנים האחרונות. לינגביה הינה ציאנובקטריה ממשפחת האוסילטוריאליס אשר יכולה ליצר רעלנים. רעלני הלינגביה לא נבדקו עד כה בכנרת, וכעת אנו מתחילים לבחון נוכחותם במים באופן ראשוני בשיטות מולקולריות.



**איור 54:** שינויים בריכוז כלורופיל בעמודת המים בתחנות (A) ו-G (B) בין אפריל לדצמבר 2020 בדגש על אוכלוסיות ציאנובקטריה. סולם הצבעים מימין מייצג ריכוז כלורופיל בין 0 ל- 3.5 מיקרוגרם לליטר. התפלגות ביומסה רטובה של אפניזומנון (C), צילינדרוספרמופסיס (D), ולינגביה (E) שפתחו פריחה בסתיו בהשוואה לשנים האחרונות.

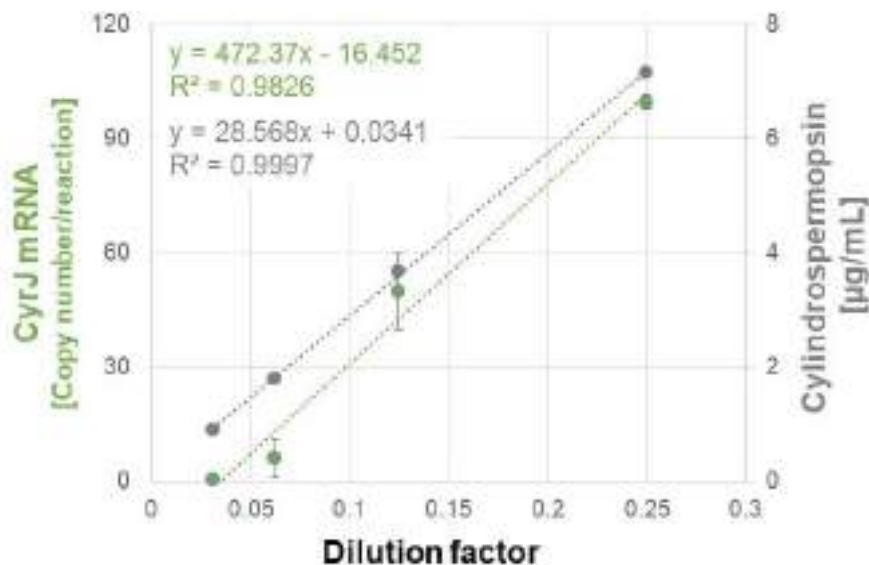
דוגמה לשינוי בתפוצה המרחבית של ציאנובקטריה בקיץ-סתיו 2020 מוצגת באיור 55 עבור עומק של 2 מ', בהשוואה לריכוז הכלורופיל הכללי בנקודות המדידה השונות של הקשת הצפונית. ניתן לראות שפריחת הציאנובקטריה (מוצגת בכחול) החלה לפני תחילת הדיגום המורחב, לכן קשה להצביע על מיקום תחילת הפריחה, אולם בשונה מהכלורופיל הכולל (מוצג בשחור), נראה כי פיזור הציאנובקטריה גבוה יותר במערב הכנרת. מכאן עולה אפשרות שהתפתחות אוכלוסיית האפניזומנון מקורה בצפון מערב האגם.



**איור 55:** ריכוזי כלורופיל כללי (בשחור) וכלורופיל ציאנובקטריאלי (בכחול) בתחנות ניטור ה"קשת צפונית" בעומק 2 מ' בשלושה תאריכים בספטמבר-אוקטובר 2020. ריכוז הכלורופיל (מיקרוגרם לליטר) מוצג כעיגול ששטחו מיצג את הריכוז. ערך הכלורופיל בכל נקודת דיגום מצוין במלבן צהוב.

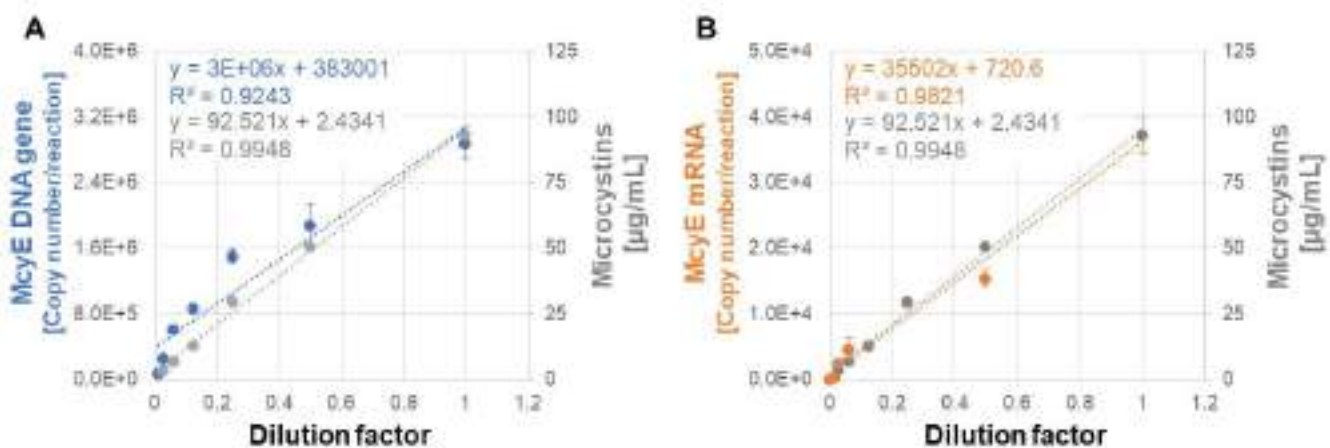
בחינת אפשרות חיזוי נוכחות טוקסינים בעזרת אנליזות מולקולריות

בכדי לבחון אפשרות זולה ומהירה לזיהוי פוטנציאל יצירת רעלנים של ציאנובקטריה, בהשוואה לשיטות האנליטיות (LC-MS; HPLC-DAD), הערכנו את רמת הגנים המעורבים ביצור הרעלנים צילינדרוספרמופסין ומיקרוציסטינים בסדרת מיהולים של תרביות מעבדה של אפניזומנון (*Aphanizomenon ovalisporum*) ומיקרוציסטיס (*Microcystis aeruginosa*). מטרתנו הייתה לבחון מתאם (קורלציה) בין תפוצת הגנים הרלוונטים ורמת הביטוי שלהם (כ- mRNA, המכונה גם תעתיק או טרנסקריפט) לבין רמות הטוקסין הנמדדות ב- HPLC. באיור 56 מוצגות תוצאות הקורלציה בין ריכחי הטרנסקריפט של הגן *CyrJ* המקודד לאנזים ליצירת הרעלן (כפי שנמדד ב qPCR; ציר Y שמאלי), והרעלן צילינדרוספרמופסין (כפי שנמדד במכשיר ה- HPLC; ציר Y ימני) כפונקציה של מיהול התרבית (ציר ה X). כפי שניתן לראות, שני המדדים, ריכח הטרנסקריפט ליצירת הרעלן, והרעלן עצמו הינם ביחס ישר למיהול תרבית האפניזומנון (  $R^2 = 0.9826$  ,  $R^2 = 0.9997$  , בהתאמה). בעקבות מגבלות הקורונה בשנה זו לא הספקנו להיערך להפקת RNA מדוגמאות מהכנת בזמן פריחת האפניזומנון, ולכן לא ניתן להשוות את רמת הביטוי של הגן לעומת הרעלן בתנאי האגם. האפניזומנון מפרישה חלק ניכר מהרעלן למים ולכן יתכן שתהיה הסתה בערכים של כלל הרעלן המצוי במים לעומת כלל הביומסה של הציאנובקטריה, תפוצת הגן ורמת הביטוי שלו. על מנת להבין האם יש מתאם קבוע בין ריכח הגן המבוטא, לריכחי הרעלן הכוללים (תוך תאי ומופרש למים), יש צורך בהמשך דיגום מהאגם לאורך כל הפריחה, ברמות ביומסה שונות. בנוסף, יש צורך לערוך השוואה בין ריכחי הגן המצוי ב- DNA (פוטנציאל הביטוי) לבין יצירת הרעלן, שכן בחינת ריכחי ה- DNA פשוטה ומכניסה פחות סטיות הנובעות מריבוי שלבים בדטקציה של רמת הביטוי כ- mRNA.



**איור 56:** מתאם (קורלציה) בין ריכח mRNA של הגן *CyrJ* (ציר Y שמאלי), או ריכחי הרעלן צילינדרוספרמופסין (ציר Y ימני), כתלות ביחס מיהולי תרבית של אפניזומנון (*Aphanizomenon ovalisporum*).

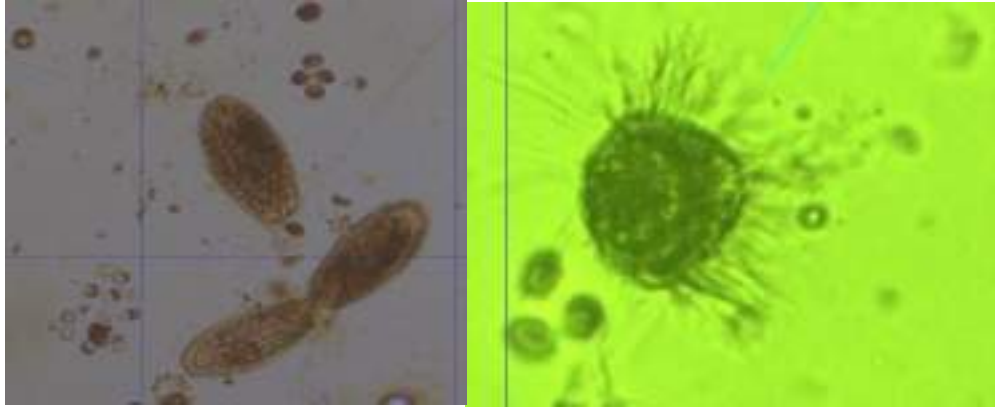
באיור 57A מוצגות תוצאות הקורלציה בין ריכוז הגן *McyE* המקודד לאנזים ליצירת הרעלן (mRNA שנמדד ב-qPCR; ציר Y שמאלי), או ריכוז מיקרוציסטינים (כפי שנמדד במכשיר ה-HPLC; ציר Y ימני) כתלות במיהול תרבית של מיקרוציסטיס (ציר ה X). באיור 57B מוצגות תוצאות הקורלציה בין רמת הטרנסקריפט של הגן כתלות במיהול התרבית. ברמת ה-DNA, ריכוז הגן המיצג את הפוטנציאל הגנטי ליצירת הרעלן, והרעלן עצמו הינם ביחס ישר למיהול התרבית ( $R^2 = 0.969, 0.994$ , בהתאמה). גם ברמת ביטוי הגן, ריכוז ה-mRNA שומר על קורלציה מול רמות הרעלן ביחס למיהול התרבית ( $R^2 = 0.982, 0.995$ , בהתאמה). בשני המדדים המולקולריים נראה כי יעילות הבדיקה טובה יותר במיהולים הנמוכים יותר, ואילו בריכוזים הגבוהים (ללא מיהול, 1000 תאים למ"ל, ובמיהול של 1:2, 500 תאים למ"ל) נצפתה הטיה מיחס ישר לעומת אלו שהתקבלו מאנליזת הרעלן. פתרון לבעיה זו הוא מיהול הדוגמא לפני הפקת ה-DNA ותיקון התוצאות לפי מקדם המיהול. ריכוז הגן גבוה בשני סדרי גודל מריכוז ה-mRNA כיוון שבריכוזים הגבוהים הפקת ה-RNA הייתה פחות טובה ולכן לא נכללו באנליזה. בנוסף, ריכוז ה-RNA נמוך מזה של ה-DNA, בניגוד למצופה. זאת ככל הנראה בעקבות ריבוי שלבי הפקת ה-RNA, והיותה מולקולה פחות יציבה מה-DNA. אף אל פי כן, במיהולים השונים נשמר יחס קבוע בין ריכוזי ה-DNA ל-RNA. היחס הישר עם ריכוז הטוקסין, היחס הקבוע מול ה-mRNA, וכן פשטות הפקת ה-DNA, מומלץ להשתמש באנליזה של DNA לחיזוי מוקדם של מיקרוציסטינים ברמת התרבית. על מנת להבין האם המנגנון מתאים גם עבור דוגמאות מהאגם, בימים אלה נבדקת התאמה בין רמות הרעלן לרמות הגנים בדוגמאות מהכנרת, בעת התפתחות פריחה של מיקרוציסטיס.



**איור 57:** מתאם (קורלציה) בין ריכוז הגן *McyE* ב-DNA (A), וב-mRNA (B) (ציר Y שמאלי), וכן ריכוזי הרעלן מיקרוציסטיס (ציר Y ימני), לבין יחס מיהולי תרבית של מיקרוציסטיס (*Microcystis aeruginosa*).



## 2.20 ניטור ציליאטים בכנרת



**במימון  
רשות  
המים**

**נחמה רושנסקי, גדעון גל**

- במים העליונים (אפילימניון), נצפו ערכים גבוהים יחסית לאורך רב השנה.
- בפברואר, אחרי ההיפוך, נצפתה צפיפות גבוהה בכל השכבות, אשר התאפיינה בערכים גבוהים של *sphere* ו-*Tintinid*.
- בתרמוקלינה, בחודש יולי, נמצאה צפיפות חריגה יחסית עם ערכים גבוהים במיוחד של *Coleps* ו-*Tintinid*.
- מאז 2014 נמשכת המגמה שצפיפות הציליאטים גבוהה באפילימניון, יורדת במטהלימניון ונמוכה יחסית בהיפולימניון.
- משנת 2017 ניכרת מגמת ירידה בביומסה של הציליאטים במטהלימניון ובהיפולימניון.

### מטרת הניטור

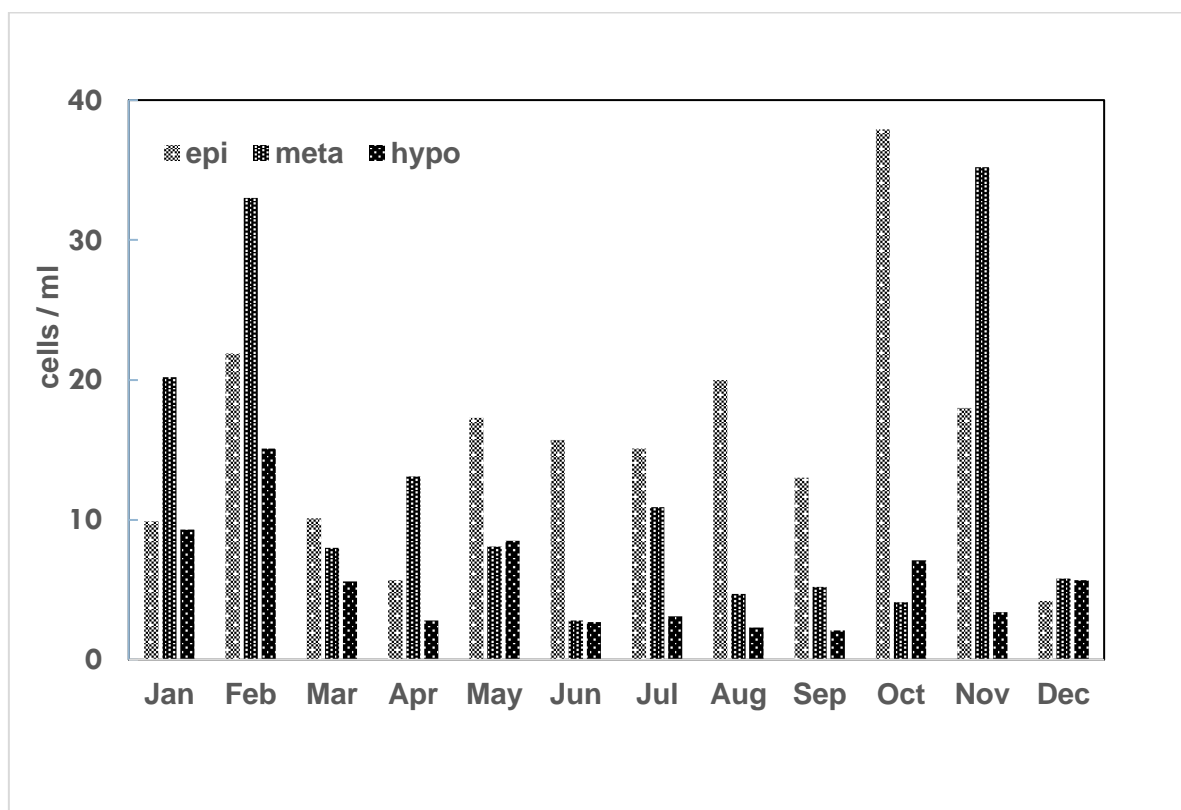
ניטור ציליאטים כמרכיב במארג המזון ובלולאה המיקרוביאלית.

### שיטות

ניטור ציליאטים מתקיים משנת 2007 ונערך פעם בחודש בתחנה A, משלוש שכבות של עמודת המים: האפילימניון (עומק 1 מ'), אזור המטהלימניון (20 מ') והשכבה העמוקה, ההיפולימניון (35 מ'). בזמן השיכוב נלקחת דגימה נוספת מאזור התרמוקלינה. אנו משקיעים דוגמת מים בה החלקיקים רוכזו פי 10 בהשקעה מוקדמת, סופרים ומודדים את הציליאטים ב- 1 מ"ל מהנפח ששקע. הספירה נעשית לפי סוגים טקסונומיים עבור הסוגים המוכרים לנו כמו *Vorticella*, *Tintinidium*, *Coleps*, ולפי הצורות הגיאומטריות (כדור, גליל, ספרואיד) עבור ציליאטים שאיננו בטוחים בהגדרתם. הפרטים נספרים בעזרת מערכת פלנקטומטריקס שבעזרתה מבוצעת גם המרה לביומסה (משקל רטוב) עפ"י משקלים ייעודיים לכל מין. ביומסת הפחמן חושבה לפי 140 ננוגרם פחמן ל- 1 מיקרוגרם משקל רטוב.

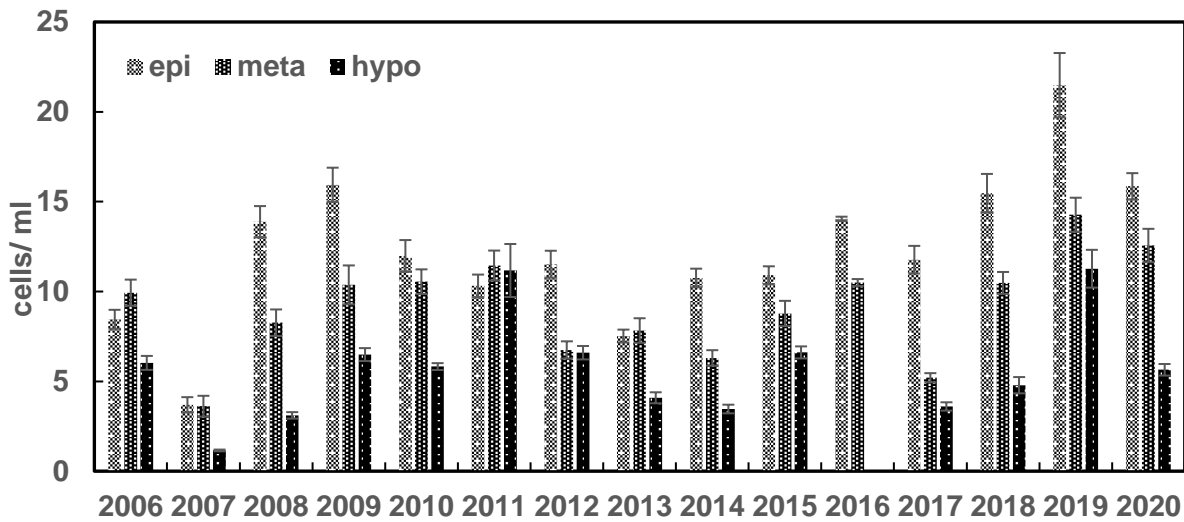
**תוצאות ודיון**

ב- 2020, צפיפות כלל הציליאטים בכל שכבת המים הייתה גבוהה בחורף (ינואר – פברואר) ובסתיו (אוקט' – נוב'), עם ממוצע של כ- 18 תאים למ"ל, לכל השכבות. בפברואר, אחרי ההיפוך, נצפתה צפיפות גבוהה במיוחד יחסית בכל השכבות (23.3 תאים למ"ל בממוצע), אשר התאפיינה בערכים גבוהים של sphere ו- *Tintinid*, 6 ו- 16 תאים למ"ל, בהתאמה. במים העליונים (אפילימניון), נצפו ערכים גבוהים יחסית לאורך כל השנה, למעט באפריל ודצמבר. באוקטובר נצפתה צפיפות חריגה של 38 תאים למ"ל, שהתאפיינה בתאים מסוג sphere ו- prolate spheroid ובצפיפות גבוהה יחסית של *Coleps* ו- *Tintinid*. במטהלימניון, נצפתה צפיפות גבוהה של ציליאטים בתחילת החורף, סמוך להיפוך ולאחריו (12 תאים למ"ל), וגם עלייה חדה בנובמבר (23 תאים למ"ל), אשר התאפיינה בערכים גבוהים של sphere ו- *Tintinid*. בהיפולימניון, נמצאה צפיפות נמוכה יחסית לאורך השנה, עם עלייה קטנה בפברואר, אחרי ההיפוך, שהתאפיינה בעליית מספר ה- *Tintinid*. בתרמוקלינה, בחודש יולי, נמצאה צפיפות חריגה יחסית עם ערכים גבוהים במיוחד של *Coleps* ו- *Tintinid* (איור 58).



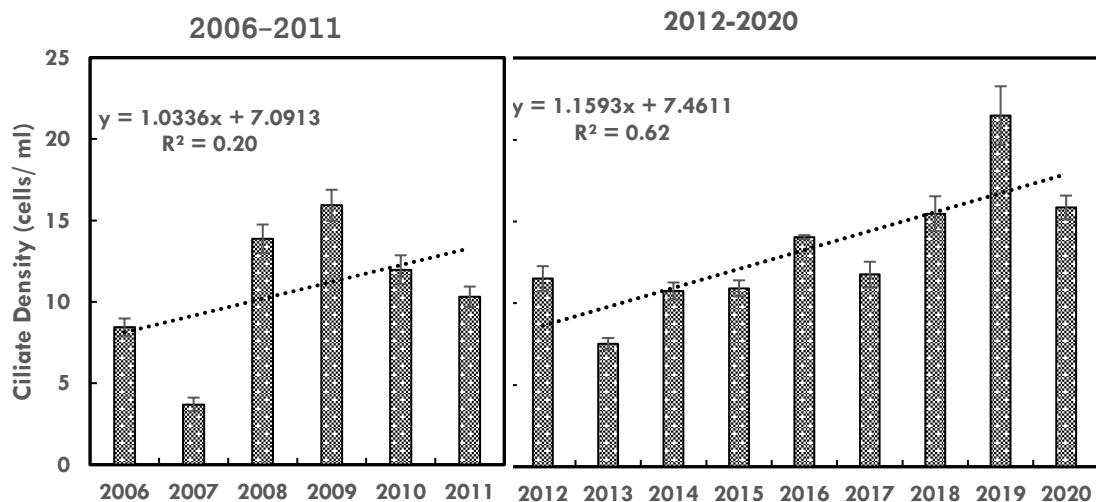
**איור 58:** הצפיפות החודשית של הציליאטים (מספר למ"ל) בשכבות השונות במהלך שנת 2020.

בהתפלגות הערכים הרב שנתית בין השכבות, נמצאה ב- 2020 תמונה דומה לזו שהייתה ב- 2018, כאשר השנה הקודמת, 2019, היתה חריגה בצפיפות הגבוהה יחסית בכל השכבות באגם (איור 59). באפילימניון, הערכים (16 תאים למ"ל) גבוהים יחסית לאלו שנמצאו מתחילת הניטור ב- 2006, ודומים לערכים ב- 2018. בהיפולימניון, הצפיפות לאורך השנים יציבה יחסית ונעה בין 4 ל- 7 תאים למ"ל, למעט הערכים הנמוכים (פחות מ 3 תאים למ"ל) ב- 2007 ו- 2008 וב- 2016, והערכים הגבוהים במיוחד (11 תאים למ"ל) ב- 2011 וב- 2019.



**איור 59:** הצפיפות הממוצעת של ציליאטים (מספר למ"ל) בשכבות העומק השונות עבור התקופה 2006-2020. הקווים האנכיים מבטאים את שגיאת התקן.

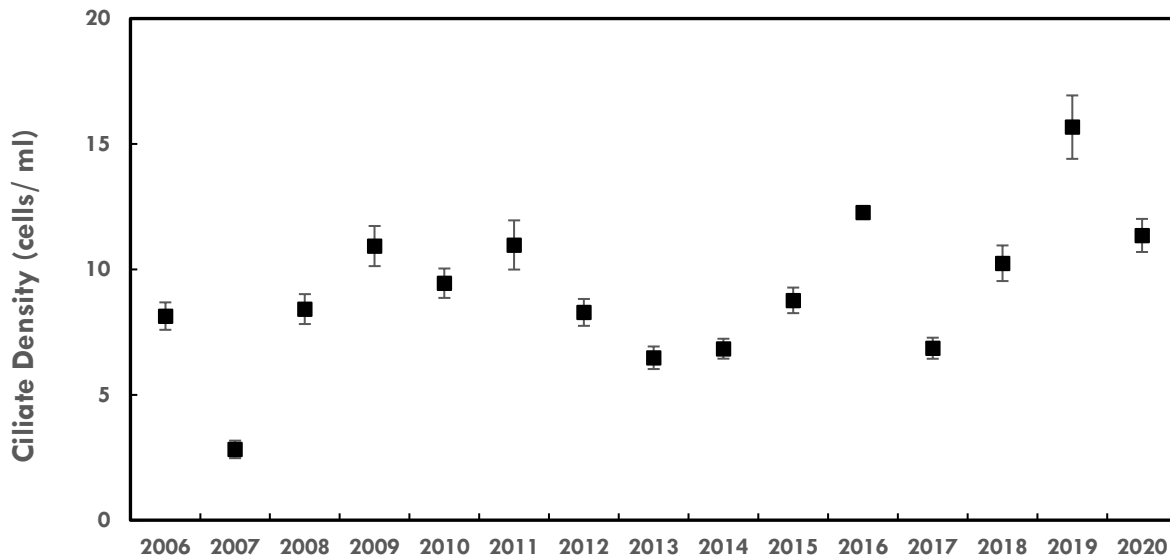
באפילימניון, בין השנים 2006-2011 נצפתה מגמה מסוימת של עליה בצפיפות בעקבות שנתיים של ערכים גבוהים בשנים 2008-2009. לעומת זאת, בשנים 2012-2020 ניתן לזהות מגמת עליה ברורה יותר בקצב ממוצע של 1.16 תאים למ"ל לשנה. ה  $R^2$  בין השנים 2006-2011 היה נמוך בהרבה מזו של קו המגמה בשנים 2012-2020 (איור 60).



**איור 60:** השינוי בצפיפות השנתית הממוצעת באפילימניון בין השנים 2006-2011 (משמאל) ובין 2012-2020 (מימין). הקווים המנוקדים הינם קווי מגמה.

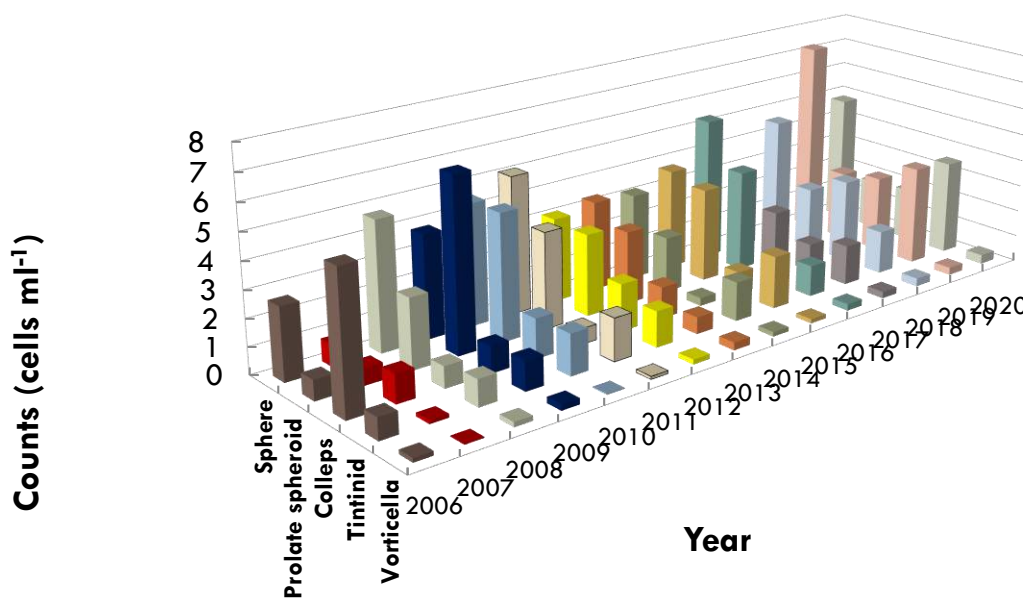
מתוך ספירת דגימות הציליאטים במהלך שנת 2020, נמצא כי מגמת העלייה משנת 2017 – 2019 בערכי הצפיפות השנתית הממוצעת בכל עמודת המים לא נמשכה ונצפתה ירידה דומה לזו שנמצאה בין השנים 2016 - 2017 ובין 2011-2012 (איור 61). מגמת הירידה שנצפתה בריכוז הציליאטים משנת 2011 ועד 2013, יחד עם העלייה בצפיפות שנצפתה בין 2014-2016 ובין 2017-2019 מצביעים על חוסר יציבות או אולי מחזוריות רב-שנתית מסוימת.

המשך ניטור הציליאטים בשנים הבאות יאפשר לנו לקבוע האם אכן קיימת מחזוריות רב שנתית באוכלוסיית הציליאטים.



**איור 61:** ריכוז הציליאטים השנתי הממוצע (2006-2020) על בסיס דיגום של שלושת שכבות עמודת המים: האפילימניון, המטהלימניון, וההיפולימניון. מספר הדגימות בשנה נע בין 35-45. הקווים האנכיים מבטאים את שגיאת התקן.

בשונה מ-2019, ב-2020 נמצאה ירידה בצפיפות הציליאטים המקוטלגים בקבוצת Sphere וגם בצפיפות Coleps. צפיפות ה-*Tintinides* והציליאטים המקוטלגים בקבוצת Prolate spheroid הייתה דומה לערכים שנמצאו ב-2019. צפיפות ה-*Vorticella* ממשיכה להיות נמוכה באגם מתחילת שנות הניטור. (איור 62).



**איור 62:** השינויים בצפיפויות השנתיות הממוצעות של קבוצות הציליאטים השונות בעמודת המים עבור התקופה 2006-2020.

קיימים קשיים בדיגום הציליאטים, העלולים להשליך על איכות האומדנים שלנו. הדיגום שאנו עורכים מתבצע משלושה עומקים ספיציפיים בלבד בעזרת דוגם מים. ידוע לנו שהציליאטים לעיתים קרובות מרוכזים בשכבות צרות וצפופות. על כן, דיגום בשלושה עומקים ספיציפיים, עלול ליצור מצב שבו אנו דוגמים מים שמעט עמוקים או רדודים מהשכבה הצפופה של הציליאטים ובכך כנראה "מפספסים" את אותה שכבה צפופה. בנוסף, השונות הרב שנתית בצפיפויות הציליאטים, בעומקים השונים ובכלל עמודת המים, מחייבים מציאת פתרון לאופי הדיגום על מנת לצמצם את ההשפעות האפשריות של תדירות הדיגום (בזמן ובעומק) על התוצאות.

## 2.21 ניטור זואופלנקטון



במימון  
רשות  
המים

גדעון גל, שרון וורולקר

- נרשמה ירידה של כ-30% בצפיפות הכוללת של הזואופלנקטון במהלך 2020 ביחס לשנת 2019.
- הירידה בצפיפות חופפת לעליה בצפיפות הדגים הקטנים (לבנון) באגם כצפוי כשנה וחצי עד שנתיים לאחר עליה משמעותית במפלס האגם.
- ערכי צפיפות נמוכים במיוחד נרשמו במהלך חודש ספטמבר שהיה מהחודשים החמים ביותר שתועדו מאז תחילת הניטור.

#### מטרת המחקר

מעקב ארוך טווח אחר השינויים באוכלוסיית הזואופלנקטון בכנרת בדגש על שינויים היכולים להעיד על תמורות במצב המערכת האקולוגית של הכנרת.

**רקע**

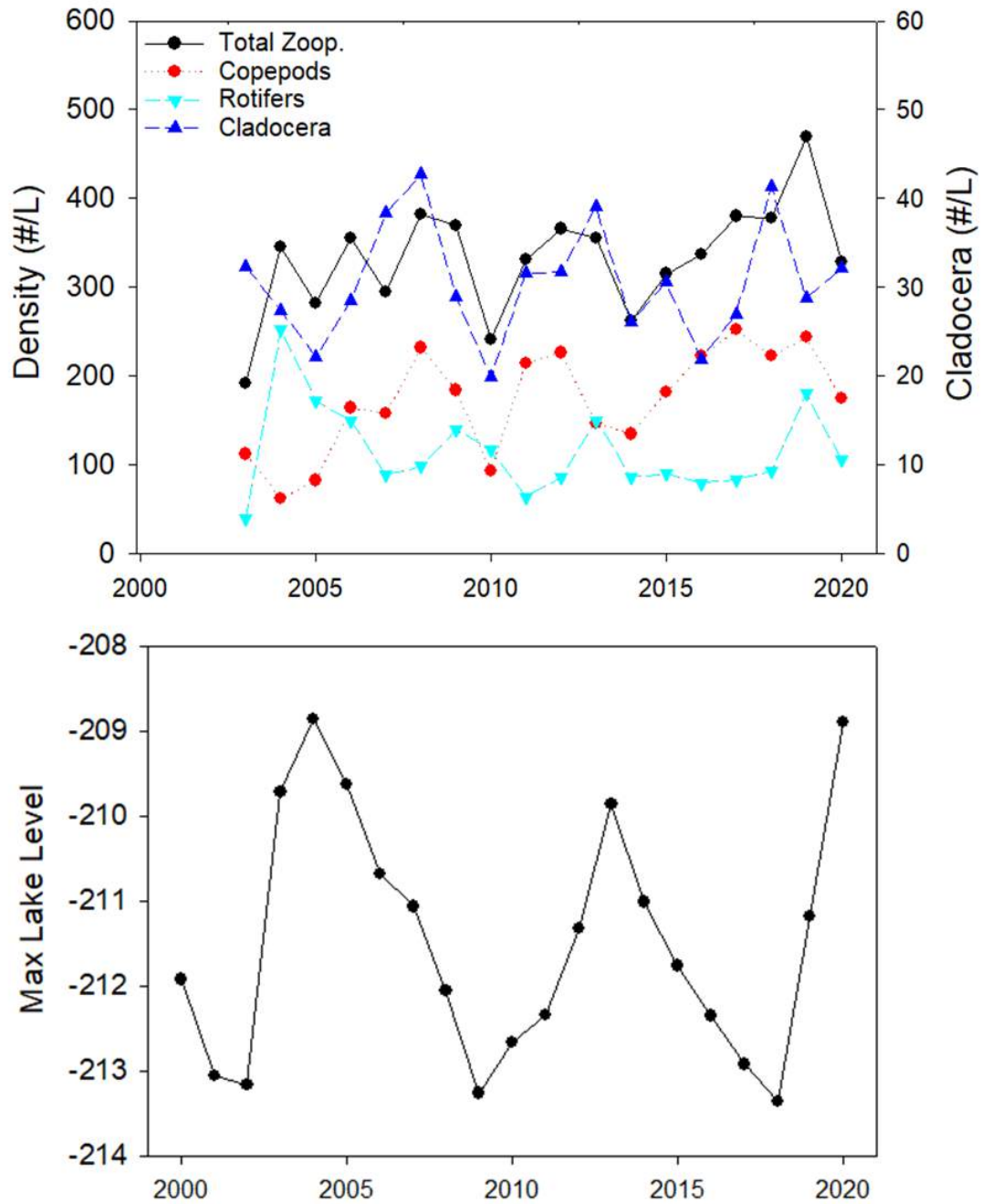
ניטור הזואופלנקטון אשר החל עם תחילת תכנית הניטור של הכנרת בינואר 1969 עבר מספר שינויים לאורך השנים. השינוי הבולט היה השילוב של דיגום פרופילים בנוסף לדיגום המיקס שנערך מאז 1969. בניגוד לדיגום המיקס שכולל דוגמא אחת שהיא תערובת של מים ממספר עומקים, המאפשר תמונה אינטגרטיבית של עמודת המים, דיגום הפרופיל כולל דיגום וספירה של דגימות שנאספו ממספר עומקים. הדיגום בשיטה זאת מאפשר שמירה על המידע הנאסף בכל עומק ועומק זיהוי מאפיינים ומגמות בזמן וגם במרחב, במימד האנכי. מאז שנת 2003, ניטור הזואופלנקטון כולל את שתי שיטות הדיגום והספירות הללו.

**שיטות**

דיגום הזואופלנקטון נעשה בתחנה A בשתי שיטות שונות. השיטה הראשונה, שיטת המיקסים, המופעלת במסגרת הניטור פחות או יותר ללא שינויים מאז תחילתו וכוללת דיגום של 1 ליטר מים מהעומקים 1,3,5,7,10,15,20,25,33 מ' בתקופה שבה האגם מעורבב או עד עומק התרמוקלינה, בנוסף לדיגום מטר מעל ומטר מתחת לתרמוקלינה. הדגימות מכל העומקים, מרוכזות לכלי אחד ומעורבבות היטב. מהכלי נלקחת דגימת מים אחת של 1 ליטר לספירה. בשיטת המיקסים, נדגמים בכל עומק כמעט 10 ליטר של מים אשר מרוכזים לבקבוק כך שישנה דגימה מכל עומק. הדגימות משומרות באגם ומוחזרות לאנליזה במעבדה תחת מיקרוסקופ לצורך זיהוי, ספירה ומדידה.

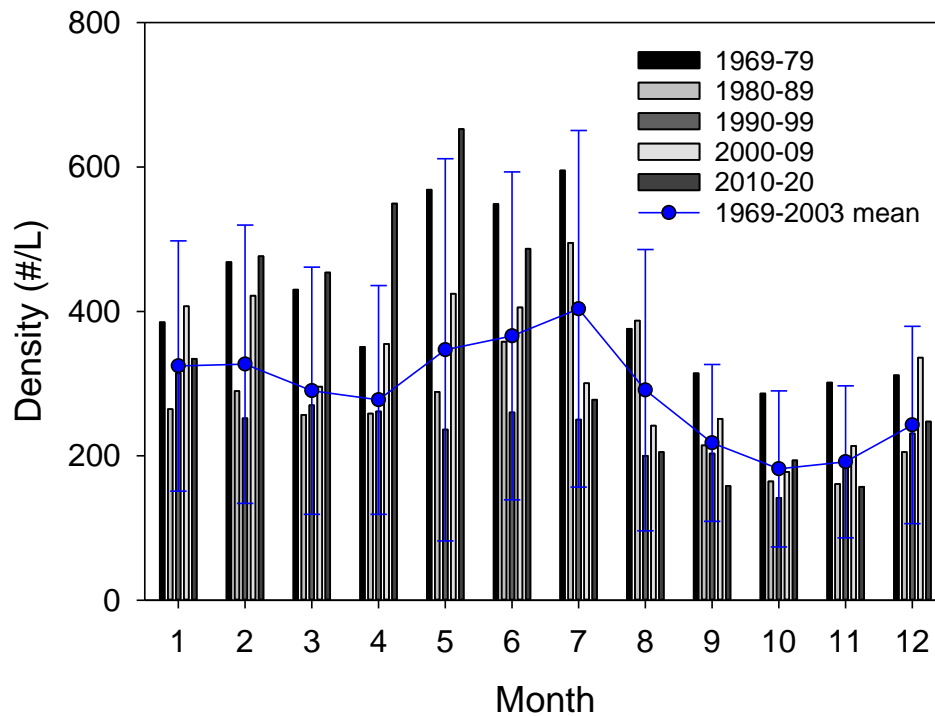
**תוצאות ודין**

במעקב אחר השינויים בצפיפות הכוללת של הזואופלנקטון באגם מאז 2003, בעזרת דגימות הפרופילים (איור 63), ניתן לראות שבשנה האחרונה חל שינוי במגמה שנצפתה מאז שנת 2014, עם ירידה משמעותית בצפיפות הזואופלנקטון באגם. בשנה החולפת הצפיפות הכוללת הממוצעת של סה"כ הזואופלנקטון ירדה מערך של 469.7 פרטים לליטר בשנת 2019 לערך של 328.5 פרטים לליטר בממוצע בשנת 2020 המשקפת ירידה של 30% בצפיפות הכוללת. הערך שנרשם בשנה החולפת דומה לערכים שנרשמו בשנים 2015-2016 (315.0-337.1 פרטים לליטר). הירידה נבעה מירידה בצפיפויות של הקופודים ושל הרוטיפרים אשר ביחד מהווים את עיקר הזואופלנקטון באגם. בקופודים נרשמה ירידה של כ- 28% בצפיפות הממוצעת לערך של 174.9 פרטים לליטר וברוטיפרים הירידה הייתה בולטת יותר (42%) לערך ממוצע של 105.3 פרטים לליטר. רק בקבוצת הקלדוסירה נרשמה עליה של 12% בצפיפות הממוצעת לערך של 32.1 פרטים לליטר.



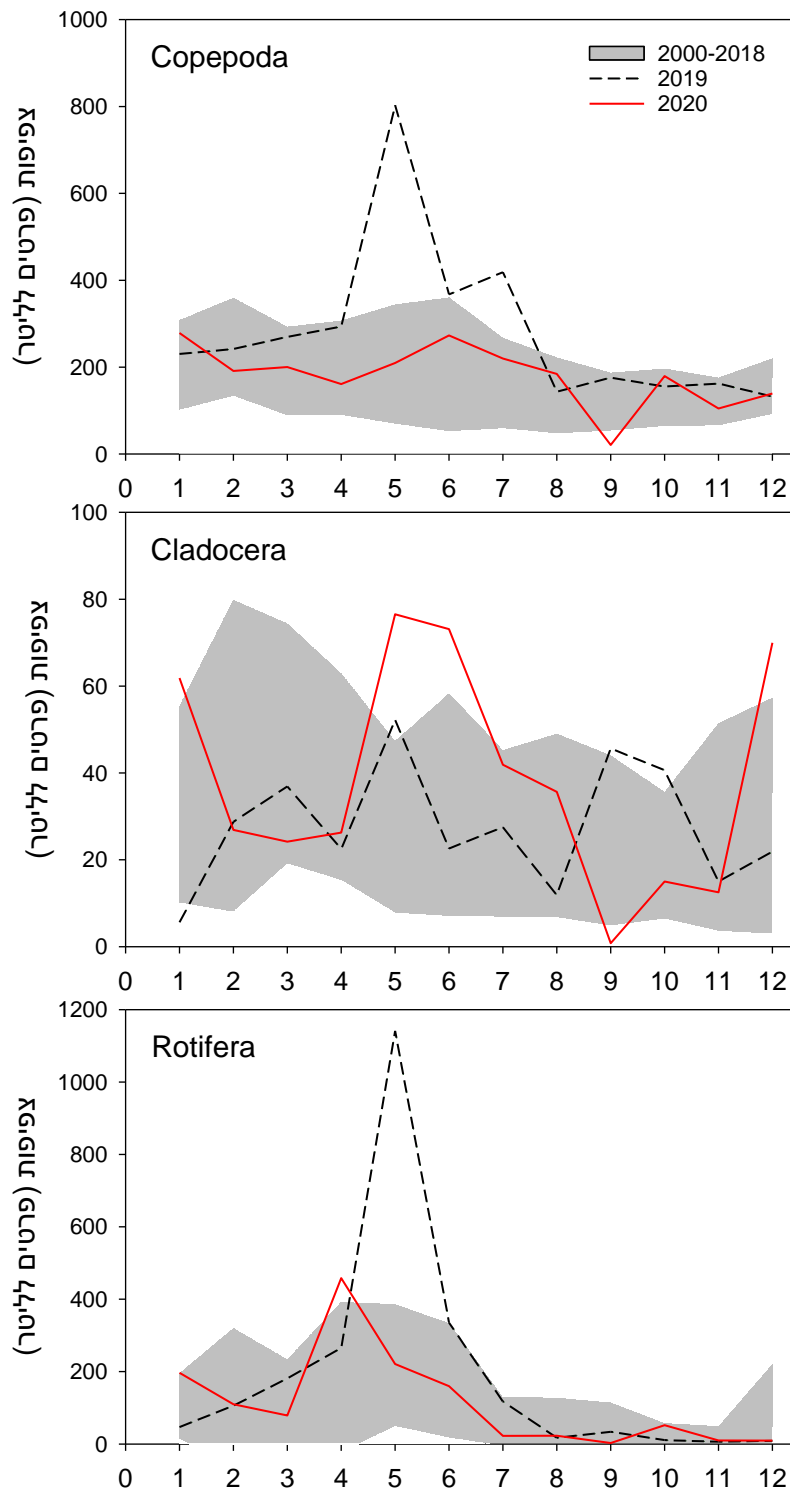
**איור 63:** באיור העליון, צפיפות שנתית ממוצעת של כלל הזואופלנקטון באגם והחלוקה עפ"י קבוצות טקסונומיות, על פי דיגום הפרופילים, בין השנים 2003-2020. ערכי הצפיפות של קבוצות הקלדוצירה מופיעים בציר האנכי הימני. באיור התחתון, מפלס אגם מקסימלי שנתי משנת 2000.





**איור 64:** צפיפות חודשית ממוצעת של זואופלנקטון עבור עשורים שונים בשנים 1969-2020 (עמודות) והממוצע החודשי הרב-שנתי לשנים 1970-2003 וסטיות התקן (קו אנכי). הנתונים מבוססים על דיגום המיקסים.

בבחינה של צפיפות הקבוצות הטקסונומיות העיקריות של הזואופלנקטון במהלך שנת 2020, ביחס לשנת 2019 ולממוצע הרב-שנתי בין השנים 2000-2018, ניתן להבחין במספר תופעות חריגות (איור 65). התופעה החריגה ביותר שנצפתה במהלך 2020 הייתה ערכי הצפיפות הנמוכים ביותר שנרשמו במהלך חודש ספטמבר. ערכים אלו דומים אם כי גבוהים רק במעט מהערכים הנמוכים ביותר שנרשמו במהלך חודש אוגוסט 2010, בשיא גלי החום. באוגוסט 2010 נרשמו שיאים בטמפרטורות האוויר ברחבי הארץ וכן בטמפרטורת המים של הכנרת והוא היה החודש בעל הטמפרטורה הממוצעת הגבוהה ביותר מאז תחילת הניטור הקבוע המתבצע ע"י המעבדה לחקר הכנרת. טמפרטורות המים המקסימלית במהלך חודש ספטמבר בעומקים 1-5 מ' הייתה  $33.81^{\circ}\text{C}$ . טמפרטורה זו הינה החמה ביותר שנרשמה במהלך חודשי הקיץ (יולי-ספטמבר) בעשור האחרון, למעט ערך יחיד הגבוה רק במעט ( $33.9^{\circ}\text{C}$ ) באוגוסט 2015, וגבוהה ביותר משתי מעלות מהממוצע לחודש ספטמבר בעשור האחרון.



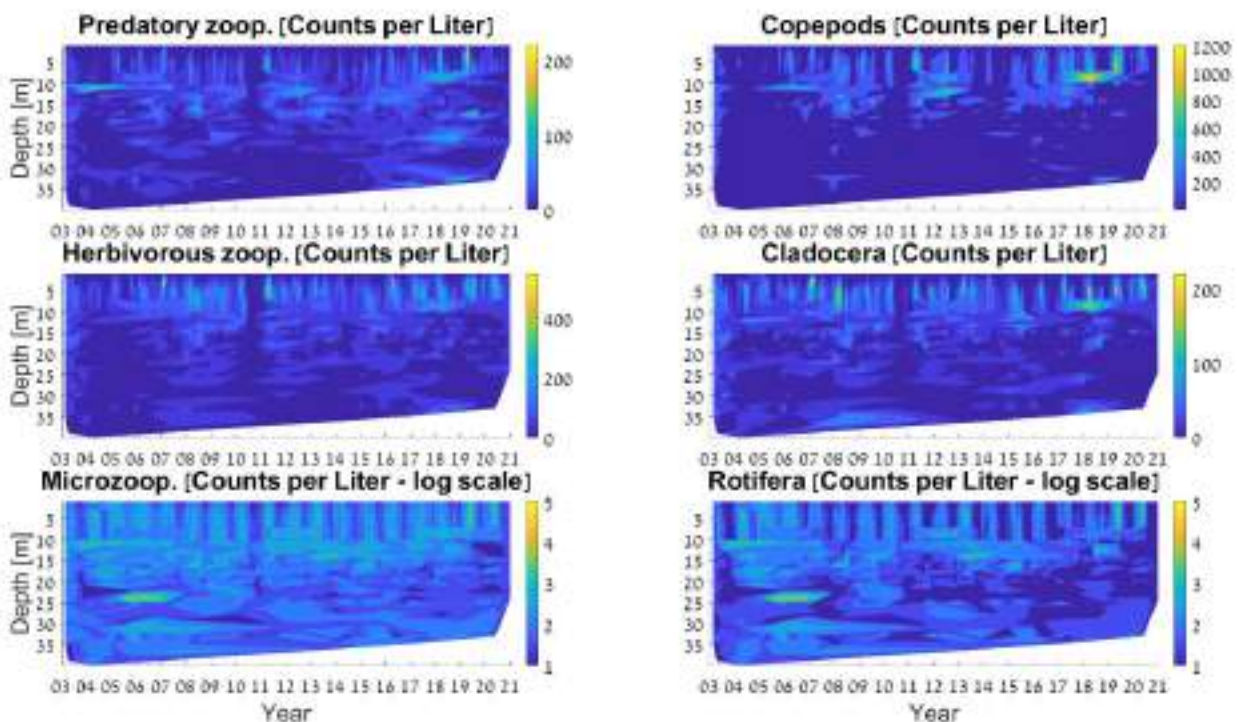
**איור 65:** צפיפות חודשית ממוצעת של שלושת הקבוצות הטקסונומיות העיקריות של הזואופלנקטון באגם: הקופפודים (איור עליון), הקלדוצ'ירה (איור אמצעי), והרוטיפרים (איור תחתון) בשנים 2020 (קו אדום), 2019 (קו שחור מקוקו) וביחס לממוצע הרב-שנתי וסטיות התקן (שטח אפור) בתקופה 2000-2018 על פי דיגום המיקסים.

אם בוחנים את הפיזור של קבוצות הזואופלנקטון בעמדות המים לאורך השנה, החל משנת 2003, ניתן לראות את ההטרוגניות שבפיזור האנכי שלהם (איור 66). בין השאר, בולט כי הזואופלנקטון הטורף והצמחוני (מיני הקלדוס'ירה ושלבי הביניים של הקופפודים) מתרכז בעיקר בחלק העליון של עמדת המים לעומת המיקרו-זואופלנקטון (הרוטיפרים והשלבים הצעירים ביותר של הקופפודים) שמופיע בצפיפויות גבוהות גם בחלקים עמוקים יותר של עמדת המים, בעיקר באביב, עם יצירת השיכוב.

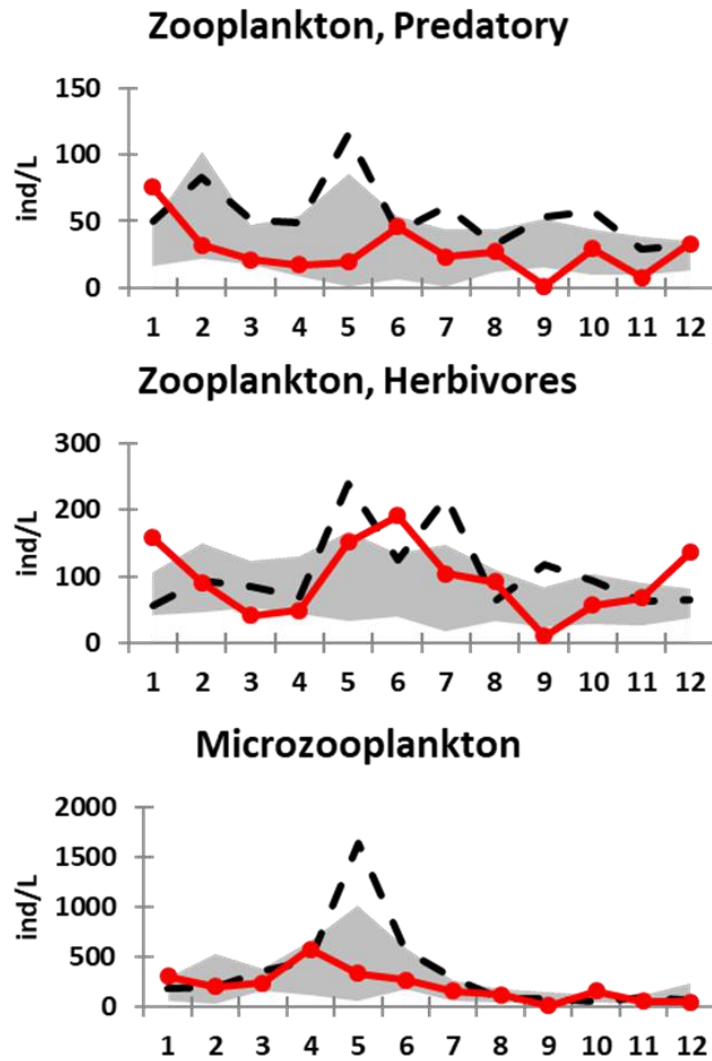
עיקר הפרטים בחלקים העמוקים יותר הם מיני רוטיפרים שונים. בנוסף, בולטת הצפיפות הגבוהה יחסית של הקופפודים והקלדוסירה בעומקים שבין 7-10 מ' החל מ-2017 ולתוך שנת 2019 אך במהלך שנת 2020 הערכים בעומקים אלו היו נמוכים.

בחינה של ההבדלים בצפיפויות החדשיות, בשנתיים האחרונות (2019, 2020) ביחס לממוצע של השנים 2000-2018, על פי החלוקה לשלושת הקבוצות הפונקצינאליות, הכוללות את הטורפים (קופפודים בוגרים), הצמחוניים (קלדוצירה והקופפודיטים) והמיקרו-זואופלנקטון (רוטיפרים והנאופליים), ניתן להבחין במספר מגמות (איור 67). ראשית, כמצופה, ישנה תאימות בין המגמות הנצפות בחלוקה זאת לבין המגמות שנצפו בחלוקה עפ"י הקבוצות הטקסונומיות. אולם, המגמות בולטות יותר. במהלך שנת 2020 ערכי צפיפויות הזואופלנקטון הטורף (קופפודים בוגרים) היו בעלי ערכים נמוכים ביותר לא רק בחודש ספטמבר אלא גם במהלך חודש נובמבר. גם במקרה של המיקרו-זואופלנקטון ניתן לזהות ערכים נמוכים ביותר, ביחס לממוצע הרב-שנתי במהלך חודשי הסתיו (ספטמבר-דצמבר) למעט חודש אוקטובר. יחד עם זאת, ערכי המינים ההרביוורים בחודשי האביב (מאי-יוני) היו מתונים ביחס לממוצע הרב-שנתי במיוחד לאור הערכים הגבוהים של הקלדוסירה בתקופה זאת.

יש להמשיך לעקוב אחר השינויים באוכלוסיות הזואופלנקטון בעיקר לאור השינויים במפלס ולאור הידוע לנו מאירועים דומים בעבר. שמירה על מפלס אגם גבוה, כדוגמת 2020/2021 והשינויים בשטחי הצמחייה המוצפת והאזורים המוצפים סביב האגם צפויים להשפיע על אוכלוסיות הזואופלנקטון בשנים הקרובות.



**איור 66:** ערכי הצפיפות החודשיים הממוצעים בעמודת המים על בסיס דיגום הפרופילים החל בפברואר 2003 ועד סוף שנת 2020 כאשר הצבעים הכחולים מבטאים ערכים נמוכים והצבעים האדומים מייצגים צפיפויות גבוהות. הערכים הם של (א) קופפודים, (ב) זואופלנקטון טורף, (ג) קלדוצירה, (ד) זואופלנקטון צמחוני, (ה) רוטיפרים, (ו) מיקרו-זואופלנקטון. יש לשים לב להבדלים בטווחי הערכים בכל איור והשימוש בסקאלה לוגריתמית באיורים התחתונים.



**איור 67:** צפיפות חודשית ממוצעת של שלושת הקבוצות הפונקציונאליות של הזואופלנקטון באגם: הזואופלנקטון הטורף (איור עליון), הצמחוניים (איור אמצעי), והמיקרו-זואופלנקטון (איור תחתון) בשנים 2019 (שחור מקוקו), 2020 (קו אדום) ביחס לממוצע הרב-שנתי (וסטיות התקן) בתקופה 2009-2018 על פי דיגום המיקסים.

## 2.22 אוכלוסיות הדגים - סקרים הידרואקוסטיים



**במימון  
רשות  
המים**

**איליה אוסטרובסקי, סמיון קגנובסקי**

- הדגים ממוקמים בראש מארגי המזון האקוויטיים, והם משפיעים על צורות החי האחרות ועל איכות המים.
- המטרה העיקרית של המחקר הייתה לנטר את הכמות, הדינמיקה העיתית והתפוצה המרחבית של הדגה באגם תוך שימוש בטכניקות הידרואקוסטיות.
- השינויים העונתיים והשנתיים של כמויות הדגים והפיזור המרחבי שלהם מוצגים בפרק זה.

### רקע

הדגים ממוקמים בראש מארגי המזון האקוויטיים, משפיעים על צורות החי האחרות ועל איכות המים, על הפיטופלנקטון, הזואופלנקטון, הזואובונטוס, ומשטר הנוטריינטים באגם. לתנודות מפלס האגם ישנה השפעה ניכרת על הביולוגיה והאקולוגיה של הדגים כמו גם על הרבייה, ההישרדות והדינמיקה באגם. דיג ואיכוס מיני דגים רצויים משנים את אוכלוסיות הדגים וגם רכיבים אחרים של המערכת האקולוגית, ובכך משפיעים על איכות המים.

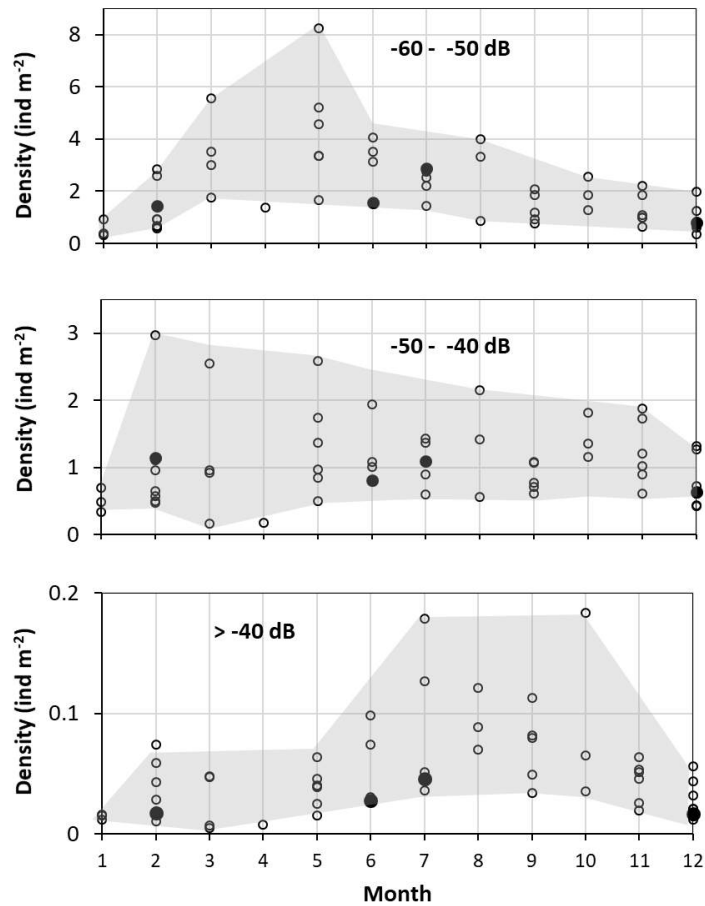
ממשק לקוי ודייג יתר עלולים לגרום נזק למערכות האקולוגיות של האגם. על כן, ממשק אוכלוסיית הדגים הינו כלי חשוב לשמירה על המערכת האקולוגית של האגם ואיכות המים. מאז שנות ה-80 המאוחרות הוכנסה לשימוש מערכת הידרואקוסטית לניטור דגים על מנת לשפר את הידע לגבי אוכלוסיות הדגים הפלגיים, זאת במטרה לייעל את ממשק הדגה ואת טכניקות האיכלוס בכנרת.

