



חקר ימים ואגמים לישראל
Israel Oceanographic & Limnological Research

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

ניטור ומחקרי כנרת לשנת 2021

דו"ח חיא"ל T8-2022



צילום: עוז צברי דר, זריחה בכנרת 2021



חקר ימים ואגמים לישראל בע"מ (חל"צ) (PBC)
The Yigal Allon Kinneret Limnological Laboratory המעבדה לחקר הכנרת ע"ש יגאל אלון
ת.ד. 447 מגדל 1495000, ישראל טלפון: 04-6721444 Tel: 04-6724627 Fax: POB 447, Migdal, Israel

ניטור ומחקרי כנרת דו"ח שנתי 2021

המעבדה לחקר הכנרת, חקר ימים ואגמים לישראל

דו"ח חיא"ל T8/2022

בעריכת ד"ר גדעון גל ואיילה לובל - ילס

יולי 2022



עיקרי הדו"ח - תמונה כללית: הכנרת בשנת 2021

במהלך חורף 2019/20 ואביב 2020 מפלס האגם המשיך לטפס והשלים עליה של 5.77 מ' מאז דצמבר 2018. משרעת המפלס במהלך שנת 2021 עמדה על 1.68 מ' בהשוואה ל- 2.65 מ' בשנת 2020 עם תנועה של 1.2 מ' בשנה ההידרולוגית 2020/21. הרום המקסימלי בשנת 2021 נרשם במהלך חודש אפריל והגיע ל-209.10, סה"כ 30 ס"מ מהקו האדום העליון. המפלס הגבוה של האגם בשנה החולפת אשר נמשך גם בחורף 2021/22 מסמן ארבע שנים של גשמים ממוצעים או גבוהים מהממוצע ותפעול האגם במפלסים גבוהים. נושא המפלסים הנמוכים והשינויים הגדולים במפלסי האגם שחווינו מאז שנות ה-60 כנראה יהיה בעתיד נושא שיעסיק אותנו פחות עם החיבור של הכנרת למערכת המים הארצית והזרמת מי מערכת באגם שמתוכננת להתחיל בשנת 2023. יחד עם צמצום דאגות המפלס בשנים הקרובות, וכנראה אף מעבר לזה, עולות דאגות לגבי ההשלכות האפשריות של הזרמת מי מערכת לכנרת. אנו ממשיכים בפעילות לבדיקת בעיות אפשריות והתחלנו בניטור מוגבר באזור כניסת מי המערכת לכנרת על מנת ליצור בסיס מידע ורקע עוד בטרם החלו בהזרמת המים. נעקוב מקרוב אחרי שינויים אפשריים בעקבות הזרמת המים. לעליה המבורכת במפלס האגם בשנים האחרונות היו מספר השלכות על האגם שאת חלקם ניתן היה לזהות במהלך השנה וחלקם, על בסיס הידוע לנו מהעבר, יחשפו בעתיד. העליה במפלס לוותה בהמשך ירידה בריכוז הכלוריד באגם עד לריכוז של 269 מג"ל באפילימניון בסוף השנה. הצמחיה החופית שהוצפה במהלך חורף 2018/19 נשארה מוצפת ובחלקה מתה והתפרקה במהלך השנה. לצמחיה החופית תפקיד חשוב בשמירה על אוכלוסיות הדגים, כגון האמנונים, התורמים רבות למערכת האקולוגית ואשר מנצלים את הצמחיה להגנה מפני טורפים במהלך תקופות ההטלה, דגירה, בקיעה ואימון של הצעירים. עם צמצום ציפיות הצמחיה החופית, חשיבות הצמחיה כאזור מוגן לאמנונים הצעירים באה לידי ביטוי ביתר שאת. יחד עם זאת, הצמחייה מקשה על גישה של נופשים למים, עלולה ליצור מפגעי ריח ויתושים וכן לשחרור של נוטריינטים לאגם עם התפרקותם 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 חריגה של דגי הלבנון אשר תורגמה לביומסה מאוד גדולה ולחץ טריפה בולט על הזואופלנקטון באגם וירידה בביומסה של הזואופלנקטון. בעקבות הירידה במקורות המזון שלהם חלה ירידה בביומסה של הדגים הפלנקטיבורים באגם. לרוב העדויות לירידה בביומסה של הזואופלנקטון נראות כשנה וחצי לאחר עליית המפלס. ואכן במהלך השנים 2020 נרשמה ירידה של כ-30% בצפיפות הכוללת של הזואופלנקטון באגם ביחס לשנת 2019 שלווח בירידה בביומסה של הדגים בשנת 2021 ועליה מקבילה בזואופלנקטון. איכות המים בכנרת מכומתת באמצעות מדד ייחודי ("מדד הקיימות של הכנרת") שפותח במעבדה לחקר הכנרת. ערך המדד של 2021 היה נמוך מערך המדד בשנת 2020 ועמד על ערך של 49 בלבד, ערך נמוך משמעותית מהסף של הערך הקביל (60). סף הערך הקביל מעיד על שמירת המערכת האקולוגית של האגם בתנאים דומים לאלו שנצפו עד לתחילת שנות ה-90. ערכי המדד עבור שנת 2021, ובשנים שקדמו לה, נמצאים מתחת לסף הקביל. 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 הקיץ-סתיו והעדר פריחת הפרידיניום בחורף-אביב שלווה בפריחה, אם כי מוגבלת של מיקרוציסטיס. בשנים האחרונות המעבדה לחקר הכנת, בתמיכה של רשות המים, הרחיבה את הניטור הרציף שהיא מבצעת באגם. בנוסף לדוברה הוותיקה בתחנה A, הנקודה העמוקה ביותר באגם, הרי שבשנת 2020 הותקנה דוברה נוספת בצפון האגם, בתחנה G, מול שפך הירדן. בתחילת שנת 2021 הותקן מצוף ניטור רציף בדרום הכנת, בתחנה D. מטרת שתי התחנות הרציפות החדשות היא בעיקר לעקוב אחר תהליכים המתרחשים באזורים אלו שהינם ייחודיים ושונים באופיים מתחנה A ובעיקר על מנת לעקוב אחר התפתחות פריחות של כחוליות (ציאנובקטריה) באזורים אלו. הנתונים הנאספים בתחנות אלו, בדומה לנתוני תחנה A מוצגים כיום ב"מרכז מידע כנת" שבאתר היא"ל 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.

טבלה 1: עיקר ממצאי הניטור לשנת 2021.

משתנה	הממצאים
מפלס	משרעת המפלס במהלך שנת 2021 עמדה על 1.68 מ' בהשוואה ל- 2.65 מ' בשנת 2020 עם תנועה של 1.2 מ' בשנה ההידרולוגית 2020/21. הרום המקסימלי בשנת 2021 נרשם במהלך חודש אפריל והגיע ל-209.10, סה"כ 30 ס"מ מהקו האדום העליון.
מדד הקיימות של הכנת	ערך המדד הכולל לשנת 2021 היה 49 - ערך נמוך ביחס לשנת 2020 והערך הרצוי של 60. בינואר-יוני הערך הכולל היה נמוך (44) בעקבות היעדר פריחה של פרידיניום ונוכחות של מיקרוציסטיס במים. בחצי השני של השנה, ערך המדד הכולל היה גבוה יותר (54) אבל נמוך מהערך הקביל בעיקר לאור פריחה של כחוליות קיציות.
טמפ' המים	שנת 2021 התאפיינה בטמפרטורות אויר בשעות הצהריים, החמות מהממוצע במידה ניכרת, במיוחד בחודשים ינואר, אפריל, יולי, אוגוסט ונובמבר, ובשעות הבוקר המוקדמות הקרות במעלה מהממוצע ה-10 שנת. מאפיינים אלו תורגמו לטמפרטורות מים של השכבה העליונה (10 מטר) שהייתה קרה מהממוצע ה-10 שנת בתחילת השנה (חודשים ינואר -אפריל) וחמה יותר בחודשים אפריל-אוקטובר. השיכוב התרמי במהלך 2021 נמשך כ- 289 יום, בהשוואה לממוצע רב שנתי העומד על 293 ± 18 יום בממוצע.
כלוריד	ערכי כלוריד באפילימניון ירדו באופן קל בחציון הראשון של השנה מ- 269 עד 259 מגכ"ל. מגמת העליה בחציון השני של השנה, עד 269 מגכ"ל, מבטאת את הירידה בספיקות נחלי אגן ההיקוות ועליה בהתאדות.
זרחן	ערכי זרחן כללי, זרחן מומס וזרחן מומס מגיב בשתי השכבות בשנת 2021 היו דומים לערכים של הממוצע הרב שנתי.
חמצן	באפילימניון ערכי החמצן בשנת 2021 היו מעט נמוכים יחסית לממוצע הרב שנתי ושנה הקודמת בעיקר עד מאי. מגמה זו ככל הנראה נובעת מפעילות ביולוגית מועטה יותר בתקופה זו.
חנקן	ערכי חנקן כללי ואורגני באפילימניון ובהיפולמניון היו דומים לערכי הממוצע הרב שנתי. כך גם עבור שלושת הצורונים האנאורגניים: אמוניום, ניטריט וניטראט. בהשוואה לשנה הקודמת, 2020, התוצאות עבור הפרמטרים של מערכת החנקן הציגו פחות קפיצות וחריגות ביחס לממוצע הרב שנתי.



<p>קיבוע חנקן</p> <p>קיבוע החנקן ב- 2021 התפרס על פני עונה קצרה והיה נמוך מהרגיל. השיא בקצבי הקיבוע נמדד בחודש אוגוסט, אז גם נמדדו ערכי שיא של החולית אפניזומנון וערכי שיא רב שנתיים של החולית צילינדרוספרצופסיס. בסך הכל קובעו באגם כ- 39 טון חנקן אטמוספרי במהלך פריחת החוליות הקייציות של 2021.</p>	
<p>ייצור שניוני חיידיקי</p> <p>הפעילות החיידיקית ההטרורופית השנתית שנמדדה בשנת 2021 באזור הפוטי הייתה דומה לזו שנמדדה ב- 2020. ערכי שיא שנתיים נרשמו בחודשים יוני וספטמבר, כשהראשון מבטא את תהליכי הפירוק של פריחת הדינופלגלטים והכלורופיטה באגם והשיא השני מבטא את פירוק הציאנופיטה והכלורופיטה. גם השנה נמשכה המגמה של פעילות חיידיקית גבוהה יחסית הנמדדת בשנים האחרונות.</p>	
<p>מאזני פחמן, חנקן וזרחן</p> <p>שטפי פחמן חנקן וזרחן לאגם ב- 2021 נמוכים ביחס לשנתיים הקודמות. עבור פחמן ערכי היצרנות הראשונית ירדו השנה והיחס בין יצרנות ראשונית לנשימה ירד בכ- 20% ביחס לשנת 2020. שנת 2021 גם אופיינה בערכי קבורה של זרחן, חנקן ופחמן לסדימנט בקרקעית האגם, נמוכים משמעותית מהשנה הקודמת.</p>	
<p>פיטופלנקטון</p> <p>בשנת 2021 שוב לא התפתחה פריחת פרידיניום. מאז 1996 היו 18 שנים ללא פריחת פרידיניום ורק 8 שנים עם פריחה. בהעדר פרידיניום הביומסה האצתית במים הייתה נמוכה לאורך כל השנה ללא כל שיא עונתי. כחוליות וירוקיות תרמו את עיקר הביומסה הקייצית.</p>	
<p>כחוליות רעילות ורעלנים</p> <p>בין אוקטובר 2020 לאוקטובר 2021 נרשמה בכנת נוכחות מצומצמת של מיקרוציסטיס בחודשי החורף-אביב, בתקופה זו נמצאו רעלני מיקרוציסטיס במים במספר נמוך של בדיקות אשר הגיעו לריכוז של מעל 2 מיקרוגרם לליטר במאי. הריכוזים בביומסה הכללית היו גבוהים ועלו בחודש מאי ומרץ (מעל 750 מיקרוגרם לקילוגרם). בחודשי הקיץ-סתיו נצפו פריחות של מיני ציאנובקטריה שונים (אפניזומנון, צילינדרוספרמופסיס, ולינגביה). שיא פריחת האפניזומנון היה בחודשים אוקטובר - נובמבר. ריכוז הצילינדרוספרמופסיס שנמדד במים הגיע לשיא של מעל 1.5 מיקרוגרם לליטר בחודשים אלו.</p>	
<p>זואופלנקטון</p> <p>נרשמה עליה של כ-16% בצפיפות הכוללת של הזואופלנקטון במהלך 2021 ביחס לשנת 2020. עליה זאת כוללת עליה של 46% באוכלוסיית הקופפודים באגם בשנת 2021 ביחס לשנת 2020. בהמשך למגמה של השנים האחרונות חלה עליה משמעותית ביחס שבין קופפודים מהסוג מזוציקלופס לסוג תרמוציקלופס. עליה זאת משקפת ירידה בלחץ הטריפה של הדגים. זאת התמונה שעולה גם מהסקר האקוסטי של הדגים.</p>	
<p>דגים</p> <p>צפיפויות הדגים מכל קבוצות הגודל בכל העונות היו בסדר גודל קרוב לתחומים הנמוכים שנצפו בשנים 2011-2020. בשנת 2021 הצפיפות הממוצעת של דגים הגדולים מ-60 dB - הייתה 1.1 פרטים / מ"ר. הדגים היו מרוכזים בדרך כלל בחלקים הצפוניים והצפון-מערביים של האגם במקומות רדודים יחסית. באפריל נצפו ריכוזים גבוהים יחסית של דגים גם באזור הדרום מזרחי.</p>	
<p>דיג ודגה</p> <p>פרויקט ניטור חדש וארוך טווח שהחל ב-2021 ומשלב נתונים מסוקר חיצוני, סוקר פנימי ודיגומים מחמנים ע"ג סירת ההקפה של קיבוץ עין גב. במהלך 2021 נראה כי שלל הדיג של דייגי הרשתות מורכב בעיקרו ממיני קיפונים (47%) ולאחר מכן האמנונים (40%). לעומת זאת, שלל הדיג של ספינת ההקפה מכיל בעיקר קרפיוניים (52%) עקב הדיג הבלעדי של לבנון הכנת, ואילו האמנונים היוו 31% מהשלל. בהשוואה חודשית בין שתי שיטות הדיג באגם, נצפה דימיון בשלל האמנונים לאורך כל השנה. בשלל הקיפונים דימיון זה נצפה גם כן, אם כי רק עד חודשי הסתיו, בו הקיפונים נידונו כמעט באופן בלעדי ע"י דייגי הרשתות. בבדיקה רב שנתיית לאורך 40 השנה האחרונות, לא נצפתה התאמה בין נתוני האכלוס של אמנון הגליל בכנת לבין גודל שלל הדיג של מין זה.</p>	

<p>חלזונות</p> <p>שינויי המפלט הגדולים הובילו להתמעטות קיצונית של החלזונות הטבעיים לכנת ולהופעת והשתלטות של מין פולש. מאז 2012 ועד היום החילזון הפולש, <i>scabra</i> <i>Thiara</i>, מהווה מעל 95% אחוז 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- 2 עד 3 סדרי גודל. גם צדפות הכנת (3 מינים) סובלות משינויי המפלט הקיצוניים ונמצאות בסכנת הכחדה. אנו משערים שהחלזונות הפולשים אוכלים כל חומר אורגני בסדימנט, כולל ציסטות של פרידיניום ובכך תורמים להעלמות הפרידיניום.</p>	
<p>חומרי הדברה</p> <p>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.</p>	
<p>אינדיקטורים לזיהום</p> <p>שנת 2021 התבלטה בריכחים נמוכים יחסית של חיידקים אינדיקטורים לצואה, כולל בתקופת החורף. מול כניסת צינור ההטיה של הירמוך נרשמה חריגה בריכח האנתרוקוקים בחודש פברואר.</p>	
<p>קצבי שיקוע</p> <p>בשנת 2021 קצבי הסדימנטציה בתחנות K ו-F היו דומים לערכים הממוצעים שנרשמו בתקופה 1999-2020. קצבי הסדימנטציה בתחנה A היו כמחצית מהממוצע. בתחנה M קצבי הסדימנטציה היו באופן מובהק גבוהים מאשר בשנים הקודמות ומערכי הממוצעים הרב שנתיים. קצבי השיקוע בתחנות K, F, A, ו-M היו 7.6, 1.8, 6.2 ו-19.3 גרם חומר יבש/מ"ר/יום, בהתאמה.</p>	
<p>הנביעה בברבוטים</p> <p>במהלך 2021 עלתה המוליכות החשמלית (קרי מליחות) בברבוטים מ- 4,560uS/cm בינואר ל- 4,980uS/cm בסוף מרץ. לאחר מכן ועד סוף דצמבר המליחות ירדה בהדרגה ל- 4,380uS/cm. במקביל, השתנה ריכח הכלוריד המדוד בטווח שבין 1,230 מג"ל ועד 1,425 מג"ל עם מקסימום בשלהי החורף. מאידך ריכח הניטרט השתנה בין 0.1 מג"ל בפברואר ועד למקסימום של 0.58 מג"ל בחודש מרץ. מהירות הזרימה (מחודש יוני) בצינור הברבוטים בציר Z וריאבילית מאוד ובין יוני לדצמבר 2021 היא השתנתה בין 0.5 ס"מ/שנייה ועד 4.5 ס"מ/שנייה. הטמפרטורה בבסיס צינור הברבוטים בתקופה זו נעה סביב 27.5°C.</p>	

תוכן עניינים

1	1 הקדמה: שילוב פעולות הניטור והמחקר במעבדה לחקר הכנרת
	2 ניטור הכנרת
3	2.1 מבוא
8	2.2 מדד הקיימות של הכנרת
12	2.3 מאזני חנקן, זרחן ופחמן בכנרת
15	2.4 מפלס האגם
17	2.5 מטאורולוגיה ופיזיקה של האגם
22	2.6 קצבי סדימנטציה
25	2.7 ממצאי הניטור הכימי
30	2.8 ניטור מתכות כבדות בכנרת
34	2.9 בחינת נוכחות חומרי הדברה במי האגם ובדגה
36	2.10 שטפי זרחן באבק
39	2.11 קיבוע חנקן
42	2.12 פחמן אורגני ואנאורגני מומס וחלקיקי
45	2.13 ניטור הברבוטים
51	2.14 איתור נביעות מלוחות נוספות
55	2.15 כלורופיל וייצור ראשוני
58	2.16 ייצור שניוני חיידקי
61	2.17 חיידקים אינדיקטורים לזיהום צואתי
65	2.18 ניטור פיטופלנקטון
69	2.19 רעלני כחוליות
74	2.20 ניטור ציליאטים
79	2.21 ניטור זואופלנקטון
84	2.22 אוכלוסיות הדגים – סקרים הידרואקוסטיים
88	2.23 ניטור דיג ודגה בכנרת
94	2.24 חלזונות וצדפות בליטורל
99	2.25 דיגום אוטומטי ברזלוציה גבוהה במרכז האגם
101	2.26 פרופיילר אוטונומי בתחנה G
107	2.27 איכות מי הכנרת באמצעות צילומי לוויין המשולבים במערכת SISCAL
112	2.28 מערכת מידע גיאוגרפית באתר האינטרנט - GIS OnLine



3 מחקרי כנרת

114	3.1 אוסף התרבויות הלאומי של אצות ישראל
117	3.2 ברקוד גנטי של ביוטת הכנרת
	3.3 השפעת המליחות בכנרת על התבססות מיקרואורגניזמים שמקורם באבק אטמוספרי
122	השוקע באגם
127	3.4 סקר רעלני כחוליות בעזרת מקלות זיהוי (סטריפים)
131	3.5 גישות חדשניות לבקרה ומניעת פריחות של ציאנובקטריה רעילות בגופי מים
134	3.6 חומרים נדיפים כחתימה כימית יעילה לשינויים באוכלוסיות ציאנובקטריה בכנרת
138	3.7 פיתוח, כיוול ויישום מודל ביוגיאוכימי תלת מימדי לכנרת
142	3.8 בדיקת השפעת הזרמת מי התפלה לכנרת באמצעות מודל תלת מימדי
147	3.9 הערכת ההשפעה של הזרמת מי התפלה על מרכיבים ביולוגיים באגם
150	3.10 מערכת ICT לזיהוי תגובת עמידות אקולוגית במערכות מים מתוקים
	3.11 גנים פונקציונאליים ודינמיקת תהליכי חמצון-חיזור בכמוקלינה הפלאגית של אגם
154	כנרת
159	3.12 השפעת בצורות מתמשכות ושינויי אקלים על האקולוגיה של הכנרת
164	3.13 יערות אשלים מוצפים – בית גידול חדש בכנרת
171	3.14 עיצוב מדיניות המים למטרות ניהול בר קיימא של מערכות אקולוגיות-חברתיות

4 מחקרי אגן ההיקוות של הכנרת וגופי מים אחרים

175	4.1 ניטור זיהום ממקור צואה בנחל משושים ונחל אל על
180	4.2 ניטור ירדן דרומי
190	4.3 ניטור מעיינות בגולן
199	4.4 ניטור פיטופלנקטון, זואופלנקטון ודגים באגמון החולה
209	4.5 גישה אינטגרטיבית לקשר שבין הירדן לכנרת
	4.6 שימוש במודלים אקולוגיים לבחינת השפעות קידוחי הגז על מארג המזון במרחב הכלכלי
213	הישראלי

5 נספחים

218	5.1 סטודנטים לתארים מתקדמים בהנחיית חוקרי המעבדה לחקר הכנרת 2021
220	5.2 פרסומי המעבדה בספרות הבינלאומית המבוקרת ב-2021/22
225	5.3 דו"חות המעבדה 2021
227	5.4 ייעוץ לממשלה, השתתפות בפורומים ובמערכות של עיתונים מדעיים



1 הקדמה: שילוב פעולות הניטור והמחקר במעבדה לחקר הכנרת

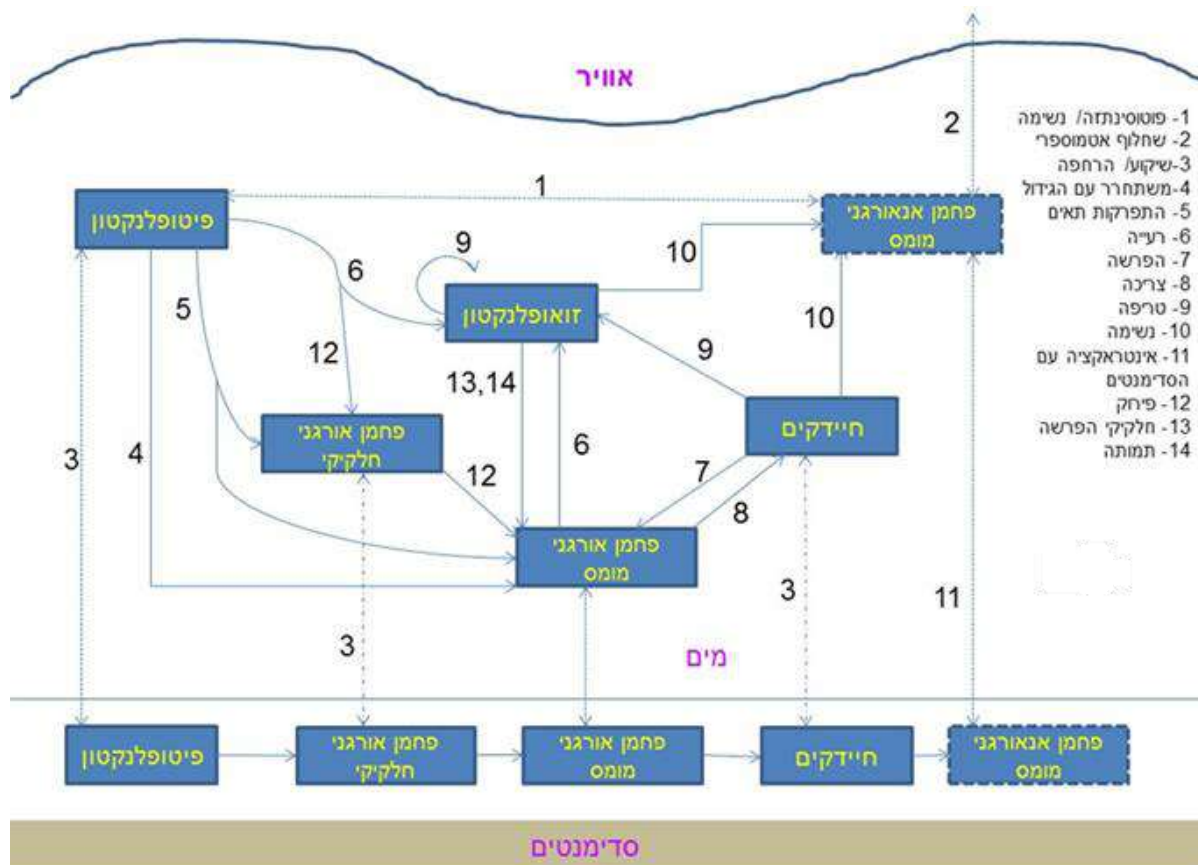
יעדיה העיקריים של המעבדה לחקר הכנרת, חקר ימים ואגמים לישראל, הינם, בראש ובראשונה, פיתוח כלים מדעיים לתמיכה בקבלת החלטות בנושא תפעול הכנרת במערכת אספקת המים הארצית, שימור המערכת האקולוגית והמשך פיתוח מרכז הידע הלימנולוגי, מהמובילים בארץ ובעולם. צוות המעבדה פועל להשגת יעדים אלו ע"י שילוב של תכנית ניטור 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 מוצג מחזור הפחמן בכנרת 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 מפורטת יותר של מידת השפעת הגורמים השונים על רמת האיטרופיקציה, על איכות המים ועל מצב המערכת האקולוגית. למרות מגבלות הקורונה והתקופה המאתגרת במהלך שנת 2021, חברי צוות המעבדה לחקר הכנרת היו מעורבים בפעילות מחקרית, מתן חוות דעת למקבלי ההחלטות וגופים ממשלתיים שונים וכן בחינוך, ויעוץ מקצועי לממשלה שניתן 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-12 כתבי עת מקצועיים בינלאומיים, פרסמו 26 מאמרים בכתבי עת מדעיים, הגישו 19 דוחות לגופים ממשלתיים 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 2021 סה"כ 17 סטודנטים לתארים מתקדמים (מסטר, דוקטורט ופוסט-דוקטורט) ממגוון אוניברסיטאות בארץ ובעולם.

המעבדה לחקר הכנרת מפרסמת כבר שנים רבות את הדו"ח השנתי הכולל סקירה של הפעילות המחקרית והניטורית של צוות המעבדה. הפעילות המחקרית מתבססת על מימון המגיע מקרנות מימון שונות על בסיס הצעות המחקר המוגשות אליהן ובשנה החולפת חוקרי המעבדה היו פעילים במעל 20 מחקרים ובמימון בהיקף של מעל 3,000,000 ₪ (לא כולל את תכנית ניטור הכנרת ועלויות כח אדם). הפעילות הניטורית ממומנת בעיקרה ע"י רשות המים ומשרד האנרגיה וכוללת את תכנית הניטור השוטף של הכנרת, על כל מרכיביה.

בשנת 2021 הורחב הניטור שאנו מבצעים בכנרת וקיבלנו אחריות על ניטור הדיג והדגה, במימון אגף הדיג, משרד החקלאות ופיתוח הכפר. בימים אלו ממש, התחלף מנכ"ל חיא"ל פרופ' ברק חרות אשר שימש בתפקיד 17 שנה ובמקומו מונה אלון זס"ק לתפקיד מנכ"ל החברה. ברצוני להודות, בשם המעבדה לחקר הכנרת, לברק על כל הפעילות, העשייה והתמיכה במעבדה במהלך תפקידו כמנכ"ל החברה וכן על מאמציו האינסופיים בקידום המחקר בחברה. בהזדמנות זאת, אאחל למנכ"ל הנכנס הצלחה רבה בתפקידו ושיתוף פעולה פורה. כמו כן, ברצוני להודות לאיילה לובל - ילס, מזכירת המעבדה, אשר סייעה רבות בעריכת הדו"ח.



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

2 ניטור הכנרת

2.1 מבוא



מצוף בתחנה D 16.1.22. צילום: עוז צברי- דר.

במימון
רשות
המים

צוות המעבדה לחקר הכנרת, חיא"ל

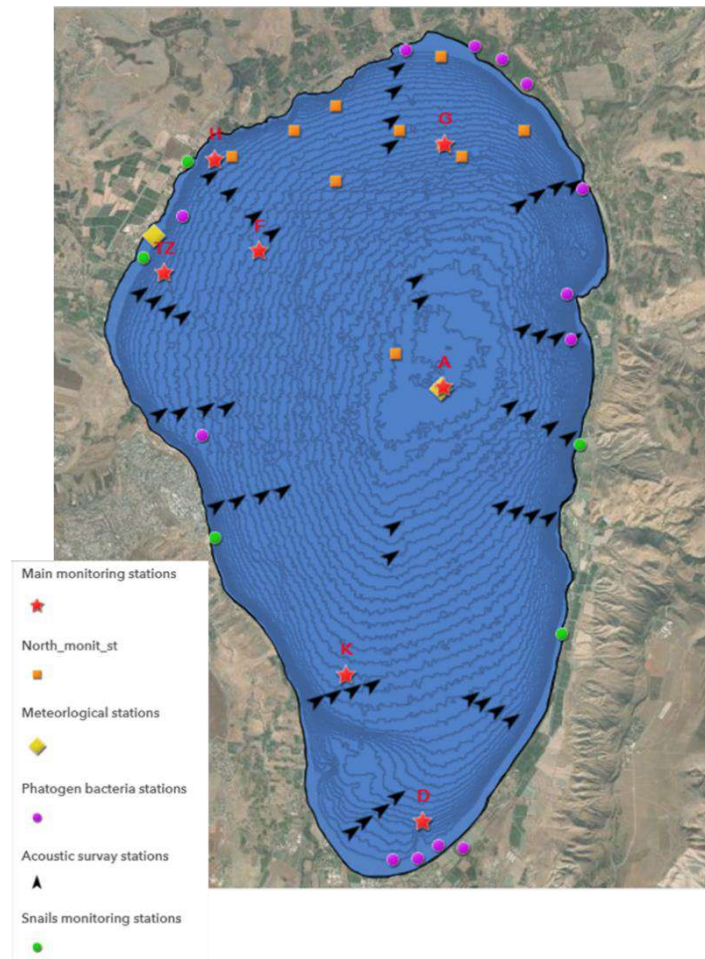
- נתוני הניטור שנאספו בכנרת במשך יותר מ- 50 שנה מהווים בסיס נתונים ומידע ייחודי באופיו, הן בשל רמת דיוק המדידות והן בשל רציפותן, המשמש לקבלת החלטות תפעוליות ומדיניות סביבתית.
- תוכנית הניטור של הכנרת הורחבה במהלך שנת 2021 לכלול תחנה רציפה בדרום האגם (תחנה D), מול היציאה של הירדן.
- נוסף גם ניטור הדיג והדגה בכנרת עבור אגף הדיג, משרד החקלאות ופיתוח הכפר.
- ניטור אדפטיבי של אוכלוסיות הכחוליות מופעל במסגרת ניטור "קשת צפונית". ניטור קשת צפונית מתבצע עם סימנים ראשוניים של התפתחות פריחת כחוליות עד דעיכת הפריחה, ומתבצע במקביל למעבר לוויין מעל הכנרת.

מבוא

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 ההיקוות והשירות ההידרולוגי האחראי על כימות כניסות המים לאגם. במתכונתה הנוכחית, תוכנית הניטור השנתית, אשר התפתחה במהלך שנות הניטור, מבוססת על דיגום במספר תחנות בכנרת בעומקים שונים, ובדיקת מספר רב של משתנים פיסיקליים, כימיים וביולוגיים. תוכנית הניטור הורחבה בשנה האחרונה לכלול גם ניטור דיג ודגה אשר משלים את תמונת מארג המזון בכנרת. הניטור, על כל מרכיביו, 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 תוכנית 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 אשר נאספות מעומק עמודת המים בכל תחנת דיגום ואת סוג הבדיקות שנערך בכל אחת מהדגימות. באיור 2 מוצג המיקום של תחנות הניטור העיקריות, על פי תוכנית העבודה השנתית של המעבדה לחקר הכנרת. תחנה A, הנמצאת בנקודה העמוקה ביותר באגם, נדגמת בתדירות של אחת לשבוע ובה נבדק 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 נוספה רפסודת דיגום אוטומטית ורציפה בתחנה G אשר מורכבת מפרופיילר דומה למכשיר הקיים בתחנה A בתוספת של חיישנים המותאמים לאמידת ריכוז הכחוליות (ציאנובקטריה) במים.

במהלך שנת 2021 נוסף מצוף דיגום רציף בתחנה D בדרום האגם, הכולל חיישנים קבועי מקום המותאמים לאמידת ריכוז הכחוליות (ציאנובקטריה) במים ומדידת חמצן מומס, כלורופיל, ומוליכות וכן שרשרת חיישני טמפרטורה לאורך עמודת המים. ניתן לזהות במפה גם את תחנות הדיגום במה שמוכר כ"קשת הצפונית". ה"קשת הצפונית" כוללת סדרת תחנות בצפון האגם המנוטרות 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 וכן בדוברת בתחנה G ובמעגן בעין גב. תחנות 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 שרשרת התרמיסטורים בתחנות A, F ו-D.



איור 2: מפה בתימטרית של הכנרת ותחנות הדיגום של תכנית ניטור הכנרת (<https://iolr.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=da01a069af4e4f568a280a625ec8c50f>)

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 תוכנית ניטור לאורך השנים הינה חיונית לצורך קבלת תמונה מהימנה של השינויים המתרחשים במערכת האקולוגית ויחד עם זאת עליה להיות דינמית במידה על מנת לתת מענה לבעיות ושינויים המתרחשים באגם. השינויים שחלו במערכת האקולוגית בשנים האחרונות, בעיקר התגברות תדירות, עוצמה ומשך פריחות הציאנובקטריה באגם מצריכים שיפור ביכולות הדיגום המרחביות. התקנת תחנות דיגום רציפות נוספות בצפון ובדרום האגם, האזורים שבהם 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).

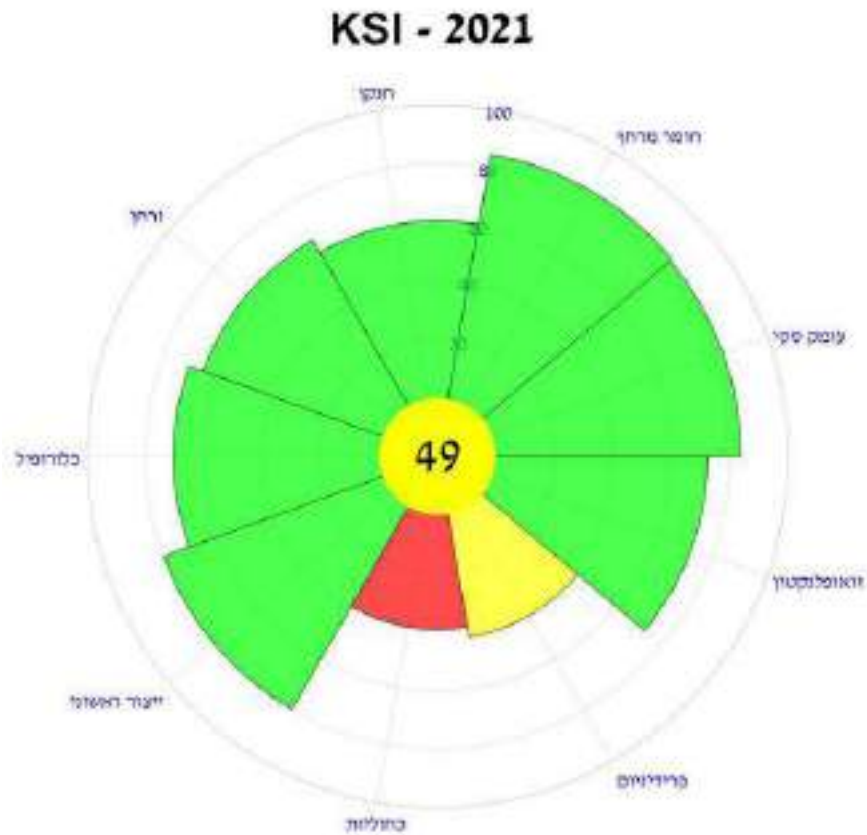
סוג הבדיקה	תחנות דיגום	תדירות הדיגום
מטאורולוגיה		
טמפרטורת האוויר	גינוסר, A, G	כל 10 דקות
לחות יחסית	גינוסר, A, G	כל 10 דקות
טמפרטורת פני המים	A, G	כל 10 דקות
רוח (כיוון ומהירות)	גינוסר, A, G	כל 10 דקות
קרינה קצרת גל	גינוסר, A, G	כל 10 דקות
קרינה ארוכת גל	גינוסר, A, G	כל 10 דקות
לחץ ברומטרי	A	כל 10 דקות
קרינת אור, PAR	גג המעבדה	רציף (ממוצע שעתי)
פיסיקה		
פרופיל טמפרטורה במים	*A, D, G, H, K*, TZ	אחת לשבוע
טמפרטורה במים ששראות 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
כימיה		
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
זרחן כללי	G, D, H, TZ	אחת לשבועיים
סיליקה	*A, D, G, H, K*, TZ	אחת לשבוע
גופרה (סולפאט)	A	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 אריק	אחת לשבועיים
רעלני כחוליות	A	אחת לחודש
זרחן באבק	מעבדה, כינר	אחת לשבוע
ביולוגיה		
פיטופלנקטון	A	אחת לשבועיים
כלורופיל	A	אחת לשבועיים
יצרנות ראשונית	A	אחת לשבועיים
זואופלנקטון	A	אחת לשבועיים

דו"ח ניטור ומחקרי כנרת 2021, המעבדה לחקר הכנרת, חיא"ל



סוג הבדיקה	תחנות דיגום	תדירות הדיגום
ריסניות (מיקרו-זואופלנקטון)	A	אחת לחודש
דגים (אקוסטיקה)	10 חתכים באגם כולו	עונתי
דיג ודגה (במימון מש' החלקאות)	ניטור דגי שלל ודיגום עם ספינת דיג	אחת למספר שבועות
חיידקים ממקור צואתי	14 תחנות במים רדודים	אחת לחודש
יצרנות חיידקית	A	אחת לחודש
נשימה קהילתית	A	אחת לחודש
קיבוע חנקן	A	אחת לחודש בזמן פריחות
חלזונות	5 תחנות חופיות	פעמיים בשנה
פלואורופרוב	*A, D, G, H, K*, TZ	אחת לשבוע
ניטור סינופטי		
פיזור מרחבי של טמפ', כלורופיל ועכירות - SISCAL	סינופטי באגם כולו	אחת ל-16 ימים

2.2 מדד הקיימות של הכנרת



**במימון
רשות
המים**

גדעון גל, נעם שחר

- בשנה האחרונה ירד הערך השנתי של מדד הקיימות ביחס לשנת 2020.
- שני משתנים עיקריים היו בבסיס ערכי המדד הנמוכים בשנת 2021: הכחוליות והפרידיניום.

רקע ומטרות

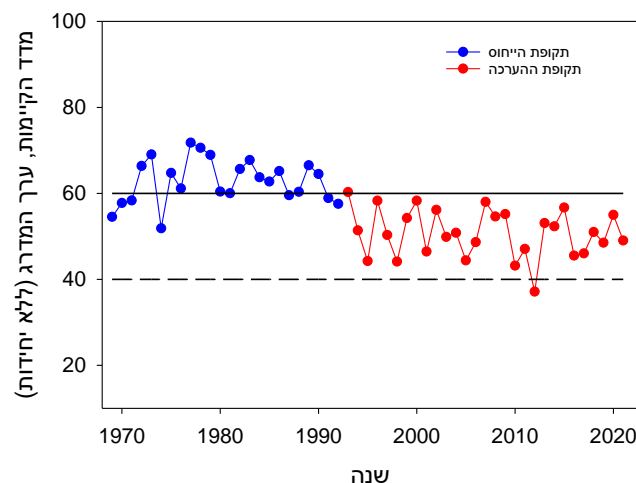
איכות המים בכנרת מכומתת באמצעות מדד ייחודי אשר פותח במעבדה לחקר הכנרת. המדד המקורי פותח בסוף שנות ה-90, ובמהלך שנת 2014 עבר שינויים עפ"י בקשת רשות המים. בדוח השנתי של 2014 דווח על שינויים אלה. על מנת להבדיל בין המדדים, שונה שם המדד המעודכן, והוא נקרא עתה מדד הקיימות של הכנרת - Kinneret Sustainability 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 2017¹). בנוסף לערך מדרג המחושב עבור כל אחד מהמשתנים, מחושב ערך כולל של המדד. הערך הכולל מחושב על בסיס ממוצע משוקלל 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 שהריכוזים 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 ודיון

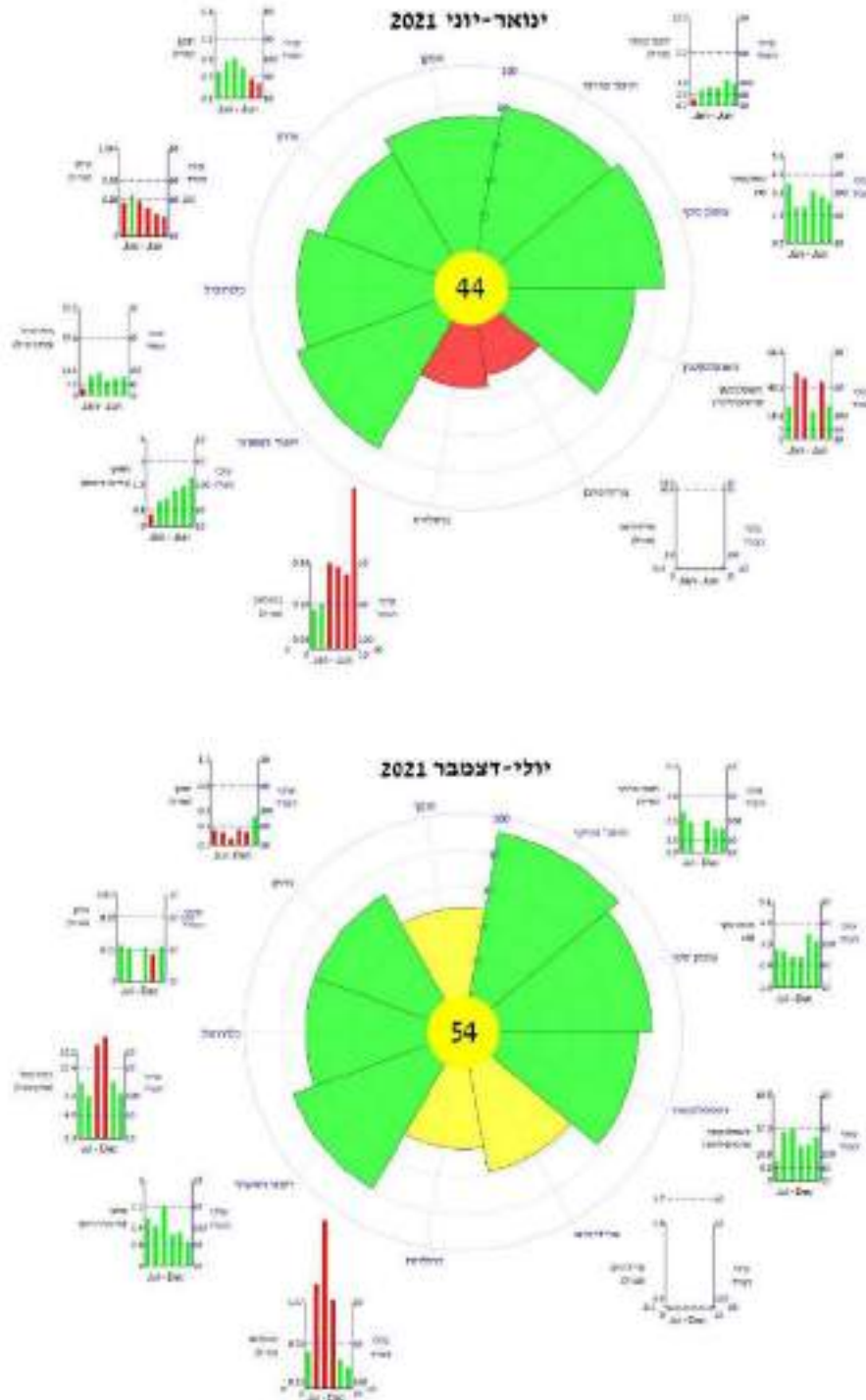
ערך המדד הכולל לשנת 2021 היה 49 שהינו ערך נמוך משנת 2020 אבל דומה לערכים שנרשמו בשנים האחרונות (איור 3). למעשה בין השנים 2016-2019 ערכי המדד הכולל לא השתנו באופן מהותי משנה לשנה ונעו בין 45-50 שהם ערכים נמוכים ביותר. יחד עם זאת בשנת 2020 נרשמה עליה בערך המדד לערך של 55 שהיה אחד מהערכים הגבוהים ביותר שנרשמו בעשור האחרון. למעשה בעשור האחרון רק בשנת 2015 נרשם ערך גבוה יותר (56.7) מהערך של שנת 2020. מאז שנת 2000 רק ב-50% מהמקרים נרשמו ערכי מדד גבוהים מערך של 50. 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 2021 יש לשים לב להבדלים בין שתי התקופות החצי-שנתיות ולגורמים שהשפיעו לרעה על ערכי המדד (איור 4). בתקופה ינואר-יוני הערך הכולל היה נמוך מאוד ועמד על ערך של 44 בעקבות ערכי מדד נמוכים ביותר של פרידיניום וכחוליות (28, 34, בהתאמה). ערכים אלו נבעו מהיעדר פרידיניום באביב ומופע של מיקרוציסטיס בעיקר מהמין *M. flos aquae* במהלך חודשי החורף. ערכי המדד של שאר הפרמטרים היו גבוהים ונעו בטווח שבין 64-84.



איור 3: תיאור גרפי של מדד הקיימות של הכנרת (KSI) עבור תקופת הייחוס (1969-1991 בכחול) ועבור התקופה 1992-2021 (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.

¹ 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.



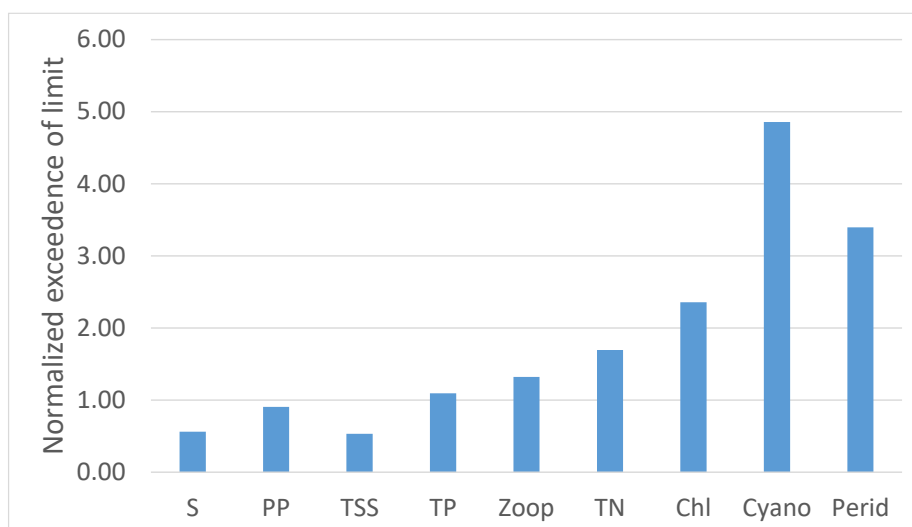
איור 4: מדד הקיימות של הכנרת (Kinneret Sustainability Index) לשנת 2021. ערכי המדד מחולקים לשתי תקופות של חצי שנה: ינואר-יוני ויולי-דצמבר. במרכז האיורים ניתן לראות את הערך הכולל, כאשר ערכים מעל 60 נחשבים בתחום הקביל. צבעי הרקע הינם צבעי רמזור: ירוק עם ערכים של 60 או יותר, צהוב בין 40-60 ואדום מתחת ל-40. הערך הכולל מבוסס על חישוב 9 ערכים 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.

בחצי השני של השנה, ערך הממד הכולל היה גבוה יותר (54) בזכות ערכים גבוהים של רוב המשתנים למעט בעיקר הכחוליות והחנקן הכללי שהציגו ערכי מדד חצי שנתיים של 44 ו-48, בהתאמה. שני משתנים אלו גררו את ערך הממד המשוקלל לערך נמוך מ-60. הערך הנמוך של הכחוליות נובע מריכוזים גבוהים שלהם במים במהלך הפריחה הקייצית, בעיקר בחודשים אוגוסט-אוקטובר. במקרה של החנקן, נרשמו ריכוזים נמוכים מהמצופה בכל החודשים למעט חודש דצמבר.

מתוך בדיקה של התפלגות ערכי מדד חריגים (<60) של כלל המשתנים בכל תקופות החצי שנתיות בין 1993-2021 עולה כי ישנם בעיקר שני משתנים שחורגים מהערכים הקבילים. ריכוזי הכחוליות והפרידיניום סוטים מהריכוז הצפוי בתדירות גבוהה. ואכן, אם מחשבים את היחס שבין מספר החודשים שבהם ערכי הממד של המשתנים היה נמוך מ-60 לבין מספר החריגות הצפוי על בסיס אופן חישוב המדרגים עולה כי הכחוליות והפרידיניום חורגים כמעט פי 4.8 ופי 3.5 יותר מהצפוי (איור 5), בהתאמה. החריגות נובעות מריכוזים גבוהים מהרצוי במקרה של הכחוליות וריכוזים נמוכים מהרצוי במקרה של הפרידיניום.

במבט ארוך טווח של מדד הקיימות של הכנרת ברור שהמערכת האקולוגית אינה במצב יציב או במצב רצוי. חוסר היציבות במערכת האקולוגית, הבאה לידי ביטוי במספר אינדיקטורים כגון הממד שמוצג כאן, מצביעה על השינוי הגדול שחל במערכת האקולוגית מאז שנות ה-90. העובדה שבעשור האחרון ערכי הממד 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 אשר בא לידי ביטוי בערכי הממד מקשה מאוד על ניהול נכון שיאפשר שיפור במצב המערכת האקולוגית של האגם.

חשוב להדגיש שגם עם הפעלת צעדי ממשק שצפויים לתרום לשיפור בממד הקיימות, כגון שמירה על מפלסים גבוהים, זמן התגובה וההתאוששות של המערכת האקולוגית הוא ארוך (שנים) ולא צפוי לבוא לידי ביטוי מיד עם הפעלת צעדי הממשק. לאור המפלסים הגבוהים שנרשמו בשנים האחרונות בכנרת ובהנחה שהם יישמרו בעתיד אנו מקווים לראות בעתיד הלא רחוק שיפור בממד הקיימות של הכנרת.



איור 5: החריגות של המשתנים השונים בתקופה 1993-2021 ביחס לערך המרבי הצפוי. ערך של 1 מבטא אחוז החריגות החודשיות השווה ערך לאחוז הצפוי על בסיס חישוב עקומות המדרג. ערכים מעל 1 מבטאים אחוז חריגות גבוה מהמצופה, למשל אחוז החריגות החודשיות של הכחוליות כמעט פי 5 מהמצופה.

2.3 מאזני חנקן, זרחן ופחמן בכנרת



במימון
רשות
המים

ירון בארי-שליון, ורנר אקרט, שירה ניניו

- שטפי פחמן חנקן וזרחן לאגם ב- 2021 נמוכים ביחס לשנתיים הקודמות.
- עבור פחמן ערכי ה-GPP ירדו השנה והיחס GPP/CR ירד בכ- 20% ביחס לשנת 2020.
- שנת 2021 גם אופיינה בערכי קבורה של זרחן, חנקן ופחמן לסדימנט בקרקעית האגם, נמוכים משמעותית מהשנה 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 על בסיס נתוני 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 2021 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 אלקטרונים למינרליזציה של פחמן אורגני (חמצן מומס, ניטראט וסולפאט) בתחתית האגם.

עבור שלושת המאזנים סך הערכים המחושבים או המוערכים מסוכם כך שנשאר פרמטר אחד: קבורה לסדימנט, קרי סדימנטציה נטו שאינו ידוע והוא המשלים את המאזן.

תוצאות ודיון**מאזן הזרחן**

ערכי הכניסה והיציאה מוערכים בצורה טובה למעט קבורה לסדימנט (סדימנטציה נטו). המיחזור הפנימי מהסדימנט, 34.6 טון, מתבסס על ערכי מקסימום של זרחן כללי בהיפולמניון וערך של כ- 56.3 טון עבור הקבורה לסדימנט (סדימנטציה נטו) משלים את המאזן הכללי. על כן, ערכים אלו מובילים לערכי סדימנטציה של כ- 90.9 טון בשנה. בהשוואה לשנה הקודמת ערכי הסדימנטציה (כללי ונטו) השנה נמוכים ב- 15% עד 12% בהתאמה. גם המיחזור הפנימי השנה נמוך ב- 20% מהשנה הקודמת.

מאזן החנקן

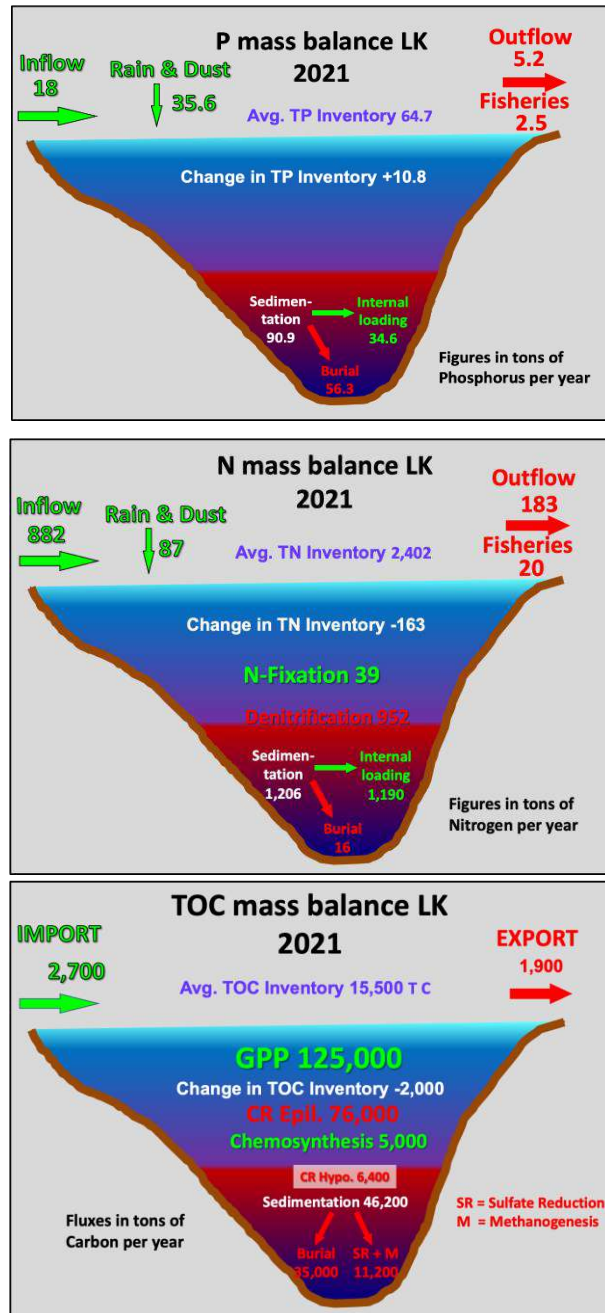
חישוב מאזן החנקן מורכב יותר. כמות החנקן שעובר דניטריפיקציה בתהליכים חיידקיים וחוזר לאטמוספירה מחושבת ל- 952 טון בהתבסס על ערכי מקסימום של ניטראט בהיפולמניון בתחילת השיכוב התרמי. המיחזור הפנימי בכנרת, 1190 טון, מבוסס על ערכי מקסימום של אמוניה בהיפולמניון. הקבורה המוערכת בכ- 16 טון סוגרת את המאזן. ערכים אלו מובילים לערכי סדימנטציה בסך של כ- 1206 טון בשנה. בהשוואה לשנה הקודמת ערכי הסדימנטציה (כללי ונטו) נמוכים ב- 40% עד 95% בהתאמה. גם המיחזור הפנימי השנה נמוך ב- 20% מהשנה הקודמת.

הירידה בערכי הסדימנטציה והמיחזור הפנימי במערכות החנקן והזרחן מייצגים ירידה בשטפים אל האגם, יחד עם ירידה מסוימת בפעילות הביולוגית באגם עצמו. זאת ביחס לשנתיים הקודמות 2019-2020 אשר אופיינו בשטפים גבוהים ובפעילות ביולוגית גבוהה.

מאזן הפחמן

בניגוד למחזורי החנקן והזרחן באגם, מאזן הפחמן מושפע באופן ניכר מיצרנות אוטיגנית. הערכה של יצרנות ראשונית ברוטו (GPP) ב- 2021 הינה 125,000 טון פחמן הדומה מאד לממוצעים של השנים 2001-2011. ביחס למספר זה, הכניסות והיציאות לאגם (2,700 ו- 1,900 טון פחמן, בהתאמה) הינן זניחות. תהליכי קיבוע פחמן אחרים (כמוסינטזה ובקטריות פוטוטרופיות 5000 טון פחמן) גם הם הרבה פחות חשובים. 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 6,400 טון פחמן אורגני בהתבסס על ריכוזים במים בתחילת השיכוב התרמי באגם. הצטברות של סולפיד בהיפולימיניון כתוצאה של חיזור בקטריאלי של סולפאט (SR) ושל מתאן (M, כ- 70% מחיזור הסולפאט בכנרת) מעידה על פירוק של 11,200 טון פחמן אורגני בדומה לשנת 2020. מכיוון ששני התהליכים מתחילים באזור הסדימנט, הם מייצגים חלק משטף שקיעת הפחמן האורגני החלקיקי. ההערכה הכוללת שלנו עבור שטף השקיעה – 46,200 טון פחמן. מאזן הפחמן שלנו נסגר ע"י ייחוס שארית של 35,000 טון פחמן אורגני לקבורה בסדימנט תוך התחשבות בירידה באינוונטר באגם של כ- 2,000 טון.



איור 6: מאזני חנקן, זרחן ופחמן בכנרת עבור שנת 2021. בכחול 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 המפלס במהלך שנת 2021 עמדה על 1.68 מ' בהשוואה ל- 2.65 מ' בשנת 2020 ותנודה של 1.2 מ' בשנה ההידרולוגית 2020/21.**
- **הרום המקסימלי בשנת 2021 הגיע ל-209.1, סה"כ 30 ס"מ מהקו האדום העליון.**

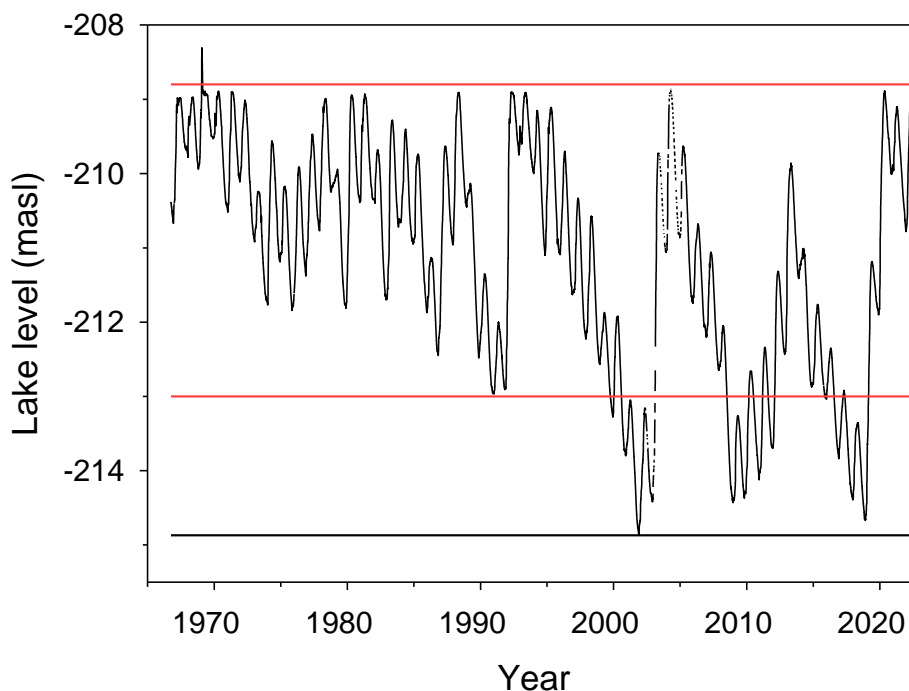
מפלס המים בכנרת משפיע במגוון דרכים על המערכת האקולוגית של הכנרת ועל כן ישנה חשיבות רבה במעקב אחר השינויים במפלס לאורך השנה ולאורך תקופה של שנים. רבים מהפרקים בדו"ח מתייחסים למצב המפלס ולכן הנתונים מוצגים כאן (באדיבות השירות ההידרולוגי). בשנים האחרונות אנו עדים לשינויים קיצוניים במפלס האגם. לאחר החורף הגשום של 2012/2013, שהסתיים עם מפלס 209.86- מ' בתחילת מאי 2013 (איור 7) חוונו את שנת הבצורת 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 2019/2020). למרות העלייה המצטברת הגדולה במפלס במהלך 2019 (חורף 2018/2019), העלייה היממתית המקסימלית הייתה 0.11 מ' לעומת עליה יממתית מקסימלית של 0.23 מ' במהלך שנת 2020.

החורפים של השנים 2020/21 ו-2021/22 המשיכו את השנים הגשומות שהחלו בחורף של 2018/19 ובחורף האחרון נרשמו 4 שנים של רמת משקעים השווה לממוצע ההיסטורי או גבוהה יותר, רצף חריג ביותר. בעקבות רצף השנים הגשומות, ולמרות השאיבות מהאגם, מפלס האגם קרוב זו השנה השלישית לרום המקסימלי. ב-10.5.2020 נרשם רום מפלס של -208.9 מטר מעל לפני הים, שנה מאוחר יותר, במהלך אפריל 2021 נרשם רום מקסימלי של -209.1 מטר מעל לפני הים ועם כתיבת שוות אלו, בסוף חודש אפריל, 2022, המפלס עומד על רום של -209.015 מטר מעל לפני הים. במהלך שנת 2021 משרעת תנודות המפלס היתה 1.68 מ' בטווח שבין -210.78 ל- -209.1 מטר מעל לפני הים, ועם תנודה של 1.2 מ' בלבד בשנה ההידרולוגית 2020/21.

לאור הרצף של ארבעת השנים האחרונות, ההסתברות ששנה גשומה נוספת היא קטנה ביותר אבל עם סיום חיבור הכנרת למערכת המים הארצית תקטן בעתיד התלות של מפלס האגם בכמות המשקעים. החיבור למערכת הארצית תבטיח תנודות מפלס קטנות יותר ועל כן גם יציבות גדולה יותר במערכת האקולוגית של הכנרת.



איור 7: מפלס הכנרת, מה-1.10.1966 ועד 31.3.2022. 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



במימון
רשות
המים

יורי לצ'ינסקי

- במהלך השנה הורחב הניטור המטאורולוגי-מרחבי של האגם, נוספה תחנה מטאורולוגית במזרח האגם במעגן של קיבוץ עין-גב.
- טמפרטורת האוויר בשעות הצהריים בתחילת אוגוסט 2021 הייתה גבוהה מהממוצע בכ-2.5 מעלות.
- באירוע חריג ב-20 לדצמבר מהירות הרוח הגיעה לכ-50 קמ"ש.

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 2800nm) וקרינה ארוכת גל ($5-25\mu\text{m}$). 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).
- משנת 2021 תחנה מטאורולוגית במזרח האגם (מעגן של קיבוץ עין גב).

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

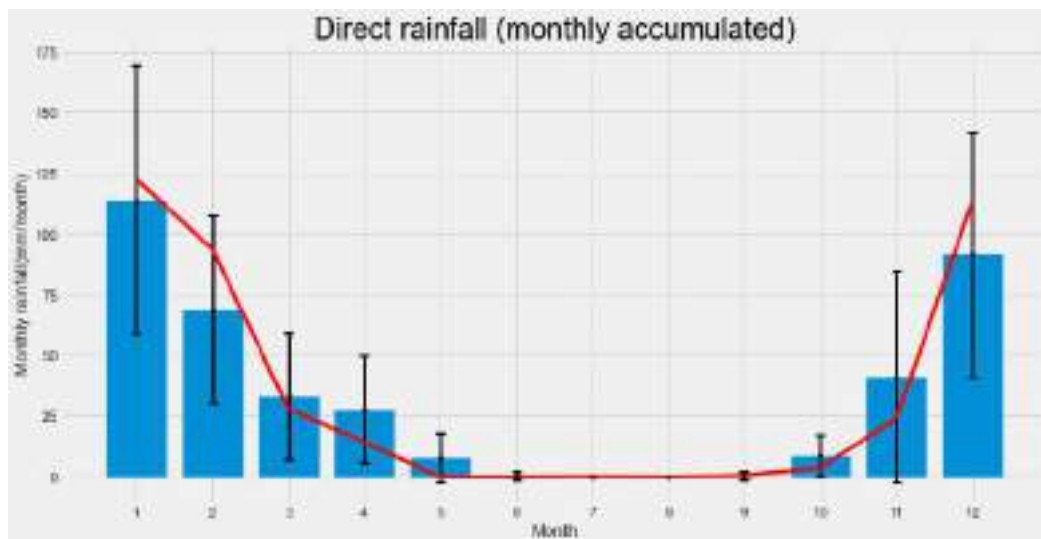
<https://iolar.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=08aa9a423cbb4a1aba63aa3e7524e18b>

סיכום שנתי של מדידת פרמטרים מטאורולוגיים

סיכום המדידות המטאורולוגיות לשנת 2021 מיוצג ע"י ממוצע שעתי (ייצוג התנודה היומית) וע"פ חודשי השנה (ייצוג התנודה העונתית). הפרמטרים שסיכום המדידה השנתי שלהם יוצג הם: 1. טמפרטורת אויר (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 2021 השווה לסיכום הרב שנתי לשנים 2020-2011. ההשוואה נעשתה ע"י חישוב ההפרש בין ממוצע שעתי לחודש משנת 2021 לעומת ממוצע דומה עבור כל העשור הקודם, ושרטוט מפת הפרשים בין שני הממוצעים.

גשם ישיר על הכנרת

בסיכום עונתי (שנה הידרולוגית) ל- 2020-2021 מתקבלים כ- 465.76 מ"מ על פני האגם (כ- 65 מלמ"ק). כמות זו קרובה לממוצע הגשמים הרב-שנתי באזור הכנרת (הממוצע הרב שנתי הוא 481.2 וסטיית תקן 125.9) (איור 8).

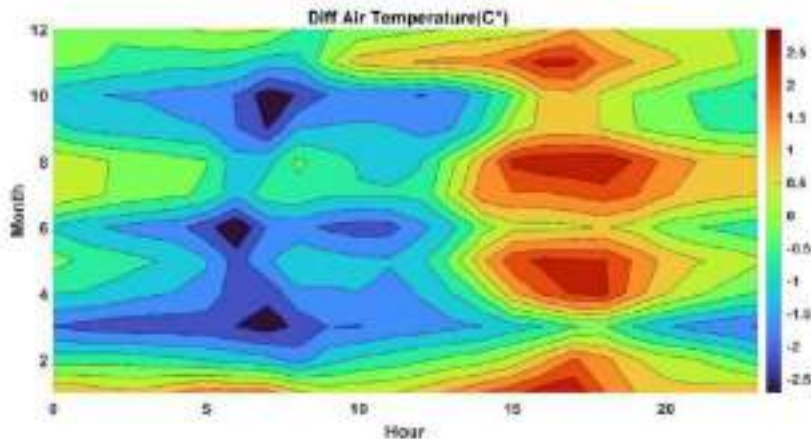


איור 8: גשם חודשי ממוצע כפי שנמדד בתחנות מסביב לכנרת בשנת 2021 (קו רציף), בהשוואה לגשם חודשי ממוצע ה-10 שנתי (עמודות).

טמפרטורת האוויר

שנת 2021 התאפיינה בשעות צהריים חמות מהממוצע במידה ניכרת, במיוחד בחודשים ינואר, אפריל, יולי, אוגוסט ונובמבר, ובשעות בוקר מוקדמות קרות במעלה מהממוצע ה-10 שנתי (איור 9). חודש מאי היה חם מהממוצע הרב שנתי במידה ניכרת. ביוני, הטמפרטורות היו ממוצעות פרט לשבוע אחרון שהיה חם מאוד. יולי היה חם מהממוצע עם שני גלי חום במהלכו, אך ללא ערכים יוצאי דופן. גל חום ממושך התרחש במהלך השבוע הראשון של אוגוסט. בספטמבר הטמפרטורות היו קרובות לממוצע, בחלקו השני של החודש התרחש

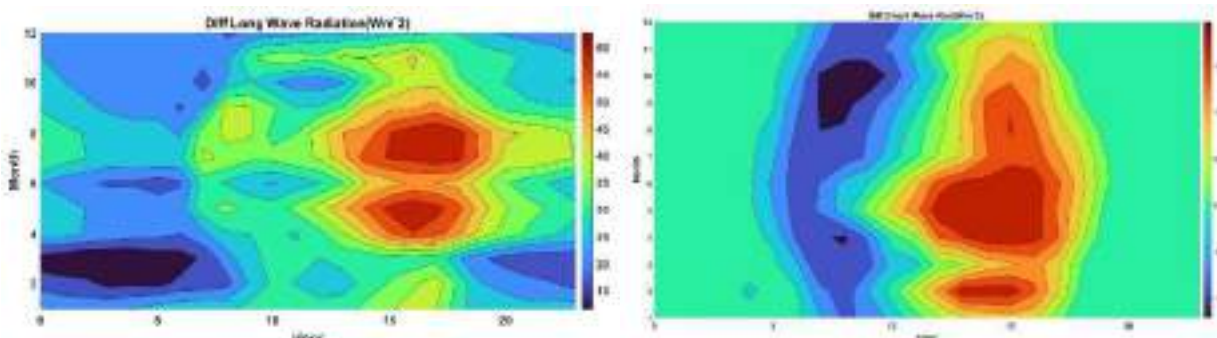
אירוע גשם לא אופייני. באוקטובר היה חם במעט מהממוצע בשעות היום וקרוב לממוצע בשעות הלילה. בנובמבר היה חם מהממוצע במידה ניכרת בעיקר בשעות היום.



איור 9: ההפרש בין טמפרטורה שעתית ממוצע לחודש בשנת 2021 לעומת ממוצע דומה עבור השנים 2011-2020.

קרינה קצרה וארוכת גל

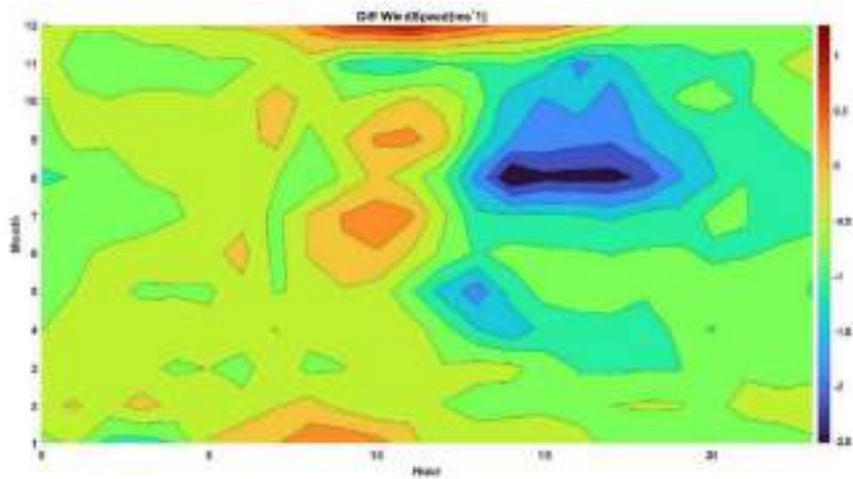
מדידות קרינה קצרת גל (305-2800nm) מראות באופן קבוע ערך מקסימאלי יומי בשעות הצהריים בין השעות 12:00-14:00 (שעון חורף). בסקאלה העונתית הקרינה המקסימאלית חלה בחודשים מאי-ספטמבר (איור 10), כאשר חודשים מאי ואוגוסט היו חריגים מהבחינה הזו (השפעה של גלי חום חריגים אשר צוינו בסעיף הקודם). ההפרש של מדידות הקרינה קצרת הגל וקרינה ארוכת גל מהערכים הרב שנתיים הממוצעים (איור 10) במהלך השנה מעיד על ערכים נמוכים יותר בשעות הבוקר וערכים גבוהים יותר בשעות אחר הצהריים, מה שתואם למדידות של טמפרטורת האויר (שעות אחר הצהריים חמות יותר במהלך השנה).



איור 10: ההפרש בין ממוצע שעתית לחודש משנת 2021 לעומת ממוצע דומה עבור השנים 2011-2020. משמאל: קרינה ארוכת גל (Wm^{-2}), מימין: קרינה קצרת גל (Wm^{-2}).

מהירות רוח

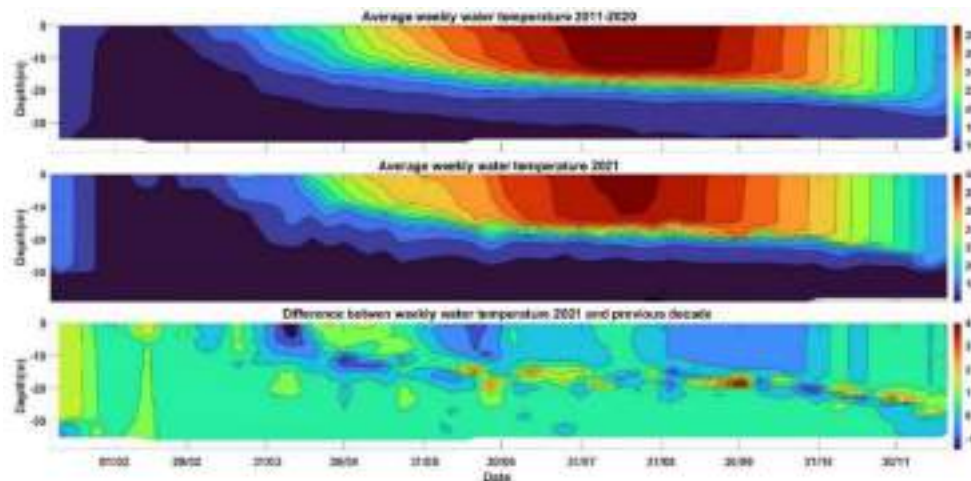
ההפרש בין הממוצע השנתי של ממוצעי מהירות הרוח (איור 11) מדגים את ההשפעה הרבה של גלי החום בחודשים אפריל וספטמבר. רוחות חזקות של סופת "כרמל", אשר הגיעו למהירויות של למעלה מ-50 קילומטר לשעה, תרמו לעלייה של המהירות הממוצעת בשעות הבוקר בממוצע החודשי בכ-1.2 מטר לשנייה במהלך חודש דצמבר.



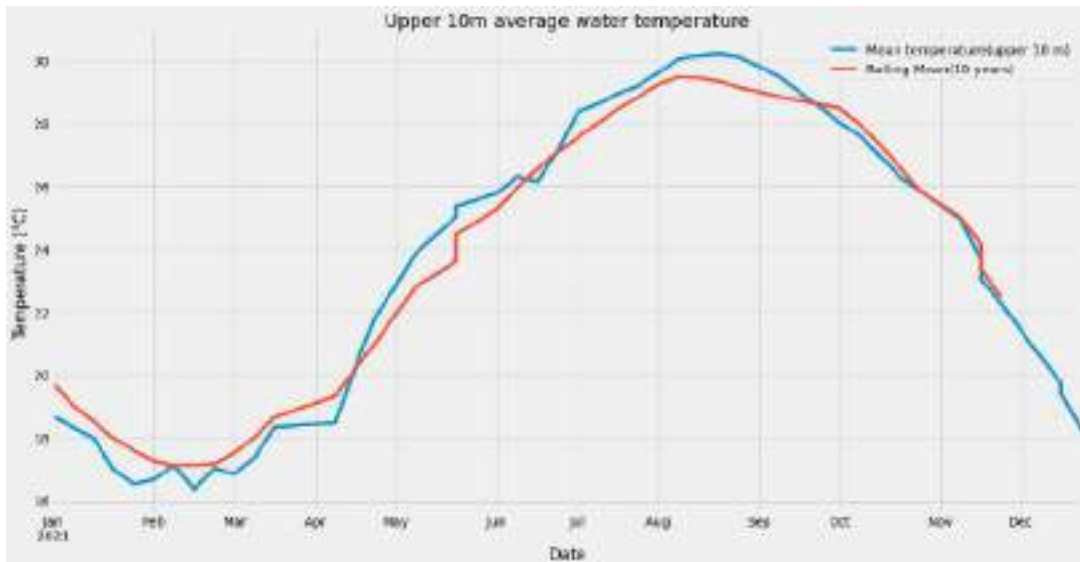
איור 11: ההפרש בין ממוצע שעותי של מהירות רוח (ms^{-1}) לחודש משנת 2021 לעומת ממוצע דומה עבור השנים 2011-2020.

סיכום שנתי של טמפרטורת האגם

פרופיל טמפרטורת גוף המים נבנה על בסיס מדידות שבועיות, באמצעות CTD במספר תחנות דיגום ובחולוציה אנכית של 0.1 מטר. באופן כללי, פרופיל טמפרטורת המים היה קרוב לממוצע הרב שנתי (איור 12 למטה) ההפרש השלילי הקל (של כחצי מעלה) נבע בעיקר מטמפרטורת אויר לילית קרה מהממוצע (הפרש השלילי של טמפרטורת אויר ממוצעת ניתן לראות באיור 9). טמפרטורת המים של השכבה העליונה (10 מטר) הייתה קרה מהממוצע ה-10 שנתי בתחילת השנה (חודשים ינואר - אפריל) וחמה יותר בחודשים אפריל-אוקטובר (איור 13). בדיקת השכוב התרמי במהלך 2021 העלתה כי הוא נמשך כ- 289 יום, בהשוואה לממוצע רב שנתי העומד על 293 ± 18 יום בממוצע רב שנתי של 50 השנים האחרונות.



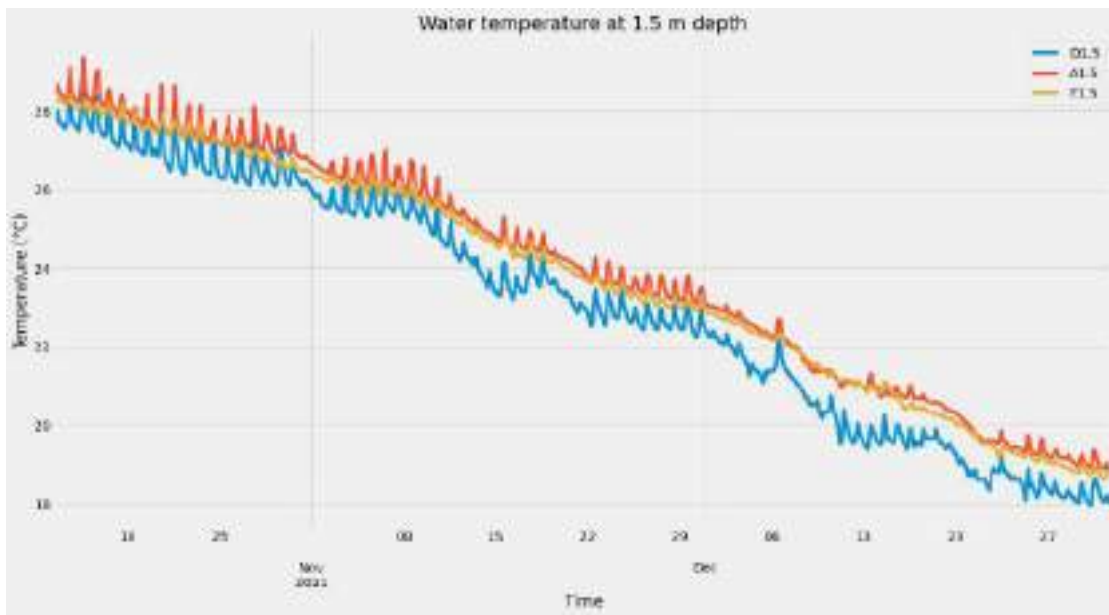
איור 12: פרופיל טמפרטורה של עמודת המים במרכז האגם, למעלה-ממוצע לשנים 2011-2020, באמצע-פרופיל טמפרטורה לשנת 2021 ולמטה - הפרש טמפרטורות בין שנת 2021 ל-10 שנים קודמות.



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

ניטור מרחבי של טמפרטורת האגם

כדי לשפר את הניתוח המרחבי של טמפרטורת האגם במהלך השנה, מותקנות שלוש שרשראות טרמיסטורים- במרכז האגם, בדרום האגם (תחנה D), ומול קיבוץ גינוסר (תחנה F). שרשראות אלו מודדות את פרופיל הטמפרטורה בחלוציה של כל 10 דקות (איור 14). באיור מוצגים ממוצעים שעתיים עבור חודשים אוקטובר-דצמבר, בגלל העומק הרדוד בתחנה הדרומית הפרופיל היומי בה מושפע יותר מתנודות יומיות בטמפרטורת האויר וזה מסביר את הטמפרטורה הנמוכה יחסית שנמדדת בה במהלך חודשי החורף.



איור 14: טמפרטורה מים בעומק 1.5 מטר, שלוש תחנות שונות במרחב האגם.

2.6 קצבי סדימנטציה



**במימון
רשות
המים**

איליה אוסטרובסקי, ניר קורן

- סדימנטציה הינה תהליך חשוב בהסרת 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 להסרת 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 עיתית ומרחבית משמעותית. עליית המפלס הגדולה באגם בשנים האחרונות השפיעה על תהליכי ההרחפה של הסדימנטים ושינויים בפיזור המרחבי של החלקיקים. אלה גרמו לשינויים בולטים במשטר הסדימנטציה באזורים הרדודים של קרקעית האגם. ניתן לקשור את השינויים בקצבי הסדימנטציה עם העלייה בעומסי הסדימנטים, המגיעים לאגם מאגן ההיקוות, במהלך שנים גשומות, ועקב העלייה המשמעותית של מפלס פני האגם.

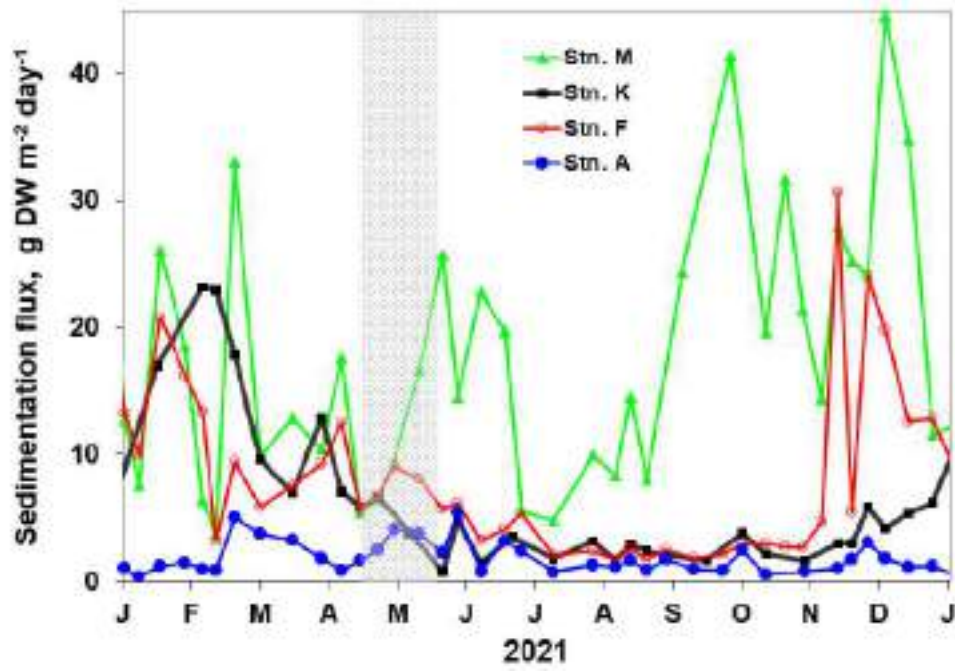
שיטות

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 של 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.

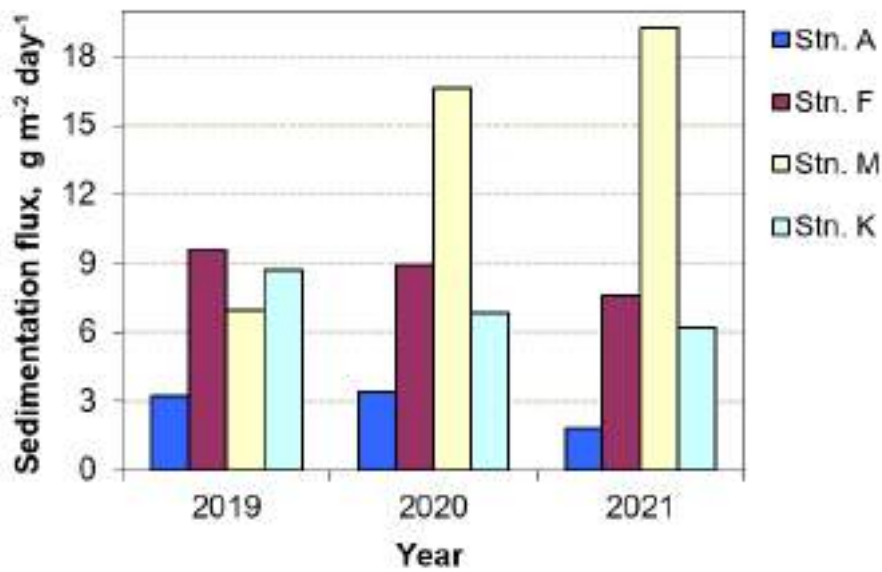
תוצאות ודיון

הדינמיקה של קצבי הסדימנטציה בכנרת בשנת 2021 מוצגת באיור 15. בתחנה העמוקה (A) קצבי הסדימנטציה היו נמוכים בשיעור ניכר ביחס לאלה שנמדדו בשאר התחנות. בתחנה זו שיאי הסדימנטציה התרחשו בסוף פברואר (5 גרם/מ"ר/יום) ובמאי (4-5 גרם/מ"ר/יום). סדימנטציה עונתית מובהקת נצפתה בתחנות הסאב-ליטורליות – F ו-K, בהן קצבי סדימנטציה גבוהים נמדדו בינואר – פברואר (עד 20-25 גרם/מ"ר/יום) ובנובמבר – דצמבר (9-30 גרם/מ"ר/יום), בעוד שבקיץ ובתחילת הסתיו היו הקצבים פחותים מ-5 גרם/מ"ר/יום. בתחנות אלה, שיאי האביב נגרמו ככל הנראה עקב הרחפה מחדש של סדימנטים מהקרקעית בתקופת ערבוב האגם ויבוא של חלקיקים אלוכטונים מאגן ההיקוות. שיאי הסדימנטציה בנובמבר – דצמבר נגרמו ככל הנראה עקב תהליכי הרחפה מחדש של סדימנטים, הקשורים לפעילות גלים פנימיים בתרמוקלינה, כאשר הם מגיעים לעומקים בהם ממוקמות המלכודות הסוב-ליטורליות. במהלך תקופת השקיעה המאסיבית של קלציט (מחצית אפריל עד מחצית מאי) נצפתה רק עליה מינורית בקצבי הסדימנטציה של תחנות A ו-F. עם זאת, שיאים אלה היו נמוכים באופן ניכר מאלו שנצפו ב-2020 (דו"ח חיא"ל מס' T9-2021 דו"ח שנתי לשנת 2020). בתחנה K שיאי הסדימנטציה של נובמבר – דצמבר היו גבוהים בהרבה מאלו שבתחנה F. שיאי קצבי סדימנטציה לא אחידים (20-45 גרם/מ"ר/יום) נמדדו בעונות השונות בתחנה הרדודה – M.

ב-2021 קצבי הסדימנטציה הממוצעים בתחנות A, F, K ו-M היו 6.2, 7.6, 1.8 ו-19.3 גרם חומר יבש/מ"ר/יום, בהתאמה (איור 16). בשנים 1999-2020 קצבי הסדימנטציה הממוצעים בתחנות A, F ו-M היו 0.2 ± 3.2 , 0.5 ± 9.4 ו- 1.1 ± 12.5 גרם חומר יבש/מ"ר/יום, בהתאמה. בשנים 1999-2020 קצבי הסדימנטציה הממוצעים בתחנה K היו 0.6 ± 7.4 גרם חומר יבש/מ"ר/יום. בשנת 2021 קצבי הסדימנטציה בתחנות F ו-K היו דומים לממוצעים הרב שנתיים שלהם. באותו הזמן קצבי הסדימנטציה בתחנה A היו כמחצית מהממוצע. בניגוד לכך בתחנה M קצבי הסדימנטציה היו באופן מובהק גבוהים מאשר בשנים הקודמות ומערכי הממוצעים הרב שנתיים. הדבר עשוי להיות קשור ליצירת משטר הידרודינמי בעל תנאי ערבול פחותים באזור הרדוד, בשנים האחרונות. באזור זה הוצפה הצמחיה היבשתית. השינויים במשטר ההידרודינמי עשויים היו לגרום להצטברות הדרגתית של חלקיקים עשירים בחומר אורגני, אשר לאחר מכן הורחפו מחדש והוסעו לכיוון אזור מיקום המלכודת בתחנה M.



איור 15: דינמיקה עונתית של קצבי הסדימנטציה בתחנות השונות ב- 2021. תקופת השקעת CaCO₃ מאמצע אפריל עד אמצע מאי 2021 מודגשת.



איור 16: קצבי סדימנטציה ממוצעים במיקומים השונים ב- 2019 - 2021.

2.7 ממצאי הניטור הכימי



החרמונה בדיגום. צילום: עוז צברי דר 2021.

**במימון
רשות
המים**

ירון בארי-שליון, אדית לייבוביץ, יורי לצ'ינסקי, מיקי שליכטר

- ביחס לשנתיים האחרונות עבור רב הפרמטרים נרשמה מגמת התייצבות לטווח ממוצע העשור האחרון.
- שיאי ערכי חמצן מומס בחורף-אביב בשתי השכבות נמוכים ביחס לשנים קודמות ומייצגים כנראה פעילות ביולוגית מועטה יחסית השנה באפילימניון וערבוב לא יעיל מספיק עבור ההיפולימניון.
- ערכי הגבה נמוכים בשתי השכבות בחצי השני של השנה.

מטרת המחקר

ניטור שוטף של הגיאוכימיה של האגם.

רקע

כמו בשנים קודמות, מוצגים נתוני הניטור הכימי משכבת האפילימניון וההיפולימניון בתחנה A בשנת 2021 בהשוואה לממוצעים רב שנתיים (עשר שנים: 2011-2019) וכן לשנה הקודמת, 2020 (איור 17).

תוצאות ודיון

להלן סיכום הממצאים לשנת 2021 (ראה איור 17):

אלקליניות וסידן:

התפתחות ערכי האלקליניות והסידן בשכבת האפילימניון בחצי הראשון של 2021 ובעיקר הירידה החריפה בערכים אלו באביב מבטאת שקיעת קלציט בעקבות פעילות ביולוגית. בשנת 2021 הירידה הייתה קצרה יחסית בהיקפה ובסידן נראה כי שיפוע הירידה מתון יותר. תופעות אלו עשויות לייצג פעילות ביולוגית מועטה יותר בשנת 2021 בתקופת האביב. מגמת ההתפתחות של אלקליניות וסידן בשכבת ההיפולמניון דמתה באופן כללי למגמה הרב שנתית ולערכי השנה הקודמת.

כלוריד:

ערכי הכלוריד באפילימניון ביטאו שנה סבירה מבחינת משקעים כאשר בחציון הראשון עד יוני נרשמה ירידה קלה בערכי כלוריד מ- 269 עד 259 מגכ"ל, ירידה אשר המבטאת את השפעת משקעי החורף/אביב ומעט התאדות. המשך מגמת העלייה, עד 269 מגכ"ל, מבטאת את הירידה בספיקות נחלי אגן ההיקוות ועליה בהתאדות.

חמצן:

ערכי החמצן בשנת 2021 היו דומים לממוצע הרב שנתי באפילימניון ממאי והלאה. עד מאי העלייה בערכי החמצן הייתה איטית יותר ולא הגיעה לשיא הרב שנתי או לזה של 2020. תופעה זו כנראה גם מעידה על פעילות ביולוגית מועטה יותר בקיץ 2021. מגמת ההתפתחות החמצן בשכבת ההיפולמניון הייתה שונה משנים קודמות וערכי החמצן בפברואר-מרץ הגיעו לכדי חצי מערכי השיא של שנים קודמות. תופעה זו מבטאת כנראה היפוך לא יעיל כך שהשכבה התחתונה לא התחמצנה באופן מלא לאורך זמן.

ערך הגבה (pH):

ערכי ההגבה בשתי השכבות במהלך שנת 2021 תאמו את הערכים והמגמות הרב שנתיות בחציון הראשון של השנה. אולם לאחר מכן נרשמה מגמת ירידה חריפה יותר והערכים נפלו מתחת לממוצע הרב שנתי. חלק מירידה זו ניתן לייחס לירידה ארוכת טווח בערכי ההגבה בעיקר בהיפולמניון.

זרחן:

ערכי זרחן כללי, זרחן מומס וזרחן מומס מגיב באפילימניון של שנת 2021 היו דומים לערכים של הממוצע הרב שנתי. גם בהיפולמניון ההתנהגות של זרחן כללי, מומס ומומס מגיב היו דומים לערכי הממוצע הרב שנתי עם הצטברות המתחילה במאי-יוני.