### שיטות

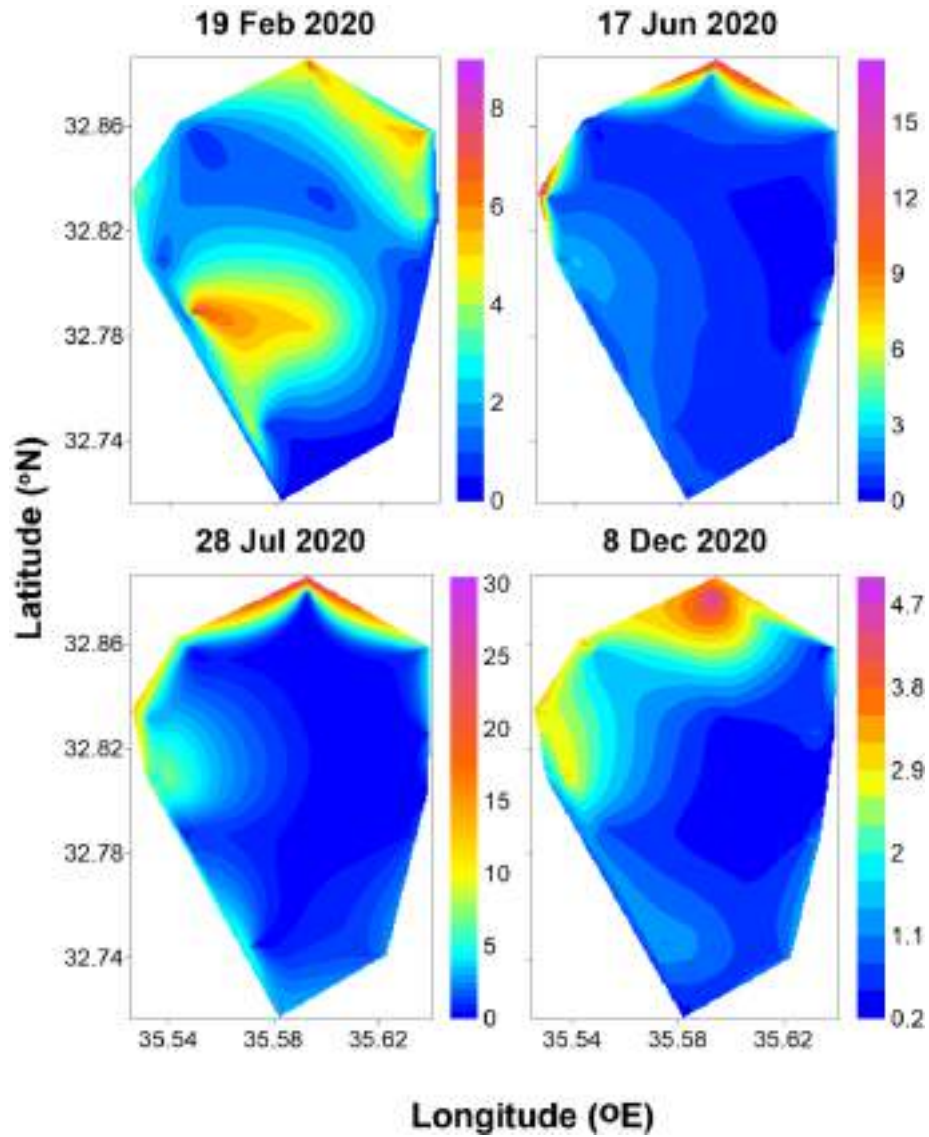
סקרים אקוסטיים, שמטרתם הערכה כמותית של מספרי הדגים וגודלם באגם, בוצעו באקוסאונדר מדעי בעל אלומה מפוצלת 120 kHz, מדגם Simrad EY60. הסקרים בוצעו לאורך 14 חתכים בשעות הלילה, בשעות שבהן הדגים מפחרים על פני עמודת המים לעומת שעות היום בהן הם מקובצים בלהקות. לפני כל סקר כויל האקוסאונדר בעזרת כדור סטנדרט. האקוסאונדר המדעי מצויד במערכת GPS המאפשרת רישום דגמים מרחביים דו-מימדיים של פיזור המטרות האקוסטיות. מכיוון שאקוסאונדר מפוצל אלומה מאפשר זיהוי מהחיישן לכל מטרה, הרי שניתן לאפיין מיקום תלת-מימדי של המטרות בגוף המים. דיגום הדגים נעשה בטווח שמעבר ל-2 מ' מהחיישן. חישובי צפיפויות הדגים נעשו בעזרת תוכנה ייעודית לעיבוד נתונים הידרואקוסטיים (<https://folk.universitetetioslo.no/hbalk/Sonar5-Pro>, Lindem Data Acquisition).

### תוצאות ודיון

טווח המטרות האקוסטיות חולק לקבוצות: מטרות קטנות עם החזר אקוסטי קטן מ-50dB - משויכות ללרוות ולדגיגים, מטרות בעלי החזר של 40dB - 50dB - הינן ככל הנראה לבנון בוגרים (*Mirogrex terraesanctae*) ומינים נוספים, ומטרות < 40dB - משויכות לדגים גדולים, חלקם מינים בעלי ערך מסחרי. הדינמיקה העונתית של הדגים משלוש קבוצות הגודל מוצגת באיור 68. הצפיפות הגבוהה יחסית של הדגים הקטנים ביותר (50dB- 60dB-) נצפתה במרץ-מאי, בעוד שהצפיפות הנמוכה התרחשה בין ספטמבר לינואר. הצפיפות הגבוהה של הדגים מקבוצת הגודל הגדולה ביותר (>40dB) נצפתה בדרך כלל ביולי-אוקטובר, ואילו צפיפות נמוכה נצפתה בין נובמבר לאפריל. צפיפויות הדגים מכל קבוצות הגודל בכל העונות היו בסדר גודל קרוב לתחומים הנמוכים שנצפו בשנים 2011-2019. הערכים הנמוכים מצביעים על ירידה משמעותית בדגים מכל קבוצות הגודל, בשנים האחרונות, המחייבים השלמת צעדי ממשק כגון ויסות מפלס המים, ירידה בטווח התנודות במפלס המים, ואכיפת ממשק הדייג. מיפוי של התפוצה המרחבית של הדגים בכנרת ב-2020 מוצגת באיור 69. הדגים היו מרוכזים בדרך כלל בחלקים הצפוניים והצפון מערביים של האגם. בפברואר 2020 נצפו ריכחים גבוהים יחסית של דגים גם באזור הדרום מערבי. בקיץ (יוני-יולי), הריכחים הגבוהים ביותר של הדגים נצפו קרוב מאד לחופי האגם, בעוד שבחודשי החורף (פברואר ודצמבר) הדגים נצפו גם במיקומים עמוקים יותר. בשנת 2020 הצפיפות הממוצעת של דגים הגדולים מ-60dB - הייתה 2.6 פרטים / מ"ר. זהו המספר הקרוב ביותר לממוצע שנרשם מאז 2011, אז נעשה לראשונה שימוש באקוסאונדר האקוסטי החדש (Simrad EY60). במשך שלוש השנים שקדמו לשנת 2020, 2017, 2018, ו-2019, צפיפות הדגים שגדולה מ-60dB - הייתה 2.9, 2.1 ו-1.4 למ"ר, בהתאמה. העלייה הגדולה במפלס המים בחורף – אביב 1992 ו-2003 גרמה לעליה גדולה בכמות הדגים בחודשים העוקבים. התופעה קשורה בהצלחת הרבייה של לבנון בליטורל האבני. בניגוד לכך, העלייה הגדולה של מפלס המים ב-2019 וב-2020 לא גרמה לגידול משמעותי בצפיפות הדגים. הדבר עשוי להיות קשור בשינויים הגדולים שחלו באזור הליטורל עקב השתלטות הצמחייה השקועה במים.



**איור 68:** דינמיקה עונתית של דגים מקבוצות גודל שונות בשנת 2020 באגם הכנרת. הנקודות השחורות המלאות מייצגות את הערכים ב-2020, הנקודות השחורות הריקות מייצגות את הערכים של 2011 – 2019. השטחים מייצגים את גבול השונות ב-2011 – 2019. הנתונים מצביעים על כך שצפיפות הדגים מקבוצות גודל שונות בשנת 2020 הייתה נמוכה למדי.



**איור 69 :** תפוצה מרחבית של דגים באגם הכינרת ב-2020. צפיפות דגים ניתנת בפרטים למטר מרובע ( $\text{ind./m}^2$ )



## 2.23 ניטור חומרי הדברה באגם הכנרת



במימון  
רשות  
המים

פלאג אסטרון, אדית ליבוביץ'

- גם בשנה זו ריכוז חומרי הדברה באגם היה נמוך יחסית.
- דגי האגם הראו כרגיל ריכוזי סף של חומרים ממשפחת ה-DDT.

### מטרת המחקר

ניטור אגם הכנרת לנוכחות חומרי הדברה

### רקע

אגם הכנרת מצוי במורד אגן ההיקוות הממוקם בצפון המדינה. אגן ההיקוות כולל בתוכו שטחים חקלאיים רבים בהם מתקיים שימוש רב בחומרי הדברה כל השנה. בתנאי סביבה שונים ניתן לצפות להגעת חומרי הדברה לנחלי הצפון ומשם לאגם. משקעים לדוגמא, הינם גורם מרכזי בתהליך ריכוז חומרי הדברה בנחלים, בנוסף לרוח המסיעה רסס חומרי הדברה ו/או קרקעות למרחקים. ניטור חומרי הדברה נערך אחת לשבועיים בחמשת תחנות הדיגום באגם. הדוגמאות עוברות מיצוי אורגני ולאחריו אנליזת מסות (GC/MS) במעבדת הכנרת. במקביל, מובאות מידי כמה חודשים דוגמאות דגים לבחינת נוכחות חומרי הדברה ברקמות כתוצאה מהרעלה מכוונת. ככלל, ריכוזי החומרים האורגניים ההידרופוביים גבוהים יותר ברקמות יצורי מים הנמצאים בראש שרשרת המזון בהשוואה למי גוף המים כתוצאה מאפקט הביומגניפיקציה.

**תוצאות ודין**

בדומה לשנים שעברו, אכן נמצאו חומרי הדברה במי האגם אך בריכוזים נמוכים מאוד ( $< 1\text{ppb}$ ). לעומתם, ריכוזי חומרים ממשפחת ה-DDT קיימים ברקמות הדגים בריכוזים של 1-6ppb באופן קבוע. חומרים אלו אסורים לשימוש ואינם בשימוש ככל הנראה זה מספר עשורים אולם יכולת השרידות שלהם גדולה. ניתן להעריך כי חומרים אלו נספחו בעבר לחומר חלקיקי, ומשם הם זולגים לאגם הכנרת כל השנה בריכוזים נמוכים ביותר אך מצטברים ברקמות הדגים לריכוזים אלו. סברה זו יש לבסס בעתיד במחקר סביבתי מקיף.

ניתן לציין כי בניגוד לשנת 2019 ושנים עברו, לא נמדדו ערכי חומרי הדברה המצביעים על הרעלה ברקמות הדגים. בטבלה 10 ניתן להתרשם מריכוזי חומרי הדברה בדגימות דגים אשר הובאו למעבדתנו השנה. לשם השוואה- דגימת דג שנדגמה בשנת 2019 (מודגש) הכילה ריכוז רב של חומר מסוג אנדוסולפאן כתוצאה מהרעלה מכוונת.

**טבלה 10:** ריכוזי חומרי הדברה בדגימות דגים אשר הובאו למעבדה לחקר הכנרת.

ממצאים (ppb)	מיקום	תאריך
Endosulfan $\alpha$ - 395 $\mu\text{g/L}$	חוף גולן	<b>21.08.19</b>
DDE- 5.4 $\mu\text{g/L}$		
4.46 $\mu\text{g/L}$	חנות דגים- טבריה	<b>23.01.20</b>
6 $\mu\text{g/L}$	חנות דגים- טבריה	<b>23.01.20</b>
5 $\mu\text{g/L}$	חוף יחזקאל מורד	<b>21.04.20</b>
0	בטיחה	<b>04.20.19</b>
Endosulfan $\alpha$ - 3.42 $\mu\text{g/L}$	בטיחה	<b>09.06.20</b>
DDT- 0.2 $\mu\text{g/L}$		
DDE- 3.85 $\mu\text{g/L}$		

## 2.24 חלזונות וצדפות בליטורל



פסי קונכיית של חלזונות שנערמו בחוף במפלט נמוך מציינים קווי מפלט מרבי משנים קודמות. צילום: תמר זהרי.

**במימון  
רשות  
המים**

**תמר זהרי, בני סולימני, דוד קמינגס**

- אוכלוסיות הליטורל הטבעיות של הכנרת מותאמות לשינויי מפלס בטווח הטבעי של כ-1.5 מ'. אוכלוסיות אלו לא מותאמות לשינויי מפלס בטווח של 6 מ'.
- שינויי המפלס הגדולים הובילו להתמעטות קיצונית של החלזונות הטבעיים לכנרת והופעת והשתלטות מין פולש.
- מאז 2012 ועד היום החילזון הפולש, *Thiara scabra*, מהווה מעל 95% מסך החלזונות באגם, בריכוזים של אלפי עד עשרות אלפי פרטים למ"ר בעומקים 2.5 ו-5 מ'. מינים טבעיים מוצאים כמעט רק במים הרדודים ובריכוזים נמוכים ב-3 סדרי גודל.
- אנו משערים כי החלזונות הפולשים אוכלים כל חומר אורגני בסדימנט, כולל ציסטות של פרידיניום ובכך תורמות להעלמות הפרידיניום.
- גם צדפות הכנרת (3 מינים) סובלות משינויי המפלס הקיצוניים ונמצאות בסכנת הכחדה.

### מטרת המחקר

מעקב אחר אוכלוסיות החלזונות והצדפות בכנרת.

**רקע**

שינויי המפלס הקיצוניים בכנרת, גורמים לשינויים משמעותיים בבתי הגידול שבליטורל (אזור המים הרדודים), בו חיים גם חלזונות וצדפות. במפלסים גבוהים, הליטורל ברובו אבני או סלעי, בעוד שבמפלסים נמוכים רובו חולי. היצורים שחיים בליטורל צריכים להתאים עצמם לשינויים הקיצוניים בבית הגידול. אלו שלא מצליחים להסתגל – מתמעטים או נכחדים, ועם היעלמותם נפתחת נישה למינים פולשים. הרכיכות בכנרת הם דוגמא לתהליך כזה. צ'רנוב (1975) דיווח על 5 מיני חלזונות בכנרת, מהם 3 גדולים ונפוצים (מגדלית הנחלים, שחריר מצולע, סהרונית הירדן) ועוד 2 זעירים (ביטיניה זעירה, קרינית הירדן). קונכיות של 5 מינים אלו מוכרות מאתרים ארכיאולוגיים וחתכים גיאולוגיים באזור הכנרת, ומעידים על נוכחות המינים הללו באזור כ-1.5 מיליון שנים. בסוף 2004, לאחר עליית המפלס המהירה של הכנרת בשנים 2002-2003, יוסי הלר מהאוניברסיטה העברית דיווח בע"פ על התמעטות קיצונית של חלזונות בחופי הכנרת. ב-2007 הנק מייניס דיווח לראשונה על המצאות מין פולש של חילזון, *Thiara scabra*, בדרום הכנרת. ב-2010/11 תעדה עדינה דולב את התפשטותו של מין פולש זה בכל חלקי הכנרת. ב-2012 התחלנו בניטור סדיר של חלזונות וצדפות בכנרת.

**שיטות**

ניטור הרכיכות (= מולוסקה, חלזונות וצדפות) מתבצע פעמיים בשנה, בתקופת מפלס המינימום (נוב'-דצמ') ושוב בתקופת מפלס המקסימום (אפריל-מאי), בחמישה אתרים חופיים (חוקוק, גינוסר, חמי טבריה, גופרה, שיטים; איור 70). בכל אתר נדגמות רכיכות בשלוש נקודות לאורך חתך מהחוף לכיוון מרכז האגם, בנקודות בהן עומק הקרקעית: 0.4 מ' (דיגום מהחוף), 2.5 מ' ו- 5 מ' (דיגום בצלילה מסירה), סה"כ 15 נק' דיגום לעונה. מסיבות טכניות הדיגום העונתי מתפרש על פני 4-5 שבועות. מיקום נקודות הדיגום, שנקבע על פי עומק הקרקעית, זז מדיגום לדיגום עם שינויי המפלס. בכל נקודת דיגום, אוספים חלזונות וצדפות מעשר משבצות קרקעית שנדגמות באופן אקראי באמצעות מסגרת של 20 על 20 ס"מ. תכולת המשבצת נאספת לתוך דלי, האבנים הגדולות מסולקות והחול מסונן במקום, הרכיכות נלקחות למעבדה לזיהוי וספירת כלל הפרטים החיים מכל מין (קונכיות וצדפות ריקות לא נספרות). הספירה מתבצעת מיד לאחר הדיגום, או למחרת.



**איור 70:** חמשת אתרי הדיגום לחלזונות וצדפות (בעיגול באדום). בכל אתר דוגמים חלזונות בשלוש נקודות דיגום לאורך חתך מהחוף לים הפתוח, בנקודות בהם עומק המים 0.4, 2.5 ו-5 מ'.

### תוצאות ודין

עקב החורף הגשום של 2019/2020 ועליית מפלס הכנרת המרבי ב-2.2 מ' מעבר למפלס המרבי בשנה הקודמת, בחודשים הראשונים של 2020, הוצפו ונוספו לליטורל של הכנרת אזורים נרחבים שהיו מחוץ למים מאז הפעם האחרונה שמפלס הכנרת היה בסביבות 209- מ', ב-2004. עקב כך, נקודות הדיגום שלנו ב-0.4 מ' היו מחוץ למים בדיגומים של 2019, ונקודות הדיגום ב-2.5 מ' היו שנה קודם במאי-אפסיים. שינויי מפלס אלו משפיעים על הפיזור המרחבי והרכב המינים של החלזונות והצדפות, שנעים לאט ולא תמיד מספיקים להדביק את קצב השתנות המפלס.

השינויים עם הזמן ועם עומק הדיגום בריכזי החלזונות (איור 71) והצדפות (איור 72) בליטורל של הכנרת מאז תחילת הדיגום ב-2012, מוצגים כממוצע של מספר הפרטים למ"ר לכל מין (אם כי 2 מיני החלזונות הזעירים אינם מוצגים). הממוצעים הם של מספר הפרטים למין ב-5 האתרים בכל עומק, בכל עונת דיגום.

### חלזונות:

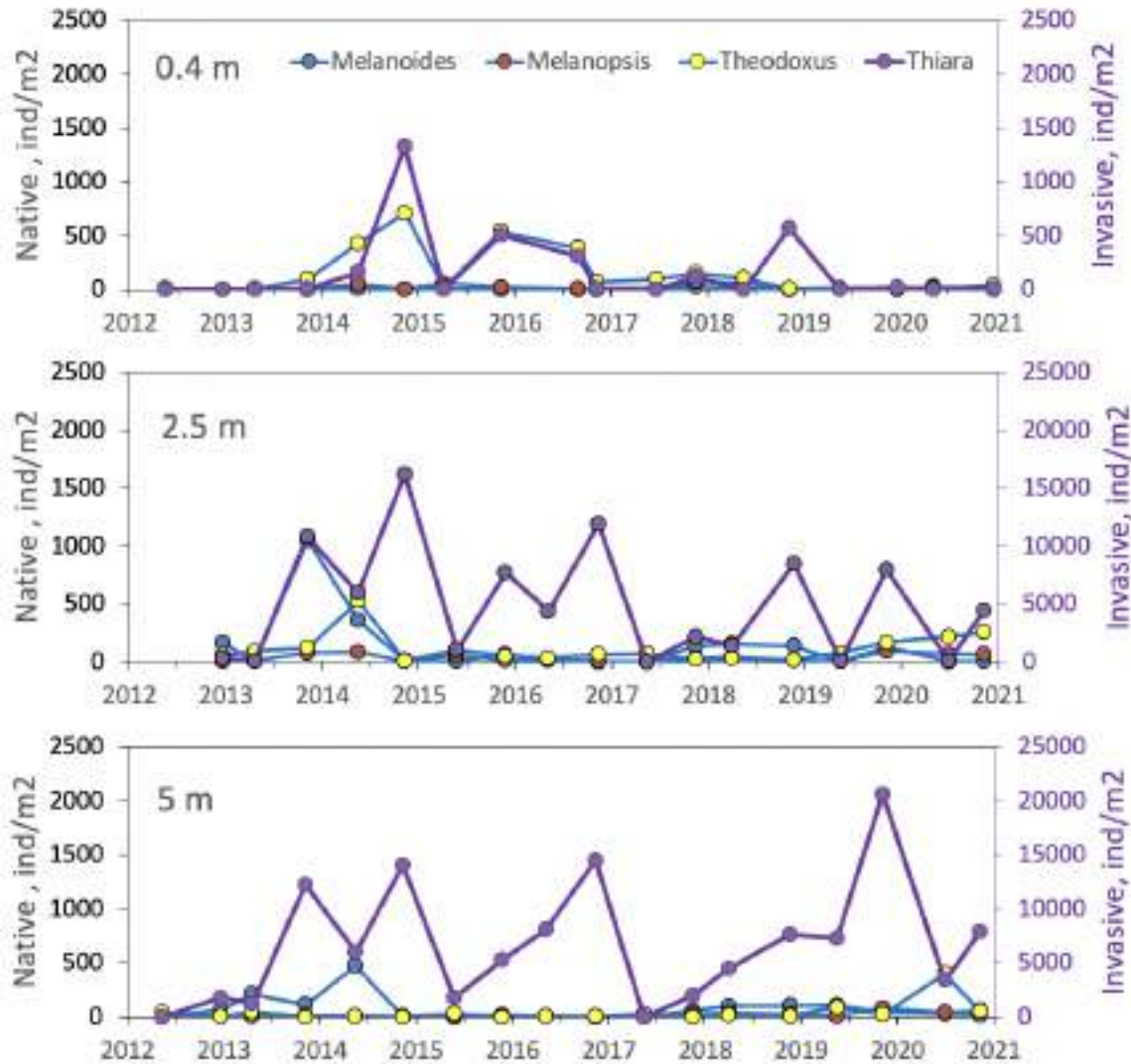
באופן עקבי מצאנו לאורך השנים שבעומק 0.4 מ' ריכזי החלזונות נמוכים בהשוואה לריכזים בשני העומקים האחרים. עקב שינויי המפלס, ברוב המקרים, נקודות הדיגום במים רדודים אלו היו מחוץ למים עד חודשים בודדים לפני הדיגום. זה נכון לכל הדיגומים במפלס מרבי (כי בכל שנה מפלס הכנרת יורד ביותר מ-0.4 מ' ממפלס מרבי למזערי), ולחלק מהדיגומים במפלס מזערי (בשנים בהן עליית המפלס בשנה הקודמת הייתה קטנה במיוחד). במים הרדודים צפינו ביתרון של המינים הטבעיים, שחריר (*Melanopsis*) וסהרונית (*Theodoxus*), באתרים בהם התשתית אבנית/סלעית, בעוד שהמגדלית (*Melanoides*), האופיינית לקרקע חולית, נדירה ביותר מאז 2012.

ב-2020, ריכזי החלזונות מכל המינים ב-0.4 מ' היו נמוכים בשתי העונות, הערכים הגבוהים ביותר שנרשמו היו של 100 שחרירים למ"ר בחוקוק במאי ו-105 סהרוניות למ"ר בחמי טבריה בדצמבר.

המין הפולש, טיאהרה, נצפה בעומק זה רק פעם אחת, 15 פרטים למ"ר בדצמבר בגינוסר. לעומת זאת, בעומקים 2.5 ו- 5 מ' באופן עקבי לאורך העשור האחרון כולו, ריכחי החלזונות היו גבוהים ב- 1-3 סדרי גודל מאשר במים הרדודים, זאת עקב שכיחות עצומה של טיאהרה, המין הפולש. בשני עומקים אלו בדרך כלל ריכחי הפרטים של *Thiara scabra* היו אלפי עד עשרות אלפי פרטים למ"ר. בפועל, כשלוקחים חופן מקרקע חולית בעומקים אלו, הוא מכיל כמעט רק חלזונות, עם גרגרי חול ביניהם. ב-2020 הריכחים שנרשמו בעומקים אלו היו בינוניים יחסית לשנים קודמות. בעומק 2.5 מ', נרשמו ריכחים נמוכים יותר מאשר ב-5 מ', אולי בגלל התקופה הקצרה (שבועות אחדים) מאז שנקודת הדיגום ב-2.5 מ' הוצפה במים, בעוד שנקודת הדיגום ב-5 מ' הייתה מוצפת גם ב-2019.

התמונה הרב-שנתית לעומקים 2.5 ו- 5 מ' (איור 71) מראה דגם "זיגזג" של ריכחים גבוהים יותר של טיאהרה בדיגומי המפלס הנמוך (נובמבר-דצמבר) מאשר בדיגומי המפלס הגבוה (אפריל-מאי). כך היה גם ב-2020. סביר שהתופעה קשורה לתזחת קו המים עם שינויי המפלס. בעומקים אלו, ריכחי החלזונות מהמין הפולש גבוהים בסדר גודל ויותר מאשר ריכחי שלושת המינים הטבעיים לכנרת, מהם מוצאים פרטים בודדים (אם בכלל) עד עשרות מעטות של פרטים למ"ר. למין הפולש יכולת הסתגלות למפלסים המשתנים, כושר ציפה והתפשטות, אין לו טורפים, והוא דוחק את המינים הטבעיים עד להכחדה, עם תוצאה של צמצום מגוון המינים.

ב-2020 לא מצאנו אפילו פרט אחד של המינים הטבעיים הזעירים, ביטיניה זעירה, וקרינית היחדן. החדשות הטובות הן שלא מצאנו אף פרט משני המינים הפולשים החדשים שנצפו ב-2018, פירגופורוס וטרביה.

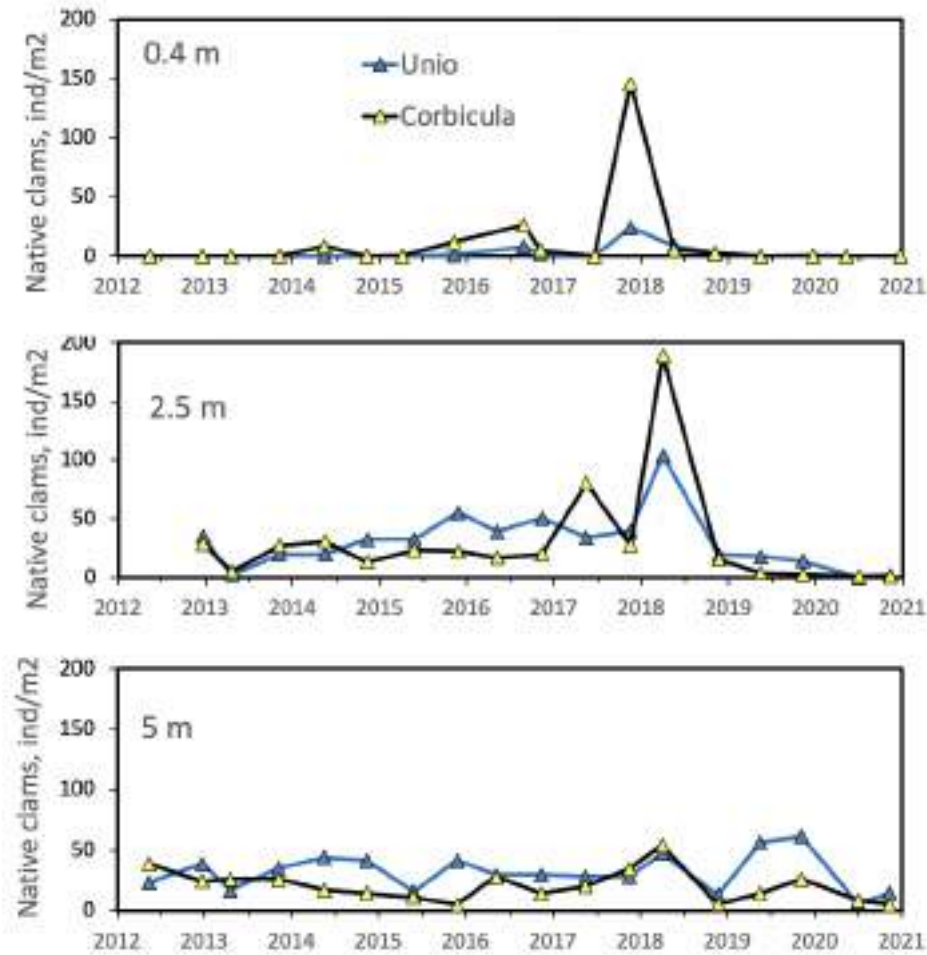


**איור 71:** ריכחי חלזונות (פרטים למ"ר) מהמין הפולש (קו סגול, ציר Y ימני) ושל שלושה מינים טבעיים לכנרת (קוים כחולים, ציר Y שמאלי), 2012-2020. כל נקודה היא ממוצע הערכים שנמצאו ב-5 אתרי דיגום (איור 70) בעומק 0.4 מ' (גרף עליון), 2.5 מ' (גרף אמצעי) או 5 מ' (גרף תחתון). שימו לב שבועומקים 2.5 מ' ו-5 מ', הערכים בציר Y הימני, עבור המין הפולש, גבוהים בסדר גודל מאלו שבציר Y השמאלי, של המינים הטבעיים.

דוע מעמק המעינות שהטיארה מביאה עמה טפילים שגורמים למחלות בדגים, ובפרט את הטפיל *Centrocestus* (טרמטודה) שפוגע באמנונים. הטפיל גורם לנזקים כבדים לגידול הדגים המסחרי בעמק המעינות (חנוך גלסנר, רמה פאלק, מידע אישי). נושא זה לא נחקר בכנרת ומצריך בדיקה. השערה נוספת שמצריכה בדיקה: בריכחים העצומים של החלזונות בסדימנט של הליטורל – הם מחסלים כל מה שנמצא בסדימנט, כולל ציסטות פרידיניום, ותורמים להעדר פריחות של אצה רצויה זו, בכך מעודדים פריחות של מיני אצות לא רצויים כמו ציאנובקטריה.

#### צדפות:

כנרת 3 מיני צדפות הטבעיות לאזור: *Unio terminalis*, *Corbicula fluminalis*, *Potomida littoralis*. בעברית: אוניו = צדפת נחלים כנרתית, קורביקולה = סלסילה חומה, פוטומידה = צדפת אגמים כנרתית. מתוכן השתיים הראשונות היו נפוצות מאד בעבר. מאז 2012 ריכחי צדפת האוניו בחופי הכנרת נמוכים מאד, בין אפס עד עשרות בודדות של פרטים למ"ר (איור 72).



**איור 72:** ריכחי צדפות (פרטים למ"ר) של שני המינים העיקריים בכנרת, אוניו וקורביקולה, 2012-2020. כל נקודה היא ממוצע הערכים שנמצאו ב-5 אתרי דיגום (איור 70) בעומק 0.4 מ' (למעלה), 2.5 מ' (אמצע) או 5 מ' (למטה).

ריכחי הקורביקולה גבוהים מעט יותר, עם שיא של מאות פרטים למ"ר בסוף 2017 (עומק 0.4 מ') או תחילת 2018 (עומק 2.5 מ'). מהמין פוטומידה מצאנו במשך השנים רק פרטים בודדים (לא מופיע באיור). ב-2020 לא מצאנו אפילו פרט אחד של מין זה. האוניו והפוטומידה הם מינים בסכנת הכחדה עולמית, ושינויי המפלס בכנרת בטווח גדול בהרבה מהטבעי תורמים להכחדתם.



## 2.25 דיגום אוטומטי ברזולוציה גבוהה במרכז האגם



**במימון  
רשות  
המים**

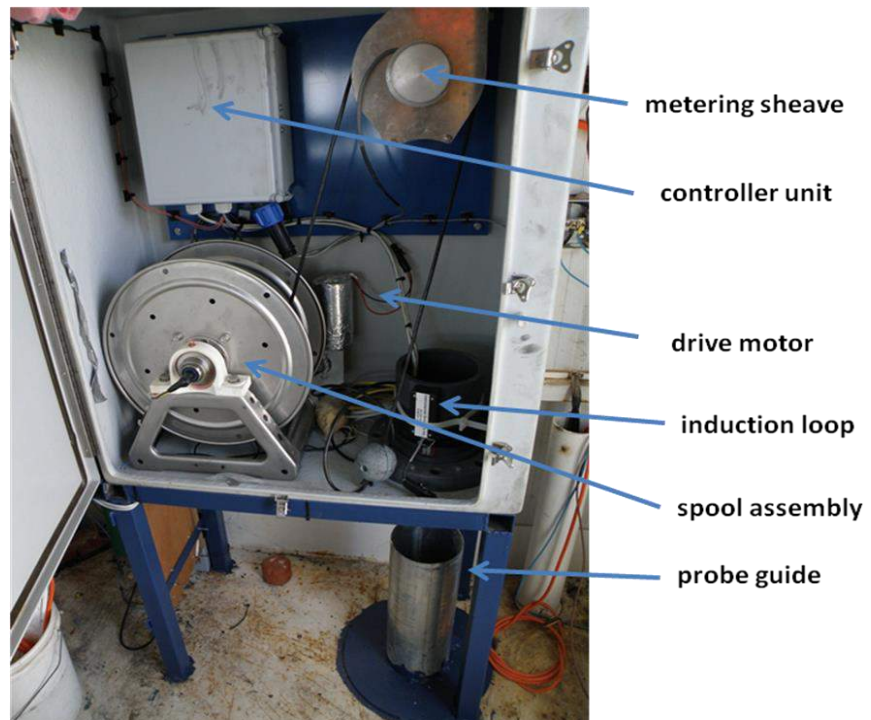
**ורנר אקרט, בני סולימני, מיקי שליכטר**

- ב- 2020 היפוך מלא של עמודת המים התרחש ב- 14 לינואר, שבוע מאוחר יותר מהשנה שקדמה לה.
- שיכוב של עמודת המים החל מוקדם וב- 10 למאי כל ההיפולימניון היה ללא חמצן, זאת לעומת סוף יוני בשנים רגילות.
- ב- 31 לדצמבר התרמוקלינה הייתה עדיין בעומק 27 מטר.

### רקע

בשנת 2002 החלה המעבדה לחקר הכנרת לנטר את עמודת מי האגם בעזרת ציוד אוטומטי המופעל מדוברת האקוראפט בתחנה A. בשנת 2009 הוחלפה יחידת ה- RUSS/YSY אשר פעלה במקום בשנים 2002-2008, במכשיר המופעל על ידי כננת שעליה מורכב דוגם רב חיישנים מדגם MANTA II (Texas, Eureka, Austin)

ומפרויילר עצמאי מותאם למקום, אשר פותח על ידי חברת Instrumental Solutions Inc, Vicksburg, Mississippi.



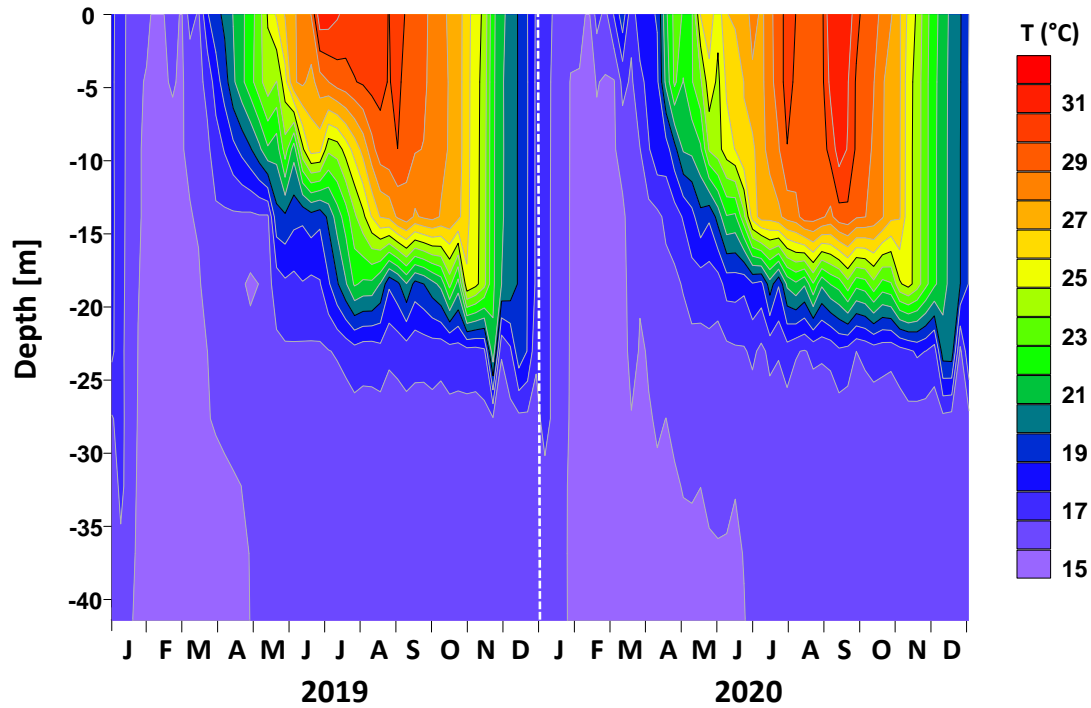
**תמונה 1 :** יחידת הפרויילר האוטונומי ISI-AutoReel

דיגום הפרופילים החל בסוף דצמבר 2009 במדידות טמפרטורה, עומק, חמצן מומס, pH, מוליכות, פוטנציאל חמצון/חיזור, עכירות וכלורופיל a. הפרויילר מבצע פרופילים בתדירות של 1-6 פעמים ביממה לאורך עמודת המים ברזולוציה של 0.5 מטר. ב- 2020 תדירות הדיגום הייתה 5 פרופילים במהלך יממה.

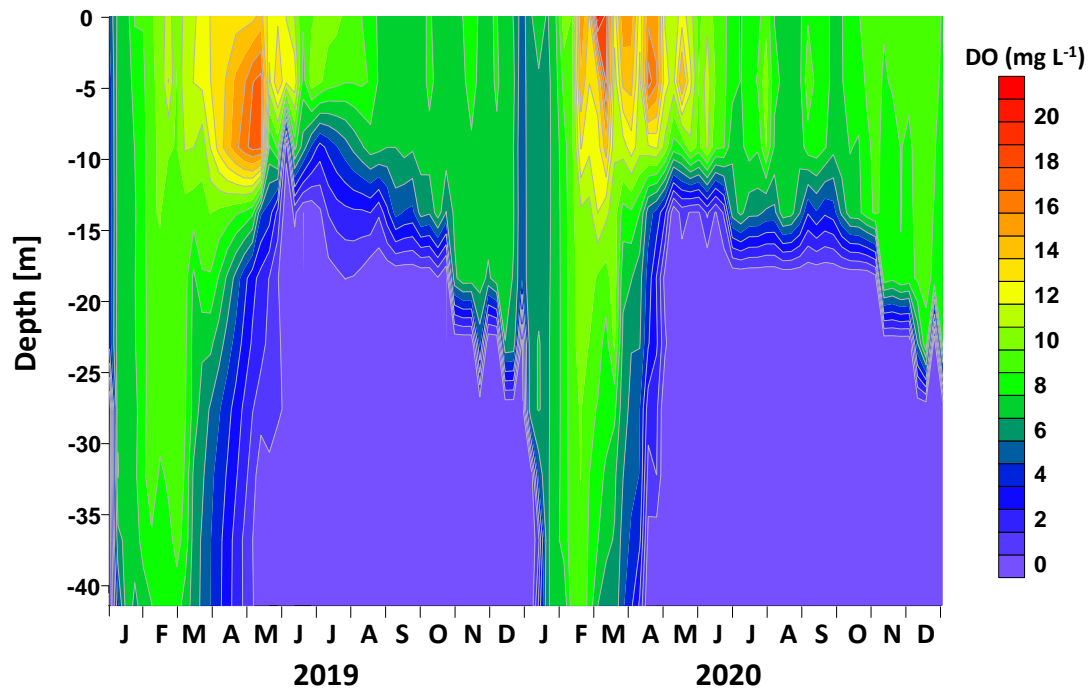
### תוצאות

בדומה ל- 2019, ב- 2020 ערבוב מלא של עמודת המים התרחש במחצית הראשונה של ינואר, עם אותה טמפרטורה של 15.7°C בכל עמודת המים (איור 73). מאפייני השיכוב התרמי הן של 2019 והן של 2020 היה זהה כמעט לחלוטין, למעט שיא בטמפרטורת המים בספטמבר 2020 כתוצאה מגל חום מאוחר אך קיצוני.

הדמיון בין 2019 ו- 2020, בא לידי ביטוי גם בריכוז החמצן המומס (איור 74) עם ערכים נמוכים יחסית בעקבות הערבוב (< 6 מג"ל), הגעה לרוויה בסוף ינואר, וירידה בריכוז סמוך לקרקעית החל מאמצע מרץ. 2020 הייתה "שנת פרידיניום" ראשונה מאז 2012, ובשל כך התאפיינה בערכי על-רוויה של חמצן מומס באפילימניון מפברואר עד לסוף אפריל. כנראה כתוצאה ישירה משקיעת הביומסה האצתית, חלה דעיכה מואצת בריכוז החמצן המומס בהיפולימניון שנותר ללא חמצן כבר ב- 10 למאי, חודש וחצי מוקדם יותר ביחס לשנת 2019.



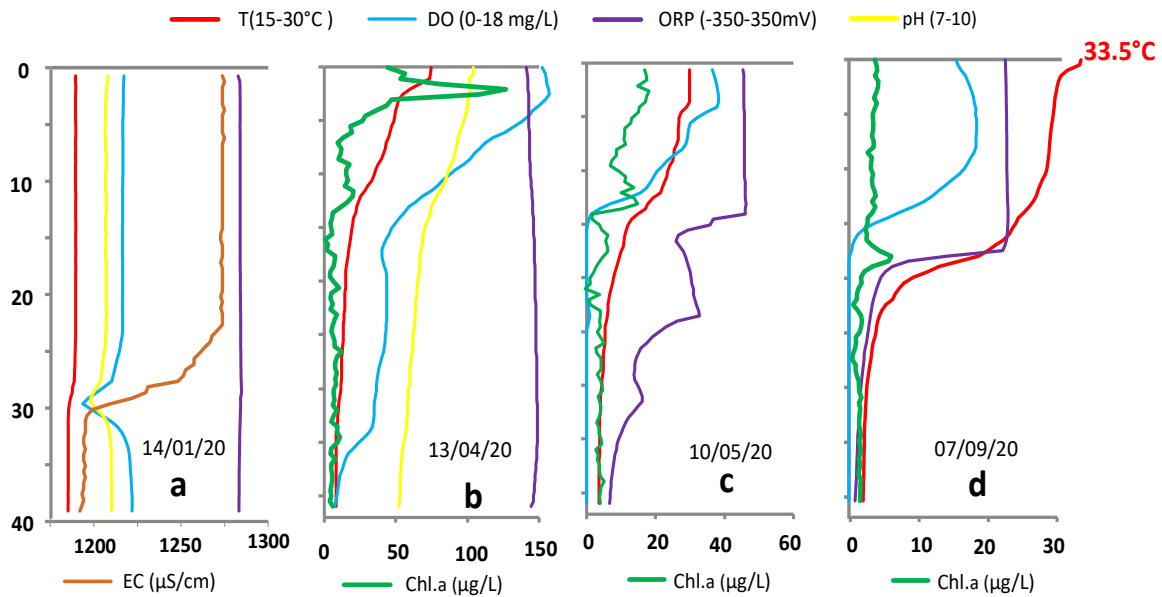
**איור 73:** שינויי טמפרטורה בעמודת המים של הכנרת בתחנה A בשנים 2019 ו-2020.



**איור 74:** ריכוז חמצן מומס בעמודת המים של הכנרת בתחנה A במהלך 2019-2020.

את השינויים הכימיים, הפיסיקליים והביולוגיים בעמודת המים בתחנה A ניתן לראות מסדרת הפרופילים שבאיור 75 a-d. ביום ההיפוך (14/01/20) ניתן להבחין בנוכחות של מי הירדן באזור הסמוך לקרקעית על פי הירידה במוליכות החשמלית מ-  $1190 - 1375 \mu S cm^{-1}$  (איור 75a). בשיא פריחת הפרדיניום באפריל, ריכוז כלורופיל a היה מעל 100 מיקרוגרם לליטר ויחד אתו נצפו ריכחים גבוהים במיוחד של חמצן מומס, שהגיעו עד 20 מג"ל. באותו הזמן ריכוז החמצן המומס בשכבת הגבול הבנטית (BBL) היה קרוב לאפס (איור

75b). הירידה המואצת בריכוז החמצן בהיפולימיניון מודגמת באיור 75c כאשר ב- 10 במאי פרופיל ה- ORP- הראה נוכחות של סולפיד מתחת ל- 15 מטר. חודשי הקיץ אופיינו במיקום קבוע ויציב של הכמוקלינה בעומק 17 מטר (ראה אוקסיקלינה באיור 74) מתחילת יולי עד לסוף אוקטובר. את גל החום של חודש ספטמבר, שהוזכר קודם לכן, ניתן לראות בברור בפרופיל מה- 7 לספטמבר כאשר הטמפרטורה קרוב לפני המים בתחנה A הגיעה ל-  $33.5^{\circ}\text{C}$  (איור 75d). באיור זה הירידה בריכוז החמצן מעל הכמוקלינה המלווה בשיא בריכוז הכלורופיל מצביעה על פעילות של חיידקים פוטוטרופיים.



**איור 75:** פרופילים אופייניים של טמפרטורות, חמצן מומס, כלורופיל, pH, עכירות, פוטנציאל חמצון חיזור (ORP) ומוליכות חשמלית (EC) במהלך תהליך השיכוב בעמדת המים של תחנה A ב- 2020. a-d תאריכים ספציפיים.

## 2.26 התקנת פרופיילר אוטונומי ותחנה מטאורולוגית בתחנה G



**במימון  
רשות  
המים**

**ורנר אקרט, גדעון גל, אסף סוקניק, בני סולימני, ולדימיר שקולניק, יורי לצ'ינסקי**

- בשנת 2020 פרופיילר אוטונומי נוסף הוצב בתחנה G.
- מערכת זאת מאפשרת איסוף נתונים בעומק קבוע בפרקי הזמן שבין הפרופילים.

### רקע

אזור צפון-מזרח הכנרת מהווה אזור מרכזי להתפתחות פריחות של כחוליות בתקופות שונות של השנה. על מנת לאפשר מעקב טוב יותר אחר התפתחות פריחות אלו, וכן איסוף מידע שיאפשר הבנה טובה יותר של הדינאמיקה של התפתחות פריחות, הוחלט על הקמת תחנת ניטור רציף בתחנה G, מול שפך הירדן. המימון של התחנה החדשה היה משותף, לחיא"ל ורשות המים. הוחלט על רכישת דוברת מחברת Instrumental Solutions Inc (ISI, Vicksburg, Mississippi, US). הדוברת כוללת פרופיילר אוטונומי מסוג AutoReel, תחנה מטאורולוגית ופנלים סולריים עם מצברים לאספקת חשמל. המערכת הגיעה בינואר 2020.

בחלקו המרכזי של הפרופיילר ישנה כננת הנשלטת באמצעות מחשב (תמונה 1) וניתנת לתכנות באופן המאפשר ביצוע של מספר פרופילים בעמודת המים במשך היממה במרווחי העומק הרצויים או דיגום רציף בעומק קבוע. התוכנה והחומרה של הכננת הותאמה על ידי הספק להפעלה של דוגם רב חיישנים מדגם Manta (תמונה 2) מתוצרת Eureka, Austin, Texas, USA, הכולל מערך סנסורים למדידה של הפרמטרים הבאים: טמפרטורה, עומק, חמצן מומס, עכירות, פוטנציאל חמצון חזור, כלורופיל a, פיקואריטרין (פיגמנט של מיקרוציסטיס חום), פיקוציאנין (פיגמנט של ציאנובקטריה) ומוליכות חשמלית.



**תמונה 1:** יחידת ה- AutoReel עם כננת הנשלטת על ידי מחשב.

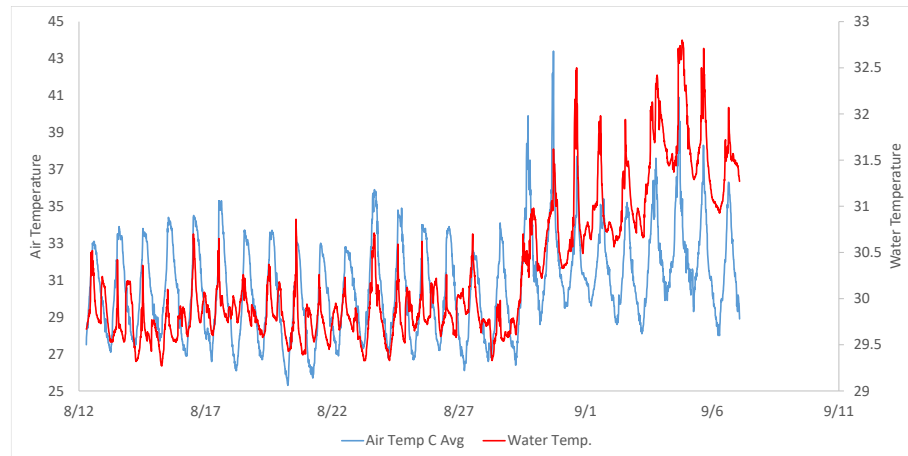


**תמונה 2:** דוגם רב חיישנים מדגם Manta מתוצרת חברת Eureka

חלק ממערך המדידה של הדבורה בתחנה G הינה תחנה מטאורולוגית קומפקטית מסוג Lufft WS-600 G. Lufft Mess- und Regeltechnik GmbH, Fellbach, Germany, אשר מודדת את הפרמטרים הבאים באופן רציף ועל פי תדירות שנקבעת ע"י המשתמש: קרינה גלובלית, טמפרטורת האוויר, לחות יחסית, משקעים, לחץ אוויר, כיוון רוח ומהירות רוח. על מנת לקבל תקשורת מרחוק והעברת נתונים הותקן במערכת ראטר סלולרי (Teltonika rut 240), המחובר לכניסת ה- LAN של מחשב ה- AutoReel. לפני עגינת הדבורה בתחנה המיועדת, היה עלינו להבטיח הגנה מפני ונדלזים ומפני לשלשת ציפורים. לצורך כך, הותקנה גדר אלומיניום. בנוסף, בכדי למנוע התיישבות ציפורים הותקנה מערכת חוטים במתח גבוה (Dual 4, 4J) על גג הכלוב. לאחר סיום עבודות ההכנה, שהתארכו בשל אילוצי הקורונה, הדבורה הוצבה במקומה באוגוסט 2020 בנ"צ 32 52.195 E 36.309 N, סמוך לתחנה G, בנקודה בה עומק המים המקסימלי עמד על 22.5 מטר. עקב בעיות טכניות בכננת, נאלצנו לדחות ביצוע של פרופילים בעמודת המים, אולם התחלנו בביצוע מדידות רציפות בעומק קבוע של 1 מטר, כל 10 דקות יחד עם נתוני מזג אוויר. בתחילת נובמבר התחלנו במדידת פרופילים בעמודת המים.

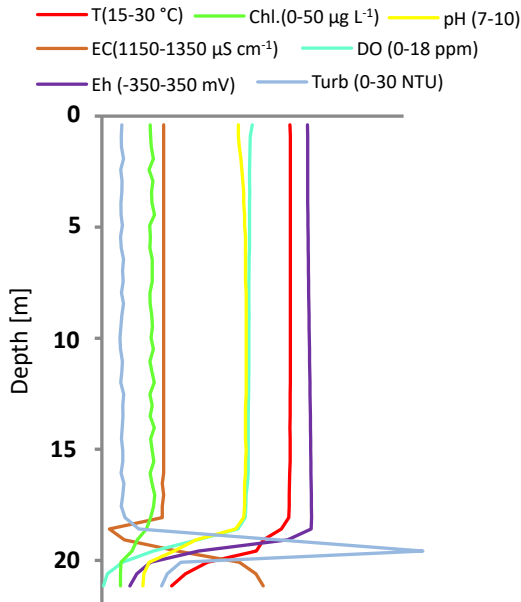
**תוצאות ראשוניות**

באיור 76 ניתן לראות את השינויים, עם הזמן, של טמפרטורת פני המים (1 מטר) וטמפרטורת האוויר במהלך 4 שבועות. ניתן לראות בברור את העלייה המשמעותית בטמפרטורות בשל גל החום שהיה בתחילת ספטמבר.

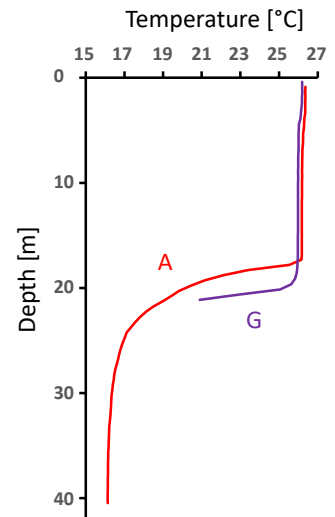


**איור 76:** מחזור יום-לילה של טמפרטורות המים והאוויר בעומק 1 מטר.

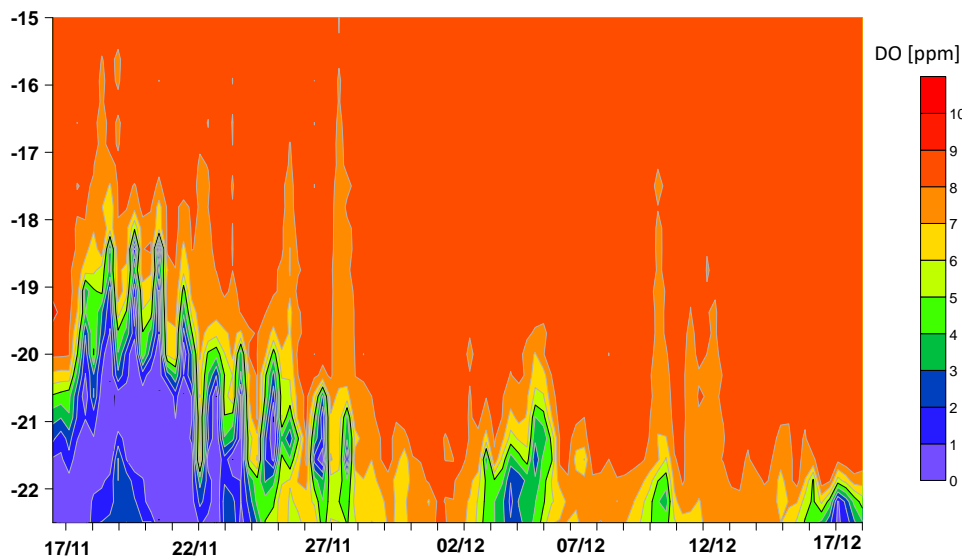
דיגום פרופילים רציף התחיל ב- 17/11/20 לאחר כיוול הסנסורים השונים. באותו היום התרמוקלינה והאוקסיקלינה היו שתיהן בעומק 20 מטר, מה שמעיד על כך שעדיין ניתן להבחין בהיפולימניון בתחנה G (איור 77). התרמוקלינה שנצפתה בתחנה G הייתה כ- 2 מטר מתחת לזו שנמדדה באותה העת בתחנה A (איור 78). במהלך הימים הבאים, האוקסיקלינה עברה תנודתיות חזקה מאוד במחזורים של 24 שעות, כאשר העומק המינימלי היה סביב חצות, והמקסימלי בשעות הצהריים (איור 79). המגמה הכללית שנצפתה הייתה צמצום והעלמות הדרגתית של ההיפולימניון באזור של תחנה G. נקודה מעניינת נוספת היא השינויים בפרופילים של המוליכות החשמלית אשר נמדדו בתחנה G (איור 80). בדרך כלל הערכים שנמדדים בהיפולימניון גבוהים מאלו של האפילימניון. בפרופילים של תחנה G ניתן לראות לעיתים, בעיקר בדצמבר, ירידה במוליכות החשמלית בשכבת המטהלימניון וערכים הנמוכים מאלו של האפילימניון. תופעה זו יכולה להיות מוסברת כתוצאה מהשפעת שיטפונות מי הירדן שהם בעלי מוליכות חשמלית נמוכה בהרבה מזו של הכנרת (איזופלטות כחולות). הנתונים הנאספים בתחנה החדשה מועברים למאגר הנתונים של המעבדה לחקר הכנרת ובהמשך יוצגו בזמן כמעט אמת באתר המעבדה בדומה להצגה של נתוני הדוגם האנכי בתחנה A.



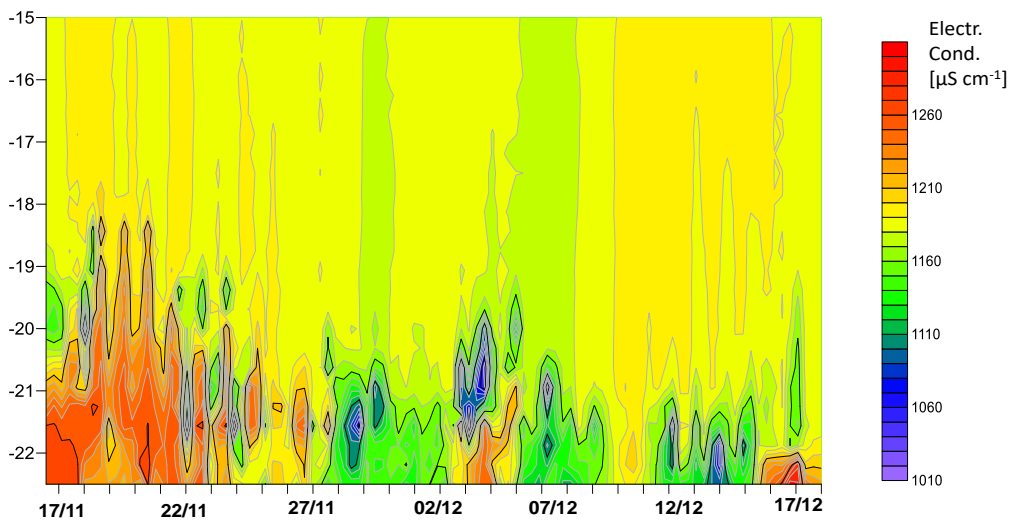
**איור 77:** פרמטרים של עמודת המים שנמדדו ב- 17/11/20 בתחנה G



**איור 78:** פרופילים של טמפרטורת המים שנמדדו בתחנות A ו G ב- 17/11/20



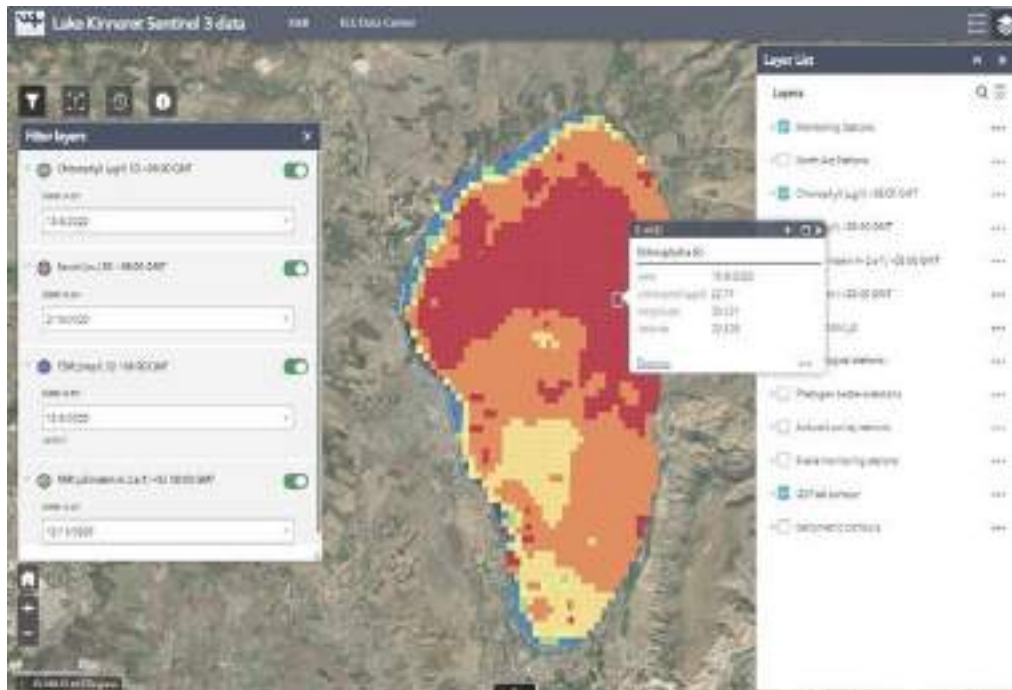
**איור 79:** דיאגרמת איזופלטות של ריכוז החמצן המומס בעמודת המים של תחנה G בעומק שמתחת ל 15 מטר, בתאריכים 17 לנובמבר עד 18 לדצמבר.



**איור 80:** דיאגרמת איזופלטות של המוליכות החשמלית בעמודת המים של תחנה G בעומק שמתחת ל- 15 מטר, בתאריכים 17 לנובמבר עד 18 לדצמבר.



## 2.27 איכות מי הכנרת באמצעות צילומי לוויין המשולבים במערכת SISCAL



**במימון  
רשות  
המים**

**גדעון טיבור, נחמה רושנסקי, מיקי שליכטר, לנא אשקר  
(מכון גיאולוגי)**

- הממוצע החודשי של טמפרטורת פני המים (SST) בכל האגם בחודשים אוגוסט - ספטמבר היה הגבוה ביותר עם טמפרטורה ממוצעת מעל 310 ואילו חודש ינואר היה הקר ביותר עם טמפרטורה ממוצעת של 16.50.
- הממוצע החודשי של ריכוזי הכלורופיל (Chl a) בכל האגם מראה שהריכוז הממוצע הגבוה ביותר (14.8 mg/L) היה בחודש פברואר והנמוך ביותר (1.6 mg/L) בחודש מאי.
- הממוצע החודשי של עומק הסקי (Secchi) בכל האגם השתנה מ-2.3 מטר בחודש יולי ועד 0.6 מטר בחודש אוקטובר.
- הממוצע החודשי של ריכוזי חומר מרחף (TSM) בכל האגם מראה שהריכוז הממוצע הגבוה ביותר (9.5 mg/L) היה בחודש פברואר והנמוך ביותר (3.3 mg/L) בחודש דצמבר.
- הממוצע החודשי של קרינה זמינה לפוטוסינתזה (PAR) בכל האגם מראה שהערך הממוצע הגבוה ביותר ( $1853 \mu E m^{-2} s^{-1}$ ) היה בחודש יוני והנמוך ביותר (996  $\mu E m^{-2} s^{-1}$ ) בחודש דצמבר.