חנקן:

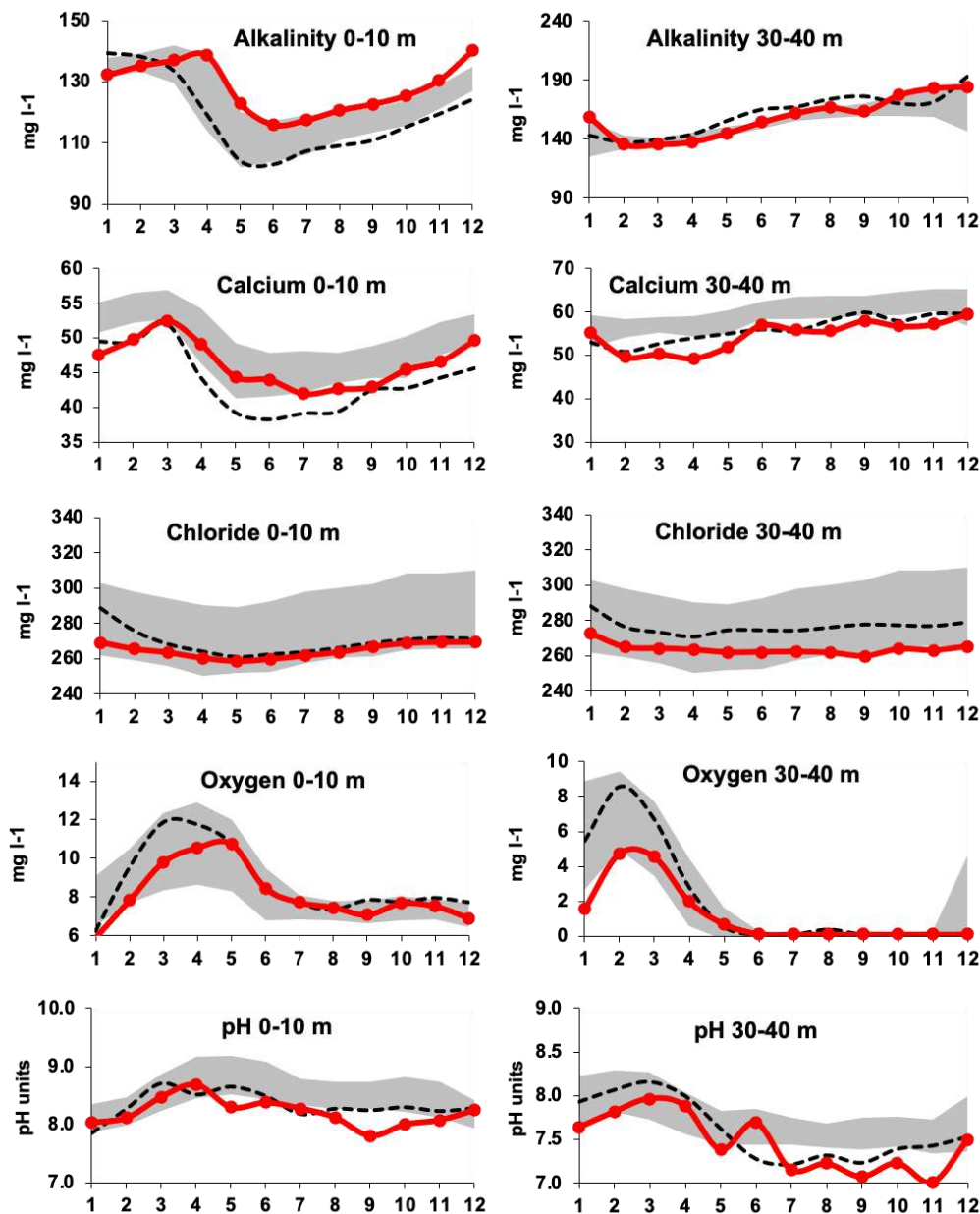
ערכי חנקן כללי ואורגני באפילימניון ובהיפולמניון היו דומים לערכי הממוצע הרב שנתי. כך גם עבור שלושת הצורונים האנאורגניים: אמוניום, ניטריט וניטראט. בהשוואה לשנה הקודמת, 2020, התוצאות עבור הפרמטרים של מערכת החנקן הציגו פחות קפיצות וחריגות ביחס לממוצע הרב שנתי. כך למשל, השיאים הגבוהים של חנקן כללי באפילימניון בחורף-אביב ב- 2020 ובשנה שלפניה, 2019 (לא מוצג באיור 17) ייצגו כניסה מסיבית יחסית של חנקן כללי למערכת האגם מאגן ההיקוות. בשנת 2021 הערכים בתקופה זו היו דומים לממוצע הרב שנתי וביטאו שטף נוטריינטים קטן יותר. ניתן לראות הקבלה של תופעה זו בגרפים של הניטראט אשר מהווה מרכיב חשוב בחנקן הכללי, בעיקר בחורף-אביב.

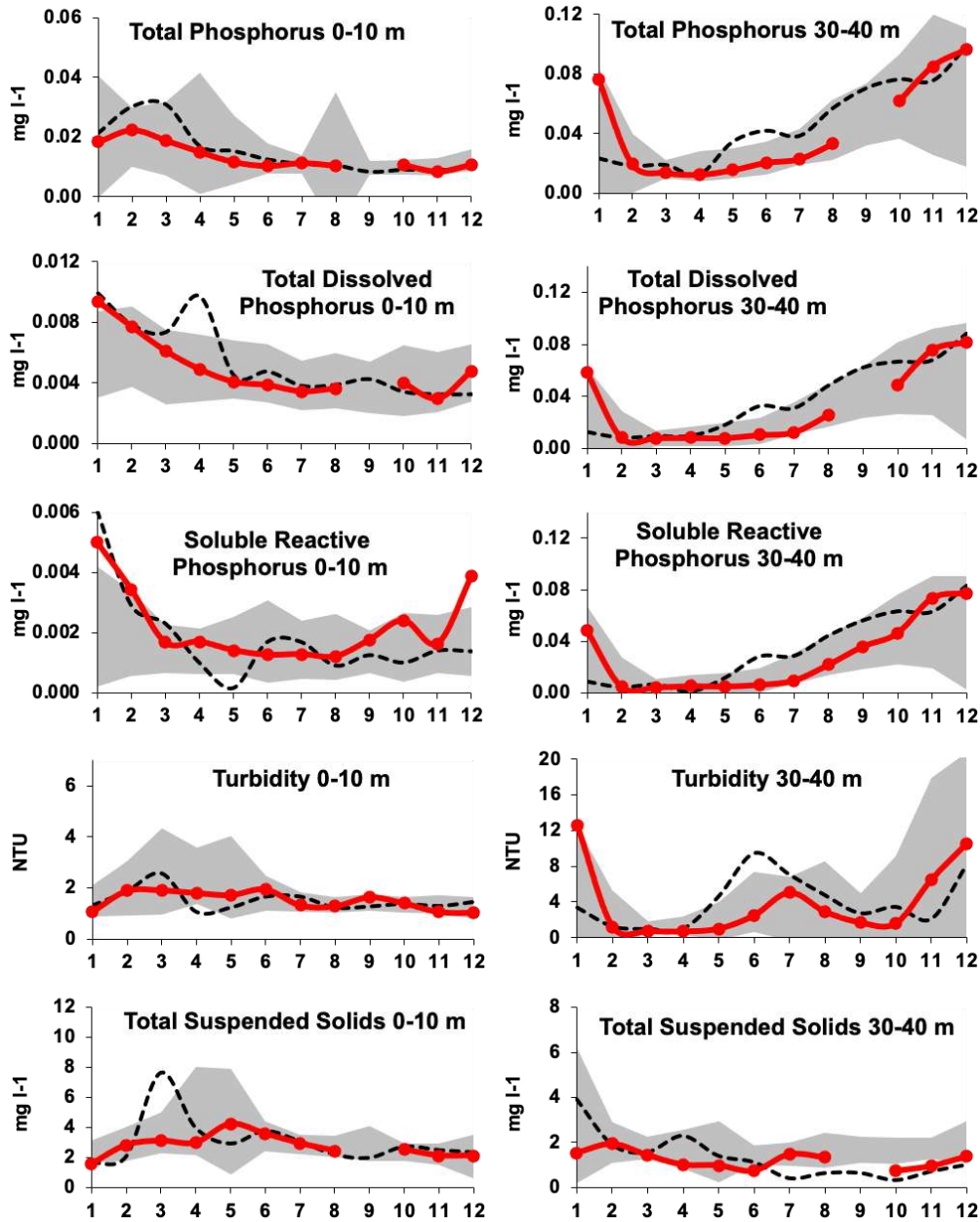
עכירות ומוצקים מרחפים:

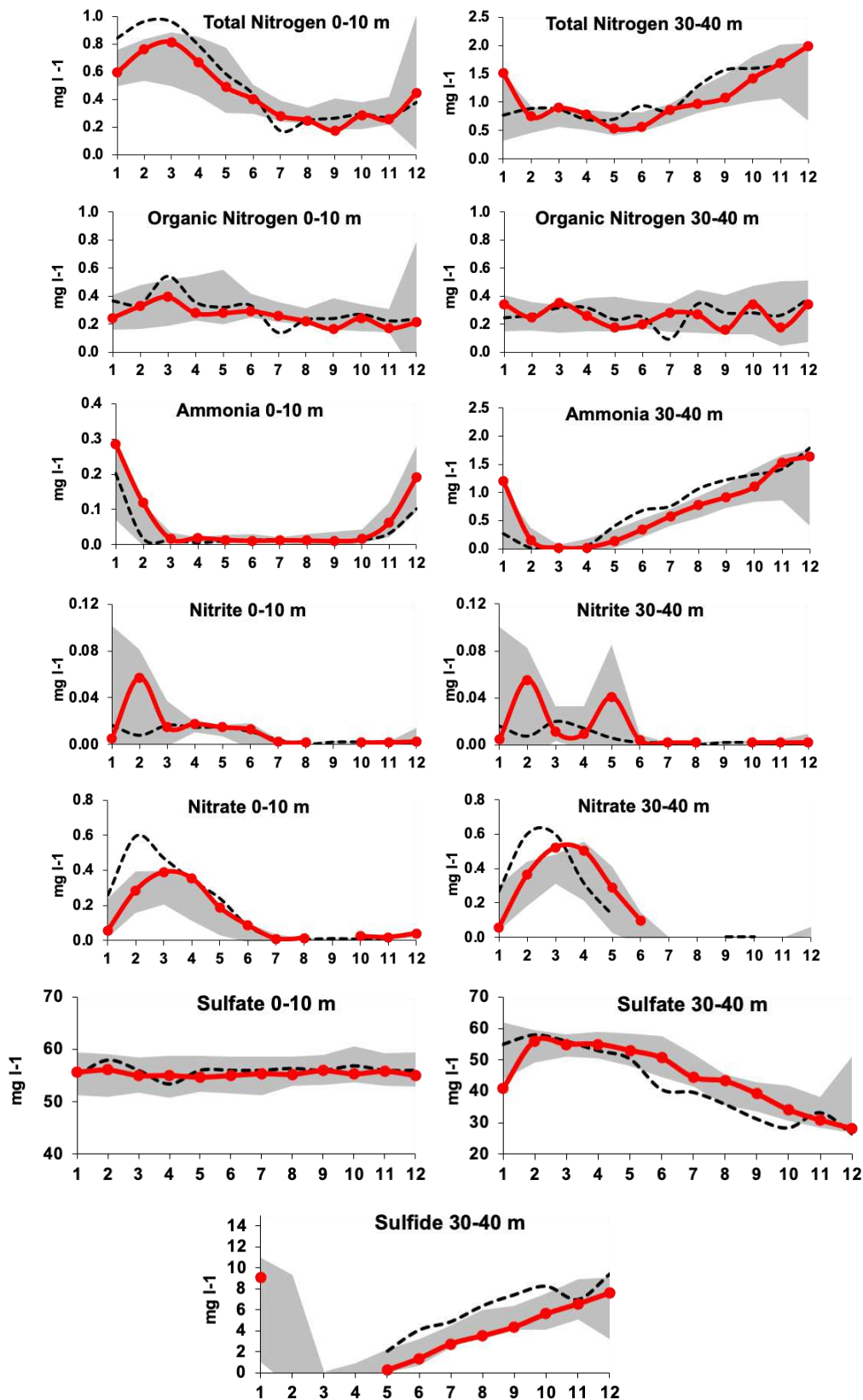
ערכי עכירות וסך המוצקים המרחפים ב- 2021 נמצאו בתוך טווח הממוצע הרב שנתי, רוב השנה, בשתי השכבות. יחד עם זאת, בדומה לשנים קודמות (לא מוצג באיור 17), החודשים האחרונים של השנה התאפיינו בערכי מוצקים מרחפים נמוכים יותר בהיפולמניון. התנודות החזקות בעכירות כתוצאה מהתעמקות התרמוקלינה והסעת סדימנטים בתקופה זו של השנה מייצגים הרחפה בליטוראל הכוללת כנראה גם חומר גס יותר אולם להיפולמניון מגיע רק חומר דק אשר מתבטא בעכירות גבוהה אך סך מוצקים מרחפים משקלית נמוך יחסית.

גופרית:

סולפאט באפילימניון של 2021 הציג יציבות לאורך השנה סביב ערכים של כ- 55 מג"ל, בדומה לממוצע הרב שנתי. הירידה בסולפאט בהיפולמניון ממאי לווה במקביל בעליה של ערכי הסולפיד בתקופה זו ומייצגת חזרו סולפאט בתנאים אנארוביים בחלק התחתון של האגם.







איור 17: ממוצעים חודשיים של ריכוזי הפרמטרים השונים בכנרת בשנת 2021 (קו אדום) בהשוואה לשנה הקודמת (2020, קו שחור מרוסק) ולממוצע הרב שנתי \pm סטיית תקן אחת של עשר השנים שלפניה (2019-2011 רקע אפור). הנתונים מוצגים בנפרד עבור שכבת המים העליונה (1-10 מ' עומק) והתחתונה (30-40 מ' עומק).

2.8 ניטור מתכות כבדות בכנרת



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

במימון
רשות
המים

ירון בארי-שלוין, גלית שרעבי (המכון הגיאולוגי)

- ברב המוחלט של דוגמאות המים בכנרת ריכוז המתכות הינו נמוך מאד ביחס לערך תקן מי שתייה.
- חריגות של אבץ- Zn מומס במי האגם נמצאו במספר מקרים בודדים, בעיקר בסתיו- חורף, בדומה למגמה של השנים האחרונות.
- מי החללים של גלעיני סדימנט רדודים (30-10 ס"מ) מכילים ריכוזים גבוהים בהרבה של מתכות רעילות ביחס למי האגם.
- ריכוזים בעייתיים של ארסן- As ומוליבדן- Mo נמצאו במי חללים מגלעיני סדימנטים מתחנה A, ועבור אבץ- Zn גם בתחנות אחרות. תופעה זו מעידה על פוטנציאל זיהום מקומי במקרים בהם נחשפים סדימנטים רדודים ומשתחררים מי החללים לאגם.

מטרת המחקר

ניטור שוטף של מתכות קורט באגם ובמוצא הירדן והמשושים.

רקע

הדו"ח הנוכחי מציג את פעולת ניטור מתכות קורט באגם הכנרת לשנת 2021. 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 בסדימנט ובמספר נחלים. תוצאות ניטור המתכות הכבדות מושוות בדו"ח לרמות המותרות במי שתיה ע"פ תקנות בריאות מים מעודכנות לשנת 2013 למרות שמי הכנרת אינם מי שתיה אלא מי גלם לשתיה.

פעולת הניטור השנה כללה חמישה פרופילי עומק במרכז האגם (תחנה A) במרץ, מאי, יוני, אוקטובר ודצמבר וכן מספר פרופילים בתחנות שונות במרחב האגם: בדרומו (D) בצפונו (G) בין שפך הצלמון לשאיבת טבריה (GY) ובשפך הירדן (J). במקביל נדגמו מי הירדן (גשר אריק) ומי נחל המשושים (סמוך לשפכו של הנחל לאגם).

שיטות

דוגמאות מים באגם נאספו באמצעות משאבה פריסטלטי (Masterflex L/S® Easy-Load Head) במרווחים של 5m וברחלוציה גבוהה יותר בתקופת השיכוב, סביב האוקסיקלינה. דוגמאות המים נאספו בבקבוקי 125mL LDPE שנשטפו מראש עם HNO_3 15.6 N ANALYTICAL GRADE (1:4), כאשר עבור ריכוז מתכות כללי נוספו מיד 15mL חומצה חנקתית מרוכזת (HNO_3 Backer INSTRANA-ANALYZED). 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 3N. מטרת הליך דיגום זה הינה לזהות את ריכוז יסודות הקורט בדוגמה, כולל מתכות ספוחות. גלעיני סדימנט קצרים נאספו באמצעות קורר (corer) ייעודי וטופלו במעבדת חיא"ל עם הגעתם למעבדה. הגלעינים נחתכו לפרוסות בעובי של כ-1 ס"מ. מי נקבוביות (מי חללים) הופרדו ע"י צנטריפוגה במהירות של 4000 סל"ד, הועברו לסינון באמצעות פילטר סטרילי חד פעמי (Whatman 0.45 micron cellulose nitrate) אל בקבוקים המכילים חומצה חנקתית 3N ביחס 1:25 למים. פרוסות הגלעין נשטפו במים מזוקקים פעמיים ($18 \text{ M}\Omega \text{ cm}^{-1}$) ועברו צנטריפוגה במהירות של 4000 סל"ד, הליך זה בוצע פעמיים. הסדימנט הנוותר עבר ייבוש בליאופיליזר ונטחן באמצעות מכתש קרמי.

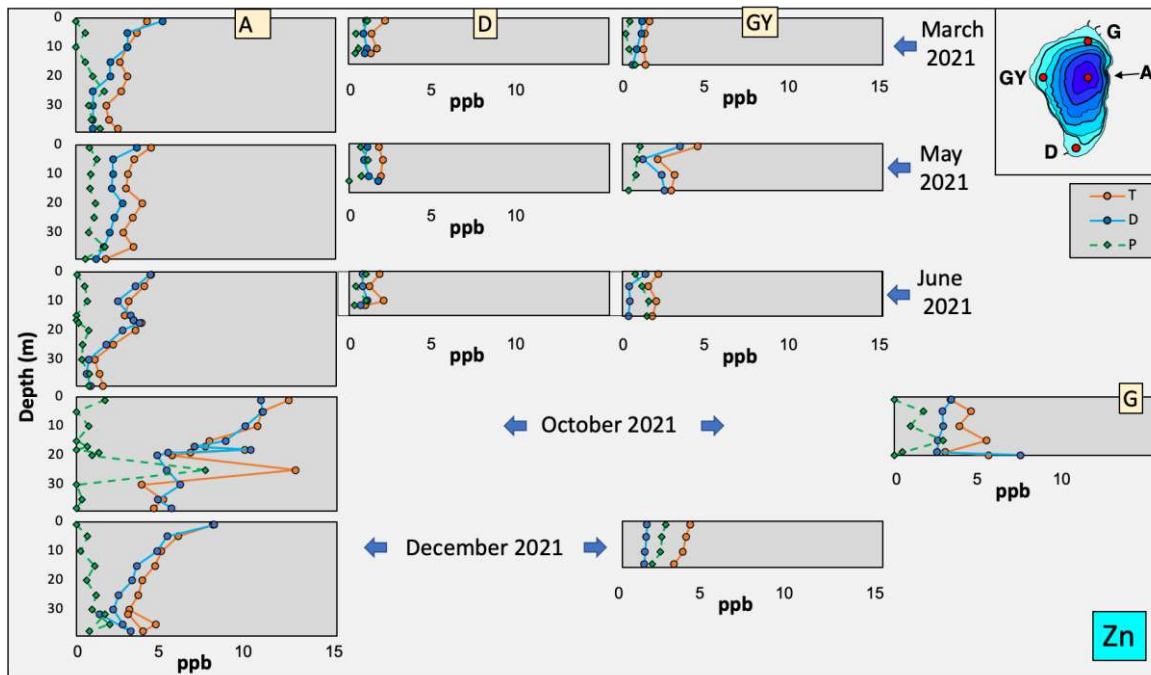
אנליזות המים בוצעו באגף לגיאוכימיה וגיאולוגיה סביבתית במכון הגיאולוגי. הדוגמאות הוחמצו עם חומצה חנקתית ו-Sc 5 ppm המשמש כסטנדרט פנימי. דיוק השיטה הינו $\pm 10\%$. יסודות קורט נוספים, כגון As, Mo, Zn, נמדדו באמצעות ICP-MS NexION 300D, Perkin Elmer. דיוק השיטה הינו $\pm 10\%$.

תוצאות ודיון

בחינת הריכוז של מתכות כבדות בפרופילי מים שונים באגם ובעונות שונות ביחס לתקן מי שתיה מראה כי ברוב המוחלט של דוגמאות המים, ריכוז המתכות היה נמוך עד נמוך בהרבה מהתקן. חריגות התקבלו באבץ בפאזה המומסת בעיקר באוקטובר בתחנה A עם חריגות של עד 215% (איור 18). כמו כן, באוקטובר ודצמבר נמצאו חריגות מעט קלות יותר גם במוצאי הירדן והמשושים. אבץ מראה לאורך השנים מתחילת המדידות עליה מתונה בריכוזים, כך שבשנים האחרונות מתגלות שוב ושוב חריגות ברמה מוגבלת בריכוז יסוד זה בפאזה המומסת במי האגם. חריגות נוספות בערכי אלומיניום נמצאו מספר פעמים לאורך השנה במוצאי הירדן והמשושים, אולם חריגה זו מוגבלת אך ורק לפאזה החלקיקית. גם תופעה זו אינה ייחודית לשנת 2021. איור 18 מראה את התפלגות ריכוזי האבץ-Zn בשלושה מימדים: במרחב האגם בתחנות שנמדדו, בעומק, ובזמן עבור מספר תחנות: A במרכז האגם, D בדרום, GY במערב ו-G בצפון הכנרת.

ריכזי האבץ היו נמוכים (פחות מכ- 3 ppb) בכל המרחב ממרץ ועד יוני ופרופיל העומק מראה העשרה בפני השטח ודעיכה כלפי מטה.

בפרופילים אלו רב האבץ נמצא בפאזה המומסת. באוקטובר ישנה קפיצה בריכזי האבץ בתחנה A אך צורת הפרופיל נותרת זהה (ריכזים גבוהים בפני השטח ודעיכה כלפי מטה), למעט אזור המתלימניון ושיא חזק נוסף ב- 30 מ', מתחת למטהלימניון אשר מאופיין גם בפאזה חלקיקית (ספוחה על חלקיקים) גבוהה. בדצמבר נראית דעיכה כללית בריכזי האבץ וכבר לא נראה שיא העשרה מתחת למטהלימניון. למרות שתבנית ההעשרה בפני השטח ודעיכה כלפי מטה שולטת בפרופילי העומק של האבץ- Zn לאורך כל השנה, ניתן לקשר כנראה את העלייה בריכזים באוקטובר גם לשיאים במטהלימניון ומתחתיו. שיאים אלו קשורים לתהליכי הרחפת סדימנט המלווים את העמקת התרמוקלינה בתקופה זו ומלווים בעליית ריכזים גם ביסודות אחרים כגון מנגן- Mn. מקור אחר לתרומה של אבץ- Zn לאגם עשוי להיות אטמוספרי- אבק. ריכזי מתכות נבחנו בגלעיני סדימנטים מתחנות שונות אשר נפרסו לפרוסות בעובי כ-1 ס"מ כך שהנתונים מייצגים חלוציית עומק גבוהה יחסית בגלעינים. הנתונים כוללים ריכזים של הפאזה המוצקה (הסדימנט) וכן של הפאזה המומסת במי חללים של אותה פרוסה. ההשוואות הבאות מבוססות על ריכזים ממוצעים. כמצופה, עבור רב המתכות (80% מהדוגמאות), הריכז בפאזה הסדימנט גבוהה מזו של פאזה מי החללים (לרב בין פי 2 - 70). הריכז במי החללים ברב המקרים (70%) גם גבוה בצורה משמעותית (לרב פי 1.5 - 25) מהריכז הממוצע בעמודת המים בכנרת מעל. הסדימנטים מהווים מבלע ארוך טווח של מתכות ממי האגם, אולם הערכים המדודים כאן מייצגים גם את תרומת ההרכב המינרלוגי. היחס בין הריכז בסדימנט, למי החללים אינו קבוע ומשתנה מאד בין יסוד ליסוד. השוואת ריכזי המתכות בין התחנות מראה כי בפאזה הסדימנט רב היסודות (70%) יותר דומיננטיים בתחנות הליטורל בהשוואה לתחנה A. לעומת זאת, במי החללים עבור רב היסודות (63%) דומיננטיים בתחנה A. בנוסף אין שום מתאם בין הקבוצה המצומצמת של מתכות הנמצאת בריכז גבוה בתחנה A בפאזה המוצק (קדמיום- Cd, מוליבדן- Mo, ואורניום- U) לבין אלו הדומיננטיות במי החללים של אותם סדימנטים בתחנה זו. למרות שבמי הכנרת רב היסודות הנמדדים בניטור נמוכים בסדר גודל או יותר מערך תקן מי שתיה, הריכזים במי החללים גבוהים יותר ובחלק מגלעיני הסדימנט הריכז של היסודות אבץ- Zn, מוליבדן- Mo, וארסן- As מגיע באחוז ניכר (25-100%) מהעומקים לערכים שהם כרבע מערך התקן. בגלעין תחנה A נמצאו במספר עומקים ערכי מוליבדן- Mo, וארסן- As הגבוהים מתקן מי שתיה, ועבור אבץ- Zn, כמעט כל העומקים בגלעיני תחנות A, D, ו- GY חורגים מתקן מי שתיה. תוצאות ערכי מי החללים של הגלעינים הרדודים (10-30 ס"מ) מעידות על פוטנציאל זיהום מי האגם במצבים בהם נחשפים סדימנטים רדודים בעיקר בהקשר של שחרור מי החללים וערבובם במי האגם.



איור 18: התפלגות ריכוזי אבץ בפרופילי עומק בכנרת במרחב (תחנות: A, D, GY, G) ובזמן: מרץ עד דצמבר 2021. בפרופילים מופיע ריכוז כללי (עגולים כתומים), ריכוז מומס (עיגולים כחולים) וריכוז (מחושב) של מתכות ספוחות על חלקיקים (מעוינים ירוקים).

2.9 בחינת נוכחות חומרי הדברה במי האגם ובדגה



**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 ודיון

בדומה לשנים שעברו, אכן נמצאו חומרי הדברה במי האגם אך בריכוזים נמוכים (1ppb). לעומתם, ריכוזי חומרים ממשפחת ה-DDT קיימים ברקמות הדגים בריכוזים של $1-10\text{ppb}$ באופן קבוע. חומרים אלו אסורים לשימוש ואינם בשימוש ככל הנראה מזה מספר עשורים. אולם, יכולת השרידות שלהם בסביבה הינה 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. דוגמת דג שהובאה למעבדתנו ב- 29.04.2021 נמצאה מורעלת בחומר מסוג אנדוסולפן אלפא המצוי בריכוז של 68ppb . ריכוז גבוה נמצא גם בדגימת מים מאותו אירוע.

2.10 שטפי זרחן באבק



**במימון
רשות
המים**

ירון בארי-שלוין, אדית לייבוביץ, ניר קורן

- שטפי זרחן זמין באבק בטבחה: 34 טון לשנה ובתחנת כינר 36.5 טון שנה.
- הממוצע לאגם-35.3 טון לשנה, דומה מאד לממוצע הרב שנתי.
- תחנת כינר מראה שונות עונתית ורב-שנתית גבוהה יותר ביחס לטבחה.
- אירוע שיא של שטף זרחן נרשם בשתי התחנות באמצע יוני.

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. מתחילת 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, זוהי השנה השביעית בה קיימות שתי תחנות ניטור זרחן באבק סביב הכנרת.

שיטות

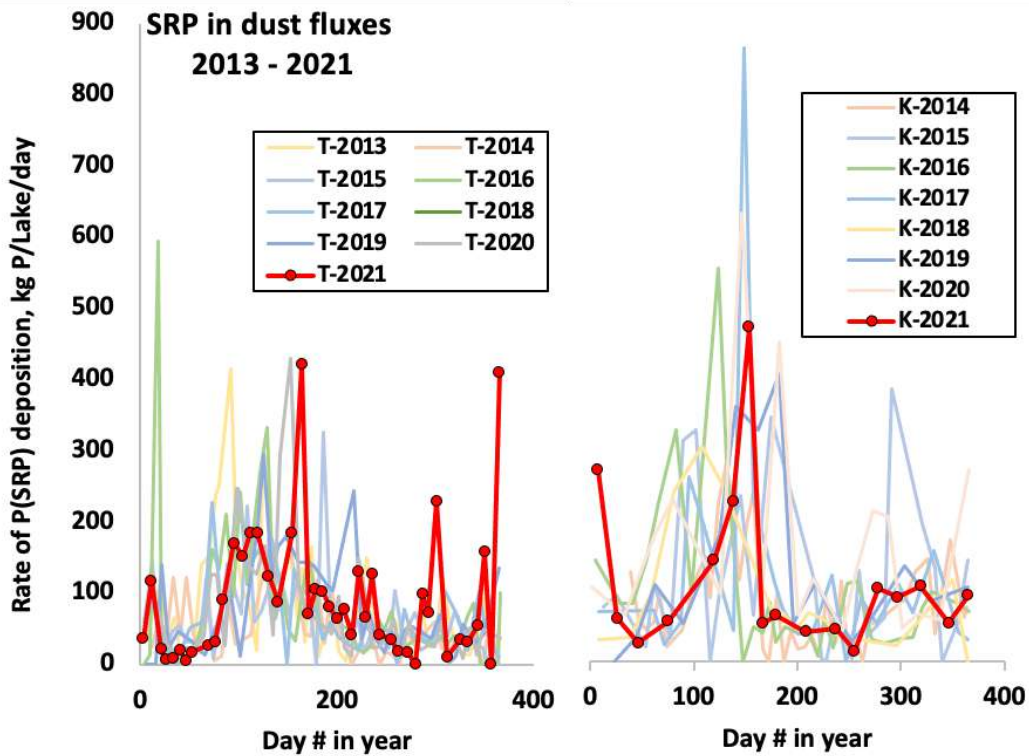
דיגום האבק מבוצע ע"י הצבת 4 דליים מלאים במים מזוקקים מורעלים בסודיום אזיד על גג המעבדה לחקר הכנרת (תחנת טבחה), וכן עוד 2 דליים בחוף כינר (תחנת כינר) במזרח האגם. נפח הדלי המלא הוא כ- 18 ליטר ושטח הפנים העליון שלו 650 סמ"ר. הדליים נדגמים למדידת זרחן מומס אחת לשבוע לערך ומים מזוקקים לקיזח הפסדי אידי מוספים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

תוצאות ודין

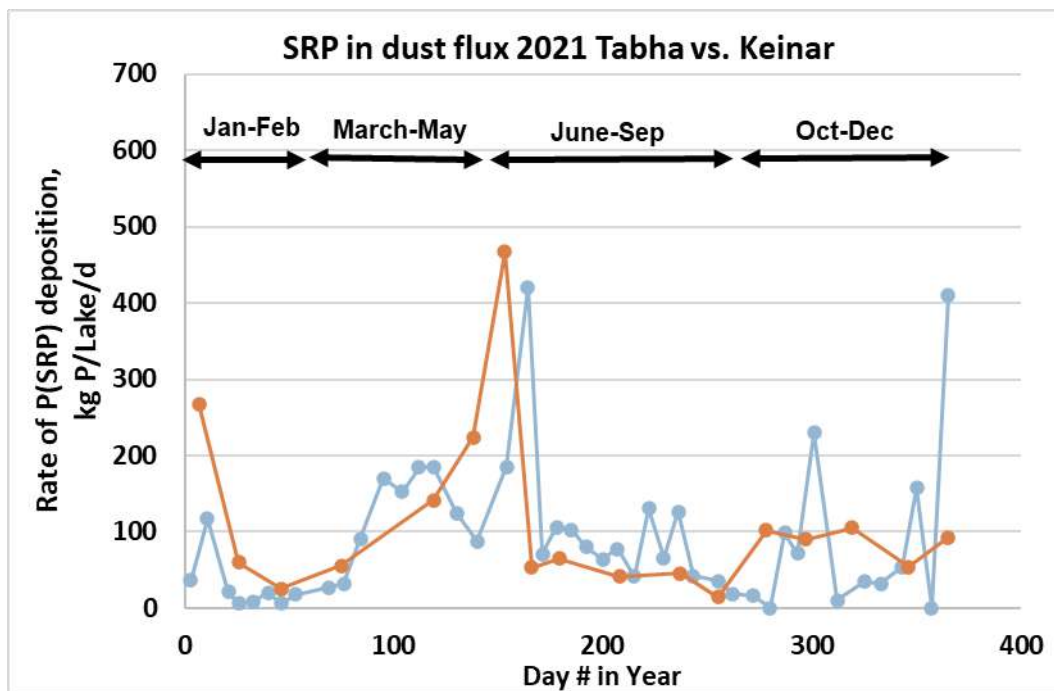
בתחנת טבחה ניתן להבחין בשתי תקופות עיקריות של שטפי זרחן באבק בשנת 2021 (איורים 19 ו-20): אביב מאוחר עד תחילת קיץ עם שטפים גדולים יחסית וקיץ-סתיו-חורף עם שטפים נמוכים יותר. שיא השטפים מעט מאוחר (גלישה אל תחילת הקיץ) בדומה לשנת 2020 ומעט מאוחר ביחס לשיא השטפים בשנים קודמות יותר, בעיקר בטבחה. כמו בשנים קודמות – תקופת שיא זו מאופיינת לא רק בשטפים גדולים יחסית אלא גם בתנודתיות רבה והיא נעה בין ערכים של כ- 50 ק"ג עד כמה מאות ק"ג זרחן מומס זמין לאגם ליום. השוואה בין שנת 2021 לשנים הקודמות (איור 19) מראה כי למרות השינויים בגודל השטפים בתקופת האביב ומיקום שיא השטפים מעט מאוחר יותר השנה ביחס ל- 2020, 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 (איורים 19 ו- 20). שיא השטפים, חד יחסית ומתרכז סביב אירוע באמצע יוני. אירוע שיא זה נרשם גם בטבחה.

סך השטף השנתי ל- 2021 ממדידות בתחנת בטבחה היה כ- 34 טון, כ- 125% ביחס לממוצע עבור השנים 2013-2020. בכינר השטף השנתי בשנת 2021 היה כ- 36.5 טון, כ- 85% ביחס ל- לממוצע עבור השנים 2014-2020. ממוצע בין שתי התחנות נותן ערך של 35.3 טון לשנה זרחן מאבק לכנרת שדומה מאד לממוצע הרב שנתי.



איור 19: השוואת שטפי זרחן מומס עבור השנים 2013-2021 בתחנות טבחה (גג המעבדה לחקר הכנרת) והשנים 2014-2021 בתחנת כינר.



איור 20: שטפי זרחן מומס בכנרת כפי שנמדדו בתחנות טבחה (גג המעבדה לחקר הכנרת): קו כחול, וכינר: קו אדום-חום בשנת 2021.

2.11 קיבוע חנקן



**במימון
רשות
המים**

שירה ניניו, חמי רושנסקי, עכסה לופו, זהר פריימן

- קיבוע החנקן ב- 2021 התפרס על פני עונה קצרה והיה נמוך מהרגיל.
- השיא בקצבי הקיבוע נמדד בחודש אוגוסט, אז גם נמדדו ערכי שיא של הכחולית אפניזומנון וערכי שיא רב שנתיים של הכחולית צילינדרוספרצופסיס.
- בסך הכל קובעו באגם כ- 39 טון חנקן אטמוספרי במהלך פריחת הכחוליות הקייציות של 2021.

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, זמן בו 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.

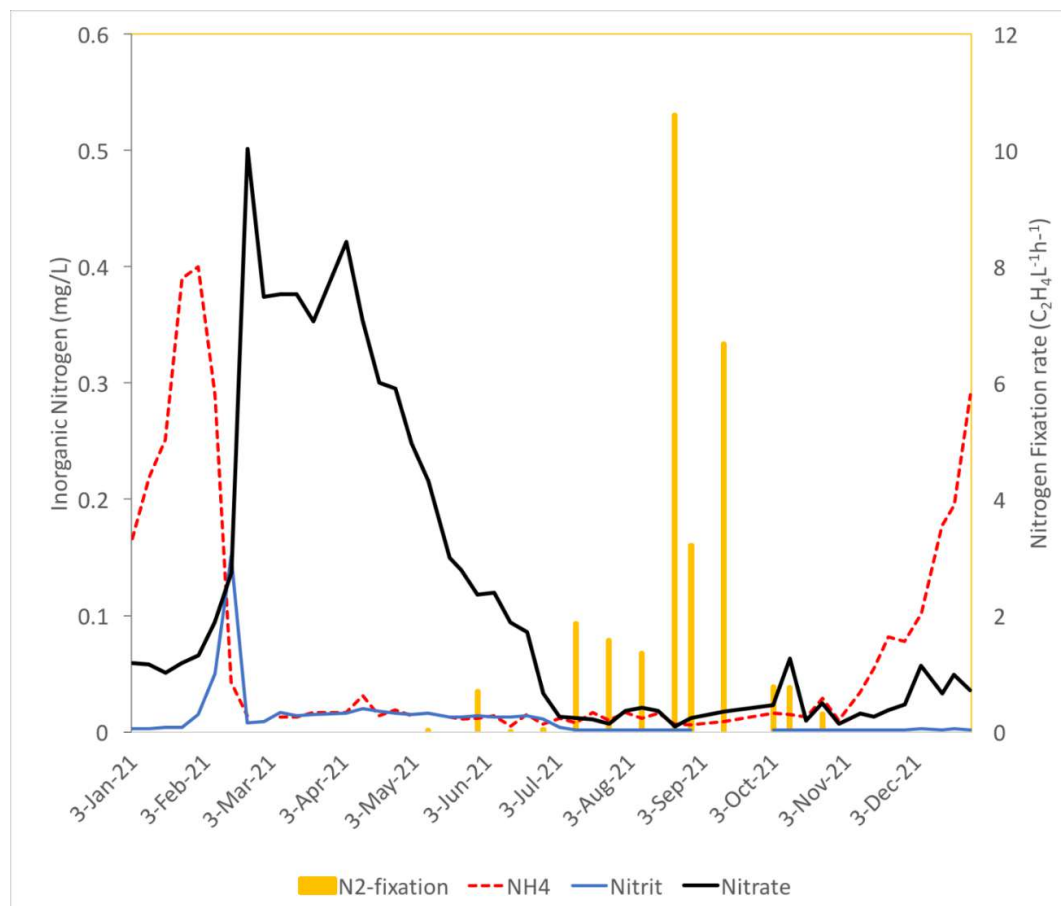
שיטות

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 אנזים הניטרוגנאז, ומדידת שעורי האתילן הנוצרים על ידי כרומטוגראף גזים. בעזרת שיטה זו נמצא שקיבוע החנקן העונתי בכנרת תלוי באנרגיית אור, עולה עם הזמן, מעוכב על ידי אמוניה ומתרחש רק באור.

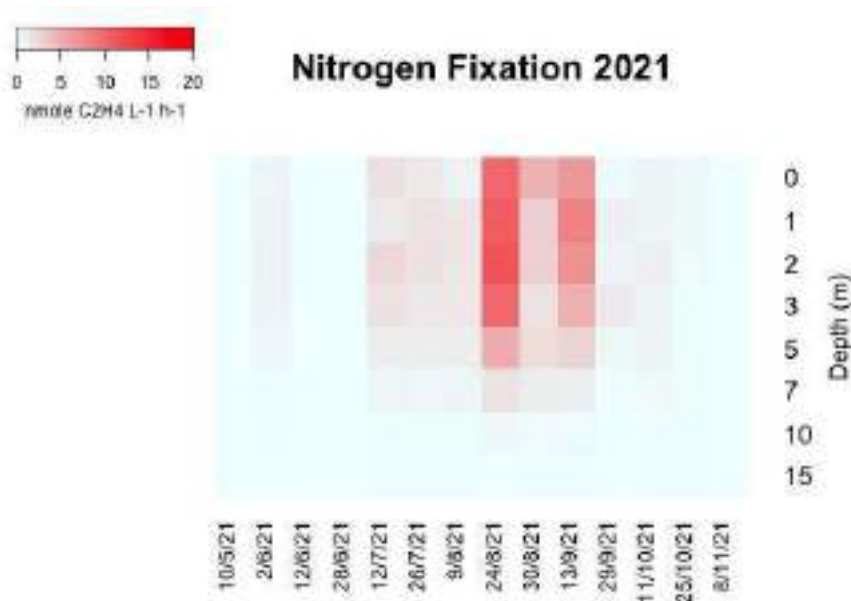
תוצאות ודין

קיימת תלות בין הפריחות של הציאנובקטריה 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 2021 נצפתה תלות זו אולם בשל אוגר חנקן גבוה באגם התחילה עונת הקיבוע מאוחר יחסית. בתחילת חודש יולי ירד ריכוז הניטראט לערכים נמוכים מספיק המעודדים פעילות קיבוע משמעותית ולפני כן נרשמו קצבים נמוכים של קיבוע (איור 21). עונת הקיבוע הגיעה לשיאה בחודש אוגוסט עם קצבי קיבוע של $10 \text{ nmole C}_2\text{H}_4 \text{ L}^{-1} \text{ h}^{-1}$ בחלק העליון של עמודת המים (איורים 21 ו-22). באותה תקופה נספרו ערכי השיא של ריכוז הפילמנטים של הכחולית אפניזומנון (474 סיבים למ"ל) כמו גם ערכי קיצון רב שנתיים של הכחולית צילינדרוספרמופסין (12,000 סיבים למ"ל). בתחילת נובמבר החלה עליה משמעותית בריכוז החנקן בצורת אמוניה באפילימניון והסתיימה עונת הקיבוע (איור 21).



איור 21: קיבוע חנקן (קצב ממוצע בעומקים 1-3 מ') וריכוזי חנקן אי-אורגני מסיס ב-3 מ' (מיליגרם לליטר) ב-2021.

ערכי קיבוע החנקן הכוללים היו דומים בשנת 2021 לאלה שנמדדו בשנתיים שקדמו לכך. ערכים אלה היו נמוכים יחסית לממוצע 3 השנים שקדמו להן 2016-2018 (טבלה 3) ויתכן שניתן לקשור את התופעה לשטפים גבוהים יותר של חנקן שנכנס לאגם מאגן ההקוות בשנים ברוכות משקעים. בעקבות כך ריכוזי הניטראט הגיעו לערכים גבוהים (0.5 mg/L במרץ 2021) והירידה בריכוז הניטראט באפילימניון ארכה תקופה ארוכה יותר, מה שגרם לעיכוב של תחילת עונת הקיבוע והביא לקיצורה של העונה. סה"כ קיבוע החנקן לשנת 2021 הסתכם ב- 39 טון לאגם, בהשוואה ל- 32 טון ב- 2020, ו- 47 טון בשנת 2019 (טבלה 3). ניתוח של פיזור פעילות הקיבוע מלמד שב- 2021 קצבי הקיבוע הגבוהים ביותר נרשמו בעומק של 2 מ' (איור 22).

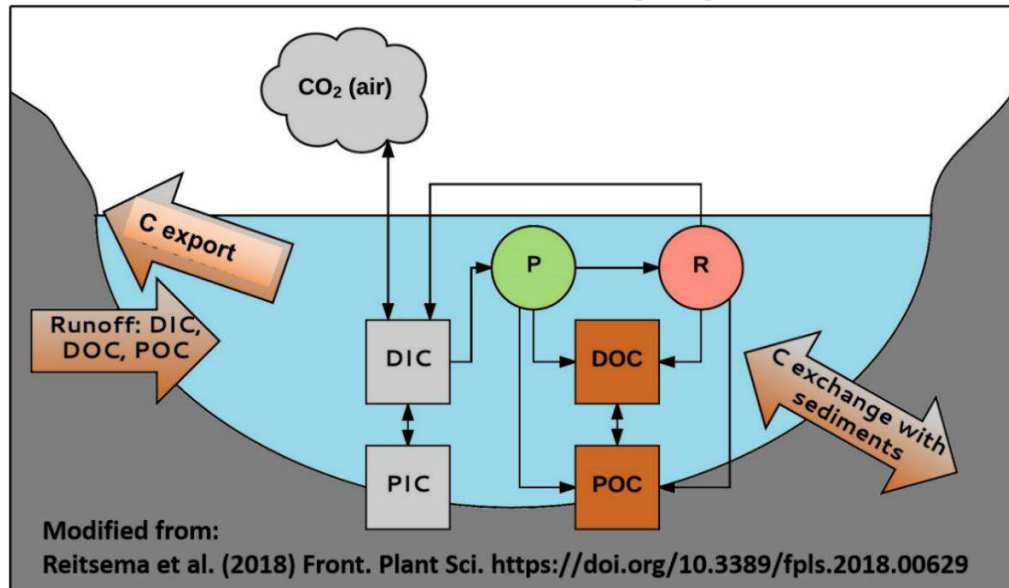


איור 22: מפת חום המייצגת את הפיזור האנכי של קצבי קיבוע החנקן בעמדות המים מ- 1-15 מ' בשנת 2021. הגוון מייצג את קצב הקיבוע שנמדד ביחידות $\text{nmole C}_2\text{H}_4 \text{ L}^{-1} \text{ h}^{-1}$ על פי הסרגל שמשמאל.

טבלה 3 : קיבוע חנקן בכנרת בשנים 2007-2021

Year	N2 Fixed, tons per lake
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
2021	39.1

2.12 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- 0.4 מג"ל בהשוואה ל- 2020.
- ב-2021, הערכים המרביים של הממוצעים החודשיים של כלל המוצקים המרחפים והפחמן האורגני החלקיקי נמדדו בחודש יוני.

רקע

פחמן אורגני מומס (DOC) ופחמן אורגני חלקיקי (POC) הם מרכיבים חשובים במעגל הפחמן באגם. DOC משוחרר על ידי פיטופלנקטון חי במהלך פירוקו, ומספק את בסיס ההזנה לכל המיקרואורגניזמים ההטרוטרופיים, המשחררים אף הם 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 $0.7 \mu\text{m}$.

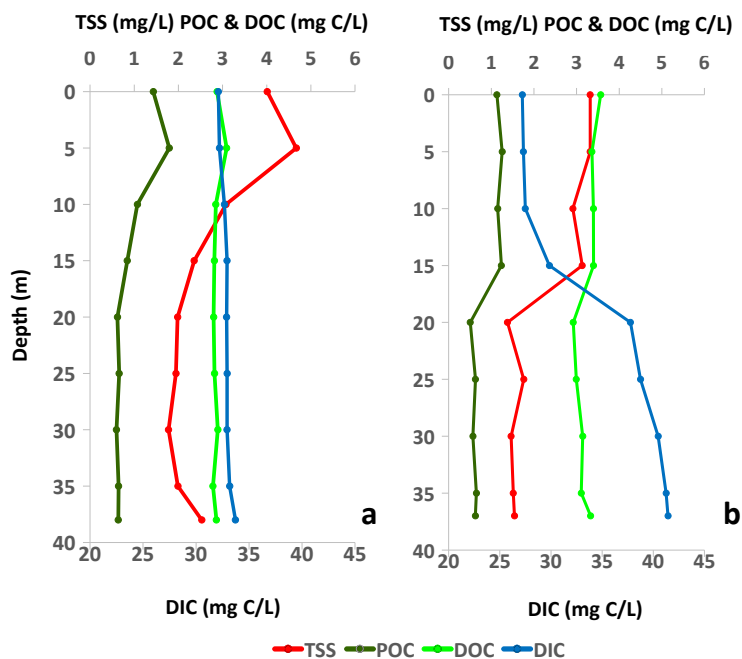
שיטות

במסגרת הניטור מדדנו את ריכוזי הפחמן המומס בעמודת המים של הכנרת ב-8 עומקים, פעם בשבועיים, חת במקביל למדידה של החומר החלקיקי באותם העומקים. הדיגום בוצע במקום העמוק באגם, בתחנת הדיגום השגרתית (תחנה A). החומר החלקיקי נאסף ע"ג פילטר סיבי זכוכית (GF/F), בעל קוטר נקב ממוצע של 0.7 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 חיישן 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 . על פי חישוב זה, כמות הפחמן האורגני החלקיקי (POC) הינה מחצית החומר השרוף.