**מטרת המחקר**

1. בניית בסיס מידע סינופטי רב-שנתי של כל האגם; 2. אספקה שוטפת של אומדני טמפרטורה, וריכחי כלורופיל וחומר מרחף מהאגם כולו כנתוני בסיס לניתוח אירועים חריגים (פריחות, זיהומים, ירידת המפלס) וכתוננים לכיול המודלים הלימנולוגיים של הכנרת; 3. הפצת המידע הנאסף לרשויות ולציבור באמצעות אתר האינטרנט של מרכז מידע כינרת ואתר רשות המים.

**רקע**

השימוש בלוויינים למיפוי איכות המים בכנרת נעשה באמצעות מערכת SISCAL (Satellite Information System on Coastal Area and Lakes) שפותחה במסגרת מחקר של התוכנית האירופאית החמישית (2002-2005) וכיום מוטמעת ע"י חברת Informus והמכון לחקר ימים ואגמים. הניטור כיום מתבסס על צילומי לוויין יומיים של Sentinel-3 עם רזולוציה של 300X300 מטר ו-VIIRS עם רזולוציה מרחבית של 750X750 מטר, על לוויין ה-Landsat 8 עם רזולוציה של 30x30 מטר בערוצי הצבע ו-60X60 מטר בערוץ התרמי שחולף מעל הכנרת פעם ב-16 יום. הנתונים הנאספים קרוב לפני המים ע"י המעבדה לחקר הכנרת בתחנות הניטור הקבועות והנתונים הנאספים בצורה רציפה ע"י ה-profiler בתחנה A ובתחנה G משמשים להמשך כיוול ובדיקה של האלגוריתמים השונים.

**שיטות**

- הורדת צילומי הלוויין קרוב ל"זמן אמת", הפעלת אלגוריתמים מתאמים ויצירת מפות של טמפרטורת פני המים (SST), ריכחי כלורופיל (Chl a), ריכחי חומר מרחף (TSM) ועומק סקי (Secchi depth),
- בדיקה וכיול אלגוריתמים קיימים מול נתוני אמת שנדגמים קרוב לפני השטח (עד חצי עומק סקי) ע"י המעבדה לחקר הכנרת.
- אנליזה יומית על בסיס נתוני Sentinel-3 וסינופטי של האגם המתבססת על נתוני לוויין ה-VIIRS.
- הפצת סיכום שבועי המתבסס על עיבוד צילומי לוויין Landsat 8 ו-Sentinel-3 לרשות המים ולמעבדה לחקר הכנרת.
- הפצת המידע הנאסף לרשויות ולציבור באמצעות אתר האינטרנט של מרכז מידע כנרת ואתר רשות המים. השנה פותחה אפליקציית GIS חדשה (ראה תמונה בכותרת הדו"ח) המאפשרת לראות את הערכים השונים בכל פיקסל ולבצע חישובי סטטיסטיים. הקישור לאפליקציה הוא:

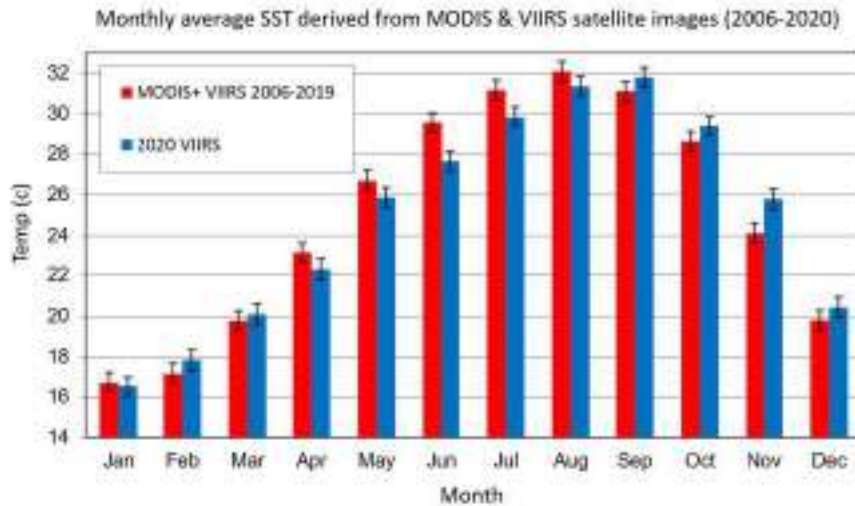
<https://iolar.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=da01a069af4e4f568a280a625ec8c50f>

**תוצאות ודיון**

אנליזות סינופטיות:

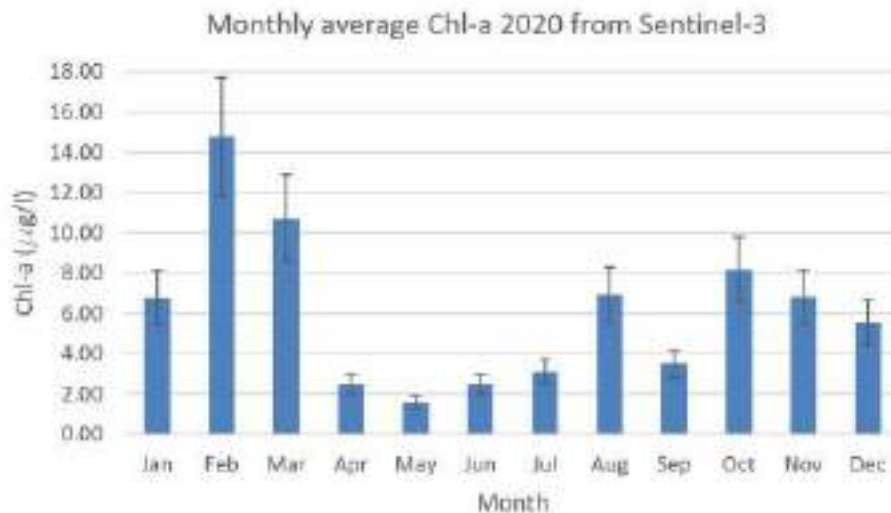
1. הממוצע החודשי של טמפרטורת פני המים (SST) בשנת 2020 חושב על בסיס 214 צילומי לוויין VIIRS ומוצג באיור 81 יחסית לנתוני ממוצע חודשי שחושב בשנים 2006-2019 מלוויין ה-VIIRS ו-MODIS ברזולוציה של 1X1 ק"מ. באיור ניתן לראות שחודשים אוגוסט - ספטמבר היו החמים ביותר עם טמפרטורה ממוצעת מעל 31°C וחודש ינואר היה הקר ביותר עם טמפרטורה ממוצעת של 16.5°C. השוואה לממוצע הרב שנתי מראה שחודשים פברואר-מרץ וספטמבר-דצמבר היו ב-2020 יותר חמים.





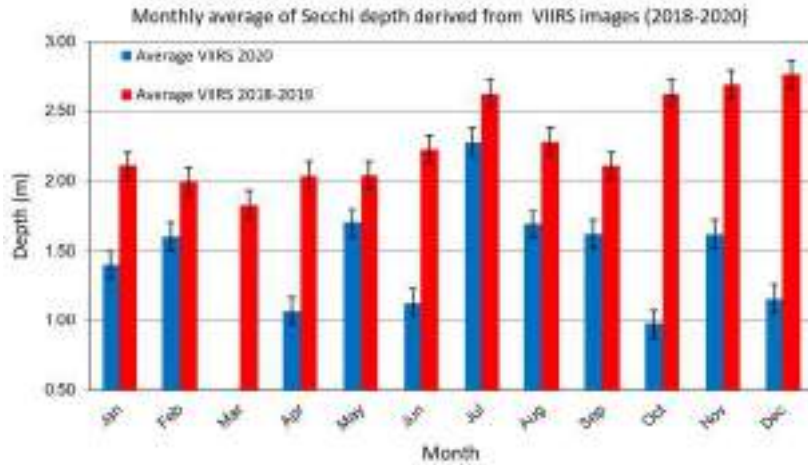
**איור 81:** טמפרטורת פני השטח (SST) חודשית ממוצעת האגמי שחושבה מנתוני לוויין VIIRS בהשוואה לנתונים שחושבו בשנים 2006-2019 מלוויין MODIS ו-VIIRS.

2. הממוצע החודשי של ריכחי הכלורופיל (Chl-a) בשנת 2020 חושב השנה מ-187 צילומי לוויין Sentinel-3 ומוצג באיור 82. נתוני הלוויין מראים שהריכוז האגמי הממוצע הגבוה ביותר ( $14.8 \text{ mg/L}$ ) היה בחודש פברואר והנמוך ביותר ( $1.6 \text{ mg/L}$ ) בחודש מאי. חשוב לציין שאנחנו עדיין בתהליך של כיוול האלגוריתם מול נתוני ה-in situ.



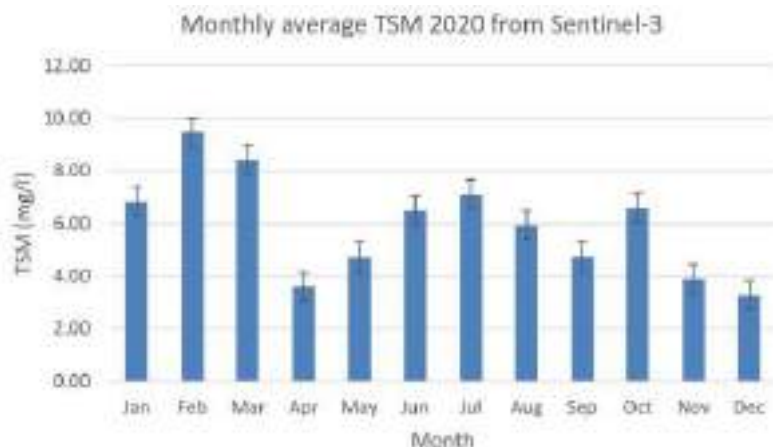
**איור 82:** ממוצע חודשי של ריכחי כלורופיל (Chl-a) האגמי בשנת 2020 המתבססים על אנליזות של צילומי לוויין VIIRS ברזולוציה של 750 מטר.

3. הממוצע החודשי של עומק הסקי (Secchi) בשנת 2020 חושב מ-116 צילומי לוויין VIIRS ומוצג באיור 83. יחסית לנתוני ממוצע חודשי שחושב בשנים 2018-2019. עומק הסקי הנמוך ביותר נמדד בחודש אוקטובר ( $0.6$  מטר) והגבוהה ביותר בחודש יולי ( $2.3$  מטר).



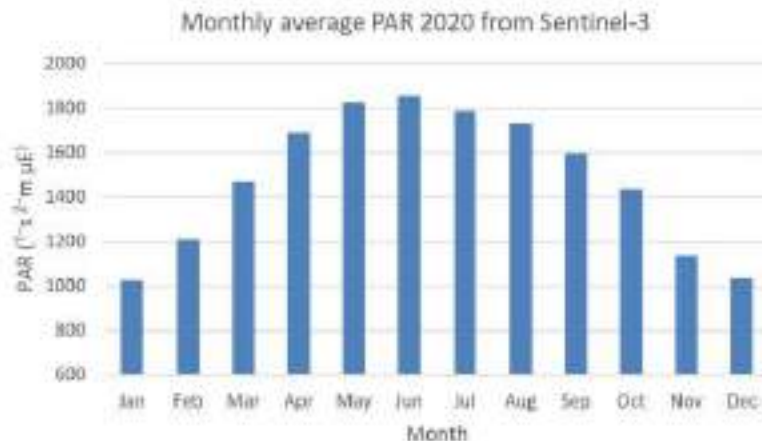
**איור 83:** עומק סקי (Secchi) חודשי ממוצע האגמי שחושב מנתוני לוויין VIIRS בהשוואה לנתונים שחושבו בשנים 2019-2018. בחודש מרץ לא בוצע חישוב בגלל מיעוט צילומים טובים.

4. הממוצע החודשי של ריכוזי חומר מרחף (TSM) בשנת 2020 חושב מ-187 צילומי לוויין Sentinel-3 ומוצג באיור 84. נתוני הלוויין מראים שהריכוז האגמי הממוצע הגבוה ביותר ( $9.5 \text{ mg/L}$ ) היה בחודש פברואר והנמוך ביותר ( $3.3 \text{ mg/L}$ ) בחודש דצמבר. חשוב לציין שאנחנו עדיין בתהליך של כיוול האלגוריתם מול נתוני in situ.



**איור 84:** ריכוזי חומר מרחף (TSM) חודשי ממוצע האגמי שחושב מנתוני לוויין Sentinel-3.

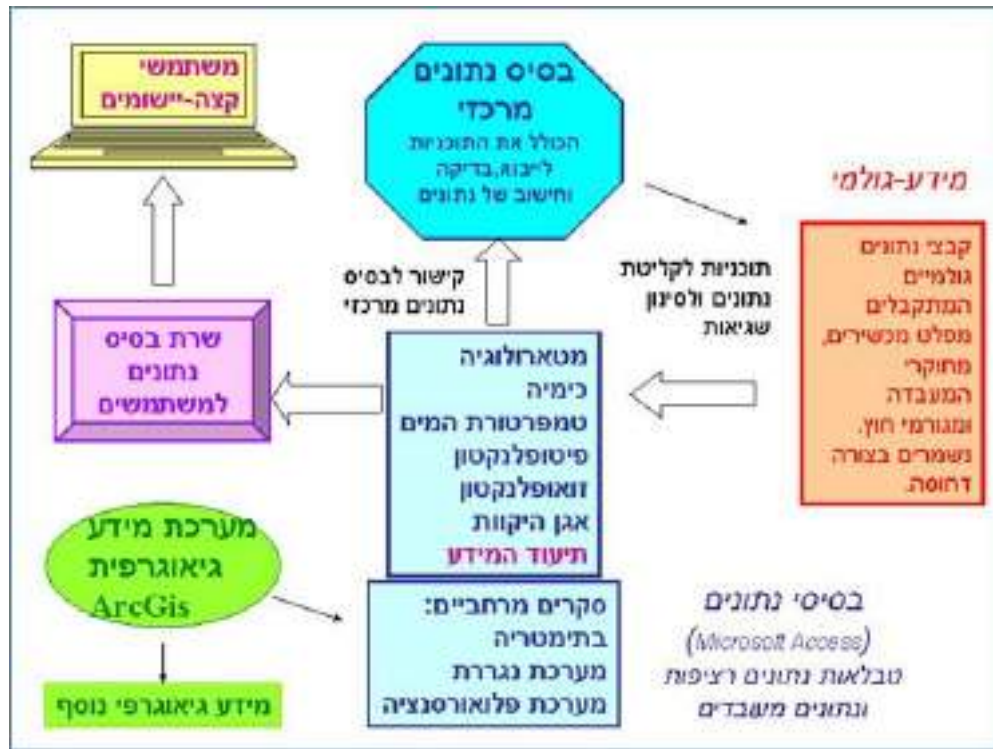
5. הממוצע החודשי של קרינה זמינה לפוטוסינתזה בין אורכי הגל (Photosynthetically PAR) 400-700nm (Available Radiation) בשנת 2020 חושב מ-187 צילומי לוויין Sentinel-3 ומוצג באיור 85. נתוני הלוויין מראים שהריכוז הממוצע האגמי הגבוה ביותר ( $1853 \mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) היה בחודש יוני והנמוך ביותר ( $996 \mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) בחודש דצמבר.



**איור 85:** ממוצע חודשי של PAR האגמי שחושב מנתוני לוויין Sentinel-3.

6. אנליזות של Chl-a, TSM, SST מלוויין Landsat 8 נעשות כל 16 יום (מותנה בעננות), בשנת 2020 עובדו 14 תמונות ועדכון חודשי נשלח ישירות לרשות המים ולמעבדה לחקר הכנרת. בגלל עננות ואובך בדר"כ ניתן לקבל בממוצע צילום אחד בחודש ולכן לא נעשו חישובי ממוצעים. החלוציה של הלוויין (30 מטר) מאפשרת לנו להבין את ההטרוגניות הרבה של הפרמטרים השונים במרחב. במהלך 2021 צילומי לוויין אלו וכן הצילומים היומיים של לוויין sentinel-3 משולבים באפליקציה של מעבדת הכנרת אשר פתוחה לציבור.

## 2.28 מרכז מידע כנרת



במימון  
רשות  
המים

מיקי שליכטר

- מרכז המידע הינו מערכת הכוללת את מאגר נתוני הניטור, תיעוד הנתונים, תכניות מחשב הנכתבות לצורך קליטה ועיבוד הנתונים ויישומים הנכתבים לשימוש חוקרי המעבדה.
- במרכז המידע משולבת מערכת מידע גיאוגרפית המשמשת לתצוגה, עיבוד וניתוח של הנתונים הגיאוגרפיים.
- חלק מהמידע מוצג בצורה גרפית באתר האינטרנט של חיא"ל במרכז מידע כנרת:

<http://kinneret.ocean.org.il/Default.aspx>

### מטרות

מטרותיו של מרכז המידע הנן: ריכוז המידע הנאסף מתוכנית הניטור של הכנרת, תיעוד המידע, עיבוד המידע והפצתו.

### רקע

מאגר הנתונים במרכז המידע כנרת מבוסס על תכנית ניטור הכנרת המתבצעת ע"י המעבדה החל משנת 1969 וכלולים בו נתונים מתחומי המטאורולוגיה, פיסיקה, כימיה וביולוגיה של האגם (טבלה 11).

המידע נאסף ברציפות ובשיטתיות בתחנות דיגום קבועות ובתדירות קבועה. בנוסף לגוף מידע זה, נמצאים במאגר נתונים הקשורים לאגן ההיקוות המתעדכנים מגופים חיצוניים (מקורות, השרות ההידרולוגי), נתונים מפרויקטים המתבצעים במעבדה ושאנם כלולים בתוכנית הניטור ונתונים ממקורות אחרים שנאספו למטרות מוגדרות באופן חד-פעמי. מאגר הנתונים מהווה את הבסיס לניתוח ממצאי הניטור: באמצעותו ניתן לזהות ולבדוק מגמות רב שנתיות המתרחשות באגם, המאגר מאפשר את בדיקת הקשר והאינטראקציה בין מרכיביה השונים של המערכת האקולוגית בכנרת לאורך זמן ומשמש בסיס לבניית מודלים לחיזוי תהליכים בכנרת. בנוסף, מאגר נתוני הכנרת משמש ככלי מחקרי בו עושים שימוש אינטנסיבי חוקרים במעבדה ובמוסדות מחקר אחרים.

**טבלה 11:** תכולת מאגר מידע כנרת.

שנת התחלה	תכולה	סוג המידע
1969	הנתונים המקוריים, בפורמט המקורי, במצב דחוס, ללא שינוי ועיבוד. (עד 1992 על גבי מדיה מגנטית). מאורגנים ע"פ נושאים בספריות מחשב.	<b>מידע גלמי</b>
1969	בסיסי נתונים הכוללים טבלאות נתונים בתחומים: בתימטריה, מטאורולוגיה ונתוני אגם: טמפרטורות, זרמים, כימיה, פיטופלנקטון, זואופלנקטון, דגים, נתוני ליטורל, נתוני נחלים.	<b>נתוני ניטור</b>
1992	בסיס נתונים (kin_info) הכולל את טבלאות התיעוד בהן מצויה האינפורמציה שנאספה אודות טבלאות הנתונים, תיעוד תחנות הדיגום, טבלאות nfol ייחודיות לנושאים שונים.	<b>תיעוד</b>
2001	אוסף הקבצים המעובדים במערכת הממ"ג: קבצי מפות, תלת ממד, shape files coverages, personal geodatabase, ותמונות בנושאים: בתימטריה, תחנות ניטור, סקרים מרחביים, אגן היקוות, גיאולוגיה, דיגום כלורופיל רב-ערוצי.	<b>נתוני ממ"ג</b>
2004	אוסף נתוני לווין של הפרמטרים: טמפרטורת פני המים, כלורופיל, סקי, עכירות.	<b>נתוני לווין</b>
2000	נתונים גולמיים ובסיסי נתונים מסקרים מרחביים שהתבצעו החל משנת 2001.	<b>נתונים ייעודיים:</b>
2000	נתונים גולמיים ובסיסי נתונים מסקרים מרחביים חודשיים בשנים 2000-2004.	• נתוני המפר"ע
2002	נתונים גולמיים ובסיסי נתונים: טמפרטורות נחלים, LDS (מטאורולוגיה וטמפרטורות), RUSS (נתונים איכות מים). נתונים מעובדים: נתוני קלט ונתוני אימות למודל.	• פרוייקט המודלים
2004	נתונים מתחנות מטאורולוגיות צמח, בית ציידא, A, חרמון.	<b>נתונים מגורמי חוץ:</b>
1970	נתוני חברת "מקורות": נתוני כימיה מתחנות גשר חורי וגשר אריק בירדן.	• נתוני השרות המטאורולוגי
2018	נתוני כימיה מנחלי אגן ההיקוות ומעינות מלוחים.	• נתוני אגן היקוות

**סיכום העבודה בשנת 2020**

ניהול שוטף של מאגר הנתונים:

1. קליטת הנתונים המתקבלים מהחוקרים, ממכשירי מדידה שונים או מגורמי חוץ: חברת מקורות, שרות מטאורולוגי ורשות המים, בדיקתם וקליטתם לבסיסי הנתונים.
2. בקרה על התכונות לקליטה אוטומטית של נתונים. לבסיס הנתונים נקלטים נתונים באופן אוטומטי ע"י תכניות מחשב בתחומים הבאים: נתוני 5 תחנות מטאורולוגיות מאזור הכנרת ושתי תחנות מטאורולוגיות בחרמון, נתוני הפרופילים ממערכת הדוגם האנכי ונתוני טמפרטורה משרשראות התרמיסטורים. מערכות קליטת הנתונים דורשות פיקוח ובקרה שוטפים.
3. ביצוע חישובים המבוססים על הנתונים וקליטתם לטבלאות. לדוגמא-חישובי ביומסה של פיתופלנקטון מתוך נתוני ספירות ומדידות התאים, חישוב של מספר הפרטים בקבוצות הטקסונומיות השונות של זואופלנקטון, חישוב עומק התרמוקלינה ועוד.
4. עיבוד נתונים לצורכי המחקר בפרויקטים שונים.
5. העברה רבעונית של בסיס הנתונים המעודכן לרשות המים.
6. העברת נתונים לגורמי חוץ (המשרד לאיכות הסביבה, הלשכה לסטטיסטיקה, חוקרים וסטודנטים במוסדות מחקר בארץ ובחו"ל).
7. גיבויים שוטפים ותקופתיים של מאגר הנתונים.

**פיתוח ותחזוקה של היישום "כנרת"**

יישום המשמש את כלל החוקרים לגישה לבסיס הנתונים, עיבוד הנתונים ותצוגה גרפית. היישום מתפתח במשך השנים בהתאם להתרחבות מאגר הנתונים והתחומים החדשים המתווספים אליו.

**גישה לנתוני הניטור באינטרנט- לחוקרי המעבדה**

עדכון שוטף של נתוני הניטור באתר האינטרנט. תחזוקת היישום המאפשר לחוקרי המעבדה, גישה דרך האינטרנט לטבלאות המרכזיות של בסיס הנתונים. היישום מאפשר צפייה, בחירת נתונים, ביצוע חישובים וייצוא הנתונים לקובצי אקסל. ממשק המשתמש דומה לממשק של היישום "כנרת" הפועל ברשת הפנימית של המעבדה.

**מערכת מידע גיאוגרפית (ממ"ג-GIS)** עבוד המידע הגיאוגרפי במערכת המידע הגיאוגרפית והפקת מפות לפרויקטים שונים. שימוש בתוכנת GIS online מאפשר שילוב ושיתוף המפות באינטרנט.

פותחה אפליקציה בכלל GIS ONLINE לתצוגת נתוני הלוויין סנטינל 3 באתר המעבדה-

<https://iolr.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=da01a069af4e4f568a280a625ec8c50f>

**קליטת תחומי מידע חדשים למאגר המידע**

1. קליטת נתונים מהרפסודה בתחנה G- נתוני מטאורולוגיה, נתוני פרופיל עומק, ונתונים רציפים ונתוני הפרמטרים של איכות מים: כלורפיל, חמצן, עכירות, pH, טמפרטורה, ציאנופיטה, מיקרוציסטיס. הנתונים נקלטים אחת ליום באופן אוטומטי, ומוצגים באתר המעבדה.
2. קליטת נתוני הלוויין סנטינל 3: כלורופיל, סקי, TSM, PAR.





## 2.29 אתר האינטרנט של מרכז מידע כנרת



במימון  
רשות  
המים

מיקי שליכטר, יורי לצ'ינסקי

- אתר האינטרנט של מרכז מידע כנרת מציג לציבור מידע אודות הכנרת בנושאים שונים: המערכת האקולוגית, תכנית הניטור, גרפים של נתונים בזמן אמת, קטלוג אצות, דוחות, פרסומים ועוד.

- כתובת האתר: <http://kinneret.ocean.org.il/Default.aspx>

### מטרות

- מטרת האתר להציג לציבור מידע אודות הכנרת בנושאים שונים:
- מידע אודות מרכז המידע - מטרות מרכז המידע ומקור הנתונים.
  - המערכת האקולוגית בכנרת - הצגה של נושאים שונים בתחומי הפיסיקה, הכימיה והביולוגיה של הכנרת. כל נושא מיוצג ומוסבר בטקסט בליווי גרפים, תמונות, מאמרים ועוד.
  - תכנית הניטור של הכנרת - הצגת מערך הניטור המתבצע בכנרת- המכשור הקיים, תחנות הדיגום, הפרמטרים הנמדדים ועוד.
  - תצוגת נתונים בזמן אמת - תצוגה גראפית אינטראקטיבית של נתונים מטאורולוגיים. תצוגת נתוני הדוגם האנכי: הצגת הנתונים בגרפים תלת-ממדיים או כפרופילי עומק.
  - מצב האגם - שידור ווידאו ממצלמה הממוקמת בתחנה A במרכז האגם ותצוגת נתונים מטאורולוגיים המתעדכנים מידי 10 דקות.
  - נתוני עבר - תצוגה גרפית אינטראקטיבית של נתונים פיסיקליים, כימיים וביולוגיים הנמדדים במסגרת תכנית הניטור החל מראשיתה בשנת 1969.

- קטלוג אצות הכנרת – תצוגה הכוללת תמונות ומידע אודות מיני האצות בכנרת. ניתן למיין את הקטלוג לפי קבוצות טקסונומיות, צורת האצות או סדר אלפא-ביתי.
- בניית קטלוג תרבויות והצגתה.
- פרסומי המעבדה לחקר הכנרת - דוחות שנתיים, דוחות בנושאים שונים, מאמרים נבחרים.

## התקדמות

במהלך שנת 2020 נמשכה עבודת העדכון השוטף של האתר בנתוני הניטור המוצגים בגרפים: נתוני הדוגם האנכי, נתוני מטאורולוגיים מתחנה A, נתונים מהרפסודה בתחנה G - מטאורולוגיה ופרמטרים של איכות מים, נתוני ממוצעים חודשיים של פרמטרים מתחום הכימיה, פיטופלנקטון, זואופלנקטון ומטאורולוגיה.

נוספו דפים חדשים: תצוגה גרפית של נתוני המטאורולוגיה מתחנה G:

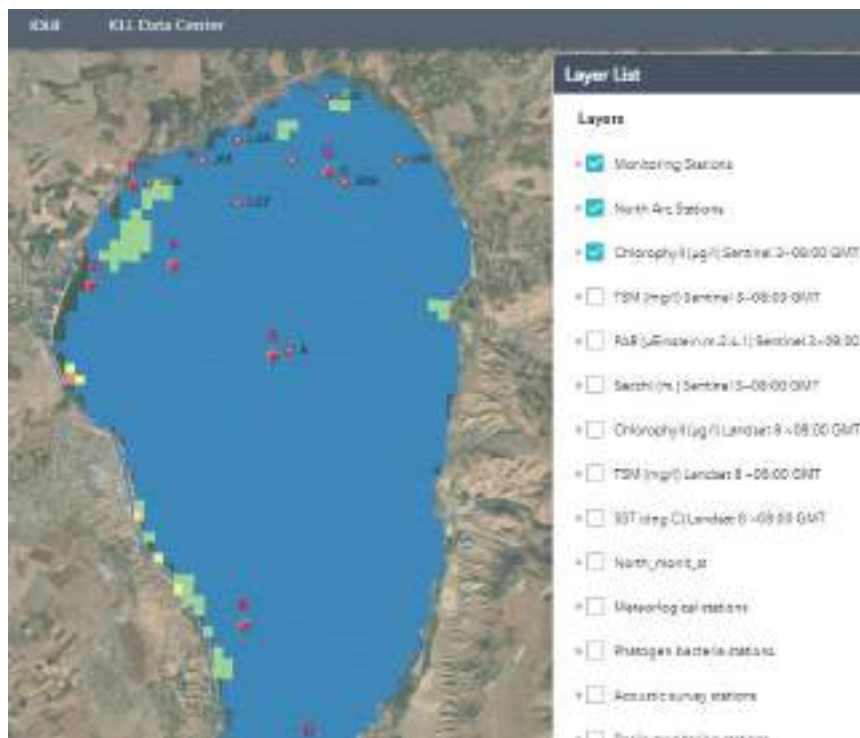
[http://kinneret.ocean.org.il/metr\\_G.aspx](http://kinneret.ocean.org.il/metr_G.aspx)

נתוני איכות המים מתחנה G:

[http://kinneret.ocean.org.il/prob\\_G\\_grp2.aspx](http://kinneret.ocean.org.il/prob_G_grp2.aspx)

תצוגת נתוני הלוויין סנטינל 3 החל מיולי 2020: כלורופיל, סקי, TSM, PAR (איור 86):

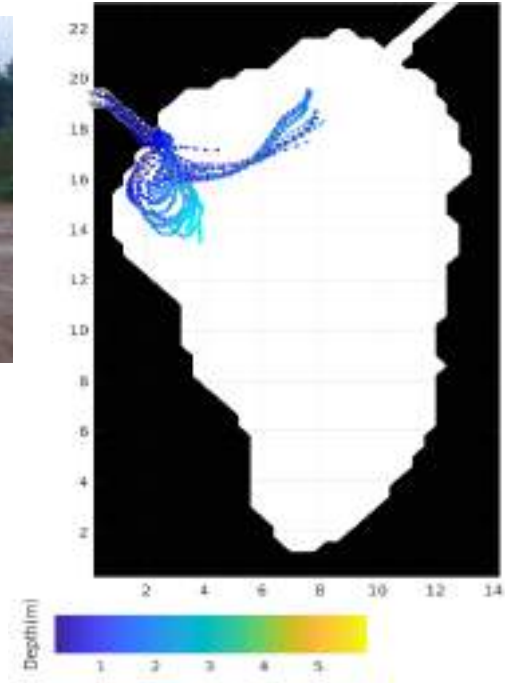
<https://iolor.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=da01a069af4e4f568a280a625ec8c50f>



**איור 86:** מסך האפליקציה להצגת נתוני הלוויין סנטינל 3

### 3 מחקרי כנרת

## 3.1 בדיקת הזרמת מי התפלה לכנרת באמצעות מודל תלת מימדי



במימון  
רשות  
המים

יעל אמיתי

- בעזרת יישום מודל ה-MITGCM לכנרת ניתן לבחון את ההיבטים השונים של הזרמת מי התפלה מהצלמון.
- תרחישי הספיקה השונים נועדו למקסם את הידע המוקדם עבור מקבלי ההחלטות.
- פיזור מי הצלמון בכנרת תלוי בשיכוב באגם, כלומר בעונת השנה, ובטמפרטורת המים הנכנסים והיחס בין שני פרמטרים אלו.

#### רקע

בעקבות החלטת הממשלה על הזרמת מים מותפלים לכנרת לצורך שמירה על תפעול כנרת במפלסים גבוהים ועל מנת לחבר אזורים מנותקים למערכת הארצית נעשתה בחינה של תרחישי הזרמה באמצעות מודל זרימה תלת מימדי של הכנרת. מודל זה מאפשר בחינה של קצב מיהול המים הנכנסים, פיזורם המרחבי, השינויים בשיכוב באגם ועוד. באמצעות המודל ניתן להריץ סימולציות עם תנאי שפה שונים, כגון כניסה של מי מערכת ומים מותפלים דרך נחל צלמון ולבדוק את פיזור המים הנכנסים כתלות בסירקולציה התלת מימדית בכנרת.

בנוסף, ניתן לבחון את פיזור המים בכנרת בעזרת שימוש באוסף כלי עבודה בסביבת מאטלאב שבאמצעותם אפשר, בהינתן שדה זרימה, לאפיין את המרחב ולעקוב אחר מי התפלה המתחילים את זרימתם בשפך הצלמון.

### שיטות

#### מודל הידרודינמי תלת מימדי

מודל הידרודינמי תלת מימדי של הכנרת ברזולוציה אופקית של 400 מטר ורזולוציה אנכית של עד מטר נבנה בעזרת המאפיינים הייחודיים של האגם. המודל מתבסס על מודל אוקיאני גנרי (MITGCM) אשר הותאם לבתימטריה ולמאפיינים הפיזיים של הכנרת. המודל מקבל מהמשתמש תנאי שפה כמו רוחות, משקעים, קרינה אטמוספירית, אידוי וכניסת מים מנחלים. הפלט הבסיסי שלו כולל טמפרטורה, מליחות, גודל וכיוון זרם בכל נקודת שריג במרחב התלת המימדי. ההרצות של המודל בדו"ח זה מקבלות קלט נתוני ספיקת מי הירדן היומיים שנמדדו בגשר הפקק ונתוני טמפרטורת מי הירדן שנאספו כל כמה ימים בשנים 2019-2020. קלט מטאורולוגי בסיסי (קרינה קצרת וארוכת גל, טמפרטורת אוויר, לחות יחסית, ומשקעים) נאסף בארבע תחנות סביב הכנרת ובתחנה A ברזולוציה עיתית מספקת כדי לאלץ את המודל. אך אילוץ הרוחות במודל הכנרת נעשה בעזרת רוחות מהמודל האטמוספרי COSMO המופעל על ידי השירות המטאורולוגי. הפלט של המודל האטמוספרי הינו ברזולוציה עיתית של 6 שעות ורזולוציה מרחבית של 2.5 ק"מ אשר התחנות המטאורולוגיות לא יכולות לספק.

#### תרחשי ספיקה

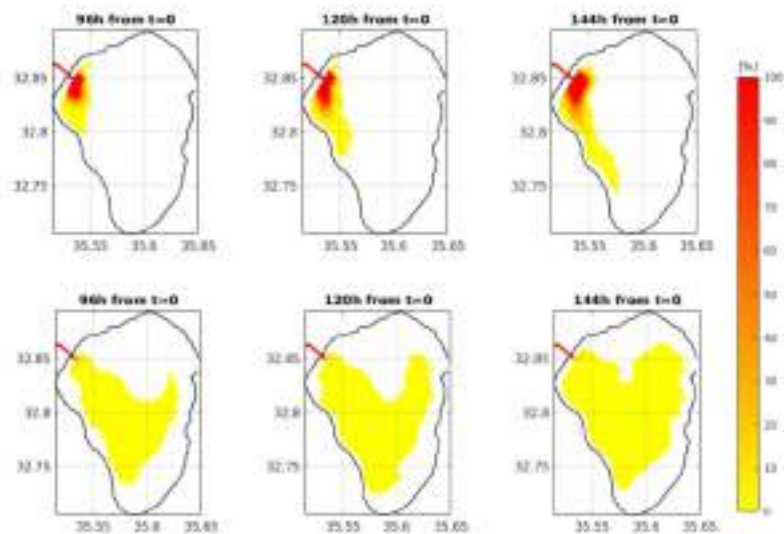
על מנת לבחון את השפעת הזרמת מים לכנרת דרך נחל צלמון נבנו שני תרחישים עם צלמון כנחל פעיל עם (א) ספיקה של 40 מלמ"ק לחודש ('צלמון בספיקה גבוהה') ו-(ב) עם 20 מלמ"ק בחודש ('צלמון בספיקה נמוכה') במהלך חודשי החורף (טבלה 12). למי הצלמון ניתנו תנאי שפה של מהירות (המתאימה לספיקה הנ"ל) במורד הנחל. בסימולציות אלו גם הירדן פעיל עם הספיקה שנמדדה ברזולוציה ימית בגשר הפקק וטמפרטורת שני הנחלים היא הטמפרטורה כפי שנמדדה כל כמה ימים בגשר הפקק. בכל חודש שבו בוצעה 'הזרמה' במודל שוחרר סמן פאסיבי בנחל כך שניתן היה לעקוב אחרי פיזור מי התפלה באגם וחדירתם לעומק כתלות בספיקה ובחודשי השנה בהתאם לזרמים המחושבים.

**טבלה 12:** סיכום הרצות המודל שבוצעו במסגרת כיול המודל ובחינת התרחישים.

שם הרצה	חודשי הזרמת מים מותפלים	כניסת ירדן	כניסת צלמון
הרצת כיול ואימות 2019	ללא	תצפיות ספיקה בגשר הפקק ב- 2019	ללא
הרצת כיול ואימות 2020	ללא	תצפיות ספיקה בגשר הפקק ב- 2020	ללא
צלמון 20	ינואר - מאי	תצפיות ספיקה בגשר הפקק ב- 2019	20 מלמ"ק בחודש
צלמון 40	ינואר - מאי	תצפיות ספיקה בגשר הפקק ב- 2019	40 מלמ"ק בחודש

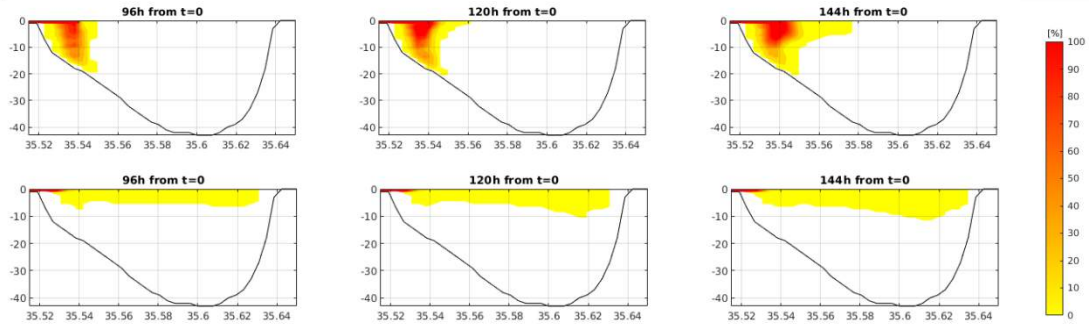
**תוצאות ודין**

כדי לבחון את פיזור המים במודל בתרחישי הספיקה השונים, פוזר סמן פאסיבי למי ההתפלה בנחל בחדשי חורף 2019 בעזרת קוד ייעודי לכך במודל. בדקנו את הפיזור המרחבי במישור האופקי על ידי סכימה של כל הסמן בעמודת המים, וגם במישור האנכי בסכימה של כל מעלות הרוחב מצפון לדרום והסתכלות על חתך עומק במשך כמעט שבוע בכל חודש מחודשי ההזרמה. בהשוואה בין חודשי השנה בספיקה של 40 מלמ"ק בחודש דרך נחל הצלמון נראה כי הפיזור המרחבי האופקי של מי ההתפלה יותר יעיל באפריל מאשר בפברואר על פי איור 87. הצבע האדום בפברואר, קרוב לפתח של הצלמון, מעיד על ריכוז מי התפלה בעומק שכן זוהי סכימה של כל עמודת המים. כמו כן ניתן לראות שבפברואר (איור 87 שורה עליונה) מי ההתפלה זורמים לאורך החוף המערבי של הכנרת וכמעט אינם מגיעים למרכז האגם בטווח הזמן של שבוע אותו בדקנו.



**איור 87:** פיזור מרחבי אופקי של מי ההתפלה (בסכימה על כל עמודת המים) המגיעים מהצלמון בספיקה של 40 מלמ"ק בחודש פברואר (שורה עליונה) ובחודש אפריל (שורה תחתונה) 2019. כל תת-איור מייצג זמן שונה מתחילת הפיזור והצבע מייצג את ריכוז מי ההתפלה.

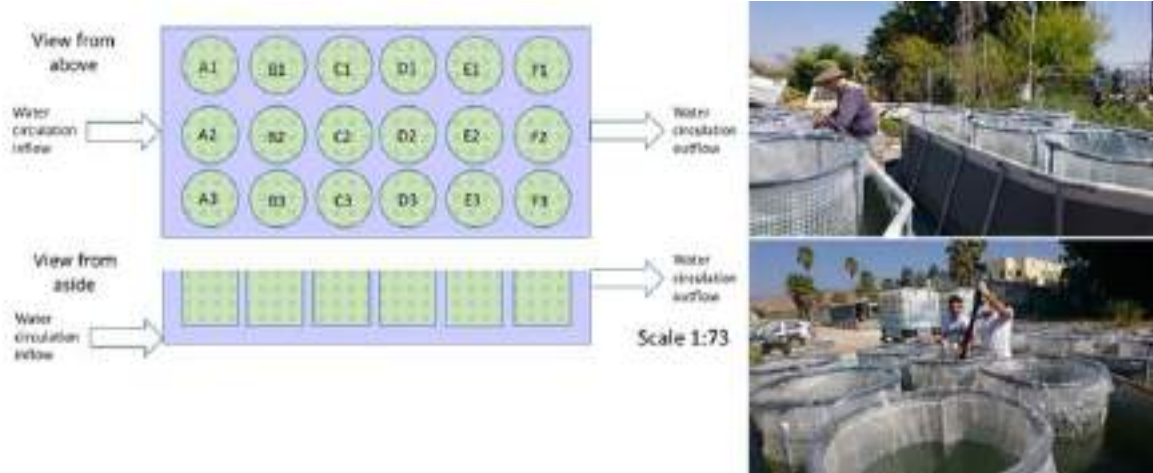
כאשר בוחנים את חתכי העומק של ניסויים אלו באיור 88, ניתן להסביר מדוע הפיזור המרחבי כה שונה בין פברואר לאפריל. באיור 88 בשורה העליונה ניתן לראות שהסמן הפאסיבי, שמייצג את מי ההתפלה, חדר לעומק עמודת המים באזור בו הצלמון נכנס לכנרת. זוהי תופעת 'זרמי הכובד' בה מי הנחל קרים משמעותית ממי האגם ולכן שוקעים לעומקים גדולים מיד עם כניסתם. תופעה זו גם נצפתה על ידי מדי זרם שהצבנו בפיתחת נחל הצלמון בינואר 2019 ודווחה בדו"ח חיא"ל מס' T13-2020 לרשות המים. באפריל (איור 88 שורה תחתונה), לעומת זאת, מתחיל השיכוב והחלק העליון של עמודת המים מתחמם כך שיש הפרדה יותר יציבה בין שכבת פני השטח לזו שמתחתיה. כמו כן, הטמפרטורה הנמדדת של מי הנחל (כפי שהנחנו עבור הצלמון בהסתמך על מדידות מהירדן) עולה גם היא כך שמי הצלמון בעלי ציפה גבוהה יותר וחדירותם לעומק אינה מתאפשרת. נציין כי ספיקה של 20 מלמ"ק בחודש דרך הצלמון אינה מציגה תמונה כל כך שונה מספיקה של 40 מלמ"ק דרך נחל צלמון ולכן לא נציג אותה בדו"ח זה.



**איור 88:** פיזור מרחבי אנכי של מי התפלה (בסכימה מצפון לדרום) המגיעים מהצלמון בספיקה של 40 מלמ"ק בחודש פברואר (שורה עליונה) ובחודש אפריל (שורה תחתונה) של 2019. כל תת-איור מייצג זמן שונה מתחילת הפיזור והצבע מייצג את ריכוז מי התפלה.

לסיכום, בעזרת יישום מודל ה-MITGCM לכנרת ניתן לבחון את ההיבטים השונים של הזרמת מי התפלה מהצלמון, השפעתם על שיכוב האגם ופיזורם בחודשים השונים במהלך החורף על מנת למקסם את הידע המוקדם עבור מקבלי ההחלטות. מתוך תוצאות הסימולציות והתרחישים עד כה עולה כי פיזור מי הצלמון בכנרת גם במישור האופקי וגם במישור האנכי תלוי בחודש בשנה ובטמפרטורת המים הנכנסים. התרחישים המוצגים בדו"ח מראים שינויים גדולים כתלות בשני גורמים אלו במעקב אחר שבוע בלבד של ערבוב.

## 3.2 הערכת ההשפעה של הזרמת מי התפלה על מרכיבים ביולוגיים באגם



**במימון  
רשות  
המים**

**אסף סוקניק, תמר זהרי, שירה ניניו, גדעון גל, ירון בארי-  
שליון, אלה אלסטר, דיתי ויינר-מוציני, עכסה לופו, שרון  
וורולקר, אדית לייבוביץ', דוד קמינגס, נחמה רושנסקי**

- בניסויי מעבדה נמצאה השפעה משמעותית על הרכב האוכלוסיות החיידקיות והאאוקריוטיות בעקבות המיהול במי התפלה. מיהול במי הביקורת נטולי היונים השפיע באופן מינימלי על הרכב האוכלוסייה, בעוד מיהול במי התפלה גרם לתמורות משמעותיות הניכרות בירידה בתפוצה של מינים מסוימים ועליה בתפוצתם של אחרים.
- בניסויי שדה במערכת המזוקסם נבחנה ההשפעה של מיהול מי כנרת במים מותפלים לפני ואחרי הכלרה והקשיה.
- למיהול מי כנרת במי התפלה לאחר הכלרה והקשיה השפעה על אוכלוסיות הפיטופלנקטון. השפעה זו באה לידי ביטוי בריכוז הכלורופיל והרכב אוכלוסיות הפיטופלנקטון.

### מטרת המחקר

לברר אם להזרמת מי התפלה, שמליחותם נמוכה, לכנרת תהיה השפעה מקומית או נרחבת יותר על אוכלוסיות הפיטופלנקטון, הזואופלנקטון והחיידקים באזור ההזרמה ובכנרת כולה, והאם הזרמת מים אלו תעודד או תעכב התפתחות של ציאנובקטריה.

**רקע**

מים מהמערכת הארצית (בעיקר מי ים מותפלים, להלן מי התפלה) אשר יחרמו לכנרת ישנו את ההרכב הכימי של מי הכנרת באזור מוגבל הקרוב לנקודת ההזרמה ובמידה מוגבלת יותר בכנרת כולה. השינוי יהיה על ידי הפחתת המליחות והפחתת ריכוזי חומרים מומסים ומורחפים במים, עם השלכות אפשריות לגבי הביטה של האגם. במערכות אקוויטיות, ריכוז והרכב הפיטופלנקטון, הזואופלנקטון והחיידקים (בקטריופלנקטון) משמשים סמנים רגישים לשינויים בהרכב הכימי של המים. במקביל, הרכב הפיטופלנקטון משפיע ישירות על איכות המים. מעקב אחר שינויים בהרכב הפלנקטון יאפשר חיזוי של השפעת ההזרמה של מי התפלה לאגם על איכות המים בתחום מקומי או נרחב. ישנה חשיבות מיוחדת לשאלה אם תוספת של מי התפלה תעודד או תעכב פריחות של ציאנובקטריה העלולות לפגוע באיכות מי הכנרת.

**שיטות****ניסויי מעבדה**

בוצעו שני ניסויי מעבדה בהן נבדקה תגובת אוכלוסיות הפיטופלנקטון, זואופלנקטון ובקטריופלנקטון במי כנרת לתוספות שונות של מי התפלה. הניסוי הראשון בוצע באביב, והשני בקיץ-סתיו. בניסויים אלו נמדדו השינויים בהרכב ובפעילות אוכלוסיות הפיטופלנקטון והזואופלנקטון ונאספו דגימות לקביעת השינויים בהרכב אוכלוסיות הבקטריופלנקטון בשיטות ריצוף מתקדמות.

**ניסויי שדה - מזוקוסם**

בוצע ניסוי במערכת המזוקוסם שנבנתה סמוך לכנרת ומבוססת על שתי בריכות אקלום הניזונות ברציפות במי כנרת ובהן שקי פלסטיק בנפח של כ- 500 ליטר כל אחד, 6-8 שקים בכל בריכה (איור 89). את השקים ממלאים במי כנרת או בתערובת של מי כנרת עם מים מותפלים, לתקופה קצרה של 3 ימים שבמהלכה נבדקים מדדים שונים למעקב אחר אוכלוסיות הפלנקטון שמקורם בכנרת, ואחר שינויים פסיקו-כימיים במים. דיגומים התבצעו מתוך השקים בעזרת דוגם אינטגרטיבי האוסף דגימת מים מכל עמודת המים בשק.

**תוצאות ודיון****השפעת מי התפלה על רכיבי הפלנקטון בכנרת – ניסויי מעבדה**

בוצעו ניסויים שמטרתם לבדוק כיצד יגיבו אצות, חיידקים וזואופלנקטון במי כנרת בתקופות השנה השונות לתוספת מי התפלה. הניסויים כללו הדגרה במעבדה של מי כנרת עם תוספות שונות של מים מותפלים שהובאו מאתר ההתפלה בחדרה. ההדגרה בוצעה במכלים שקופים. תוצאות ניסויי זה הוצגו בדוח שנה א' של הפרויקט.

להלן המסקנות העיקריות:

במהלך הניסוי הסתמנה עליה במרבית הפרמטרים המייצגים את אוכלוסיית הפיטופלנקטון. הפעילות הפוטוסינתטית של אוכלוסיות הפיטופלנקטון השתמרה ברמה ההתחלתית במהלך הניסוי. תוספת מי התפלה או מים נטולי יונים עודדה גידול של אצות צורניות בעוד שבמי כנרת לא מהולים היה יתרון לציאנובקטריה. להרכב הכימי של המים הייתה השפעה על קצבי קיבוע החנקן של האוכלוסיות המקבעות שמקורן במי הכנרת. נרשמה תגובה דומה של אוכלוסיית הזואופלנקטון לטיפול של 50% מי התפלה וטיפול ב-50% במים נטולי יונים (ביקורת של מיהול בלבד). נמצא שמיהול המים לא הביא לירידה מיידי בקצבי פעילות החיידקים ההטרוטרופיים מעבר לאפקט המיהול עצמו. עם זאת, בעוד שבמי כנרת בלתי מהולים



נרשמה עליה בפעילות החיידקית לאחר שלושה ימי ניסוי, בבקבוקי המיהול נרשמה ירידה בפעילות לערכים של כ- 30% מהפעילות הראשונית, ירידה שלא הייתה תלויה בתווח המיהול.

להלן תוצאות האנליזה הגנטית של הרכב אוכלוסיות המיקרוביאלית שמקורן בכנרת וההשפעה של מי התפלה עליהן: ניכרת השפעה משמעותית על הרכב האוכלוסיות החיידקיות והאוקריוטיות בעקבות המיהול במי התפלה. מעקב אחר האוכלוסיות החיידקיות על ידי ריצוף הגן ל- S16 הריבזומלי מלמד שבעוד שמיהול במי הביקורת נטולי היונים השפיע באופן מינימלי על הרכב האוכלוסייה, מיהול במי התפלה גרם לתמורות הניכרות בירידה בתפוצה של מינים מסוימים ועליה בתפוצתם של אחרים (איור 89).

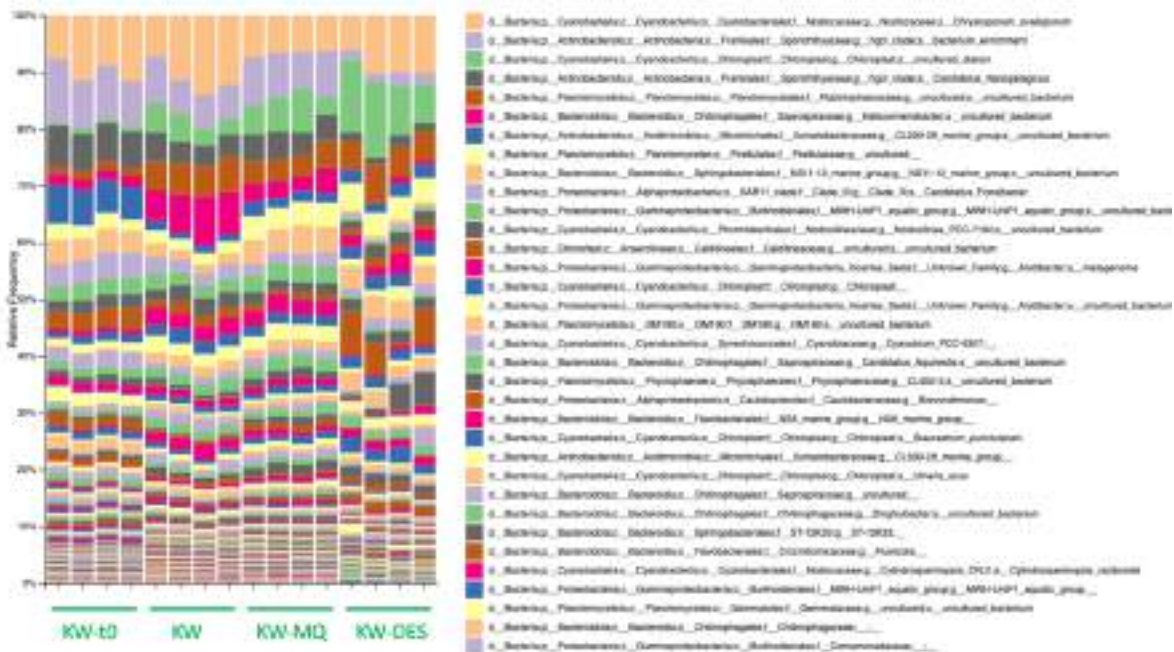
על מנת לאמוד את גודל השינוי באוכלוסיות נערכה אנליזה סטטיסטית של principal coordinate analysis (PCoA) בין קבוצות הניסוי השונות שהראתה בבירור שהאוכלוסיות החיידקיות בבקבוקי הניסוי של מי כנרת בלבד, או מי כנרת מהולים במים נטולי יונים קרובות מאוד בעוד שהאוכלוסייה בבקבוקים שנמהלו במי התפלה נבדלת מהן. האוכלוסיות האוקריוטיות נבחנו גם הן בשיטות דומות, על ידי ריצוף מתקדם של הגן ל- S18 הריבזומלי. בדומה לאוכלוסיות החיידקיות, גם האוכלוסיות האוקריוטיות מושפעות מהמיהול במי התפלה והדבר בא לידי ביטוי בירידה בתפוצה של מספר קבוצות טקסונומיות. משמעות ממצאים אלה היא שמיהול מי כנרת במי התפלה משפיע על ההרכב הביולוגי של המים ללא תלות במיהול עצמו, והדבר מצביע על כך שבמי ההתפלה קיימים רכיבים האחראים להשפעה זו, ואינם קיימים במים נטולי יונים ששמשו כביקורת.

#### ניסויים במערכת המזוקסם

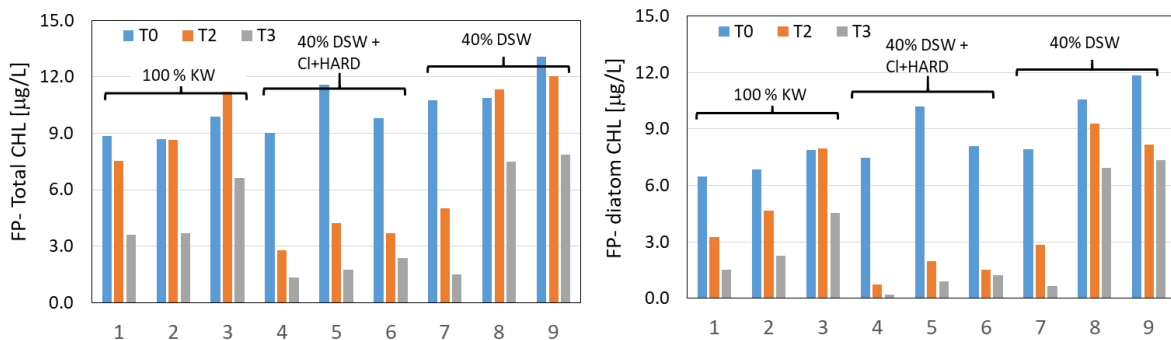
בניסויי שדה במערכת המזוקסם נבחנה ההשפעה של מיהול מי כנרת במים מותפלים לפני ואחרי הכלרה והקשיה. בניסוי זה נבחנה ההשפעה האפשרית של תוספת מי התפלה מוכלרים על המערכת האקולוגית של הכנרת חזת על מנת לחזק את הממצאים מניסוי קודם (שבחן מים מותפלים לאחר התפלה מול מים חסרי יונים) שהצביעו על אפשרות זו.

כתוצאה מערבוב מי כנרת עם מים מותפלים (יחס מיהול של 60:40) נצפו שינויים קלים בריכוז צורוני חנקן אנאורגניים ובזרחן כללי בין מי כנרת לבין תערובות עם מי התפלה, יומיים ושלושה ימים לאחר העמדת מערכת המזוקסם. לא נצפה שוני ברור בין תערובות מי ההתפלה השונות.

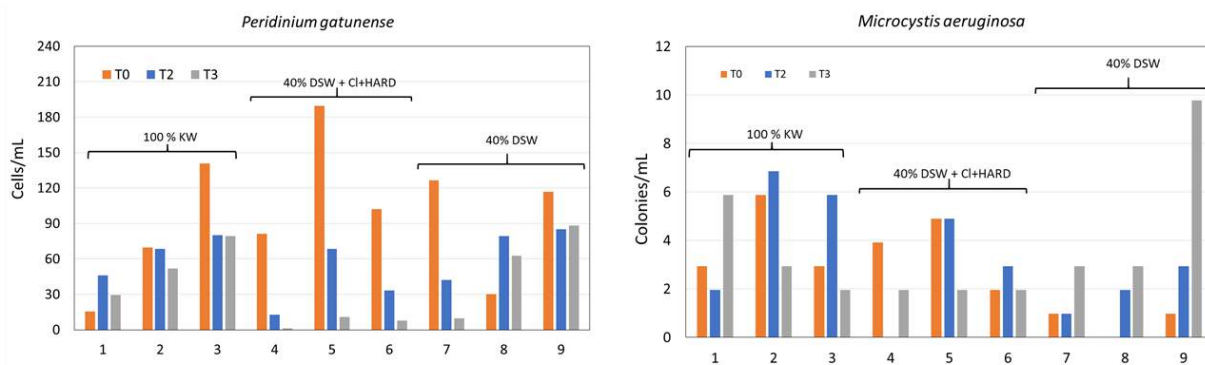
למיהול מי כנרת במי התפלה לאחר הכלרה והקשיה השפעה ברורה על אוכלוסיות הפיטופלנקטון. השפעה זו באה לידי ביטוי בריכוז הכלורופיל (איור 90) והרכב אוכלוסיות הפיטופלנקטון (איור 91). זיהוי מרכיבי הפיטופלנקטון על פי הרכב הפיגמנטים שלהם הראה שבמי הכנרת נוכחות גבוהה יחסית של אצות מקבוצת הצורניות והדינופלגלטים. נמצא שאוכלוסיות אלו (בעיקר דינופלגלטים) רגישות למי התפלה שעברו הכלרה והקשיה (איור 91). נמדדה פגיעה חריפה בריכוזי הפרידיניום בשקים בהם מי הכנרת נמהלו במי התפלה לאחר כלורינציה והקשיה. לעומת זאת, למיהול במי התפלה ללא כלורינציה הייתה השפעה מתונה על ריכוז תאי הפרידיניום.



**איור 89:** הרכב האוכלוסייה החיידקית במי כנרת (KW-t0) עובר שינויים מינימליים לאחר שלושה ימי אינקובציה ללא מיהול (KW) או עם מיהול במי קולונה נטולי יונים (KW-MQ). מיהול במי התפלה (KW-DES) גורם לשינויים גדולים יותר בהרכב האוכלוסייה. התוצאות מובאות כתפוצה יחסית של מינים שהתגלו בריצוף מתקדם של הגן ל- S16 הריבזומלי.



**איור 90:** ריכוז כלורופיל כללי (משמאל) וכלורופיל שמקורו בצורניות ודינופלגלטים (מימין) על פי מדידות פלורוסנציה עם מערכת רב-ערוצית FP. המדידות בוצעו בשקים השונים שהודגרו במערכת המזוקוסם: 1-3, ביקורת מי כנרת בלבד, 4-6 מי כנרת מהולים עם מי התפלה בתוספת כלור והקשיה, 7-9 מי כנרת מהולים במי התפלה ללא טיפול. מדידות נערכו בתחילת הניסוי T0 ולאחר יומיים T2 ושלושה ימים T3.



**איור 91:** ריכוז תאי פרידיניום ומושבות של מיקרוציסטיס מהמין *M. aeruginosa* במהלך הניסוי. המדידות בוצעו בשקים שהודגרו במערכת המזוקוסם: 1-3, ביקורת מי כנרת בלבד, 4-6 מי כנרת מהולים עם מי התפלה בתוספת כלור והקשיה, 7-9 מי כנרת מהולים במי התפלה ללא טיפול. מדידות נערכו בתחילת הניסוי T0 ולאחר יומיים T2 ושלושה ימים T3.



## 3.3 גנים פונקציונאליים ודינמיקת תהליכי חמצון-חיזור בכמוקלינה הפלאגית של אגם כנרת



במימון  
ISF

ורנר אקרט, עודד ברגמן, בני סולימני, זהר פריימן, שירה ניניו

- היווצרות האוקסיקלינה מאופיינת בגרדיינטים תלולים של מתאן וסולפיד.
- במהלך השיכוב בקיץ, העלייה בריכוז הניטראט מעל הכמוקלינה, מעידה על תהליכי ניטריפיקציה מתמשכים.

### מטרת המחקר

המטרה העיקרית של המחקר היא זיהוי פעילות מטבולית בקרב האוכלוסיות המיקרוביאליות המורכבות בכמוקלינה הפלאגית של אגם הכנרת ולבחון את ההשפעה של מעבר מתנאים אוקסיים לאנוקסיים על חיידקים ארופיליים.

מטרות המחקר הספציפיות הן:

- מעקב במרחב ובזמן אחר התפתחות הכמוקלינה הפלאגית של אגם הכנרת.
- אפיון וכימות גנים פונקציונאליים עיקריים של האוכלוסיות המיקרוביאליות בכמוקלינה הפלאגית של אגם הכנרת.
- אפיון וכימות גנים פונקציונאליים עיקריים של האוכלוסיה המיקרוביאלית (in vitro), בניסוי מזוקחם תחת תנאי חמצון חיזור מבוקרים ומעבר בניהם.

**רקע**

הכמוקלינה הפלאגית באגמים משוכבים טרמית, אשר מתווה את הגבול בין שכבות מים אוקסיות לאנוקסיות, מאופיינת בגרדיינטים כימיים חדים. התחרות אחר מקורות אנרגיה זמינות וכן אחר מקבלי אלקטרונים מתאימים, מובילה להיווצרות של שיכוב האוכלוסיות המיקרוביאליות ו/או של קבוצות חיידקים פונקציונאליות, בתוך אזור/שכבה צרה ומצומצמת. עם זאת, רצף האירועים והתהליכים הרגולטוריים אשר קובעים האם וכיצד מתרחשים שינויים בתנאים ההידרו-כימיים, אשר יכולים להוביל לתגובות סלולאריות, אינן מובנות.

בכדי לנטר את ההתפתחות במרחב ובזמן של הכמוקלינה הפלאגית בכנרת, אנו בוחנים במחקר את יחסי הגומלין בין פעילות מיקרוביאלית לבין שינויים בתהליכי חמצון-חיזור. מטרתנו היא לזהות ולאפיין את הפעילות המטבולית של האוכלוסיות המיקרוביאליות המורכבות, לאורך המעבר מתנאים אוקסיים לאנוקסיים ולבחון את ההשפעה של המעבר בין תנאים אלו, על חיידקים ארופיליים, כפונקציה של ריכוז מקבלי / מוסרי אלקטרונים וכן חדירת אור לעמודת המים. ההיפותזה שלנו היא כי שינויים בתנאי החמצון-חיזור בכמוקלינה הפלאגית, מקושרים לקבוצות גנים פונקציונאליים ספציפיים.

**שיטות**

בכדי לבחון היפותזה זו, אנו משלבים מעקב *in situ* וכן דיגום ברזולוציה גבוהה, אשר מתחמנים ומותאמים בהתאם לשכוב הכימי של עמודת המים בכנרת. השכוב הכימי של עמודת המים נטר באופן רציף (במחזורים של 5-6 שעות), על ידי דוגם פרופיל אוטונומי רציף, אשר הופעל מה Ecoraft – בנמצא במרכז האגם. בנוסף, השתמשנו במהלך הדיגומים במולטי-פרוב דיני, המצויד בסנסורים לעומק, סולפיד, פוטנציאל חמצון-חיזור (ORP), טמפ' (T), ערך הגבה (pH) וחמצן מומס (DO). בכדי לדגום את הכמוקלינה הפלאגית ברזולוציה גבוהה, השתמשנו ב - syringe sampler, אשר מכיל 16 מזרקים הדוגמים את עמודת המים במקביל, ברזולוציה של 10 ס"מ. פתיחות וסגירות חחרות ונשנות של המזרקים, באמצעות לחץ פנאומטי, בשילוב שסתומים חד כיווניים, אפשרה מילוי של שקיות הדיגום של 400 מ"ל מים. עומק הדיגום המדויק נקבע ע"י multiprobe, אשר חובר למעטפת ה - syringe sampler. מכל שקית דיגום, נלקחו 300 מ"ל לאנליזה מולקולארית של קבוצות גנים פונקציונאליים עיקריות. סינון מידי של המים בוצע בשטח (פילטרים 0.2 μm), באמצעות מערכת פילטרציה, הכוללת 16 משפכי סינון. 100 מ"ל נוספים מהדיגמה נלקחו למעבדה לקביעת ריכוזי מתאן (methane) מומס, באמצעות headspace analysis וכן עבור יונים עיקריים, באמצעות flow injection analysis. בכדי לזהות קבוצות גנים פונקציונאליים עיקריות, תחת תנאים מבוקרים, אנו מתכננים ניסוי mesocosm, בתנאי מעבדה. לצורך כך, נקים מערכת מים-סדימנט החשופה לשינויי חמצון-חיזור מלאכותיים. הפרמטרים הכימיים ינוטרו און-ליין באמצעות אלקטרודות כימיות ו - Membrane-Inlet Mass Spectroscopy MIMS.

**תוצאות ודיון**

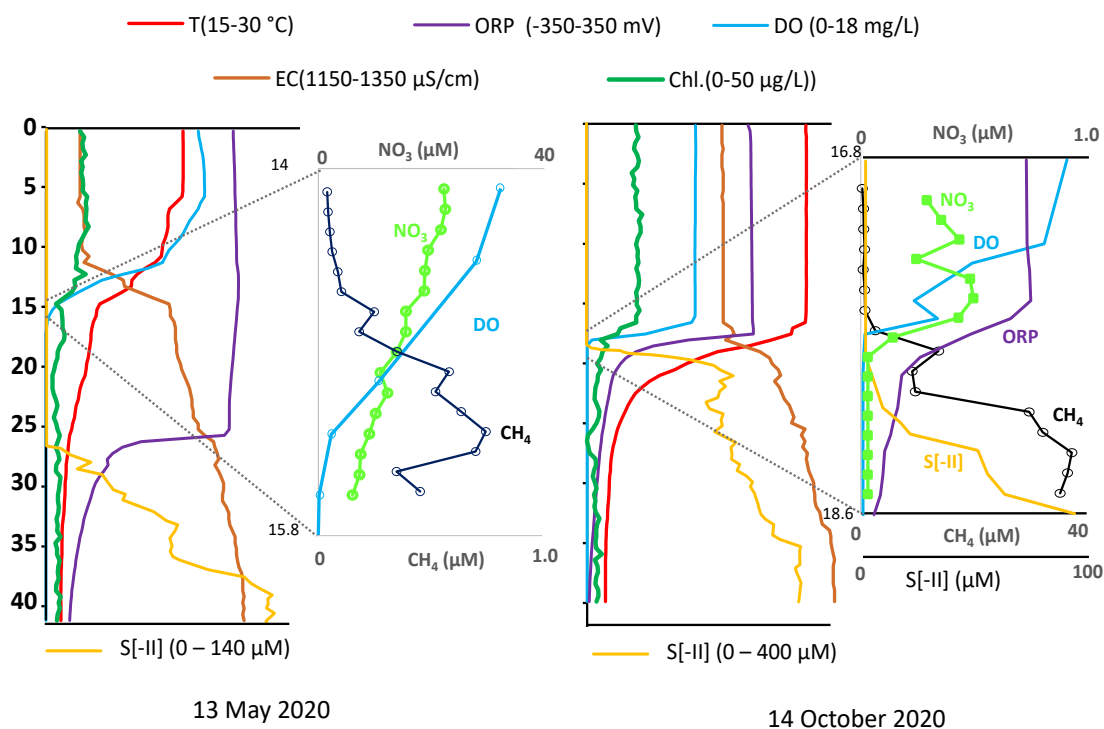
במהלך שנת 2020, המטרה העיקרית הייתה פריסה והפעלה של ה - syringe sampler במהלך תקופת השיכוב הכימי של עמודת המים. הדיגום החל לאחר שתהליך הניטור הראה אוקסיקלינה יציבה שהתפתחה בשכבת ה - metalimnion. החל מאמצע מאי ועד החצי הראשון של דצמבר ביצענו 11 דיגומים, שניים מהם מוצגים באיור 92.



החמצן בשכבת ה- hypolimnion התכלה ב- 13 למאי, מתחת לאוקסיקלינה (ב- 15.6 מטר), בעוד הסולפיד התכלה מתחת לעומק 27 מטר. דיגום האוקסיקלינה באמצעות ה- syringe sampler בוצע בין העומקים 14.2-15.6 מטרים. הפרופילים, אשר כאמור נדגמו ברזולוציה הגבוהה, עבור ניטראט ומתאן, העידו על תהליכי דניטריפיקציה וחמצון מתאן.

הפרופיל אשר נלקח במהלך חודש אוקטובר הראה כי הכמוקלינה התייצבה ב- 17.5 מטר, כך שהתקיימה הפרדה בין שכבת המים האוקסית ובין השכבה המועשרת בסולפיד ומתאן. הפרדה זו אופיינה בשינויי גרדיינטים חדים, כפי שאומת ע"י פרופיל הדיגום, בין 17-18.5 מטרים. יש לציין כי בפרופיל זה נצפתה עליה בריכוזי הניטראט מעל לכמוקלינה, דבר המעיד על תהליכי ניטריפיקציה מתמשכים.

בכדי לאפיין ולכמת גנים פונקציונאליים עיקריים של האוכלוסיה המיקרוביאלית בכמוקלינה, החלטנו להפיק סימולטנית את ה- DNA/RNA מהפילטרים. לצורך כך בוצעו ניסיונות רבים, עם מודיפיקציות, עבור מספר ערכות מסחריות וכן פרוטוקולים של הפקה ידנית. בחינת ריכוזי ואיכות ה- DNA/RNA שהתקבלו, העלתה כי הערכה Allprep dna/rna mini kit QIAGEN, נתנה את התוצאות הטובות ביותר. בנוסף, בדיקה מעמיקה ב- tapestation analysis העלתה כי האיכות והריכוזים שהתקבלו מתאימים לעבודה המולקולארית המתוכננת (qPCR ו- amplicon targeted next generation sequencing). בנוסף תכננו פריימרים המתאימים לשתי שיטות אלו, עבור כל הגנים פונקציונאליים שבכוונתנו לבדוק וכעת אנו נמצאים בתהליך הפקת ה- DNA/RNA מהפילטרים הרבים שנדגמו.



**איור 92:** השייכו הכימי של עמודת המים בכנרת, בתחנה A וההבדלים בגרדיינטים הכימיים של הכמוקלינה בין ה- 13 למאי וה- 14 לאוקטובר 2020.

## 3.4 השפעת המליחות בכנרת על התבססות מיקרואורגניזמים שמקורם באבק אטמוספירי השוקע באגם



בתמונה: ניסוי המזקוסם. צילום: שירה ניניו.

**במימון  
רשות  
המים**

**שירה ניניו, אסף סוקניק, ירון בארי-שליון, זהר פריימן,  
עכסה לופו**

- אנליזה גנטית של המיקרואורגניזמים המגיעים עם האבק מצביעה על הבדלים בהרכב האוכלוסיות לאורך השנה. עונת הקיץ בולטת במגוון מיני חיידקים רב יותר.
- זוהו כ 40 מיני כחוליות המגיעים עם האבק לאורך השנה, וחלקם אינם מוכרים בכנרת.
- נבחנה השפעתו של האבק על אוכלוסיות הכינרת בתנאי מליחות שונים בניסוי מזקוסם.

### רקע

בכל שנה מגיעים לכנרת כמה אלפי טונות של אבק אטמוספירי ממקורות שונים. אבק זה טומן בחובו פוטנציאל כימי וביולוגי המשפיע על המערכת האקולוגית של האגם.

האבק מספק לאגם נוטריינטים ויסודות קורט כמו גם מזרע של מיקרואורגניזמים, כגון אצות חד תאיות, חיידקים (כולל ציאנובקטריה) פטריות וחד-תאיים המוסעים לרוב כספורות, או תאי קיימא, שנובטים בסביבה המימית ועשויים להתפתח ולשגשג. לפיכך, יש חשיבות גדולה לאפיין את האבק המגיע לכנרת על מנת לאמוד את תרומתו למערכת האקולוגית, ולהעריך מה תהיה השפעתו על המערכת האקולוגית בהינתן שינויים עתידיים הצפויים בגורמים כגון: מליחות, התחממות אזורית/גלובלית, שימושי קרקע, רוחות, משטר המשקעים המקומי, שאיבות, והזרמה של מי התפלה אל האגם.

מחקר זה מתמקד בפוטנציאל ההשפעה של האבק על מרכיב חשוב במערכת האקולוגית של האגם: אוכלוסיות הפיטופלנקטון. זאת מתוך הבנה כי להשפעה על יצרנות ראשונית באגם ישנן השלכות מרחיקות לכת על המערכת האקולוגית בכללותה. המחקר משלב אספקטים ביולוגיים וגיאוכימיים בכדי לבחון סוגיה זו, תוך הבחנה בין אירועי אבק שונים המייצגים מקורות שונים. המחקר משלב ניטור ואפיון כימי-ביולוגי של אבק עם ניסויי מעבדה.

### **מטרות**

מטרת המחקר היא להעריך את הפוטנציאל של אורגניזמים ונוטריינטים מהאבק להשפיע על המערכת האקולוגית של הכנרת כתלות בשינויים הצפויים להתרחש במליחות, טמפרטורה ועומס נוטריינטים באגם וכתלות במאזן המים. המחקר בוחן כיצד עשוי אבק אטמוספירי השוקע בכנרת להשפיע על אוכלוסיית הפיטופלנקטון באגם בהיבט של פוטנציאל ההתבססות של מינים חדשים ויחסי גומלין עם אוכלוסיות מקומיות של פיטופלנקטון ובקטריופלנקטון כתלות במליחות ובגורמים סביבתיים נוספים.

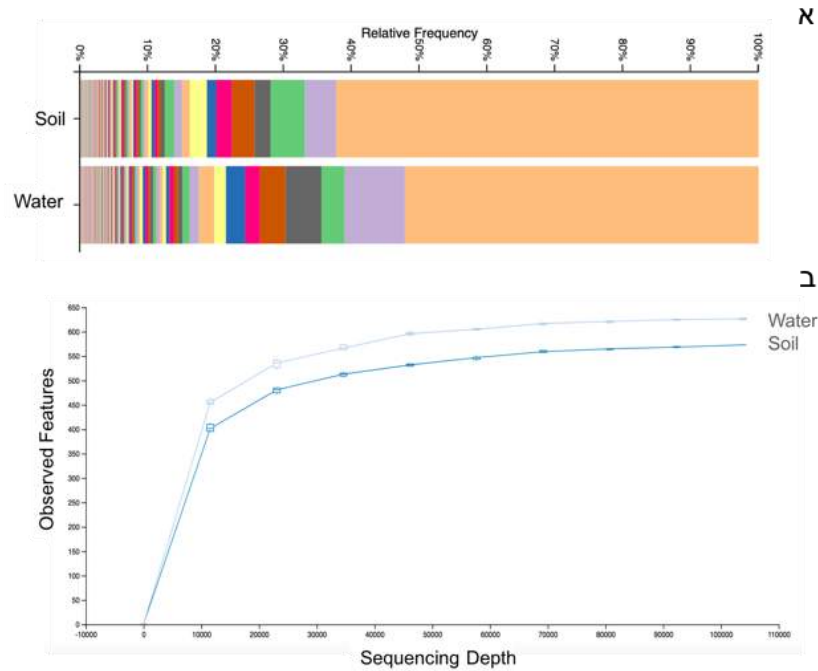
### **שיטות**

מערכת כפולה לדיגום פאסיבי של אבק אטמוספירי הוקמה על מרפסת בניין המעבדה. המערכת מורכבת מקערות נירוסטה שטוחות בקוטר של 40 ס"מ, בעלות פרופיל נמוך, המוצבות על גבי מעמד ייעודי מוגבה. בתוך הקערות נמצאות שכבות של גולות זכוכית מעוקרות שמטרתן לכלוא את האבק הנוחת באופן פאסיבי בקערות. קערה אחת משמשת לאיסוף חומר עבור אנליזה גנטית, והשנייה משמשת לאיסוף אבק יבש עבור ניסויי התבססות ואנליזה כימית.

### **תוצאות ודיון**

#### **בחינת שיטת מיצוי הדנ"א מאבק עבור ניתוח גנטי**

פילטרים עליהם נאסף אבק שימשו למיצוי החומר הגנטי בעזרת קיטים ייעודיים. נבדקו שני קיטים שונים, על מנת לבחון איזה סוג מיצוי מתאים יותר לאנליזה של אבק. הקיטים שנבחנו הם מחברת Qiagen האחד הוא Power water והשני Power soil, האחד נועד למיצוי דנ"א ממים מסוננים, והשני נועד למיצוי מקרקע. לשם השוואה בין הקיטים השתמשנו בפילטר מדוגמה אחת, אותו חצינו לשניים. מכל חצי מוצה דנ"א בעזרת שני הקיטים המסחריים. הדנ"א שמוצה מהפילטרים נשלח לריצוף מתקדם בחברה מסחרית המספקת שירות זה. הרצפים שהתקבלו עברו אנליזה לקביעת מגוון המינים והתפלגותם בכל דוגמה. נמצא שקיים דמיון בין התוצאות שהתקבלו בכל אחד מהקיטים שנבחנו (איור 93ב). עם זאת, ניכר כי בדוגמה שמוצתה בעזרת הקיט Power Water נמצא מספר גבוה יותר של גנוטיפים, ככל הנראה כתוצאה ממיצוי יותר יעיל של הדנ"א (איור 93א). לאור תוצאות אלה, הוחלט להשתמש בקיט Power Water בהמשך המחקר.

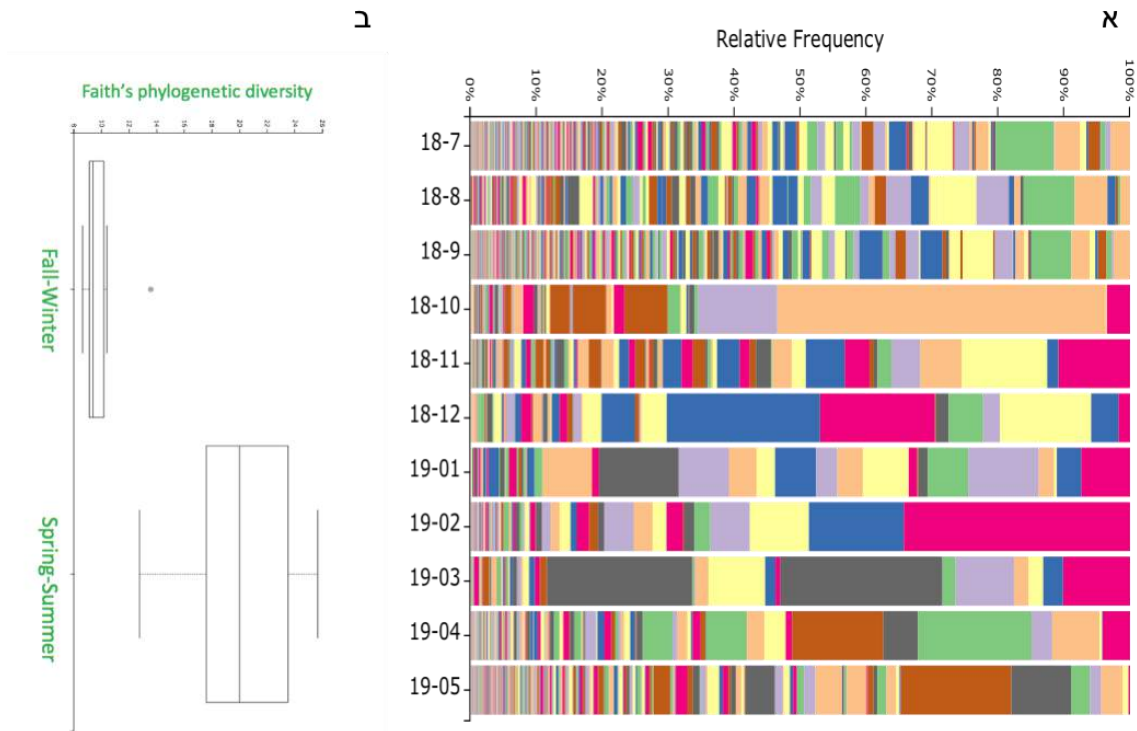


**איור 93:** השוואה בין שתי שיטות למיצוי הדנ"א מאבק. תוצאות ריצוף מתקדם של הגן לרנ"א ריבזומלי 16S שהופק משתי דגימות שמקורן באותו פילטר חצוי, האחת מוצתה בעזרת הקיט (Water) Power Water, והשנייה ב- Power Soil (Soil). א. מגוון המינים שנמצאו בדוגמאות ותפוצתם היחסית. ב. גרף rarefaction מציג את מספר הגנוטיפים בכל דוגמה כפונקציה של עומק הריצוף.

#### אנליזה גנטית של דוגמאות אבק

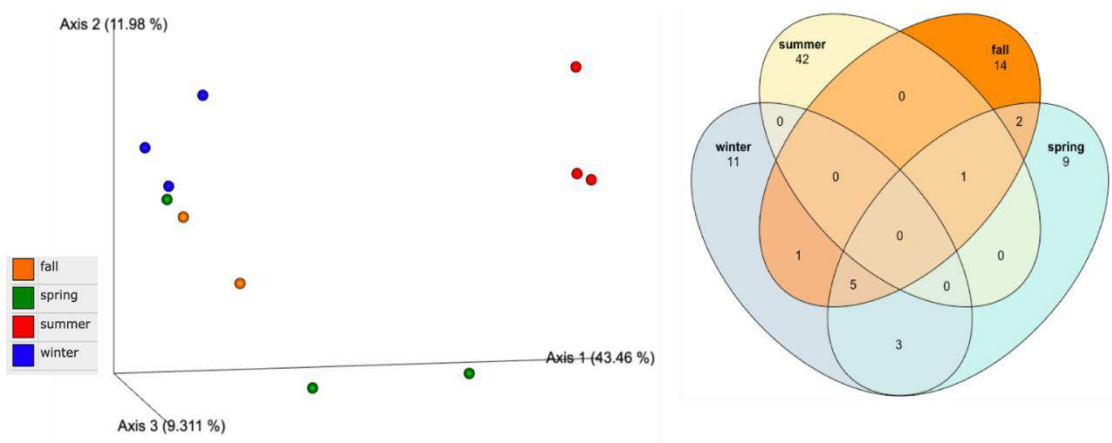
אוכלוסיות החיידקים בדגימות אבק שנאספו אחת לחודש לאורך שנה עברו אנליזה לקביעת הרכב אוכלוסיות החיידקים בעזרת ריצוף עמוק של הגן לרנ"א הריבזומלי 16S. נמצא שהרכב מיני החיידקים המגיעים עם האבק משתנה כתלות בחודש (איור 94א). בנוסף, מורכבות האוכלוסיות משתנה לאורך השנה כשבחודשים יולי-אוגוסט-ספטמבר קיים מגוון רב יותר של מינים מזה שנמצא בשאר חודשי השנה (איור 94א). השונות/מורכבות של כל דוגמה חושבה בעזרת מדד Faith's Phylogenetic Diversity ונמצא שהשונות של האוכלוסייה שהופקה מהאבק בחודשי האביב והקיץ גבוהה מהשונות שנמדדה בדוגמאות של חודשי הסתיו-חורף (איור 94ב).





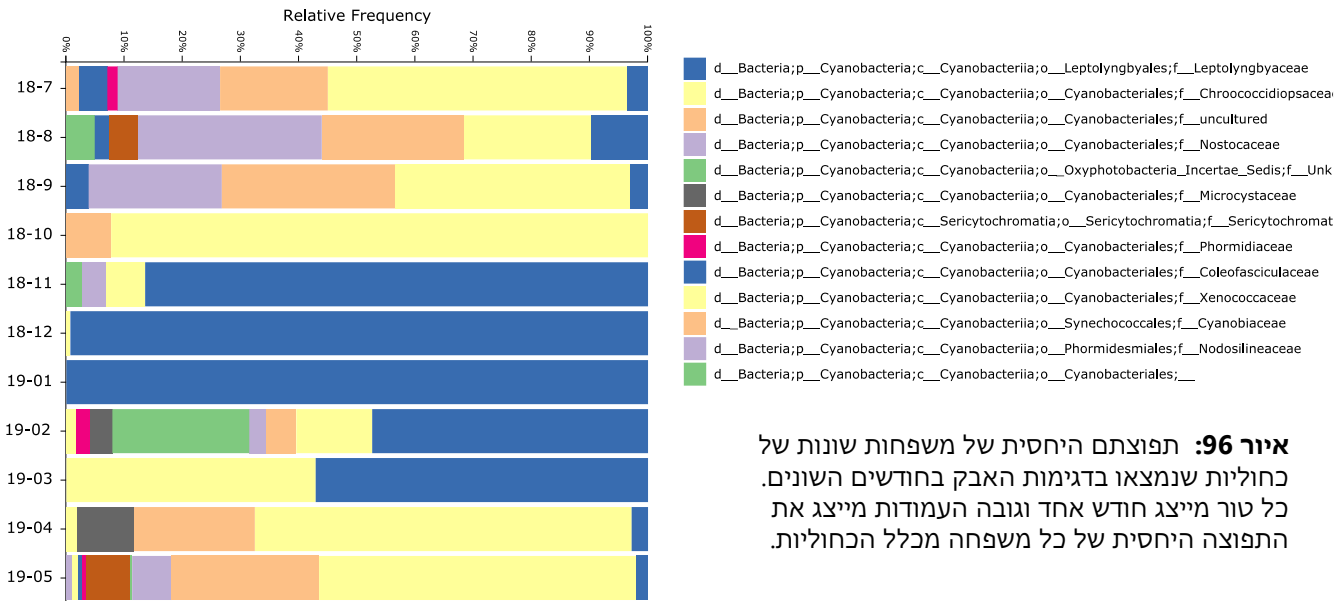
**איור 94:** מגוון ועושר מינים באוכלוסיית החיידקים המגיעים עם האבק לאורך השנה. דנ"א שהופק מאבק שנאסף חודשית עבר ריצוף מתקדם של הגן לרנ"א ריבזומלי 16S לקביעת אוכלוסיית החיידקים המיוצגת בדוגמה. א. מגוון המינים שהתקבלו בכל דוגמת אבק, ותפוצתם היחסית. ב. אנליזת Boxplot של שונות האוכלוסייה החיידקית לפי מדד Faith's Phylogenetic Diversity בין דוגמאות שנאספו באביב-קיץ לבין אלה שנאספו בסתיו-חורף. ההבדל בין שתי הקבוצות נמצא כמובהק בעזרת המבחן הסטטיסטי Kruskal-Wallis  $p < 0.05$ .

גם בדיקה של המינים הייחודיים לכל עונה מעלה שעונת הקיץ יוצאת דופן במספר המינים השונים המייחדים אותה ולא מופיעים בעונות אחרות – 42 מיני חיידקים ייחודיים (איור 95). ניתוח סטטיסטי של השונות בין האוכלוסיות בשיטת ה- Principal coordinate analysis מצביע גם הוא על אוכלוסיות האבק של הקיץ כשונות מייתר אוכלוסיות האבק (איור 95).

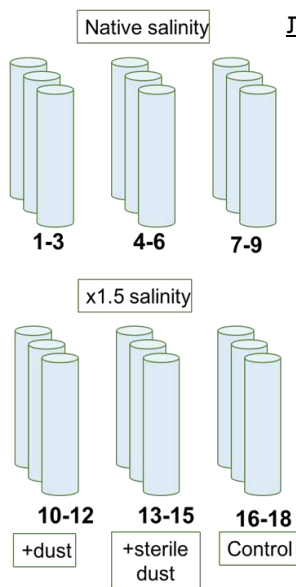


**איור 95:** שונות ודמיון בין האוכלוסיות החיידקיות באבק. דיאגרמת ון (Venn) של המינים הייחודיים המגיעים עם האבק בעונות השונות (פאנל ימין). ניתוח סטטיסטי Principle coordinate analysis של השונות בין האוכלוסיות החיידקיות באבק בחודשים השונים (פאנל שמאל). כל נקודה מהווה אוכלוסייה שנמצאה בחודש מסוים והנקודות צבועות על פי העונה לפי המקרא בצד שמאל.

שיטת הריצוף בה השתמשנו מאפשרת קלסיפיקציה טקסונומית של המינים המגיעים עם האבק, ותשומת לב מיוחדת ניתנה למערכה של הכחוליות להן ישנו פוטנציאל להתבסס ולהשפיע על מאזן המינים באזור הפוטי באגם. בסך הכל זיהינו כ- 40 גנוטיפים שונים של כחוליות המגיעים עם האבק, אותן ניתן לסווג ל- 12 משפחות שונות. רשימת המשפחות ותפוצתם היחסית באבק שנאסף בחודשים שונים מופיעה באיור 96. ניכר שבחודשי החורף המשפחה העיקרית שמופיעה בדגימות האבק היא *Leptolyngyaceae* ואילו בחודשי הקיץ קיים ייצוג של משפחות רבות יותר. השוואה של מיני הכחוליות באבק עם מינים שנמצאים באגם יכולה להביא לזיהוי מינים שמגיעים עם האבק מאזורים אחרים אולם אינם מתבססים באגם בתנאים הנוכחיים השוררים בו. מינים אלו הם בעלי פוטנציאל להשפיע על האקולוגיה של האגם אם וכאשר יחולו שינויים במליחות או שינויים סביבתיים אחרים שיאפשרו את התבססותם.



**איור 96:** תפוצתם היחסית של משפחות שונות של כחוליות שנמצאו בדגימות האבק בחודשים השונים. כל טור מייצג חודש אחד וגובה העמודות מייצג את התפוצה היחסית של כל משפחה מכלל הכחוליות.

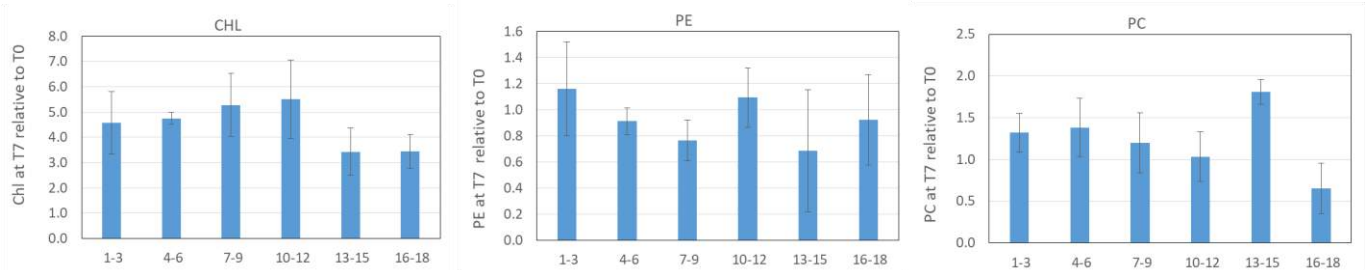


**איור 97:** תצוגה סכמתית של ניסוי המזקוסם.

ניסוי מזקוסם לבחינת השפעת האבק על הביטה של האגם כתלות במליחות

הניסוי בוצע במערכת המזקוסם שנבנתה סמוך לכנרת ומבוססת על שתי בריכות איקלום הניזונות ברציפות במי כנרת ובהן שקי פלסטיק בנפח של כ- 50 ליטר כל אחד, 9 שקים בכל בריכה (18 סה"כ). השקים מולאו במי כנרת עם או בלי תוספת מלח להעלאת המליחות (נתרון) פי 1.5. בשני תנאי המליחות נבחנו שלושה מצבים – עם תוספת אבק, עם תוספת אבק מעוקר וללא תוספת אבק. כל אחד מהמצבים נבחן עם שלוש חזרות ביולוגיות (איור 97).

המערכת הועמדה לתקופה קצרה של 7 ימים שבמהלכם נבדקו מדדים שונים למעקב אחר אוכלוסיות הפלנקטון והבקטריופלנקטון שמקורם בכנרת ובאבק, ואחר שינויים פסיכוכימיים במים. הרכב וריכח הפיגמנטים בשקי הניסוי נבדקו באופן עקיף על ידי מדידות פלואורסנציה בדגימות שעורערו באור באורכי גל מוגדרים: 450 nm עבור כלורופיל (CHL), 560 nm עבור פיקואריתרין (PE) ו 620 nm עבור פיקוציאנין (PC). מדידות בוצעו בתדירות יומית במהלך הניסוי והתוצאות מוצגות באיור 98.



**איור 98:** שינוי יחסי בריכח הפיגמנטים העיקריים כתלות בתנאי הניסוי השונים. ערכים מייצגים את השינוי היחסי ב-T7 לעומת T0. מדידות בוצעו בעזרת שלושה סנסורים אופטיים מסוג Cyclops-7F Submersible Sensors מתוצרת Turner Designs, Inc. הסנסורים מאפשרים זיהוי וכימות של כלורופיל CHL, פיקוציאנין PC ופיקואריתרין PE. העמודות באיורים מייצגות את השינוי היחסי בריכח הפיגמנטים (ממוצע וסטית תקן, 3 חזרות) עבור כל אחד מהמשתנים שנבחנו (1-3, 4-6, 7-9, 10-12, 13-15, 16-19, פרטים בסכמת הניסוי).

ככלל, ריכח הכלורופיל בכל הטיפולים גדל בין פי 3.5 (שקים 13-15 ו 16-18) לפי 5.5 (שקים 10-12). תוספת של נתון (ללא אבק שקים 16-18) ועם אבק מעוקר (שקים 12-15) הגבילה את התפתחות אוכלוסיות הפיטופלנקטון. גידול מירבי (ריכח הכלורופיל עלה פי 5.5 בין T0 ל T7) נמדד בשקים בהם ריכח הנתון היה גבוה פי 1.5 וניתנה תוספת של אבק. עליה דומה בריכח הכלורופיל במהלך הניסוי נמדדה גם בשקים בהם לא שונתה מליחות מי הכנרת עם ובלי תוספת אבק. ההבדלים בין הטיפולים האלו לא נמצאו מובהקים סטטיסטית בשל הבדלים גדולים בין השקים של אותו טיפול (איור 98). הערכה של השינויים בריכח אוכלוסיות הציאנובקטריה לאורך תקופת הניסוי שבוצעה על ידי מדידת ריכח הפיגמנטים האופייניים (PE ו-PC) מצביעה על יציבות יחסית של אוכלוסייה זו. השינוי בריכח ה-PC הוא בטווח של עשרות אחוזים (תוספת שבין 5 ל-75 אחוז בטיפולים 1-3, 4-6, 7-9, 10-12, 13-15 ופחיתה בשיעור של 35% בטיפול 16-19). השינוי שנמדד בין T0 ל- T7 בריכח הפיקואריתרין (PE) הוא מצומצם יותר ובמגמת פחיתה (איור 98). מתוצאות אלו עולה שתנאי הניסוי במזוקסם עכבו את התפתחות אוכלוסיית הציאנובקטריה ותמכו בגדילה של אוכלוסיות של ירוקיות צורניות ואצות מקבוצות נוספות. בהמשך המחקר, יעובדו תוצאות נוספות מניסוי זה ויערכו ניסויים נוספים לבחינת פוטנציאל ההתבססות של תבדידי פיטופלנקטון מן האבק כתלות במליחות. בנוסף, תיבחן השפעתם של חיידקים מן האבק על פיטופלנקטון מאגם הכנרת בתנאי מליחות שונים.

## 3.5 פיתוח אינדיקטורים מיקרוביאליים להערכת איכות מים ומצב טרופי של מערכות מים טבעיות – הכנת כמודל



במימון  
רשות  
המים

שירה ניניו, אסף סוקניק, נחמה רושנסקי, עכסה לופו, זהר פריימן

- איסוף חומר גנטי וריצופו אפשרו ניתוח מעמיק של אוכלוסיית החיידקים הפוטוטרופיים המרכיבה את הפריחה המטלימנטית הקייצית באגם.
- נמצא שמרבית הפריחה מורכבת מחמישה מיני *Chlorobia* ושהתפלגותם לאורך עמודת המים תואמת את ריכוזו של החמצן המומס.

## רקע

הכנת כגוף מים עילי, נתונה להשפעות סביבתיות מגוונות, חלקן טבעיות אך רובן קשורות לפעילות אנושית אזורית או גלובלית. יציבות המערכת האקולוגית של הכנת ותגובתה למגוון גורמים מאלצים הינה בעלת משמעות רבה למשק המים הרואה בכנת מאגר מים חשוב גם בעידן הנוכחי של התפלת מי ים. מערכת הניטור הביולוגי בכנת שמה דגש, לאורך שנים, על אוכלוסיות הפיטופלנקטון בעוד המעקב אחר תמורות באוכלוסיות החיידקים היה מוגבל ומצומצם בהיקפו בעיקר בגלל היעדר כלים אנליטיים מתאימים. מטרת מחקר זה היא לפתח וליישם כלים חדשים למעקב אחר מבנה האוכלוסיות המיקרוביאליות (micro-biome) במערכת האקולוגית של הכנת תוך שימוש בטכנולוגיה קיימת של ריצוף גנטי מתקדם. בעזרת הגישה המוצעת מתגלה בפנינו חוליה חשובה שרמת הידע עליה מוגבלת אך מהווה רכיב חשוב במערכת של הכנת כמו גם במערכות אקווטיות אחרות. המחקר פותח צוהר להבנת התפקוד של מיקרואורגניזמים במחזור נוטרייטיים בפירוק חומרים אורגנים ובתגובתם לשינויים סביבתיים טבעיים או מאלצים. הנחה בסיסית של המחקר היא שמיקרואורגניזמים רגישים מאוד לסביבתם ועשויים להגיב לשינויים במערכת האקולוגית, לפני ששינויים אלה באים לידי ביטוי במדדים ביו-גיאוכימיים מקובלים. מטרתנו היא לספק כלים מתקדמים למעקב אחר המיקרואורגניזמים באגם הכינרת.

## מטרות

פיתוח כלים חדשים למעקב אחר מבנה אוכלוסיות המיקרוביאליות (micro-biome) במערכת האקולוגית של אגם הכנת תוך שימוש בטכנולוגיה קיימת של ריצוף גנטי מתקדם.

## שיטות

לצורך האנליזה נדגמות אוכלוסיות חיידקיות בכנת דיגום מרחבי, אנכי ועונתי. מן הדגימות מופק חומר גנטי המשמש לאנליזה גנטית בשיטות של ריצוף מתקדם לקבלת רצפי הגנים ל רנ"א ריבוסומלי 16S הקיימים בדוגמה ומייצגים את מיני החיידקים השונים ואת הכמות היחסית שלהם. תוצאות הריצוף עוברות עיבוד בעזרת תוכנת QIIME2 וניתוח סטטיסטי בעזרת שפת התכנות R על מנת לבחון את השוני בין האוכלוסיות בהיבט של מגוון ביולוגי ושינויים במבנה אוכלוסיית החיידקים בזמן ובמרחב ותגובתן לשינויים באגם.

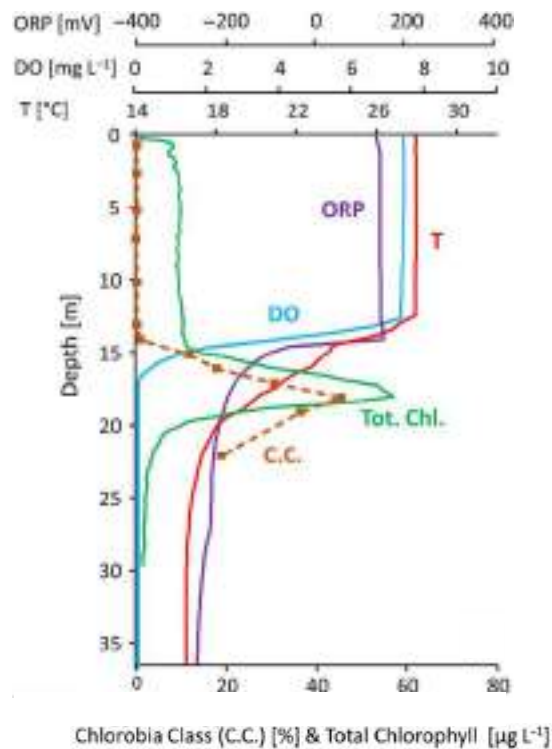
## תוצאות ודין

### אפיון פריחת חיידקים מהמחלקה *Chlorobia*

במהלך חודשי הקיץ מתפתחת בכנת אוכלוסיית חיידקים פוטוסינתטיים בשכבת המטאלימניון. על מנת לאפיין את אוכלוסיית החיידקים המרכיבים פריחה זו, נדגמו מים במספר עומקים שונים בתחנה A. דגימות המים סוננו, ומעקב לזיהוי שונות גנטית באוכלוסיית הכלורוביום בוצע בעזרת ריצוף מתקדם של גן ה- 16s הריבזומלי על פי הפרוטוקול שפותח בשלבי הפרויקט הקודמים. כפי שדווח בעבר, הרצפים שהתקבלו סוננו על פי שיוכם הפילוגנטי למערכת *Chlorobi*, ונמצא שריכחם היחסי במטאלימניון מאוד גבוה. במסגרת פרויקט זה מינפנו את כוחה של שיטת הריצוף וביצענו אנליזה מעמיקה של האוכלוסייה שאינו תלוי בזיהוי מורפולוגי. התוצאות סוכמו לכדי מאמר שפורסם בספרות המקצועית<sup>3</sup> וממצאים עיקריים ממנו

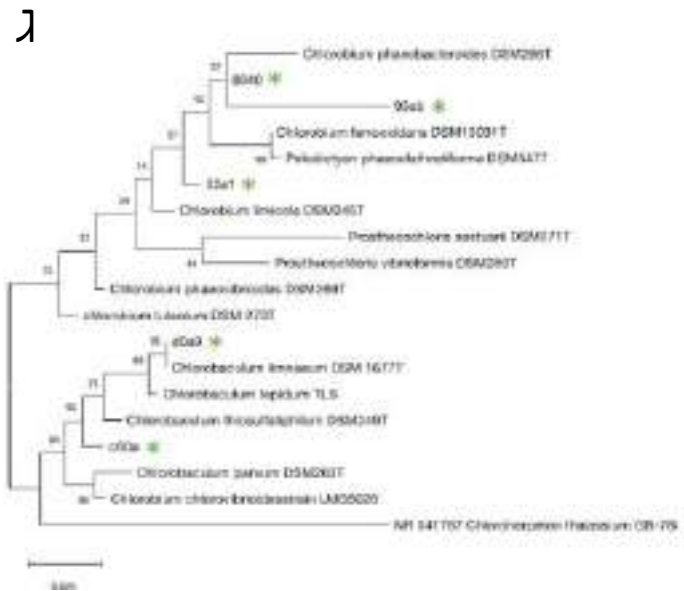
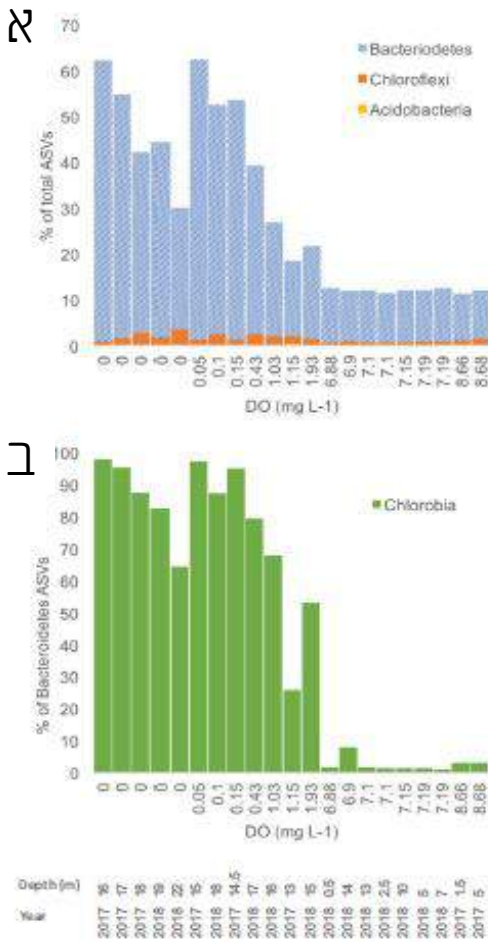
3 Ninio, S, Lupu, A, Eckert, W, Ostrovsky, I, Viner Mozzini, Y, Sukenik, A. Metalimnetic chlorophyll maxima in Lake Kinneret - Chlorobium revisited. Freshwater Biology. 2021; 66: 468– 480.

מובאים בדוח זה. התוצאות מראות שהתפלגותם האנכית של המינים מהמחלקה *Chlorobia* תואמת להתפלגות הכלורופיל שנמדד בעמודת המים באותו היום (איור 99).



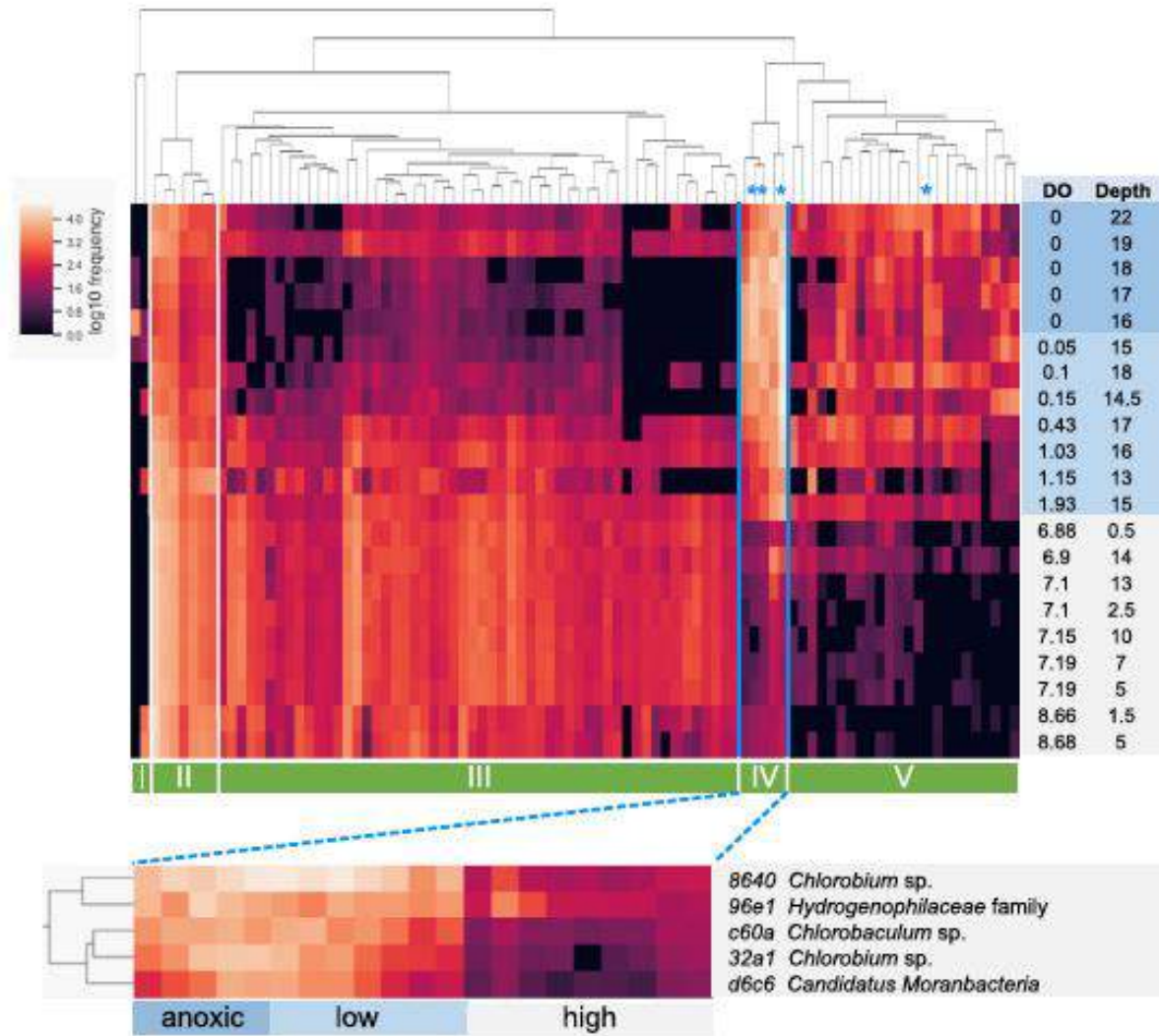
**איור 99:** תפוצת הרצפים השייכים למערכת *Chlorobia* בעמודת המים תואמת את ריכוז הכלורופיל (Tot. Chl.) שנמדד במהלך הדיגום בעזרת הפלואורוב. עבור כל דגימה מוצג אחוז הרצפים ששייך למחלקה *Chlorobia* מתוך כלל רצפי החיידקים שהתקבלו בדוגמה (C.C.). בנוסף, מוצגת הטמפרטורה (T) כמו גם ריכוזו של החמצן המומס (DO) ופוטנציאל החימצון/חיזור (ORP) בעמודת המים.

אפיון גנטי מטבעו רגיש מאוד, ומאפשר זיהוי וכימות בו זמנית של מינים רבים המרכיבים את חברת (community) החיידקים כולה כולל סוגים ומינים שלהם תפוצה גבוהה ומהווים את ה- "פריחה" כמו גם מינים נלווים שתפוצתם נמוכה יותר. בגישה זו ניתן לראות שמבין כל המערכות החיידקיות בהן ידוע כי קיימים חיידקים פוטוטרופיים, המערכה העיקרית המיוצגת בפריחה המטלימנטית הקייצית באגם הינה המערכת *Bacteroidetes* (איור 100א). ניתוח של הרכב האוכלוסייה במערכת זו מראה שעיקר המינים המרכיבים אותה באזורים בעלי ריכוז חמצן נמוך הינם מינים מן המחלקה *Chlorobia* (איור 100ב). הפריחה מורכבת מחמישה מינים עיקריים של *Chlorobia* אותם ניתן לשייך למספר ענפים פילוגנטיים שונים, על פי ניתוח עץ אבולוציוני (איור 100ג).



**איור 100:** ניתוח טקסונומי של המינים המרכיבים את הפרחה. א. תפוצתם היחסית של מינים השייכים לאחת משלוש המערכות החיידקיות בהן קיימים חיידקים פוטורופיים. ב. אחוז המינים השייכים למחלקה *Chlorobia* מתוך המערכה *Bacteroidetes*. דוגמאות מסודרות על פי ריכוז החמצן המומס (DO). ג. עץ פילוגנטי עם מיני ה-*Chlorobia* שנמצאו בפרחה (כוכבית), יחד עם מינים מהספרות בעלי טקסונומיה ידועה.

ניתוח של כל אוכלוסיית החיידקים בדוגמאות השונות כתלות בריכוז החמצן המומס מביא לאפיונם של חמש קבוצות (קלאסטרים) של חיידקים (איור 101). קלאסטרים IV מתאפיין במינים שתפוצתם גבוהה בריכוז חמצן נמוכים עד אפסיים, וקלאסטרים זה מכיל את רוב מיני ה-*Chlorobia* המרכיבים את הפרחה.



**איור 101:** מפת חום של התדירות היחסית של מיני החיידקים שנמצאו לאורך עמודת המים בזמן פריחת ה-*Chlorobia*. כל שורה מייצגת דוגמת מים אחרת, והדוגמאות מסודרות על פי ריכוז החמצן המומס (DO). כל טור מייצג מין אחר של חיידקים, ומיני ה-*Chlorobia* מצוינים בכוכבית. הגוון מייצג את התפוצה היחסית של כל מין על פי סרגל הצבע שמשמאל. המינים מקובצים בשיטה הסטטיסטית של hierarchical clustering לחמישה קלאסטרים על פי התפלגותם בין הדוגמא



## 3.6 אקולוגיה מולקולרית של החיידק הפתוגני ליגיונלה באגם הכנרת



במימון  
הקרן  
הלאומית  
למדע

שירה ניניו, עודד ברגמן

- נמצא הבדל מובהק בעושר אוכלוסיית הליגיונלה בין תקופת שונות בשנה.
- השונות והמגוון הגבוהים ביותר נמצאו בתקופת הקיץ.
- לא נמצאה תלות בין שונות מיני הליגיונלה לבין עומק נקודת הדיגום.

### מטרות

מיפוי והגדרת בתי הגידול של חיידק הליגיונלה באגם הכנרת, ואפיון מולקולרי ופיזיולוגי של המינים השונים המצויים באגם.

### רקע

חיידק הליגיונלה הוא חיידק נפוץ מאוד במערכות מים מתוקים, ומצוי הן במערכות מלאכותיות והן בטבעיות. חשיפה לנתז של מים המכילים חיידקי ליגיונלה יכולה להוביל למחלת ריאות חמורה. חיידק הליגיונלה יכול לשרוד בתווך רחב של תנאים סביבתיים, ומצוי בביופילם, כפלנקטון וגם כטפיל של פרוטוזואות ממינים שונים.

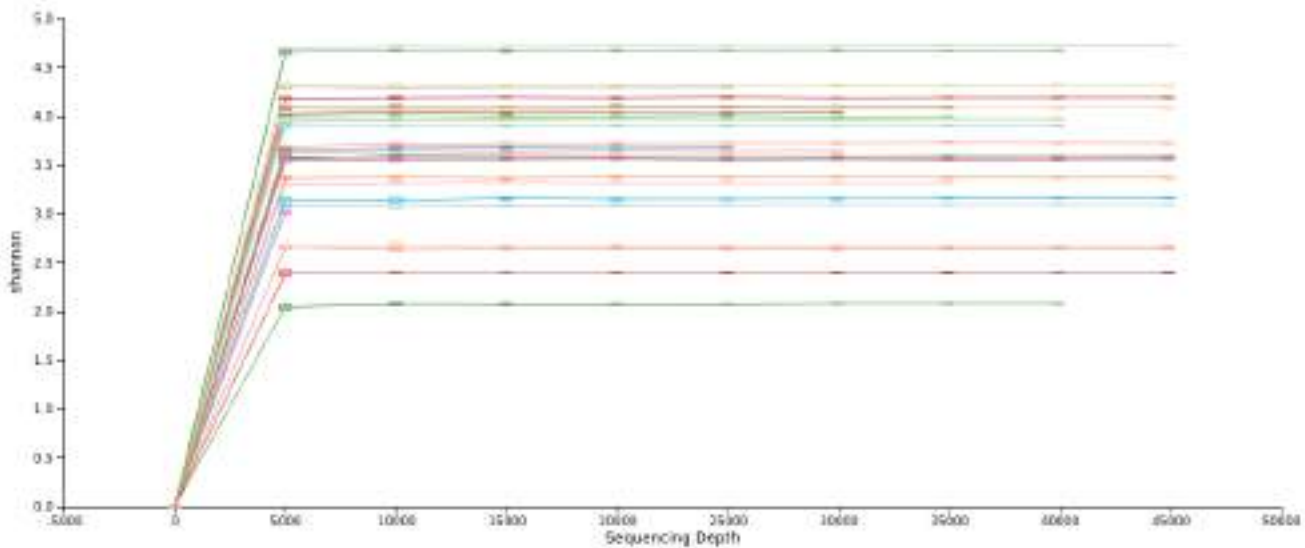
תוצאות ראשוניות מצביעות על קיומם של מספר מיני ליגיונלה באגם הכנרת, ביניהם כאלה הידועים כגורמי מחלה. במחקר זה ממופת הימצאות חיידק הליגיונלה בבתי הגידול המגוונים של האגם, מוגדר המיקרוביום של בתי הגידול השונים ונבחנת ההשפעה של תנאי הסביבה על הפיזיולוגיה של החיידק והאינטראקציה שלו עם אורגניזמים אחרים הנמצאים בסביבתו. המחקר צפוי לקדם את זיהויים של תהליכים אקולוגיים העשויים לתרום להתפתחות אבולוציונית של זני חיידקים סביבתיים בעלי פוטנציאל לגרימת מחלה באדם.

### שיטות

אפיון מגוון המינים של הליגיונלה באגם ובדיקת תפוצתם היחסית בוצעו על ידי בידוד חומצות הגרעין מדגימות מים וריצוף מתקדם של רצף ייחודי לסוג ליגיונלה מתוך הגן ל-16S ריבזומלי. האנליזה של תוצאות הריצוף הגולמיות התבצעה בעזרת התוכנה QIIME2 וניתוח סטטיסטי בעזרת שפת התכנות R.

### תוצאות ודין

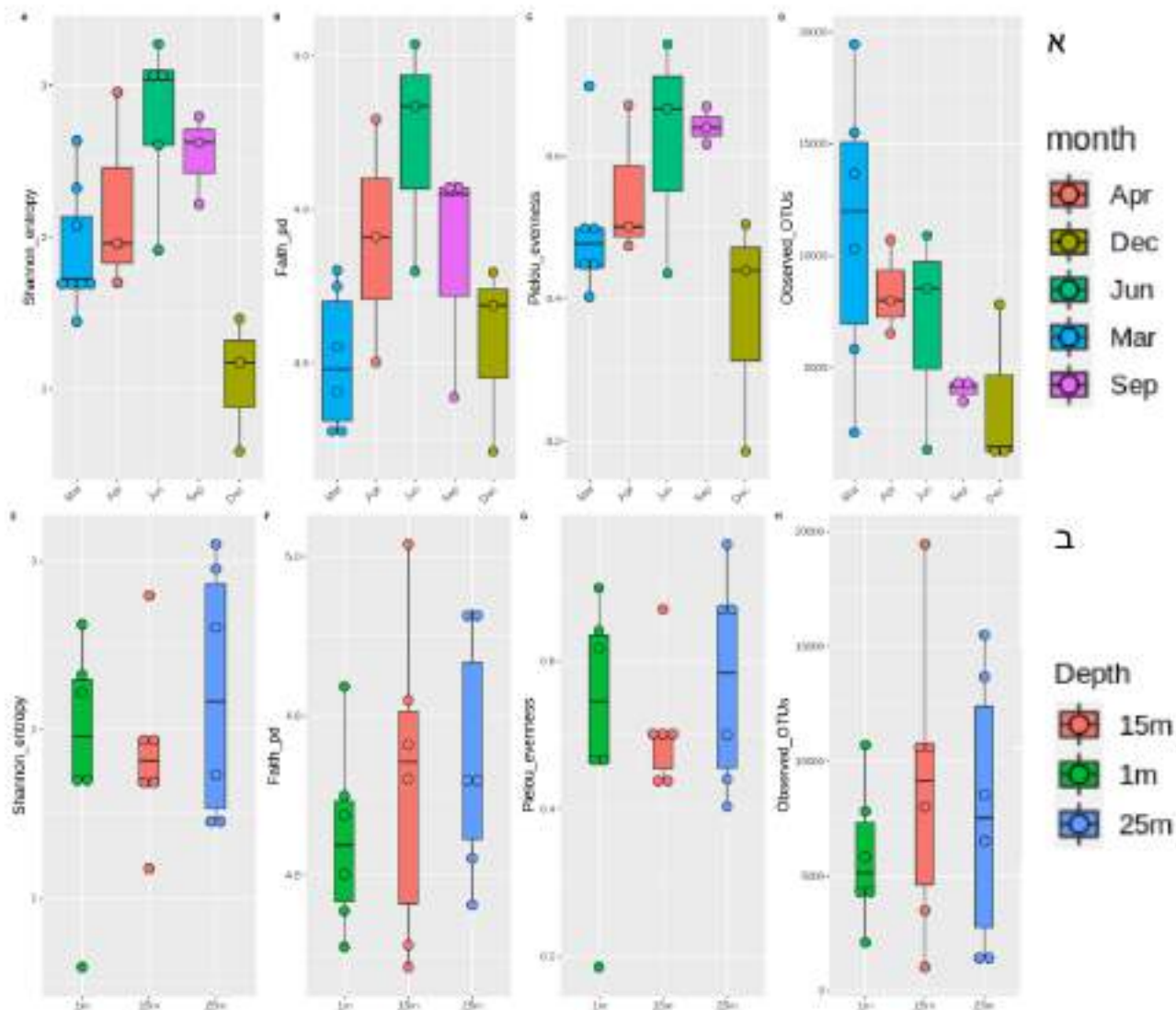
תפוצתם של מיני חיידקים מן הסוג *Legionella* נבחנה לאורך זמן ובעומקים שונים באגם הכנרת. דגימות מים נלקחו אחת לעונה ומכל הדגימות בוצעה הפקה של חומצות הגרעין, לצורך ביצוע אנליזה גנטית לקביעת הרכב המינים של חיידקי הליגיונלה. ראשית נבחן עומק הריצוף יחסית לשונות המינים על ידי חישוב ה- rarefaction ונמצא שעומק הריצוף בהחלט מספיק על מנת לתת תמונה מהימנה על עושר מיני הליגיונלה בדגימות (איור 102).