תוצאות ודין

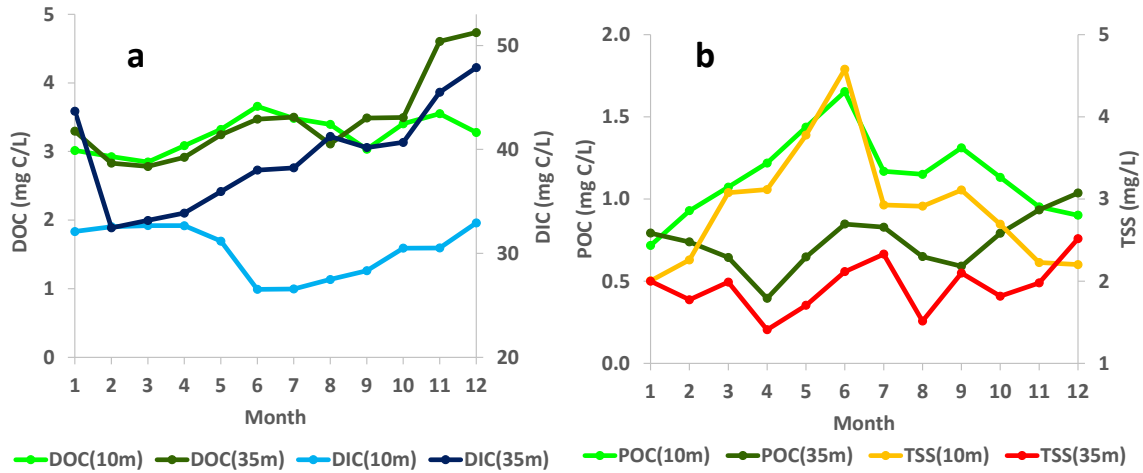
במהלך 2021 ריכזי ה-DOC החודשיים הממוצעים בעמודת המים של הכנרת היו 3.31 ± 0.31 מג"ל פחמן, 0.4 מג"ל פחות מאשר ב-2020, אך קרוב מאוד לממוצע הרב שנתי של העשור האחרון (3.35 מג"ל פחמן). כמו בשנים קודמות, גם השנה ערכי ה-DOC היו די קבועים לאורך עמודת המים, כפי שניתן לראות מהממוצעים החודשיים ממאי עד ספטמבר (איור 23). הפרופילים של ריכזי ה-DIC השתנו בין האביב לסתיו, כפי שכבר דווח בעבר, כאשר הריכזים בהיפולימניון עלו, בתקופת השיכוב התרמי, מ-30 ל-45 מג"ל כתוצאה מתהליכי שקיעה של חומר חלקיקי אורגני ואנאורגני המלווים בתהליכי המסה ומינרליזציה. העובדה שבשנת 2021 לא נצפו פריחות משמעותיות של פיטופלנקטון באה לידי ביטוי גם בערכים נמוכים של פחמן אורגני חלקיקי (POC), שנשארו מתחת ל-2 מג"ל במהלך כל השנה עם ממוצע שנתי של 0.89 מג"ל פחמן, המהווים 37.4% מכלל המוצקים המרחפים (TSS). את הפיזור האחיד של ריכזי הפחמן האורגני המומס בעמודת המים ניתן לראות גם על פי השינויים של הממוצעים החודשיים עם הזמן באפילימניון (10 מטר) ובהיפולימניון (35 מטר), (איור 24 a). עד אוקטובר ערכי ה-DOC באפילימניון ובהיפולימניון הראו מגמות וערכים דומים שנעו בין 3 ל-3.5 מג"ל. במהלך נובמבר - דצמבר ריכזי ה-DOC סמוך לקרקעית עלה בהדרגה עד ל-4.7 מג"ל פחמן.



איור 23: ממוצעים חודשיים של TSS, POC, DOC, ו-DIC בעמודת המים של הכנרת שנמדדו: a. במרץ 2021. b. באוגוסט 2021.

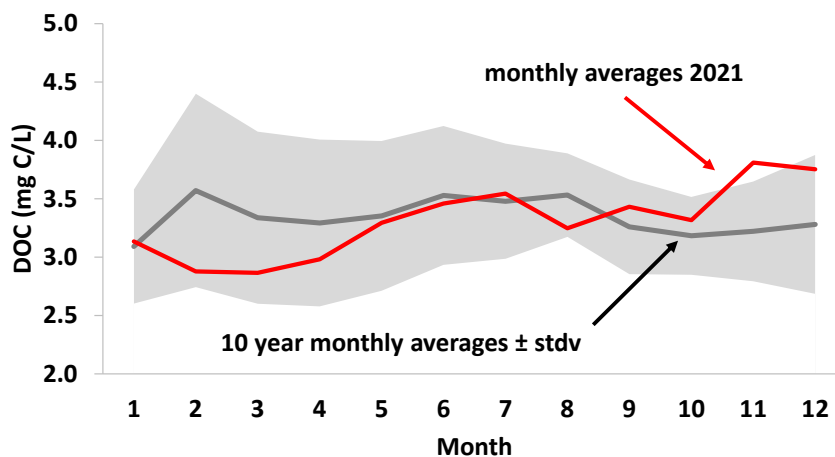
בניגוד ל-DOC, השינויים המרחביים, עם הזמן, של ריכזי הפחמן האנאורגני המומס (DIC) הראו הבדלים עונתיים כתלות בעומק, כאשר הריכזים האפילימנטיים נעו בין 27 ל-33 מג"ל פחמן ואילו הריכזים בהיפולימניון עלו בהדרגה והגיעו ל-48 מג"ל בסוף תקופת השיכוב. שינויים אלה הינם בקורולציה הפוכה

למגמות של ה- TSS וה- POC באפילימניון, שם שניהם הגיעו לשיא ביוני עם ערכים של 4.6 ו- 2.7 מג"ל בהתאמה, ולאחר מכן ירדו במהלך הקיץ והסתיו והגיעו לערכים של 2.2 ו- 0.9 מג"ל (איור 24 b). בהיפולימניון ריכחי ה- TSS וה- POC הראו שינויים קטנים בלבד שנעו בין 0.5 ל- 1 מג"ל ובין 1.5 ל- 2.5 מג"ל בהתאמה.



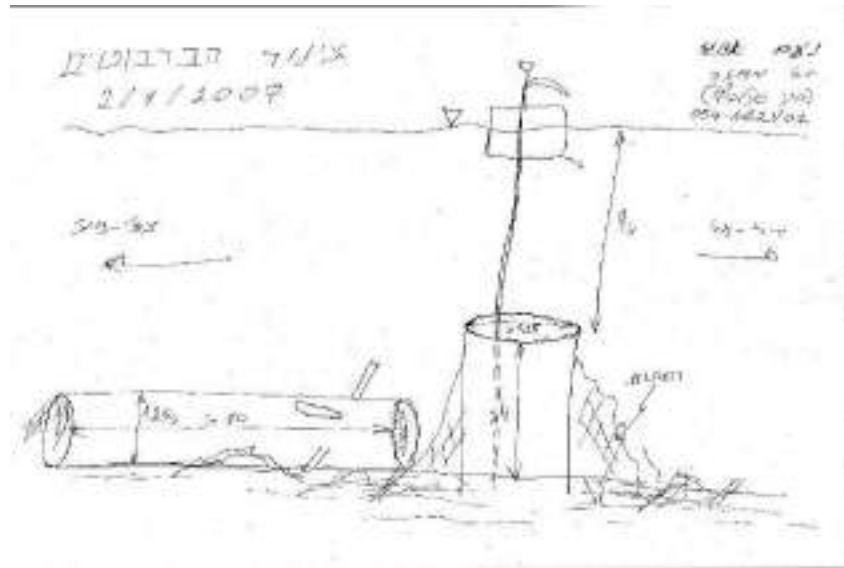
איור 24: שינוי עיתי בממוצעים חודשיים של: פחמן מומס אורגני ואנאורגני (a) ופחמן חלקיקי וחומר מרחף (b) במהלך 2021 בעומקים 10 ו-35 מטר.

בהשוואה למגמות הרב שנתיות, במהלך 2021, הממוצעים החודשיים של ריכחי ה- DOC בעמודת המים של הכנרת היו נמוכים יחסית והראו משרעת של 1 מג"ל בלבד מ- 2.8 בפברואר עד 3.8 מג"ל פחמן בנובמבר (איור 25). נתון זה תואם את העובדה ש- 2021 הייתה שנה עם פעילות נמוכה של פיטופלנקטון.



איור 25: ממוצעים חודשיים של ריכחי פחמן אורגני מומס בעמודת המים של תחנה A שבמרכז האגם ב- 2021 בהשוואה לערכי הממוצעים הרב שנתיים.

2.13 ניטור הברבטים



במימון
רשות
המים

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

- במהלך 2021 עלתה המוליכות החשמלית (קרי מליחות) בברבטים מ- 4,560 uS/cm בינואר ל-4,980 uS/cm בסוף מרץ. לאחר מכן ועד סוף דצמבר המליחות ירדה בהדרגה ל- 4,380 uS/cm.
- ריכוז הכלוריד המדוד השתנה בטווח שבין 1,425 מג"ל ועד 1,230 מג"ל עם מקסימום בשלהי החורף. מאידך ריכוז הניטרט השתנה בין 0.1 מג"ל בפברואר ועד למקסימום של 0.58 מג"ל בחודש מרץ.
- המגמות ארוכות הטווח בריכוז הכלוריד בברבטים מצביעות על ירידה חריפה מ- 2,549 מג"ל בינואר 2009 ל-786 מג"ל במרץ 2011 ולאחריה עליה ל-1,230 מג"ל בדצמבר 2011.
- המגמות ארוכות הטווח של הניטרט בברבטים הן של ירידה הדרגתית מריכוזים של כ- 1 מג"ל (כחנקן) בין 2009 לבין 2014 ועד לכ-0.3 מג"ל בהווה.
- קיימת מגמה עונתית במליחות של הברבטים. המליחות עולה בכל שנה בחורף וזאת בניגוד לנביעות היבשתייות הסמוכות שבאזור טבחה.
- החל מיוני 2021 מבוצעת מדידה רציפה ואוטומטית של מהירות הזרימה, והטמפרטורה והמוליכות החשמלית בצינור הברבטים.
- מהירות הזרימה בציר Z בין יוני לדצמבר 2021 נעה בין 0.5-4.5 ס"מ/שניה ועד - 0.5 ס"מ/לשניה. הטמפרטורה בתקופה זו נעה סביב $27.5^{\circ} C$.

מטרות הניטור

קביעת שטפי מים ומליחים מצינור הברבוטים לכנרת.
ניסיון לקביעת המנגנונים השולטים בשפיעת נביעה זו.

רקע

ניטור נביעת הברבוטים ע"י המעבדה לחקר הכנרת, היא"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 שאף הם הופסקו בנובמבר 2016. בשנת 2021, לאחר רכישת ציוד חדש חודשו מדידות אלה. הנחת הבסיס של עבודה זו הינה כי ריכוז המליחות משקף את היחס שבין תרומת הספיקה של המרכיב המלוח לבין המרכיבים המתוקים. כמו כן, ההנחה היא כי שינויים במליחות משקפים שינויים ביחסי תערובת זו. על סמך עבודות שבוצעו ע"י חוקרים שונים מליחות תמלחת הקצה באזור הכנרת אמורה להיות בסביבות 18,000 מג"ל אי לכך במליחות של לדוגמא כ-2000 מג"ל מי הנביעה המלוחה אמורים להכיל רק כ-11% מי תמלחת. מכאן, שכאשר מנטרים שינויים משמעותיים בספיקה הנמדדת במי צינור הברבוטים (לדוגמא אם בפרק זמן מסוים מהירות הזרימה בצינור גדלה פי 2) הם אינם יכולים להגרם ע"י שינויים בספיקת המרכיב המלוח בלבד והם חייבים לנבוע משינויים בספיקה של המרכיב המתוק ו/או של שני המרכיבים גם יחד. למרות זאת, ה"שליטה" בהרכב הכימי (major ion composition) של התערובת נובעת בדרך כלל ממרכיב הקצה המלוח. יונים שמתנהגים בדומה לכלוריד (או הנתרון) הם למשל הסידן, סטרונציום, אשלגן, מגנזיום, ברום וסולפט (ראה טבלה 4 בהמשך). בדרך כלל האינפורמציה שמתקבלת מהמידע הכימי היא די מוגבלת ורק מאפשרת להגדיר האם היחס בין ספיקות המרכיב המתוק למלוח השתנה. סיבוך נוסף שקיים במערכת נובע מכך שקיימים לפחות שני מרכיבי קצה מתוקים שתורמים לברבוטים ולכל אחד מהם יכולה להיות כימיה קצת שונה. ההגיון של ניטור ריכוזי הניטרט נובע מההנחה שאם אחד מאקוויפרים אלו הוא פריאטי הוא גם תורם ניטרט ואילו האקוויפרים הכלואים העמוקים אינם תורמים ניטרט. זאת מכיוון שמי גשם שנופלים באזור הכנרת מכילים קרוב ל-1 מג"ל חנקן ניטרטי ובסביבה המחומצנת הפריאטית של מי הגשם שמחלחלים מטה לא צפויה הרחקה של מרכיב חנקני זה עקב דניטריפיקציה. ההגיון בבדיקת המרכיב האיזוטופי של החמצן במים הוא קצת שונה. אנו מניחים שלתמלחות הרכב איזוטופי כבד יחסית (חמי טבריה למשל) של בערך 1 - עד 2- פרמיל (דיון במקום אחר) ואילו למים שנופלים על הר מירון ושכנראה מזינים את האקוויפרים המתוקים הכלואים $\delta^{18}\text{O}$ ערכים בתחום שקרובים ל-6 פרמיל. מאידך, לגשם המקומי שכנראה מזין את האקוויפרים הפריאטיים המקומיים (האאוקניים והבזלתיים) ערכים של סביב ל-5 פרמיל. לאורך כל תקופת הניטור (מסוף 2007 עד היום) מבוצע דיגום חודשי שלאחריו מבוצעת קביעה במעבדה של ריכוזי כלוריד, ניטרט, מוליכות חשמלית והרכב האיזוטופי של חמצן 18 במים. בשנים הראשונות ובשנת 2021 כלל ניטור זה גם קביעת ריכוזי מומסים עיקריים כגון סידן, מגנזיום, אלקליניות קרבונטית, נתרן, אשלגן סטרונציום ובריום. אנליזה של כלורידים ניטרט ואלקליניות מבוצעת במעבדה לחקר הכנרת, היא"ל, ואילו אנליזות לפרמטרים אחרים (קטיונים עיקריים והרכב איזוטופי) מבוצעים במכון הגאולוגי בירושלים. החל מיוני השנה חזרנו למדוד בצורה רציפה (תדירות פעם בשעה) את מהירות הזרימה בצינור, טמפרטורת המים וכן מוליכות חשמלית.

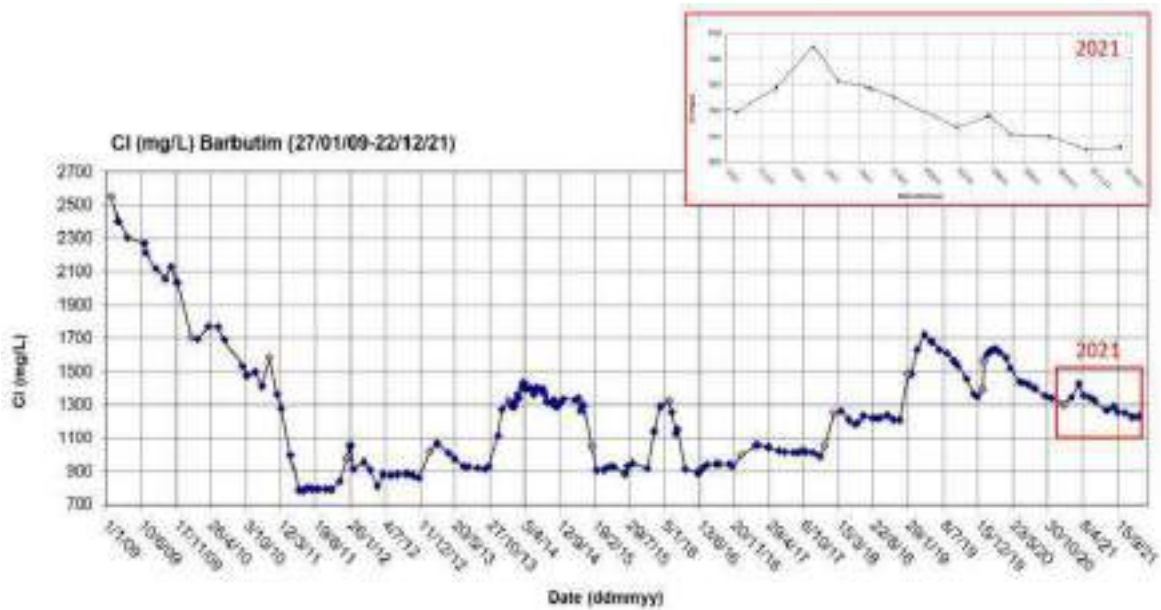
תוצאות ודיון

מגמות השנה האחרונה: בין ינואר לסוף מרץ 2021 עלו ריכחי הכלורידים בצינור הברבוטים מ-1,298 ל-1,425 מג"ל ולאחר מכן חלה ירידה מתונה עד 1,230 מג"ל בסוף דצמבר (איור 26). המוליכות החשמלית (איור 27) מצויה במתאם גבוה ($R^2=0.98$) עם ריכח הכלוריד והיא עוקבת אחרי המגמה שהתקבלה בכלוריד. המשמעות של ממצא זה היא שבניטור ה"מליחות" הרציף בברבוטים ניתן יהיה בעתיד להסתפק במדידת המוליכות, שהוא פרמטר קל למדידה in-situ ומדויק מאוד ("חזרתיות reproducibility" בסדר גודל של פרמיל בודד). החל מספטמבר 2021 נעשית מדידה רציפה (כל שעה) ואוטומטית של המוליכות החשמלית באמצעות סנסור ה-Manta. ריכחי הניטראט (איור 28) השתנו בין 0.58 מג"ל בחודש מרץ ועד 0.11 מג"ל בחודש יוני. לא נמצא מתאם בין ריכחי הניטראט לריכחי הכלוריד ו/או המוליכות החשמלית.

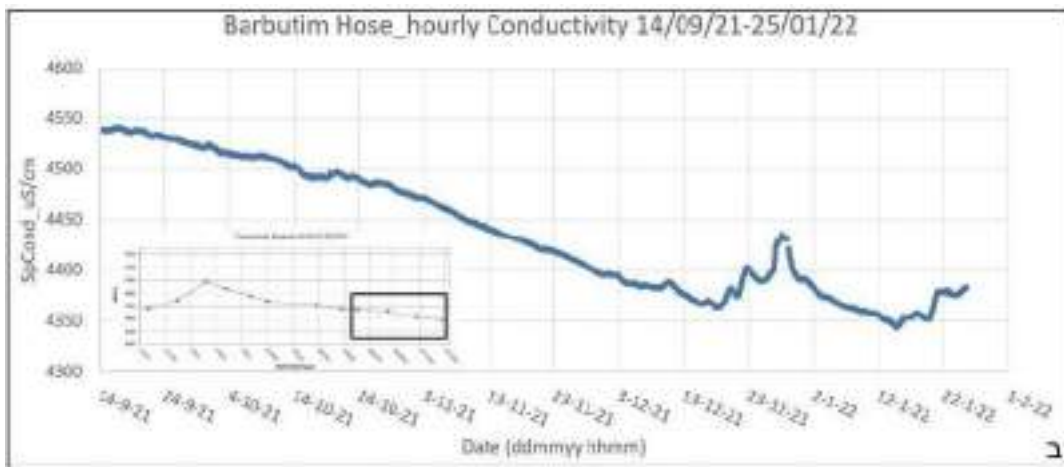
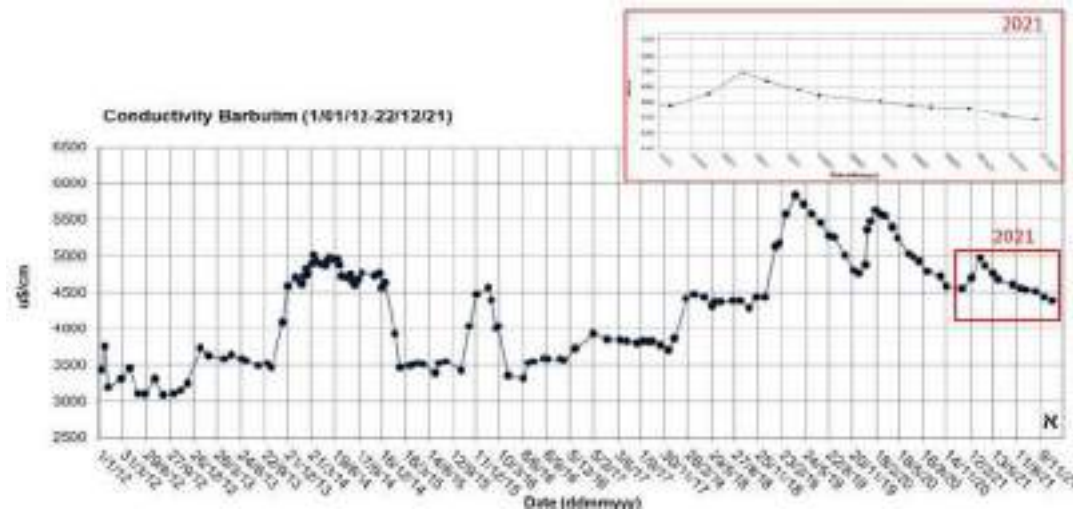
המגמות ארוכות הטווח מצביעות על כך שבין ינואר 2009 לבין סוף 2011 חלה ירידה חריפה בריכח הכלוריד מכ-2700 מג"ל עד ל-800 מג"ל. על בסיס ההנחה שריכח הכלוריד במרכיב הקצה המלוח הוא כ-18,000 מג"ל ניתן להעריך שריכח מרכיב זה ירד מכ-15% לכ-4.5% מהמים שבתערובת. בד בבד חלה הקלה איזוטופית ארוכת טווח של מבערך $\delta^{18}\text{H}_2\text{O} = -5.5\%$ לכמעט 9.5% . מכאן שהן המליחות והן ההרכב האיזוטופי מצביעים על האפשרות שבתקופה זו חלה ירידה בתרומה היחסית של מרכיב הקצה המלוח. מאידך, הירידה המתונה שחלה בתקופה זו בריכח הניטראט מכ-1.4 מג"ל לכ-1 מג"ל מצביעה על האפשרות של ירידה מקבילה בתרומת האקויפרים המתוקים הפריאטיים. משנת 2012 ועד לסוף 2021 חלו שינויים מסוימים במליחות הברבוטים כאשר בשנים האחרונות היא הגיעה לרמה של בין 1200 לבין 1500 מג"ל כלוריד. תוך כך ניתן להבחין בשינויים עונתיים ברורים של עליות חורפיות במליחות (עיגולים כתומים באיור 26) ולאחר מכן ירידות. בניגוד למליחות שבה ניכרת מגמת התייבבות מסוימת ריכחי הניטראט הולכים וקטנים (איור 28) עד לרמות אופייניות של 0.5 מג"ל. לדעתנו, ירידה זו משקפת השתתפות פחותה והולכת של האקוויפר האוקני הפריאטי בזרימות לנביעה בטבחה בד בבד עם עליה יחסית בספיקה שמוצאה באקוויפר חבורת יהודה העליונה אשר כלוא באזור זה. גם לספיקת המים מתכונת עונתית כאשר בחורף-אביב היא גדולה יותר מאשר בקיץ-סתיו.

מאפיין בולט של מהירות הזרימה בצינור הברבוטים הוא הוריאביליות הגדולה עם הזמן, הן בסקלות זמן שעתיות והן בטווחי זמן של שבועות. מהירות הזרימה השעתית במעלה הצינור החלה להימדד מיוני 2021 (איור 29). המהירות היומית הממוצעת נעה בין 0.5 - ס"מ/שניה ועד 4.5 ס"מ/שניה. מרבית היונים העיקריים, להוציא את הביקרבונט, מצביעים על עליה בריכח בין פברואר למרץ ולאחר מכן על ירידה הדרגתית (טבלה 4). הסיבה לכך היא שיונים אלה מהווים את התמלחת העמוקה שבאזור. באופן כללי ניתן לצפות לכך שהמרכיב המלוח במעיינות יהיה כבד יותר איזוטופית בצורה משמעותית מהמרכיבים המתוקים. למשל, להערכתנו מרכיב הקצה המלוח של מעינות פוליה הוא בסביבות (SMOW) 3.0% - ואילו המרכיבים המתוקים נוטים יותר לכיוון של 6% - . דהיינו, ניתן לשער שהתערובת תכביד מעט איזוטופית במקרה שהספיקה היחסית של מי המרכיב המלוח בתערובת תעלה (= המליחות תגבר). זוהי אחת משתי הסיבות לכך שאנו מנטרים $\delta^{18}\text{H}_2\text{O}$ במסגרת פרויקט זה (איור 30).

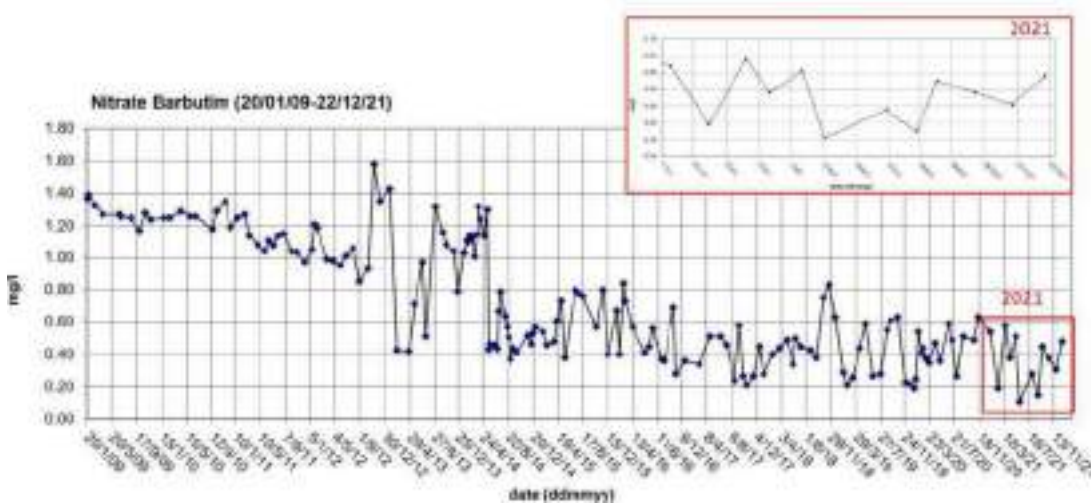
אולם, מאחר וניתן להעריך שהספיקה היחסית של המרכיב המלוח קטנה (בברבוטים אנו מעריכים שהיא בממוצע בסביבות 10% מהספיקה הכוללת) אנו מודעים לכך שקשה יהיה לזהות שינויים בספיקה היחסית של המרכיב המלוח באמצעות ניטור $\delta^{18}\text{H}_2\text{O}$. מעבר לזה גם השגיאה האנליטית (המכשירית) במדידת $\delta^{18}\text{H}_2\text{O}$ היא בס.ג. של 0.1% והו מרחב שגיאה שמכסה את רוב הדטה שמופיע באיור 30. למרות האמור לעיל נראה מאיור זה כאילו ישנן שתי מגמות בדטה האיזוטופי של שנת 2021, הראשונה מגמה חורפית-אביבית של הכבדה (אקווילונט של המלחה?) והשנייה מגמה קיצית של "הקלה".



איור 26: ריכוז כלוריד בברבוטים 2009-2021 (במג"ל). הגרף העליון מייצג את 2021 והעיגולים הכתומים מציינים את החודשים ינואר-פברואר.

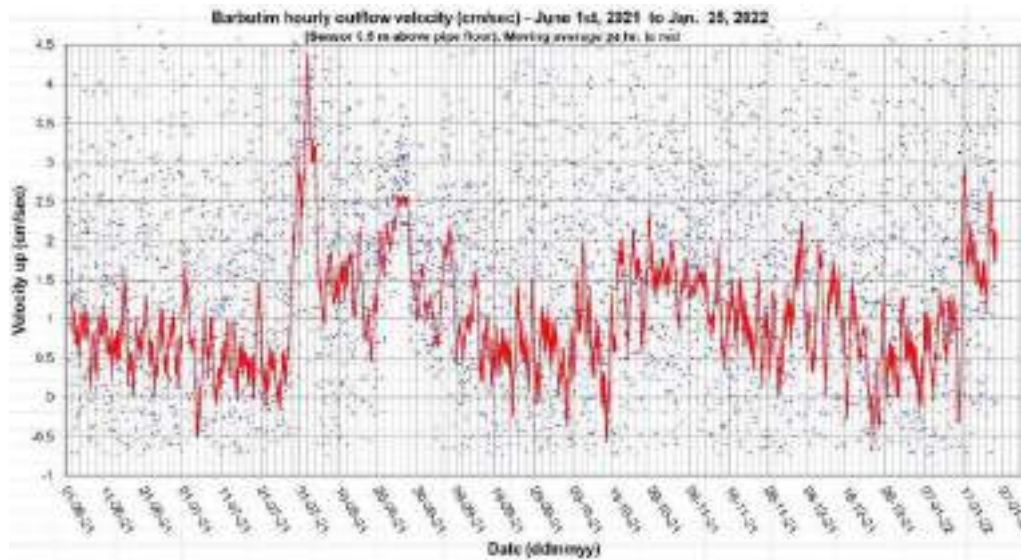


איור 27: א. המוליכות החשמלית בברבוטים 2009-2021 (במיקרו-סימנס לס"מ) כפי שנמדדה מאנליזות דיגום המים החודשי. בגרף העליון מוצגת המוליכות בשנת 2021 ו-ב. המוליכות החשמלית בברבוטים מספטמבר 2021 עד סוף ינואר 2022 כפי שנמדדה ברציפות (תדירות של שעה) באמצעות סנסור ה-Manta. בגרף הפנימי מוצגת המוליכות בשנת 2021.



איור 28: ריכח הניטרט בברבוטים 2019-2021 (במיליגרם חנקן לליטר). בגרף העליון מוצג ריכח הניטרט ב-2021.

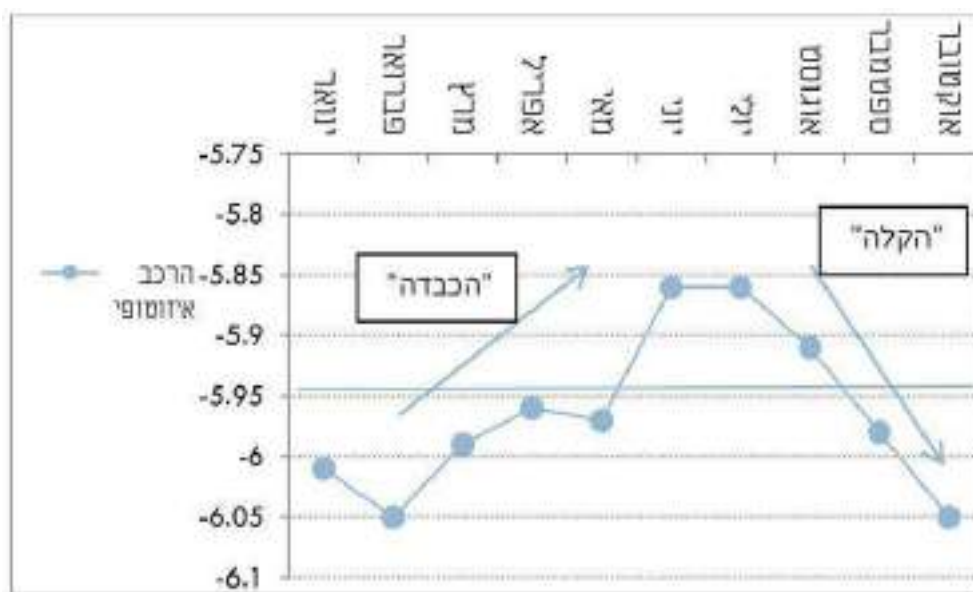




איור 29: מהירות שעתית בציר Z ("ספיקת מים") שנמדדה בבסיס צינור הברבוטים מיוני 2021 ועד ינואר 2022. נקודות כחולות מייצגות דיגום מידי שעה ואילו הקו האדום מייצג ממוצע רץ של 24 שעות.

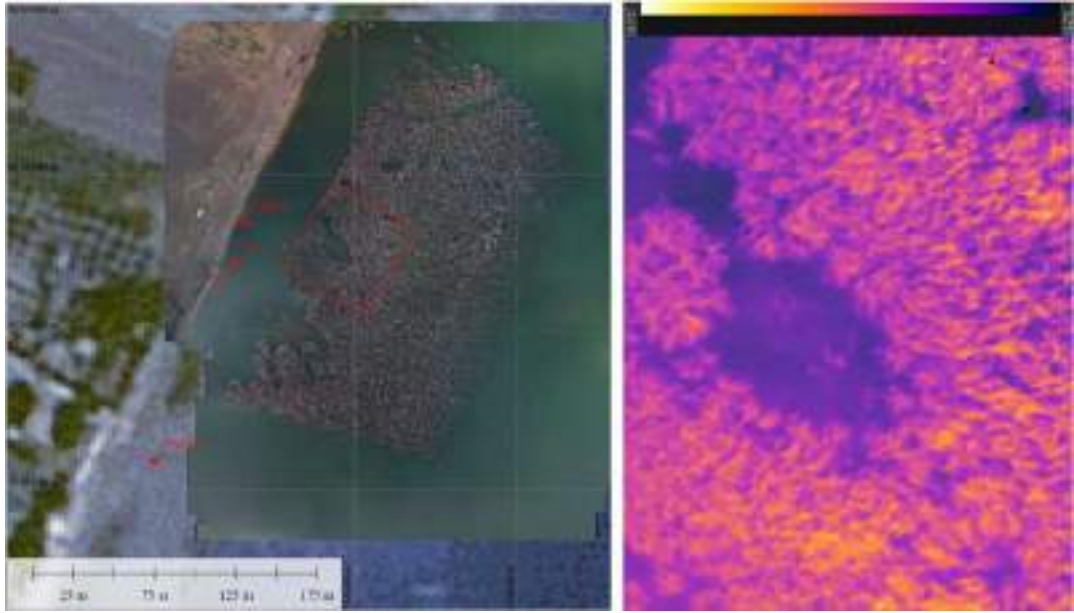
טבלה 4: אנליזות יונים עיקריים בשנת 2021. הערכים הם בריכחים של מג"ל.

Sample	SiO ₂	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Sr ⁺⁺	Cl ⁻	Br ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻
11.1.21	14	530	20	246	88	4.7	1,260	10.7	89	352
15.2.21	15	559	21	239	90	4.8	1,330	11.4	96	
21.3.21	15	599	22	269	93	5.1	1,400	11.8	104	370
12.4.21	14	578	21	265	91	4.9	1,350	11.2	99	378
12.5.21	15	563	21	261	91	4.8	1,330	11.1	97	378
1.6.21	14	565	21	261	90	4.8	1,320	10.9	95	377
28.7.21	15	542	21	257	89	4.7	1,280	10.5	93	379
26.8.21	15	541	20	257	89	4.7	1,280	10.7	93	379
14.9.21	15	534	20	256	88	4.6	1,270	10.4	91	379
19.10.21	15	510	19	245	85	4.5	1,255	10.5	88	375



איור 30: השתנות ההרכב האיזוטופי של H₂O¹⁸ במהלך 2021.

2.14 איתור נביעות מלוחות נוספות



**במימון
רשות
המים**

עמי נשרי, גדעון טיבור, ירון בארי-שלוין

- במהלך 2021 עובדו 10 צילומי לוויין מסוג Landsat 8 ומופו אנומליות תרמיות (SST) קרוב לחוף כאשר נמצאה התאמה לאנומליות שמופו מהלוויין בשנים הקודמות.
- נעשו שני סקרים תרמיים ברזולוציה גבוהה באמצעות רחפן באזור חמי טבריה, נמל טבריה וגינוסר.
- נתוני ה-CTD באזורי אנומליות אלו לא הצביעו על שפיעות מלוחות משמעותיות וממוקדות בקרקעית.
- במהלך 2021 ובתחילת 2022 נדגמו מספר בורות בסמוך לצינור הברבוטים שהצביעו על אנומליה חזקה בטמפרטורה ובמליחות קרוב לקרקעית.
- שטח הבור (מכתש 79) שנובע מים מליחים ונמצא צמוד לצינור הברבוטים הוא כ- 1,000 מ"ר, מכאן שהספיקה הנמדדת בצינור הברבוטים (שטח חתך של בערך 1 מ²) קטנה בהרבה מהספיקה ה"אמיתית" של האזור המכונה ברבוטים.

מטרות המחקר

לאפיין את ההרכב הכימי והאיזוטופי של המקורות המלוחים השאריטיים בקרקעית הכנרת. להגדיר לפי מיפויי "מולטיבים" של קרקעית הכנרת רשימת אתרים חשודים בכניסת תמלחות שאריות לכנרת (למשל: מכתשים פעילים).

למפות אנומליות תרמיות בפני המים (SST) של הכנרת תוך שימוש בצילומי לוויין מסוג Landsat 8 ובמצלמה תרמית המותקנת ברחפן כדי לזהות ולוודא אתרים חשודים.

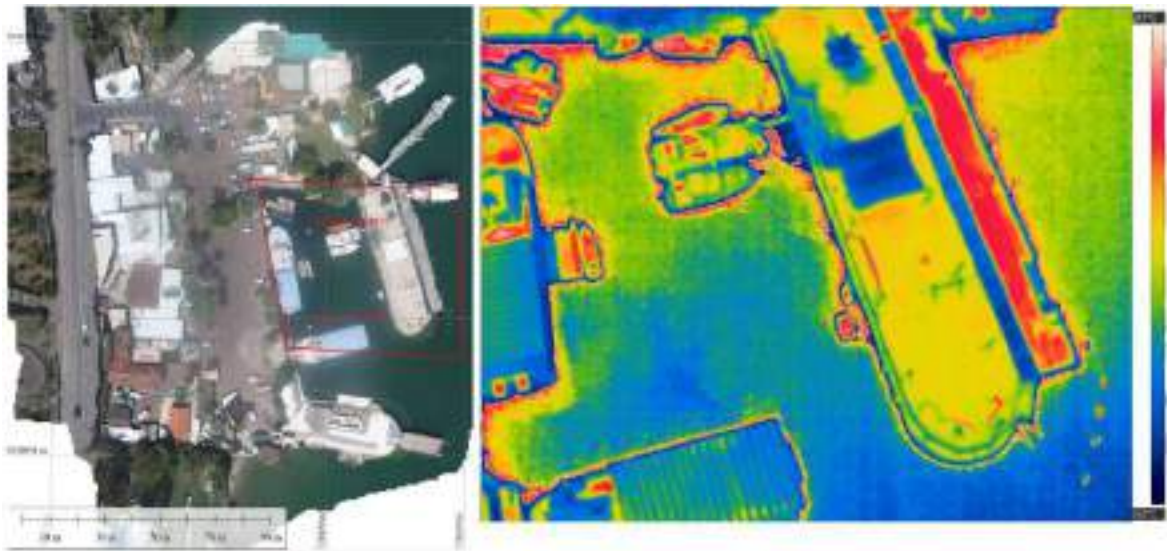
לבחון באמצעות דיגום ואנליזה כימית- איזוטופית "אתרים חשודים" אלו כדי לבחון האם הרכב המים הדולף/נובע באתר זה מתאים לתמלחות השאריות העיקריות של הכנרת.

רקע

בעיית המלחת הכנרת מעסיקה את מנהלי משק המים כבר שנים רבות. אחת ההשפעות הברורות של שנות בצורת, המלוות גם בירידה משמעותית בשאיבות מהכנרת, היא החרפה משמעותית בהמלחת הכנרת. מגמות אלו צפויות להימשך 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) שלוש הרבעים הנוותרים, להלן התמלחות השאריות, 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 תרמית). 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 תרמיות 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 כלל ארבעה שלבים: א) אפיון כימי איזוטופי של המערכת הכללית של הכנרת, ב) בניית מאגר אתרים חשודים לנביעה מלוחה בכנרת, ג) מיפוי אנומליות תרמיות בפני מי הכנרת ו-ד) אפיון וסימון אתרים על סמך הרכב כימי ואיזוטופי של מים שנובעים באתרים אלו. במהלך 2021 ותחילת 2022 בוצעו סקרים ועיבודים שכללו את שלבים ג ו-ד במחקר.

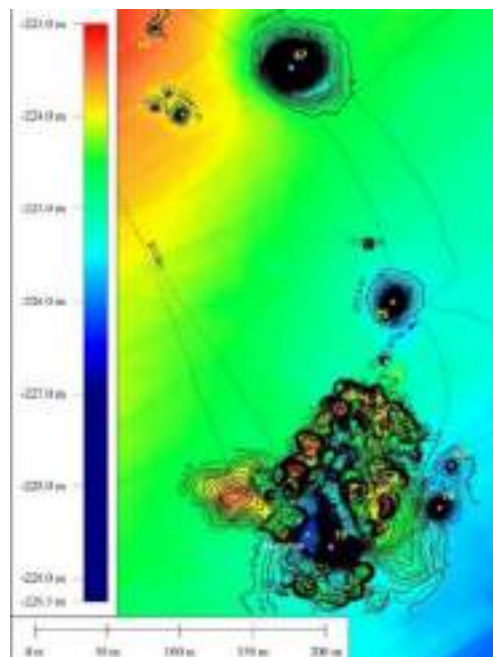
תוצאות ודיון

שלב ג: מיפוי אנומליות תרמיות במי הכנרת תוך שימוש בצילומי לוויין ובמצלמה תרמית על רחפן כלל עיבוד של 10 צילומי לוויין מסוג Landsat 8 שבהם מופו אנומליות תרמיות בסמוך לחוף באותם מיקומים שהתגלו בשנים הקודמות. במהלך 2021 בוצעו שני סקרים תרמים באמצעות רחפן באזורי האנומליות שהתגלו בלוויין בחמי טבריה ואזור גינוסר בתאריך 8.03.21 (ראה תמונה בתחילת הפרק) ונמל טבריה בתאריך 21.04.21 (איור 31). הסקרים כללו מיפוי תרמי מרחפן, דיגום CTD ומדידת מוליכות חשמלית של דגימות מים בסמוך לקרקעית. בכל האתרים שנדגמו הייתה עליה בטמפרטורה ובמוליכות אבל לא התגלו מקורות משמעותיים וממוקדים של נביעות מלוחות ולכן הם לא נשלחו לאנליזה איזוטופית.

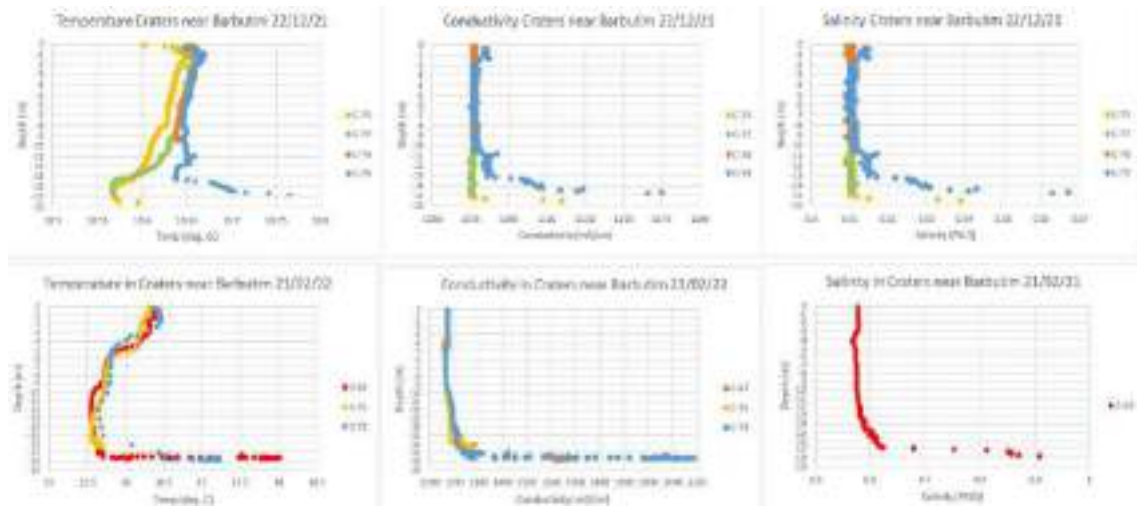


איור 31: צילום מרחפן של נמל טבריה בתאריך 21.04.21. בצד שמאל ניתן לראות את הצילום (אורתופוטו) מהרחפן באור הנראה ואת מיקום תחנות דיגום ה-CTD והמים. הפוליוגון האדום מראה את גבולות הצילום התרמי מהרחפן (בצד ימין). למעט אזורים חמים (גוונים אדומים) ביבשה ובסירות העוגנות בנמל ניתן להבחין במים שבחלק הצפוני מערבי של הנמל באנומליה חמה. מעדויות אנשי הנמל בתקופה של מפלס נמוך בחלק זה של הנמל יש נביעה של מים חמים.

שלב ד: איתור, אפיון וסימון נביעות מלוחות לא מוכרות על סמך הרכב כימי ואיזוטופי של מים שנובעים מהם. במהלך 2021 ו-2022 נדגמו בורות חשודים באזור נביעת צינור הברבוטים (איור 32). הדיגום כלל ביצוע פרופילים מוליכות חשמלית, טמפרטורה ומליחות באמצעות CTD ו-Manta ולקיחת דיגומי מים מהקרקעית. תוצאות הדיגום של בורות 67, 75, 77, 78, ו-79 מצביעות על אנומליה במליחות, מוליכות חשמלית וטמפרטורה רק בבורות 67, 79 ו-75 (איור 33). דיגומי מים מקרקעית בורות אלו נשלחה לאנליזה איזוטופית במכון הגיאולוגי.



איור 32: מפה בתימטרית של האזור הסמוך לצינור הברבוטים המתבססת על מיפוי מולטיבים שבוצע ב-2019 (צפון בצד ימין). מיקומי הבורות וצינור הברבוטים מסומנים בצלב אדום ומספריהם מופיעים בצהוב. הקונטורים של עומק הבורות באינטרוול של 20 ס"מ מסומנים בקווים שחורים. הבורות שבהם הטמפרטורה, המוליכות החשמלית והמליחות נמצאה גבוהה מהסביבה הם: 67 (בצפון), 75 ו-79 הנמצאים בסמוך לצינור הברבוטים.



איור 33: פרופילי טמפרטורה, מוליכות חשמלית ומליחות (משמאל-לימין) של הבורות באזור צינור הברבוטים (ראה מיקום באיור 32) שנדגמו באמצעות CTD ומנטה-22 בדצמבר 2021 וב-21 לפברואר 2022. הבורות שבהם הטמפרטורה, המוליכות החשמלית והמליחות גבוהה מהסביבה הם: 67 (אדום), 75 (כתום) ו-79 (כחול).

פרופיל המליחות בבור 79 קרוב לצינור הברבוטים מצביע על המלחה בקרבת הקרקעית. על סמך הבתימטריה (מיפוי מולטי בים), אנו מעריכים ששטח הבור (מכתש) שנובע מים מליחים הוא קרוב ל-1000 מ². מכאן שהספיקה הנמדדת בצינור הברבוטים (שטח חתך של בערך 1 מ²) קטנה בהרבה מהספיקה ה"אמיתית" של האזור המכונה ברבוטים ולכן מדידות מהירות הזרימה (הספיקה) שמבוצעות בצינור הברבוטים (ראה פרק מס' 2.13 - ניטור הברבוטים) מהוות קנה מידה לשינויים בספיקה ולא לערכה האבסולוטי.

2.15 כלורופיל וייצור ראשוני



במימון
רשות
המים

ורנר אקרט, רות נ. קפלן- לוי, דוד קמינגס

- 2021 הייתה שנה נטולת פריחות משמעותיות.
- רמות הכלורופיל היו נמוכות רוב השנה.
- הייצור הראשוני התאפיין השנה בעקומה שטוחה יחסית, ללא הבדלים גדולים בין שני חצאי השנה.

מטרת המחקר

מעקב רב שנתי אחר ריכחי הכלורופיל וקצבי הייצור הראשוני במרכז הכנרת.

רקע

ריכח כלורופיל וקצב היצרנות הראשונית באגם הינם מדדים בסיסיים חשובים ביותר למעקב אחר התהליכים המתרחשים בו. פרמטרים אלו מהווים מדדים לביומסה וקצב פעילות בבסיס מארג המזון ושינויים בהם עשויים להצביע על שינויים מרחיקי לכת בתפקוד המערכת האקולוגית.

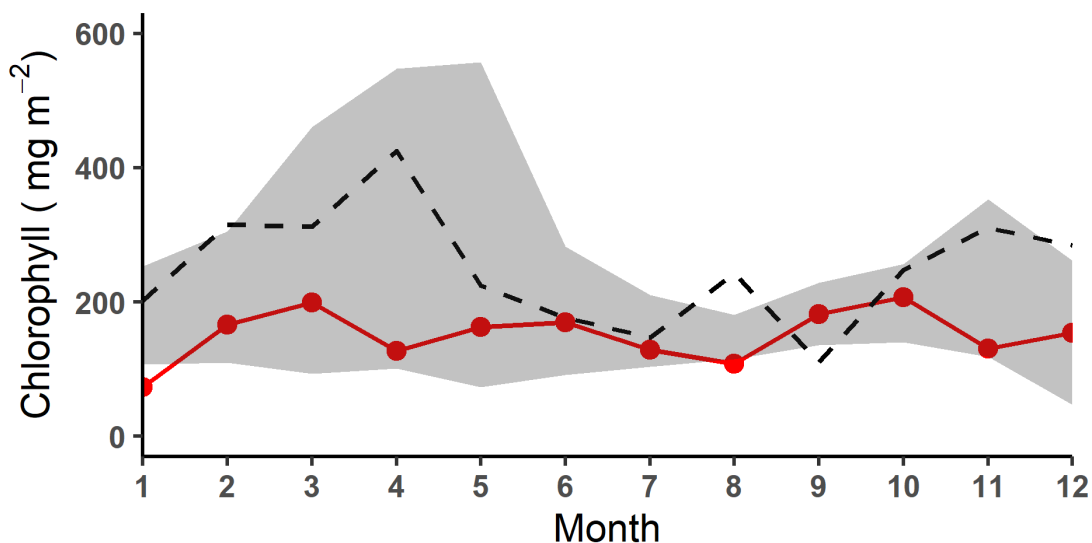
ריכחי הכלורופיל וקצבי הייצור הראשוני מנוטרים בכנרת מאז 1969 (כלורופיל) או 1971 (ייצור ראשוני). בשנות השבעים והשמונים שני פרמטרים אלו התנהגו לפי דגם שנתי טיפוסי שכלל שיא אביבי (אפריל-מאי) בזמן פריחת הפרדיניום, בעוד שבמחצית השנה השנייה נרשמו בדרך כלל ערכים נמוכים. דגם זה השתנה עם העלמות פריחות הפרדיניום, בעשור האחרון עקומת הפרודוקטיביות השתטחה בעוד שעקומת הביומסה מראה שיא סתווי בנוסף לשיא האביבי.

שיטות

מים למדידת ריכחי כלורופיל וייצור ראשוני נדגמים אחת לשבועיים בתחנה A, בעומקים 0, 1, 2, 3, 5, 7, 10 ו-15 מ'. עבור כלורופיל בלבד, נדגמים בנוסף מים מעומק התרמוקלינה בתקופת השיכוב ומעומקים 20, 30, 35 מ' כשהאגם לא משוכב. כלורופיל נמדד בשיטת Holm-Hansen et al 1965 לאחר מיצוי באצטון 90% לכ-18 שעות. ייצור ראשוני נמדד בשיטת הפחמן המסומן רדיואקטיבית לפי Steeman-Nielsen 1952 לאחר אינקובציה של 2-3 שעות in-situ בעומקי הדיגום.

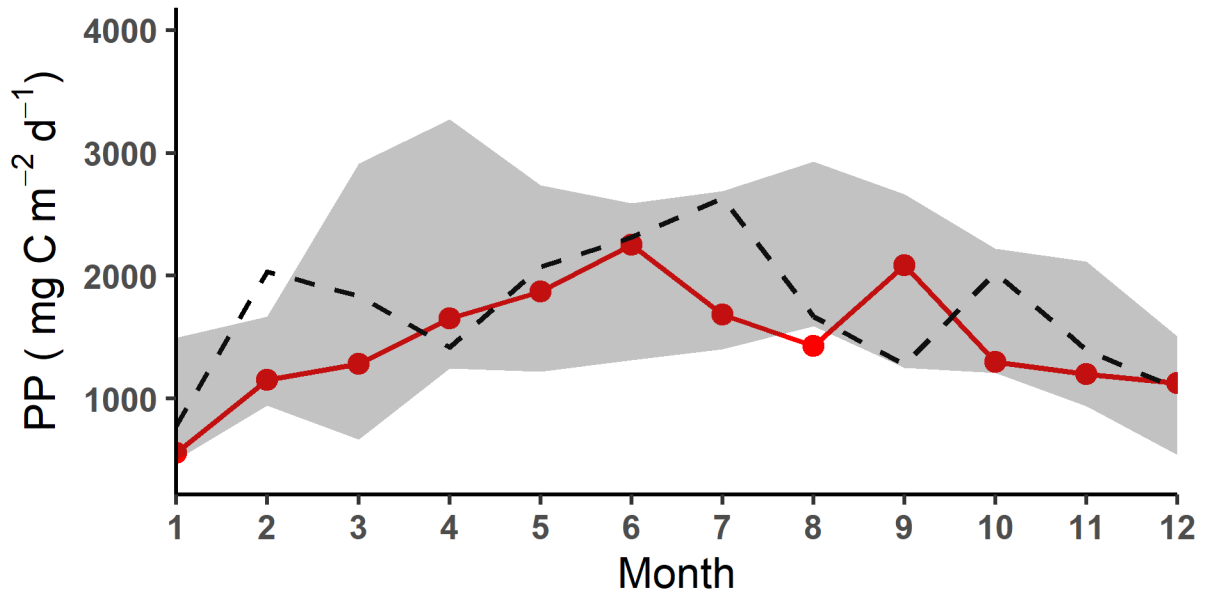
תוצאות ודיון

שנת 2021 הייתה שנה נטולת פריחות משמעותיות גם בתקופת האביב וגם בסתיו. ריכחי הכלורופיל נותרו נמוכים לעומת הממוצע וסטיית התקן הרב שנתית לאורך כל השנה (איור 34). ברוב שנת 2021 הממוצעים החודשיים של ריכחי כלורופיל נפלו בתוך טווח סטיות התקן של ערכי הכלורופיל בעשור האחרון, למעט ריכחים נמוכים במיוחד בחודשים ינואר ואוגוסט (איור 34). באופן בולט, הדגם השנתי ב-2021 היה שונה מאד מהדגם השנתי ב-2020, שנה בה הייתה פריחת פרדיניום משמעותית.

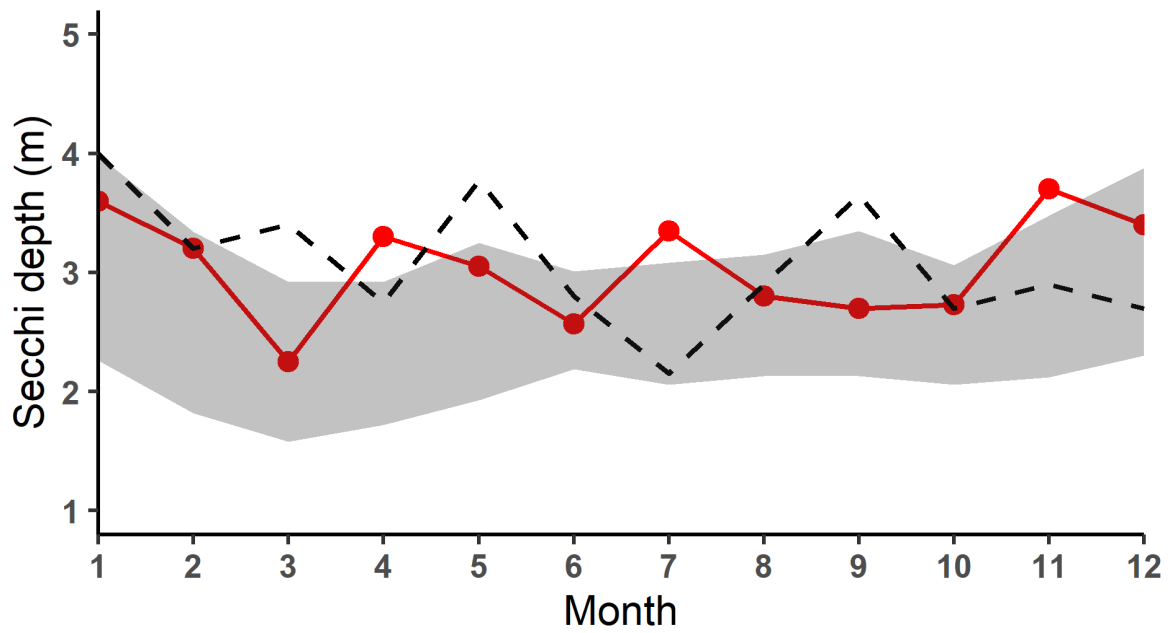


איור 34: המהלך השנתי של הממוצעים החודשיים של ריכחי כלורופיל ב-2021 (קו אדום) בהשוואה ל-2020 (קו שחור מקווקו) ולסטיות התקן סביב הממוצע לעשור 2010-2019 (ענן אפור). הערכים מוצגים ליחידת שטח, לאחר אינטגרציה לאורך 15 המטר העליונים של עמודת המים.

מבחינת קצבי הייצור הראשוני (איור 35), ב-2021 ראינו שוב את התופעה האופיינית לעשור האחרון של "יישור העקומה", כלומר ערכי ייצור ראשוני דומים באביב ובסתיו. היצרנות הראשונית באביב הייתה נמוכה ביחס לממוצע הרב שנתי וכך גם ערכי הכלורופיל (איורים 34, 35). חודש אוגוסט התאפיין ברמה נמוכה במיוחד של קיבוע פחמן אשר מתאימה גם לרמות נמוכות של כלורופיל באותו חודש (איור 34, 35). ערכי עומק הסקי היו אופייניים ודומים לערכים הרב שנתיים (איור 36).



איור 35: כמו איור 34 עבור קצבי יצור ראשוני.



איור 36: כמו איור 34 עבור עומק סקי בתחנה A.

2.16 ייצור שניוני חיידקי



במימון
רשות
המים

חמי רושנסקי, שירה ניניו

- הפעילות החיידקית ההטרורופית השנתית שנמדדה בשנת 2021 באזור הפוטי הייתה דומה לזו שנמדדה ב- 2020.
- ערכי שיא שנתיים נרשמו בחודשים יוני וספטמבר, כשהראשון מבטא את תהליכי הפירוק של פריחת הדינופלגלטים והכלורופיטה באגם והשיא השני מבטא את פירוק הציאנופיטה והכלורופיטה.
- גם השנה נמשכה המגמה של פעילות חיידקית גבוהה יחסית הנמדדת בשנים האחרונות.

רקע

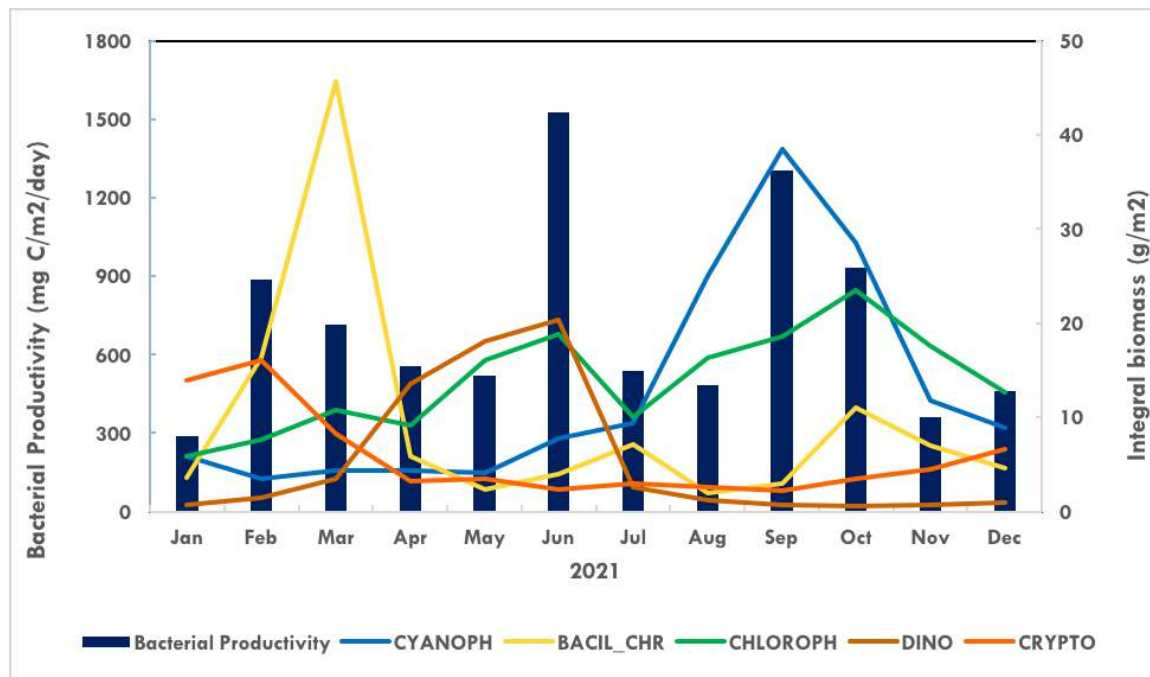
חיידקים הטרורופיים הם מרכיב חשוב במארג המזון, עם תפקיד מרכזי בפירוק חומר אורגני ומיחזור נוטריינטים. החיידקים מגיבים מהר לשינויים באגם כולל פריחות של אצות או עליה אחרת בביומסה. התחקות אחר פעילות חיידקית מאפשרת קבלת תמונה של פיזור תהליך הפירוק של חומר אורגני באגם בזמן. מעקב שגרתי אחר פרמטר זה חשוב בכדי 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-2021 בתדירות של פעם בחודש.

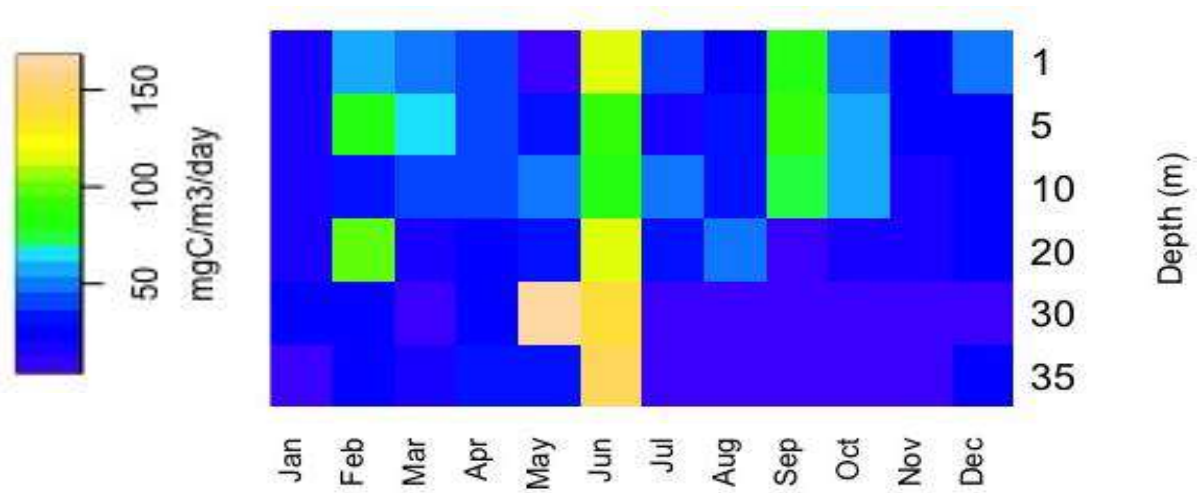
תוצאות ודיון

הייצור החיידקי הכולל שנמדד ב- 2021 היה דומה לזה שנמדד ב- 2020, אך הראה דינמיקה שונה במקצת. באזור הפוטי נמדדו ערכי שיא שנתיים של מעל 800 מג' פחמן למ"ר ליום בחודשים שונים לאורך השנה (איור 37) ולא בגל בודד. הפעילות המרבית נמדדה ביוני והייתה גבוהה ב- 30% מהערך המרבי שנמצא ביוני 2020 (1527 ו- 1170 מג' פחמן למ"ר ליום, בהתאמה). הנתונים מצביעים על פעילות של חיידקים הטרוטרופים באזור הפוטי המלווה את תהליך הקריסה של פריחת הדינופלגלטים והכלורופיטה ביוני ואת פריחת הציאנופיטה והכלורופיטה בספט' - אוקט' (איור 37). הפעילות באוקט' הייתה דומה לזו שנמדדה ב- 2020 (סביב ה- 950 מג' פחמן למ"ר ליום). בנוסף נרשמה פעילות באזור הפוטי לאורך רוב השנה ללא תלות בפריחה של אצה מסוימת.



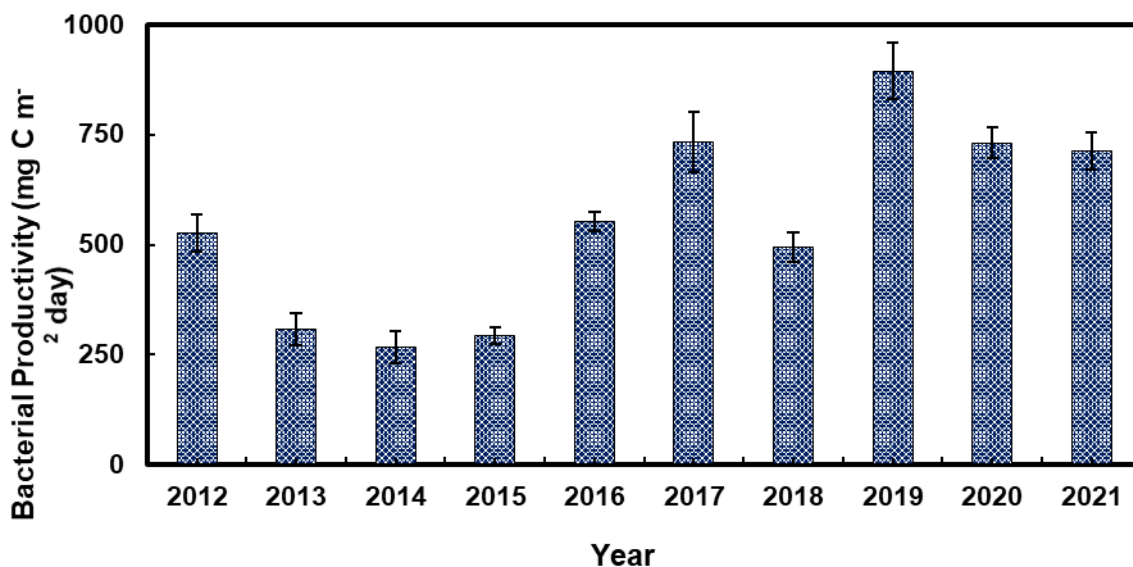
איור 37: ביומסה של פיטופלנקטון וייצור חיידקי (מג' פחמן/מ"ר/יום) בעמודת המים האפילימנטית ב- 2021. הערכים מייצגים אינטגרציה של ערכים שנמדדו לאורך עמודת המים בעומקים 1-15 מטר.

ניתוח הפיזור האנכי של הפעילות החיידקית מראה שעם קריסת פריחת הדינופלגלטים והכלורופיטה בחדש יוני, נמדדה פעילות חיידקית גבוהה בעומק 20 מ' שהגיעה לשיא ב- 35 מ' (117 ו- 147 מג' פחמן למ"ר ליום, בהתאמה). פעילות זו משקפת ככל הנראה תהליכי פירוק ביומסה שוקעת של הפריחה, בשילוב עם תהליכי דניטריפיקציה הטיפוסיים לעונה זו באגם (איור 38).



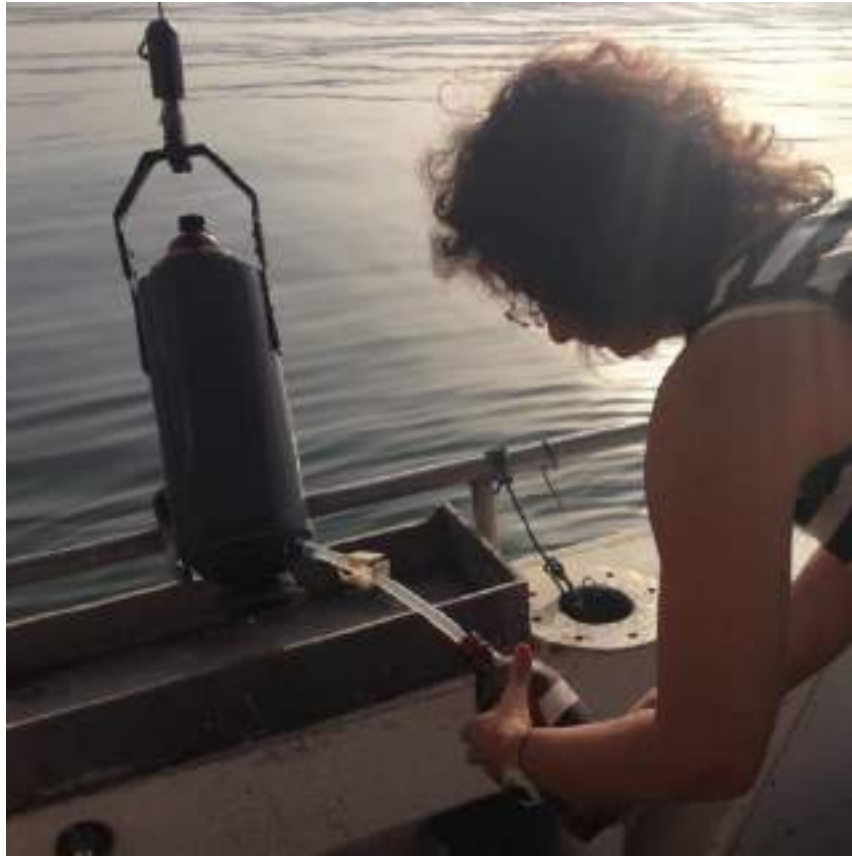
איור 38: מפת חום המייצגת את הפיזור האנכי של היצרנות החיידקית בעמודת המים מ-1-35 מ' בשנת 2021. הגוון מייצג את קצב היצרנות שנמדד ביחידות מג' פחמן/מ³/יום, על פי הסרגל שמשמאל.

סך כל הייצור החיידקי שנמדד ב-2021 היה דומה לזה שנמדד ב-2020, וממשיך את המגמה של פעילות חיידקית גבוהה מאז 2016, לעומת הפעילות הנמוכה יחסית שנמדדה בשנים 2013-2015 (איור 39).



איור 39: היצרנות החיידקית (מג' פחמן למ"ר ליום) בעמודת המים מ-1-15 מ' משנת 2012.

2.17 חיידקים אינדיקטורים לזיהום צואתי



**במימון
רשות
המים**

עכסה לופו, חמי רושנסקי, שירה ניניו

- **שנת 2021 התבלטה בריכוזים נמוכים יחסית של חיידקים אינדיקטורים לצואה, כולל בתקופת החורף.**
- **מול כניסת צינור ההטייה של הירמוך נרשמה חריגה בריכוז האנתרוקוקים בחודש פברואר.**

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 והשפעתו על האגם כגוף מים טבעי וכמקור למי שתיה ונופש. לצורך ניטור זה נדגמים מים בתחנות ייעודיות אחת לחודש.

תוצאות הבדיקות מוצגות ב - 15 אתרים סביב הכנרת הכוללים:

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

שיטות

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

תוצאות ודין

בשנת 2021 נרשמו ריכחים נמוכים של חיידקים אינדיקטורים לצואה בכנרת. הספירות הגבוהות ביותר של קוליפורמים צואתיים היו מול שפך הירדן עם 225 ל- 100 מל' בחודש פברואר. בתקופה זו של השנה נובע הזיהום מזרימות שיטפוניות באגן ההיקוות הכוללות גם נגר עילי, וכשהשיטפונות מועטים גם הזיהום הנלווה נמוך. מול צינור הטיית הירמוך בדרום הכנרת נרשמה חריגה בחודש פברואר בריכח האנתרוקוקים שעמד על 124 ל- 100 מל', ככל הנראה כתוצאה מהזרמה פעילה בצינור ההטייה בתקופה זו. (טבלה 5).

טבלה 5 : תוצאות ספירות אינדיקטורים חיידקיים לזיהום צואתי (מספר חיידקים ב- 100 מ"ל מים) בתחנות שונות ב- 2021. תקן מי שתיה מחייב 0 חיידקי צואה ל- 100 מ"ל, ובחופי רחצה מותרים קוליפורמים צואתיים (Fecal coliforms) עד 400 ל- 100 מ"ל ואנטרוקוקים עד 105 ל- 100 מ"ל.

Bacteria 2021			
STATION:JORDAN			
	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	5	4	6
Feb.	225	119	60
Mar.	18	15	19
Apr.	15	16	7
May.	2	0	5
Jun.	29	21	5
Jul.	20	11	2
Aug.	8	7	4
Sep.	13	3	3
Oct.	23	14	25
Nov.	17	14	17
Dec.	62	37	43

STATION:TIBERIAS INTAKE			
	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	13	12	10
Feb.	1	3	3
Mar.	3	4	0
Apr.	8	3	2
May.	6	2	1
Jun.	8	7	2
Jul.	6	3	1
Aug.	0	0	0
Sep.	12	3	1
Oct.	10	9	0
Nov.	9	4	3
Dec.	9	7	5

STATION:WATERCARRIER INTAKE			
	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	3	1	3
Feb.	28	20	7
Mar.	1	0	5
Apr.	4	0	1
May.	10	10	1
Jun.	4	0	4
Jul.	4	84	4
Aug.	2	2	1
Sep.	1	1	0
Oct.	10	9	1
Nov.	4	5	0
Dec.	4	2	9

STATION:JORDAN VALLEY INTAKE			
	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	2	2	6
Feb.	1	5	4
Mar.	6	3	7
Apr.	5	1	2
May.	1	0	3
Jun.	2	0	1
Jul.	1	0	0
Aug.	1	0	0
Sep.	4	1	0
Oct.	6	3	0
Nov.	3	1	0
Dec.	11	9	5

STATION:GOLAN INTAKE			
	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	2	1	55
Feb.	22	18	66
Mar.	14	1	3
Apr.	2	1	0
May.	7	1	2
Jun.	7	0	8
Jul.	5	6	10
Aug.	9	2	1
Sep.	61	10	7
Oct.	31	7	2
Nov.	20	13	4
Dec.	1	2	0

STATION:KURSY			
	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	1	0	1
Feb.	5	7	2
Mar.	16	9	14
Apr.	8	10	13
May.	4	2	3
Jun.	4	1	0
Jul.	0	161	2
Aug.	23	9	5
Sep.	0	1	1
Oct.	16	1	4
Nov.	15	4	7
Dec.	8	3	3

STATION:AMNUN			
	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	8	12	7
Feb.	2	4	1
Mar.	19	9	3
Apr.	9	7	1
May.	2	5	5
Jun.	5	0	20
Jul.	2	3	5
Aug.	7	5	2
Sep.	54	9	2
Oct.	12	2	2
Nov.	3	0	1
Dec.	3	1	2

STATION:MASUDIA			
	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	2	0	2
Feb.	8	8	2
Mar.	22	18	17
Apr.	0	0	0
May.	2	5	2
Jun.	14	12	4
Jul.	48	42	5
Aug.	12	9	7
Sep.	0	0	0
Oct.	17	5	1
Nov.	3	1	1
Dec.	15	6	8

STATION: DUGIT

	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	0	1	3
Feb.	32	23	10
Mar.	4	6	1
Apr.	3	3	2
May.	14	11	1
Jun.	5	1	3
Jul.	3	4	0
Aug.	32	12	5
Sep.	4	1	0
Oct.	28	7	9
Nov.	1	2	2
Dec.	76	26	36

STATION:MAAGAN

	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	0	1	3
Feb.	2	2	4
Mar.	5	3	1
Apr.	2	2	4
May.	0	0	1
Jun.	1	0	0
Jul.	18	0	1
Aug.	8	1	1
Sep.	1	0	0
Oct.	9	8	1
Nov.	11	0	1
Dec.	34	13	43

STATION:ZACHI

	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	2	1	7
Feb.	26	24	14
Mar.	9	5	43
Apr.	0	1	0
May.	3	1	5
Jun.	1	0	1
Jul.	1	0	2
Aug.	2	0	1
Sep.	0	0	0
Oct.	6	3	4
Nov.	6	3	5
Dec.	10	9	8

STATION:ALUMOT

	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	9	11	15
Feb.	0	3	3
Mar.	2	0	0
Apr.	6	2	4
May.	6	4	3
Jun.	1	1	1
Jul.	3	0	0
Aug.	5	1	1
Sep.	4	0	0
Oct.	10	13	4
Nov.	9	3	0
Dec.	8	7	8

STATION:AMUD

	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	2	1	1
Feb.	0	0	6
Mar.	2	0	1
Apr.	2	0	4
May.	0	0	1
Jun.	4	2	5
Jul.	8	0	0
Aug.	6	3	3
Sep.	1	0	0
Oct.	0	1	0
Nov.	6	1	1
Dec.	18	3	7

STATION:YARMUCH

	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	10	12	43
Feb.	21	4	124
Mar.	57	46	26
Apr.	3	3	5
May.	1	4	1
Jun.	1	0	0
Jul.	5	2	0
Aug.	7	4	2
Sep.	3	0	0
Oct.	2	8	2
Nov.	7	0	1
Dec.	32	15	26

TABLE 15 STATION: TZALMON

	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	3	1	0
Feb.	5	1	2
Mar.	0	0	1
Apr.	19	13	13
May.	1	2	3
Jun.	0	0	0
Jul.	6	0	0
Aug.	40	0	4
Sep.	2	0	0
Oct.	0	0	0
Nov.	4	2	0
Dec.	16	2	9

2.18 ניטור פיטופלנקטון



צילינדרוספרמופסיס (ציאנובקטריה חוטית) במופע סלילני, שהופיעה בריכחים גבוהים מבעבר בסתיו 2021. צילמה: אלה אלסטר.

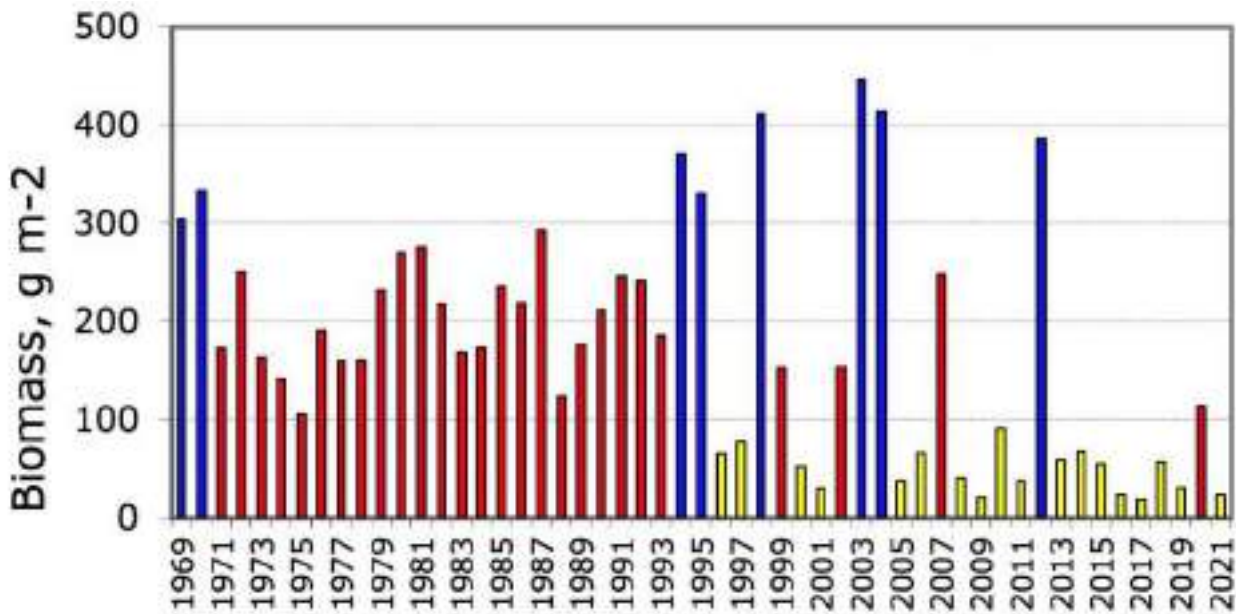
במימון
רשות
המים

תמר זהרי, אלה אלסטר

- בשנת 2021 שוב לא התפתחה פריחת פרידיניום. מאז 1996 היו 18 שנים ללא פריחת פרידיניום ורק 8 שנים עם פריחה.
- בהעדר פריחת פרידיניום הביומסה האצתית במים הייתה נמוכה לאורך כל השנה וללא כל שיא עונתי.

2021 - שנה נוספת ללא פריחת פרידיניום

בשנת 2021 שוב לא התפתחה פריחת פרידיניום אביבית (איור 40). זאת אחרי ששנת 2020 הייתה "שנת פרידיניום" טיפוסית, כלומר שנה שבה הממוצע החודשי של ביומסת הפרידיניום באחד מחודשי האביב עבר את ערך הסף של 100 גר' למ². עד אמצע שנות ה-90 כל השנים, היו שנים של פריחת פרידיניום בעצמה בינונית. יוצאות דופן היו השנתיים השטפוניות 1969 ו-1970 בתחילת הסדרה והשנתיים השטפוניות 1994-1995, בהן עוצמת פריחת הפרידיניום הייתה גבוהה במיוחד (מעל 300 ג' למ²). אך מאז 1996 נצפו 18 שנים ללא פריחה, כולל 2021, ורק 8 שנים עם פריחה (4 שנים של פריחה בינונית, 4 שנים של פריחה מאסיבית).

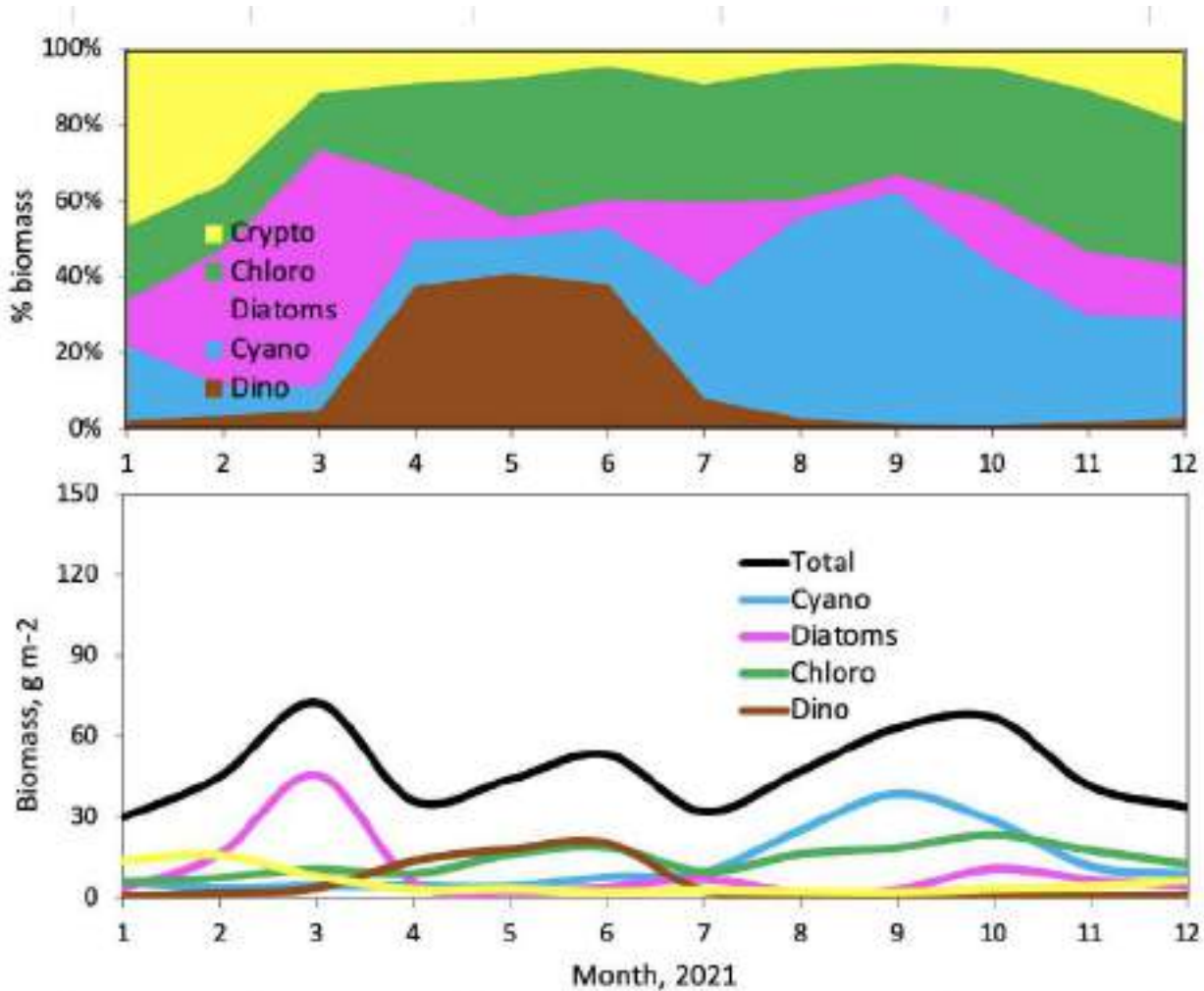


איור 40: עצמת פריחת הפרידיניום בשנים 1969-2021. עצמת הפריחה מבוטאת כממוצע חודשי של הביומסה בחודש בו ביומסת הפרידיניום הגיעה לשיאה השנתי (הערך המרבי בכל שנה). בהתאם לעוצמת הפריחה האביבית השנים חולקו לשלוש קטגוריות: שנים ללא פריחה (צהוב, ביומסה חודשית ממוצעת שלא עלתה על 100 ג' למ"ר), שנים עם פריחה בינונית (אדום, ביומסה בין 100-300 ג' למ"ר) ופריחה מאסיבית במיוחד (כחול, ביומסה מעל 300 ג' למ"ר).

מאז הקמת אגמון החולה ב-1994 (וצימצום כמות המים ששוטפת את עמק החולה ומגיעה לכנרת) ועד לשנים האחרונות יכולנו להצביע על דגם שחזר על עצמו שבו פרידיניום פורחת בכנרת רק בשנים ברוכות בגשמים, שנים בהן עמק החולה נשטף. בשנים שטפוניות אלו מגיעים לכנרת חומרים אורגניים ואנאורגניים (כמו סלניום) שנשטפים מאדמות הכבול, מה שלפני הקמת האגמון קרה כל שנה אך מאז הקמתו לא קורה בשנים שחונות. אולם, בשנים האחרונות - היו גם שנים גשומות שבהן הפרידיניום לא פרח. למשל חורף 2018/19 היה גשום מאד אך ללא פריחה. חורף 2019/20 היה חורף גשום שני ברצף - עם פריחה. חורף 2020/21 היה קרוב לממוצע הרב שנתי וללא פריחה. הסבר אפשרי (בינתיים בגדר השערה) הוא שהחילזון הפולש שהתפשט בכנרת ב-2010/11 ומאז נפוץ מאד מסלק חלק משמעותי מתאי הקיימא של פרידיניום בקרקעית האגם ובכך מצמצם את האינוקולום. פירוט נוסף בפרק החלזונות.

תרומה יחסית של קבוצות הפיטופלנקטון השונות

בהעדר פריחת פרידיניום, תרומת הדינופלגלטים לסך הביומסה האצתית ב-2021 הייתה נמוכה (<40%) והצטמצמה ל-3 חודשים (אפריל עד יוני, איור 41 למעלה). הקבוצות שתרמו את עיקר הביומסה ב-2021 היו בחורף כריפטופיטה וצורניות, ובקיץ ירוקיות (מאפריל עד דצמבר) וציאנובקטריה (מיולי עד דצמבר).



איור 41: המהלך השנתי של ביומסת הפיטופלנקטון ושל ביומסת הקבוצות הטקסונומיות העיקריות בכנרת, 2021. למעלה: תרומה יחסית של כל אחת מהקבוצות. למטה: ערכים מוחלטים (גר' למ"ר) של ביומסה של כל קבוצה ושל הסה"כ.

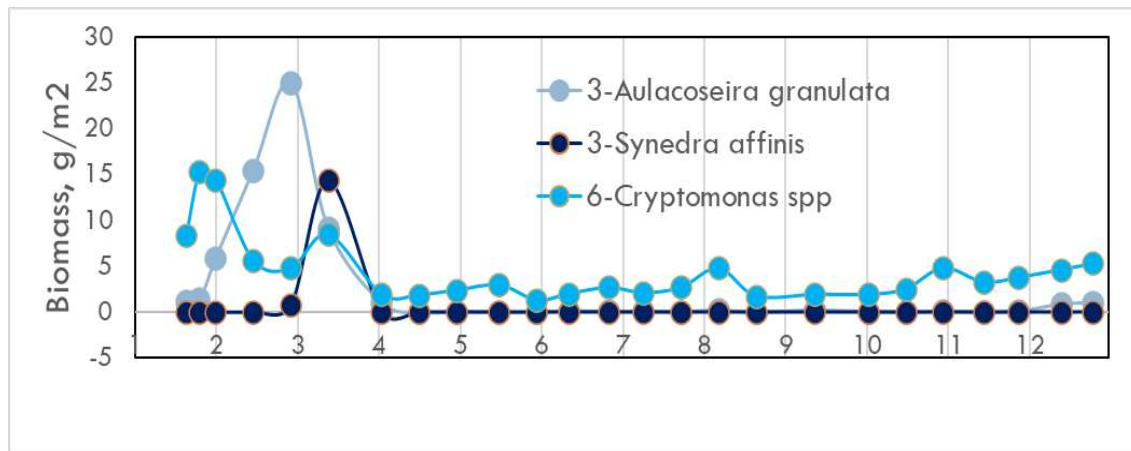
סך הביומסה והביומסה של הקבוצות העיקריות

הממוצע השנתי של ביומסת הפיטופלנקטון ב-2021 היה $47\ g\ m^{-2}$, ערך שהוא רק 60% מהממוצע הרב-שנתי של $78\ g\ m^{-2}$. ולאורך כל השנה, סך הביומסה לא עלה אף פעם מעל $80\ g\ m^{-2}$ (איור 41 למטה). שני הממוצעים החצי שנתיים, ינואר עד יולי עד דצמבר היו גם הם $47\ g\ m^{-2}$. דגם "שטוח" כזה לא היה קיים בשנות ה-70, 80, 90 של המאה הקודמת, בהן נרשם כל שנה שיא ביומסה אביבי משמעותי. אך בשנים ללא פריחת פרידיניום של שנות האלפיים דגם זה נעשה יותר ויותר שגרתי.

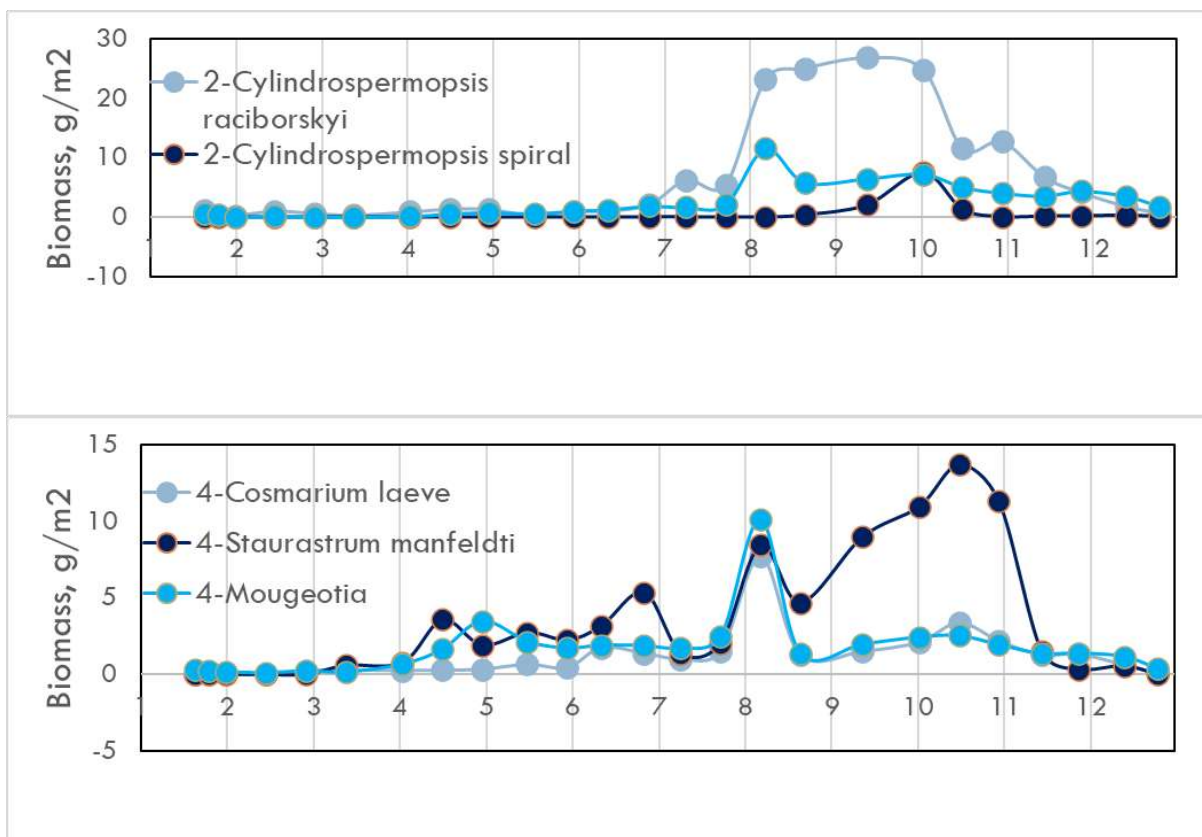
הרכב המינים ודינמיקה עונתית

מספר מועט יחסית של מינים תרמו את מרבית הביומסה בשנת 2021. שנה זו נפתחה, כמו רוב השנים בכנרת, בתרומה משמעותית של קריפטופיטה (כריפטומונס, רודומונס). בפברואר-מרץ הופיעו צורניות (ציקלוטלה, אאולקוסירה, איור 42). בספטמבר הופיעה החוטית הכחולית אפניזומנון, באוקטובר הופיעו צילינדרוספרמופסיס, והירוקית סטאורסטרום (איור 43). צילינדרוספרמופסיס הופיעה בשני מופעים, המופע הרגיל של חוטים ארוכים וישרים, ומופע סלילני (ראו תמונת כותרת לפרק זה) שהיה נדיר עד כה ונראה ב-2021 בריכחים גדולים בהרבה מאשר בעבר.

מינים שונים של הגנוס *Staurastrum* פורחים בשנים האחרונות בכנרת, מינים שלא הכרנו בעבר. ב-2019 פרח המין *Staurastrum pinge* ביוני-יולי. ב-2020 ו-2021 המין הדומיננטי היה *Staurastrum manfeldtii* (וריאנט קטן) שפרח בסתיו.



איור 42: המהלך השנתי עבור ביומסה של 3 מינים שתרמו את עיקר הביומסה בתחילת שנת 2021: הצורניות *Aulacoseira granulata*, *Synedra affinis* והכריפטופיט *Cryptomonas sp.*



איור 43: המהלך השנתי עבור ביומסה של המינים שתרמו את עיקר הביומסה בקיץ ובאביב של שנת 2021: 2 מיני כחוליות (למעלה) ו-3 מיני ירוקיות (למטה).

2.19 רעלני כחוליות



במימון
רשות
המים

פלאג אסטרון, אסף סוקניק, דיתי ויינר-מוציני

- בשנת 2021, זוהו מיקרוציסטינים במי הכנרת החל מחודש מרץ ועד חודש מאי, בריכוזים של עד 2.26 מיקרוגרם לליטר (מק"ג לליטר). בביומאסה הריכוז המירבי של מיקרוציסטינים היה 173 מק"ג לגרם חומר יבש. מספר המושבות *Microcystis flos-aqua* היה נמוך השנה בדומה לשנה שעברה.
- צילינדרוספרמופסין נמדד בכנרת בדוגמאות מים בחודשים ינואר פברואר, ושוב החל מחודש אוגוסט 2021. רמת הרעלן לא עלתה מערך של 1.8 מק"ג לליטר.