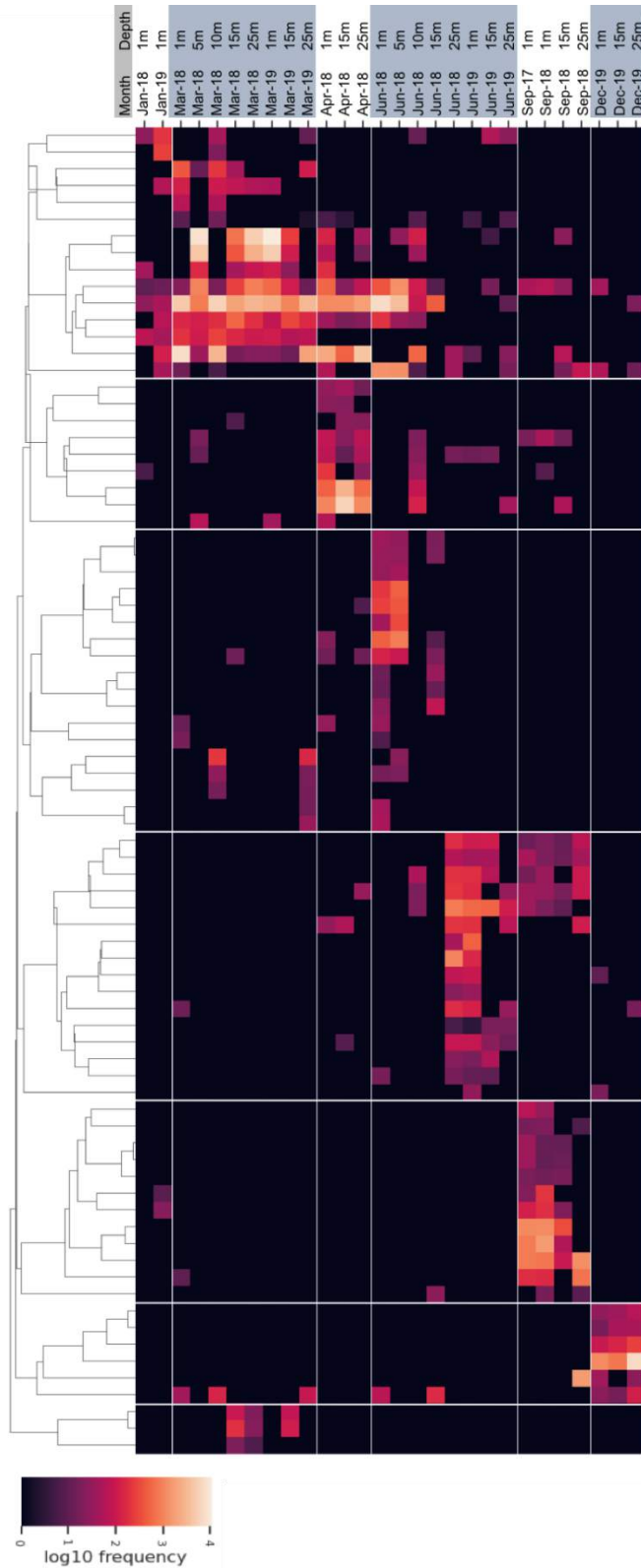
**איור 102:** הצגה גרפית לקשר שבין עומק הריצוף (מספר רצפים) ומורכבות אוכלוסיית חיידקי הליגיונלה עבור הדגימות השונות. כאשר כוללים 5000 רצפים ויותר, המורכבות מגיעה לערך קבוע. המורכבות חושבה עבור כל הדוגמאות בעזרת פונקציית alpha-rarefaction המושפעת ממספר המינים ומהשונות שלהם.

עם זאת, התוצאות מצביעות על הבדל משמעותי בעושר המינים בין הדוגמאות. תופעה זו נחקרה באופן ישיר על ידי חישוב ה- alpha diversity בדגימות בעזרת מספר מדדים שונים (איור 103). נמצא ששונות המינים הממוצעת דומה בדוגמאות מעומקים שונים (איור 103b) אולם ניכר כי עושר ומורכבות האוכלוסייה משתנה לאורך השנה ובשנתיים שנבחנו נמדדה השונות הנמוכה ביותר בחורף ואילו בקיץ נמדד עושר המינים הגדול ביותר (איור 103א). על מנת להבין תופעה זו ערכנו אנליזה של hierarchical clustering בה נתחו המינים השונים על פי התפלגותם בין עונות הדיגום השונות (איור 104). התוצאות מצביעות על מספר מקבצים של מינים המופיעים בתקופות שונות של השנה באגם.

לדוגמה, בחודש ספטמבר נראים 12 מינים עיקריים, והם מופיעים ללא תלות בעומק הדיגום או בשנת הדיגום. אותם המינים כמעט ואינם מופיעים בעונות אחרות (איור 104). ניתוח נרחב של גורמים ביוטיים ואביוטיים, כולל אפיון גנטי, יתבצע בהמשך המחקר, על מנת לברר מה קובע את התפוצה של מיני הליגיונלה השונים המהווים מרכיב קבוע במערכת האקולוגית של אגם הכנרת.

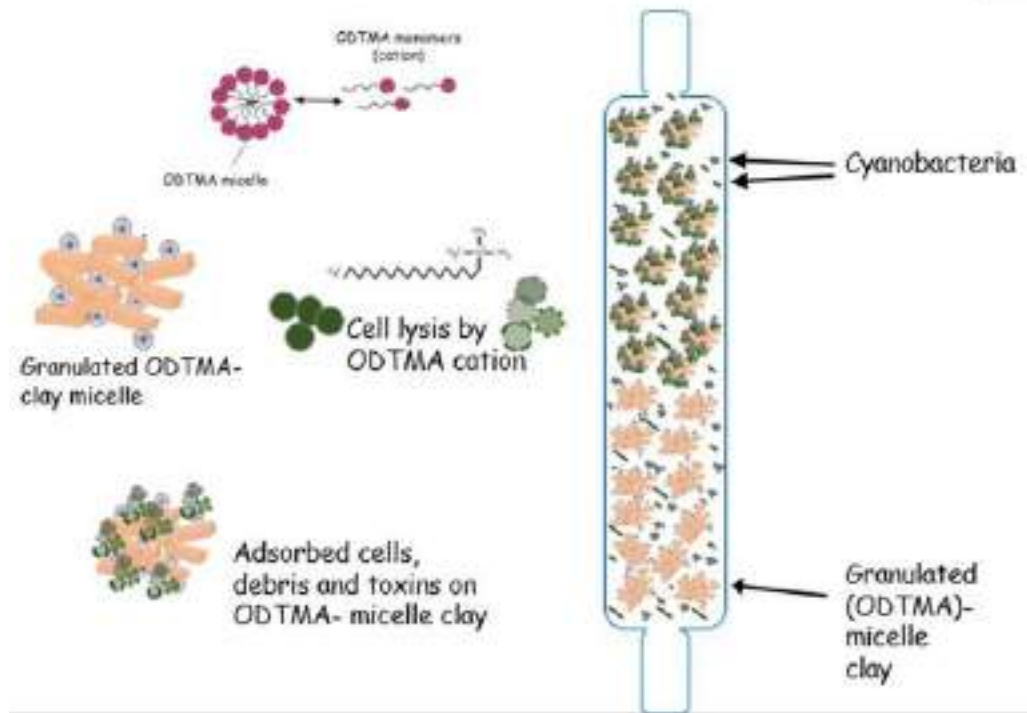


**איור 103:** שונות אוכלוסיית הליגיונלה alpha diversity לפי מדדים שונים – Shannon, Faith, Evenness, ו - Observed OUT's (משמאל לימין). מוצגת השונות הממוצעת של הדוגמאות המקובצות על פי חודשים (א) או עומקים (ב).



**איור 104:** מפת חום של התדירות היחסית של מיני ליגינלה אשר נמצאו לאורך עמודת המים בעונות השונות. כל טור מייצג דוגמת מים אחרת, והדוגמאות מסודרות על פי חודש הדיגום, ולא על פי תאריך או שנה. כל שורה מייצגת מין אחר של חיידקים מהסוג ליגינלה. הגוון מייצג את התפוצה היחסית של כל מין על פי סרגל הצבע שלמטה. המינים מקובצים בשיטה הסטטיסטית של hierarchical clustering לשבעה קלאסטרים על פי התפלגותם בין הדוגמאות.

## 3.7 גישות חדשניות לבקרה ומניעת פריחות של ציאנובקטריה רעילות בגופי מים



במימון  
משרד  
המדע  
והטכנולוגיה

אסף סוקניק בשיתוף עם אהרון קפלן ושלמה ניר (א. עברית), פרופ' לירונג סונג (IHB CHINA)

- אמינים רבעוניים אורגניים ATMA alkyl trimethyl ammonium פוגעים בפעילות הפוטוסינתטית בציאנובקטריה ומעכבים את הגידול.
- גרנולות מרוכבות של חרסית מיצלות ODTMA מסלקות ביעילות מיקרוציסטינים. יעילות הסילוק של מיקרוציסטינים מסוג RR פחותה יחסית למיקרוציסטינים אחרים.

### מטרת המחקר

לתכנן ולבחון כלים אמינים לניהול שליטה ובקרה על פריחות של ציאנובקטריה רעילות בגופי מים, אגמים מאגרים ובריכות.

**רקע**

מינים שונים של ציאנובקטריה אחראיים לפריחות רעילות בגופי מים בעולם כולו ומהווים איום ממשי על איכות מי השתייה, על שימושים מגוונים של מערכות אקולוגיות, אגמים, בריכות ומאגרים. בין הציאנובקטריה הרעילים ניתן למנות מגוון סוגים שיוצרים פריחות בכנרת כמו *spMicrocystis* המייצרים משפחה של רעלני כבד הקרויים מיקרוציסטינים (MC) ו-*Aphanizomenon* המייצר רעלן הנקרא צלינדרוספרמופסין. באתרים שונים בעולם, הצטברות מאסיבית של ביומסה של ציאנובקטריה הביאה למשבר באספקת מי שתייה בגלל נוכחות רעלנים של ציאנובקטריה. בישראל פריחות ציאנובקטריה מדווחת מידי שנה בבריכות דגים ובמאגרי מי השקיה, וחשוב מכך, מיני מיקרוציסטיס ואפניזומנון רעילים שולטים מדי פעם באוכלוסיות הפיטופלנקטון בכנרת, מקור עיקרי למי שתייה. רשויות מים וגופים האחראיים על הגנת הסביבה זקוקים לפרוטוקול אמין לבקרה וניהול של פריחות רעילות של ציאנובקטריה במיוחד בהינתן מצבי חירום בהם נדרשת תגובה מהירה להפחתת התפשטות הפריחה במקורות המים.

**שיטות**

פוטנציאל השימוש באמינים רבעוניים אורגניים ATMA alkyl trimethyl ammonium כחומרים מעכבי גידול של ציאנובקטריה נבחן במערכת מעבדתית. תרבויות של ציאנובקטריה ושל אצות ירוקיות נחשפו למינונים שונים של ATMA מסוגים שונים. נבדקה ההשפעה על הפעילות הפוטוסינתטית בשיטות ספקטרליות, ויציבות התאים בשיטות מיקרוסקופיות. יכולת הסילוק וההרחקה של מיקרוציסטינים על ידי גרנולות מרוכבות של חרסית ומיצלות ODTMA נבחנה בקולונות ספיחה מעבדתיות תוך שימוש בתמיסת טוקסינים מסחרית או בתערובת של טוקסינים שמקורה בתרבית של מיקרוציסטיס. נפחים עם ריכוז מדוד של מיקרוציסטינים הוזרמו דרך קולונה שהכילה גרנולות במשקל ידוע וריכוז הרעלנים ביציאה מהקולונה נמדד בשיטות אנליטיות ב-HPLC. תוצאות ניסויי הספיחה נבחנו בעזרת מודל פיסקלי (1) הכולל הולכה, ספיחה ושחרור של הרעלנים.

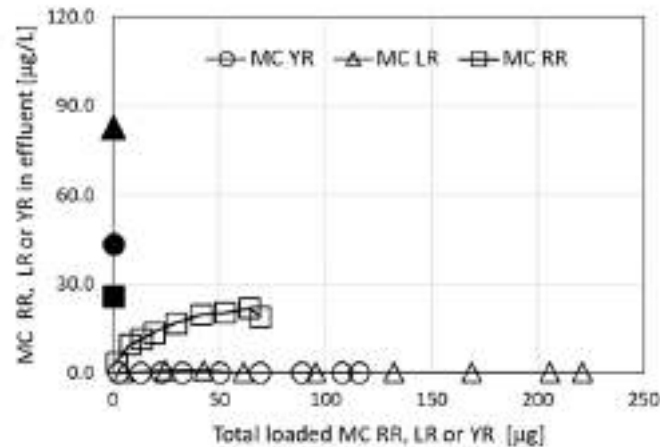
$$dC_i(X,t)/dt = -v \cdot \partial C_i(X,t) / \partial X - C_i \cdot C_i(X,t) \cdot R(X,t) + D_i \cdot RLi(X,t) \quad (1)$$

כאשר  $RLi(X,t)$  הוא הריכוז המולרי של אתרי ספיחה תפוסים מסוג  $i$ , ו- $v$  מייצג את מהירות הזרימה בפילטר. מהירות הזרימה המחושבת מתוך  $v = Q_v / (A \cdot f)$ , כאשר  $Q_v$  היא הספיקה (נפח בזמן) ו- $f$  הפרקציה של נפח החללים מתוך הנפח הכולל של הפילטר (A).

**תוצאות ודיון**

בניסויי מעבדה נמצא שהאמין הרבעוני Octadecyl trimethyl ammonium (ODTMA) מעכב את הפעילות הפוטוסינתטית של ציאנובקטריה בריכחים של מיקרומולר. חשיפת תרבויות של ציאנובקטריה ל-ODTMA גורמת לירידה ביעילות הפוטוסינתטית עד להפסקה מוחלטת של הפעילות ובמקביל מתרחשת פגיעה במערכת הפוטוסינתטית אשר באה לידי ביטוי בהגברת הסיגנל הפלורוסנטי כתוצאה מניתוק מערכת איסוף האור מהממברנה. נמצא שציאנובקטריה רגישות יותר לקטיונים אורגניים מקבוצת ה-ATMA מאשר אצות ירוקיות, וגם, בין הציאנובקטריה שנבחנו, לאפניזומנון הייתה רגישות גבוהה יותר מאשר למיקרוציסטיס.

למושבות של מיקרוציסטיס נמדדה רגישות מופחתת בשל התפשטות איטית של המעכב אל פנים המושבות. עבודה זו סוכמה במאמר שפורסם לאחרונה בכתב העת *Chemosphere*<sup>4</sup>. קולונות ספיחה מעבדתיות המכילות גרנולות מרכבות של חרסית ומיצלות ODTMA נמצאו יעילות בסילוק והרחקה של מיקרוציסטינים מהמים. תערובת מיקרוציסטינים שמקורה בביומסה של מיקרוציסטיס שנאספה מהכנרת הזרמה לקולונה שהכילה גרנולות מרכבות, ובנחל שעזב את הקולונה נמצא שריכח הרעלנים ירד משמעותית. ההרחקה של מיקרוציסטינים מהסוג LR ו- YR הייתה מלאה גם לאחר מעבר של 0.1 מיליגרם ויותר של רעלנים אלו (איור 105). הסילוק של MC-RR היה קרוב ל- 100% בנפחי סינון קטנים ולאחר הזרמה מתמשכת ריכח הרעלנים ביציאה מהקולונה עלה בהדרגה עד לערך מירבי של כ- 25 מיקרוגרם לליטר, ערך המהווה 85% מהריכח במקור (איור 105).

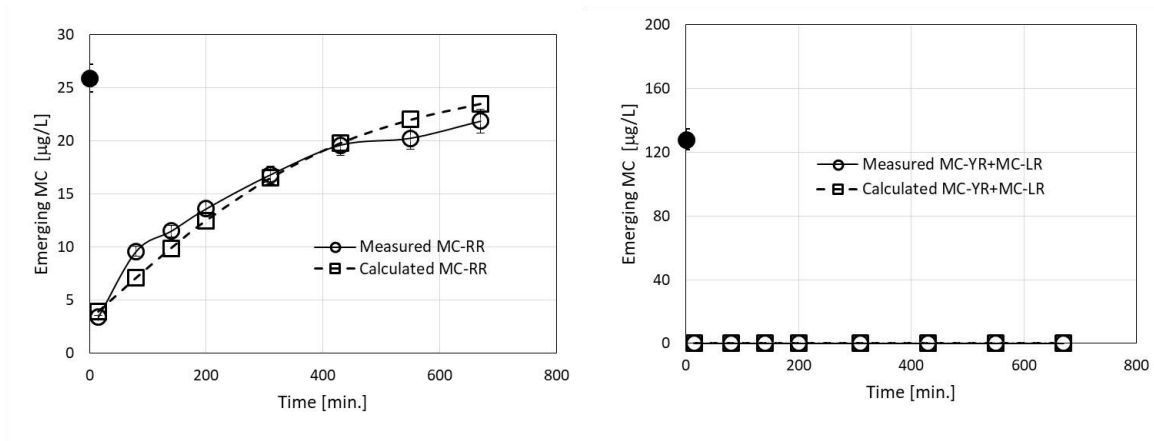


**איור 105:** ריכח מיקרוציסטינים ביציאה מקולונת סינון עם גרנולות חרסית מיצלות ODTMA כתלות בכמות המיקרוציסטינים שהועמסה על הקולונה. מקור המיקרוציסטינים בביומסה של מיקרוציסטיס שנאספה מהכנרת. הנקודות המלאות מייצגות את הריכח במקור של ה- MC הספציפי.

יישום מודל הסינון/ספיחה לניסוי שתוצאותיו מתוארות באיור 105 עבור סוגי המיקרוציסטינים השונים חצה סילוק מלא של מיקרוציסטינים מסוג LR ו- YR וסילוק חלקי בלבד של MC-RR (איור 106). יעילות סילוק גבוהה חושבה גם עבור מיקרוציסטינים מסוג LR ו- WR שמקורם בתרביות או בתכשירים מסחריים. תוצאות אלו שללו את האפשרות שחומר אורגני מסיס (DOC), כמו במי כנרת לדוגמה, עלול להקטין את יעילות הספיחה. על בסיס מספר רב של ניסויי ספיחה והרצת מודל הספיחה חושבה קיבולת הגרנולות למיקרוציסטינים. הקיבולת שחושבה עבור LR-MC הינה 1.5 גרם טוקסין לק"ג גרנולות. עבור MC-WR 0.4 גרם לק"ג ואילו עבור MC-RR הקיבולת המחושבת היא נמוכה - כ- 0.012 גרם לק"ג גרנולות. בהשוואה לממצאים אלו, השימוש בפחם פעיל (GAC) לספיחת רעלנים של ציאנובקטריה (הטכנולוגיה המקובלת כיום) הוא בעל יעילות נמוכה יותר ורק התפתחות של אוכלוסיית חיידקים מפרקי מיקרוציסטינים מגבירה

<sup>4</sup> Wu, X., Viner-Mozzini, Y., Jia, Y., Song, L. and Sukenik, A., 2021. Alkyltrimethylammonium (ATMA) surfactants as cyanocides-Effects on photosynthesis and growth of cyanobacteria. *Chemosphere* .p.129778

את יעילות ההרחקה על ידי GAC. עבודה זו סוכמה במאמר מדעי שהתקבל לפרסום בכתב העת Applied Nano<sup>5</sup>.



**איור 106:** ריכוזי מיקרוציסטינים (מדודים – עיגולים וקו רציף ומחושבים – ריבועים וקו מקווקו) ביציאה מקולונה של גרנולות חרסית מיצלות ODTMA במהלך סינון של תערובת מיקרוציסטינים שמקורה בביומאסה של מיקרוציסטיס מהכנרת. הנקודה השחורה מייצגת את הריכוז של המיקרוציסטינים במקור. משמאל תוצאות מדודות ומחושבות עבור RR- MC ומימין עבור YR - MC ו- LR - MC.

<sup>5</sup> Sukenik, A.; Viner-Mozzini, Y.; Mizrahi, D.; Tamam, I.; Benitez, A.R.; Nir, S. Removal of cyanotoxins microcystins from water by filtration through granulated composites of bentonite with micelles of the cation octadecyltrimethyl ammonium (ODTMA). Applied Nano 2021, 2



## 3.8 חומרים נדיפים כחתימה כימית יעילה לשינויים באוכלוסיות ציאנובקטריה בכנרת



צילום: מוטי דיאמנט 18.4.21

במימון  
רשות  
המים

פлаг אסטרון

- מיני פיטופלנקטון שונים פולטים נגזרות שונות נדיפות של מולקולות, לאלו יכולת גבוהה להוות סממנים אותם קל יחסית לאבחן לאחר כיול המערכת.
- מחקר זה תר אחר סממנים נדיפים למיקרוציסטיס, במטרה לאבחן עליה בריכוז האצה הנ"ל במקורות מים.

### רקע

מחקר זה סוקר את פליטת החומרים הנדיפים שמקורם במיני פיטופלנקטון שונים ( אוכלוסיות מיקרוציסטיס באופן ספציפי ) המתקיימים באגם וסביבתו. הנחת העבודה מבוססת על מצאי חומרים נדיפים המדווחים בספרות המקצועית, אשר רבים מהם ייחודיים למיני פיטופלנקטון שונים.

הנחת עבודה חשובה היא כי גם מצבים פיזיולוגיים שונים יכולים להשפיע על הרכב ואו סוג החומרים הנדיפים הנפלטים באגם. הנחות אלו מתקיימות גם בהקשר מעקב אחר פיגמנטים שונים שמקורם בפיטופלנקטון הקיים בגופי מים (כגון סוגי כלורופיל וקרוטנואידים) ובחינתם ע"י שיטות ספקטרליות. אולם, שיטות אופטיות אלו מתבססות על מגוון של עשרות מולקולות בודדות, בעוד ומגוון המולקולות הנדיפות המופרשות ע"י מיני פיטופלנקטון כולל מעל 1000 חומרים ידועים ואלפים אחרים לא ידועים ולכן פוטנציאל השימוש בשיטה זו רב יותר. שיטות הדיגום השונות שנוסו השנה התבססו על אמצעים זולים מתוך כוונה להנגיש את תוצאות המחקר לגופים רבים ובעלויות נמוכות יחסית. שיטות אלו כללו שימוש במיצוי על גבי סיבים ייעודיים (SPME) Solid Phase Micro Extraction ו/או שאיבת אוויר דרך סופחנים ייחודיים מפולירטאן, אותם ניתן למצות עם ממס אורגני. שנת המחקר הראשונה נפגעה מהפסקות מחקר ארוכות כתוצאה מהקורונה אך מספר בדיקות מצומצם אכן נערך באגם בחודשי שנת 2020 בנוסף לבדיקה יחידה בבריכת דגים הנגועה במיקרוציסטיס אורוגינזה.

### **שיטות**

שיטות העבודה כוללות דגימת אוויר בשתי שיטות- ע"י סיבים ייעודיים המותאמים לספיחת חומרים באוויר, אותם ניתן לשחרר באופן מבוקר במכשיר אנליזת המאסות (GC/MS), או ע"י שאיבת אוויר דרך סופחני Poly Urethane Foam (PUF), ומיצוי בממס אורגני בסיום הדיגום.

אופן העבודה כולל דיגום חומרים הנפלטים מתרביות מיקרוציסטיס וחיפוש אחר חומרים משותפים הנפלטים מהאגם בזמנים שונים וספציפית במקרי פריחה. חומרים דומים המאובחנים הן בתרביות והן בדוגמאות שטח מאופיינים ע"י ספריות זיהוי NIST, לאלו המזוהים ברמה גבוהה נרכש סטנדרט לאימות סופי.

### **תוצאות ודין**

טבלה 13 המוצגת למטה, מסכמת את רשימת החומרים הזוהים לחומרים הנפלטים מתרביות המעבדה בדגימות השונות שנלקחו בשנת המחקר הראשונה. לחומרים זהים, להם אין אימות ע"י סטנדרט צוין מספר במקום שם. ניתן לראות כי רשימת החומרים הזוהים שאינם מזוהים ועולים בדגימות רבות, היא רשימה גדולה בהרבה בהשוואה לחומרים המזוהים ע"י סטנדרטים ואו ברמת הסתברות גבוהה ע"י ספריות החומרים (NIST). לכן יש להמשיך ולנסות לקבל פיענוח לגבי חתימה נדיפה זו של זני המיקרוציסטיס.

**טבלה 13:** חומרים נדיפים המזוהים (✓) בהסתברויות שונות – בהפלגות/נסיעות דיגום ראשוניות ובתרבויות מיקרוציסטיס. חומרים המסומנים בכוכבית \* = מזוהים ע"י סטנדרטים, שאר החומרים = עדיין ללא פיענוח.

Compound	<i>Microcystis</i> culture incubated with SPME fibers	C1004	Fish pool 1	Fish pool 2	Kinneret Feb cruises	Kinneret Aug cruises	Kinneret Oct cruises	Kinneret Dec cruises
,Disulfide* bis(1-(methylethyl Comp 47	✓							
Methyl* isopropyl disulfide Comp 48	✓							
β cyclocitral* Comp 50	✓							
α* Pinene (monoterpene extracted by plants) Comp 30	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
β* Pinene (monoterpene extracted by plants) Comp 32	✓	✓	✓	✓		✓		
*3-Carene (monoterpene extracted by plants) Comp 33	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
*Limonene (monoterpene extracted by plants) Comp 35	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
*Squalene (terpene extracted by aqua-organisms) Comp 54	✓							
Comp 1			✓	✓			✓	✓
Comp 3			✓	✓	✓			
Comp 4					✓			
Comp 6					✓			
Comp 14				✓			✓	
Comp 20								✓
Comp 21			✓					✓
Comp 23								✓
Comp 24			✓	✓		✓		
Comp 26			✓	✓				
Comp 27			✓	✓		✓		
Comp 29								✓
Comp 62								✓

בטבלה 13 ניתן להתרשם מקיום מספר חומרים נדיפים המזוהים לאחר אימות ע"י סטנדרטים וכאלו שעדיין לא זוהו. החומרים המזוהים כללו בעיקר מונוטרפנים הידועים כחומרים הנפלטים מצמחייה. חומרים נוספים עלו באופן תדיר אך ללא אפיון מספק ולכן ינותחו בהמשך המחקר. המידע הספרותי תורם גם הוא להעלאת הודאות. ניתן לראות כי קבוצת החומרים שנדגמו בהפלגות הדיגום מכילה בעיקר חומרי טבע ממקור צמחי, כגון מונוטרפנים ואלקאנים (הן מצמחי יבשה ופיטופלנקטון באגם) בנוסף למזהמים אורגניים ממוצע פטרוכימי שמקורם במפעלים ומכוניות.

קבוצת החומרים שזוהתה בתרבויות המיקרוציסטיס הכילה חומרים לא מזוהים, אלקאנים ותרכובות ייחודיות לתרבויות מיקרוציסטיס ממינים מסוימים (מסומנים בכוכבית בטבלה 13). חומרים אלו שדווחו זה מכבר כתרכובות סולפידים ייחודיים למיקרוציסטיס, מצביעים על מינים ספציפיים מתוך קבוצת ה- *Microcystis aeruginosa* ולכן בעלי ייחודיות גבוהה ביותר אפילו בתוך הקבוצה עצמה. חומרים ספציפיים ו/או ייחודיים לאצות אלו לא נמצאו באגם. סיבה לכך יכולה לנבוע מהשימוש בשיטות דיגום ו/או סוגי חומר סופח לא מספקים בניסוי. סיבה נוספת יכולה להיות קיום זן מיקרוציסטיס שונה מזה הקיים בתרבויות, הפולט חומרים נדיפים לא מוכרים אשר בתקווה יעלו בהמשך הניסויים. ההצלחה בדיגום התרבויות לכן רבה ואף מפתיעה, ומראה ספציפיות לתרבויות כמדווח בספרות המקצועית אך למרות זאת אינה "מצטלבת" עם דוגמאות האוויר שנלקחו מהאגם.

ניתן לראות כי קבוצת המונוטרפנים מופיעה פעמים רבות באגם אך לא בכל דיגום, לדוגמא בחדש אוקטובר לא נצפו אלו האחרונים באגם. לעומתם קבוצות הסולפידים (חומרים 47, 48) וכן cyclocitral (חומר 50) לא נצפו באגם למרות היותם סממנים ידועים לקבוצות מיקרוציסטיס אך כן בתרבויות. על כן, יש לשפר את שיטות האיסוף לקראת עליה בריכוזי המיקרוציסטיס באגם.

למעשה קשה להבחין בהופעה ייחודית של מספר רב של חומרים נדיפים הנפלטים במקרים בהם יש עליה בריכוזי מיקרוציסטיס בגוף המים כפי שצפינו במקרה של חודשי האביב (דיגום סוף פברואר ודיגום בריכות הדגים הנגועות במיקרוציסטיס). על כן, השאלה היא האם יש שוני בריכוזים השונים של אלו המופיעים פעמים נוספות באגם? בדיקה מהירה בעזרת הסטנדרטים שנרכשו מעלה כי ניתן להבחין בשוני ברור בין הדוגמאות כפי שמצוין בטבלה 14.

**טבלה 14:** ריכוזי טרפנים (ppb) בדיגומי אגם הכנרת

טרפן	פברואר	אוגוסט	אוקטובר	דצמבר
<b>α Pinene</b>	22.4	11.86	0	0.89
<b>β Pinene</b>	0	22	0	0
<b>Carene-3</b>	42.2	3	0	1.29
<b>Limonene</b>	13.7	10	0	0

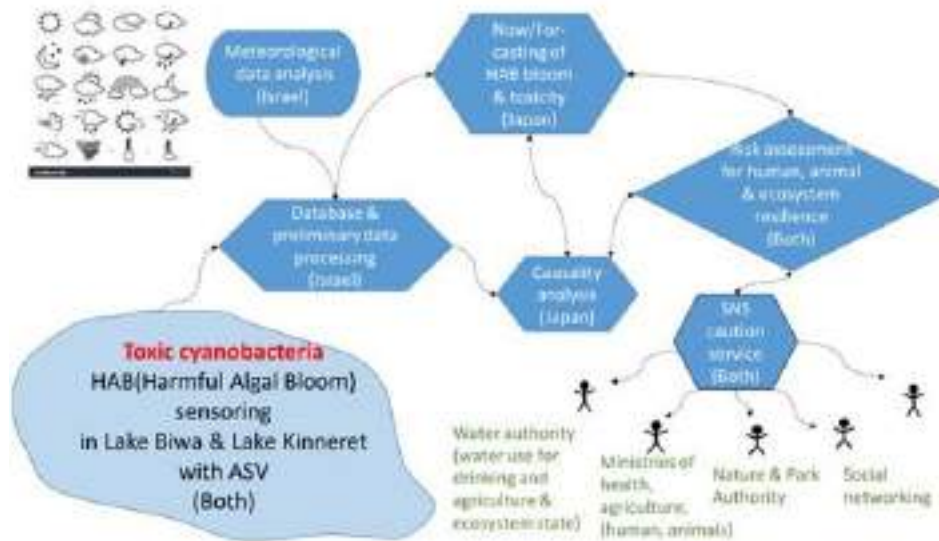
למעשה חודש פברואר בו נצפתה הופעה (מועטה) של מיקרוציסטיס בכנרת (2020) לווה בעליה בפליטת מונוטרפנים כדוגמת  $\alpha$ -Pinene, Limonene, 3-Carene. ייתכן ועליה זו אינה קשורה ישירות למין זה ולכן יש צורך לבצע דיגום בפריסה רחבה יותר בעונות השנה וכן בתרבויות נוספות. אך זהו אכן סממן לו ציפינו. לסיכום שנת המחקר 2020:

- ניתן באמצעים זולים יחסית לקיים דיגום של חומרים הנפלטים מתרבויות המיקרוציסטיס.
- מספר חומרים נדיפים בתרבויות מיקרוציסטיס במעבדה אופיינו. חלקם ניתן לזהות בעזרת סטנדרטים זולים יחסית שנרכשו.
- חלק מהחומרים הנ"ל הינם ספציפיים למיקרוציסטיס ממין מסוים, מין זה אינו שולט באגם.
- חומרים נוספים אופיינו כחומרים הנפלטים לאוויר מתרבויות המיקרוציסטיס.
- פליטת חומרים נדיפים באגם בסוף פברואר (תחילת האביב) בו נצפו אוכלוסיות מיקרוציסטיס באגם, אינה ספציפית למין זה או אחר אך נראה כי קיימת עליה בפליטת מונוטרפנים בחודש זה במיוחד.

#### המלצות לשנת 2021:

תכנון להמשך בדיקה והצלבה של חומרים הנפלטים לאוויר מתרבויות נוספות הקיימות במעבדת הכנרת וכן דיגום נרחב יותר ושכלול שיטות אלו, למציאת חתימה מדויקת יותר. במקביל יתבצע שימוש בכלי ייעודי לדיגום חומרים נדיפים (Thermal desorption) שאינו קיים במעבדתנו, בשיתוף פעולה עם פרופסור יעל דובובסקי מהטכניון. יכולות מכשור זה הן בדיגום והן באנליזת חומרים נדיפים - גבוהה ביותר.

## 3.9 מערכת ICT לזיהוי תגובת עמידות אקולוגית במערכות מים מתוקים



**במימון**  
**משרד המדע**  
**והטכנולוגיה**

**איליה אוסטרובסקי, אסף סוקניק, פרבין ג'בה דב,**  
**בשיתוף עם פרופ' קומאגי מ' (Japan Ritsumeikan University)**

- הופעה מערכת אקוסאונדר תלת ערוצית המאפשרת זיהוי והפרדה בין מרכיבים בעלי החזר קול שונה (דגים מול מושבות של מיקרוציסטיס) בעמודת המים בכנרת.
- פותח מודל לחיזוי פיזור אות אקוסטי על בסיס הפילוג האנכי של אוכלוסיית ציאנובקטריה במים.

### מטרת המחקר

מטרת הפרויקט היא לפתח טכנולוגיה לאיסוף מידע סביבתי, ניתוחו בשיטות של תקשורת מידע Information communication technology- ICT ויישום לניטור מערכות אקווטיות. עד מרכזי הוא הדגמת הטכנולוגיה באגם BIWA ביפן ובכנרת בישראל תוך שילוב מידע הנאסף בזמן אמת מהמערכות האקולוגית והטמעתו בגופי מידע ציבוריים לשיפור דרכי קבלת החלטות תפעוליות. היעדים המחקריים המידיים הם לזהות במקום ובזמן התפתחות אוכלוסיות רעילות של ציאנובקטריה ולחזות את פוטנציאל ההתפתחות של פריחות אלו בטווח זמן קצר now casting ובמרחב גוף המים תוך שילוב המידע במערכות תקשורת SNS.

**רקע**

פריחות של ציאנובקטריה משפיעות לרעה על איכות מי הכנרת. בשני העשורים האחרונים פריחות של ציאנובקטריה מתפתחות בכנרת הן בחורף והן בקיץ. זיהוי בזמן אמת של פריחות ציאנובקטריה חריגות דורש כלי ניטור מתקדמים המספקים מידע שניתן לשלבו במודל פיסיקלי/אקולוגי לחיזוי קצר טווח זיהוי פוטנציאל הפריחה והפיזור המרחבי של אוכלוסיות הציאנובקטריה המתפתחות. המידע והתחזיות יעמדו לרשות הגופים המפקחים והמתפעלים את האגם ולרשות הגופים האחרים המשתמשים באגם: אספקת מים לשתייה וחקלאות, דייג קייט ונופש.

ניטור כמותי של פריחות ציאנובקטריה מהווה אתגר טכנולוגי מכיוון שהתפוצה המרחבית שלהן הטרוגנית במרחב ומשתנה בזמן. מרבית שיטות הדגימה הביולוגיות הסטנדרטיות הן עתירות עבודה וגזולות זמן. לפיכך, נדרש פיתוח טכנולוגיות חדשות לכימות מהיר של ציאנובקטריה בגופי מים. מעקב אחרי החזר גלי קול בתווך המימי (אקוסטיקה), הינה טכנולוגיית חישה מרחוק המאפשרת סקרים מהירים וכמעט-סינופטיים של נפחי מים גדולים ומספקת נתונים ברזולוציה גבוהה על שפע אורגניזמים במרחב ובזמן. מחקרים אחרונים מצביעים על כך שניתן לזהות אוכלוסיות של ציאנובקטריה בעזרת מכשירים אקוסטיים בתדרים אולטראסוניים, ולעקוב אחר תפוצתם במרחב ובזמן. עם זאת, התכונות האקוסטיות של ציאנובקטריות אינן מוכרות דיין, וכאשר התאים יוצרים מושבות כמו במהלך פריחה של מיקרוציסטיס, האות האקוסטי המוחזר מופר ואיננו קוהרנטי (coherent) וכן משפיע על עוצמת האות המוחזר מהמושבה (backscattering). כדי לקשר את האות המוחזר שנמדד עם אקוסאונדר וריכח ביומסה של אוכלוסיית מיקרוציסטיס יש להגדיר תכונות אקוסטיות אופייניות לתאים ולמושבות של הציאנובקטריה. נכון להיום, התכונות האקוסטיות של ציאנובקטריה ככלל ושל מיקרוציסטיס בפרט אינן ידועות. בעבודה זו יישמנו מודל אקוסטי שנועד לכמת את ההתפלגות האנכית של ביומסת מיקרוציסטיס מהנתונים שנרשמו עם אקוסאונדר בשלושה תדרים קוליים.

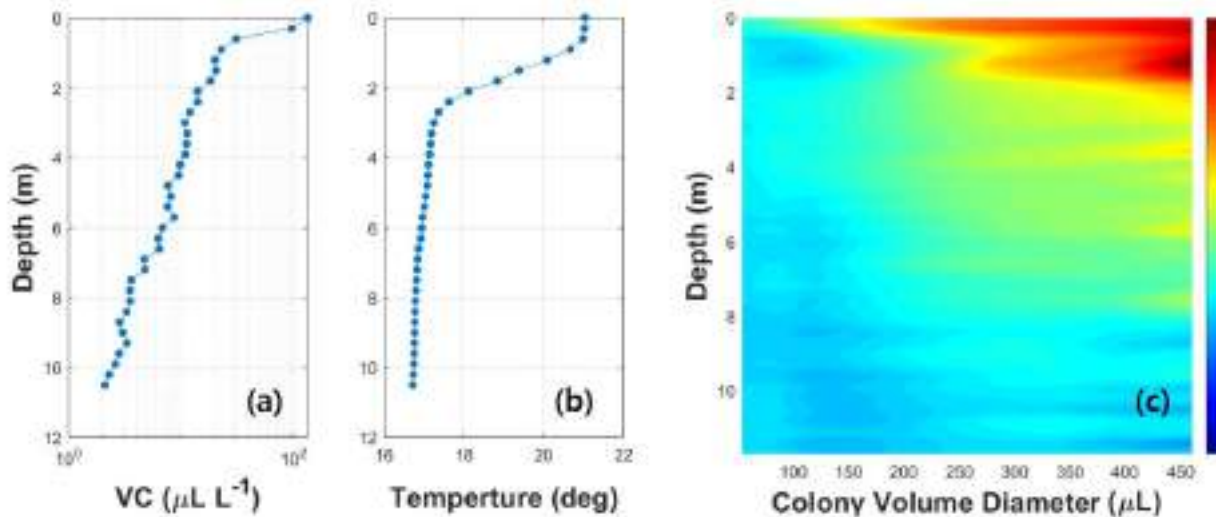
**שיטות**

פיזור האות האקוסטי על ידי מושבה אחת של מיקרוציסטיס הוא סיכום קוהרנטי של האות המתקבל מכלל התאים. הפיזור הכללי המצטבר של מושבות ציאנובקטריות שונות אינו קוהרנטי וקשה לחיזוי. לפיכך, יושם מודל אמפירי פשוט לאפיון פיזור אקוסטי של אוכלוסיית מושבות מיקרוציסטיס המפוזרות במים. המודל שוקל את התלות של רמת הקוהרנטיות ופיזור האות האקוסטי בריכח ציאנובקטריה. להמחשת תוצאות המודל השתמשנו בנתונים שנאספו ב- 3 באפריל 2019. הנתונים האקוסטיים נדגמו באמצעות EK80 המופעל במצב הגל הרציף (CW), אשר משדר פולסים בתדרים אקוסטיים קבועים. הדגימה האקוסטית נעשתה בשלושה תדרים של 70, 120 ו- 333 קילוהרץ. לאימות התוצאות השתמשנו בפרופילים האנכיים של ריכח נפח המיקרוציסטיס (VC) אשר נמדד עם (Laser In-Situ Scattering and LISST-100x Transmissometry, Sequoia Scientific, Inc.)

**תוצאות ודיון**

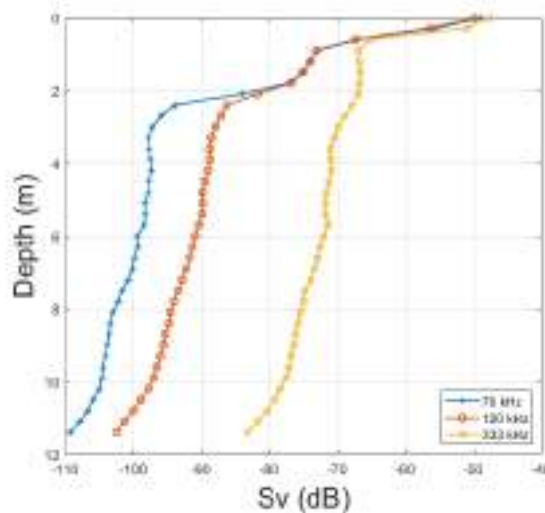
הפרופיל האנכי של הריכח הנפחי VC של מיקרוציסטיס נמדד בעזרת מערכת אופטית מסוג LISST-100x במקביל למדידות אקוסטיות. ערכי ה- VC שנמדדו היוו בסיס למידול האות האקוסטי. הפרופיל האנכי של ה- VC ( $\mu\text{L L}^{-1}$ ) והטמפרטורה לעומק עמודת המים שנמדדו בכנרת ב- 3 באפריל 2019 מוצגים באיור 107. התפוצה של מושבות גדולות (קוטר גדול מ- 200 מיקרון) גדלה באופן חד קרוב לפני המים (איור 107C) והריכח הנפחי הכולל גדל בשכבת המים שמעל התרמוקלינה היממתית, הנוצרת במהלך היום.





**איור 107:** פרופיל אנכי של ריכוז נפחי VC ( $\mu\text{L L}^{-1}$ ) של מושבות מיקרוציסטיס, (b) פרופיל טמפרטורה (מעלות C) ו (c) פרופיל אנכי של VC של מושבות מיקרוציסטיס בגודל שונה (קוטר המילימטר). סרגל הצבעים מימין מציג סקלה לוגריתמית של קבוצות קוטר במ"מ.

פרופילים אנכיים של Sv volume backscatter strength מוצגים באיור 108. בשכבת המים העליונה של 2 מ', נמצא גרדיינט חריף בשינוי האות האקוסטי Sv עם העומק, חאת בתוך התרמוקלינה היממתית הנוצרת בשכבת המים העליונה בשעות היום. בשכבה העמוקה יותר נצפה שינוי מתון יותר בערך ה-Sv עם העומק. מעניין לציין שתופעה זו נצפתה ללא תלות בתדר האקוסטי.



**איור 108:** פרופילים אנכיים של Sv שהוקלטו עם מערכת אקוסאונדר של סימדר EK80 ב-70, 120 ו-333 קילו-הרץ. הפרופילים נמדדו במהלך פריחה של *Microcystis* sp.

את הפרופילים של האות האקוסטי בחנו על פי מודל אקוסטי שהתבסס על הנחה שהפיזור האקוסטי שמקורו במושבות מיקרוציסטיס אינו קוהרנטי לחלוטין. על מנת לקשור את ההחזר האקוסטי הנפחי (volume backscattering coefficient  $S_v$ ) והריכוז הנפחי של מיקרוציסטיס  $V_{bio}$ , התכונות האקוסטיות של מיקרוציסטיס מודלו. מקדם ההחזר האקוסטי  $S_v$  מבוטא במשוואה הבאה עם מקדם חזקה  $p(f, z)$ :

$$\langle s_v(f, z) \rangle_{a_{cell}} = n_{cyan}^{p(f, z)}(z) \langle \sigma_{bs}(f, \bar{a}_{cell}) \rangle_{a_{cell}} \quad (1)$$



כאשר  $\langle s_V(f, z) \rangle_{a_{cell}}$  הוא הממוצע של מקדם ההחזר האקוסטי עבור תדר  $f$  ועומק  $z$ .  $n_{cyan}(z)$  הוא המספר הכולל של תאים ליחידת נפח בעומק  $z$ .  $\langle \sigma_{bs}(f, \bar{a}_{cell}) \rangle_{a_{cell}}$  הוא ערך ממוצע של backscattering cross section לטווח גדלים של תאי מיקרוציסטים.  $\bar{a}_{cell}$  מייצג רדיוס ממוצע של התא.  $p(f, z)$  הוא המעריך של  $n_{cyan}$ . הפונקציה  $p(f, z)$  מתוארת במשוואה 2:

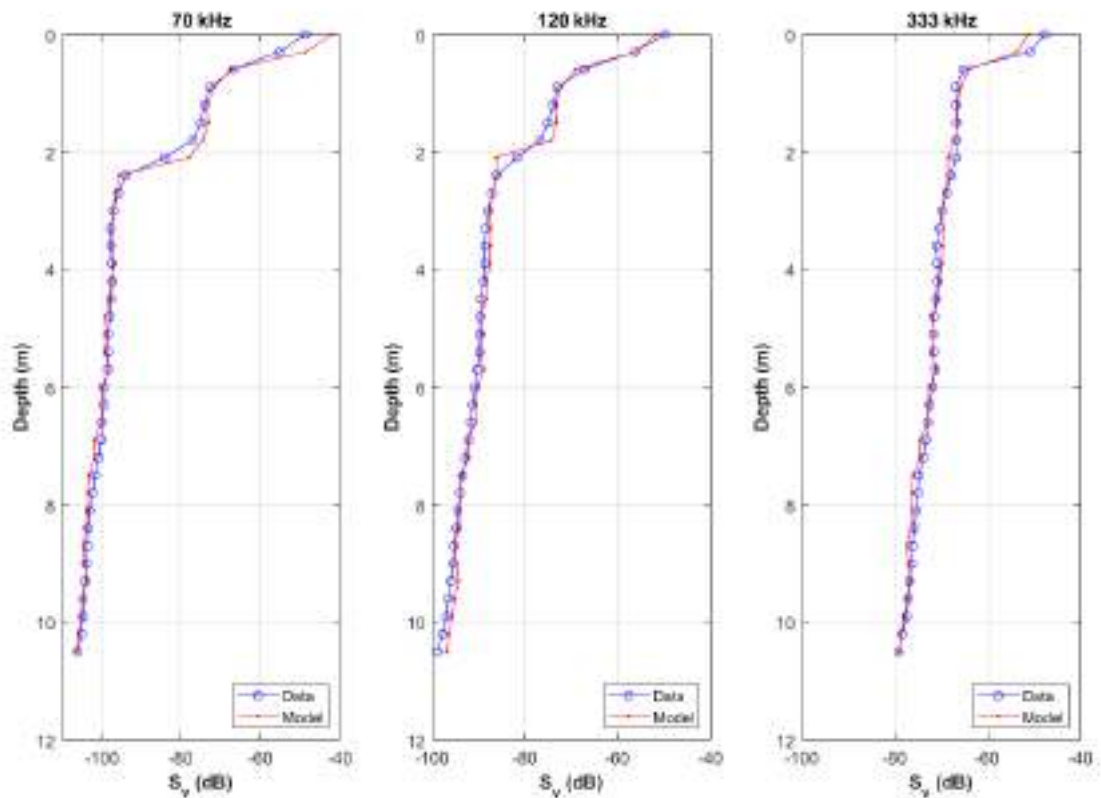
$$p(f, z) = \begin{cases} p_0 & z > z_{ref} \\ p_0 + \alpha_0 \left( \frac{f_{ref}}{f} \right) \left( \frac{n_{cyan}(z)}{n_{cyan}(z_{ref})} \right)^{\frac{1}{3}} & z \leq z_{ref} \end{cases}, \quad (2)$$

כאשר  $p_0$  ו  $\alpha_0$  הם ערכים ניסויים המחושבים תוך התאמה של מדידות אקוסטיות ונתונים אמפיריים,  $z_{ref}$  הוא עומק יחוס שניתן לחישוב אמפירית על ידי התאמה של נתונים אקוסטיים. כאשר  $z < z_{ref}$  החזר קוהרנטי מוגבר משפיע על האות האקוסטי המוחזר. כאשר  $z > z_{ref}$ , הגודל של המעריך  $p(f, z)$  במשוואה 1 הוא קבוע ( $p_0$ ) ואינו תלוי בתדר ורק גדול מעט מיחידה ומייצג תרומה קוהרנטית קבועה מתא בודד במושבה. אולם כאשר  $p(f, z) > p_0, z < z_{ref}$ , מייצג תרומה קוהרנטית נוספת שמקורה בהשפעה של תאים סמוכים עם מרווח מצומצם ביניהם,  $f_{ref}$  הוא תדירות רפרנס שבמקרה הנוכחי נבחרה לתדר של 120 kHz. גודל המעריך  $p(f, z)$  נע בין 1 (totally incoherent) ל-2 (totally coherent). את הריכוז הנפחי  $V_{bio}$  ניתן לבטא כמכפלה של נפח הממוצע של התא  $\langle v_{cell} \rangle$  ומספר תאי המיקרוציסטים כפי שמוצג במשוואה 3 המקשרת בין  $V_{bio}$  ההחזר האקוסטי הנפחי  $S_V$ .

$$\begin{aligned} V_{bio} &= \langle v_{cell} \rangle n_{cyan} \\ &= \langle v_{cell} \rangle \left( \frac{\langle s_V(f, z) \rangle_{a_{cell}}}{\langle \sigma_{bs}(f, \bar{a}_{cell}) \rangle_{a_{cell}}} \right)^{1/p(z, f)} \\ &= \langle v_{cell} \rangle \left( \frac{10^{S_V(f, z)/10}}{\langle \sigma_{bs}(f, \bar{a}_{cell}) \rangle_{a_{cell}}} \right)^{1/p(z, f)} \end{aligned} \quad (3)$$

הריכוז הנפחי של אוכלוסיית המיקרוציסטים,  $VC$ , כפונקציה של הערך האקוסטי הנמדד,  $S_V$ , חושב על פי הפרופיל האנכי של  $S_V$ . בשל המורכבות של מודל ההחזר האקוסטי, הפתרון נסמך על nonlinear inversion method (Chu *et al.*, 2016). תוצאות הרצת המודל מציגות את הפיזור בהשוואה לפרופילים האנכיים של  $S_V$  שנמדדו באגם (איור 109). תחזיות המודל מספקות התאמה עם הנתונים האקוסטיים שנמדדו. הפרופילים האנכיים המחושבים מתארים שתי תכונות המוטמעות במודל (1) בעומקים  $< 2$  מ' (ב- VC נמוך), רוב הפיזור הקוהרנטי נבע מתרומת תאי המיקרוציסטים במושבות; (2) בעומקים רדודים יותר (בעוצמה גבוהה יותר של VC), בנוסף לפיזור הקוהרנטי המתאים, תרומה מהפיזור הקוהרנטי שנבעה מאינטראקציה בין המושבות מילאה תפקיד חשוב בפיזור האקוסטי של מיקרוציסטים. בתדירות נמוכה יותר, קוהרנטיות פיזור חזקה יותר בין תאי מיקרוציסטים התרחשה ב- VC נמוך יותר. מודל הפיזור הקוהרנטי בחלקו תפס את דפוס הפיזור הכללי ותאר את תלות התדר והעומק. כך נחשפו דפוסי הפיזור הקשורים מטבעם לתכונות האקוסטיות של אוכלוסיית המיקרוציסטים. התוצאות שלנו מראות כי אקוסאונדר מדעי יכול למדוד באופן מהימן  $S_V$  ומאפשר לכמת ציאנובקטריה הנושאת גז ואת ההטרוגניות האנכית שלה. כלי אקוסטי זה חשוב לניטור יעיל של דינמיקות האוכלוסייה של ציאנובקטריות נושאות גז ועשוי לסייע בהגנה על בריאותן של מערכות

אקולוגיות של בני אדם, בעלי חיים ומים. כמו כן, הכלי אמור להקל משמעותית על המחקרים החשובים מבחינה אקולוגית העוסקים בהשפעת גורמי הסביבה על פריחה של ציאנובקטריה נושאת גז.



**איור 109:** הפרופילים האנכיים של  $S_v$  שנמדדו בכנרת עם מערכת אקוסאונדר תלת ערוצית (Data) בהשוואה לתוצאות המודל האקוסטי שהורץ עבור כל אחד מהתדרים 70, 120 ו-333 קילוהרץ.

## ספרות

Chu, D., P. H. Wiebe, G. L. Lawson, and N. J. Copley. 2016. "Estimation of size, orientation, and abundance of marine organisms using acoustic scattering model-based inversions," J. Acoust. Soc. Am. 139: 2885-2895.

## 3.10 שימוש בציוד אקוסטי מתקדם לזיהוי דגים והערכת ביומסה למטרת ניהול ממשק דייג אופטימלי בכנרת



**במימון  
משרד המדע  
והטכנולוגיה**

**איליה אוסטרובסקי, היקרו הומה בשיתוף עם יונתן  
בלמקר (אוניברסיטת תל אביב), אבי אוסטפלד  
(טכניון), ובוריס קצנלסון (אוניברסיטת חיפה)**

- יש צורך בזיהוי של סוגי הדגים בעזרת טכניקות אקוסטיות לשם תמיכה בממשק הדייג בכנרת ולשם ניהול מערכת אקולוגית.
- מטרת המחקר הינה פיתוח שיטות אקוסטיות לזיהוי דגים בכנרת.
- באמצעות משדר אקוסטי רחב פס בוצע זיהוי דגים בתנאים טבעיים. בנוסף נאספו נתוני אמת לצורך ניתוח נוסף.

### מטרת המחקר

מטרת המחקר הינה קבלת מידע אמין לגבי גודל ויצרנות אוכלוסיות מיני דגי השלל המסחרי בכנרת על ידי שימוש בטכניקה חדשנית לצורך ניטור, בעזרת מכשור עם משדר אקוסטי בפס רחב. מידע זה ישמש להערכת מצבן הנוכחי של אוכלוסיות דגי הכנרת, ולאחר מכן יעבור אינטגרציה עם מודל מתקדם במטרה לייעל את ממשק הדיג בכנרת.

**רקע**

דגי הכנרת מושפעים בעשורים האחרונים ממגוון גורמים הכוללים: העשרת אוכלוסיות של דגים מסחריים, תמורות בלחץ הדייג ושינויים במערכת האקולוגית של הכנרת. הבנת השפעתם של גורמים אלו על הדגה ופיתוח מדיניות בר-קיימא לניהול הכנרת, מחייבים הערכות מדויקות של פרמטרים שונים של אוכלוסיות הדגים.

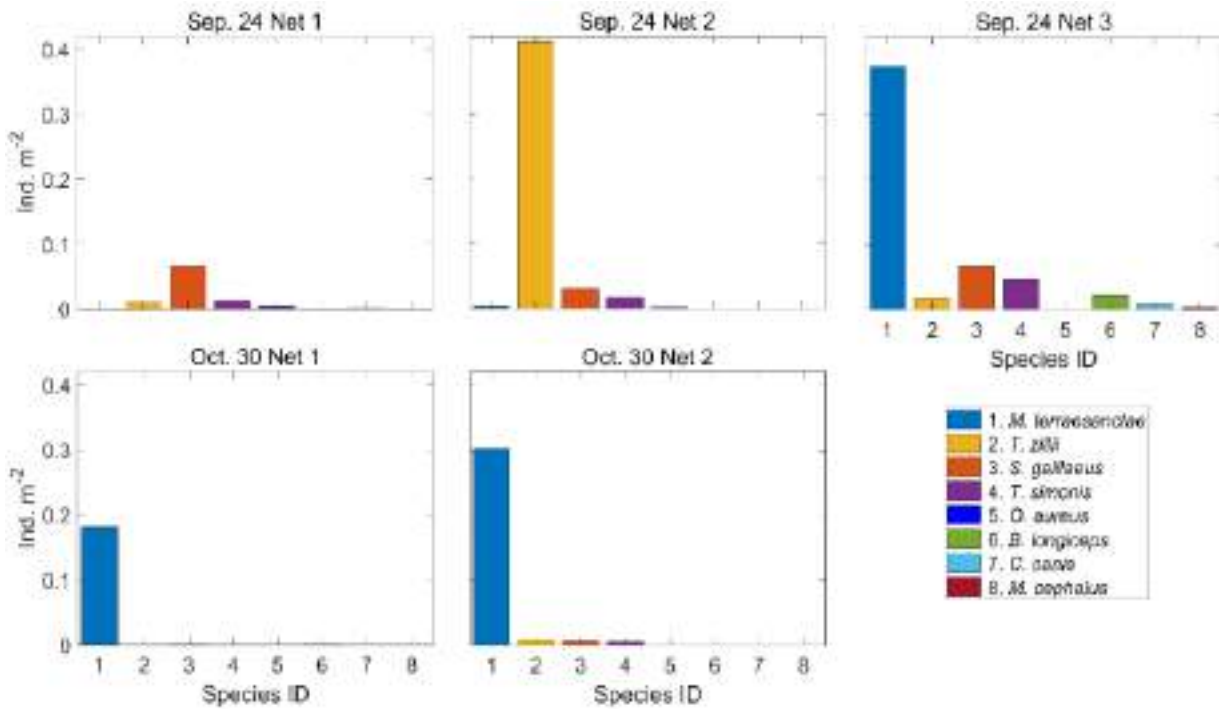
**שיטות**

ניטור הדגה התבצע באמצעות מכשיר אקוסטי רחב פס המאפשר הערכת ביומסה עבור המינים העיקריים הניתנים לזיהוי אקוסטי. משדר אקוסטי רחב פס שונה ממשדרים אקוסטיים רגילים בכך שהוא משדר גלי קול על פני ספקטרום רחב של תדרים ולא בתדר אחד קבוע. הניטור האקוסטי רחב הפס מאפשר, בפעם הראשונה, הערכות ביומסה של דגים תוך הפרדה בין מינים וקבוצות דגים מסוגים שונים. שיטה זו מהווה פריצת דרך בהשוואה לשיטות קודמות אשר מספקות אומדנים של ביומסה ללא הבחנה בין מינים / קבוצות פונקציונליות. נתונים אלה יוכלו לשמש כבסיס למודלים, הלוקחים בחשבון הן את הדגים והן את תפוצתם, במטרה לקדם ניהול דייג אופטימלי ובר קיימא.

המדידות נעשו על ידי אקוסאונדר רחב פס מדגם Simrad EK80, המצויד במתמר מפוצל אלומה ES70-7C ומאפשר איסוף נתוני אקוסטיקה בפס רחב בתחום 45-90 kHz. משך הפולס וקצב הפינג היו 0.512ms ו-2.5Hz, בהתאמה. במהלך כל ניסוי נאספו נתונים במשך כ-20 - 10 דקות. כיול האקוסאונדר נעשה על ידי כדור טונגסטן בקוטר 38.1 מילימטר. נאספו נתונים אקוסטיים בכנרת בספטמבר ובאוקטובר 2020 במטרה לחקור את ההחזר מהמטרות כפונקציה של התדר (TSFR) של דגים בעומקים שונים. הניסויים באגם נערכו מהספינה "חרמונה". עיבוד הנתונים האקוסטיים והערכת עוצמת ההחזר (TS) ופונקציית התדר (TSf) נעשו בעזרת תוכנת Echoview 9. המטרות שיוחסו למסלולי הדגים הוגדרו על ידי תוכנת Echoview. במטרה לסווג מטרות אקוסטיות לקבוצות דגים השתמשנו באלגוריתם המקבץ (MacKay, K-Means) (2003; Steinley, Brusco, 2007). אלגוריתם זה מייחס כל נתון נקודתי לאחד המקבצים על ידי הפחתת סכום הריבועים בתוך המקבץ (clustering). הפלגות סקר אקוסטיות עם אקוסאונדר רחב פס בוצעו בכנרת במקביל לדיגום דגים ברשת סקלווה, של עין-גב, בעלת גודל עין של 2 ס"מ. הדגים שנתפסו זוהו ונמדדו (אורך).

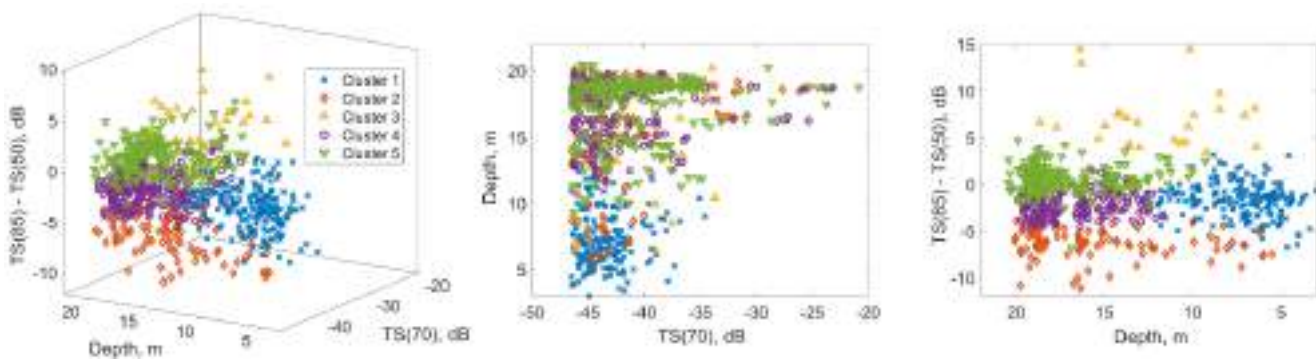
**תוצאות ודין**

הדגים הנתפסים ביותר בסקרי השדה היו הלבנון (*Mirogrex terraesanctae*) והאמנונים (*Sarotherodon galilaeus*, *Tilapia simonis*, *Tilapia zillii*, *Oreochromis aureus*). היו הבינית, הבורי והכסיף. בספטמבר האמנונים היו הדומיננטים ברשת 1 ו-2, בעוד שלבנונים היו הדומיננטים ברשת 3. באוקטובר הלבנון היה הדג הדומיננטי הן ברשת 1 והן ב-2 (איור 110).

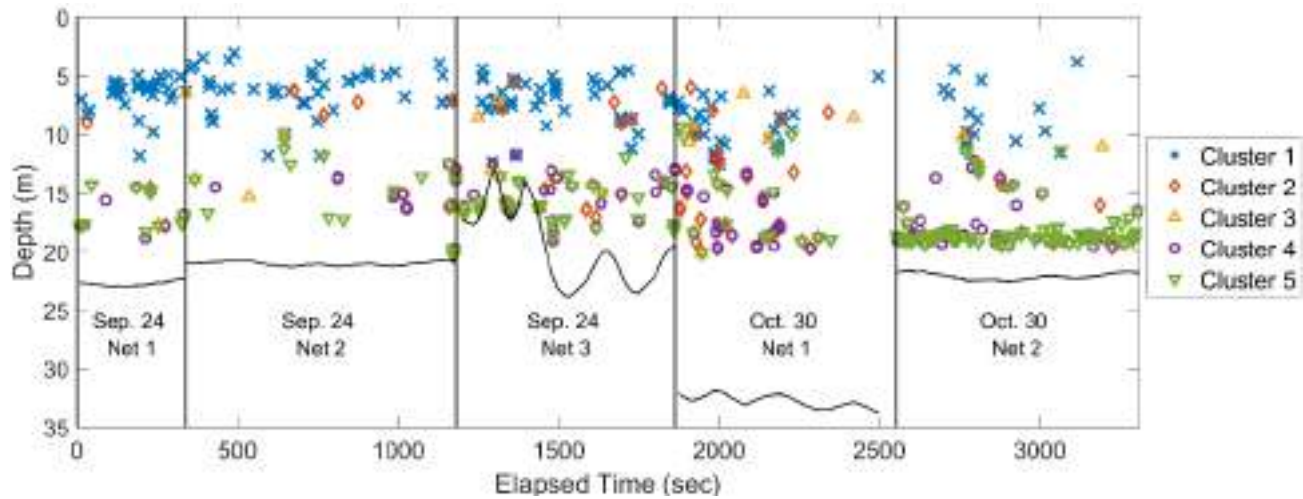


**איור 110 :** צפיפות מיני דגים שונים ברשת הסקלווה.

עבור שימוש באלגוריתם המקבץ - K-Means של המטרות האקוסטיות שנמדדו על ידי האקוסאונדר רחב הפס בחרנו את המאפיינים הבאים: עוצמת ההחזר (TS), עוצמת ההחזר בתדר 70 קילוהרץ (TS(70)), ההפרש בין עוצמות ההחזר בין התדרים 85 ל-50 קילוהרץ (TS(85)-TS(50)) ועומק. לפי התוצאות ניתן להבדיל בין 5 מקבצים המבוססים על משתני האקוסטיקה בפס רחב ומיקום המטרה בעמודת המים (איור 111). לדוגמא, מטרות ממקבץ 1 היו ממוקמות בשכבת המים של עשרת המטרים העליונים. מקבצים 4 ו-5 היו ממוקמים באותו חלק של עמודת המים, העמוק מ-10 מטר (איור 112), ובנוסף הראו דגמים דומים של תפוצות התדרים. הדבר אפשר לנו לצרף את המקבצים 4-5 לשם המשך עיבוד המידע.



**איור 111:** תוצאות מקבצי K-Means. חמישה מקבצי מטרות אקוסטיות מוצגים באנליזה. פאנל שמאלי – מבט תלת מימדי. פאנל מרכזי – מבט על, פאנל ימני – מבט צד.



**איור 112:** אקוגרמה של מטרה יחידה מדגימה את מיקומי העומקים של המטרות המסווגות ב-5 מיקומי דיגום. הסמלים מציינים מקבץ זהים לאלו שהוצגו באיור 111. הקו התחתון מציין את מיקום קרקעית האגם. ציר הזמן מבטא את הזמן המצטבר מאז תחילת הדיגום האקוסטי הראשון. הקווים האנכיים מייצגים את תחילת וסיום כל אחת מהמידות האקוסטיות.

השוואת הצפיפויות של קבוצות הדגים הדומיננטיות (לבנון ואמנונים) עם צפיפויות המטרה של המקבצים הדומיננטיים מראה שהלבנונים עשויים להיות משויכים למקבץ 1 והאמנונים משויכים למקבצים 4 ו-5. על מנת לבדוק זאת, חישבנו את הקורלציה בין כמות הדגים ב-5 תפיסות הרשת עם כמות המטרות של המקבצים. לקחנו בחשבון שעוצמת ההחזר של דג (שאורכו מעל 12 ס"מ), ברשת 2 ס"מ, שווה לעוצמת החזר של  $-46$  dB. התוצאות מראות מקדמי קורלציה חזקים יחסית בין צפיפות מקבץ 1 לבין צפיפות הלבנון ( $R=0.43$ ) ובין צפיפות מקבצים 4 ו-5 לבין צפיפות האמנונים ( $R=0.76$ ). התוצאות שלנו מראות שהגישה המוצעת לקיבוץ מטרות הינה כלי מבטיח להבחנה אקוסטית בין קבוצות דגים דומיננטיות, למטרות כימות, על ידי שימוש באקוסאונדר רחב פס. שיפורים של הגישה המוצעת יאפשרו בהמשך הפרדה טובה יותר בין מינים כך שתוכל להוות מכשיר שימושי לניטור שגרתי של דגים באגם הכנרת.

### ספרות

Steinley, D., & Brusco, M. J. (2007). Initializing k-means batch clustering: A critical evaluation of several techniques. *Journal of Classification*, 24(1), 99–121.

MacKay, D. (2003). "Chapter 20. An Example Inference Task: Clustering". *Information Theory, Inference and Learning Algorithms*. Cambridge University Press. pp. 284–292.

# 3.11 השפעת הצומח החופי על האקולוגיה והפיתוח התיירותי של הכנרת



**במימון  
הקרן  
לשטחים  
פתוחים**

**איל אופיר, גדעון גל, תמר זהרי, דוד קמינגס, עמית דולב (רט"ג), אביטל גזית (אוניברסיטת תל אביב), דנה בכר (איגוד ערים כנרת) דפנה עמר, פיראס תלחמי (רשות המים)**

- בשנת 2019 התחלנו בפרויקט שמטרתו לאמוד את השפעת הצומח החופי על האקולוגיה והפיתוח התיירותי של הכנרת.
- מטרת הפרויקט הייתה לשפר את הידע לגבי ההשפעות ההדדיות הקיימות בין צמחייה, נופשים ורביית אמנונים.
- במסגרת הפרויקט נבדקו אתרים בעלי מאפיינים שונים, חלקם עם נוכחות של נופשים וחלקם ללא.
- תוך שימוש בידע הנצבר נבחנו תרחישי ניהול צומח בעזרת המודל האקולוגי.
- גובשו המלצות תפעוליות לניהול הצומח באגם.

## מטרת המחקר:

בשנת 2019 התחלנו בפרויקט דו שנתי שמטרתו לאמוד את השפעת הצומח החופי על האקולוגיה והפיתוח התיירותי של הכנרת. הפרויקט הוא במימון הקרן לשטחים פתוחים ושותפים לו: מהמעבדה לחקר הכנרת, חיא"ל: גדעון גל, תמר זהרי, דוד קמינגס, איל אופיר. רט"ג: עמית דולב. איגוד ערים כנרת: דנה בכר. רשות המים: פיראס תלחמי ודפנה עמר. אקולוג מלווה של הפרויקט: אביטל גזית (אוניברסיטת תל אביב).

מטרתו של הפרויקט הייתה לשפר את הידע לגבי ההשפעות ההדדיות הקיימות בין צמחייה, נופשים ורביית אמנונים. במסגרת הפרויקט נבדקו אתרים בעלי מאפיינים שונים, חלקם עם נוכחות של נופשים וחלקם ללא. בתוך האתרים נבחנו מספר חלופות לניהול ממשק הצומח כך שבסופו של דבר נוכל להצביע על החלופות אשר ממקסמות את התועלות הן לציבור הנופשים והן לאקולוגיה של האגם ממנה נהנים משתמשים רבים. הידע המתגבש כתוצאה מביצוע הסקרים יכול לשמש בתהליכי תכנון ואולי אף להוביל לתהליך תכנון בו מיושמות ההמלצות לכל שטחי האגם.

הפרויקט נחלק לשני חלקים מרכזיים: (1) ביצוע סקרי דגה באזורי נופשים (חוף צינברי) ובאזורי ביקורת (אזור המעבדה), (2) גיבוש תובנות מהסקרים והרצה של תרחישי ניהול צומח במודל האקולוגי.

במהלך השנה החולפת (2020) סיכמנו את הידע אשר נאסף בשנה קודמת (ראה דו"ח ח"א"ל מס' T4-2020). לאחר סיכום הידע שנאסף בוצע שימוש במודל האקולוגי של האגם אשר מאפשר בחינה של תהליכים וקבלת תמונה כוללת על המתרחש באגם. המודל המרחבי אשר היה בשימוש באגם הינו ברזולוציה של 200X200 מטר. בבחינה של האזורים שאושרו לכיסוח נראה היה כי הרזולוציה גסה מדי ויש צורך בבניה של מודל מרחבי חדש ברזולוציה גבוהה יותר אשר בעזרתו ניתן יהיה לבחון באופן קונקרטי יותר את ההשפעה של האזורים אשר מאושרים לכיסוח. בנייה של מודל מרחבי ובחינתו היא תהליך מורכב ולצורך כך ביצענו שימוש בשכבות מידע הקיימות ברשותנו ובנוסף פיתחנו ביחד עם חברת סיסטמטיקס כלי מדף אשר יוכל להמיר את המידע למודל החדש.

### שיטות:

על מנת לבחון את השפעת הצמחייה על רביית הדגים באגם, ביצענו במהלך השנה החולפת את הפעולות הבאות:

#### 1. פיתוח של כלי אשר מתרגם את שכבות הצמחייה לקבצים שניתן להריץ במודל:

מדיניות הצומח החופי בכנרת מרוכזת על ידי רשות המים אשר מעדכנת מעת לעת את המדיניות ואף אחראית למתן אישורי כיסוח לגופים אשר מגישים בקשות אלו. המדיניות שגובשה לוקחת בחשבון את הצרכים האקולוגיים של האגם לצד צרכים של משתמשי האגם. עם זאת מעת לעת מגיעות בקשות חדשות לרשות המים אשר צריכות להבחן במסלול האישורים. על מנת שניתן יהיה להעריך את ההשפעה של הבקשות ותהליכי תכנון על האקולוגיה, פיתחנו כלי אשר יודע לתרגם את שכבת אישורי הכיסוח לקבצים אשר המודל האקולוגי מסוגל לקרוא ולהריץ. הכלי שפותח מהווה ממשק יעיל וחשוב בין כלי מדיניות לבחינה מדעית. הכלי פותח בחברת סיסטמטיקס ועושה שימוש בשפת קוד של תוכנת ה-ARCGIS. הפיתוח מאפשר המרת שכבות ניהול האישורים לשכבת מידע עבור המודל ובכך מאפשר הרצה ובחינה של השלכות הבקשות (והאישורים) על המערכת האקולוגית.

#### 2. בניית מודל אקולוגי מרחבי חדש עם רזולוציה גבוהה

המודל המרחבי אשר בוצע בו שימוש קודם היה ברזולוציה מרחבית של 200X200 מטרים (גודל תא) (איור 113 א). לצורך ניתוח אישורי הכיסוח היה צורך בבניית מודל מרחבי חדש ברזולוציה גבוהה. לשם כך, בוצע שימוש בכלי ההמרה שהוכן על ידי חברת סיסטמטיקס ובעזרתו הומרו השכבות המרחביות למודל חדש בעל רזולוציה מרחבית של 100X100 מטרים (איור 113 ב). לאחר תרגום השכבות בוצע תהליך של תיאום ובנייה מחדש של הקשרים הקיימים במודל (פונקציות) על מנת שאלו יתאימו למודל החדש. מודל זה שימש לצורך בחינה של תרחישי הצומח וניתוח ההשפעה של הכיסוח האפשרי על אוכלוסיית אמנוני הגליל.





**איור 113:** השוואה בין שטח החישוב במודל המרחבי. השטחים הכחולים אלו האזורים שאושרו לכיסוח והשטחים השחורים הם אלו אשר מחושבים במודל. איור א' מראה את השטח במודל של 200X200 ואיור ב' את מודל ה-100X100. יש לשים לב להבדלים בגודל השטחים השחורים. ככל שהרזולוציה גבוהה יותר, השטחים מדויקים יותר וכך תוצאות המודל.

### 3. הרצה של תרחישים הבוחנים את השפעת הצומח על אוכלוסיית אמנון הגליל

התרחישים נחלקו לשני סוגי מפלסים - נמוך וגבוה. מפלס נמוך מייצג ערכי מפלס בהם מרבית הצמחייה החופית נמצאת מחוץ למים ואילו מפלס גבוה מייצג שנים בהם ההצפה של הצמחייה החופית היא מאוד גבוהה. בשל שני החורפים האחרונים, נראה כי תרחישי המפלס הגבוה הם רלוונטיים יותר לניהול האגם אולם באם המצב ישתנה ניתן יהיה לבחון את תרחישי ניהול הצומח במפלסים נמוכים. אחד הגורמים הנוספים הניתנים לניהול (על ידי משרד החקלאות) הוא מאמץ הדיג. שינוי במאמץ הדיג משפיע על אוכלוסיית אמנון הגליל. על כן, יש חשיבות בבחינת השפעת הצומח ברמות שונות של מאמץ דיג. על מנת לבחון את השפעות השינוי של הצמחייה ומאמץ הדיג עבור כל אחת מהן, נבחרה שנת בסיס לאורה בוצעו הגדלה/הקטנה של הפרמטרים. בכמות הצמחייה שנת הבסיס הייתה 2015 בה בוצע מיפוי ודגימת היקף הצמחייה למערכות גיאוגרפיות (במסגרת פרויקט קודם). מאמץ הדיג נשען על המאמץ שהיה בשנת 2016 (זו השנה האחרונה בה התקבלו נתונים מלאים מאגף הדיג/משרד החקלאות), מפלס גבוה הוא ביחס לנתוני המפלס בשנת 2005 ונמוך בשנת 2009. עבור השנים האלו בוצע חישוב של מיקום המפלס וכמות הכיסוי על ידי המרת הנתונים לתוכנת ממ"ג תוך התחשבות בשיפועים של הליטורל. על מנת לבחון את ההשפעה של הצמחייה ומאמץ הדיג נערכה בחינה של מצבי קיצון (כמות צמחייה פי 5 או 0.1 ומאמץ דיג פי 3 או 0.1 ביחס לשנת 2015). מצבי קיצון אלו נועדו לבדוק האם יש לפרמטרים אלו השפעה על אמנון הגליל ולאמוד את כמותה. לאחר הכיול, המודל הורץ עד לשנת 2030 אולם בדו"ח זה מוצגות התוצאות עד 2026 חזת לצרכי גזירת מדיניות של ניהול היקף הצומח ומאמץ הדיג. בסיכומו של דבר בוצעו 50 הרצות עבור רמות מפלסים שונות.

### 4. לצורך בחינת ההשפעה של האזורים שאושרו לכיסוח בוצע שימוש בשתי שיטות מידול שונות:

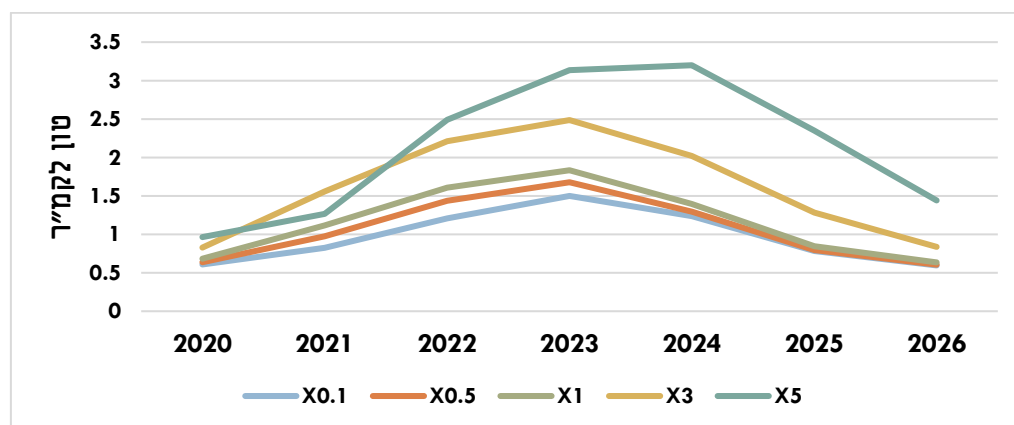
**בתי גידול** - הגדרה של האזורים המאושרים לכיסוח כבתי גידול ייחודיים לאמנון הגליל ובחינה של ההפרעות לשהייה שלהם בבית הגידול על ידי נופשים ומשתמשים אחרים. תרחיש שעבורו נקבע ערך הפרעה של 1 מציג מצב בו בית הגידול מופרע לחלוטין ולא מאפשר שהייה של אמנון הגליל. לעומת זאת, תרחיש שעבורו נקבע ערך הפרעה של 0.01 מציג מצב בו בית הגידול מאפשר שהייה אופטימלית של האמנונים. במציאות המצב הוא בטווח הביניים בו בית הגידול מופרע לאמנונים חלק מהשנה בשל פעילות נופשים ומתרחצים ואילו בחלק מהשנה אין בו הפרעה. לכן נכון יותר יהיה לבחון את ההשפעות סביב להפרעה של 0.5 המייצגת הפרעה לאמנון הגליל כחצי שנה (מאי עד ספטמבר).

שכבה סביבתית- הגדרה של אזורי הכיסוח כאזורים בעייתיים לאמנון הגליל ושימוש בפונקציה המרחיקה אותם מאזורים אלו. בשיטה זו, אזורי הכיסוח הוגדרו כשכבה של אזורים בהם אמנון הגליל מעדיפים שלא לשהות בהם, כלומר הם לא מבצעים שימוש באזורים אלו כמעט כל השנה עם דגש מיוחד על תקופת הרבייה שלהם. שיטה זו מצמצמת את האזורים הנגישים לאמנון הגליל לרבייה. על מנת לעשות זאת בוצעו שינויים בשכבת הצומח בשנת 2016 כך שהאזורים שאושרו לכיסוח נלקחו בחשבון ולמעשה נוצרו שכבות חדשות ללא צמחייה בכלל באזורים שאושרו לכיסוח.

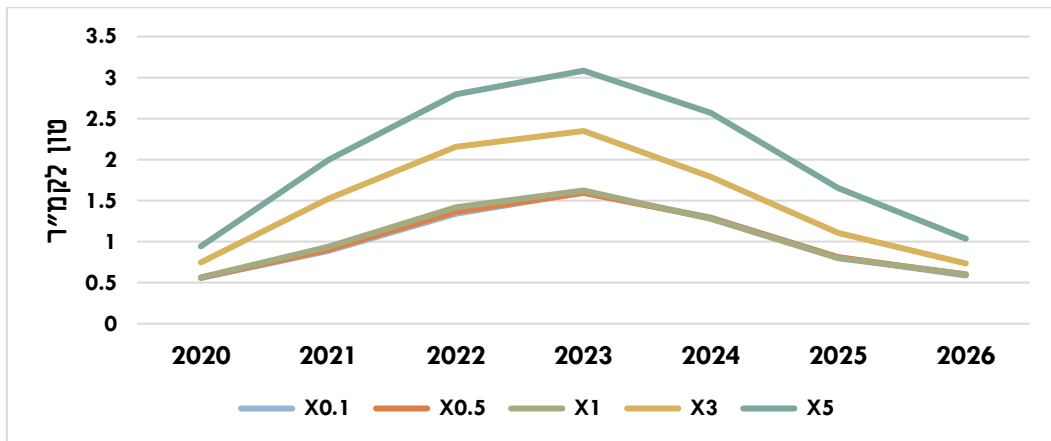
### תוצאות:

#### תוצאות הרצת המודל ללא התחשבות באזורים המאושרים לכיסוח

מתוך כלל התוצאות הרלוונטיות (לאמנון הגליל) התמקדנו בשינויים בביומסה ובשלל הדיג שלו. התוצאות מוצגות עבור מפלס נמוך ומפלס גבוה אם כי עם עליית המפלס השנה וההבנה שכנראה ניתן יהיה לנהל את הכנרת במפלסים גבוהים, נראה שתוצאות המפלס הגבוה הן רלוונטיות לקבלת ההחלטות לשנים הקרובות. אולם גם תוצאות לגבי מפלס נמוך מציגות זווית חשובה לגבי מדיניות חוסר, קרי, מצבים של מעט צומח מוצף ולחץ על אזורי הקינון של אמנון הגליל. כפי שנראה בתוצאות (איורים 114 ו 115) הביומסה של אמנון הגליל משתנה לא רק בגלל היקף מאמץ הדיג וכמות הצמחייה, אלא גם בשל פרמטרים של מארג המזון באגם (כמות הטריפה שלהם וכמות האוכל הזמינה להם) אולם הצמחייה ומאמץ הדיג בהחלט משפיעים על כמות הביומסה. התוצאות, כפי שמומחשות באיורים 114 ו 115, מצביעות על כך שלכמות הצמחייה המוצפת יש השפעה על הביומסה. במפלס גבוה ונמוך כאשר אנחנו מגדילים את היקף הצמחייה המוצפת לפי חמש (x5), נראית עלייה בביומסה של עד לפי שלוש (מטון לקמ"ר לשלוש טון לקמ"ר) בשנות השיא 2023/4. אינטרפולציה של הערכים בשנת 2023 מצביעה על כך שכל הכפלה של כמות הצומח המוצף ביחס לזה שהייתה בשנת 2015 מוסיפה 0.32 טון לקמ"ר בביומסה של אמנון הגליל. המשמעות לאגם היא הכפלה ב- 168 (שטח פני האגם) כלומר תוספת של 54.7 טון לכלל האגם. מספר זה יכול לשמש כמספר בסיס בחישובים של הפחתת כמות הצומח המוצף הניתנת באישורים. ההבדל בהשפעה של כמות הצמחייה במפלס גבוה לזו במפלס נמוך (איורים 114 ו 115) בא לידי ביטוי בהשפעה של כמות הצמחייה המוצפת בערכים של 0.1x ו 0.5x. בעוד שבמפלס גבוה לערכים אלו כמעט ואין השפעה, הרי שבמפלס נמוך הם מפחיתים את הביומסה של אמנון הגליל ב- 0.15 טון לקמ"ר במעבר בין 1x ל 0.5x וב- 0.17 טון לקמ"ר במעבר בין 0.5x ל 0.1x. המשמעות היא שבמפלס נמוך יש חשיבות רבה יותר לכמות הצומח המוצף ולכל אחת כסווי יש תרומה לביומסה של אמנון הגליל.



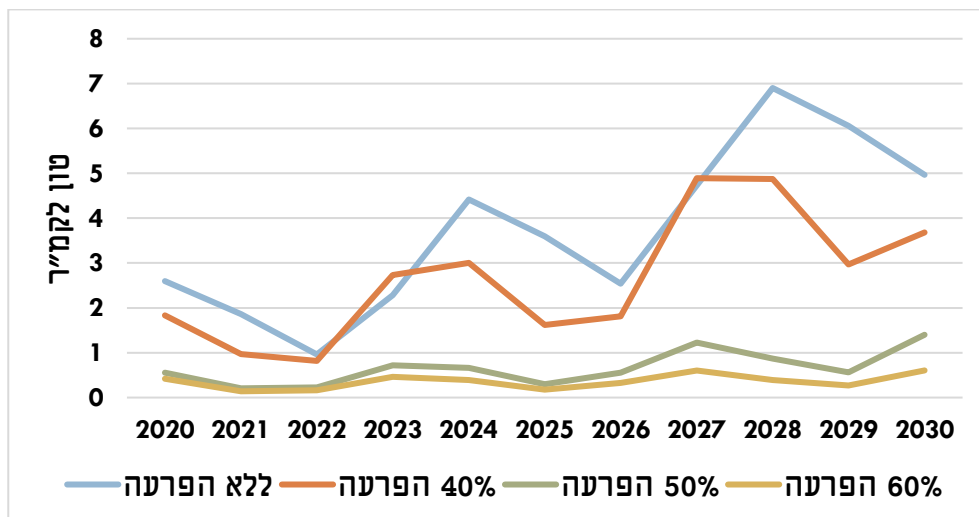
**איור 114:** מפלס נמוך- תוצאות הביומסה של אמנון הגליל במצבי צמחייה שונים ביחס למצב הצמחייה שהיה בשנת 2015. מאמץ הדיג נשאר קבוע ברמה של שנת 2016.



**איור 115:** מפלס גבוה: תוצאות הבימוסה של אמנון הגליל במצבי צמחייה שונים ביחס למצב הצמחייה שהיה בשנת 2015. מאמץ הדיג נשאר קבוע ברמה של שנת 2016.

תוצאות מהמודל הבוחנות את אזורי הכיסוח

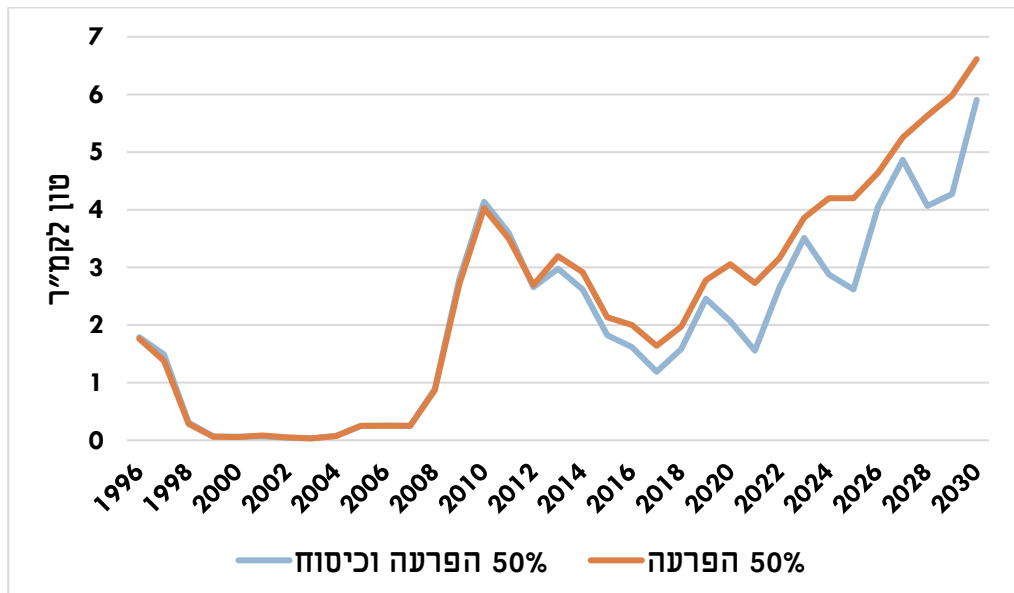
מבחינה של תוצאות תרחישי בתי הגידול, ניתן לראות כי כאשר בית הגידול לא מופרע על ידי נופשים או דייגים, הבימוסה של אמנוני הגליל היא מקסימלית ובעוד שבית הגידול מופרע ב- 60% מהשנה הבימוסה יורדת מאוד. כמו כן, ישנו רף של 40% הפרעה שחצייה שלו מורידה את הבימוסה משמעותית (איור 116). כיוון שעונת הרחצה היא בדרך כלל ממאי ועד ספטמבר, הרי שבדרך כלל היא לא עוברת את 40% מהשנה אולם באם יתבצע שימוש נוסף בשטח זה באופן שירחיק את נוכחות האמנונים מהאזור הרי שתהיה לכך השפעה על הבימוסה שלהם באגם.



**איור 116:** הבימוסה של אמנוני הגליל (טון לקמ"ר) בתרחישי בתי הגידול. הקו הכחול מייצג מצב בו בית הגידול לא מופרע לחלוטין והקו הצהוב מייצג הפרעה של 60%.

התוצאות של הרצת המודל מראות מצב בו אזורי הנופש מופרעים על ידי פעילות במחצית מהשנה ובנוסף מתבצעת פעילות כיסוח של הצמחייה (איור 117). ניתן לראות כי הפחתת כמות הצמחייה מורידה את הבימוסה של אמנוני הגליל אם כי לא באופן לינארי ורציף זאת ככל הנראה בשל מעבר לאזורי קינון אלטרנטיביים.





**איור 117:** הביומסה של אמנוני הגליל במצב בו יש הפרעה של נופשים במחצית מהשנה (הקו הכתום) ובמצב בו בנוסף מתבצע כיסוח של הצמחייה באזורים שאושרו (הקו הכחול).

### מסקנות

המידע שנאסף בשילוב התוצאות מהמודל האקולוגי מצביעות על כך שיש חשיבות רבה לכמות, צפיפות ומיני הצמחייה בכל הקשור לרביית אמנונים בכלל ואמנון גליל בפרט וגודל אוכלוסיותיהם באגם. ההשפעה היא לא בהכרח לינארית כלומר לא ניתן לחשב מספר הקושר בין היקף הצומח לביומסה משום שמעבר לצפיפות מסוימת רביית האמנונים בין הצמחייה פוחתת. כמו כן, ראינו שבחלק מהזמן אמנוני הגליל משתמשים באזורים המוגדרים כאתרי נופש כשטחי רבייה. תוצאות הרצת המודל האקולוגי מראות כי במידה והיקף הפעילות באתרי הנופש יגדל, תגבר ההפרעה לרביית אמנונים והביומסה של אמנוני הגליל באגם תקטן. אי לכך, אנו ממליצים:

1. להמשיך ולנהל מדיניות זהירה בכל הקשור לניהול הצומח החופי ומתן אישורי כיסוח צמחייה.
2. שמירה על מדיניות זהירה בכל הקשור בפתיחת אזורים לפעילות נופש ולא להרחיב את גבולותיה הן מבחינת לוחות הזמנים בשנה והן בהיקף הנופש באגם.

עונת הרבייה של אמנוני הגליל מתרחשת בדרך כלל מאפריל עד יוני. בתקופה זו האמנונים נמצאים באזורי הצומח בונים קנים, מטילים ביצים והדייגים מנצלים את אותם אזורים להתפתחותם. מחזור חיים זה מוכר אף לדייגים ולצערנו ראינו כי הדייגים מטילים רשתות באזורי הצומח ולעיתים גם בסמיכות רבה לאזורי רחצה. בנוסף דייגי חכות רבים מטילים חכות ואף נכנסים לתוך הצומח החופי במטרה להתקרב לדגים. אנו ממליצים לנסות ולהגביל פעילות זאת, הדבר יגן על אוכלוסיית האמנונים להם תפקיד חשוב במארג המזון באגם וכן כענף מסחרי.

# 3.12 יערות אשלים מוצפים – בית גידול חדש



**במימון  
רשות  
המים**

**תמר זהרי, דוד קמינגס, גדעון גל, ירון בארי-שלוין, ורנר אקרט, אדית לייבוביץ', איל אופיר, דנה בכר, עמית דולב, אביטל גזית**

- בתי הגידול ביערות האשלים התאפיינו בעוצמות אור נמוכות יחסית לחופים ללא צמחיה מוצפת, בתחלופת מים נמוכה, ובעושר של חומר אורגני מתפרק ולכן צריכת חמצן גבוהה וריכוזי חמצן נמוכים.
- ריכוזי הזרחן הכללי, האמון, והחומר המרחף בשני אתרי היערות היו גבוהים יותר מאשר במרכז האגם, וגבוהים יותר עבור מוצקים מרחפים קרוב לקרקעית מאשר בפני המים.
- הרכב המינים של הפיטופלנקטון והזואופלנקטון ביערות האשלים היה שונה מזה המוכר מהמים הפלאגים של הכנרת.
- יער האשלים המוצף בבטיחה הוא בית גידול שונה בפיסיקה, בכימיה ובביולוגיה שלו מיער האשלים מול המעבדה. חלק מהתהליכים בתוך היער המוצף בבטיחה דומים לתהליכים בהיפולימניון.

**רקע**

עקב נידוד הולך וגובר של מפלסי הכנרת התפתח בעשורים האחרונים בשולי הכנרת בית גידול שלא היה קיים בה בעבר: אזורי חוף חשוף נרחבים המתכסים ביערות אשלים. כשהמפלס עולה ומציף את האשלים, הם נעשים חלק מאזור הליטורל באגם. סבך האשלים משמש את הדגה באגם, וחשוב להצלחת הרבייה. אולם במקביל, סבך האשלים מסתיר את נוף האגם, מקשה על תפעול חופים תיירותיים, ויוצר בעיות נגישות, בטיחות ותברואה. רשות המים מקבלת בקשות ממפעילי חופים ומתושבי סובב כנרת לסלק את סבך הצמחייה מקו החוף שלהם. מכיוון שהצומח החופי המוצף הוא בית גידול חדש בכנרת, הידע לגביו מועט, ועד כה ננקטו צעדי ממשק שלא בהתאם לעיקרון הזהירות המונעת. המחקר הנוכחי בא לצמצם פערי ידע על ידי אפיון בית הגידול של יער אשלים מוצף (איסוף נתונים פיסיקליים, כימיים וביולוגיים), ולענות על שאלות ממשקיות הקשורות ליער זה. בשנת המחקר הראשונה, התמקדנו באיסוף נתונים ודיגום מסירה (בשני אתרי יערות אשלים מוצפים, מול המעבדה לחקר הכנרת (KLL) ובבטחה (BTH), ובאתר ביקורת ללא אשלים (PGH), ובביצוע אנליזות במעבדה. דיווח זה הוא תקציר של דוח מלא שהוגש לרשות המים (זהרי ושות' 2021).

**שיטות**

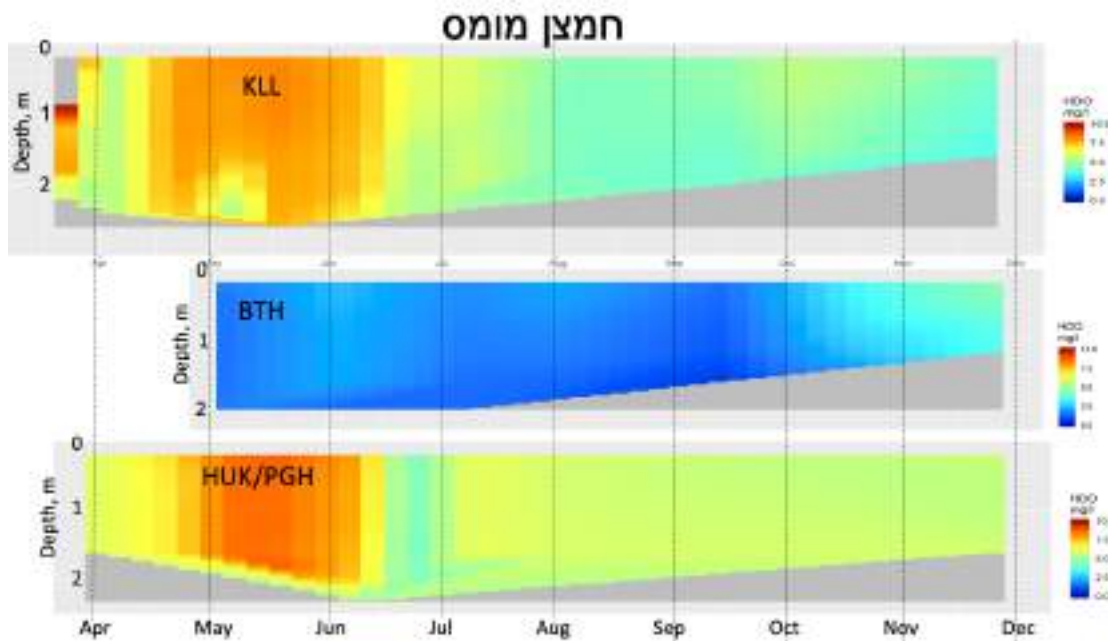
ב- 2020 דגמנו אחת לחדש לאורך חתכים בשני אתרי יער מוצף: מול המעבדה (KLL) – החל ממרץ 2020; בבטחה (BTH) – החל ממאי, ובאתר ביקורת של חוף ללא צמחייה (HUK או PGH) – החל מאפריל. באתרי היערות דגמנו ב-5 תחנות לאורך החתך, המרוחקות בכ-10 מ' זו מזו, כאשר תחנה 1 היא הקרובה ביותר לחוף, תחנה 3 במרכז החתך, ותחנה 5 הקרובה ביותר לים הפתוח. באתר הביקורת דגמנו ב-2 תחנות, שמוקמו במרחק 10 מ' ו-100 מ' מקו החוף. בכל תחנת דיגום: (1) מדדנו באמצעות מולטיפרוב שדה Manta II (יצרן: Eureka) לאורך פרופיל עומק (מפני המים ועד לקרקעית): עומק, טמפרטורה, pH, חמצן מומס, מוליכות חשמלית, (2) אספנו דוגמאות משני עומקים (0.2 מ'; 0.2 מ' מעל הקרקעית) לאנליזות כימיות (נוטריאנטים, פחמן אורגני כללי, חומר מרחף, כלורופיל) במעבדה. (3) אספנו דוגמאות לאנליזות ביולוגיות: פיטופלנקטון, פריפיטון, זואופלנקטון.

**תוצאות****מדידות בסנסורים: טמפרטורה, מוליכות חשמלית, ריכוז חמצן מומס ו-pH**

עבור ארבעת הפרמטרים שנמדדו באמצעות סנסורים (טמפרטורת מים, מוליכות חשמלית, ריכוזי חמצן מומס ו-pH) בתוך כל אתר באותה הפלגת דיגום, ההבדלים בין התחנות לאורך החתך היו מזעריים. לפיכך נסתפק בהמשך בהצגת נתונים מתחנה בודדת (לרוב תחנה 3, האמצעית) בכל אתר, המייצגת טוב את התנאים בחתך כולו. לעומת זאת, ההבדלים בין האתרים BTH ו-KLL היו גדולים. אתר KLL התנהג קצת שונה מאשר אתר הביקורת, בעוד שאתר הבטחה היה שונה מאד משני האתרים האחרים. נראה זאת בהמשך כמעט בכל הפרמטרים שנבדקו. בנוסף, באופן עקבי, לאורך התקופה כולה, בשלושת האתרים ובכל תחנות הדיגום, טמפרטורת מים, המוליכות החשמלית, ריכוזי החמצן המומס ורמת ה-pH הראו דגם דומה של אחידות לאורך עמודת המים בכל תחנה ותחנה, כלומר עמודות המים היו ללא שיכוב.

כדוגמא, בחרנו להציג כאן את הפרמטר שהראה הבדלים בולטים במיוחד בין האתרים – ריכוזי החמצן המומס (איור 118). בבטיחה, לאורך כל התקופה, ריכוזי החמצן המומס היו נמוכים מאד לאורך כל עמודת המים. ממאי עד אוקטובר ריכוזי החמצן שנרשמו נעו בין 1-2.5 מג"ל. באתר KLL ריכוזי החמצן המומס היו ברוויה (מעל 7 מג"ל) באביב, דעכו במהלך הקיץ למינימום של 3-4 מג"ל בספטמבר. הדגם של ריכוזי החמצן ב-KLL

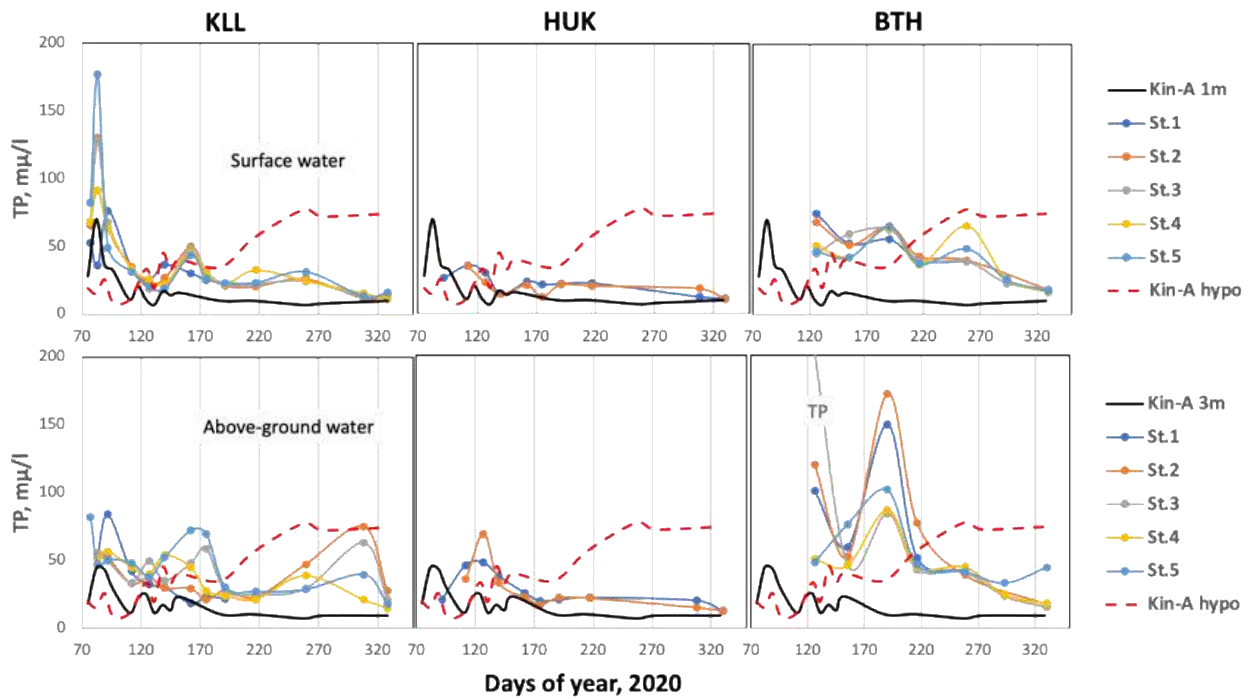
היה דומה לזה שבאתר הביקורת, PGH, אבל באופן עקבי הריכזים בתחנת הביקורת היו יותר גבוהים, כנראה עקב פחות צריכת חמצן לתהליכי פירוק חומר אורגני.



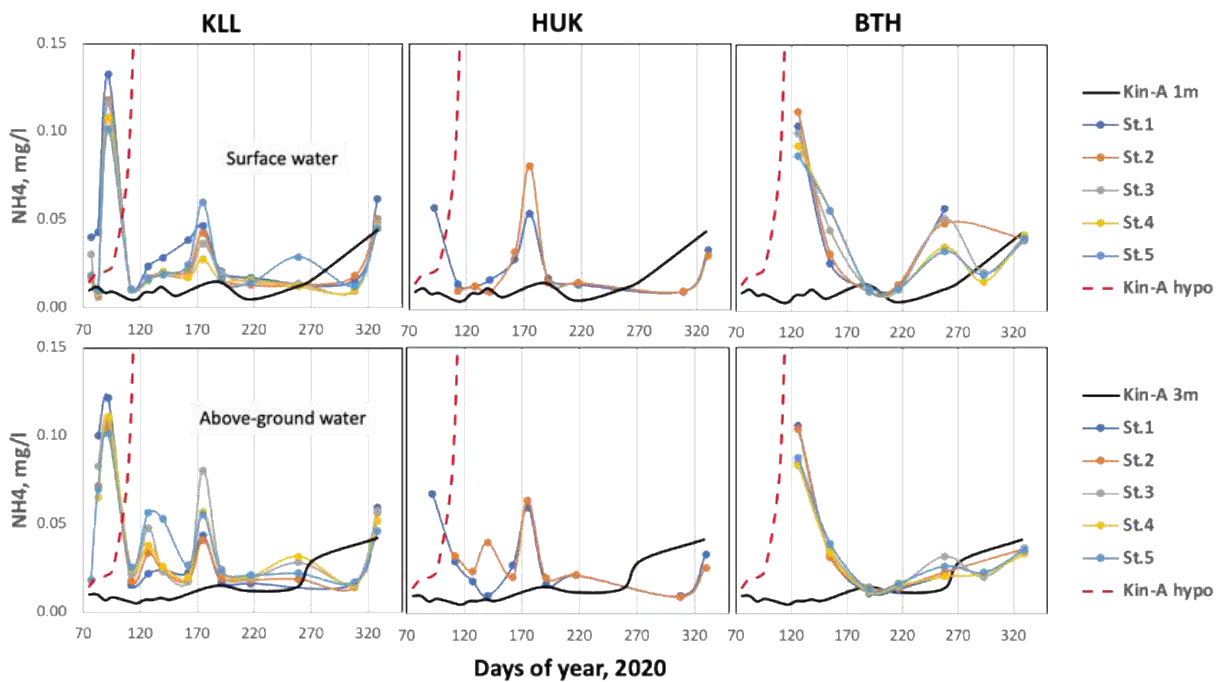
**איור 118:** השינויים עם הזמן והעומק בריכזי החמצן המומס בתחנה 3 שבמרכז החתך מול המעבדה לחקר הכנרת, (KLL), בבטחה (BTH), ובחוף הביקורת בתחנה 2 המרוחקת כ-100 מ' מהחוף (HUK/PGH).

#### נוטריאנטים

ריכזי הזרחן הכללי, האמון, והחומר המרחה בשני אתרי היערות היו גבוהים יותר מאשר במרכז האגם, וגבוהים יותר עבור מוצקים מרחפים קרוב לקרקעית מאשר בפני המים. לדוגמה, ב-KLL ריכזי הזרחן הכללי (TP) בפני השטח ובעומק היו גבוהים מאלו שבאפילימניון של מרכז הכנרת בתחנה A פי 2-3 ופי 1.5 עד 5 בהתאמה. ב-BTH ערכי הזרחן הכללי היו גבוהים עוד יותר: בפני המים ובקרבת הקרקעית ריכזי הזרחן הכללי היו גבוהים יותר מאשר באפילימניון של מרכז האגם עד פי 6.5-2 ועד פי 8-2 בהתאמה (איור 119). מבין הצורונים השונים של חנקן אשר נמדדו ביערות האשלים (חנקן כללי, חנקן מומס כללי, ניטראט, ניטריט, אמון), בלטו בעיקר ריכזים גבוהים של אמון בתוך היערות בהשוואה לריכזים באפילימניון בתחנה A (איור 120). ב-KLL ובאתר הביקורת באביב, ריכזי האמון היו גבוהים יותר מאשר באפילימניון של מרכז האגם פי 8-14, בדומה לריכזים של ההיפולמניון במרכז הכנרת בתקופה זו, ועד פי 3-4 בסוף יוני. בבטיחה בתחילת מאי הריכזים בשני העומקים היו גבוהים, פי 14-15 מריכזי האפילימניון של מרכז הכנרת בדומה לריכזי ההיפולמניון של תקופה זו.



**איור 119:** השינויים עם הזמן בריכוזי הזרחן הכללי (TP, מיקרוגרם לליטר) בשלושת אתרי הדיגום (מול המעבדה KLL משמאל, חוקוק HUK באמצע, בטחה BTH מימין) בדגימות מים מפני השטח (גרפים עליונים) ומעומק 20 ס"מ מעל הקרקעית (שעומקה נע בין 1.5 – 2.5 מ', גרפים תחתונים), בכל אחת מתחנות הדיגום שלאורך החתך בכל אתר (קיום צבעוניים). לשם השוואה מוצגים הערכים מתחנה A במרכז האגם (קו שחור עבה) בעומקים 1 מ' (גרפים עליונים) ו-3 מ' (גרפים תחתונים) וכן בהיפולמיניון (ממוצע מעומקים 30 מ' ומטה, קו אדום מקווקו). התחנות: St.1 – הקרובה ביותר לחוף, St.5 – הרחוקה ביותר מהחוף, עם מרחקים של 10 מ' בין תחנות עוקבות. בבטיחה הדיגום החל במאי 2020.



**איור 120:** כמו איור 2 עבור ריכוזי אמון.



פיטופלנקטון

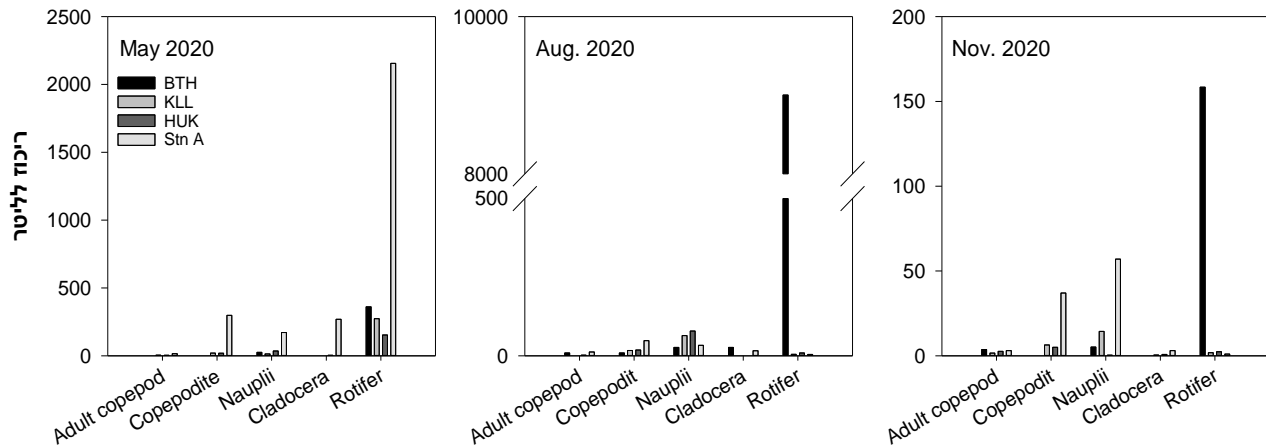
ביער האשלים שמול המעבדה לחקר הכנרת, הרכב הפיטופלנקטון היה לרוב דומה לזה שבמרכז האגם, עם הבדל בולט אחד - ביער האשלים נספרו יותר דינופלגלטים ובמיוחד פרידיניום. ב-23 למרץ "תפסנו" כתם של פרידיניום בתוך היער המוצף, עם ריכחי תאים עצומים בפני המים, של 1700 למ"ל בתחנה 5 ו-800 למ"ל בתחנה 3. לשם השוואה, במרכז האגם ריכח הפרידיניום הגבוה ביותר שנרשם במהלך הפריחה של 2020 (ב-22 למרץ) היה 460 תאים למ"ל.

הרכב המינים בדוגמאות מהבטיחה היווה הפתעה גדולה כי הוא היה שונה לגמרי מהמוכר מהניטור ממרכז האגם. הקבוצות הדומיננטיות היו דינופלגלטים, איגלנופיטה וכריפטופיטה, עם מגוון גדול של ירוקיות וכמעט ללא צורניות וכחוליות. לפחות 5 מיני דינופלגלטים שראינו בדגימות היו מינים שעד כה לא מצאנו אף פעם בכנרת. מקרב האיגלנופיטה נמצאו מינים שאנחנו רואים בדוגמאות מאגמון החולה אך לא בכנרת. גם הירוקיות בבטיחה היו ממינים הנדירים במרכז הכנרת.

זואופלנקטון

אוכלוסיות הזואופלנקטון שנדגמו בשלושה אתרים ובשלושה מועדים שונים התאפיינו בהבדלים גדולים בהרכב האוכלוסייה ובריכחי הפרטים, בין האתרים, ובין לבין האוכלוסייה שנדגמה בתחנה A, במרכז האגם. בחודש מאי, בשונה מהמועדים האחרים שנדגמו, הריכחים בתחנה A היו גבוהים באופן משמעותי מאלו שנמצאו באתרים BTH (בטיחה), KLL (המעבדה) ו HUK (אתר ביקורת). הרוטיפירים, שהיו הדומיננטים באוכלוסייה שנדגמה בתחנה A (בעומק 3 מ'), נמצאו בריכח של מעל 2000 פרטים לליטר בניגוד לריכחים של מאות בודדות באתרים האחרים.

גם בקבוצות הטקסונומיות האחרות נמצאו הבדלים גדולים בין תחנה A לשאר האתרים (איור 121). בשני המועדים האחרים, באוגוסט ונובמבר, נמצאו בבטיחה ריכחים של רוטיפירים גבוהים בהרבה מאלו שנמצאו באתרים האחרים. בולט במיוחד הריכח החריג באוגוסט, מעל 9000 פרטים לליטר. בדגימות מהבטיחה נרשם מספר גדול של מיני רוטיפירים שאינם נמצאים בדגימות הנאספות במסגרת הניטור השוטף בתחנה במרכז האגם. גם בקבוצות הטקסונומיות האחרות נמצאו הבדלים בין המצאי בתחנה A לבין המצאי באתרים האחרים, אבל קטנים יותר. מתוצאות הספירות של דיגומי נובמבר עולה כי, למעט הרוטיפירים, הריכחים של קבוצות הזואופלנקטון במרכז האגם (תחנה A) היו גבוהים מהריכחים שנמצאו באתרי הדיגום של הפרויקט. מתוך בחינה של מגוון המינים והקבוצות הטקסונומיות במועדים ובאתרים השונים, ניתן לזהות מספר מגמות בראש ובראשונה, עולה כי כאשר בוחנים את המגוון בין הקבוצות הטקסונומיות הראשיות בבטיחה המגוון הוא הקטן ביותר, בכל שלושת המועדים שנבחנו. מגמה שניה שעולה היא שאתרי הביקורת הם בעלי מגוון גדול יותר מאשר האתרים עם האשלים, הן לגבי הקבוצות הטקסונומיות הכלליות והן לגבי מגוון מיני הרוטיפירים, למעט התוצאות מהדיגום בחודש מאי. ניתן לראות תמיכה במגמות אלו מתוצאות חישוב מדדי מגוון המינים של שאנון וסימפסון. למעט הדיגום בחודש מאי, ערכי מדדי המגוון שהתקבלו היו נמוכים באופן משמעותי בבטיחה לעומת אתר KLL ואתרי הביקורת.



**איור 121:** ריכוז הקבוצות הטקסונומיות השונות של הזואופלנקטון כפי שנדגמו בשלושה מועדים שונים באתרים הבטיחה (BTH), המעבדה (KLL), באתר הביקורת (HUK) ובתחנה A. יש לשים לב להבדלים בסקאלות בציר האנכי בין האיורים.

### פריפטון

באביב ועד יולי ענפי האשל והקנה ב-KLL וגם בבטיחה, היו מכוסים ב"מרבד צורניות", עם שלטון מוחלט וצפיפות עצומה של צורניות מסדרת ה-Penalles. אצות אלו מהוות מזון עשיר, ואכן צפינו מספר פעמים בדגיגי אמנון המלחכים מהענפים והקנים את מעטה האצות.

### דיון ומסקנות

יערות האשלים המוצפים מהווים בית גידול חדש אשר נחקר לעומק לראשונה בעבודה זו. המשך קיומו של בית גידול זה, התעצמותו או נסיגתו תלויים במצבי המפלס העתידיים. על פי תחזיות שינויי האקלים באזורנו, צפויים מחזורים של רצפי שנים שחונות בתדירות גבוהה יותר מאשר בעבר. במצב זה צפוי שיערות האשלים בשולי האגם יתעצמו. ליערות האשלים המוצפים תרומה לתפקוד האגם. למשל, באביב, יערות האשלים המוצפים משמשים מדגרה לפרידיניום (מרץ 2020 באתר KLL). באביב ובקיץ הפריפטון על ענפי העצים המוצפים מהווים מקור מזון עשיר לדגיגים.

בתי הגידול ביערות האשלים מאופיינים בעוצמות אור נמוכות יחסית לחופים ללא אשלים, בתחלופת מים נמוכה יותר, ובעושר של חומר אורגני שפירוקו צורך חמצן וגורם לריכוזי חמצן נמוכים. תופעות אלו מוקצנות בבטיחה, שם היער ותיק וסבוך יותר מאשר היער שמול המעבדה לחקר הכנרת, משתרע על פני שטחים נרחבים יותר, וחגורת יער טבוע בעובי של כ-200 מ' מפרידה ותורמת לחסימת תחלופת המים. בקעת הבטיחה מישורית, בעוד שחוף המעבדה לחקר הכנרת משופע יותר. בנוסף, אזור הבטיחה נמצא בזווית שונה לכיווני הרוח העיקריים בכנרת (מזרחיות בחורף, מערביות בקיץ) והוא מוגן יותר מהשפעת רוחות אלו. ההבדלים הגדולים בריכוזי החמצן המומס שנמדדו בשני האתרים (איור 118) הם עדות עקיפה לתחלופת מים זעומה בבטיחה בהשוואה לזה של אתר המעבדה. בבטיחה בלטה הצטברות חומר אורגני (בעיקר נשר מהעצים) רב יותר על הקרקע בינות העצים. מדובר בתהליך מתמשך לאורך שנים רבות יותר, לכן צפוי שצריכת החמצן כתוצאה מפירוק חומר אורגני זה תהיה גדולה יותר בבטיחה מאשר באתר המעבדה. חלק מהתהליכים בתוך היער המוצף בבטיחה דומים לתהליכים בהיפולימיניון ובעקבות כך גם מאפיינים של שתי סביבות אלו דומים: עוצמת אור נמוכה, העדר תחלופת המים עם יתר האגם, תהליכי פירוק של חומר אורגני הצורכים חמצן וגורמים לדלדול בחמצן מומס, pH נמוך, מוליכות גבוהה, וריכוזים גבוהים של חומרי דשן.

התנאים השונים כל כך מאלו שבאפילימניון מתבטאים בפלורה ופאונה אחרים מאלו שאנחנו מכירים במרכז האגם ואפילו ביער האשלים הצעיר והדליל יותר שמול המעבדה. בלט מאד השוני בהרכב המינים של הפיטופלנקטון והזואופלנקטון בין הבטיחה לבין האתרים האחרים, ובפרט שבבטיחה נמצאו מינים שלא מוכרים לנו מ-50 שנות ניטור במרכז האגם. בנוסף, נמצא שמגוון מיני הזואופלנקטון בבטיחה נמוך משמעותית מהאתרים האחרים. למיני הפיטופלנקטון הדומיננטיים ביער האשלים, הדינופלגלטים, הקריפטופיטה, והאיגלנופיטה, תכונות אופייניות: (1) מיקסוטרופיה: היכולת להיזון גם על ידי בליעת חלקיקים או על ידי קליטת חומרים אורגניים מומסים, בנוסף ליכולת הפוטוסינטיטית. זה לא מפתיע עקב עוצמות האור הנמוכות במים שבסבך היער המוצל, ועקב הריכוזים הגבוהים של חומר אורגני במים. (2) יכולת תנועה עצמית בשחייה שכנראה חיונית בתנאים של הסבך הצפוף בו כמעט ואין תנועת מים.

### **ספרות**

זהרי ת', גל ג', בארי-שליון י', אקרט ו', אופיר א', קמינגס ד', בכר ד', דולב ע', גזית א'. 2021. יערות אשלים מוצפים – בית גידול חדש בכנרת. דוח שנתי לרשות המים. דוח חיא"ל מס' T1-2021.

# 3.13 עיצוב מדיניות המים למטרות של ניהול בר קיימא



צילום: עוז צברי-דר.

במימון  
משרד  
המדע  
והטכנולוגיה

## ארקדי פרפרוב, גדעון גל

- סקר של המודעות הסביבתית בהקשר של הכנרת העלה שרמת המודעות הינה בינונית.
- נבחנו סדרה ארוכה של תרחישים שכללו שינויי מפלס ושינויי עומסי נוטריינטים על פני טווח רחב של תנאים.

### רקע

הבנת העובדה כי משאב המים הינם משאב מוגבל, הובילה לפיתוח הרעיון של ניהול משאבי מים ברי קיימא, אשר מבוסס על יציבות אקולוגית, הכוללת בתוכה מרכיבים רעיוניים של מגוון ביוטי, resistance ו-<sup>6</sup>resilience של מערכות אקולוגיות אקווטיות. יציבות (ומרכיביה) הינה כלי שימושי בעיצוב מדיניות המים

<sup>6</sup> בהיעדר תרגום עברי למושגים אלו אנו משתמשים כאן במושגים הלועזיים.

דו"ח ניטור ומחקרי כנרת 2020, המעבדה לחקר הכנרת, חיא"ל

וניהול בר-קיימא הקושר בין מרכיבים חברתיים ואקולוגיים. הגדרות מעשיות ויישומיות של יציבות אקולוגית ומרכיביה אינן נפוצות. במחקר זה אנו בוחנים את המודעות הסביבתית של אוכלוסיות שונות ביחס לכנרת, המהווה גורם מנבא טוב ליכולת לזהות איומים סביבתיים ומידת הפעילות והמעורבות הקהילתית.

### מטרות

1. אמידת מידת ההבנה והמודעות הקיימת של הציבור לגבי שירותי המערכת אקולוגיים של הכנרת.
2. כימות היציבות האקולוגית ומרכיביה: מגוון ביוטי, resilience ו-resistance.

### הערכת המודעות

בשנה הראשונה נחקרו המשתנה החברתי (מודעות, Aw), שירותים אקולוגיים עיקריים (אספקת מים, שימור המערכת האקולוגית ותיירות) ויחסי הגומלין עם משתנים מניעים מרכזיים באמצעות שאלונים. תוצאות הערכת המודעות של קהילת המשיבים מסוכמות בטבלה 15.