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 משטחי הציאנובקטריה ונמדד ריכוז הרעלנים בביומסה שנאספה. איסוף ביומסת מיקרוציסטיס נערך ע"י סינון מי כנרת ברשת ברשת $20\mu\text{m}$. לאחר מיצוי וריכוז, הדגימות נלקחות לאנליזה איכותית וכמותית לרעלנים משתי קבוצות: מיקרוציסטינים (MC) שמקורם במיקרוציסטיס וצילינדרוספרמופסין (CYN) שמקורם במיקרואצה בשם אפניזומנון.

המדידות מבוצעות בשיטות HPLC ו-LC/MS. התוצאות מוצגות כריכח הרעלן ליחידת נפח מים $\mu\text{g/L}$ או $\mu\text{g/g}$ בדוגמאות מים, או כריכח הרעלן בביומסה (ליחידת משקל יבש) בריכח $\mu\text{g/g}$. במקביל נערכות מדידות נוספות באגם לבקשת גופים שונים. בשנת 2021 בוצעו גם דיגומים נוספים בעונת הסתיו-חורף בחופי אמנון, עין גב, חוף מעבדת הכנרת ותחנה A, כחלק מפרוייקט אפיון צילינדרוספרמופסין בעזרת מקלות אבחון (סטריפים).

תוצאות ודיון

מיקרוציסטיס ומיקרוציסטינים:

בשנים האחרונות המין השולט באגם הוא *Microcystis flos-aqua* בהשוואה למין *Microcystis aeruginosa*. באביב 2021, בחודשים מרץ-אפריל נספרו מספר מושבות מועט יחסית (עד 100 מושבות למיליליטר) של מין זה, בדומה לשנה שעברה (ראה איור 44). עם זאת, בהשוואה לשנה שעברה, השנה נדגמו ריכחי רעלנים נמוכים יחסית בצופת.

טבלה 6: ריכחי רעלנים (מיקרוציסטינים וצילינדרוספרמופסין) בדגימות בהם נמצאו רעלנים בתחנה A - שנת 2021 (תוצאות חיוביות בלבד מוצגות).

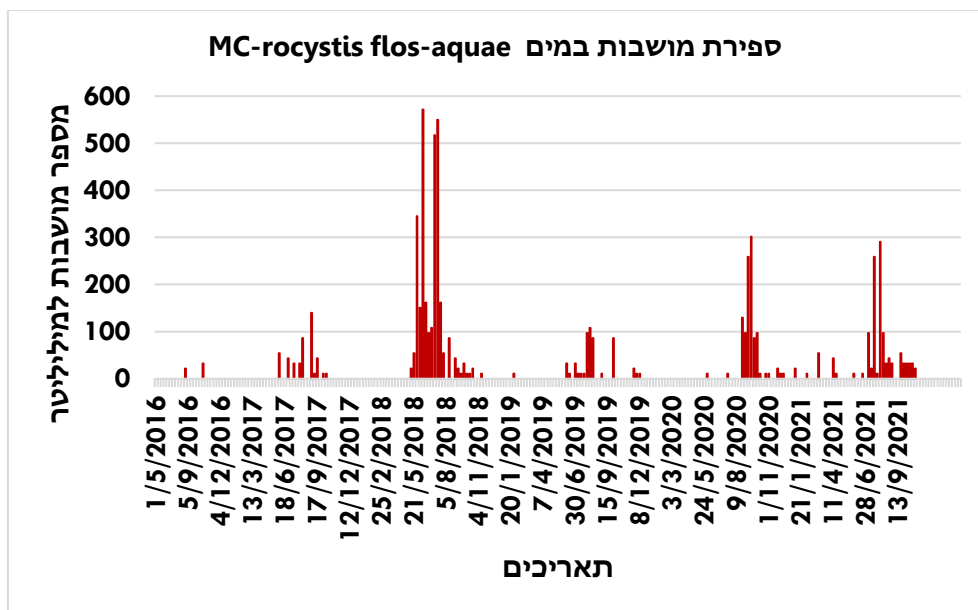
תאריך	תחנה	עומק (מטר)	סוג הרעלן	ריכח רעלנים במים ($\mu\text{g/L}$) ובביומסה - מודגש בירוק ($\mu\text{g/g}$)
Jan-17-21	A	1	CYN	1.48
Jan-31-21	A	1	CYN	0.85
Feb-7-21	A	1	CYN	0.59
Mar-9-21	חוף מעבדת הכנרת	0	MC like	18.5
Mar-10-21	קשת צפונית Q 02	0	MC-LR	0.38
Mar-10-21	קשת צפונית Q 02	0	MC-RR	0.28
Mar-22-21	*20 μm Net	0	MC-YR	93
Mar-22-21	20 μm Net	0	MC-LR	173
Mar-22-21	20 μm Net	0	MC-RR	47
Mar-22-21	20 μm Net	0	MC like	12.5
May-30-21	חוף מעבדת הכנרת	0	MC-YR	2.26
May-30-21	חוף מעבדת הכנרת	0	MC-LR	1.50
May-30-21	חוף מעבדת הכנרת	0	MC-RR	0.43
May-31-21	A	1	MC-RR	0.09
Aug-15-21	A	1	CYN	0.55
Aug-22-21	A	1	CYN	0.50
Aug-22-21	חוף מעבדת הכנרת	0	CYN	0.51
Aug-22-21	חוף עין גב	0	CYN	0.54
Aug-22-21	מפרץ אמנון	0	CYN	0.43

ריכוז רעלנים במים ($\mu\text{g/L}$) ובביומסה - מודגש בירוק ($\mu\text{g/g}$)	סוג הרעלן	עומק (מטר)	תחנה	תאריך
0.91	CYN	0	חוף מעבדת הכנרת	Sep-5-21
0.95	CYN	1	A	Sep-12-21
1.25	CYN	1	A	Sep-19-21
1.21	CYN	0	חוף מעבדת הכנרת	Sep-19-21
1.24	CYN	0	חוף עין גב	Sep-19-21
0.77	CYN	0	מפרץ אמנון	Sep-19-21
1.12	CYN	1	A	Oct-3-21
1.14	CYN	1	A	Oct-17-21
0.97	CYN	0	חוף מעבדת הכנרת	Oct-17-21
1.25	CYN	0	חוף עין גב	Oct-17-21
0.80	CYN	0	מפרץ אמנון	Oct-17-21
1.60	CYN	1	A	Nov-15-21
1.50	CYN	0	חוף מעבדת הכנרת	Nov-15-21
1.25	CYN	0	חוף עין גב	Nov-15-21
1.14	CYN	0	מפרץ אמנון	Nov-15-21
1.52	CYN	1	A	Dec-5-21
1.22	CYN	1	A	Dec-19-21
0.83	CYN	1	A	Jan-2-22

20 μm net * = איסוף חומר באגם בעזרת רשתות 20 מיקרון

שמות רעלני מיקרוציסטינים מצויינים בקצרה MC-LR, MC-Like, CYN וכ"ו.

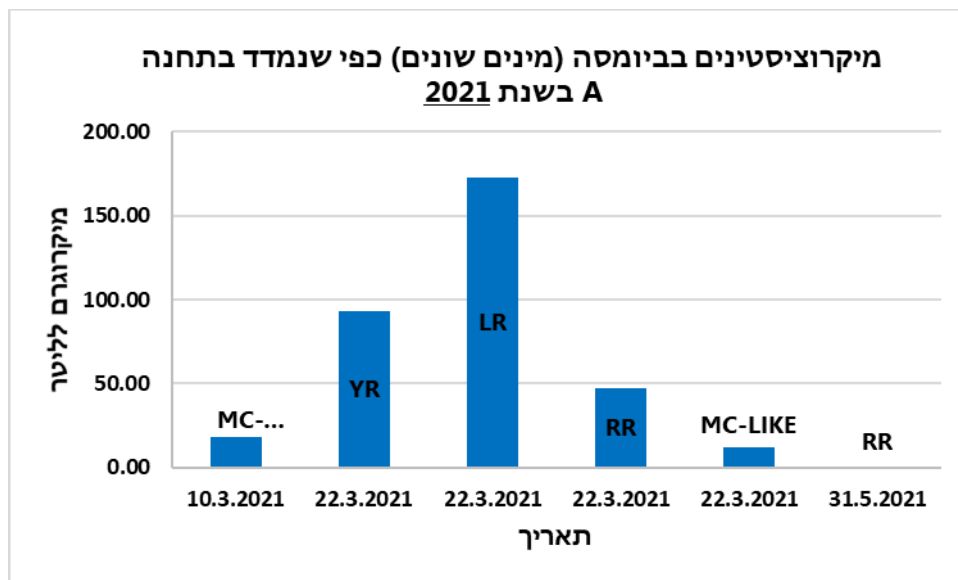
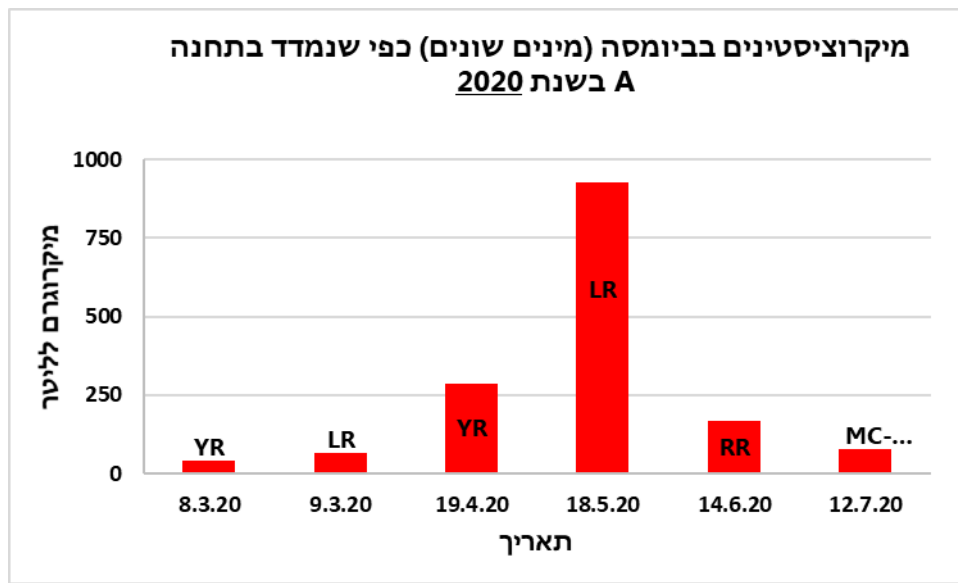
כפי שניתן לראות באיור 44, גם ביומסת המיקרוציסטיס באגם לא הגיעה השנה לריכוזים גבוהים בהשוואה לשנים שעברו, אך יתכן ויעלו בזמן הקרוב לכתיבת הדו"ח (פברואר 2022).



איור 44: ספירת מושבות *Microcystis-flos aqua* בעומק 1 מטר בתחנה A, החל משנת 2016 ועד ינואר 2022.

מבחינת ריכחי הרעלנים במים, ניתן לסכם כי מעט מופעים של מיקרוציסטינים זוהו במי האגם ובריכח מקסימלי של 2.26 מיקרוגרם לליטר. יש לציין כי במי שתיה, סף הריכחים המותרים המומלצים ע"י ארגון הבריאות העולמי (WHO) הוא עד 1 מיקרוגרם לליטר, לכן מומלץ לטפל במי הגלם מהכנרת במקרים בהם הריכחים עוברים סף זה במים.

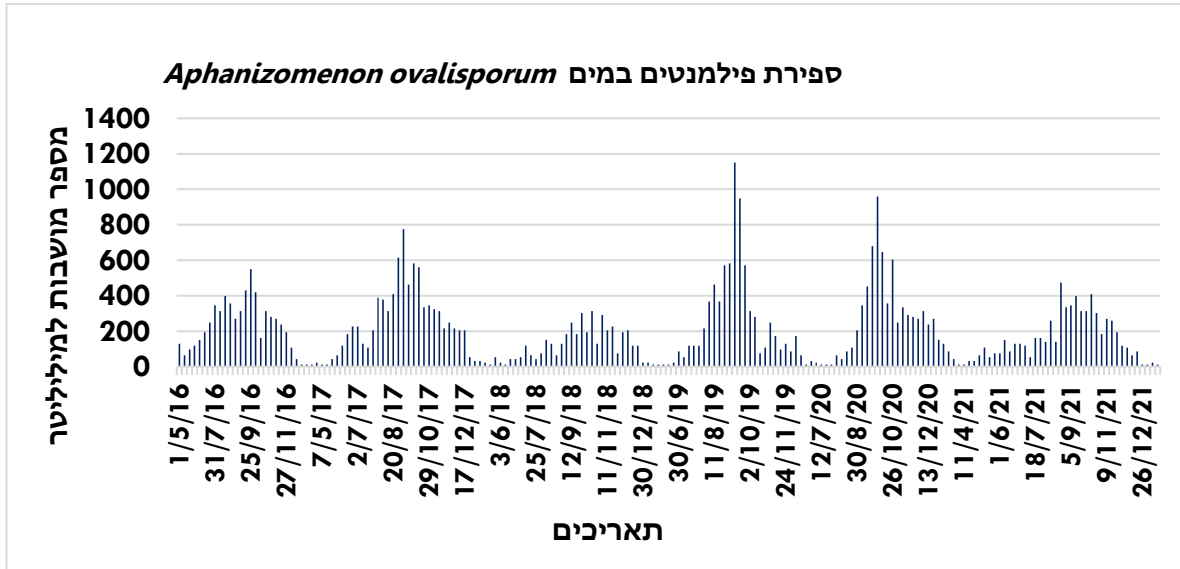
כמחכר מעלה, ריכחי הרעלנים בביומסה היו נמוכים בהשוואה לשנים שעברו, מדד זה מייצג את יכולת ייצור הטוקסינים הקיימת באוכלוסיה. באיור 45 ניתן לראות כי קיימים סוגי רעלנים שונים בביומסה כאשר הסוג השולט בשנים 2020 ו-2021 הוא מיקרוציסטין LR (MC-LR). רעלן זה ידוע גם כבעל הרעילות המרבית מבין סוגי הרעלנים המוצגים.



איור 45: ריכח מיקרוציסטינים (רעלני מיקרוציסטיס) בביומסה מסוננת (מיקרוגרם לגרם חומר יבש).

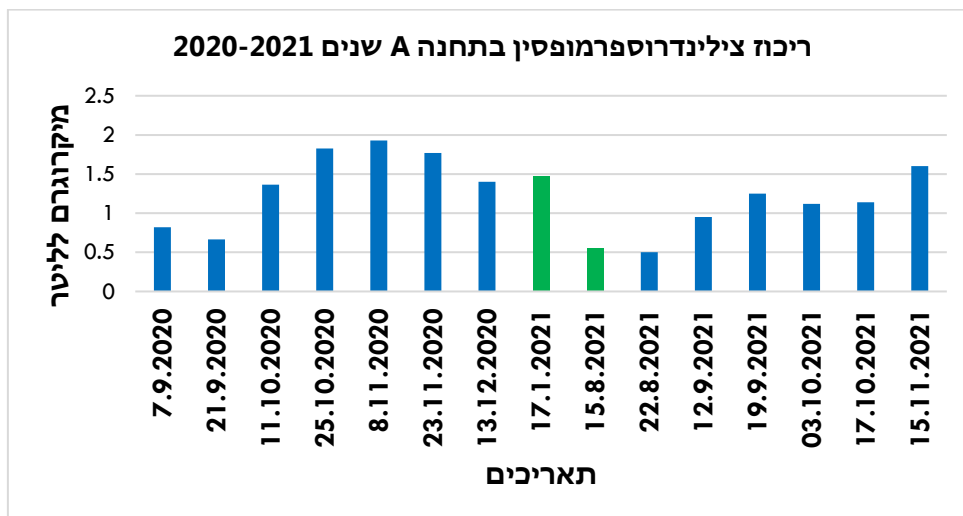
אפניזומנון וצילינדרוספרמופסין

אוכלוסיית ה- *Aphanizomenon ovalisporum* החלה מתפתחת השנה מתחילת הקיץ (יוני) והגיעה לריכחים מקסימליים באמצע הקיץ (ספטמבר) אשר דעכו לקראת בוא הסתיו (דצמבר 2021). בהשוואה לשנים קודמות לא נצפתה עלייה במספר הפילמנטים למיליטר.



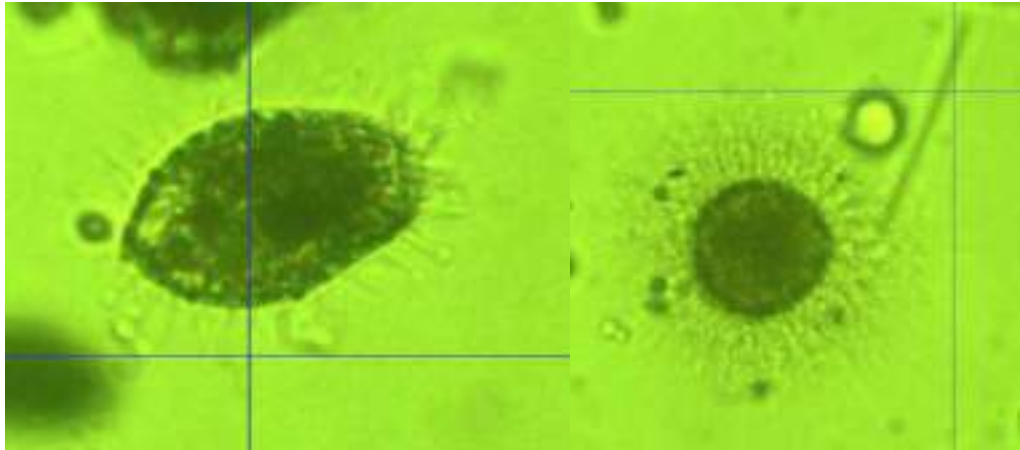
איור 46: ספירת פילמנטים *Aphanizomenon ovalisporum* בעומק 1 מטר בתחנה A בכנרת, שנים 2016-2022.

מין זה של אפניזומנון מסוגל להפריש רעלן בשם צילינדרוספרמופסין אשר בניגוד לרעלני המיקרוציסטיס, הינו מסיס ביותר ועל כן ניתן לזהותו במים כמדיום עיקרי. כפי שצויין בדו"חות קודמים, רעלן זה בעל עמידות מסוימת בסביבה המימית ולכן ניתן למצוא אותו עד מספר שבועות לאחר דעיכת הפריחה. ריכוזיו במי האגם השנה מוצגים בטבלה 6 וכן מרוכזים באיור 47. ניתן לראות כי ריכח הצילינדרוספרמופסין מגיע לשיא בחודש נובמבר. יש לציין כי בהתאם להמלצות ארגון הבריאות העולמי למי שתייה, ערך סף מירבי הוא 0.7 מיקרוגרם לליטר.



איור 47: ריכח הרעלן צילינדרוספרמופסין בעומק 1 מטר בתחנה A בכנרת. שתי העמודות הירוקות מציינות את מרווח הזמן בין סיום תקופת הפריחה בסתיו ותחילתה המחודשת בקיץ 2021.

2.20 ניטור ציליאטים



במימון
רשות
המים

חמי רושנסקי, גדעון גל

- הצפיפות השנתית הממוצעת בכל עמודת המים ב- 2021 היתה דומה לזו של 2020.
- במים העליונים (אפילימניון), נצפתה ירידה במספרי ציליאטים לעומת השנה שעברה.
- במטהלימניון, בהשוואה ל- 2020, נמצאה עלייה של הממוצע השנתי בצפיפות ה- *Coleps* וירידה בצפיפות ה- *Tintinides* ובציליאטים בצורת *sphere*.
- ב- 2021 נמצאה לראשונה צפיפות דומה באפילימניון ומטהלימניון.
- במים העמוקים, ההיפולימניון, נצפתה צפיפות גדולה בדצמבר.
- ערכי הביומסה השנתית הממוצעת באפילימניון ובתרמוקלינה היו נמוכים בכחצי לעומת 2020, והיו הנמוכים ביותר שנמצאו מאז 2015.

מטרת הניטור

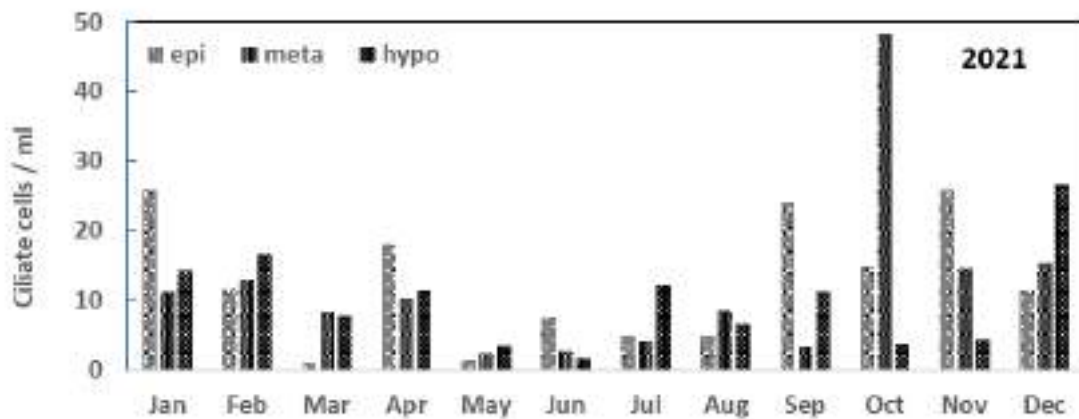
ניטור ציליאטים כמרכיב במארג המזון ובלולאה המיקרוביאלית.

שיטות

ניטור ציליאטים מתקיים משנת 2006 ונערך פעם בחודש בתחנה A, בשלוש 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. ביומסת הפחמן חושבה לפי 140 ננוגרם פחמן ל- 1 מיקרוגרם משקל רטוב.

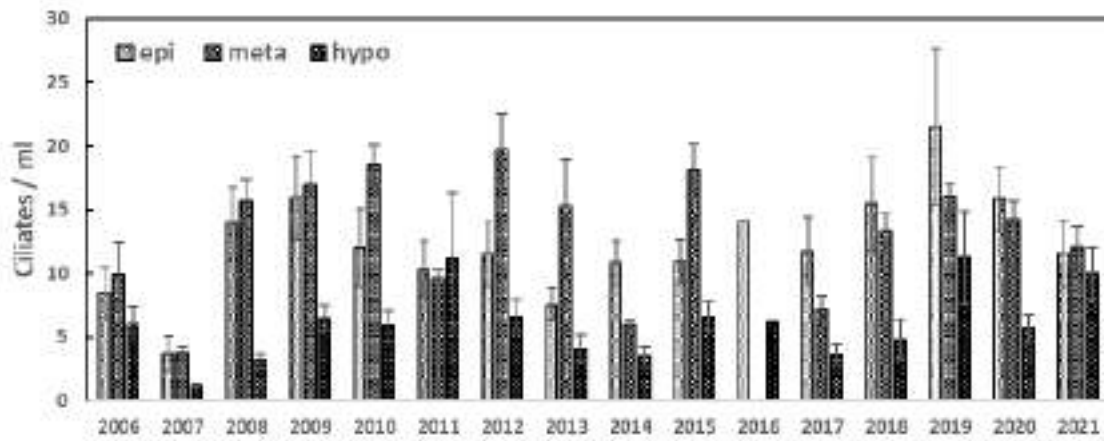
תוצאות ודיון

ב- 2021, צפיפות כלל הציליאטים בכל שכבת המים הייתה גבוהה יחסית בחורף (ינואר – אפריל, למעט במרץ באפילימניון) ובסתיו (ספט' – דצמ', למעט בספטמבר במטהלימניון, ובאוקט' ונוב' בהיפולימניון), (איור 48). הממוצע השנתי היה כ- 13, 12 ו- 10 תאים למ"ל באפי-, מטה- והיפולימניון, בהתאמה. באפילימניון נצפתה ב- 2021 ירידה במספרי הציליאטים לעומת 2020, כנראה כתוצאה מירידה ב Prolate Spheroids ו- *Tintinides* (מ- 3 ל- 2, ומ- 4 ל- 1 תאים למ"ל, בהתאמה). במטהלימניון, הצפיפות היחסית של הציליאטים הייתה גבוהה במיוחד באוקטובר ונבעה כנראה ממספר התאים הגבוהים של *Coleps* (כ- 50 תאים למ"ל). בהשוואה ל- 2020, נמצאה עלייה של הממוצע השנתי בצפיפות ה- *Coleps* (מ- 1 ל- 6 תאים למ"ל) וירידה בצפיפות ה- *Tintinides* ובציליאטים בצורת sphere (מ- 5 ל- 2, ומ- 6 ל- 3 תאים למ"ל, בהתאמה). בהיפולימניון, בדצמבר צפיפות הציליאטים הייתה גבוהה יחסית. ערכי הממוצע השנתי היו גבוהים לעומת 2020 (10 לעומת 5.6 תאים למ"ל), עם עלייה בתאים בצורת sphere (מ- 1 ל- 4 תאים למ"ל) וב- *Coleps* (מ- 1.4 ל- 2.9 תאים למ"ל).



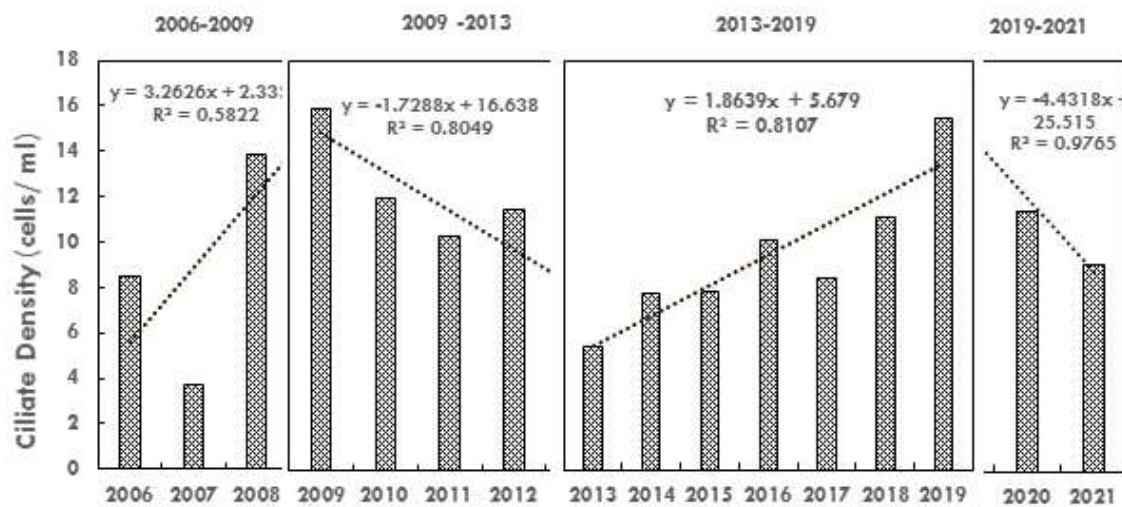
איור 48 : הצפיפות החודשית של הציליאטים (מספר למ"ל) בעומקים המייצגות שכבות שונות במהלך שנת 2021.

בהתפלגות הערכים הרב שנתית בין השכבות, התחשבנו במדידות שנלקחו בשכבות השונות לאורך השנים. דוגמאות מעומקים 1-2 מ' ייצגו את שכבת האפילימניון, עומקים בין 25-12 מטר ייצגו את המטהלימניון, ועומקים בין 30-38 מ' ייצגו את ההיפולימניון. ב- 2021 מוצאנו ירידה בצפיפות הציליאטים באפילימניון (12.6 תאים למ"ל) לעומת 2020 (16 תאים למ"ל) ו- 2019 (21.5 תאים למ"ל), נמצאה גם ירידה בצפיפות הציליאטים במטהלימניון, מ- 16 תאים למ"ל ב- 2019, ל- 14 ב- 2020 ו- 12 ב- 2021 (איור 49). ב- 2021 נמצאה לראשונה צפיפות דומה באפילימניון ובמטהלימניון. הצפיפות בהיפולימניון הייתה גבוהה יותר (10 תאים למ"ל) לעומת 2020 (5.6 תאים למ"ל) וקרובה לערכים הגבוהים יחסית שנמצאו בשנים 2019 ו- 2011 (11 תאים למ"ל). כמו בשנת 2011, אבל בניגוד לכל רצף השנים מאז 2006, בשנת 2021 ערכי הצפיפות של שלושת השכבות היו דומים, ללא צפיפות גבוה באופן בולט באף אחת מהשכבות. בהקשר זה, מעניין לציין שעד שנת 2013, ערכי הצפיפות הגבוהים ביותר נמצאו שכבת המטהלימניון. מאז, לרוב הערכים הגבוהים ביותר נמצאו בשכבת האפילימניון למעט בשנת 2015 וב- 2021.



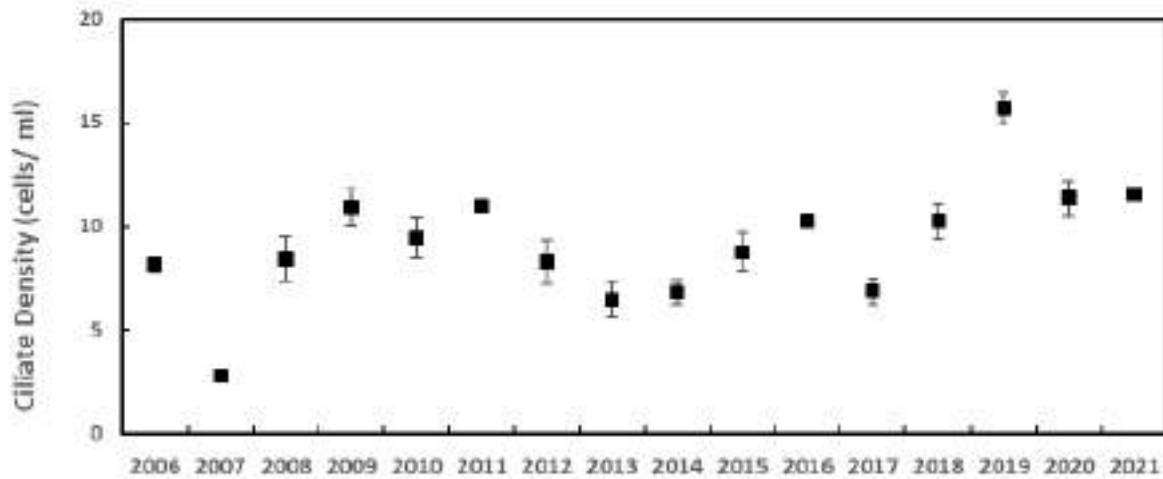
איור 49: הצפיפות הממוצעת של ציליאטים (מספר למ"ל) בשכבות העומק השונות עבור התקופה 2006-2021. הקווים האנכיים מבטאים את שגיאת התקן.

באפילימניון, בין השנים 2006-2021 אנו מוצאים מחזוריות רב-שנתית בצפיפות הציליאטים. משנת 2006 ל-2009 נצפתה מגמת עליה (ממוצע של 3.3 תאים למ"ל לשנה). מ-2009 ל-2013 אנו מוצאים ירידה בצפיפות (ממוצע של 3.3 תאים למ"ל לשנה) ובין השנים 2013-2019 שוב עליה ומ-2019 ל-2021 שוב ירידה עם ממוצעים שנתיים של 1.9 ו 4.4 תאים למ"ל, בהתאמה. ה R^2 בין השנים 2006-2009 היה נמוך בהרבה בגלל שנת 2007, שהיתה חריגה בערכים הנמוכים בכל שכבות המים (איור 50).



איור 50: השינוי בצפיפות השנתית הממוצעת באפילימניון בין השנים 2006-2009, 2009-2013, 2013-2019 ובין 2019-2021. הקווים המנוקדים הינם קווי מגמה.

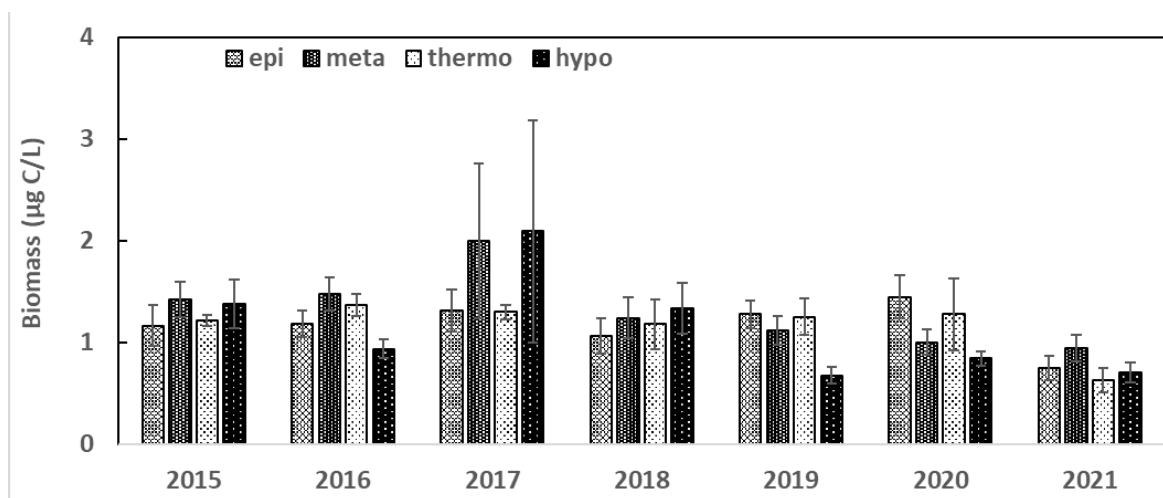
בערכי הצפיפות השנתית הממוצעת בכל עמודת המים נמצא כי ב-2021, הצפיפות היתה דומה לזו של 2020. בשנה הבאה נוכל לדעת אם תהיה מגמה של עלייה בצפיפות כפי שקרה אחרי הירידה ב-2006-2007 וב 2019-2020 או המגמה תהיה המשך הירידה שנמצאה משנת 2019. המשך ניטור הציליאטים בשנים הבאות יאפשר לנו לקבוע האם אכן קיימת מחזוריות רב-שנתית באוכלוסיית הציליאטים או שמדובר בחוסר יציבות מתמשכת.



איור 51: ריכוז הציליאטים השנתי הממוצע (2006-2021) על בסיס דיגום של שלושת שכבות עמודת המים: האפילימניון, המטהלימניון, וההיפולימניון. מספר הדגימות בשנה נע בין 35-45. הקווים האנכיים מבטאים את שגיאת התקן (בשנים 2007, 2011 ו 2021 ערכי שגיאת התקן לא נראים בגרף, כיוון שהיו נמוכים: 0.2 ומטה).

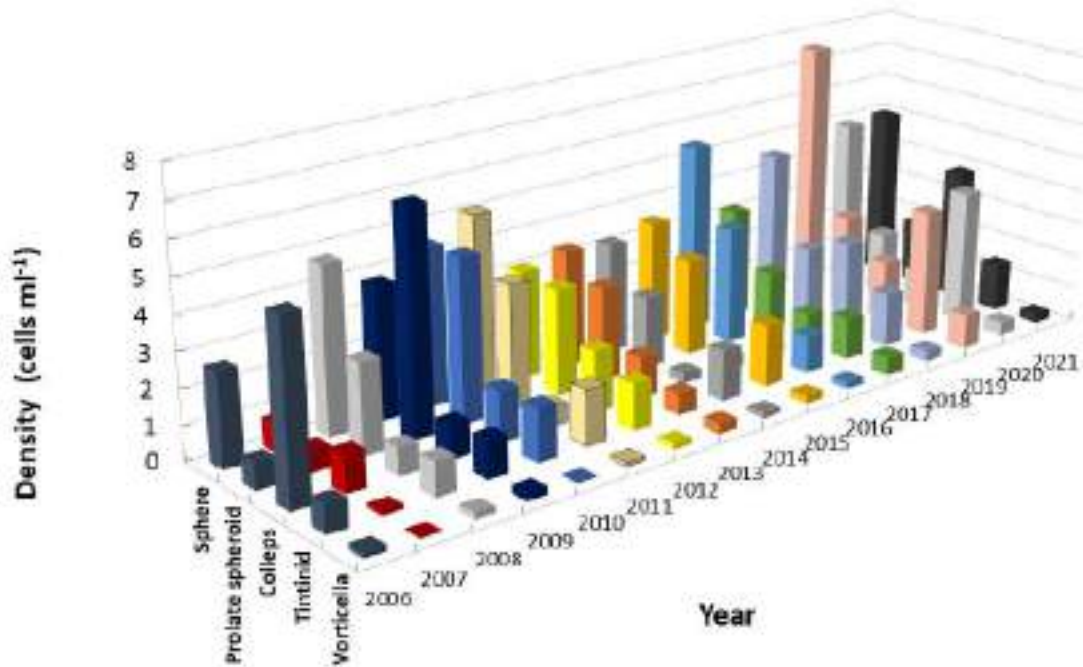
הביומסה השנתית הממוצעת של הציליאטים מאז 2015 מובאת באיור 52. ב-2021, ערכי הביומסה השנתית הממוצעת באפילימניון ובתרמוקלינה (0.7 ו-0.6 מיקרוגרם פחמן לליטר, בהתאמה) היו נמוכים בכחצי מהערכים בשנה הקודמת (1.4 ו-1.3 מיקרוגרם פחמן לליטר, בהתאמה) והיו הנמוכים ביותר שנמצאו מאז 2015 (ממוצעים שנתיים שנעים בין 1.04 ל-1.45 מיקרוגרם פחמן לליטר).

במטהלימניון, ערכי הביומסה ב-2021 ($0.7 \pm 0.1 \mu\text{gC/L}$) היו דומים לערכים שנמצאו ב-2019-2020 ($0.76 \pm 0.12 \mu\text{gC/L}$ בממוצע), אך מורגשת ירידה בביומסה מאז 2015, למעט ב-2017 (ירידה מ-1.4 ל-0.9 מיקרוגרם פחמן לליטר מ-2015 ל-2021, למעט ב-2017 שבה נרשמה ביומסה של 2 מיקרוגרם פחמן לליטר). הביומסה הגבוהה יחסית ב-2017 נבעה מהערכים הגבוהים במיוחד שנמצאו בחודש מרץ ($10.2 \mu\text{gC/L}$ מיקרוגרם פחמן לליטר), ולכן שגיאת התקן היתה חריגה. בהיפולימניון, לא נמצא שינוי דרמטי מאז 2019 כשהממוצע לשנים 2019-2021 היה 0.7 ± 0.1 מיקרוגרם פחמן לליטר. נמשכת מגמת הירידה בערכי הביומסה כשהממוצע לשנים 2018-2015 עמד על 1.4 ± 0.5 מיקרוגרם פחמן לליטר.



איור 52: ביומסת הציליאטים השנתית הממוצעת (2015-2021) על בסיס דיגום חודשי של שלושת שכבות עמודת המים: האפילימניון, המטהלימניון, וההיפולימניון וכן התרמוקלינה. הקווים האנכיים מבטאים את שגיאת התקן.

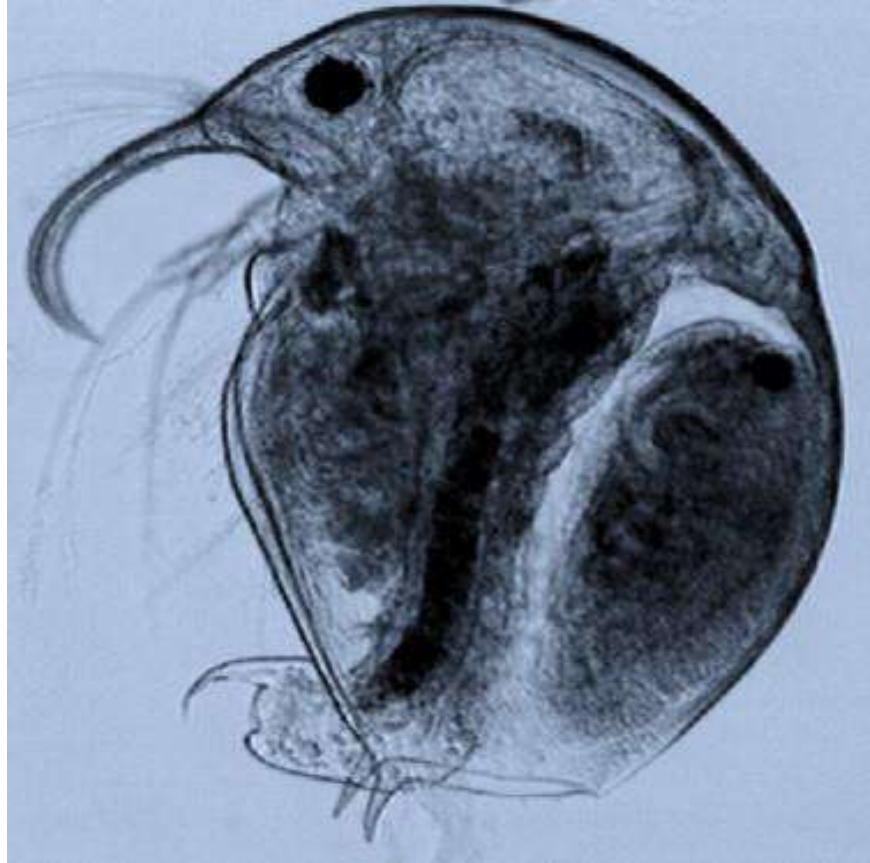
בשנת 2021 מצאנו צפיפות דומה ל- 2020 בצפיפות הציליאטים המקוטלגים בקבוצת Sphere וגם בצפיפות Prolate spheroid. נמצאה עלייה בצפיפות *Coleps* יחסית לשנה שעברה (3.9 לעומת 1.1 תאים למ"ל, בהתאמה). מצד שני, היתה ירידה בצפיפות ה- *Tintinides* (1.4 לעומת 3.9 תאים למ"ל, בהתאמה). צפיפות ה- *Vorticella* ממשיכה להיות נמוכה באגם מתחילת שנות הניטור (איור 53).



איור 53: השינויים בצפיפויות השנתיות הממוצעות של קבוצות הציליאטים השונות בעמדת המים עבור התקופה 2006-2021.

קיימים קשיים בדיגום הציליאטים, העלולים להשליך על איכות האומדנים שלנו. הדיגום שאנו עורכים מתבצע משלושה עומקים ספציפיים בלבד בעזרת דוגם מים. ידוע לנו שהציליאטים לעיתים קרובות מרוכזים בשכבות צרות וצפופות. על כן, דיגום בשלושה עומקים ספציפיים, 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 עליה של כ-16% בצפיפות הכוללת של הזואופלנקטון במהלך 2021 ביחס לשנת 2020.
- נרשמה עליה של 46% באוכלוסייה הקופפודים באגם בשנת 2021 ביחס לשנת 2020.
- בהמשך למגמה של השנים האחרונות חלה עליה משמעותית ביחס שבין קופפודים מהסוג מזוציקלופס לסוג תרמוציקלופס. עליה המשקפת ירידה בלחץ הטריפה. תמונה שעולה גם מהסקר האקוסטי של הדגים.

מטרה

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

רקע

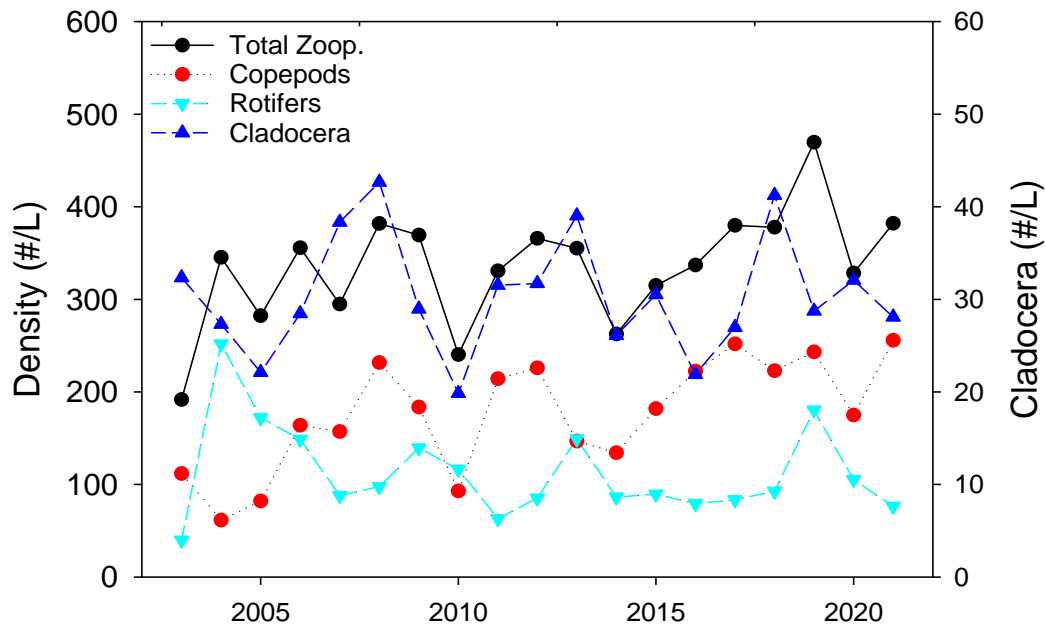
ניטור הזואופלנקטון אשר החל עם תחילת תכנית הניטור של הכנרת בינואר 1969 עבר מספר שינויים לאורך השנים. השינוי הבולט היה השילוב של דיגום פרופילים בנוסף לדיגום המיקס שנערך מאז 1969. בניגוד לדיגום המיקס שכולל דוגמא אחת שהינה תערובת של מים ממספר עומקים, המאפשר תמונה אינטגרטיבית של עמודת המים, דיגום הפרופיל כולל דיגום וספירה של דגימות שנאספו ממספר עומקים. הדיגום בשיטה זאת מאפשר שמירה על המידע הנאסף בכל עומק ועומק חיהוי 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 במהלך תקופת השיכוב דיגום עד עומק תרמוקלינה, בנוסף לדיגום מטר מעל ומטר מתחת לתרמוקלינה. הדגימות, מכל העומקים מרוכזים לכלי אחד ומעורבבים היטב וממנו נלקחת דגימת מים אחת של 1 ליטר לספירה. בשיטת הפרופילים, 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.