התוצאות בטבלה מבוססות על מדגם של 128 תושבי רמת הגולן, טבריה, וחיפה כאשר 58% מהנשאלים היו נשים. התפלגות הגילאים של הנשאלים: 11.7% מתחת לגיל 20, 9.4% בין 20-30, 16.4% בגילאי 30-40, 33.6% בין 40-50 ו-28.9% מעל גיל 50. מתוך כלל הנשאלים, 52% היו בעלי השכלה תיכונית, 26% על-תיכונית, ו-22% אקדמית. אמדנו את מידת המודעות הסביבתית בהקשר של הכנרת על בסיס אחת התשובות הנכונות בכל שאלון ועל בסיס התשובות של כלל הנשאלים. אחת התשובות הנכונות (Aw) הומר לביטוי מילולי עפ"י המדרגים הבאים:

"Weak":  $Aw < 45%$ , "Moderate":  $45% < Aw < 65%$ , "Strong":  $65% < Aw < 100%$

**טבלה 15:** תוצאות שאלון המודעות הסביבתית של כלל האוכלוסייה.

Issue	Aw (%)	Level of Awareness
Lake surface	47.6	Moderate
Lake volume	56.8	Moderate
% in Water supply	32.0	Weak
% in Fishery	39.2	Weak
Agency responsible for management of lake	59.5	Moderate
Agency responsible for water supply	46.8	Moderate
Awareness of Measures		
Water transfer	54.4	Moderate
Search for oil	76.6	Strong
<b>AVERAGE</b>	51.6	Moderate

**כימות של המגוון הבייתי resistance**

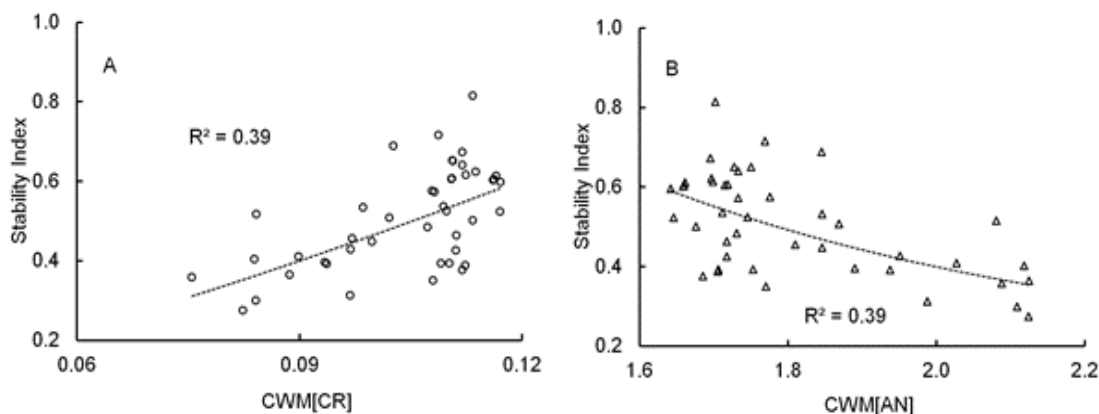
בשלב זה התמקדנו באתגרים שבפיתוח של המתודולוגיות הדרושות. שתי קבוצות של פרמטרים נבחרו כמשתני מצב. הסט הראשון כלל: ביומסה של חמש קבוצות טקסונומיות של אצות. הסט השני היה סט "איכות מים" וכלל: ריכוזים של TN ו-TP, ביומסה של *Dinophyta* ו-*Cyanophyta*, וביומסה של זואופלנקטון טורף. עומסים של N ו-P ומפלס מי האגם שימשו כמשתנים מאלצים (הפרעות) המייצגים גם את צעדי הממשק שעליהם יש למקבלי החלטות השפעה. המגוון הבייתי הוגדר בעזרת מדד הדומיננטיות (DI) ושני מדדים של שונות פונקציונלית: ערכים ממוצעים משוקללים של האוכלוסייה (CWM) המבוססים על תכונות פונקציונליות הכוללות נשימה קהילתית ספציפית ופוטוסינתזה ספציפית CWM(CR) ו-CWM(AN), בהתאמה. הדינמיקה של המגוון הבייתי חושבה על בסיס נתוני כנרת ("נתוני שדה") ועל בסיס תוצאות מידול.

אנו מציעים גישה חדשה לכימות resistance תוך שימוש בהופכי (רציפרוקאלי) של השינוי במשתנה המצב. מידול אקולוגי עם מודל DYCD היה הכלי העיקרי לכימות השונות ב-resistance וב-resilience ויחסייהם עם צעדי ממשק מרכזיים- עומסי נוטריינטים (N ו-P) והשינויים במפלס האגם. ההשפעה של מספר תרחישי ניהול על המערכת האקולוגית של האגם נבחנה ע"י הרצת תרחישים של 30 שנה.

על מנת להעריך את היחסים בין עומסי נוטריינטים ומפלס המים לבין מרכיבי היציבות, ערכנו סדרה של סימולציות שכללה שינויים ברמת עומס הנוטריינטים על פני טווח רחב של עומסים על ידי הכפלת הריכוז של N, P או N ו-P יחד (תרחישי N, P ו-N&P, בהתאמה) בכניסות לאגם. גורמי ההכפלה שהשתמשנו בהם היו 0.1x, 0.2x, 0.5x, 1x, 2x, 5x, 10x כאשר 1x מייצג את ערכי הבסיס. בתרחישי מפלס האגם המפלס שונה בטווח שבין 210.0 ל-215.0 מ'. תחת תרחישי שינויי מפלס, עומסי הנוטריינטים נשמרו קרוב לערכי מקדם הכפל של 1.

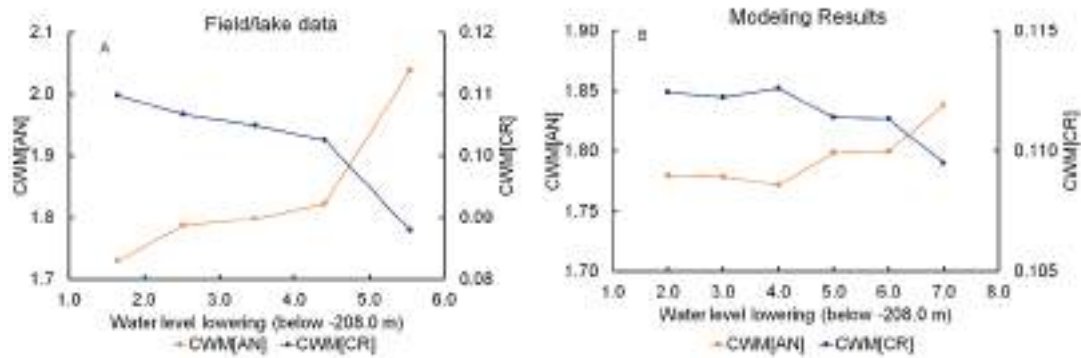
יש לשים לב כי תרחישי המפלס ותרחישי העומסים אפשרו הערכה של "השפעה נקייה" של גורם מפריע אחד (למשל, מפלס המים או העומס בלבד), בעוד שנתוני האגם מייצגים השפעה משולבת של מספר לא ידוע של הפרעות.

אנו ממחישים את תוצאות יישום הניתוח הסטטיסטי של נתוני האגם עם הרצות הסימולציה ויחסי הגומלין ביניהם. בהתחשב בשינויים במפלס המים באגם כמשתנה מאלץ פוטנציאלי משמעותי, הערכנו גם את היחסים בין מפלס המים לבין מדדי השונות. מדדי השונות הפונקציונלית (CWM[AN] ו-CWM[CR]) הצביעו על יחסים מנוגדים עם מפלס מי האגם (איור 122).



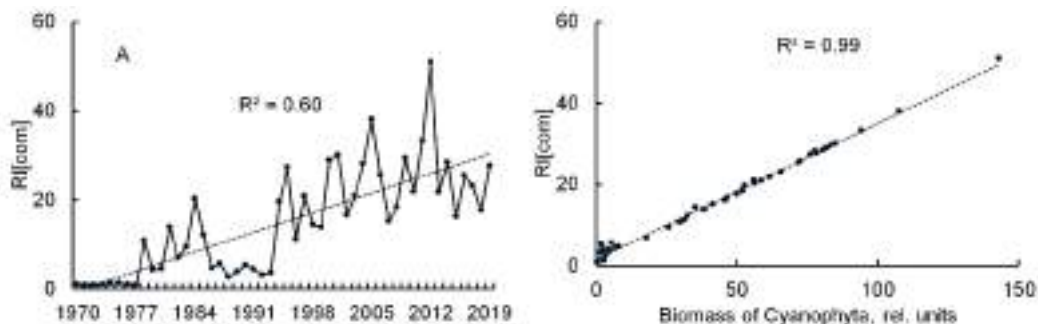
**איור 122:** קשרי הגומלין בין מקדמי המגוון הפונקציונלי (A: CWM[CR], B: CWM[AN]) ומפלס המים באגם.

היחסים בין מדדי המגוון הפונקציונלי לבין מפלס מי האגם המחושבים על בסיס נתוני האגם ותוצאות התרחישים מוצגים באיור 123.



**איור 123:** דינמיקה של מדדי המגוון הפונקציונלי (CWM[AN] ו-CWM[CR]) לעומת מפלס מי האגם (ערכי המדד הנורמלים לערכים שהושגו עבור רמת האגם של -210 מ') על בסיס נתוני האגם ותוצאות התרחישים.

הדינמיקה של ה-resilience (RI[com]) שהתקבלה מהנתונים האמפיריים הצביעה על מגמת עליה (איור 124A). אותם נתונים מראים כי השונות של RI[com] הוגדרה כמעט לחלוטין על ידי השונות של ביומסת הציאנובקטריה (איור 124B). הנתונים המוצגים באיורים 122-124 מייצגים את ההערכות הראשונות של השונות הפונקציונלית וה-resistance של המערכת האקולוגית של הכנרת והקשר שלו למשתנים מאלצים עיקריים.



**איור 124:** A. דינמיקה עיתית של מדד ה-resilience (RI[com]) בשנים 1970-2019. B. הקשר בין ביומסה של ציאנובקטריה ו RI[com].

## 3.14 השפעת בצורות מתמשכות ושינויי אקלים על האקולוגיה של הכנרת



צילום: גיל אליהו, ג'ני, מגזין מקור ראשון.

**מחקר  
במימון  
רשות  
המים**

**שחר רגב, גדעון גל, יוחאי כרמל ( הטכניון )**

- בצורות מתמשכות, עליה בטמפרטורות, בתדירות ועצמת גלי חום ואירועי גשם חריגים חזויים עקב שינויי האקלים.
- זהו מחקר מקיף ראשון שיבחן את השפעת שינויי אקלים על האקולוגיה של הכנרת.
- המחקר יבחן, באמצעות סימולציות של חבר מודלים, השפעת תרחישי אקלים של הפרעות קצרות טווח ולחצים מתמשכים על האקולוגיה של הכנרת.

### מטרת המחקר

בחינת השפעת בצורות מתמשכות ושינויי אקלים על האקולוגיה של הכנרת, זיהוי האלמנטים של המערכת האקולוגית, הרגישים לשינויי אקלים, ובכך להצביע על פעולות אפשריות של ניהול הכנרת כדי לשמר את שירותי המערכת של הכנרת.



יבחן החוסן להפרעות חולפות של גלי חום חרימות שיטפוניות ולחצים מתמשכים של עליית טמפרטורה ובצורות. כמו כן, תבחן הסוגיה האם קיימת נקודת מפנה שמעבר לה תשתנה המערכת האקולוגית של הכנרת.

## רקע

שינויי אקלים צפויים להיות חריפים במיוחד במזרח התיכון – ירידה בכמות המשקעים, עליה בטמפרטורות ועליה בתדירות ועצמת גלי חום ואירועי גשם חריגים. השינויים צפויים להשפיע על הדינמיקה של המערכת האקולוגית בכנרת על-ידי שינוי כמות ואיכות המים ובכך לגרום לאיבוד מאפיינים אקולוגיים של האגם ולפגוע בשירותי המערכת שלו. מיעוט גשמים בשילוב של צריכה חקלאית יביא לזרימה נמוכה בירדן, דבר שיגרום למפלס כנרת נמוך, עלייה במליחות והשפעה על ריכוז הנוטריינטים המגיעים לאגם. טמפרטורות גבוהות יגרמו לעליית טמפרטורת המים תוך השפעה ישירה על החי והצומח השונים וכן על עומק ותקופת השיכוב שיגרמו לשינוי בזמינות הנוטריינטים. ישנה אי ודאות לגבי כיוון חלק מהשפעות אלו מכיוון שהמערכת מורכבת וקשה לחזוי. להבנת התהליכים יש חשיבות רבה לניהול האגם, הן בהיבט שינויי אקלים והן בשאלות אחרות.

בניתוח מערכת אקולוגית דינמית יש הרבה דיונים בספרות על מושגים והגדרות שונות. במחקר זה המערכת תאופיין בעזרת שלושה מושגים: סבולת (Resilience), חוסן (Robustness), ונקודת מפנה (Tipping point). ניתן לחלק שינויים חיצוניים למערכת לפי משך השינוי: שינוי חולף ושינוי כרוני. בהתאם לכך ניתן לתאר את המערכת האקולוגית בעזרת שני מאפיינים – סבולת – יכולת המערכת לשמור או לחזור לתפקודה לאחר הפרעה חולפת, וחוסן – המערכת חסינה אם היא יכולה לשמור על תפקודה גם כאשר יש שינויים כרוניים. לצורך הנוחות אתייחס למושג חוסן אקולוגי כמכיל את שני המאפיינים הדינמיים. אין סטנדרט למדוד את המושגים האלו ואחד האתגרים הוא לפתח שיטות למדידת המושגים. המדידה תהיה בעיקרה על-ידי מידת השינוי ב- KSI (Kinneret Sustainability Index) – זמן החזרה של המערכת למצב שיווי משקל לאחר תום ההפרעה. כשזמן החזרה מהיר יותר, הסבולת גבוהה יותר. נקודת מפנה היא הגבול של מערכת חסינה. מעבר לנקודה זו המערכת תאבד את התפקוד והמבנה שלה ותעבור למבנה, או תפקוד, אקולוגי אחר. נקודות מפנה לא קיימות בכל מערכת אקולוגית ושינויים יכולים להיות הדרגתיים ולאורך פרקי זמן ארוכים. גם אם קיימת נקודת מפנה, קשה לחזות אותה ויש קושי למדל אותה – זהו אחד האתגרים במחקר.

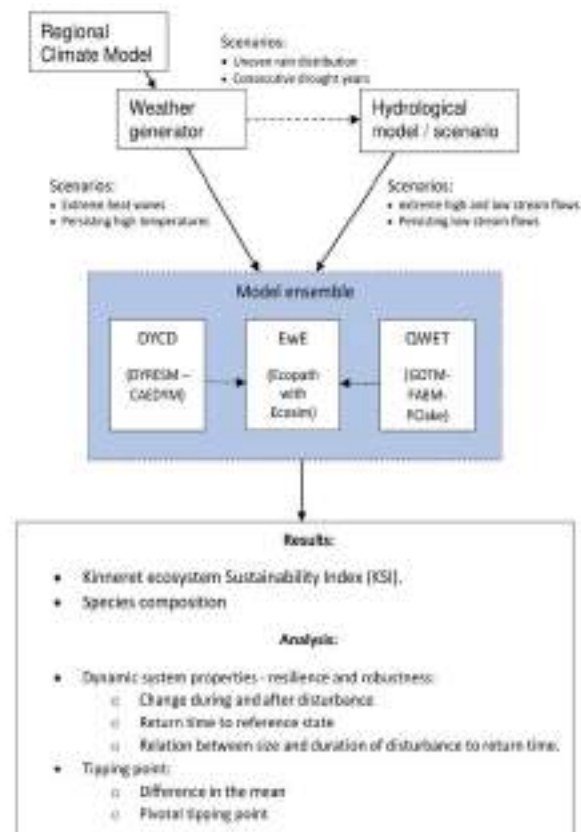
מודלים מאפשרים למדענים לבצע ניסויים וירטואליים והם כלי אפקטיבי לבחון שאלות אקולוגיות. ישנם הרבה מודלים של אגמים, מודלים הידרודינמיים ואקולוגיים, מבוססי תהליכים. חֵבֵר מודלים (Ensemble modelling) היא גישה שמפעילה מספר מודלים שונים במקביל על אותו אגם. שימוש בחֵבֵר מודלים משפר את התחזית, נותן הבנה טובה יותר של אי הודאות המובנית במודלים ומאפשר השוואה של תהליכים אקולוגיים המודגמים בצורה שונה. מחקר זה יהיה אחד מהיישומים הראשונים של חֵבֵר מודלים על אגם. מחקר זה יהיה המחקר המקיף הראשון שיבחן את השפעת שינויי אקלים על האקולוגיה של הכנרת. המחקר יבחן, באמצעות סימולציות של חֵבֵר מודלים, השפעת תרחישי אקלים של הפרעות קצרות טווח ולחצים מתמשכים על האקולוגיה של הכנרת.

המחקר יזהה אלמנטים במערכת האקולוגית של הכנרת, אשר רגישים לשינויי אקלים ובכך יצביע על פעולות ניהוליות נדרשות לשמור על שירותי המערכת של הכנרת. המחקר יתרום להתקדמות משמעותית במספר כלים שמטרתם לבחון חוסן של אגם: (1) שימוש בחֵבֵר מודלים. (2) סיווג המערכת האקולוגית של אגם למרכיבים הדינמיים – סבולת וחוסן אקולוגי. (3) סימולציה של נקודת מפנה על-ידי מודלים.

**שיטות**

מתווה המחקר מתואר באיור 125. תוצאות מודל אקלימי אזורי ישמשו לבניית תרחישי מזג-אוויר, תרחישי המשקעים יתורגמו לזרימות בנחלים באמצעות מודל הידרולוגי. תרחישי אקלים יכללו הפרעות קצרות טווח של גלי חום בעוצמה ותדירות שונה, זרימות שיטפוניות בנחלים ושנות בצורת בודדות. לחצים מתמשכים יכללו עליה הדרגתית בטמפרטורות ובצורות מתמשכות. יבחן גם תרחיש משולב של לחצים מתמשכים והפרעות קצרות טווח. תרחישים אלו ישמשו כתנאי שפה למודלים האגמיים. יעשה שימוש בשלושה מודלים. QWET ו-DYCD הם מודלים דומים בכך שיש להם חלק הידרודינמי המתחבר לחלק אקולוגי. החלק ההידרודינמי של QWET פותח לאוקיינוס ואילו DYCD לאגמים ומאגרים כך שהם שונים אך שניהם פותרים משוואות של מעבר חום ותנע. החלק האקולוגי פותר משוואות של מאזן נוטריינטיים. המודלים הם חד מימדיים – מימד העומק.

לשני המודלים עשרות פרסומים. לעומתם, מודל EwE הוא מודל אקולוגי המתבסס על משוואת טורף-נטרף של Lotka-Volterra ומכיל תוספת של Foraging arena theory. יעשה שימוש במודל ללא מימד מרחבי. ל-EwE יש מאות פרסומים. למודל EwE אין חלק הידרודינמי ולכן יקבל כקלט טמפרטורות וריכחי נוטריינטיים מהמודלים האחרים. במודלים DYCD ו-EwE נעשה שימוש במחקרים קודמים בכנרת והם מכוויילים. מודל QWET מכוויל במהלך המחקר. הכיול מתבצע לפי מדדי מתאם בין המודל לבין תצפיות בפועל בתקופה בין 2005-2014 ותיקוף הכיול יתבצע על 2015-2020.



**איור 125:** מתווה המחקר.

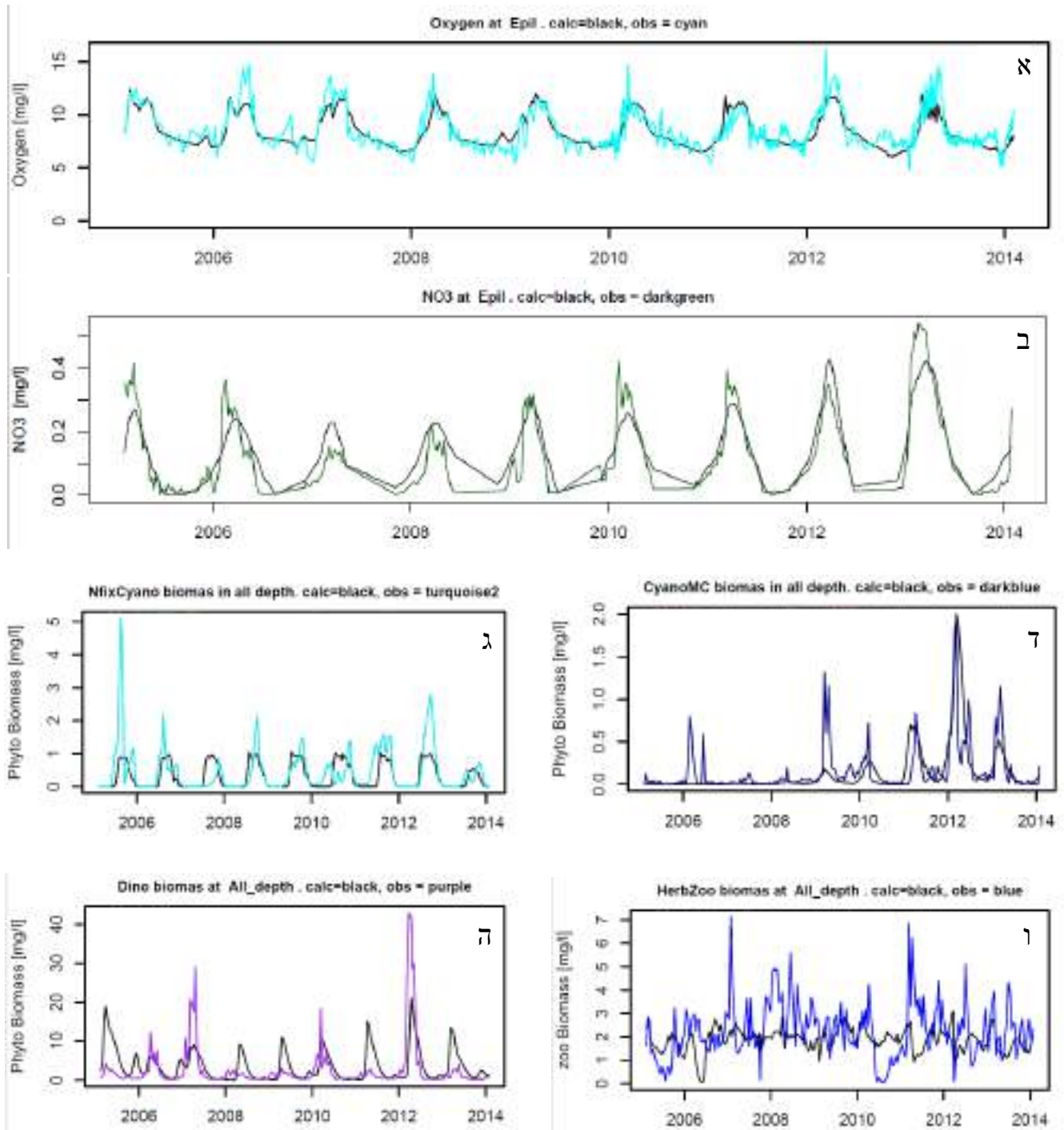
בנוסף יתבצע תיקוף תהליכי, על ידי השוואה של קצבי תהליך כגון צריכת חמצן בהיפולימניון ותיקוף מערכת, למשל על-ידי השוואה של יחסי נוטריינטים-כלורופיל, ויחס בין ביומסה של זאופלנקטון לפיטופלנקטון. תוצאות הרצת המודלים ינותחו ל- KSI ומשתנים נוספים. בטבלה 16 מתואר התוצר המתוכנן של כל מודל. יבחנו ההבדלים בתוצאות המודלים השונים. ניתוח נוסף יעשה כדי לבחון את התכונות הדינמיות – סבולת וחוסן – שימדדו על-ידי שינויים במדד KSI בזמן הפרעה, אחרי הפרעה, זמן חזרה למצב ייחוס, קשר בין גודל ומשך ההפרעה לתגובת המערכת ולזמן החזרה. כדי לזהות אם יש נקודת מפנה, ייבדק בשיטות סטטיסטיות אם מתרחש שינוי מהיר ב KSI ובמשתנים נוספים.

**טבלה 16:** משתנים המודגמים בכל מודל (? = עוד לא נקבע).

Variables	QWET	DYCD	EwE
<b>Water temperature &amp; Nutrients (O, N,P)</b>	+	+	-
<b>Phytoplankton</b>	5 groups	5 groups	?
<b>Zooplankton</b>	3 groups	3 groups	3 groups
<b>Fish</b>	?	-	10 species
<b>Top predators (humans,</b>	-	-	+

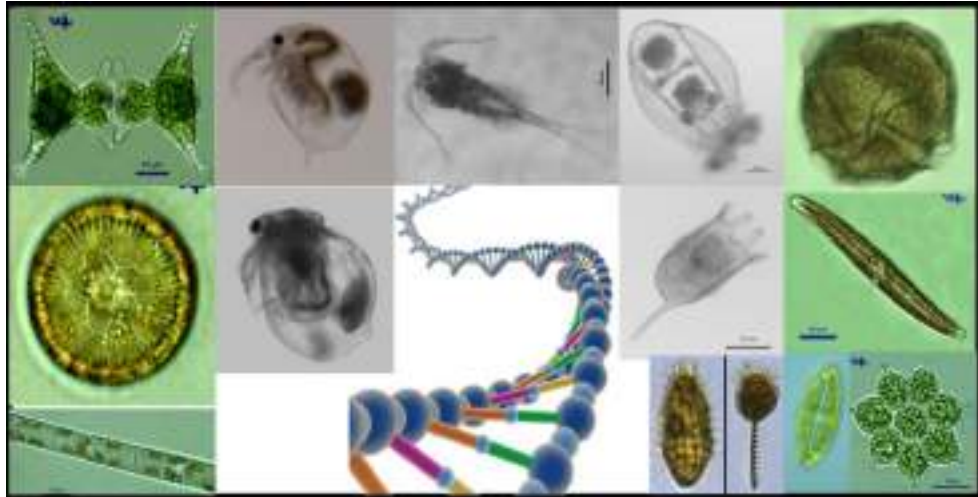
### תוצאות ראשוניות

נתונים לתנאי השפה, תנאי ההתחלה ונתונים לכיול המודלים שולבו ממקורות שונים וסודרו לצורך בדיקת שלושת המודלים. החלק הפיזיקלי של QWET כוייל בהצלחה ( $R^2=0.97$ ) והמודל מחקה נכון את תהליך השיכוב השנתי. כיול החלק האקולוגי נמצא בתהליך ומתקבלות תוצאות יפות: חמצן  $R^2=0.82$ , זרחן  $R^2=0.34$ , אמוניום באפילימניון -  $R^2=0.46$ , ניטראט באפילימניון  $R^2=0.78$ . באיור 126 מוצגות מספר דוגמאות של תוצאות המודל אל מול מדידות בפועל.



**איור 126:** תצפיות (בצבעוני) ומודל (בשחור) של: (א) חמצן באפילימניון (ב) ניטראט באפילימניון (ג) ציאנובקטריה מקבעת חנקן (ד) מיקרוציסטיס (ה) פרידניום (ו) זאופלנקטון צמחוני.

# 3.15 ברקוד גנטי של ביוטת הכנרת



במימון  
חיא"ל

רות נ. קפלן לוי, אלה אלסטר, שרון וורולקר, עכסה  
לופו

- ברקוד DNA של מיקרו-אצות מהאגם מתבצע ע"י בידוד תרביות או תאים/מושבות וריצוף של 2 מקטעים מהגנום: *rbcL* והמקטע *rRNA SSU-ITS*.
- ברקוד DNA של ממלכת בעלי החיים והפרוטוזואה מהכנרת מתבצע ע"י בידוד פרטים וריצוף של מקטע מהגן *coi*.
- באגם מוגדרים כיום 261 מיני מיקרואורגניזמים, מתוכם ל-36 מינים יש כבר ברקוד גנטי.

## רקע

היכולת לזהות ולקרוא לאורגניזם בשם הוא נדבך חשוב בהבנתנו ויכולתנו לשמר את המגוון הביולוגי הקיים בעולמינו. בעבר זיהוי המינים נעשה על פי צורתם החיצונית (מורפולוגיה), אך כיום ידוע ששיטה זו בלבד הינה לעיתים בעייתית. האתגר נובע מכמה סיבות: ישנם מינים המשנים את צורתם כחלק ממחזור החיים, או שצורתם משתנה בעקבות שינויים בתנאי הסביבה. בנוסף, ישנם מינים שונים הדומים בצורתם ולכן קשה להבחין ביניהם והאתגר הגדול הוא בזיהוי המינים הקטנים, אלו שקשה להבחין ביניהם במיקרוסקופ. בניגוד למאפיינים חיצוניים (מורפולוגיים) העשויים להשתנות, כל אורגניזם נושא מטען גנטי ייחודי לו זה אינו משתנה לאורך כל מהלך חייו ואיננו תלוי בתנאי הסביבה. כל מין (רב-תאי או חד-תאי) נושא בכל תא את אותו מטען גנטי במשך כל חייו, זה מועבר בתורשה לצאצאיו, עובדה זו משמשת אותנו ככלי לזיהוי ואפיון מינים. ברקוד של DNA הינה דרך ליצירת תווית לאורגניזם בהתאם לרצף חומצות הגרעין באזור ספציפי בגנום שלו.

ברקוד DNA הינו רצף חומצות גרעין קצר, לרוב של כ- 800 בסיסים, הנמצא בגנום של כל האורגניזמים ומוסכם על הקהילה המדעית. רצפי DNA אלו מופקדים במאגר נתונים גדול ובו קישור למסמך המתעד את מקור הדגימה והידע הטקסונומי לגביה. בשיטה זו אין צורך להמתין שהאורגניזם יהיה בשלב התפתחותי מסוים על מנת לזהות את המין. כלומר, שיטה זו מאפשרת זיהוי מינים במהירות, ביעילות ובמדויק. יתרון נוסף של הברקוד כשיטת זיהוי מינים הוא ששינויים בחומצות הגרעין (מוטציות) נאגרים מהר יותר משינויים בחזות החיצונית של המין, ובכך מתאפשר להבחין בין שני מינים שזה עתה התפצלו אחד מהשני מבחינה אבולוציונית.

כיום ישנה כמות אדירה של נתוני רצפים במאגר הנתונים, אך חוסר בידע טקסונומי "קלאסי" גורם לעיתים לטעויות חמורות בזיהוי אורגניזמים. טעויות אלו באות לידי ביטוי בשיוך רצף DNA לאורגניזם אחר, מה שבסופו של דבר מוביל לשרשרת של טעויות בזיהוי מינים כאשר משתמשים בכלים מולקולאריים בלבד. לפיכך יש חשיבות רבה לשילוב נתוני הברקוד הגנטי עם נתונים אמינים ומבוססים של טקסונומיה "קלאסית". בפרויקט זה אנו יוצרים בסיס נתונים אשר עומד כלבנת ידע ראשונה עליה ניתן יהיה לבנות אין סוף מחקרים, תוך מניעת טעויות עתידיות וזיהוי מהיר ומדויק של המיקרואורגניזמים בכנרת.

### **מטרת המחקר**

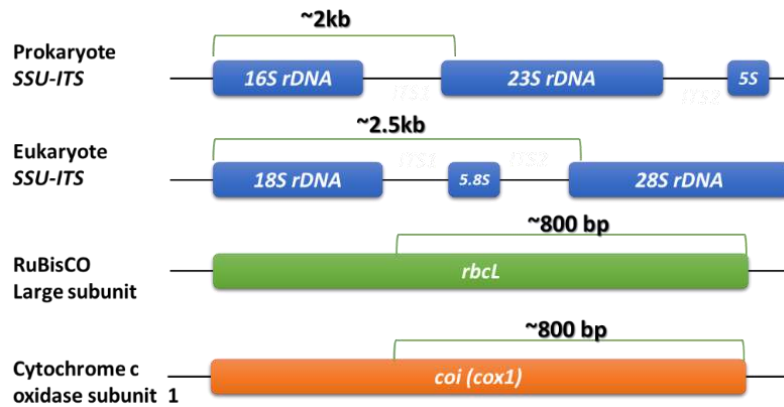
1. לפתח כלים ליצירת ברקוד גנטי של המיקרואורגניזמים הקיימים בכנרת.
2. יצירת בסיס נתונים של רצפי DNA נגיש באינטרנט, להשלמה ושדרוג שיטת הזיהוי המשמשת היום של המיקרואורגניזמים בכנרת.

### **שיטות**

בסיס הנתונים נבנה מבידוד של המיקרואורגניזמים בצורת תרביות חד-אצתיות, או בידוד תאים, מושבה או פרט מהאגם לתוך מבחנה, תלוי בגודל ובמורפולוגיה. לאחר הבידוד וצילום של האורגניזם, מגיעים לשלב הפקת DNA גנומי והגברת מקטעי ה DNA הנבחרים: *rbcL* ו-*SSU-ITS* למיקרו-אצות ו-*coi* עבור עולם החי (איור 127). תוצר ה-PCR נשלח לריצוף או עובר שיבוט קודם לכן, תלוי בגודל מקטע ה- DNA. לאחר אנליזה של רצפי ה- DNA באמצעות תוכנת BioEdit, מתבצע חיפוש במאגר המידע הבינלאומי בעזרת BLASTN (<http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>) כדי למצוא את רמת הזהות של המין מהכנרת למיני מיקרואורגניזמים אחרים שהופקדו ב- GenBank. כמו-כן, אנליזה פילוגנטית מתבצעת למינים השונים כדי לקבוע את דיוק הגדרתם. הגדרת המין המדויקת תאפשר השוואה של מידע מהכנרת עם אגמים אחרים בעולם.

### **תוצאות ודיון**

בכנרת ישנן קבוצות של מיקרואורגניזמים מימיים המאופיינים היטב מורפולוגית, לכן קבוצות אלו הינן מועמדות מצוינות לשימוש בברקוד. בקבוצת המיקרו-אצות, הכוללת את הפיטופלנקטון והפיטובנתוס, אנו בחרנו להשתמש ברצפים משני מקטעים בגנום, כאשר הראשון הינו מקטע מהגן *rbcL* המשמש לזיהוי הסוג, והמקטע השני נפרש על פני ה-*SSU-ITS* (rRNA Small Subunit – InTragenic Space) המאפשר להבחין בין מינים קרובים אבולוציונית (איור 127). לעומתם, את ממלכת בעלי החיים מקובל לאפיין לפי מקטע בגן המקודד ל-*coi*, לכן מקטע זה נבחר עבור קבוצת הזואופלנקטון והפרוטוזואה (איור 127).



**איור 127:** מקטעי הגנום שנבחרו לריצוף כ- DNA ברקוד לקבוצות השונות.

יצירת בסיס נתונים, ברקוד, למיקרואורגניזמים של הכנרת הינו תהליך מתמשך הכרוך בכמה שלבים (מתגרים: 1) יכולת בידוד של המין, אם זה לתרבית או מבחנה יכולה להוות אתגר רציני בעיקר כאשר מדובר במינים קטנים במיוחד; 2) זיהוי מורפולוגי מדויק, שלא תמיד מתאפשר מסיבות המפורטות מעלה; 3) הפקת DNA בצורה יעילה, ללא חומרים מעכבים, שתאפשר הגברת הגנים בשלב הבא; 4) הגברת מקטעי ה-DNA מהמינים והקבוצות הטקסונומיות השונות שהוא תלוי רצף חומצות הגרעין באותו המין. כלומר שלכל קבוצת מינים עלינו לכייל את המערכת כך שנוכל לקבל את רצף הברקוד הנדרש. על פי הספרות מאכלסים את הכנרת כיום כ- 260 מיני מיקרואורגניזמים אואקריוטיים וציאנובקטריה, מתוכם 36 מינים כבר רוצפו (טבלה 17). מתוך 26 מיני מיקרו-אצות שעברו ברקוד, הופקדו 91 רצפים בבסיס הנתונים הבינלאומי (Kaplan-Levy et al., 2016) ויותר מעשרה מינים נמצאים בשלבים השונים לקראת ההפקדה. כמו כן, השנה סיימנו לרצף את כל תשעת מיני ה-Arthropoda ברשימת הניטור של הזואופלנקטון.

טבלה 17 : מצב הברקוד הגנטי של ביוטת הכנרת, נכון ל- 12/2020.

Kingdom	Phylum	Species list source	No. of species in Lake Kinneret	No. of species Barcoded
<b>Eubacteria</b>	Cyanobacteria	Zohary et al., 2014	40	9
<b>Chromista</b>	Bacillariophyta	Zohary et al., 2014	20	-
	Cryptophyta	Zohary et al., 2014	5	-
	Haptophyta	Zohary et al., 2014	1	-
	Dinophyta	Zohary et al., 2014	16	-
	Ciliophora	Madoni 1990	37	-
<b>Plantae</b>	Charophyta	Zohary et al., 2014	17	2
	Chlorophyta	Zohary et al., 2014	90	15
<b>Protozoa</b>	Euglenophyta	Zohary et al., 2014	6	-
<b>Animalia</b>	Arthropoda	Gal et al., 2014	9	9
	Rotifera	Gal et al., 2014	20	1
<b>Total</b>			<b>261</b>	<b>36</b>

מידע מולקולארי על המינים השונים מאפשר לנו לעדכן, לאמת או לשנות את שמות המינים ברשימת הניטור ובקטלוג האינטרנטי.

#### **מקורות ספרות:**

Gal, G., & Hambright, K. D. (2014). Metazoan Zooplankton. 227-245. doi:10.1007/978-94-017-8944-8\_13

Kaplan-Levy, R. N., Alster-Gloukhovski, A., Benyamini, Y., & Zohary, T. (2016). Lake Kinneret phytoplankton: integrating classical and molecular taxonomy. *Hydrobiologia*, 764(1), 283-302. doi:10.1007/s10750-015-2517-5

Madoni, P. (1990). The ciliated protozoa of the monomictic Lake Kinneret (Israel): species composition and distribution during stratification. *Hydrobiologia*, 190, 111-120.

Zohary, T., Yacobi, Y. Z., Alster, A., Fishbein, T., Lippman, S., & Tibor, G. (2014). Phytoplankton. 161-190. doi:10.1007/978-94-017-8944-8\_10



# 3.16 אוסף התרביות הלאומי של אצות

## ישראל Israel National Culture Collection of Algae (INCCA)



במימון  
חיא"ל

רות נ. קפלן-לוי, אלה אלסטר, תמר זהרי, נעמה לנג-יונה

- אוסף התרביות הלאומי של אצות ישראל (INCCA) הוקם במעבדה לחקר הכנרת על מנת לתעד, לבודד ולשמר את מגוון מיני המיקרו-אצות בישראל.
- נכון לדצמבר 2020 האוסף מכיל 118 תרביות חיות של מיקרו-אצות, שרובן בודדו מהכנרת.
- רוב התרביות שייכות ל-3 מערכות: (39%) *Cyanobacteria* (40%) *Chlorophyta* ו- (16%) *Charophyta*

### רקע

ישראל היא מדינה מזרח-תיכונית קטנה, צחיחה למחצה (שטח: 22,145 קמ"ר), המבורכת במגוון רחב של מערכות אקולוגיות מימיות טבעיות, המהוות בתי גידול למגוון עצום של מיקרו-אצות. למיקרו-אצות תפקיד חיוני בבריאות כדור הארץ, הן מהוות את הבסיס למארג המזון וממלאות תפקידים מרכזיים באוקיינוסים, האגמים והנחלים. עם שינויי האקלים ואובדן בתי הגידול הטבעיים בעקבות פעילות אדם, מגוון ביולוגי זה נמצא בסכנה ובירידה מתמדת, כמו אלה שכבר התרחשו באגם הכנרת. אוסף התרביות הלאומי של אצות ישראל (Israel National Culture Collection of Algae - INCCA) נוסד במטרה לשמר את המגוון הביולוגי של האצות באזורנו, וכן לשמש כמשאב (Kaplan-Levy et al. 2020). מטרתנו היא לזהות, לתעד, לבודד ולשמר את המגוון הביולוגי של אצות וציאנובקטריה בישראל. משאב זה משמש למחקר, שיקום סביבתי, חקלאות, תעשייה וחינוך.



בשנים האחרונות ענף האצות מהווה מנוע צמיחה מרכזי לחקלאות הישראלית. גם התעשייה הישראלית גילתה את המיקרו-אצות כתחום עם פוטנציאל כלכלי נרחב לייצור והפקה של תוספי מזון (יוד, אומגה 3, חלבונים ועוד), כמזון לבעלי חיים, חומרים לתעשיית הקוסמטיקה וגם לטיפול בשפכים. במקביל קיים הצורך ההולך וגדל למצוא מיני מיקרו-אצות חדשים לתועלת האדם בתחומים שונים כגון הרפואה, התזונה, והקוסמטיקה.

תרומת האוסף הלאומי INCCA לישראל משמעותית ביותר, במיוחד מאז הסכם - "The Nagoya Protocol on Access to Genetic Resources and the Fair and Equitable Sharing of Benefits Arising from their Utilization (ABS)", שנחתם ב- 2010 ביפן ותוקפו החל מ-2014. הסכם זה מספק מסגרת משפטית שקופה ליישום יעיל של אחד מיעדי ה- Convention on Biological Diversity CBD שהינו שיתוף הוגן וצודק של יתרונות מניצול משאבים גנטיים. אחת מתוצאות הלוואי של ההסכם היא הגבלות בהעברת מיקרואורגניזמים בין מדינות. הגבלה זו מחזקת את הצורך באוסף תרבויות לאומי מוסמך כדי לשמר את המגוון הביולוגי של האצות במדינה, במיוחד עבור מינים בסכנת הכחדה.

INCCA ממקם במעבדה לחקר הכנרת, חקר ימים ואגמים לישראל (חיא"ל), לחופה של הכנרת. אוסף התרבויות החל את דרכו בשנות ה-70 למאה הקודמת, בעיקר למטרות מחקר. החל משנת 2012 נוספו לאוסף מינים רבים כחלק מפרויקט יצירת ברקוד גנטי למיקרו-אצות של הכנרת.

### **מטרות אוסף התרבויות INCCA:**

- יצירת אוסף לאומי מקיף של מיקרו אצות מבודדות, מתויגות ובעלות זיהוי מורפולוגי וגנטי מכלל מקווי המים בישראל – מעיינות, נחלים, ימים ואגמים.
- להוות בנק לשימור מגוון המינים של מיקרו אצות בישראל.
- התרבויות ישמשו את קהילת המדע, החקלאות, התעשייה והחינוך.
- הצטרפות ועמידה בדרישות הארגון העולמי World Federation of Culture Collections.

### **שיטות**

מים שנאספו ממקורות שונים בארץ מגיעים למעבדה ומהם אנו מבודדים את המיקרו-אצות במיקרומניפולציה למצע גידול נחלי או על ידי זריעה לבידוד על צלחות פטרי עם מצעי גידול שונים המתאימים למערכות שונות של מיקרו-אצות.

תבדידי המיקרו-אצות ב- INCCA מזהות מיקרוסקופית על פי הטקסונומיה הקלאסית ולאחר מכן עוברות אנליזה ליצירת ברקוד גנטי (ראה דו"ח ברקוד גנטי של ביוטת הכנרת). האחרונה מבוססת על הגברה וריצוף של מקטעי DNA מגנום המיקרו-אצה. התרבויות באוסף הינן חד-אצתיות (קסניות) והן נשמרות על צלחות אגר או מצע נחלי.

### **תוצאות ודין**

סך הכל 118 זנים של אורגניזמים פוטוסינתטיים מוחזקים כיום במתקן INCCA (טבלה 18). רשימת הזנים המלאה זמינה בכתובת <http://kinneret.ocean.org.il/INCCA.aspx>. האוסף כולל נציגים משבע מערכות, אולם רוב הזנים שייכים ל- Cyanobacteria (39%) Chlorophyta (40%) ו- Charophyta (16%) (טבלה 18, איור 128). מתוך 118 התרבויות 39 זוהו לרמת המינים, כולל 2 Charophyta, 19 ירוקיות, 16 ציאנובקטריה, 1 Haptophyta ודינופלגלט אחד.



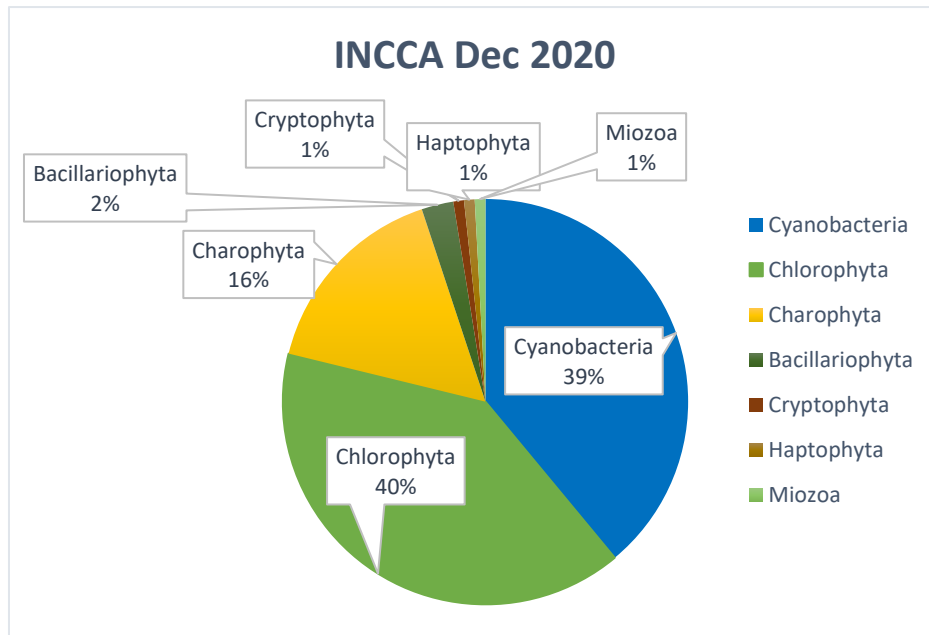
נכון לסוף 2020, 13 מינים הם בעלי ברקוד גנטי של שני סמנים: 6 ציאנובקטריות, Chlorophyta ו-1 Charophyta. רבים מהמינים באוסף שלנו מופיעים גם בקטלוג תמונות הפיטופלנקטון המקוון בכתובת:

[http://kinneret.ocean.org.il/phyt\\_cat\\_listView.aspx](http://kinneret.ocean.org.il/phyt_cat_listView.aspx)

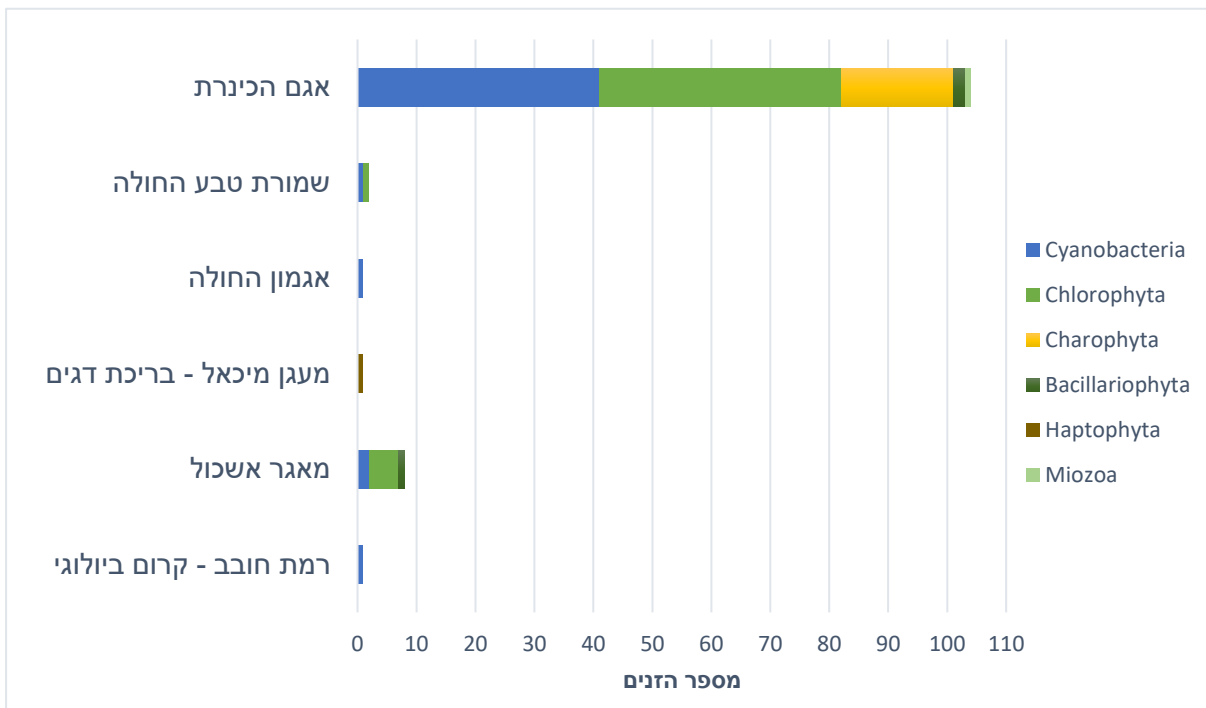
מתוך 118 התרביות שנמצאות כיום באוסף, 114 תרביות מקורן בישראל. ארבע הנותרות הן של זנים שהובאו למעבדה למטרות מחקר, כולל *Rhodomonas* sp. מגרמניה ושלושה זנים של *Mougeotia* sp. מאגמים באיטליה: Tovelì Geneva, Garda. מתוך 114 הזנים שמקורם בישראל, 89% בודדו מהכנרת (איור 129), והשאר בודדו ממקורות מים מגוונים בישראל, כולל שמורת הטבע החולה, אגם אגמון ומאגר אשכול. מאחר ומקורם של רוב התבדידים הוא מהכנרת, כל זן מלווה במידע סביבתי המגיע מתוכנית הניטור של האגם, דבר המייחד את INCCA משאר אוספי התרביות בעולם.

**טבלה 18 :** מספר זני המיקרו-אצות המוחזקים ב-INCCA ממוינים לפי מערכה, מחלקה וסדרה

Phylum	Class	Order	No. of strains (12/2020)	Total
<b>Cyanobacteria</b>	Cyanophyceae	Chroococcales	12	<b>46</b>
		Synechococcales	11	
		Oscillatoriales	11	
		Nostocales	12	
<b>Chlorophyta</b>	Chlorophyceae	Chaetophorales	1	<b>47</b>
		Chlamydomonadales	6	
		Sphaeropleales	28	
		Trebouxiophyceae	11	
		Ulvophyceae	1	
<b>Charophyta</b>	Zygnematophyceae	Desmidiiales	6	<b>19</b>
		Zygnematales	13	
<b>Bacillariophyta</b>	Bacillariophyceae	Bacillariales	2	<b>3</b>
		Mastogloiales	1	
<b>Cryptophyta</b>	Cryptophyceae	Pyrenomonadales	1	<b>1</b>
<b>Haptophyta</b>	Coccolithophyceae	Prymnesiales	1	<b>1</b>
<b>Miozoa</b>	Dinophyceae	Peridinales	1	<b>1</b>
<b>Total strains</b>			<b>118</b>	<b>118</b>



**איור 128:** מגוון פילוגנטי של זני INCCA המתאר את אחוז הזנים השייכים לכל מערכה, דצמבר 2020.



**איור 129:** מקור זני המיקרו-אצות שבודדו ממקומות שונים בישראל ומתוחזקים ב-INCCA, על פני הגרף מצוין מספר הזנים מכל קבוצה טקסונומית שבודדו מכל אתר.

ל-INCCA יש כמה מאפיינים שמבדילים אותו מאוספי תרבויות אחרים של מיקרו-אצות. זהו אוסף הזנים הראשון והיחיד בישראל ובמדינות המזרח התיכון השכנות לה. זהו ניסיון ראשון לאסוף ולשמר מינים של מיקרו-אצות חיות של האזור למטרות מדעיות, תעשייתיות וחינוכיות עתידיות. בלב האוסף הזה עומדים הזנים מאגם כנרת, המגובים בנתונים רבים מתוכנית ניטור הכנרת, הפועלת כבר למעלה מ-50 שנה. לפיכך, מידע אקולוגי רב קיים עבור רבים מהזנים, כולל התנאים הסביבתיים שבהם המין גדל או קמל, החל משנת 1969.

כמה מתבדידי INCCA כבר הוכיחו שהם בעלי ערך יוצא דופן למחקר כגון: *Peridinium gatunense* INCCA-C1004 (Mic-G), *Microcystis* sp. INCCA-C1005 *aeruginosa* D1001, *Microcystis* *Chrysochlorum ovalisporum* INCCA-C3002 (אפניזומנון). על ידי הפיכת אוסף התרבויות שלנו לאוסף רשמי שיתרחב ויכלול מיני מיקרו-אצות מכל סוגי בתי גידול מימיים ואפילו יבשתיים בארץ, ברצוננו לספק בית לשימור המגוון הביולוגי של מיקרו-אצות בישראל.

### **מקורות ספרות**

Kaplan-Levy, R. N., A. Alster-Gloukhovski, M. Slichter & T. Zohary, (2020). The Israel National Culture Collection of Algae (INCCA) for biodiversity conservation. *Nova Hedwigia*, 111(3-4), 231–243. doi:10.1127/nova\_hedwigia/2020/0603

## 4 מחקרי אגן ההיקוות של הכנרת וגופי מים אחרים

### 4.1 גישה אינטגרטיבית לבדיקת השפעת גופי מים בעמק החולה על הכנרת



מבט מראש פינה (למעלה) לעמק החולה בראשית שנות הארבעים.

במימון  
רשות  
המים

עמי נשרי, איתי גבריאלי (המכון הגאולוגי)

- המחקר עוסק באספקת פחמן לאצות בכנרת כתוצאה משיקוע קלציט.
- בתהליך זה משתחרר למים פחמן דו-חמצני המהווה מקור פחמן לאצות הפירידיניום. קיים קשר בין שיקוע הקלציט לפריחות של אצה זו.
- באגן ההיקוות מתרחשים תהליכים אשר משפיעים על אספקת חומרים שתורמים לשיקוע הקלציט. חלו שינויים ארוכי טווח בתהליכים אלו כתוצאה משינויים "הידראוליים" באגן ההיקוות.

**רקע**

מטרת המחקר שלהלן היא לבחון, בגישה אינטגרטיבית, את הזיקה שבין הירדן כספק מים מומסים וחלקיקים לבין אצות בכנרת. הדגש הוא על אצת הפרידיניום והסיבה לכך היא הקשר האפשרי שבין פריחות אצה זו לבין שיטפונות הירדן.

עד תחילת שנות ה-90 אצה זו שלטה במערכת האקולוגית באגם תוך כדי קיום פריחות אביביות סדירות בעצמה בינונית עד גבוהה. מאידך, השנים שלאחר מכן מתאפיינות בשונות שנתית גבוהה בעצמת הפריחות עם זיקה ברורה בין עוצמת השיטפונות באגן ההיקוות לבין גודל הפריחה. ממצאים אלו הביאו למסקנה שאגן ההיקוות תורם גורם/ גורמים שונים שעוזרים להתפתחות הפריחות. אולם, גודל התרומה הוא לא רק תוצאה של השיטפונות במערכת אלא כפי הנראה חלו גם שינויים במשטר ההידראולי של אגן ההיקוות אשר אפשרו את המעבר מהמשטר של עד שנות ה-90 לזה שאחריו. מסיבות שלא נדון בהם כאן, שינויים ברמות נוטריאנטים כגון חנקן ניטרי זרחן נשללים ומאידך שינויים בתרומת הסלניום, הארבע-ערכי, שהוא תוצר שטיפה של קרקעות כבוליות יתכנו וצריכים להיות מובאים בחשבון. נוסף לכך, לפירידיניום התנהגות מיקוסטרופית מוכחת, שבחלק הראשון של המחקר הנוכחי וידאנו את קיומה (אבל לא כימתנו) באמצעות ניסיונות מעבדה. לכן, שינויים רב-שנתיים בתשומה של חומרים אורגניים אלוכטוניים חייבת גם היא להילקח בחשבון. בדו"ח הנוכחי הבאנו בחשבון את אספקת הפחמן האנ-אורגני לפירידיניום. אצה זו מובחנת בכך שהיא מוגבלת לצריכת פחמן דו-חמצני ואיננה צורכת פחמן שמצוי כיון ב-קרבונט במים. בכנרת ריכחי הפחמן הדו-חמצני נמוכים במיוחד, בעיקר בעונת הפריחה, זוהי מגבלה רצינית להתפתחות האצה. אנו מניחים שאספקת הפחמן לאצה באגם נובעת בעיקר משיקוע בו-זמני של קלציט אוטיגנית כך שהגברת שיקוע קלציט צריכה להוביל להגברת הפריחות של הפרידיניום, ולהפך, פחיתה בשיקוע קלציט אמורה לגרום להקטנת הפריחות. כמו כן, אנו מניחים שהטריגר לשיקוע הקלציט, הם חלקיקים שמקורם בעמק החולה, אשר מאפשרים את הפחתת אנרגיית האקטיבציה הנדרשת להשגת היווצרות גבישי הקלציט.

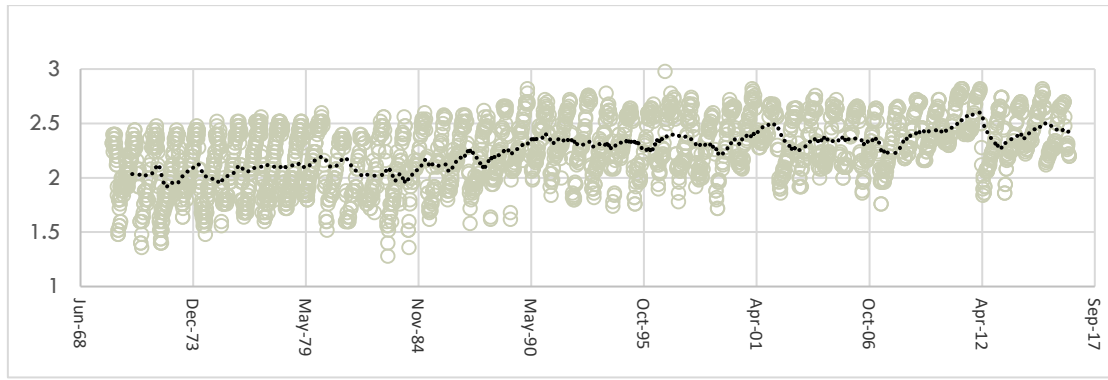
**שיטות**

בשנת הקורונה הסתפקנו בעיבוד מידע ממאגר הנתונים של המעבדה לחקר הכנרת.

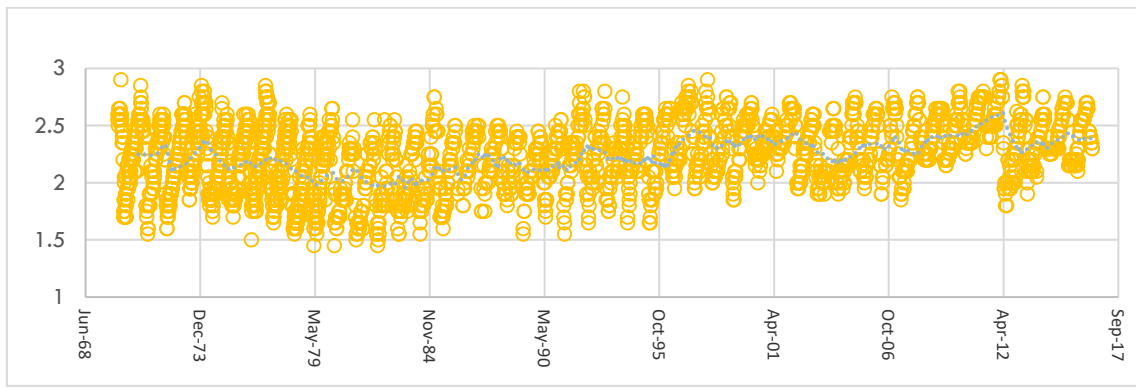
**תוצאות ודיון**

הניטור הרב-שנתי (1968-2020) של ריכחי האלקליניות והסידן (נתונים שבועיים ודו-שבועיים) בשכבת פני הכנרת (1-3 מטר עומק) והממוצע הרץ ( $\pm 100$ ) מוצגים באיורים 130 ו-131 שלהלן. ניתן להבחין במגמה רב-שנתית של עליית ריכחי שתי המומסים. השינויים העונתיים בריכח הם תוצאה של שיקוע אביבי של קלציט ולאחר מכן כניסות של שני המומסים לאפילימניון, אשר נובעות ממקורות שונים. כמו כן, מקורות הכניסות הם: א. הירדן שמאופיין בריכחים גבוהים ממי פני הכנרת, ב. כניסת תמלחות סידן וכלורידים משולי האגם, ג. ערבוב מסוים של מים היפולימנטיים מועשרי סידן ואלקליניות אל תוך האפילימניון כתוצאה מערבוב בשולי האגם (lake boundary mixing), ו-ד. המסת קלציט אוטיגנית בקרקעית האפילימנטית כתוצאה מביודגרדציה של חומרים אורגניים והיווצרות תנאים מתאימים להמסה. המשרעת של הירידה העונתית בריכח, הן של הסידן והן של הביקרבונט, שמהווה קנה מידה לרמת שיקוע הקלציט, הולכת וקטנה עם השנים (איורים 131 ו-132) מערך טיפוסי של 1 מילימול לליטר בשנות השבעים-שמונים לכ- 0.7 מילימול לליטר בשנים האחרונות.

דהיינו, ניתן להסביר את מגמות העלייה בריכוז הסיידן והאלקליניות במי הכנרת בפחיתה רב-שנתית בשיקוע של קלציט באגם. למען הכרת סדרי הגודל: שיקוע הקלציט השנתי מהאפילמניון בכנרת הוא בסדר גודל של 90,000 טון שבהם הסיידן מהווה כ-15% מהאינוונטר הכנרתי הטיפוסי של כ-220,000 טון.



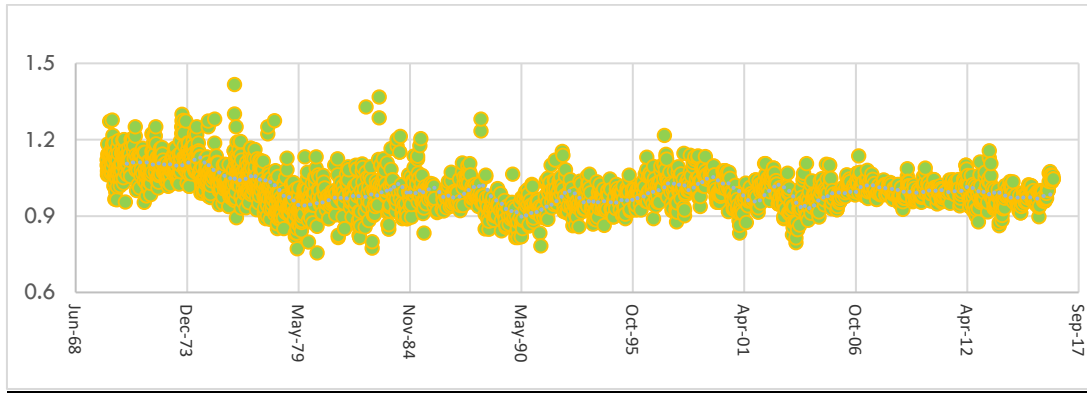
**איור 130:** המגמה הרב-שנתית בריכוז הממוצע של האלקליניות בפני הכנרת (1-3 מטר) ביחידות של מילימול לליטר בין 1968 ל-2016.



**איור 131:** המגמה הרב-שנתית בריכוז הממוצע של סיידן בפני הכנרת (1-3 מטר) ביחידות של מילימול בליטר, בין 1968 ל-2016.

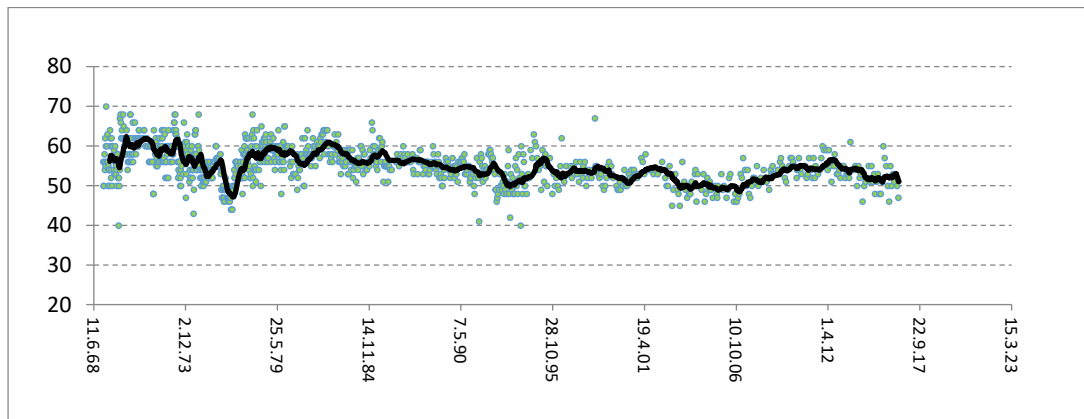
בחינה מדוקדקת של המגמות ארוכות הטווח באמצעות היחס Ca/Alk (איור 132) מורה על כך שבשנות השבעים היחס היה שווה לבערך 1.1 ואילו החל מתחילת שנות ה-80 היחס המולרי האופייני ירד והתייצב על בערך 1.0. הסיבה לכך נבעה מכך שבשנות השבעים היה באגן ההיקוות מקור משמעותי נוסף של סיידן מקור זה היה שטיפה של אגן החולה והמסה של גבסים שהיו בעצמם תוצרים של תהליכים דיאגנטיים פנימיים שהחלו עם ייבוש החולה ונסיגת מי התהום. בסדימנטים של החולה יש עדיין גבסים אבל העובדה שאינם תורמים כמויות גדולות של סיידן (וסולפט ראה איור 133) מלמדת על כך שזמן השהות של מי הקרקע אשר מצויים במגע עם הגבסים נעשה גדול יותר, דהיינו מים אלה שותפים פחות בתרומות החולה לירדן.



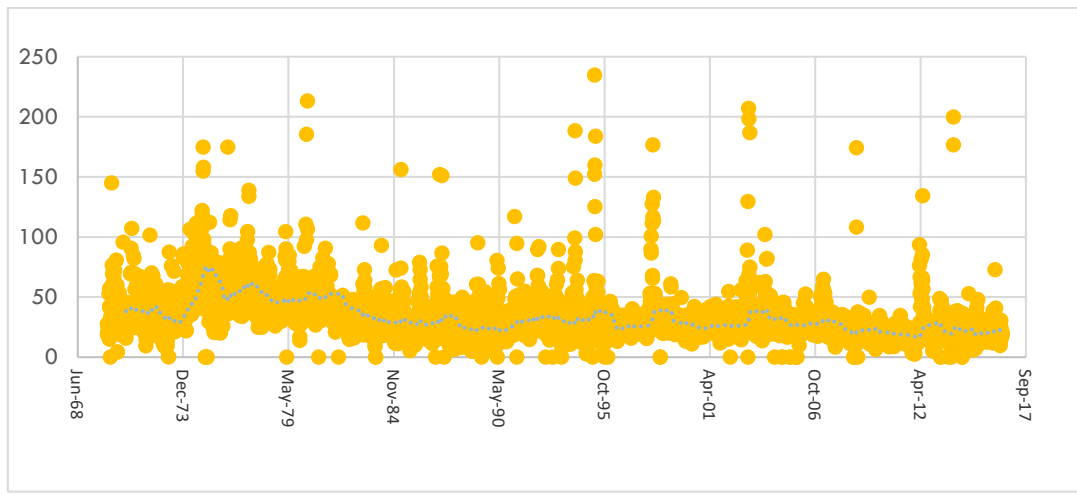


**איור 132:** המגמה הרב-שנתית (1968-2016) של היחס המולרי Ca/Alk בפני הכנרת (1-3 מ').

מגמות דומות ומשלימות ניתן להפיק מנתונים של הירדן גשר חורי. את ההוכחה להמסת הגבסים ולארחיה של חומרים אורגניים ניתן לראות באיורים 133 ו-134. ריכח הסולפט בפני הכנרת (וכמו כן בירדן אם כי בסקלה אחרת) יורד הדרגתית מערך 60 מג"ל לבערך 52 מג"ל (איור 133). גם ריכח החנקן האורגני המומס בירדן (ללא איור) ובפני הכנרת מתנהג בצורה דומה (איור 134), גבוה בשנות השבעים והולך וקטן בהווה. לחנקן האורגני זיקה ברורה וטריוויאלית למידת הארחיה של קרקעית עמק החולה וה"קפיצה" בריכחו בשנות השבעים נבעה מארחיה מוגברת של הכבול.



**איור 133:** מגמות ארוכות טווח (1968-2016) בריכח יון הסולפט (מג/ל) בפני הכנרת (1-3 מטר)



**איור 134:** מגמות ארוכות טווח בריכוז החנקן האורגני בפני הכנרת (3-1מטר), ריכוזים במיקרומול לליטר.

### סיכום

תהליך שיקוע קלציט בכנרת, המתרחש בעיקר באביב, הוא ספק עיקרי של פחמן, כדו-תחמוצת הפחמן-לפירידיניום. פחיתה בעצמת תהליך זה פוגעת בהתפתחות אצה זו והנישה הזו נתפסת ע"אצות שמסוגלות לצרוך פחמן כיון בי קרבונט. לאחר ייבוש החולה ובשנות ה-70-80 התרחשו באגן ההיקוות תהליכים ארזיביים ופוסט דיאגנטיים שהתבטאו בין השאר בבליה של חומרים אורגניים, ביצירת גבסים משניים ולאחר מכן בהמסתם ובפיזור אבק ברחבי אגן ההיקוות. עקב הריסת הטקסטורה של הכבול התאפשרה תולכה "קלה" של מי הקרקע בחלק העליון הפנוי של "כבול החולה", כמדיום להסעת אופקית של מי גשמים לירדן ומשם לכנרת. התוצאה הייתה שעומסי החומרים האורגניים וביניהם הסידן (תוצר המסה של גבס) ועוד חלקיקים שהוגדרו על ידינו (בדו"ח המלא) כטריגר לשיקוע קלציט, הביאו לשיקוע מוגבר של קלציט וכך להופעה סדירה של פירידיניום. בתחילת שנות ה-90 עם העלאת מפלס מי התהום בעמק החולה ועצירתם החלקית באמצעות הסכר התת-קרקעי וכמוכן הקמת האגמון פחתה המוליכות ההידראולית ההוריזנטלית בעמק (בהשוואה לשנות ה-70-80). התוצאה הייתה פחיתה בעומסי החומרים שהעמק תורם לירדן ולכן פחיתה בעצמת שקוע הקלציט וכתוצאה מכך בהופעת הפירידיניום. את הפחיתה ארוכת הטווח בשקוע הקלציט אנו מציגים בחלק הנוכחי של דו"ח של המעבדה לחקר הכנרת. (הדו"ח הסופי יוגש השנה לרשות המים). מאז רק בשנים שיטפוניות מאוד מתרחשת הסעת מים דרך חתך הקרקע שמקיימת אינטראקציה חזקה עם המדיום ה"כבולי" המוצק וכך מאפשרת הסעה של החומרים הדרושים לשיקוע מסיבי של קלציט ופריחות פירידיניום.

הערה: פרק זה מהווה את אחד מהבסיסים למאמר שמצוי כרגע בשלבי הכנה.

## 4.2 שימוש במודלים אקולוגיים לבחינת השפעות קידוחי הגז על מארג המזון במרחב הכלכלי הישראלי



צילום: Julie Dermansky מתוך: Corbis/ Getty

**מחקר  
במימון  
משרד  
האנרגיה**

**אלה להב, גדעון גל, איל אופיר, פלג אסטרון**

- מטרת המחקר היא פיתוח ויישום של מודלים מרחביים להערכה כמותית של ההשלכות האפשריות של אירועי זיהום.
- המודלים יכללו עקומות תגובה של מינים ימיים לרמות שונות של מזהמים שמקורם מאירוע שפך של דלקים פוסילים.
- נערך סקר ספרות מקיף של מחקרים בספרות הבינלאומית.
- המידע שנאסף מסקר הספרות תורגם לעקומות רגישות אשר קודדו למודלים המעודכנים.

### **רקע**

בשנים האחרונות נעשה מעט מאוד מחקר על ההשלכות האקולוגיות האפשריות של אירועי זיהום של דלקים פוסילים בסביבה הימית, למעט מקרים חריגים של זיהום כגון אירוע ה-Deepwater Horizon במפרץ מקסיקו וה-Exxon Valdez באלסקה.

עם זאת, הריבוי בקידוחי הגז והנפט בסביבה הימית והחשש מפני אירועי זיהום נוספים, הובילו לשורה של מחקרים אשר חיברו בין מודלים פיסיקליים המדמים את אופן התפשטות כתמי הזיהום לבין מודלים אקולוגיים המודדים את הפגיעה במערכת האקולוגית. במחקר זה נפתח ונייטש מודל אקולוגי מרחבי על מנת להעריך כמותית את ההשלכות האפשריות של אירועי זיהום בים התיכון. המודל מסוג Ecospace הוא מודל מרחבי למודלים אקולוגיים מהסוג Ecopath with Ecosim (EwE) שפותחו ויושמו בעבר לים התיכון הישראלי (Corrales et al. 2017, Corrales et al. 2018). המודל המרחבי שנייטש במסגרת פרויקט זה (Ofir et al. בהכנה) יורחב לכלול עקומות תגובה של מינים ימיים לרמות שונות של מזהמים שמקורם מאירוע שפך של דלקים פוסילים. לשם כך נערך סקר ספרות מקיף של מחקרים בספרות הבינלאומית, בנוסף לשילוב מידע מהניטור השוטף של הים התיכון. המידע שנאסף תורגם לעקומות רגישות אשר קודדו למודלים המעודכנים. בשלב הבא, המודלים יבחנו סדרה מקיפה של תרחישי זיהום סטטיים ודינמיים במרחב והשלכות הזיהומים על המערכת האקולוגית יאובחנו על ידי שינויים בביומסה של המינים השונים, בזמן ובמרחב, בנוסף לחישוב מדדים כמותיים המשקפים את התפקוד של מארג המזון. תוצאות המחקר יתנו הערכה כמותית של ההשלכות האקולוגיות ואורך טווח ההשפעה על המינים המצויים בים התיכון שבאמצעותה מקבלי ההחלטות יוכלו להיעזר על מנת לבסס ממשקי מנהל ושימור.

### **מטרת המחקר**

המטרה העיקרית של המחקר היא להעריך את הסיכון ואת ההשפעה האקולוגית של שפיכת תוצרי דלקים פוסילים (נפט, קונדנסט וכו') על המערכת האקולוגית במרחב הכלכלי הישראלי. עם זאת, האתגר במטרה זו הוא חוסר הודאות הנובע מסיבות שונות, ביניהם הטווח רחב של תרחישים אפשריים, המגוון הרחב של החומרים הכימיים בהרכבים שונים הנשפכים באירועי זיהום והמורכבות הרבה של מארג המזון, יחסי הגומלין בתוכו והתגובות הביולוגיות המשתנות של המינים השונים. אחת הדרכים לצמצם את חוסר הודאות היא באמצעות הערכה כמותית של ההשפעות האקולוגיות של אירועי זיהום באמצעות מודלים אקולוגיים. לשם כך נייטש מודל כמותי על מנת לענות על השאלות הבאות:

1. מהו הריכוז המינימלי של החומרים הרעילים, כגון PAH (polycyclic aromatic hydrocarbons) אשר יגרום לירידה מובהקת בביומסה של מינים מרכזיים במרחב הכלכלי הישראלי כתוצאה מאירוע זיהום הנגרם בעקבות פעילות קידוחי הדלק הפוסילים?
2. מה תהיה ההשפעה של תרחישי הזיהום השונים בכמות ומרכיבי החומרים הרעילים, אזור גיאוגרפי והיקף על מארג המזון של המינים במרחב הכלכלי הישראלי?

### **שיטות**

המודל בו נשתמש במחקר הזה נשען על מודלים קיימים שפותחו באמצעות תוכנת ה-Ecopath with Ecosim (Corrales et al. 2017, Corrales et al. 2018). המודלים מספקים תמונת מצב סטטית ודינמית מבחינת הביומסה של המרכיבים של המערכת האקולוגית והאינטראקציה בתוכה מיוצגת על ידי קבוצות מינים שונות. הקבוצות מכילות מינים אשר זהים בנישה האקולוגית ובמיוחד במקורות המזון שלהם ונקראות 'קבוצות פונקציונליות' והן מכילות בתוכן מינים מקומיים ופולשים החל מחד-תאים ועד טורפי-על כגון כרישים.

במחקר זה המודל מכיל 42 קבוצות פונקציונליות של מינים המצויים במרחב הכלכלי הישראלי. עבור קבוצות אלו (או רובם הגדול) ייקבעו עקומות תגובה ורגישות אשר יקבעו על בסיס התגובות הביולוגיות של המינים השונים לחומרים הרעילים שייבחרו.

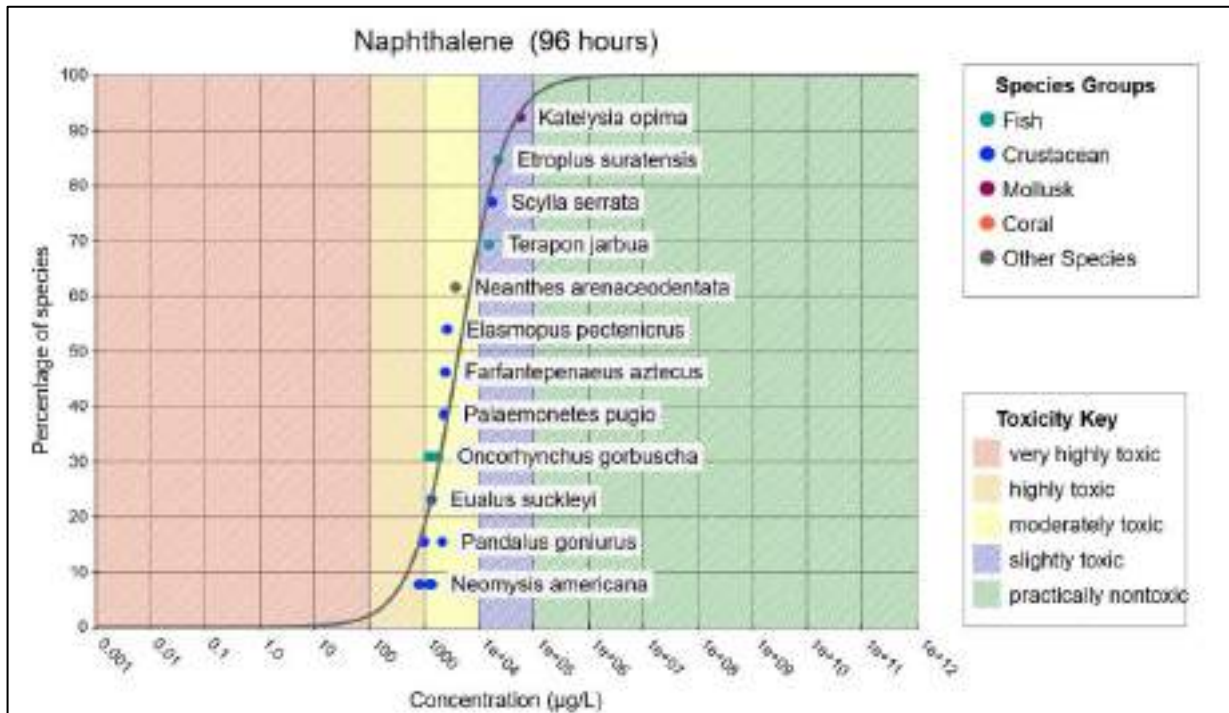
- לשם כך התבצעה סקירת ספרות מקיפה של מחקרים בספרות הבינלאומית על מנת לבסס מידע על:
1. עקומת התגובה של מינים ימיים לחומרים מזהמים שמקורם דלקים פוסילים, אשר נאספו מאזורים בהם היו אירועי זיהום (אלסקה ומפרץ מקסיקו), במטרה להתאים את עקומות התגובה למינים דומים המצויים בים התיכון.
  2. מודלים זיהום שנבנו באקוספייס או בתוכנות דומות שאמדו תרחישים של זיהום דלקים פוסילים ומקורות אחרים של זיהום במערכת האקולוגית הימית.
  3. רמת הרעילות של המזהמים השונים המעורבים בתהליכי החיפוש, הפקה והשינוע של דלקים פוסילים חמים לחומרים הכימיים שאנו מצפים למצוא בתרחישי הזיהום, כגון חומרים ארומטיים (PAHs), (MAHs).
- לאחר שלב זה, הגדרנו את עקומות התגובה של הקבוצות הפונקציונאליות למזהמים השונים והעקומות הוצבו במודל האקוספייס. בנוסף, הגדרנו את ריכחי הרעילות המינימליים של המזהמים השונים למינים ובתי גידול שונים, על ידי הצבת הריכחים המינימליים של המזהמים אשר נמצאו שגורמים לתגובות ביולוגיות (בעיקר תמותה) במינים השונים. הגדרות נעשו בהתאם למידע על מדדי הרעילות שנאספו ובהתאם לריכחים שאנו מצפים למדוד בתרחישים שנבחו.
- השלב הבא במחקר יכלול בחינת תרחישים. התרחישים ייבנו וישמשו להערכת ההשפעה של אירועי זיהום שונים מבחינת החומרים המזהמים, ריכחים, היקף וכו' על מארג המזון הימי במרחב הכלכלי הישראלי. שלב זה יכלול שני חלקים:
- בחלק הראשון, פיתוח ובחינת מספר תרחישים בסיסיים של אירועי זיהום נפט או קונדנסט באחד מאתרי הקידוח. בשלב זה, יבחנו תרחישים סטטיים בהם כתם הזיהום לא מתפשט במרחב עם הזמן ומאפשרים למדוד את הזמן שלוקח לראות את ההשפעה על מארג המזון. בנוסף, נבחן תרחישים דינמיים במרחב המציבים תמונת מצב ריאליסטית יותר ומספקים מידע על התפשטות כתם הזיהום עם הזמן. לבניית תרחישים אלו נשתמש במידע שנאסף על אירוע הזיהום בחדש פברואר 2021.
- בחלק השני, התרחישים הבסיסיים יותאמו ויורחבו על מנת לבנות אוסף של תרחישים מפותחים המחולקים לקטגוריות של מיקום, חומרת הזיהום, עונות השנה ומשך אירוע הזיהום (טבלה 19). כתוצאה מכך נקבל מספר רב של סימולציות אותן נוכל לנתח על מנת לקבל מפות רגישות והערכות סיכונים כפונקציה של מאפייני אירוע הזיהום, מיקום ותזמון. רמת הרגישות והסיכונים יקבעו על ידי מטריקס האוכלוסייה (לדוגמה, שינויים בביומסה של מינים מקומיים ופולשים) ואינדיקטורים אקולוגיים נוספים.

**טבלה 19:** התרחישים המתקדמים- הגורמים המשתנים שיותאמו לתרחישי הבסיס.

גורם	טווח רמות הגורמים
<b>מיקום</b>	3 דרגות של רגישות בית הגידול, מבוסס על מפות רגישות בתי גידול של חיא"ל ומיקום גאוגרפי של מקור הזיהום
<b>חומרה (מספר חביות נפט)</b>	X0.25, X0.5, X1.5, X2
<b>עונת השנה</b>	חורף, קיץ
<b>משך אירוע הזיהום</b>	3 דרגות סך הכל, עד 3 חודשים

## תוצאות ודיון

כאמור, סקר הספרות המקיף שבוצע כלל איסוף מאמרים של מחקרים קודמים הבודקים את השפעת אירועי זיהום דלקים פוסילים על המערכת האקולוגית הימית, במטרה לגבש בסיס מידע על מודלים זהים, נתוני רעילות ותגובות ביולוגיות של מינים שונים. אחד ממקורות המידע שנמצאו הוא בסיס הנתונים CAFE (Chemical Aquatic Fate and Effects) של הגוף הממשלתי האמריקאי NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), בו ניתן לחפש את עקומות התגובה של מינים ימים ואקוטים שונים לפי סוג החומר. בסיס נתונים זה יעיל במיוחד ומשמש כמקור לנתוני התגובה וריכזי הרעלנים (איור 135, טבלה 20), אותם נציב כעקומות תגובה במודל על מנת לבחון את התרחישים השונים.



**איור 135:** תוצאות החיפוש בבסיס הנתונים CAFE של התגובות הביולוגיות (LC50) של מינים ימיים שונים לרעלן Naphthalene.

בהמשך הפרויקט נבנה ונבחן מספר תרחישים סטטיים ודינמיים במרחב של אירועי זיהום של דלקים פוסילים, בהתבסס על הנתונים מבסיס הנתונים CAFE (טבלה 20), המאמרים מסקירת הספרות (טבלה 21) והמידע שנאסף על אירוע הזיהום בחודש פברואר 2021.

## ביבלוגרפיה

- Corrales, X., M. Coll, E. Ofir, J. J. Heymans, J. Steenbeek, M. Goren, D. Edelist, and G. Gal. 2018. Future scenarios of marine resources and ecosystem conditions in the Eastern Mediterranean under the impacts of fishing, alien species and sea warming. Scientific Reports 8:14284.
- Corrales, X., E. Ofir, M. Coll, M. Goren, D. Edelist, J. J. Heymans, and G. Gal. 2017. Modeling the role and impact of alien species and fisheries on the Israeli marine continental shelf ecosystem. Journal of Marine Systems 170:8.8-102

**טבלה 20:** ריכוזי התגובה (LC50) של מינים ימיים שונים לרעלן Naphthalene בתוצאות החיפוש בבסיס הנתונים

CAFÉ

ריכוזי 50LC שנמדדו (µg/L)	שם המין	שם מדעי
2680	Scud	<i>Elasmopus pecteniscus</i>
23,000	Pearl Spot	<i>Etroplus suratensis</i>
1390	Shortscale Eualid	<i>Eualus suckleyi</i>
2500	Brown Shrimp	<i>Farfantepenaeus aztecus</i>
57,000	Marine Bivalve	<i>Katelysia opima</i>
3800, 3800	Polychaete Worm	<i>Neanthes arenaceodentata</i>
1420, 850, 1280, 800, 1350, 1250	Opossum Shrimp	<i>Neomysis americana</i>
1200, 1370, 1840, 1240	Pink Salmon	<i>Oncorhynchus gorbuscha</i>
2350, 2350, 2400	Daggerblade Grass Shrimp	<i>Palaemonetes pugio</i>
971, 2160, 1020	Humpy Shrimp	<i>Pandalus goniurus</i>
17,770	Crab	<i>Scylla serrata</i>
15,500	Tigerfish	<i>Terapon jarbua</i>

**טבלה 21:** דוגמה מתוך טבלת ריכוזי נתוני התמותה וריכוזי הרעילות של מינים שונים שנאספו בסקר הספרות וישמשו כבסיס לעקומות התגובה במודל.

paper	organism	chemical	response	index	optimum	min in ppm	max in ppm	credibility
C. Barata et al 2005	copepod- <i>Oithona davisae</i>	Naphthalene	survival	EC50	0	0.1422	7.981	not from Med
C. Barata et al 2005	copepod- <i>Oithona davisae</i>	1-Methylnaphthalene	survival	EC50	0	0.1281	2.652	not from Med
C. Barata et al 2005	copepod- <i>Oithona davisae</i>	1,2-Dimethylnaphthalene	survival	EC50	0	0.1562	0.61699	not from Med
C. Barata et al 2005	copepod- <i>Oithona davisae</i>	Phenanthrene	survival	EC50	0	0.1782	0.522126	not from Med
C. Barata et al 2005	copepod- <i>Oithona davisae</i>	1-Methylphenanthrene	survival	EC50	0	0.1422	0.688248	not from Med
C. Barata et al 2005	copepod- <i>Oithona davisae</i>	3,6-Dimethylphenanthrene	survival	EC50	0	0.1422	0.1422	not from Med
C. Barata et al 2005	copepod- <i>Oithona davisae</i>	Fluorene	survival	EC50	0	0.1662	1.799946	not from Med
C. Barata et al 2005	copepod- <i>Oithona davisae</i>	Dibenzothiophene	survival	EC50	0	0.1842	0.550758	not from Med
C. Barata et al 2005	copepod- <i>Oithona davisae</i>	Fluoranthene	survival	EC50	0	0.2023	0.196231	not from Med
C. Barata et al 2005	copepod- <i>Oithona davisae</i>	Pyrene	survival	EC50	0	0.2023	0.153748	not from Med
B. Echols et al 2016a	scyphozoa jellyfish	TPAH	mortality	LC50	0	0.0533	0.131	found in med
M. Carls et al. 1999	Pacific herring	TPAH	egg mortality	LOEC	0	0.0343	0.0343	not from Med
M. Carls et al. 1999	Pacific herring	TPAH	egg mortality	EC50	0	0.0343	0.0533	not from Med
M. Carls et al. 1999	Pacific herring	TPAH	larvae mortality	LOEC	0	0.0343	0.0343	not from Med
M. Carls et al. 1999	Pacific herring	TPAH	egg mortality	LOEC	0	0.00072	0.00761	not from Med
M. Carls et al. 1999	Pacific herring	TPAH	larvae mortality	LOEC	0	0.00072	0.00072	not from Med
J. H. Paul et al 2013	bacteria and phytoplankton	pure BP oil (SOB-20100628-047)	mortality	LD50	0	10	10	found in med
J. H. Paul et al 2013	bacteria and phytoplankton	Corexit EC 9500A	mortality	LD50	0	10	100	found in med
J. H. Paul et al 2013	bacteria and phytoplankton	mixture	mortality	LD50	0	10	10	found in med
J. H. Paul et al 2013	bacteria and phytoplankton	pure BP oil (SOB-20100628-047)	mortality	LD50	0	0.1	1000	found in med
J. H. Paul et al 2013	bacteria and phytoplankton	Corexit EC 9500A	mortality	LD50	0	0.1	10	found in med
J. H. Paul et al 2013	bacteria and phytoplankton	mixture	mortality	LD50	0	0.1	10	found in med
N. Brown-Peterson et al. 2012	juvenile Southern flounder	tPAH50	mortality	LC50	0	0.031-394.9	78.1	not from Med
N. Brown-Peterson et al. 2012	juvenile Southern flounder	tPAH50	mortality	LC20	0	0.031-394.9	36.3	not from Med
B. Echols et al 2016b	Mysid Shrimp ( <i>Americamysis bahia</i> )	TPAH	survival	LOEC	0	0.0441	0.132	not from Med
B. Echols et al 2016b	Inland Silversides ( <i>Menidia beryllina</i> )	TPAH	survival	LOEC	0	0.0441	0.132	not from Med
B. Echols et al 2016b	Inland Silversides ( <i>Menidia beryllina</i> )	TPAH	survival	LOEC	0	0.00761	0.0123	not from Med
D. Philibert et al. 2019	sheepshead minnow	TPAH (source oil+ disp.)	mortality	LC50	0	0.05	0.2075	not from Med
D. Philibert et al. 2019	zebrafish	TPAH (source oil+ disp.)	mortality	LC50	0	0.05	0.2651	not from Med
B. Echols et al 2016a	scyphozoa jellyfish	Corexit 9500	mortality	LC50	0	0.0096	0.0323	found in med
Page et al. 2002	amphipod <i>Rhepoxynius abronius</i>	TPAH	mortality	LC10	0	0.000117	0.0041	not from Med
C. Travers et al. 2015	Bay anchovy	TPAH Slick B	mortality	LC50	0	0.0005	0.0014	found in med
C. Travers et al. 2015	Speckled sea trout	TPAH Slick B	mortality	LC50	0	0.0005	0.0247	not from Med
C. Travers et al. 2015	Red drum	TPAH Slick A	mortality	LC50	0	0.0005	0.0271	not from Med
C. Travers et al. 2015	Bay anchovy	TPAH Slick A	mortality	LC50	0	0.0005	0.0039	not from Med
C. Travers et al. 2015	Speckled sea trout	TPAH Slick A	mortality	LC50	0	0.0005	0.0303	not from Med
C. Travers et al. 2015	Red drum	TPAH Slick B	mortality	LC50	0	0.0005	0.0309	not from Med
C. Travers et al. 2015	Mahi-mahi	TPAH Slick A	mortality	LC50	0	0.0005	0.0088	found in med
C. Travers et al. 2015	Copepod	TPAH Slick A	mortality	LC50	0	0.0005	0.0644	found in med
A.J. Esbaugh et al. 2016	Mahi-mahi	High energy DWH Source oil	mortality	LC50	0	0.0001	0.0458	found in med
A.J. Esbaugh et al. 2016	Mahi-mahi	High energy Weathered oil	mortality	LC50	0	0	0.0123	found in med
A.J. Esbaugh et al. 2016	Mahi-mahi	High energy Slick A oil	mortality	LC50	0	0	0.0088	found in med
A.J. Esbaugh et al. 2016	Mahi-mahi	Chemically enhanced DWH Source oil	mortality	LC50	0	0	0.0253	found in med
A.J. Esbaugh et al. 2016	Mahi-mahi	Chemically enhanced Weathered oil	mortality	LC50	0	0	0.0087	found in med
A.J. Esbaugh et al. 2016	Mahi-mahi	Chemically enhanced Slick A oil	mortality	LC50	0	0	0.0095	found in med



## 5 נספחים

## 5.1 סטודנטים לתארים מתקדמים בהנחיית חוקרי המעבדה לחקר הכנרת 2020

שם	תואר	אוניברסיטה	נושא	מנחה בחיא"ל	מנחה באוני' באונ'
1	פ' ג'בה - דב	פוסט-דוקטורט	חיא"ל Institute of Indian Technology, Madras.	מערכת ICT לניטור תגובת עמידות אקולוגית במערכות מים מתוקים. מוגש למשרד המדע והטכנולוגיה	א' אוסטרובסקי
2	ס' ויו	דוקטורט	מכון הידרוביולוגי - ויוהאן סין	מחקר אקוסטי של מיקרוציסטיס באגם דאנצ'י	א' אוסטרובסקי L. Song
3	ה' הומה	פוסט-דוקטורט	Tokyo University of Marine Science and Technology, Japan.	שימוש בציוד אקוסטי מתקדם לזיהוי דגים והערכת ביומסה	א' אוסטרובסקי
4	ע' ברגמן	פוסט-דוקטורט	חיא"ל	הדינמיקה של תהליכי חימצון/חיזור בכמוקלינה של אגם הכנרת - ניתוח כימי-גנטי	ו' אקרט
5	ח' ויגדרוביץ'	דוקטורט	אוני' בן-גוריון	מנגנוני חיזור ברזל באזור מתאנוגנזה בסדימנטים	א' סיון ו' אקרט
6	ע' זרקה	מוסמך	תל-חי	מקורות האבק לכנרת	א' רייכמן א' ליטאור י' בארי-שליון
7	ר' רוטשטיין	מוסמך	אוני' חיפה	הסעת סדימנטים בנחלי בקעת בית-צידא	י' בארי-שליון נ' גרינבאום
8	ג' ביטון	מוסמך	אוני' חיפה	Economic aspects of fish stock accounting as a renewable natural capital existing within the Israeli marine habitat	ג' גל ש' צמח-שמיר
9	א' להב	מוסמך	אוני' חיפה	Modeling Potential Impacts of Gas Exploitation on the Israeli Marine Ecosystem	ג' גל ר' בוקמן
10	י' לצ'ינסקי	דוקטורט	אוני' חיפה	A data-driven approach for ecological monitoring of Lake Kinneret	ג' גל י' להן



11	ש' רגב	דוקטורט	טכניון	השלכות של בצורות ארוכת טווח ושינויי אקלים על המערכת האקולוגית של הכנרת	ג' גל	י' כרמל
12	ש' גובר	מוסמך	המרכז האקדמי רופין-קמפוס מכמורת	אקולוגיה של הירקון	ע' נשרי	ש' גפני
13	ת' זילברמן	דוקטורט	אוני' עברית	שימוש באיזוטופים של חנקן למידול מחזור החנקן בכנרת	ע' נשרי	ב' לזר
14	י' שנל	דוקטורט	אוני' עברית	נסיון לזיהוי ביומרקרים בקרקעית הכנרת	ע' נשרי	י' אראל
15	ת' לשם	דוקטורט	אוני' חיפה	כיטרדים של אצות הכנרת	א' סוקניק	ד' צ'רנוב
16	א' שוויצר	דוקטורט	אוני' חיפה	דינמיקה של אוכלוסיות חיידקים המלוות פריחה של מיקרוציסטיס	א' סוקניק	ד' צ'רנוב ד' שר
17	א' בן-חור	מוסמך	אוני' תל אביב	The effect of an Effective Microorganisms (EM) formula on the intensity of growth of toxic cyanobacteria in Lake Kinneret	א' סוקניק	א' גזית
18	ע' רחנשטיין	מוסמך	תל-חי	הרחקה של ציאנובקטריה ממקורות גלם למי שתיה וממאגרי מים באמצעות מרכבי חרסיות	א' סוקניק	ג' ריטבו

# 5.2 פרסומי המעבדה בספרות הבינלאומית המבוקרת ב-2020/21

**Amitai, Y.**, Ashkenazy, Y., and H. Gildor. **2021**. The effect of the source of deep water in the Eastern Mediterranean on Western Mediterranean intermediate and deep water. *Frontiers in Marine Science* 7:1215. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.615975>

**Amitai, Y.**, Yam, R., Montagna, P., Devoti, S., Correa, M. L., and A. Shemesh. **2020**. Spatial and temporal variability in Mediterranean climate over the last millennium from vermetid isotope records and CMIP5/PMIP3 models. *Global and Planetary Change* 189:103159. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103159>

**Astrahan, P.**, Korzen, L., Khanin, M., Sharoni, Y., and A. Israel. **2021**. Seaweeds fast EDC bioremediation: supporting evidence of EE2 and BPA degradation by the red seaweed *Gracilaria* sp. and a proposed model for the remedy of marine-borne phenol pollutants *Environmental Pollution* 278:116853. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116853>

Bižić, M., Klintzsch T., Ionescu D., Hindiyeh M. Y., Günthel M., Muro-Pastor A. M., **Eckert W.**, Urich T., Keppler F., and H.-P. Grossart. **2020**. Aquatic and terrestrial cyanobacteria produce methane. *Science Advances* 6 (3):1-9. DOI: 10.1126/sciadv.aax5343

Cohen, R., Paikin, S., Rokney, A., Rubin Blum, M., and **P. Astrahan**. **2020**. Multidrug-resistant enterobacteriaceae in coastal water: an emerging threat. *Antimicrobial Resistant Infection Control* 9 (169): 1-9. <https://doi.org/10.1186/s13756-020-00826-2>

Cook, K.V., Li, C., Cai, H., Krumholz, L.R., Hambright, K.D., Paerl, H.W., Steffen, M.M., Wilson, A.E., Burford, M.A., Grossart, H.-P., Hamilton, D.P., Jiang, H., **Sukenik, A.**, Latour, D., Meyer, E.I., Padisák, J., Qin, B., Zamor, R.M. and G. Zhu. **2020**. The global *Microcystis* interactome. *Limnology and Oceanography* 65: S194-S207. doi:10.1002/lno.11361

Doubek, J.P., Anneville, O., Dur, G., Lewandowska, A.M., Patil, V.P., Rusak, J.A., Salmaso, N., Seltmann, C.T., Straile, D., Urrutia-Corderon, W.T.P., Venail, P., Adrian, R., Alfonso, M.B., DeGasperi, C.L., de Eyto, E., Feuchtmayr, H., Gaiser, E.E., Girdner, S.F., Graham, J.L., Grossart, H-P., Hejzlar, J., Jacquet, S., Kirillin, G., Llamas, M.E., Matsuzaki, S.S., Nodine, E.R., Piccolo, M.C., Pierson, D.C., **Rimmer, A.**, Rudstam, L.G., Sadro, S., Swain, H.M., Thackeray, S.J., Thiery, W., Verburg, P., **Zohary, T.** and J.D Stockwell. **In Press**. The extent and variability of storm-induced temperature changes in lakes measured with long-term and high-frequency data. *Limnology and Oceanography*. <https://doi.org/10.1002/lno.11739>



Flores, J. M., Bourdin, G., Altaratz, O., Trainic, M., **Lang-Yona, N.**, Dzimban, E., Steinau, S., Tettich, F., Planes, S., Allemand, D., Agostini, S., Banaigs, B., Boissin, E., Boss, E., Douville, E., Forcioli, D., Furla, P., Galand, P. E., Sullivan, M. B., Gilson, É., Lombard, F., Moulin, C., Pesant, S., Poulain, J., Reynaud, S., Romac, S., Sunagawa, S., Thomas, O. P., Troublé, R., de Vargas, C., Thurber, R. V., Voolstra, C. R., Wincker, P., Zoccola, D., Bowler, C., Gorsky, G., Rudich, Y., Vardi, A. and I. Koren. **2020**. Tara Pacific Expedition's Atmospheric Measurements of Marine Aerosols across the Atlantic and Pacific Oceans: Overview and Preliminary Results, *Bulletin of the American Meteorological Society* 101(5): E536-E554. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0224.1>

Flores, J. M., Bourdin, G., Kostinski, A., Altaratz, O., Dagan, G., Lombard, F., Haëntjens, N., Boss, E., Sullivan, M., Gorsky, G., **Lang-Yona, N.**, Trainic, M., Romac, S., Voolstra, C., Rudich, Y., Vardi, A., and I. Koren. **In press**. Diel cycle of sea spray aerosol concentration over vast areas of the tropical Pacific Ocean and the Caribbean Sea, available at Research Square <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-74373/v1>

**Gal, G.**, Gilboa, Y., **Schachar, N.**, **Estrofi, M.**, and D. Schlabling. **2020**. Ensemble Modelling of the Impact of Climate Warming and Increased Frequency of Extreme Climatic Events on the Thermal Characteristics of a Sub-Tropical Lake. *Water* 12. doi:10.3390/w12071982

Grossowicz, M., **Ofir, E.**, Shabtay, A., Wood J., Biton, E., Belkin, N., Frid O., Sisma-Ventura, G., Kress, N., Berman-Frank I., and **G. Gal**. **2020**. Modeling the effects of brine outflow from desalination plants on coastal food-webs of the Levantine basin (eastern Mediterranean Sea). *Desalination* 496:114757. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114757>

Grossowicz, M., **Varulker, S.**, **Koren, N.**, and **G. Gal**. **In press**. Desalination plants do not impact the diversity or abundance of zooplankton of the Israeli coast. *Desalination* 511.

Hipsey, M. R., **Gal, G.**, Arhonditsis, G. B., Carey, C. C., Elliott, J. A., Frassl, M. A., Janse, J. H., de Mora, L., and B. J. Robson. **2020**. A system of metrics for the assessment and improvement of aquatic ecosystem models. *Environmental Modelling & Software* 128:104697. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104697>

**Homma, H.**, and **I. Ostrovsky**. **2021**. The relationship between target strength frequency response and vertical swim velocity: a new approach for fish discrimination. *Aquatic Living Resources* 34.

Hozumi, A., **Ostrovsky, I.**, **Sukenik, A.**, and H. Gildor. **2020**. Turbulence regulation of Microcystis surface scum formation and dispersion during a cyanobacteria bloom event. *Inland Waters* 10: 51-70. <https://doi.org/10.1080/20442041.2019.1637681>

- Huang, Y., Liu, S., Shen, Y., Hong, J., Peng, L., Li, L., Xu, P., Hu, J., Chen, X., and **I. Ostrovsky**. 2020. Nitrogen availability affects the dynamics of *Microcystis* blooms by regulating the downward transport of biomass. *Harmful algae* 93:101796. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2020.101796>
- Kao, Y.-C., Rogers, M. W., Bunnell, D. B., Cowx, I. G., Qian, S. S., Anneville, O., Beard, T. D., Brinker, A., Britton, J. R., Chura-Cruz, R., Gownaris, N. J., Jackson, J.R., Kangur, K., Kolding, J., Lukin A. A., Lynch, A. J., Mercado-Silva, N., Moncayo-Estrada, R., Njaya, F. J., **Ostrovsky, I.**, Rudstam, L. G., Sandström, A. L.E., Sato, Y., Siguayro-Mamani, H., Thorpe, A., Van Zwieten, P. A.M., Volta, P., Wang, Y., Weiperth, A., Weyl, O. L.F., and J.D. Young. 2020. Effects of climate and land-use changes on fish catches across lakes at a global scale. *Nature Communications* 11:1-14. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14624-2>
- Kaplan-Levy, R. N., Alster, A., Shlichter, M., and T. Zohary**. 2020. The Israel National Culture Collection of Algae (INCCA) for biodiversity conservation. *Nova Hedwigia* 111:231-243. DOI: 10.1127/nova\_hedwigia/2020/0603
- Kleinhaus, K., Voolstra, C. R., Meibom, A., **Amitai, Y.**, Gildor, H., and M. Fine. 2020. A closing window of opportunity to save a unique marine ecosystem. *Frontiers in Marine Science* 7:1117. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.615733>
- Lang-Yona, N.**, F. Öztürk, D. Gat, M. Aktürk, E. Dikmen, P. Zampas, M. Tsagkaraki, N. Mihalopoulos, A. Birgül, and P. B. Kurt-Karakuş. 2020. Links between airborne microbiome, meteorology, and chemical composition in northwestern Turkey. *Science of the Total Environment* 725:138227. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138227>
- Liu, L., Sotiri, K., Dück, Y., Hilgert, S., **Ostrovsky, I.**, Uzhansky, E., Katsman, R., Katsnelson, B., Bookman, R., Wilkinson, J., and A. Lorke. 2020. The control of sediment gas accumulation on spatial distribution of ebullition in Lake Kinneret. *Geo-Marine Letters* 40 (4): 453–466. <https://doi.org/10.1007/s00367-019-00612-z>
- Lohrberg, A., Schmale, O., **Ostrovsky, I.**, Niemann, H., Held, P., and J. S. von Deimling. 2020. Discovery and quantification of a widespread methane ebullition event in a coastal inlet (Baltic Sea) using a novel sonar strategy. *Scientific Reports* 10:1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60283-0>
- Minshull, T.A., Marín-Moreno, H., Betlem, P., Bialas, J., Buenz, S., Burwicz, E., Cameselle, A.L., Cifci, G., Giustiniani, M., Hillman, J.I.T., Hölz, S., Hopper, J.R., Ion, G., León, R., Magalhaes, V., Makovsky, Y., Mata, M.-P., Max, M.D., Nielsen, T., Okay, S., **Ostrovsky, I.**, O'Neill, N., Pinheiro, L.M., Plaza-Faverola, A.A., Rey, D., Roy, S., Schwalenberg, K., Senger, K., Vadakkepuliambatta, S., Vasilev, A., Vázquez, Juan.-Tomá. 2020. Hydrate occurrence in Europe: A review of available evidence, *Marine and Petroleum Geology* 111: 735-764. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.08.014>



- Naselli-Flores, L., **Zohary, T.**, and J. Padisák. **2021**. Life in suspension and its impact on phytoplankton morphology: an homage to Colin S. Reynolds. *Hydrobiologia*: 7-30.  
<https://doi.org/10.1007/s10750-020-04217-x>
- Ninio, S., Lupu, A., Eckert, W. Ostrovsky, I. Viner Mozzini, Y., and A. Sukenik. 2021**. Metalimnetic chlorophyll maxima in Lake Kinneret - Chlorobium revisited. *Freshwater Biology*. 66: 468– 480.  
<https://doi.org/10.1111/fwb.13653>
- Ninio, S., Lupu, A. Viner-Mozzini, Y., Zohary, T., and A. Sukenik. 2020**. Multiannual variations in Microcystis bloom episodes – Temperature drives shift in species composition. *Harmful Algae* 92: 101710. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.101710>
- Ostrovsky, I., Wu, S.,** Li, L., and L. Song. **2020**. Bloom-forming toxic cyanobacterium Microcystis: Quantification and monitoring with a high-frequency echosounder. *Water Research*:116091.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116091>
- Peled, Y., Shamir, S. Z., Israel, A. Shechter, M., **Ofir, E., and G. Gal. 2020**. Incorporating insurance value into ecosystem services assessments: Mitigation of ecosystem users' welfare uncertainty through biological control. *Ecosystem Services* 46:101192. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101192>
- Poikane, S., **Zohary, T.**, and M. Cantonati. **2020**. Assessing the ecological effects of hydromorphological pressures on European lakes. *Inland Waters* 10: 241-255. DOI: 10.1080/20442041.2019.1654800.
- Rahav, E., Raveh, O., Y. Golub, K., Belkin, N., **Astrahan, P.**, Maayani, M., Tsumi, N., Kiro, Y., Herut, B., Silverman, J., and L.D Angel. **2020**. Nitrate-enrichment structures phytoplankton communities in the shallow eastern Mediterranean coastal waters. *Frontiers in Marine Science*, section Marine Pollution.7:611497.  
doi: 10.3389/fmars.2020.611497
- Santoso, A. B., Hamilton, D. P., Schipper, L. A., **Ostrovsky, I.**, and C. H. Hendy. **2020**. High contribution of methane in greenhouse gas emissions from a eutrophic lake: a mass balance synthesis. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*:1-20.  
<https://doi.org/10.1080/00288330.2020.1798476>
- Seifert-Dähnn, I., Skumlien Furuseth, I., Kofi Vondolia, G., **Gal, G.**, de Eyto, E., Jennings, E., and D. Pierson. **2021**. Costs and benefits of automated high-frequency environmental monitoring – the case of lake water management. *Journal of Environmental Management*: 285:112108.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112108>

- Shai, Y., Rubin, B.M., Angel, L.D., Sisma Ventura, G., Zurel, D., **Astrahan, P.**, and E. Rahav. **2020**. Response of oligotrophic coastal microbial populations in the SE Mediterranean Sea to crude oil pollution; lessons from mesocosm studies. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 249:107102. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.107102>
- Stockwell, J.D., Doubek, J.P., Adrian, R., Anneville, O., Carey, C.C., Carvalho, L., De Senerpont Domis, L.N., Dur, G., Frassl, M.A., Grossart, H.P., Ibelings, B.W., Lajeunesse, M. J., Lewandowska, A.M., Llamas, M.E., Matsuzaki S-I.S., Nodine, E.R., Nöges, P., Patil V. P., Pomati, F., Rinke, K., Rudstam, L.G., Rusak, J.A., Salmaso, N., Seltmann, C.T., Straile, D., Thackeray, S.J., Thiery, W., Urrutia-Corderon, P., Venail, P., Verburg, P., Woolway, R.L., **Zohary, T.**, Andersen, M.R., Bhattachary, R., Hejzlar, J., Janatian, N., Kpodonu, A.T.N.K., Williamson, T.J., and Harriet L. Wilson. **2020**. Storm Impacts on Phytoplankton Community Dynamics in Lakes. *Global Change Biology* 26:2756-2784. <https://doi.org/10.1111/gcb.15033>
- Uzhansky, E., Katsnelson, B., Lunkov, A., and **I. Ostrovsky**. **2020**. Spatial and temporal variability of free gas content in shallow sediments: Lake Kinneret as a case study. *Geo-Marine Letters* 1-15. <https://doi.org/10.1007/s00367-019-00629-4>
- Van der Hal, N., Yeruham, E. Shukis, D., Rilov, G., **Astrahan, P.**, and D. L. Angel. **2020**. Uptake and incorporation of PCBs by eastern Mediterranean rabbitfish that consumed microplastics. *Marine Pollution Bulletin* 150:110697. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110697>
- Wu, X., **Viner-Mozzini, Y.** Jia, Y., Song, L. and **A. Sukenik**. **2021**. Alkyltrimethylammonium (ATMA) surfactants as cyanocides-effects on photosynthesis and growth of cyanobacteria. *Chemosphere* 129778. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129778>
- Wu, X., Yang, T., Feng, S., Bangding Xiao, L. L., Song, L., **Sukenik, A.**, and **I. Ostrovsky**. **2020**. Recovery of Microcystis surface scum following a mixing event: Insights from a tank experiment. *Science of the Total Environment*. 138727. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138727>
- Zohary, T.** **2020**. Alon Rimmer: Tenacious Hydrologist, Devoted Editor, Mentor 1956-2018. *Journal of Hydrology* 588: 125067. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125067.
- Zohary, T.**, G. Flaim, and U. Sommer. **2021**. Temperature and the size of freshwater phytoplankton. *Hydrobiologia* 848: 143-155. <https://doi.org/10.1007/s10750-020-04246-6>

## 5.3 דו"חות המעבדה 2020

שם הדו"ח/המעבדה לחקר הכינרת ע"ש יגאל אלון	דו"ח חיא"ל מס'
<b>צוות חוקרי המעבדה לחקר הכנרת</b> . 2020. בחינת השלכות של שתי חלופות לחיבור אזורים מנותקים על הכנרת. מוגש לרשות המים.	<b>T1/2020</b>
<b>אופיר, א', בכר, ד', גזית, א', גל, ג', דולב, ע', זהרי, ת', עמר, ד', קמינגס, ד', תלחמי, פ'</b> 2020. השפעת הצומח החופי על האקולוגיה והפיתוח התיירותי של הכנרת, דו"ח ביניים לאבן דרך 3. מוגש לקרן לשטחים פתוחים.	<b>T2/2020</b>
<b>סוקניק, א', זהרי, ת', ניניו, ש', גל, ג', בארי-שליון, י'</b> . 2020. הערכת ההשפעה של הזרמת מי התפלה על מרכיבים ביולוגיים באגם. מוגש לרשות המים.	<b>T3/2020</b>
<b>בארי – שליון, י', גרינבאום, נ', רימר, א' (ז"ל)</b> . 2020. אפיון היציבות ההידרולוגית-סדימנטולוגית של התא הליטורלי בבקעת בית צידא, הכנרת, צפון ישראל והשלכות לגבי בתי גידול אקולוגיים. מוגש למשרד המדע.	<b>T4/2020</b>
<b>צוות המעבדה לחקר הכנרת</b> . 2020. מסמך רקע לגיבוש תכנית פעולה לשמירה על אגם הכנרת כאוגר אסטרטגי של מדינת ישראל, מוגש לרשות המים.	<b>T5/2020</b>
<b>גל, ג', אסטרותי, מ', שחר, נ'</b> . 2020. חיזוי שינויים במערכות אקוטיות בתגובה לשינויים על בסיס מודלים בזמן כמעט אמת. דוח סופי, מוגש למשרד האנרגיה.	<b>T6/2020</b>
<b>נשרי, ע' (מרכז)</b> . 2020. בחינה והמלצה למתכונת ניטור נחל הירקון. דו"ח סופי, מוגש לרשות נחל הירקון.	<b>T7/2020</b>
<b>גל, ג', אמיתי, י', סוקניק, א'</b> . 2020. בחינת השפעות אפשריות של הזרמת מי מערכת ארצית על איכות מי הכנרת והמערכת האקולוגית. דו"ח שנתי, שנה ראשונה. מוגש לרשות המים.	<b>T8/2020</b>
<b>צוות המעבדה לחקר הכנרת</b> . 2020 דו"ח שנתי ניטור ומחקרי כנרת לשנת 2019. מוגש לרשות המים.	<b>T9/2020</b>
<b>אקרט, ו', סולימני, ב', ניניו, ש', ברגמן, ע', פריימן, ז'</b> . 2020. הדינמיקה של תהליכי חימצון/חיזור בכמוקלינה של אגם הכנרת ניתוח כימי גנטי. דו"ח ביניים, מוגש לקרן הלאומית למדע.	<b>T10/2020</b>
<b>ניניו, ש', בארי-שליון, י', סוקניק, א'</b> . 2020. השפעת המליחות בכנרת על התבססות מיקרואורגניזמים שמקורם באבק אטמוספרי השוקע באגם. דו"ח ביניים, מוגש לרשות המים.	<b>T11/2020</b>
<b>אסטרון, פ'</b> . 2020. חומרים נדיפים (VOCs), חתימה כימית מרחבית יעילה לעליית אוכלוסיות ציאנובקטריה ופיטופלנקטון ספציפיות באגם הכנרת, מצב פיזיולוגי והרכב המינים. דו"ח חצי שנתי, שנה ראשונה. מוגש לרשות המים.	<b>T12/2020</b>
<b>אמיתי, י'</b> . 2020. בדיקת השפעת הזרמת מי מערכת ארצית לכנרת על הרכב ושיכוב המים באגם. דו"ח שנתי, שנה ראשונה. מוגש לרשות המים.	<b>T13/2020</b>

שם הדו"ח/המעבדה לחקר הכנרת ע"ש יגאל אלון	דו"ח חיא"ל מס'
זהרי, ת', גל, ג', בארי - שליון, י', אקרט, ו', קמינגס, ד', אופיר, א', בכר, ד', גזית, א', דולב, ע'. 2020. יערות אשלים מוצפים : בית גידול חדש בכנרת. דו"ח חצי שנתי, שנה ראשונה. מוגש לרשות המים.	T14/2020
אוסטרובסקי, א', סוקניק, א', ג' בה - דב, פ'. 2020. מערכת לזיהוי תגובת עמידות אקולוגית במערכות מים מתוקים. מוגש למשרד המדע.	T15/2020
צוות ניטור וחוקרי המעבדה לחקר הכנרת, חיא"ל. 2020 דוח חצי שנתי. מוגש לרשות המים.	T16/2020
אופיר, א', בכר, ד', גזית, א', גל, ג', דולב, ע', זהרי, ת', עמר, ד', קמינגס, ד', תלחמי, פ' 2020. . השפעת הצומח החופי על האקולוגיה והפיתוח התיירותי של הכנרת, דו"ח סופי. מוגש לקרן לשטחים פתוחים.	T17/2020
סוקניק, א'. 2020. גישות חדשניות לבקרה ומניעה של פריחות ציאנובקטריה רעילות בגופי מים – דוח שנה ב', שת"פ עם סין, מוגש למשרד המדע.	T18/2020
אמיתי, י', סוקניק, א', ניניו, ש', גל, ג', בארי-שליון, י'. 2020. בחינת השפעות אפשריות של הזרמת מי מערכת ארצית על איכות מי הכנרת והמערכת האקולוגית. דו"ח חצי שנתי, שנה ראשונה. מוגש לרשות המים.	T19/2020



## 5.4 ייעוץ והשתתפות בוועדות ממשלתיות לאומיות ומקצועיות בישראל ובחו"ל

### כללי

המעבדה לחקר הכנרת, כאחת היחידות של חקר ימים ואגמים לישראל, נותנת ייעוץ מקצועי לממשלה ע"י השתתפות של נציגים בוועדות ממשלתיות, השתתפות בדיונים של פורומים ממשלתיים שונים והגשת חוות דעת מקצועיות בע"פ ובכתב.

להלן מספר דוגמאות להשתתפות חוקרי המעבדה לחקר הכנרת בדיונים מקצועיים ופעולות ייעוץ לגורמים ממשלתיים ובינ"א במהלך שנת 2020:

- ✓ ניתנה חוות דעת למשרד להגנת הסביבה בנושא מפגע במסוף הכימיקלים בנמל חיפה/קישון.
- ✓ מעקב אחר אירוע פריחה חורפית של ציאנובקטריה. דו"ח אד הוק נשלח לרשות המים.
- ✓ מתן ייעוץ לרשות המים בנושא הזרמת מי התפלה לכנרת. הושלמה סדרת ניסויים מעבדתיים, ובוצעו ניסויים במודלים לבחינת ההשלכות.
- ✓ ייעוץ לרשות המים בנוגע לבעיית המלחת הכנרת, המפלסים הנמוכים ושילוב התנאים החריגים באגם בתקופה האחרונה.
- ✓ ייעוץ ומתן חוות דעת בנושא זמן השהות של מי הכנרת וההשלכות על איכות המים.
- ✓ לבקשת רשות המים החל ניטור מורחב של פריחות ציאנובקטריה בכנרת.
- ✓ לבקשת רשות המים החל תכנון וביצוע התקנת תחנת דיגום קבועה בצפון ובדרום הכנרת לצורך מעקב אחרי התפתחות פריחות של ציאנובקטריה באגם.
- ✓ ייעוץ לרשות המים בנושא רעלני ציאנובקטריה בכנרת, שכלל פיתוח ויישום פרוטוקול דיווח מדורג לרשות המים, וכן דיגום ואנליזות ייעודיות במקרה של פריחה בכנרת.
- ✓ ייעוץ לרשות המים בנושא ממשק הצומח בחופי הכנרת.
- ✓ ייעוץ לרשות המים בנושא הכנת מסמך תכנית אסטרטגית להתמודדות עם תקופות בצורת במשק המים.
- ✓ מספר מקרי חשד להרעלת דגים נבחנו גם השנה (כבכל שנה), הממצאים מצביעים מספר פעמים בשנה על פעילות עבריינית של הרעלת דגים. השנה קיים חשד לניסויי תכשירים שונים לביצוע פעילות זו המאלצים ניתוח מעמיק יותר. דיווחים נשלחו לאגף הדיג במשרד החקלאות ולרשות המים.

**השתתפות חוקרים בוועדות ממשלתיות לאומיות ומקצועיות בישראל ובחו"ל**

- ✓ השתתפות בפרויקט Conservation of freshwater mussels של COST ACTION של האיחוד האירופי (א' אוסטרובסקי).
- ✓ ועדת התפעול העליונה למשק המים, רשות המים (ג' גל, משקיף).
- ✓ הוועדה לממשק דיג בכינרת, משרד החקלאות (ת' זהרי, חברה, ג' גל, משקיף).
- ✓ ועדת אינטרדוקציה של בע"ח ואצות, משרד החקלאות (א' אוסטרובסקי, חבר).
- ✓ צוות היגוי ניטור כינרת ואגן ההיקוות, רשות המים (ג' גל, משקיף).
- ✓ ועדה לניטור ומניעת הרעלות דגים בכינרת, משרד החקלאות (ג' גל, משקיף).
- ✓ נציג הקהילה הלימנולוגית הישראלית בארגון הלימנולוגים הבין-לאומי SIL (א' אוסטרובסקי).
- ✓ מזכירה כללית וגזברית של ארגון הלימנולוגים הבין-לאומי SIL (ת' זהרי).
- ✓ ניהול תחנת חקר במדעי המים בגליליום, שותפות אזורית לקידום חינוך מדעי טכנולוגי באשכול גליל-מזרחי (ר' קפלן-לוי).
- ✓ The management committee at the specialist group on Lake and Reservoir Management, Internation Water Association (א' אוסטרובסקי).

**חברות במערכות של עיתונים מדעיים**

- ✓ Journal of Aquaculture & Marine Biology - Editorial Board (א' אוסטרובסקי)
- ✓ Ecological Informatics - Editorial Board (א' אוסטרובסקי)
- ✓ Limnology and Oceanography- Editorial Board (ו' אקרט)
- ✓ Inland Waters - Editorial Board (ו' אקרט)
- ✓ Scientific Reports - Editorial Board (ו' אקרט)
- ✓ Hydrobiologia – Editorial Board (ג' גל).
- ✓ Water (MDPI) - Editorial Board (ג' גל)
- ✓ Inland Waters -Editorial Board (ת' זהרי)
- ✓ יו"ר הוועד המנהל של כתב העת "אקולוגיה וסביבה" (א' סוקניק)
- ✓ Oceanography and Limnology - Editorial Board Advances (א' סוקניק)
- ✓ Frontiers in Aquatic Microbiology - Editorial Board (א' סוקניק)
- ✓ Microorganisms (MDPI) - Editorial Board (א' סוקניק)
- ✓ Phycology (MDPI) - Editorial Board (א' סוקניק)