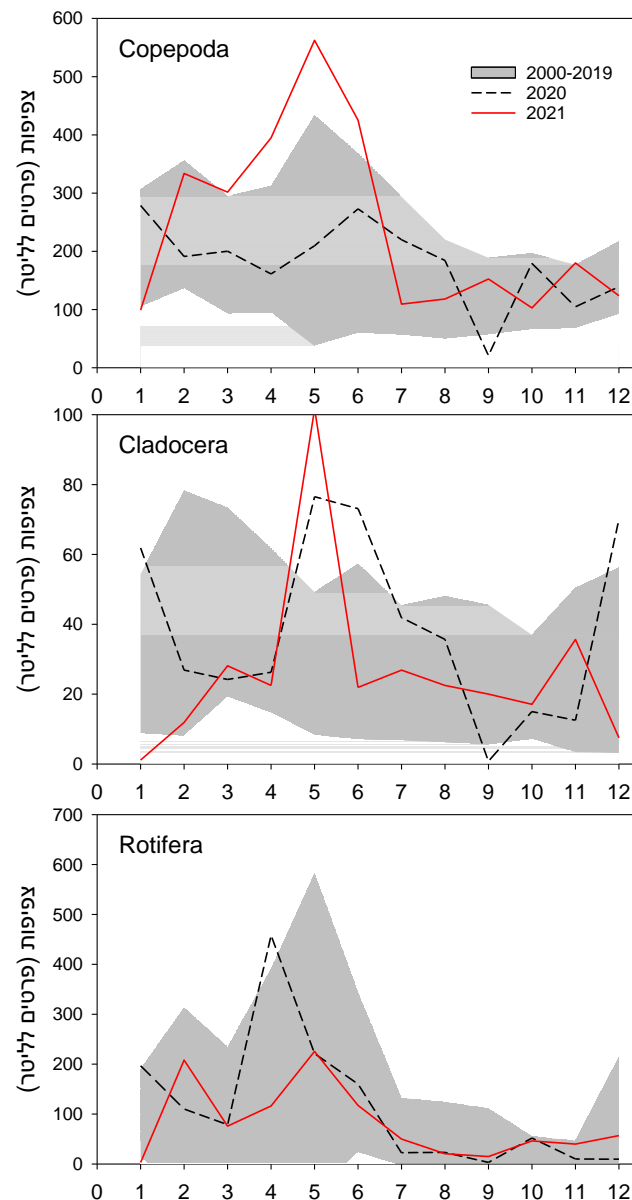
תוצאות ודיון

במעקב אחר השינויים בצפיפות הכוללת של הזואופלנקטון באגם מאז 2003, בעזרת דגימות הפרופילים (איור 54), ניתן לראות שבשנה האחרונה, בניגוד לשנת 2020, חלה עליה בצפיפות הזואופלנקטון באגם. בשנה החולפת הצפיפות הכוללת הממוצעת (סטיית תקן) של סה"כ הזואופלנקטון עלתה מערך של 361.5 (588.0) פרטים לליטר בשנת 2020 לערך של 378.9 (432.9) פרטים לליטר בממוצע בשנת 2021-עליה של 16% בניגוד לירידה של 30% בצפיפות הכוללת בשנת 2020. הערך שנרשם בשנה החולפת דומה לערכים שנרשמו בשנים 2017-2018 (377.9-379.9 פרטים לליטר). העלייה נבעה בעיקר מעליה של 46% בצפיפות של הקופודים לצפיפות הממוצעת (סטיית תקן) של 250.3 (249.5) פרטים לליטר. לעומת זאת נרשמה ירידה בצפיפויות של הרוטיפרים (28%) והקלדוצירה (12%). הירידה בצפיפות שתי הקבוצות הללו איננה מפתיעה לאור העלייה הבולטת בצפיפות הקופודים שהינם, בשלביהם הבוגרים, הטורפים העיקריים של שתי הקבוצות הללו. עדות לקשר ניתן לראות בתזמון של הירידה בעיקר בצפיפות של הרוטיפרים ביחס לשנה שעברה המתרחשת בחודשי האביב, בתקופה בה נרשמה עליה משמעותית של קופודים בוגרים (איור 55).



איור 54: 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.

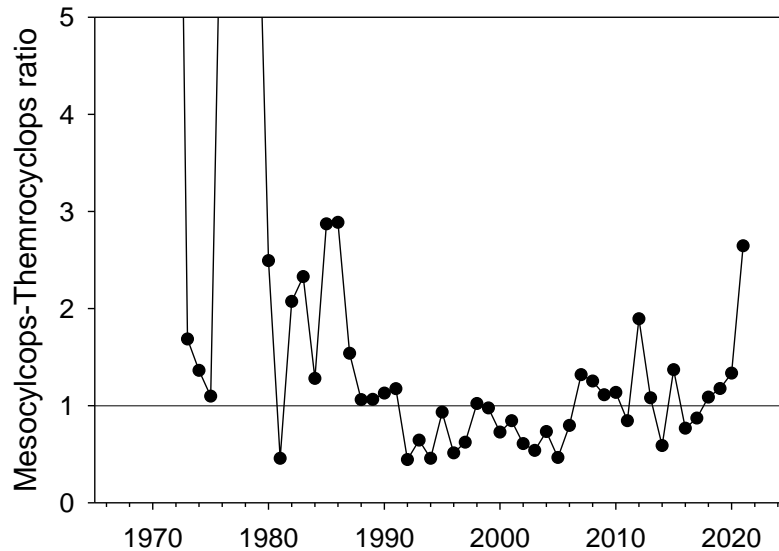
בבחינה של צפיפות הקבוצות הטקסונומיות העיקריות של הזואופלנקטון במהלך שנת 2021, ביחס לשנת 2020 ולממוצע הרב-שנתי בין השנים 2001-2019, ניתן להבחין במספר תופעות חריגות (איור 55). התופעה החריגה ביותר שנצפתה במהלך 2021 הייתה ערכי הצפיפות הגבוהים של הקופפודים בחודש מאי שחרג מהנתונים ההיסטוריים בעשור האחרון. חודש מאי הגיעו אחרי ערכים גבוהים החל מחודש פברואר. גם מיני הגבוהים ביותר של קופפודים. אך הערכים במאי הגיעו אחרי ערכים גבוהים החל מחודש פברואר. גם מיני הקלדוצירה הציגו ערכי צפיפות גבוהים בחודש מאי ביחס לממוצע הרב שנתי. לעומת זאת, בשאר חודשי השנה שלושת הקבוצות הטקסונומיות הציגו ערכים דומים לממוצעים הרב-שנתיים.



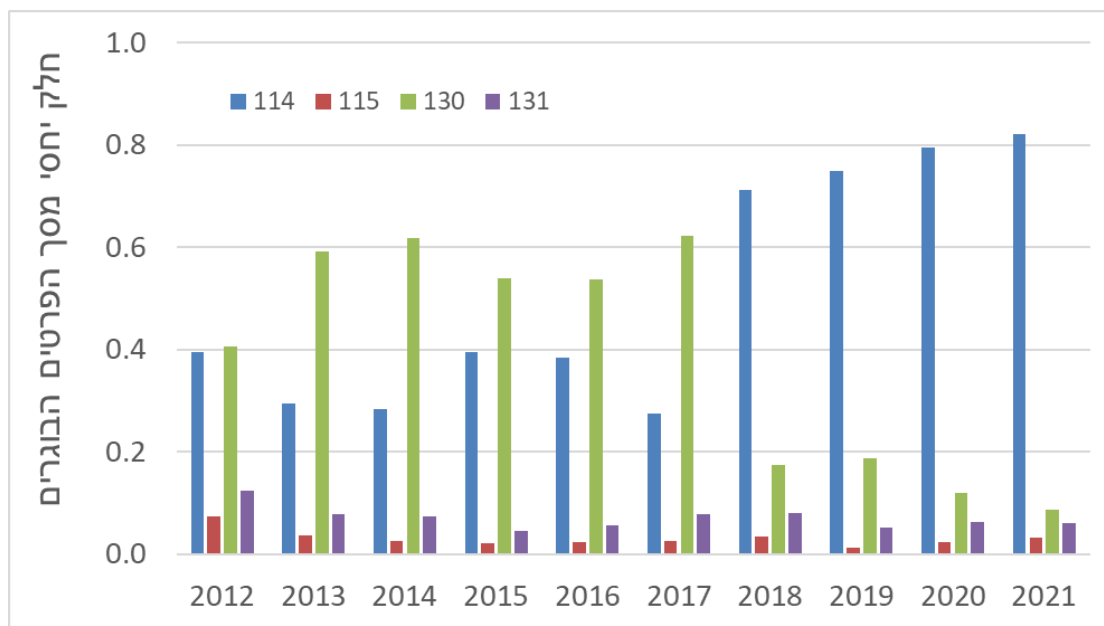
איור 55 : צפיפות חודשית ממוצעת של שלושת הקבוצות הטקסונומיות העיקריות של הזואופלנקטון באגם: הקופפודים (איור עליון), הקלדוצ'ירה (איור אמצעי), וההרוטיפרים (איור תחתון) בשנים 2021 (קו אדום), 2020 (קו שחור מקוקו) וביחס לממוצע הרב-שנתי וסטיות התקן (שטח אפור) בתקופה 2000-2019 על פי דיגום המיקסים.

בנוסף לערכי הצפיפות הגבוהים של הקופפודים בשנה החולפת אנו עדים למגמת שינוי נוספת באוכלוסייה הזאת. בכנרת קיימים בעיקר שני מינים של קופפודים מהסוג *Mesocyclops* והסוג *Thermocyclops*. למרות ששני מינים אלו הם בעלי מאפיינים דומים הם שונים בגודלם כאשר המין *Mesocyclops ogunnus* גדול יותר ומגיע לאורך מעל 800 מיקרון לעומת המין *Thermocyclops dybowski* המגיע לאורך מקסימלי של כ-630 מיקרון. בעקבות הבדלי הגדלים נמצא כי שהיחס שבין צפיפות שני המינים מבטא את לחץ הטריפה של דגים על הקופפודים באגם. במהלך חמשת העשורים האחרונים אנו עדים לשינויים גדולים ביחס שבין שני המינים (איור 56) עם ערכים גבוהים בשנות השבעים והשמונים. למעשה רק 1991 ערך היחס מזוציקלופס/תרמוציקלופס ירד מתחת לערך של 1.

בשנה החולפת חלה עליה משמעותית בערך זה (3.0) לערך שנרשם לאחרונה רק בשנת 1986. עליה זאת באה לידי ביטוי גם בחלק היחסי של צפיפות הבוגרים של שני מינים אלו באוכלוסיה. מהספירות שלנו עולה מגמה ברורה של עליה בחלק היחסי של הבוגרים מהמין *M. ogunnus* לעומת מגמת ירידה בחלקם היחסי של הבוגרים מהמין *T. dybowski* (איור 57). מגמות אלו מבטאות ירידה בלחץ הטריפה על המין תרמוציקלופס ותואמות גם את ממצאי הניטור האקוסטי של הדגים (פרק 2.22).



איור 56: היחס שבין ריכחי שני מיני הקופפודים העיקריים באגם המחושב על בסיס הצפיפות השנתית הממוצעת של שני המינים. הקו הרציף האופקי מייצג יחס של 1.



איור 57: החלק היחסי של השלבים הבוגרים של שני מיני הקופפודים באגם *M. ogunnus* (קוד מזהה 114, 115) והמין *T. dybowski* (קוד מזהה 130, 131).

יש להמשיך לעקוב אחר השינויים באוכלוסיות הזואופלנקטון בעיקר לאור השינויים במפלס והשינויים באוכלוסיית הקופפודים בשנים האחרונות. שמירה על מפלס אגם גבוה, כדוגמת 2020/2021 ו-2021/22 והשינויים בשטחי הצמחייה המוצפת והאזורים המוצפים סביב האגם צפויים להשפיע על אוכלוסיות הדגים ולכן גם על הזואופלנקטון בשנים הקרובות.

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 האקוויטים, משפיעים על איכות המים, על הפיטופלנקטון, הזואופלנקטון, הזואובנטוס, ומשטר הנוטריינטים באגם. לתנודות מפלס האגם ישנה השפעה ניכרת על הביולוגיה והאקולוגיה של הדגים כמו גם על הרבייה, ההשרדות והדינמיקה באגם. דייג ואכלוס 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 אכלוס הדגים בכנרת.

שיטות

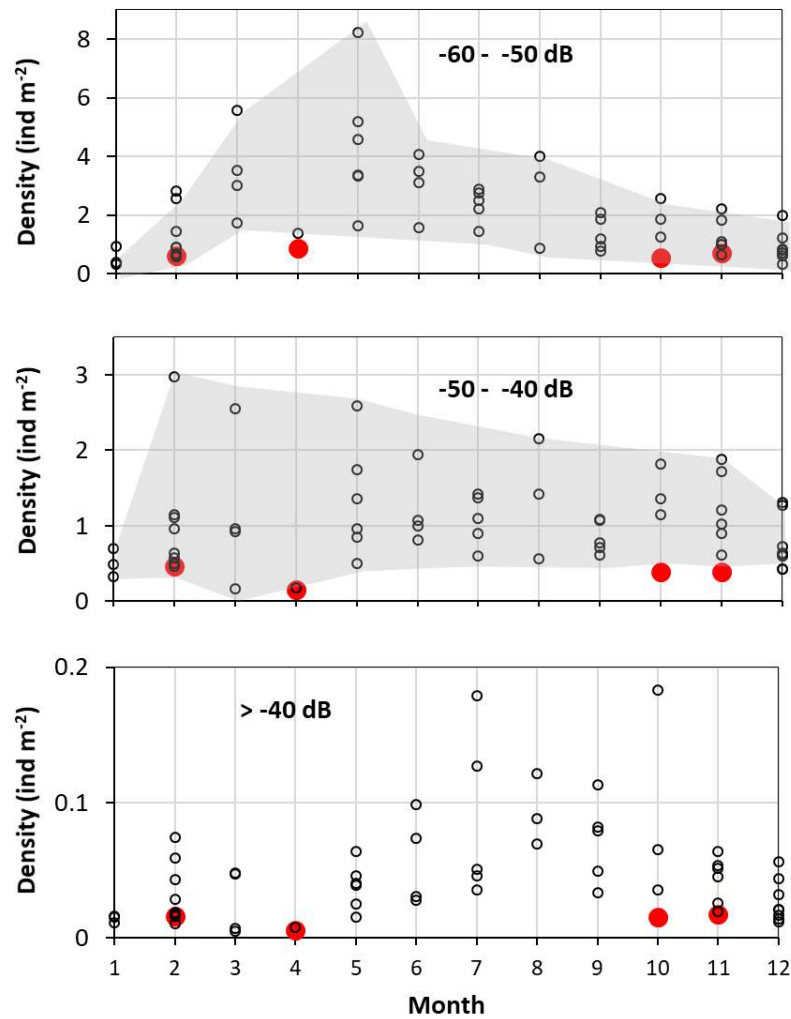
סקרים אקוסטיים, שמטרתם הערכה כמותית של מספרי הדגים וגודלם באגם, בוצעו באקוסאונדר מדעי בעל אלומה מפוצלת 120 kHz, מדגם Simrad EY60. הסקרים בוצעו לאורך 14 חתכים בשעות הלילה, בשעות שבהן הדגים מפוזרים על פני עמודת המים, לעומת שעות היום בהן הם מקובצים בלהקות. לפני כל סקר כויל האקוסאונדר בעזרת כדור סטנדרט. האקוסאונדר המדעי מצויד במערכת GPS המאפשרת רישום דגמים מרחביים דו-ממדיים של פיזור המטרות האקוסטיות. מכיוון שאקוסאונדר מפוצל אלומה מאפשר זיהוי מטרות בודדות, הרי שניתן לאפיין מיקום תלת-מימדי של המטרות בגוף המים. דיגום הדגים נעשה בטווח שמעבר ל-2 מ' מהחישן. חישובי צפיפויות הדגים נעשו בעזרת תוכנה ייעודית לעיבוד נתונים הידרואקוסטיים (Lindem, 2015 Data Acquisition- Balk).

תוצאות ודין

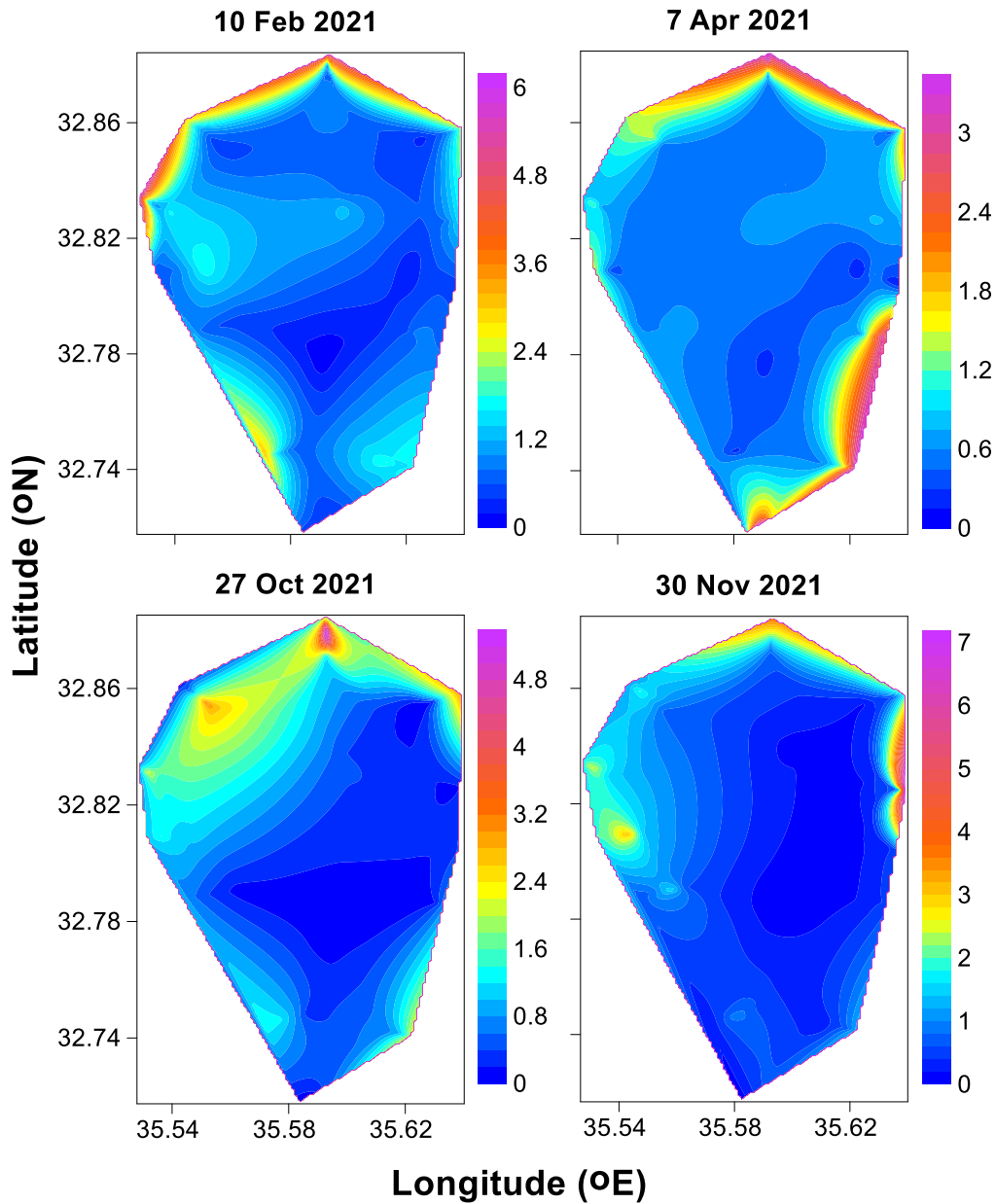
טווח המטרות האקוסטיות חולק לקבוצות: מטרות קטנות עם החזר אקוסטי קטן מ-50dB - משויכות ללרות ולדגיגים, מטרות בעלות החזר של 40dB - 50dB - הינן ככל הנראה של לבנון בוגרים (*Mirogrex terraesanctae*) ומינים נוספים, ומטרות <40dB משויכות לדגים גדולים, חלקם מינים בעלי ערך מסחרי. הדינמיקה העונתית של הדגים משלוש קבוצות הגודל מוצגת באיור 58.

בשנת 2021 צפיפות הדגים הקטנים (50dB - 60dB) הייתה דומה למדי (0.6-0.9 פרטים/מ"ר) בסקרים השונים. הצפיפויות של קבוצות הדגים הבינוניות והגדולות היו הנמוכות ביותר באפריל.

ב-2021 צפיפויות הדגים מכל קבוצות הגודל בכל העונות היו בסדר גודל קרוב לתחומים הנמוכים שנצפו בשנים 2011-2020. הערכים הנמוכים מצביעים על ירידה משמעותית בכל קבוצות הגודל של הדגים בשנים האחרונות בהן המפלס היה גבוה יותר באגם הכנרת. הסיבה לכך יכולה להיות קשורה להתפתחות הלא שגרתית של אזורי הליטורל באגם בהם בעקבות הצמחייה המוצפת ישנה הצטברות של סדימנטים. שינויים אלה עשויים היו להקטין באופן משמעותי את אזורי הרבייה (חוף אבני) של המין הדומיננטי *Mirogrex terraesanctae* (לבנון) בתקופה שהמפלס גבוה, ובכך להוביל לירידה בכמות הדגים בשנים הבאות. מכאן שהתנודות הקיצוניות של מפלס האגם, אשר אפשרו התפתחות צמחייה יבשתית גבוהה ליד קו המים בתקופות של מפלס נמוך והצפתם עם עליית המפלס, השפיעו באופן שלילי על כמויות הדגים באגם. אנו חושבים שהקטנת טווח תפעול המפלסים לטווח הטבעי לאגם, בנוסף לפיקוח ואכיפת חוקי הדייג יהיו חיוביים לאוכלוסיות דגי הכנרת. בשנת 2021 הצפיפות הממוצעת של דגים הגדולים מ-60dB הייתה 1.1 פרטים / מ"ר. זהו שליש מהממוצע שנרשם מאז 2011, אז נעשה לראשונה שימוש באקוסאונדר האקוסטי החדש (Simrad EY60). במשך שלוש השנים שקדמו לשנת 2021, 2018, 2019, ו-2020, צפיפות הדגים שגדולה מ-60dB הייתה 2.1, 1.4 ו-2.6 למ"ר, בהתאמה. העלייה הגדולה במפלס המים בחורף – אביב 1992 ו-2003 גרמה לעליה גדולה בכמות הדגים בחודשים העוקבים. התופעה קשורה בהצלחת הרבייה של הלבנון בליטורל האבני. בניגוד לכך, העלייה הגדולה של מפלס המים ב-2019 וב-2020 לא גרמה לגידול משמעותי בצפיפות הדגים בשלוש השנים האחרונות. הדבר עשוי להיות קשור בשינויים הגדולים שחלו באזור הליטורל עקב השתלטות הצמחייה השקועה במים.



איור 58: דינמיקה עונתית של דגים מקבוצות גודל שונות בשנת 2021 באגם הכנרת. הנקודות האדומות המלאות מייצגות את הערכים ב-2021, הנקודות השחורות הריקות מייצגות את הערכים של 2011 – 2020. השטחים מייצגים את גבול השונות ב-2011 – 2020. הנתונים מצביעים על כך שצפיפות הדגים מקבוצות גודל שונות בשנת 2021 הייתה נמוכה למדי.



איור 59: תפוצה מרחבית של דגים באגם הכנרת ב-2021. צפיפות דגים ניתנת בפרטים למטר מרובע (ind./m^2)

ספרות

Balk H, Lindem T (2015) Sonar 4 and Sonar 5-Pro post-processing systems, Operator manual version 6.0.3, 494 p, Lindem Data Acquisition Humleveiien 4b. 0870 Oslo, Norway.

2.23 ניטור דיג ודגה בכנרת



במימון
אגף הדיג,
משרד
החקלאות

ניר שטרן, גדעון גל, דוד קמינגס, ג'יימס שפירו

- זוהי השנה הראשונה לניטור זה, ובמהלכה נבנה מתאר לשנים הבאות
- הדיג בכנרת מהווה חלק חשוב משירותי המערכת האקולוגית בכנרת
- ניטור סדיר של דיג ודגה הינו הכרחי להבנת מצב בריאות המערכת האקולוגית

מטרת המחקר

ניטור סדיר של דיג ודגה ברחבי הכנרת יספק מידע עדכני עבור מצב חברות הדגים לאור השינויים הביזויים והא-ביזויים שמתרחשים באגם. מטרת המשנה הן:

- א. ניטור מאמץ הדיג באגם ע"י סקירה של מספר סירות הדיג הפעילות והערכת השלל הנסחר.
- ב. הערכת גודל אוכלוסיות הדגים ע"י דיגום סדיר ומעקב אחר התפלגויות הגדלים וגילאי הדגים.
- ג. הערכת מצב אוכלוסיות המינים המסחריים ע"י ניטור תדיר של אורך ומשקל הגוף של הדגים.
- ד. הערכת עונתיות הרבייה של דגי הכנרת המסחריים ע"י דיגום סדיר ומדידת המצב הרבייתי.

רקע

בעוד שבאגם הכנרת נפוצים קרוב ל-25 מיני דגי גרם, ענף הדיג המקומי מתבסס רק על כתשעה מינים השייכים לשלוש משפחות: האמנוניים (Cichlidae), הקרפיוניים (Cyprinidae), והקיפונייים (Mugillidae). למרות היותו ענף מצומצם בגודלו, לדיג בכנרת ישנה חשיבות כלכלית ותרבותית רבה עבור תושבי האזור והוא מהווה רכיב חשוב בשירותי המערכת האקולוגית של האגם.

על מנת לייעל את תפוקת האגם לשירות מערכת זה, ישנו מאמץ שנתי לאכלס את האגם בשלושה מינים ייעודיים לדיג: אמנון הגליל ושני מיני קיפונים. יחד עם זאת, מידע עדכני עבור מאמץ הדיג, גודל האוכלוסיות המסחריות והרכב השלל במרחב ובזמן אינו קיים מאז הופסק בשנת 2019 עם היציאה לגמלאות של אנשי אגף הדיג של משרד החקלאות.

זוהי השנה הראשונה בה תכנית ניטור הדיג והדגה בכנרת נמצאת תחת אחריות חיא"ל והיא נועדה להמשיך תכניות ניטור קודמות של אגף הדיג אשר פעלו בעבר באופן סדיר, יחד עם תוספת של פרמטרים חדשים.

מטרות העל של תכנית ניטור זו הינן הערכת גודל אוכלוסיית הדגים המסחריים באגם, ומצבם, ודיוק עונת הרבייה.

מידע זה יושג ע"י איסוף וניתוח נתוני שלל דיג מתוך סקרים באתרי הפריקה השונים (דיגי רשתות העמידה במעגן טבריה ומעגן גינוסר), נתוני שלל של סירת דיג ההקפה בקיבוץ עין גב, והערכת גילאי הדגים ומצב הרבייה ע"י דיגום מוסדר בתדירות של חודשיים.

נתוני הפריקה של הדגים נאספו בשנת 2021, החל מסוף חודש מרץ, ע"י שני סוקרים בימים ובשעות שונות ובתדירות של מינימום 15 ביקורים במעגנות בחודש. במהלך הביקור במעגנה נספרו כלי השיט הפעילים באותה יממה ותועד הרכב המינים והכמויות של כל מין בשלל הפריקה.

בנוסף, במהלך 2021 בוצעו שני דיגומים ע"ג ספינת ההקפה של קיבוץ עין גב מהם נאספו נתוני אורך, משקל, גיל, ע"י ספירת טבעות הגידול על גבי קשקש הדג, ומצב רבייתי של השלל, ע"י שקילה פרטנית של איברי הרבייה של כל זיג. השנה ניתן דגש על אמנון הגליל *Sarotherodon galilaeus*, המין המסחרי והרווחי ביותר מבין דגי האגם.

דו"ח זה מציג תוצאות ראשוניות מתוך שנת הניטור הראשונה תוך כדי השוואת הנתונים שנאספו מול נתוני העבר של אגף הדיג, משרד החקלאות.

תוצאות ודיון

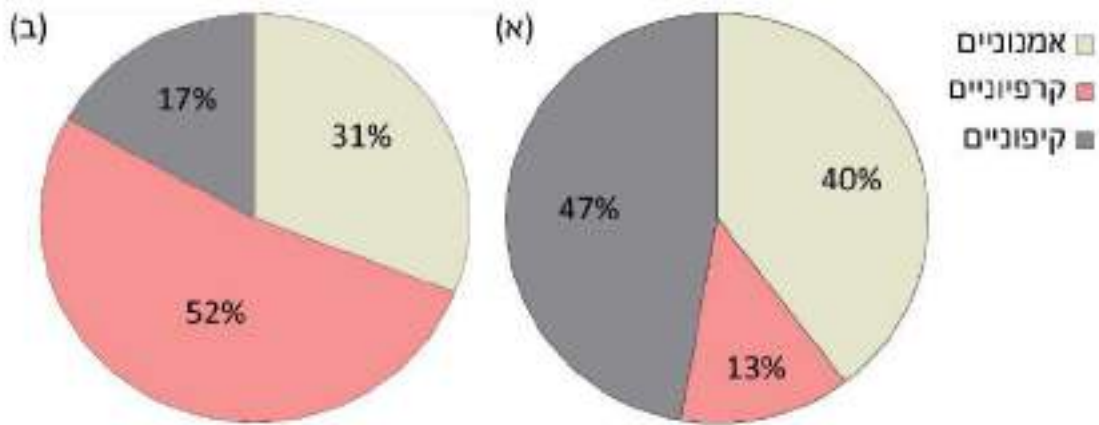
1. ניטור דיג

סקירת שלל הדיג – אפריל עד דצמבר 2021

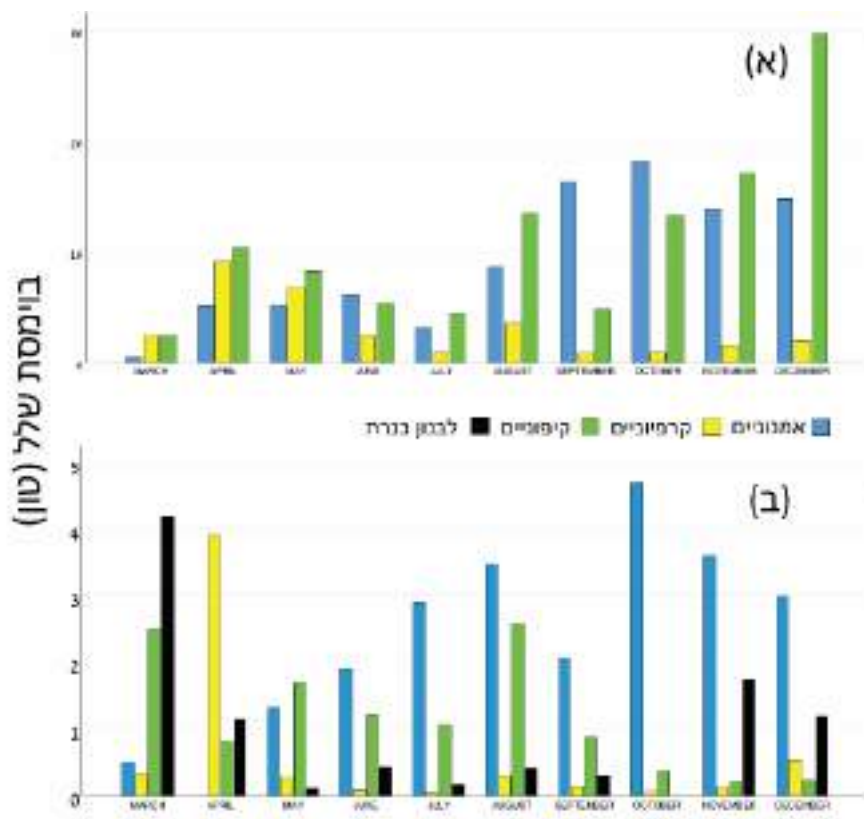
בבחינת נתוני השלל הכללי נצפו הבדלים ביחס המשקלי של משפחות הדגים השונות בין שתי שיטות הדיג (איור 60). בדיג רשתות העמידה נראה כי שני מיני הקיפוניים היוו את הפרקציה הגדולה ביותר (47%), ככל הנראה משקף את שללם של סירות הדיג המתמחות בדיג קיפוניים (בורים). לעומת זאת, ברשת ההקפה של קיבוץ עין גב הקרפיוניים היוו את הרכיב הגדול ביותר (52%) כתוצאה מדיג בלעדי של לבנון הכנרת *Mirogrex terrasanctae* אשר נמצא רוב השנה במרחב הפלאגי של האגם ונדוג בשיטה זו באופן בלעדי.

בחלוקה לפי חודשים נראה כי שלל האמנונים הגיע לשיאו בחודשי הסתיו עבור שתי שיטות הדיג, בהתאמה לסוף עונת הרבייה של האמנונים ועזיבתם את אזור הליטורל אל עבר המרחב הפלאגי. במהלך האביב והקיץ נצפתה גם מגמה דומה בשלל הקיפוניים בין שתי שיטות הדיג, אך נראה כי בחודשי הסתיו שלל הקיפוניים מגיע בעיקר מרשתות העמידה הייעודיות לדיג של משפחה זו (איור 61).

מבחינת הפדיון עבור מיני המטרה השונים, לאמנון הגליל הערך הכלכלי הגבוה ביותר והוא מהווה כ-60% מסך הפדיון הכללי של הדיג בכנרת (טבלה 7).



איור 60: חלוקת שלל הדיג באגם הכנרת (ביומסה) עבור מרץ-דצמבר 2021 ע"פ שלושת משפחות הדגים הנפוצות. (א) שלל דיג רשתות העמידה; (ב) שלל הדיג של ספינת רשת ההקפה בקיבוץ עין גב.



איור 61: חלוקת שלל הדיג באגם הכנרת (ביומסה) לפי חודשים ועבור משפחות הדגים הנפוצות. (א) שלל דיג רשתות העמידה; (ב) שלל הדיג של ספינת רשת ההקפה בקיבוץ עין גב.

טבלה 7: נתוני שלל שנתיים והרווח הכלכלי עבור מיני דגי המטרה של שתי שיטות הדיג באגם כנרת עבור 2021*

שלב	א. הגליל	א. הירדן	טברנון	קיפון	בינית	כסיף	קרפיון	לבנון
שלל בטונות	142.1	8.4	0.9	150.15	18.8	49.7	19.5	24.2
מחיר ₪ לק"ג	23.3	1.1	0.0	10.8	3.1	4.8	7.3	5.0
פדיון ₪	3,304,673	9,411	0	1,623,487	58,868	236,137	141,629	120,920

* הנתונים עבור שלושת החודשים הראשונים חושבו כמוצעים של 2015, 2016, 2018, 2019

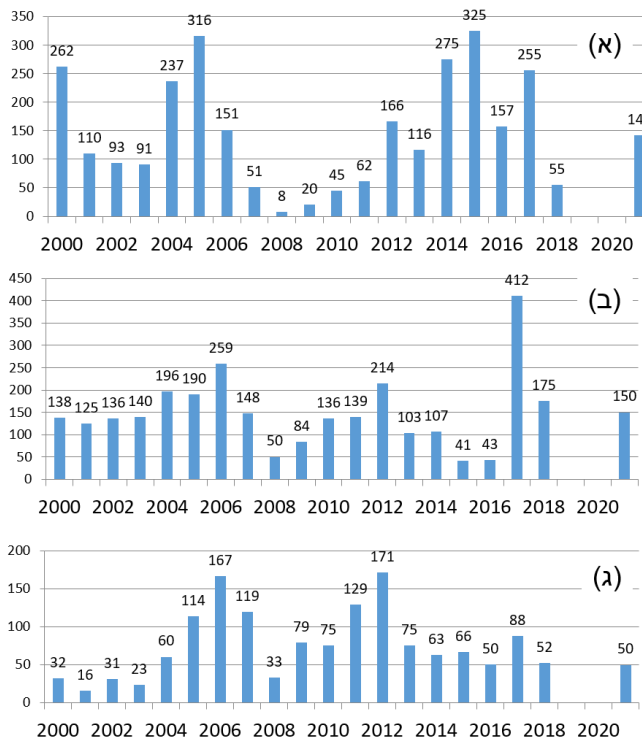


השוואת נתוני שלל מול נתוני עבר

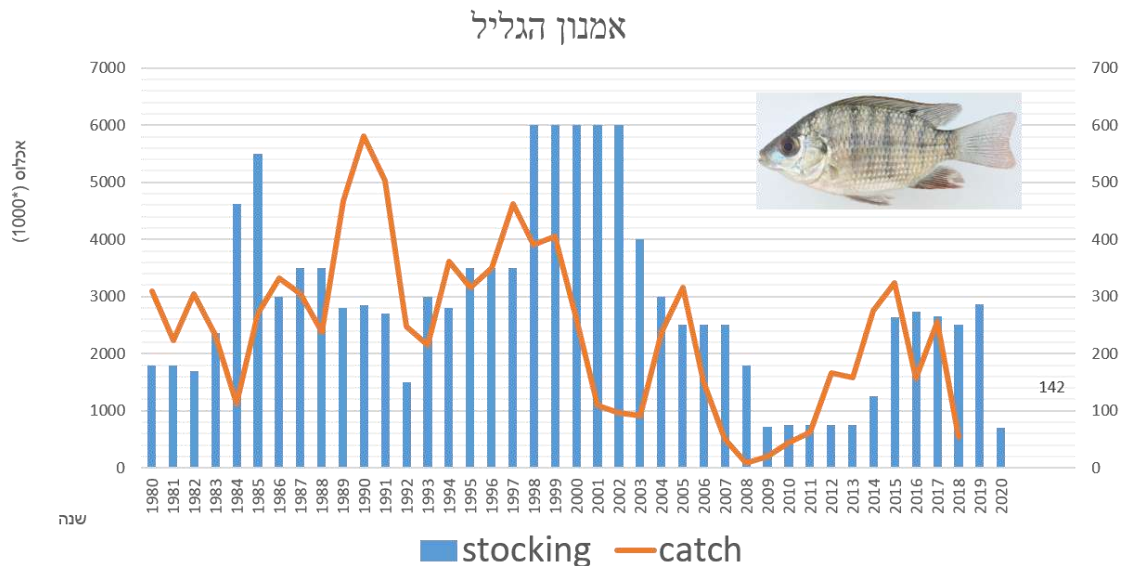
נתוני שלל רשתות העמידה שנאספו ע"י אגף הדיג מתחילת המילניום עבור שלושת המינים המרכזיים: אמנון הגליל, קיפון בורי וכסיף, הראו תנודות ומגמות דומות לאורך השנים (איור 62). הדמיון בתנודות אלו קשור ככל הנראה לתנאים הסביבתיים באגם, ובעיקרם גובה המפלס ועונתיות של מיני הפיטופלנקטון והזואופלנקטון באגם, אשר משפיעים על חברת הדגים, ללא קשר לזהותם הטקסונומית או לצרכיהם הביולוגיים.

השוואת נתוני האכלוס מול השלל באמנון הגליל

באמצעות שימוש בנתוני שלל ואכלוס של אמנון הגליל משנת 1980 ועד היום, ניתן היה לבחון האם קיים קשר בין גודל האכלוס לבין האוכלוסייה הנדוגה. במילים אחרות, האם לאחר שנתיים ממועד האכלוס, שהוא פרק הזמן בו המאוכלסים הצעירים מתגייסים לשלל, נצפתה עלייה כלשהי בדיג האמנונים באגם. ככל הנראה, עקב העובדה כי היקף ושיטת האכלוס שונתה מספר פעמים במהלך התקופה, לא נצפה קשר ברור בין המשתנים הללו (איור 63).



איור 62: השוואה רב-שנתית של נתוני השלל (ביומסה בטון) של שלושת המינים המסחריים העיקריים בכנרת: (א) אמנון גליל; (ב) קיפון בורי; (ג) כסיף שפל עין.

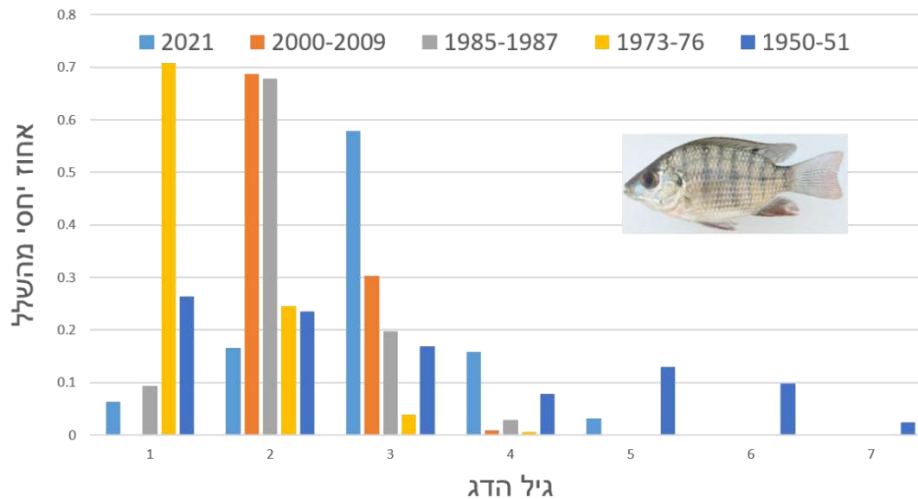
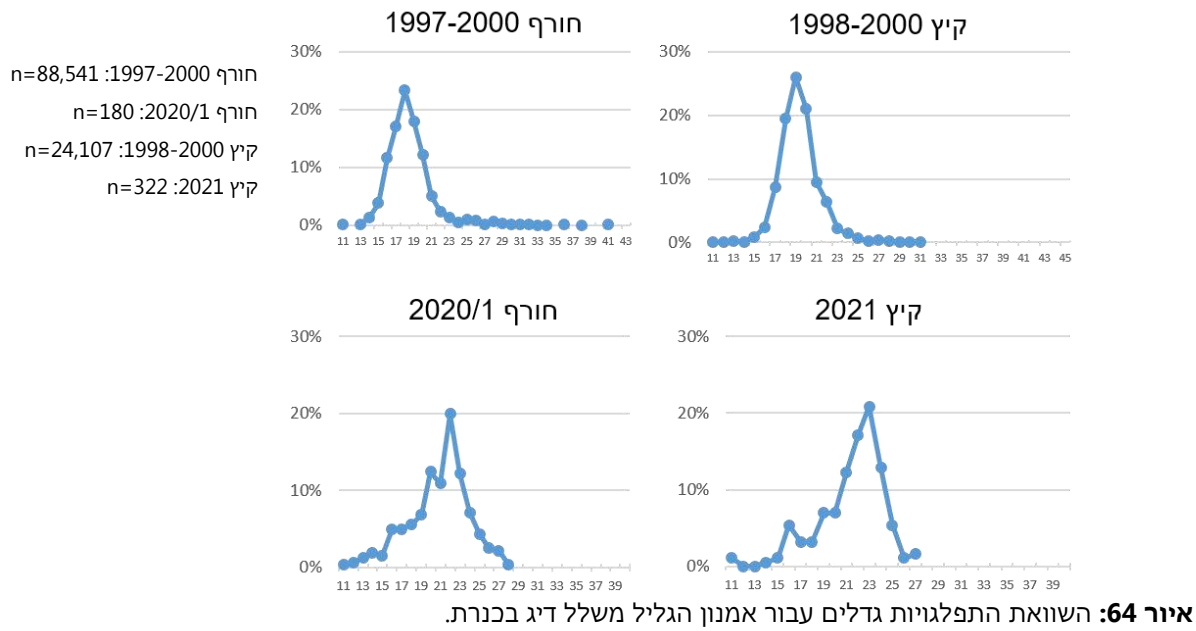


איור 63: השוואה רב שנתית עבור נתוני השלל (ביומסה בק"ג) של אמנון גליל בכנרת (גרף כתום) אל מול ממדי אכילוס הדגיגים באותה שנה (עמודות כחולות).

2. ניטור דגה (מיקוד באמנון הגליל)

השוואה של קבוצות גודל מול נתוני עבר

בהשוואה בין עקומות אורכי הדגים בין השנים 1997-2000 לשנת הניטור הנוכחית נצפו הבדלים בחורף ובקיץ אשר כללו ממוצע דגים גדול יותר בשנת הניטור הנוכחית מול נתוני העבר (איור 64). תוצאה זו מצביעה ככל הנראה על ההשפעה של הגדלת גודל עין הרשת המינימלית בתקנות הדיג העדכניות. במקביל למדידות הדגים, נעשתה הערכה של גילאי הדגים ע"י ספירת טבעות הגידול בקשקשי הדגים. שיטה זו מקובלת בספרות המדעית ובוצעה גם בניטורי העבר של אגף הדיג. כמו כן, על מנת לתקף את השיטה, נאספו 30 פרטים של אמנון גליל בעלי גיל ידוע מבריכות הגידול של אגף הדיג בקיבוץ גינוסר. בהשוואה היסטורית של האחוז היחסי לכל קבוצת גיל בשלל הדיג, נראתה עלייה משמעותית של דגים בטווח הגיל שלוש מול נתוני העבר, ככל הנראה תוצר נוסף של הגדלת העין ברשת הדייגים (איור 65). בנוסף, נראה כי נתוני העבר הרחוק מ-1950 1951 כללו פרטים בגילאים של 5-7 אשר לא נצפו מאז. ייתכן כי תוצאות אלו נקבעו עקב הערכת יתר של טבעות הגידול בהשוואה לנהוג כיום וכי הן אינן משקפות נכונה את גילאי הדגים.



3. המשך הניטור

פרויקט זה יימשך גם בשנים הבאות, בהן נשכלל ונעדכן את שיטות הניטור השונות. ניטור ליטורל - באביב הקרוב ייערך ניטור הליטורל הראשון באמצעות מכשיר אלקטרו-שוקר חדש שנקנה ע"י המעבדה לחקר הכנרת, חי"ל. באמצעות ניטור זה נוכל להעריך ולתאר את הרכב חברת הדגים בבתי הגידול השונים ברחבי הליטורל באגם, וכן לכמת את עוצמת הרבייה והקינון של מיני האמנונים. ניטור דגה - ניטור על גבי סירת הדיג של קיבוץ עין גב ייערך בתדירות של כל חודשיים ובאמצעות נוכל לקבל תמונת מצב מהימנה עבור עונתיות הרבייה של מיני המטרה השונים דרך מדידת ערכי ה Gonado-Somatic Index (GSI), אשר מהווים את המשקל היחסי של איברי הרבייה מול משקל הדג. הערכת גודל האוכלוסייה - לאחר שנאסוף ונסכם את כלל התפלגויות הגדלים של אמנון הגליל ונצליב את הנתונים עם גילאי הדגים, נוכל להעריך באמצעות מדדים סטטיסטיים את גודל האוכלוסייה. נתון זה הינו חיוני לטובת הערכת המצב האקולוגי של המין ולקבלת החלטות ממשקיות עתידיות כגון ניהול מפלסי מים ואיכוס הדגים.

2.24 חלזונות וצדפות בליטורל



במימון
רשות
המים

תמר זהרי, בני סולימני, דייב קמינגס, ניר קורן

- 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' אשר במהלכם נעלמים מרצועת הליטורל התשתית האבנית, הכיסוי הצמחי ולגונות הבטיחה.
- 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'. המינים הטבעיים לכנרת נמצאים בריכוזים נמוכים ב-2-3 סדרי גודל.
- אנו משערים כי החלזונות הפולשים אוכלים כל חומר אורגני בסדימנט, כולל ציסטות של פרידיניום ובכך תורמים 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 מהאוני' 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 עדינה דולב תעדה 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 (חוקוק, גינוסר, חמי טבריה, גופרה, שיטים; איור 66). בכל אתר נדגמות רכיכות מהקרקעית 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 על חומר חי, מיד לאחר הדיגום, או למחרת.



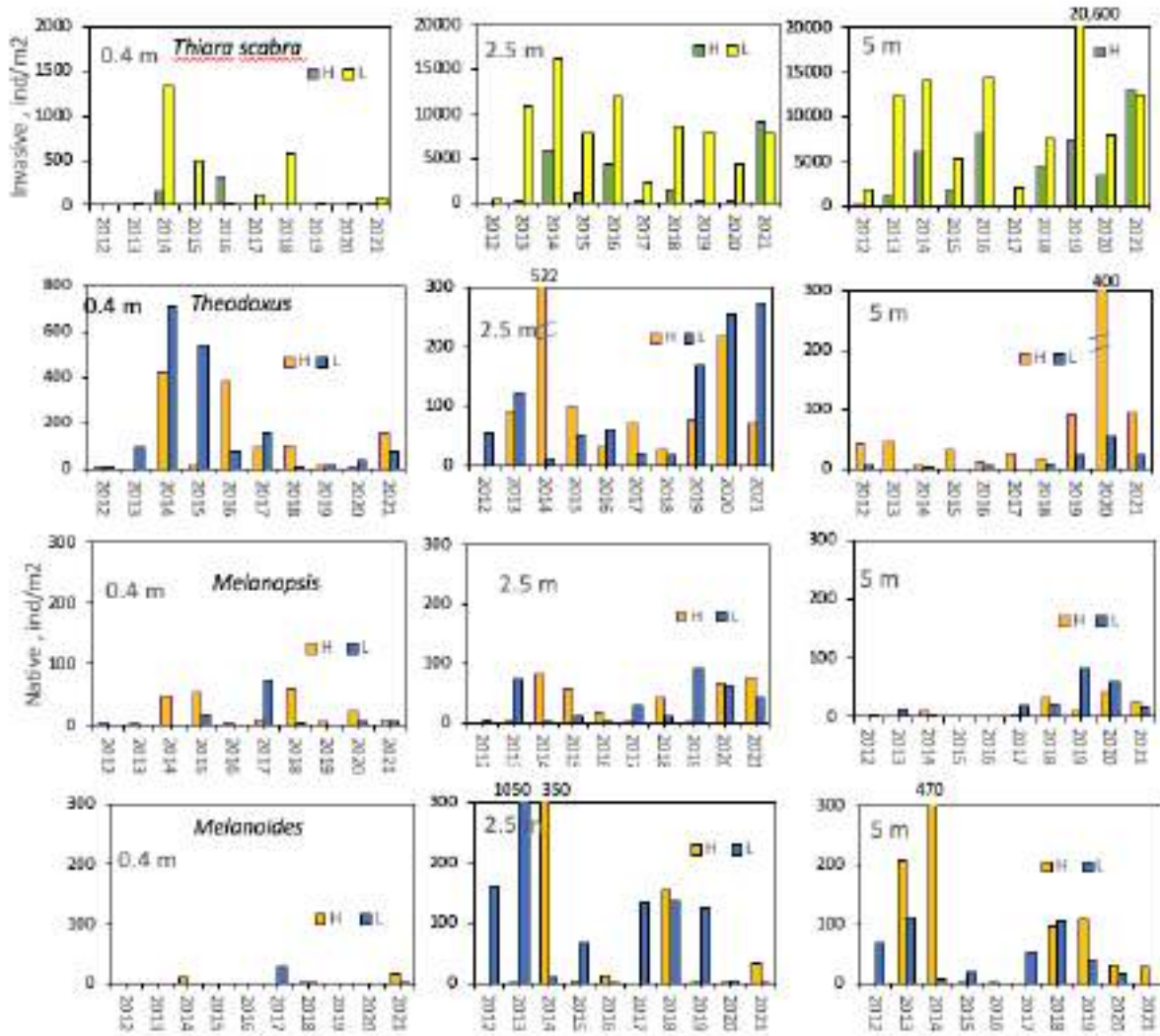
איור 66: חמשת אתרי הדיגום לחלזונות וצדפות (בעיגול באדום). בכל אתר דוגמים חלזונות בשלוש נקודות דיגום לאורך חתך מהחוף לים הפתוח, בנקודות בהם עומק המים 0.4, 2.5 ו-5 מ'.

תוצאות ודין

חלזונות:

עקב החורף הגשום של 2021/2020, חורף שהחל עם כנרת כמעט מלאה (מפלס מינימום של -210.75), עליית המפלס ב-2021 הייתה מזערית בלבד. השנה בחרנו להשוות בין ריכחי החלזונות באביב, בעת מפלס המקסימום השנתי, לסתיו, במפלס המינימום השנתי, עבור כל אחד משלושת עומקי הדיגום. תוצאות ניטור החלזונות, 2012-2021, מוצגות באיור 67. הנתונים המוצגים הם ממוצע ריכח החלזונות מ-5 אתרי הדיגום, עבור כל תאריך ועומק דיגום. באיור זה בולטות לעין מספר תופעות:

- הריכחים של טיארה בעומקים 2.5 ו-5 מ' גבוהים 2-3 סדרי גודל מאשר הריכחים של המינים הטבעיים. בסתיו (מפלס מינימום שנתי) ריכחי הטיארה ~10,000 פרטים למ"ר. רק בעומק 0.4 מ' התמונה משתנה: ריכחי הטיארה, נמוכים יותר מאשר במים היותר עמוקים (לרוב >1000 למ"ר), וריכחי התיאודוקסוס (סהרונית) דומים לריכחי הטיארה.
- בממוצע, ריכחי הטיארה גבוהים יותר במפלס נמוך מאשר במפלס גבוה. התופעה חזרת על עצמה בשלושת עומקי הדיגום. לגבי המינים הטבעיים בכנרת, אין כמעט הבדל בריכחים בין הסתיו לאביב.
- המגדלית (*Melanoïdes*) כמעט ונעלמה לחלוטין מאזור המים הרדודים.



איור 67: סדרת זמן של ריכוזי החלזונות בקרקעית (ממוצעים של 5 אתרים) בשלושת עומקי הדיגום, 0.4, 2.5 ו- 5 מ', עבור 4 מיני החלזונות הגדולים, במפלס השנתי המרבי באביב (H) ובמפלס השנתי המזערי בסתיו (L) כל שנה. למעלה, בצבעי צהוב וירוק ובסקלת ציר Y של 0-20,000 - המין הפולש, טיארה סקברה. בהמשך, בצבעי כחול וכתום - שלושת המינים הטבעיים לכנרת. יש לשים לב להבדלים בסקאלה של הציר האנכי בין המינים השונים ובעומקים השונים.

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-2021 לא מצאנו אפילו פרט אחד של המינים הטבעיים הזעירים, ביטיניה זעירה, וקרינית הירדן. מאידך, גם לא מצאנו אף פרט משני המינים הפולשים החדשים שנצפו ב-2018, פירגופורוס וטרביה. ידוע 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.

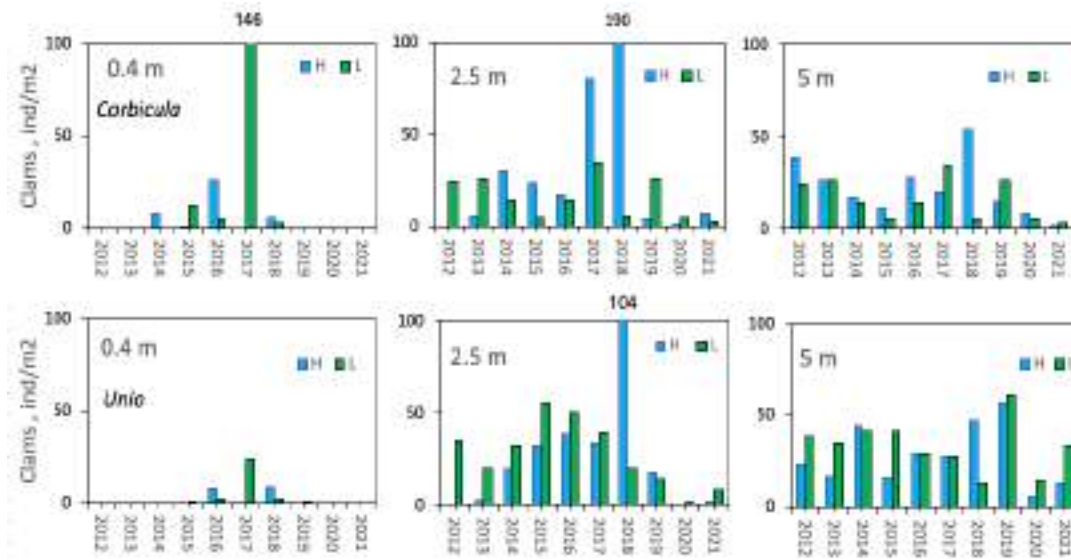
השערה נוספת שמצריכה בדיקה: בריכוזים העצומים של החלזונות בסדימנט של הליטורל – הם ניזונים מחומר אורגני ויתכן כי מחסלים כל מה שנמצא בסדימנט, כולל ציסטות פרידיניום, ותורמים להעדר פריחות של אצה רצויה זו, בכך מעודדים פריחות של מיני אצות לא רצויים כמו ציאנובקטריה.

צדפות:

בכנרת 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 ממוצע ריכחי הצדפות נמוך מאד, לרוב בין אפס עד עשרות בודדות של פרטים למ"ר (איור 68). לא ניכרים הבדלים גדולים בין הריכחים במפלס גבוה למפלס נמוך.



איור 68: סדרת זמן של ריכחי צדפות בקרקעית הכנרת (ממוצעים של 5 אתרים) בשלושת עומקי הדיגום, 0.4, 2.5 ו- 5 מ' עבור 2 מיני צדפות (קורביקולה - למעלה, אוניו - למטה), במפלס השנתי המרבי באביב (H, עמודות כחולות) ובמפלס השנתי המזערי בסתיו (L, עמודות ירוקות) כל שנה.

מהמין פוטומידה מצאנו במשך השנים רק פרטים בודדים (לא מופיע באיור). ב- 2020 לא מצאנו אפילו פרט אחד של מין זה. ב-2021 מצאנו רק 4 פרטים של המין, ב-2 דגימות מתוך סה"כ 30 הדגימות במהלך השנה. האוניו והפוטומידה הם מינים בסכנת הכחדה עולמית, ושינויי המפלס בכנרת בטווח גדול בהרבה מהטבעי, תורמים להכחדתם.

2.25 דיגום אוטומטי ברזולוציה גבוהה במרכז האגם



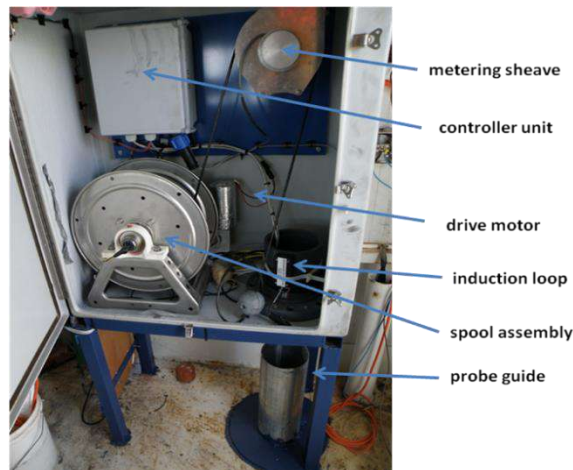
במימון
רשות
המים

ורנר אקרט, בני סולימני, מיקי שליכטר

- בחורף 2020/21 התרחש היפוך מלא של עמודת המים בין ה- 30 ל- 31 לינואר 2021.
- טמפרטורת המים בתקופת הערבוב עמדה על 16.3°C .

רקע

בשנת 2002 החלה המעבדה לחקר הכנרת לנטר את עמודת מי האגם בעזרת ציוד אוטומטי המופעל מדוברת האקוורפט 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 (Eureka, Austin, Texas) MANTA II ומפרופיילר עצמאי מותאם למקום, אשר פותח על ידי חברת Instrumental Solutions Inc, Vicksburg, Mississippi.

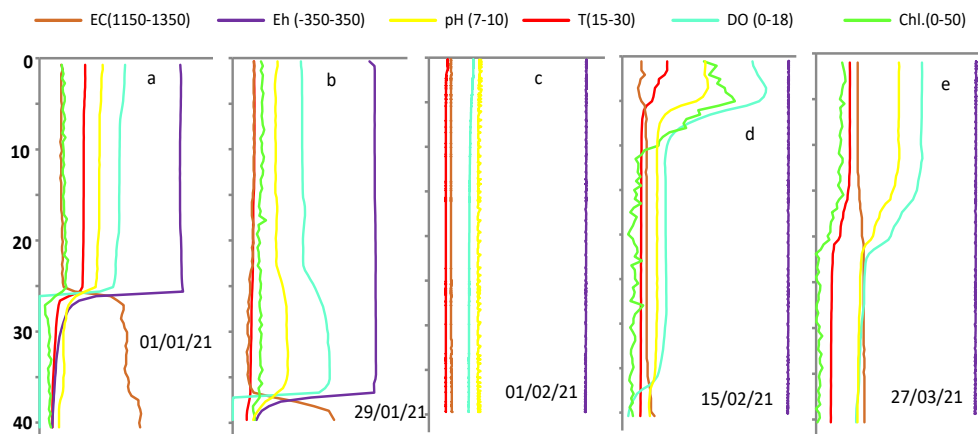


איור 69 : יחידת הפרופיילר האוטונומי ISI-AutoReel

דיגום הפרופילים החל בסוף דצמבר 2009 במדידות טמפרטורה, עומק, חמצן מומס, pH, מוליכות, פוטנציאל חמצון/חיסור, עכירות וכלורופיל a, 1-4 פעמים ביממה לאורך עמודת המים ברזולוציה של 0.5 מטר. הדיגומים הופסקו ב- 27 למרץ 2021 כתוצאה מבעיה ברכיבים של מערכת המיחשוב של הפרופיילר וכן מבעיות באספקת החשמל שגרמה לחוסר תפקוד מלא של הפרופיילר. אנו פועלים לתיקון מקיף של כלל המערכת כדי להבטיח המשך רציפות באספקת מידע בעתיד.

תוצאות מ-2021

בדומה לשנתיים שחלפו, בתחילת 2021 עמודת המים של הכנרת הייתה עדיין משוכבת כאשר התרמוקלינה והכמוקלינה היו בעומק 26 מטר (איור 70a). השיכוב של עמודת המים שמר על יציבות עד ל- 22 בינואר, כאשר הפרשי הטמפרטורה בין האפילימניון להיפולימניון ירדו מ- 2°C ל- 1°C (הנתונים לא מוצגים). ב- 29 לינואר הפרשי הטמפרטורה היו פחות מ- 0.3°C, מה שהביא לירידת הכמוקלינה ל- 28 מטר (איור 70b). עירבוב מלא של עמודת המים נראה מ- 1 לפברואר, עם טמפרטורות מים שעמדה על 16.3°C (איור 70c). באמצע פברואר מזג אוויר חם יחסית גרם לשיכוב תרמי זמני של עמודת המים (איור 70d) אשר בא לידי ביטוי בעליה בטמפרטורת המים ב- 5 המטרים העליונים יחד עם עליה בריכוז כלורופיל a וחמצן מומס. יש לשים לב כי באותו הזמן נצפתה ירידה חדה בריכוז החמצן המומס סמוך לקרקעית. לצערנו הפרופיל האחרון שנמדד ב- 2021 והיה ב- 27 למרץ, כבר הראה שיכוב יציב עם אפילימניון נפרד לחלוטין מההיפולימניון באמצעות תרמוקלינה בעומק 20 מטר.



איור 70: פרופילים אופייניים של טמפרטורות, חמצן מומס, כלורופיל, pH, עכירות, פוטנציאל חמצון/חיסור (ORP) ומוליכות חשמלית (EC) במהלך תהליך השיכוב בעמודת המים של תחנה A ב- 2021. e-a תאריכים ספציפיים.

2.26 פרופיילר אוטונומי בתחנה G



**במימון
רשות
המים**

ורנר אקרט, גדעון גל, בני סולימני, מיקי שליכטר, ולדימיר שקולניק, יורי לצ'ינסקי

- **עמודת המים בתחנה G מושפעת פחות מגלים פנימיים (סיישים) בהשוואה לתחנה F.**
- **בתקופת האביב, הדוגם הרב ערוצי קלט את נוכחותם של מי הירדן במהלך הדיגום הרציף בעומק 1 מטר.**

רקע

ב- 2018 התקבל מימון מרשות המים שמטרתו הייתה התקנת פרופיילר אוטונומי, נוסף לזה שבתחנה A, בין שפך הירדן לתחנה A. לאחר סקר שוק מקיף בין ספקים שונים הגענו להסכם עם חברת Instrumental Solutions Inc (ISI, Vicksburg, Mississippi, US) לרכישת מערכת ניטור צפה מתוצרתה. המערכת כוללת: יחידה של פרופיילר אוטומטי (AutoReel), תחנה מטאורולוגית ופאנלים סולאריים עם מצברים לאספקת חשמל. המערכת הגיעה בינואר 2020 ועליה הותקנו אמצעי הגנה נגד ציפורים (חיווט במתח גבוה נגד ציפורים מסוג Dual 4, 4J) וגדר מתכת גבוהה למניעת ונדליזם (תמונה עליונה). בחודש אוגוסט 2020, לאחר השלמת האבזור, המערכת הועמדה בנקודת העגינה שלה: 32 52.195 E 36.309 N, בקרבת תחנה G, כאשר עומק המים המרבי באותו הזמן עמד על 22.5 מטר.

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 הותאמו 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 חיזור, 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



תמונה 3: תחנה מטאורולוגית Lufft WS-600

חלק ממערך המדידה של הדוברה בתחנה G הינה תחנה מטאורולוגית קומפקטית מסוג Lufft WS-600 (תמונה 3) מתוצרת 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, מהירות רוח. על מנת לקבל תקשורת מרחוק והעברת נתונים הותקן במערכת ראוטר סלולרי (rut 240 Teltonika), המחובר לכניסת ה-LAN של מחשב ה-Autoreel.

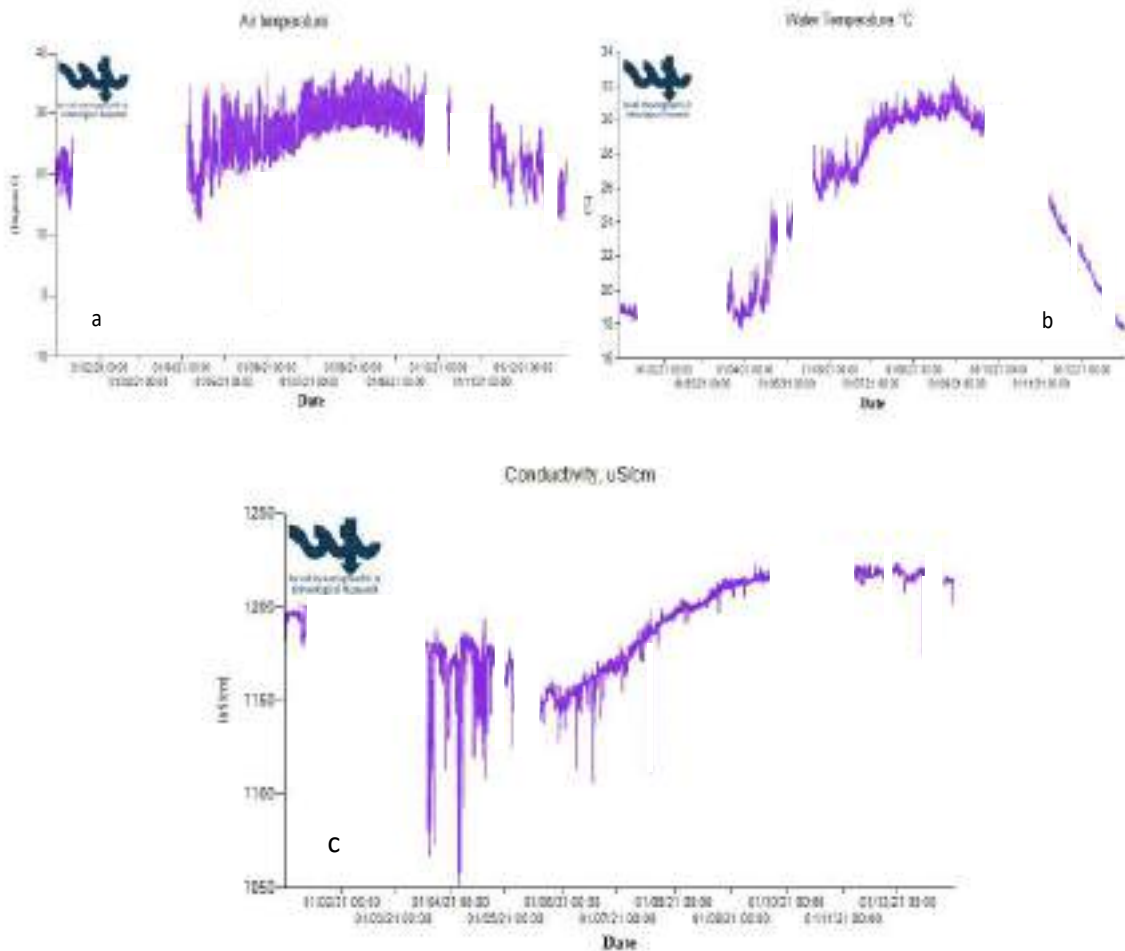
ב- 2021 הפרופיילר תוכנת למדידה של 2-5 פרופילים אנכיים בעמודת המים כל 24 שעות, ברזולוציה של 0.5 מטר בין נקודות המדידה. בין פרופיל אחד למשנהו, הדוגם הרב ערוצי עמד בעומק 1 מטר למדידות רצופות בכל הסנסורים בפרקי זמן של כל 10 דקות יחד עם מדידות של נתוני מזג אוויר מהתחנה המטאורולוגית.

חלק ממערך המדידה של הדוברה בתחנה G הינה תחנה מטאורולוגית קומפקטית מסוג Lufft WS-600 (תמונה 3) מתוצרת 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, מהירות רוח. על מנת לקבל תקשורת מרחוק והעברת נתונים הותקן במערכת ראוטר סלולרי (rut 240 Teltonika), המחובר לכניסת ה-LAN של מחשב ה-Autoreel.

ב- 2021 הפרופיילר תוכנת למדידה של 2-5 פרופילים אנכיים בעמודת המים כל 24 שעות, ברזולוציה של 0.5 מטר בין נקודות המדידה. בין פרופיל אחד למשנהו, הדוגם הרב ערוצי עמד בעומק 1 מטר למדידות רצופות בכל הסנסורים בפרקי זמן של כל 10 דקות יחד עם מדידות של נתוני מזג אוויר מהתחנה המטאורולוגית.

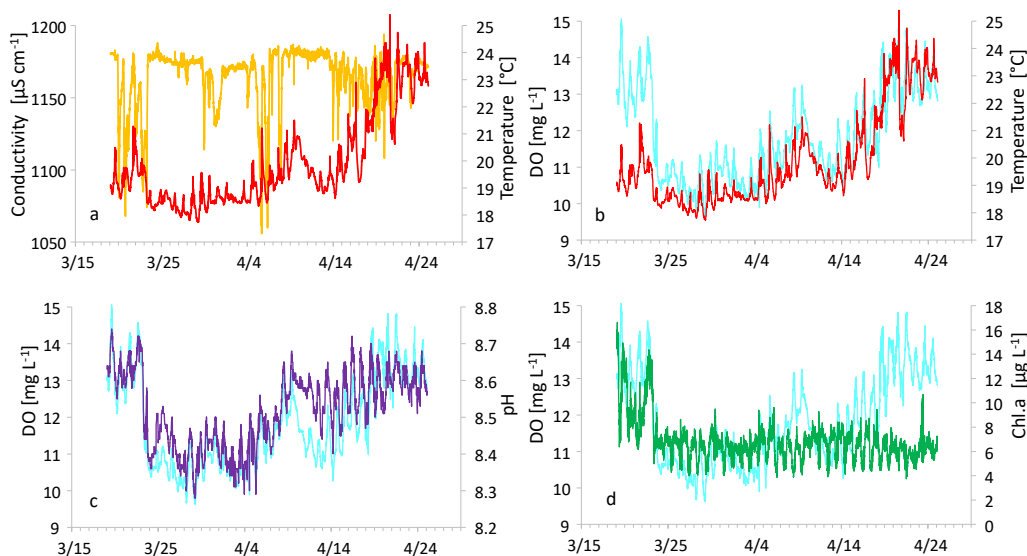
תוצאות מ- 2021

במהלך 2021 סבלנו מבעיות באספקת החשמל בתחילת האביב והסתו, אבל רוב השנה המערכת הייתה תקינה. באיור 71a, ניתן לראות את כל תקופת הדיגום כפי שהיא מוצגת בנתונים של טמפרטורת האוויר מהתחנה המטאורולוגית והטמפרטורות בעמודת המים מהדוגם רב החיישנים (איור 71b). טמפרטורות האוויר הגיעו לשיא באוגוסט ועמדו על 38°C . הטמפרטורות בלילה היו בד"כ נמוכות בכ 10°C משיא הטמפרטורה בשעות היום. טמפרטורות המים הגיעו לשיא של 32°C בסוף ספטמבר עם שינויים יומיים של $1-2^{\circ}\text{C}$. השינויים היומיים הגדולים ביותר נראו בנתוני המוליכות החשמלית באביב כאשר הפרשים היו בסביבות $150\mu\text{S cm}^{-1}$ לעומת הפרשים של פחות מ- $5\mu\text{S cm}^{-1}$ בקיץ (איור 71c). ברוב ימות השנה המוליכות החשמלית הראתה מגמת עליה אופיינית לאפילימניון של הכנרת מ- $1140\mu\text{S cm}^{-1}$ במאי עד ל- $1220\mu\text{S cm}^{-1}$ בסוף אוקטובר.



איור 71: שינויים עיתיים בטמפרטורת האוויר (a), טמפרטורת המים בעומק 1 מטר (b) ומוליכות חשמלית בעומק 1 מטר בתחנה G ב-2021.

באיור 71 ניתן לראות את השינויים העיתיים של טמפרטורת פני המים (1 מטר) וטמפרטורת האוויר. ניתן לראות בברור את העלייה המשמעותית בטמפרטורות בשל גל החום שהיה בתחילת ספטמבר. בכדי לאפשר הדגמה טובה יותר של השינויים היומיים שורטטו נתוני האביב באופן מפורט (איור 72).

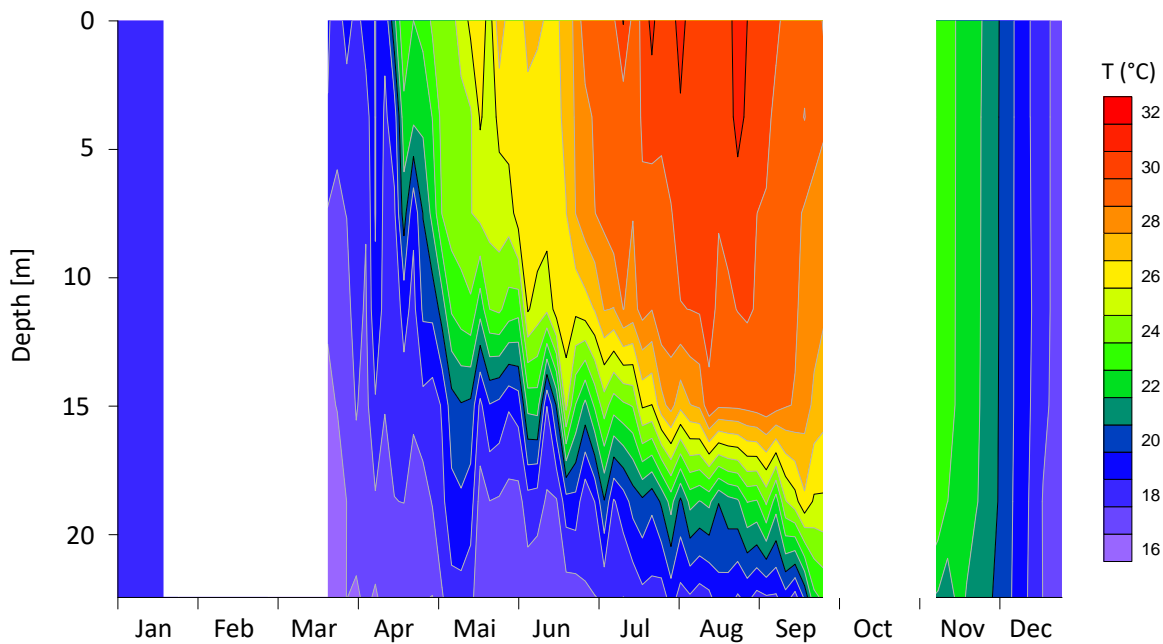


איור 72: שינויים עיתיים בטמפרטורת המים ובמוליכות החשמלית (a), טמפרטורת המים יחד עם חמצן מומס (b), חמצן מומס ו-pH (c) וחמצן מומס יחד עם כלורופיל (d) . הנתונים נמדדו בעומק 1 מטר בתחנה G בין התאריכים ה-19 למרץ ל-26 לאפריל, 2021.

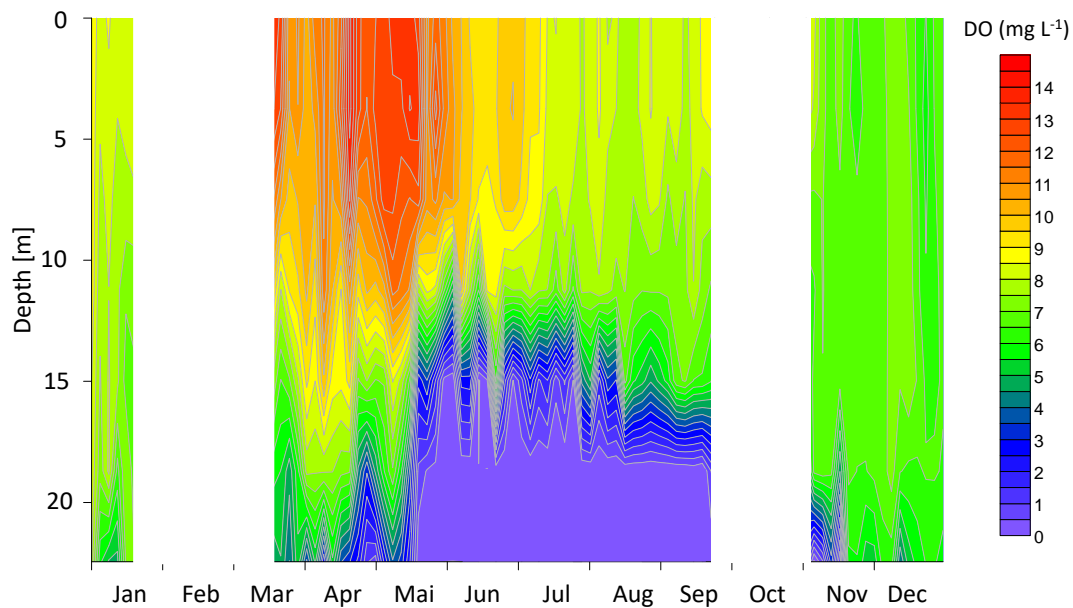


באביב, התנאים ששררו בפני המים של תחנה G הושפעו מאוד מתהליך הערבוב שבין מי הירדן למי הכנרת המלוחים יותר. ניתן לראות תופעה זאת באופן בולט בפיקים השלייים של המוליכות החשמלית בתחילת מרץ ואפריל (איור 72a). הפיקים המקבילים של מוליכות חשמלית, חמצן מומס, pH וכלורופיל a במהלך מרץ (איור 72a-d) עשויים להצביע על כך שמי הירדן הם: 1. חמים יותר ממי הכנרת. 2. עשירים יותר בפיטופלנקטון מה שמסביר את הערכים הגבוהים של חמצן מומס ו-pH. באופן כללי ערכי החמצן המומס והטמפרטורה, כמו גם החמצן המומס וה-pH מראים מתאם גבוה (R) ביניהם עם ערכים של 0.59 ו-0.77 בהתאמה, כנראה בעיקר בשל עליה בקרינת השמש ופעילות פיטופלנקטון גבוהה יותר.

בהתבסס על תוצאות הפרופילים, התפתחות השיכוב התרמי בעמדת המים של תחנה G מסוכמת בגרף איזותרמות (איור 73). ב-2021 טמפרטורת המים קרוב לפני השטח נשארה נמוכה מ-20°C עד אמצע אפריל ולאחר מכן עלתה ל-23°C תוך פחות משבוע. אישור נוסף לתוצאה זאת ניתן לראות באיור 2a7. סמוך לקרקעית ניתן לראות שיכוב זמני במרץ שהפך לקבוע בסוף אפריל. תרמוקלינה יציבה התפתחה בעומק 16 מטר במאי והעמיקה בהדרגה לאחר מכן, כך שלקראת המחצית השנייה של ספטמבר ההיפולימניון בתחנה G נעלם לגמרי. באמצע נובמבר עמדת המים ב-G הייתה מעורבת לחלוטין.

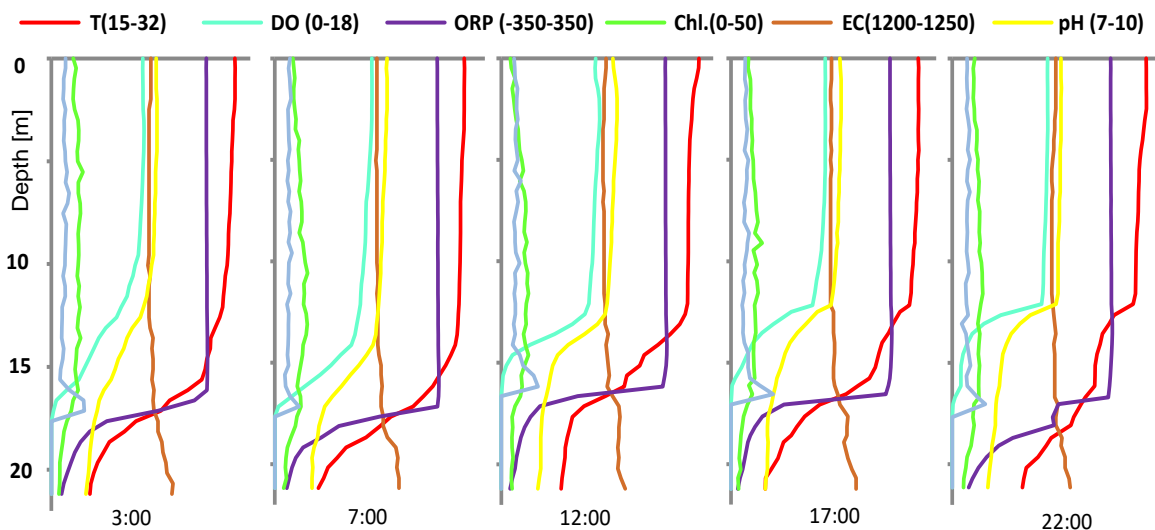


איור 73: איזותרמות (קוים שווי טמפרטורה) בעמדת המים של תחנה G במהלך 2021.



איור 74: דיאגרמת איזופלטות של ריכוז החמצן המומס בעמודת המים של תחנה G במהלך 2021.

ניתן לראות את התגובה הכימית לשיכוב הפיסיקלי של עמודת המים באמצעות ערכי החמצן המומס (איור 74). התנאים בקרבת הקרקעית עקבו אחר שינויי הטמפרטורה, והציגו באפריל תקופה קצרה עם ריכוזי חמצן נמוכים מאוד שלאחר מכן עלו בתחילת מאי לפני שירדו והשכבה הפכה לחסרת חמצן לחלוטין לקראת אמצע מאי. לאחר מכן האוקסיקלינה עקבה במדויק אחר מיקום התרמוקלינה ונעלמה לחלוטין בתחילת נובמבר. באיור 75 מוצגת סדרת פרופילים יומיתים שנמדדו ב-9 לאוגוסט, בתקופת השיכוב, בהפרשי זמן של 4 עד 5 שעות. בתאריך זה הכמוקלינה התאפיינה בירידה חדה בפוטנציאל חמצון חזור (ORP) בעומק 17 מטר המייצג את חלקו העליון של ההיפולימניון. מעניין לציין, כי לא ניתן להבחין כמעט בתנועה אנכית של מיקום הכמוקלינה כפי שמצופה בתקופה זאת של השנה המאופיינת בפעילות חזקה של גלים פנימיים. במטהלימניון ריכוז החמצן המומס ירד בצורה הדרגתית מ-8 ל-0 מג"ל בין העומקים 12 ל-17 מטר, והכמוקלינה לוותה בגרדיאנטים מקבילים של טמפרטורה ו-pH.



איור 75: פרופילים של פרמטרים שונים בעמודת המים שנמדדו מהרפסודה בתחנה G ב-9 לאוגוסט 2021.

2.27 איכות מי הכנרת באמצעות צילומי לוויין המשולבים במערכת SISCAL



**במימון
רשות
המים**

גדעון טיבור, מיקי שליכטר

- טמפרטורת פני המים (SST) בכל האגם הייתה החמה ביותר בחודש אוגוסט עם טמפרטורה ממוצעת של 31.26° וחודש ינואר היה הקר ביותר (18.35°).
- למעט חודשים אוקטובר-דצמבר, טמפרטורת פני השטח הממוצעת הייתה ב-2021 יותר חמה מהממוצע הרב-שנתי.
- הממוצע החודשי של ריכוזי הכלורופיל (Chl a) בכל האגם מראה שהריכוז הממוצע הגבוה ביותר של כלורופיל נרשם בחודש נובמבר (5.46 mg/L) והנמוך ביותר (1.16 mg/L) בחודשים ינואר-פברואר.
- הממוצע החודשי של עומק הסקי בכל האגם נע בין מ-1.8 מטר בחודש יולי ועד 0.7 מטר בחודש מרץ. יחסית לממוצע ב-2020 ישנה ירידה בעומקי הסקי בכל החודשים.
- הריכוז הממוצע הגבוה ביותר של חומר מרחף (6.5 mg/L) היה בחודש דצמבר והנמוך ביותר (2.2 mg/L) בחודש אפריל. למעט חודשים נובמבר-דצמבר ריכוזי החומר המרחף הממוצע היה נמוך מזה שחושב בשנת 2020.
- הממוצע החודשי של קרינה זמינה לפוטוסינתזה (PAR) בכל האגם מראה שהערך הממוצע הגבוה ביותר של קרינה זמינה לפוטוסינתזה (PAR) היה בחודש יוני ($1860 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$) והנמוך ביותר ($1015 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$) בחודשים ינואר-פברואר. השוואה לנתוני 2020 מראה שלמעט חודש פברואר שהיה נמוך ב-2021, בשאר החודשים הריכוזים דומים.

מטרות המחקר

1. בניית בסיס מידע סינופטי רב-שנתי של כל האגם; 2. אספקה שוטפת של אומדני טמפרטורת פני המים, ריכוזי חומר מרחף, עומק סקי, קרינה זמינה לפוטוסינתזה וריכוזי כלורופיל 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 כנרת 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 כיול ובדיקה של האלגוריתמים השונים.

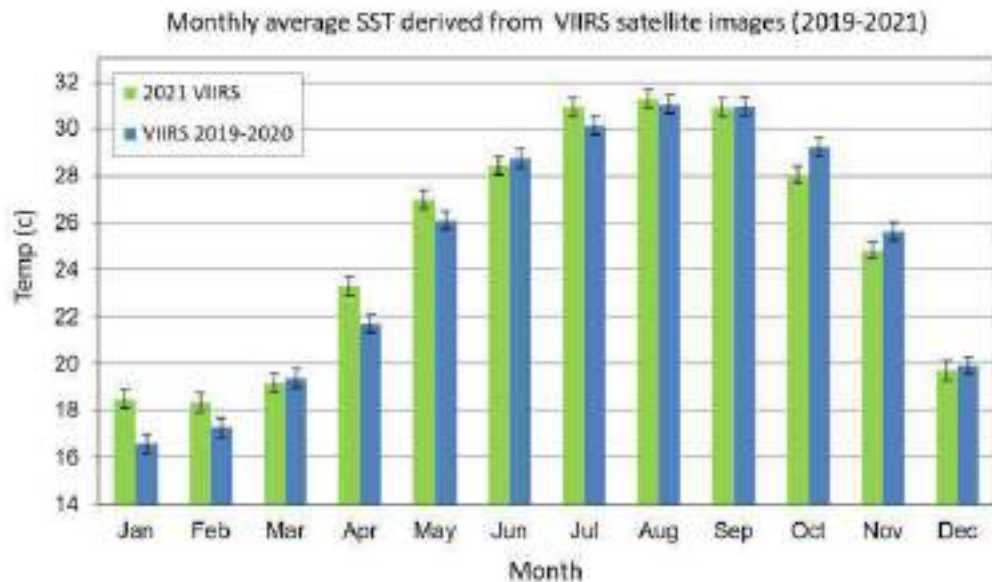
שיטות

- הורדת צילומי הלוויין קרוב ל"זמן אמת", הפעלת אלגוריתמים מתאמים ויצירת מפות של טמפרטורת פני המים (SST), ריכוזי כלורופיל (Chl a), ריכוזי חומר מרחף (TSM), עומק סקי (Secchi depth) ושטף האנרגיה מהשמש באורכי גל 400-700 ננומטר הפנוי לפוטוסינתזה (PAR).
- בדיקה וכיול אלגוריתמים קיימים מול נתוני אמת שנדגמים קרוב לפני השטח (עד חצי עומק סקי) בתחנות הניטור ע"י המעבדה לחקר הכנרת בשעה GMT 8:00~. השנה נעשה שימוש רחב בנתוני תחנה G המשדרת קרוב לזמן אמת.
- אנליזה יומית על בסיס נתוני Sentinel-3 וסינופטי של האגם המתבססת גם על נתוני הלוויין VIIRS.
- הפצת המידע הנאסף לרשויות ולציבור באמצעות אפליקציית GIS באתר האינטרנט של מרכז מידע כנרת ואתר רשות המים (ראה תמונה בכותרת הדו"ח).

תוצאות ודיון

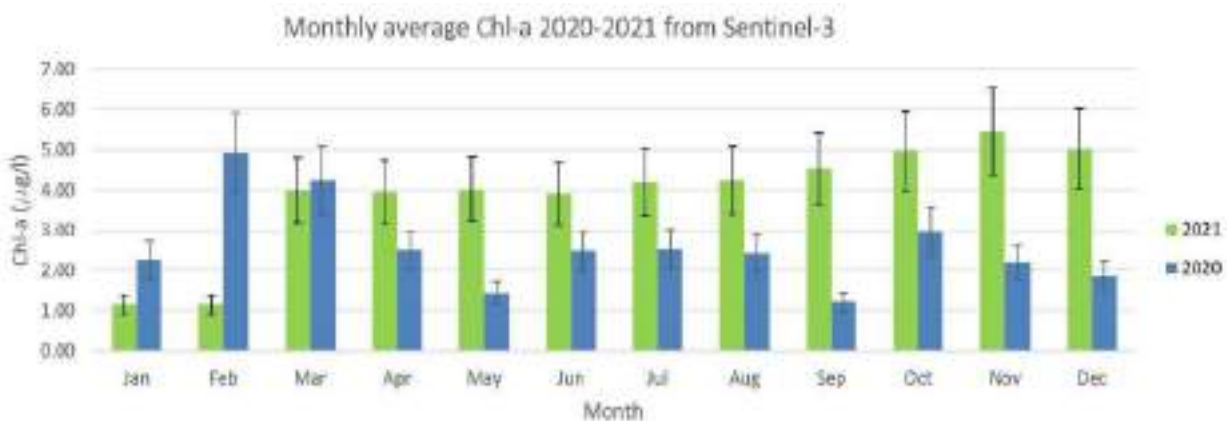
אנליזות סינופטיות:

1. הממוצע החודשי של טמפרטורת פני המים (SST) בשנת 2021 חושב על בסיס 244 צילומי לוויין VIIRS ומוצג באיור 76 יחסית לנתוני ממוצע חודשי שחושב בשנים 2019-2020 מלוויין ה-VIIRS ברזולוציה של 750X750 מטר. באיור ניתן לראות שחודש אוגוסט היה החם ביותר עם טמפרטורה ממוצעת של 31.26° וחודש ינואר היה הקר ביותר עם טמפרטורה ממוצעת של 18.35° . השוואה לממוצע הרב שנתי מראה שלמעט חודשים אוקטובר-דצמבר טמפרטורת פני השטח הממוצעת הייתה ב-2021 יותר חמה.



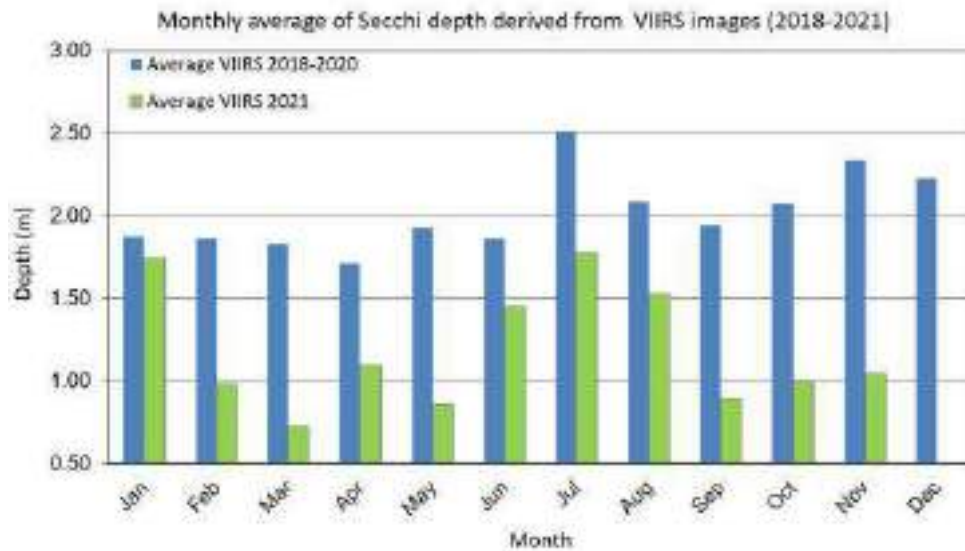
איור 76: התפלגות הממוצע החודשי של טמפרטורת פני השטח (SST) בכל האגם שחושבה מנתוני לוויין VIIRS בהשוואה לנתונים שחושבו בשנים 2019-2020.

2. הממוצע החודשי של ריכוזי הכלורופיל (Chl-a) בשנת 2021 חושב על בסיס 227 צילומי לוויין Sentinel-3 ברזולוציה של 300X300 מטר ומוצג באיור 77 יחסית לנתוני ממוצע חודשיים ב-2020. חשוב לציין שתוצאות המיפוי מייצגות את מצב האגם בשעה ~ GMT 08:00 שבה לרוב ריכוזי הכלורופיל נמצאים במינימום. נתוני הלוויין מראים שהריכוז האגמי הממוצע הגבוה ביותר (5.46 mg/L) היה בחודש נובמבר והנמוך ביותר (1.16 mg/L) בחודשים ינואר-פברואר. השוואה לנתונים שחושבו ב-2020 מצביעה על כך שלמעט חודשים ינואר-מרץ ריכוזי הכלורופיל החודשי של כל האגם היו גבוהים יותר ב-2021. חשוב לציין שתהליך כיוול האלגוריתם מול נתוני ה-in situ בעיקר של תחנה G עדיין נמשך.



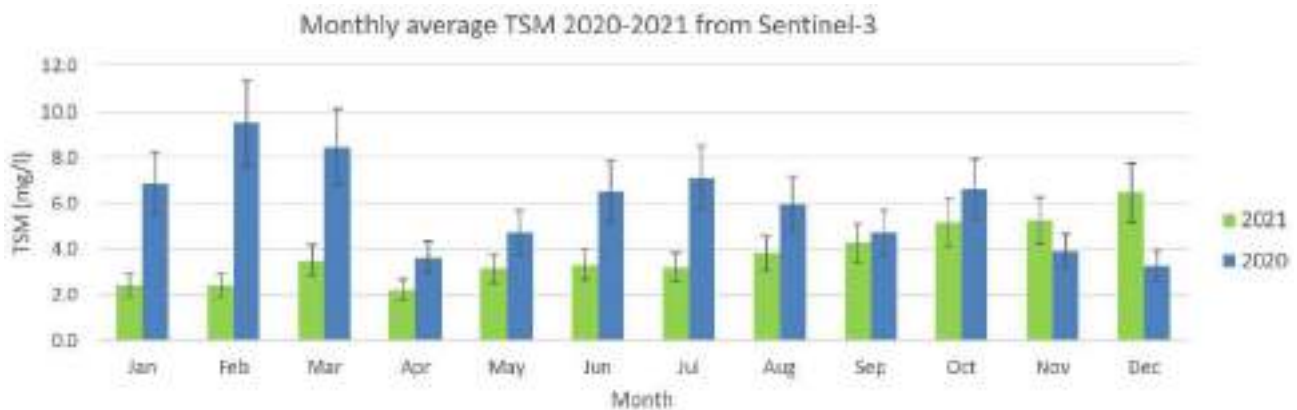
איור 77: ממוצע חודשי של ריכוזי כלורופיל (Chl-a) האגמי בשעה ~ GMT 8:00 בשנת 2021 יחסית ל-2020 המתבססים על אנליזות של צילומי לוויין Sentinel-3 ברזולוציה של 300 מטר.

3. הממוצע החודשי של עומק הסקי (Secchi) בשנת 2021 חושב על בסיס 135 צילומי לוויין VIIRS ומוצג יחסית לנתוני ממוצע חודשי שחושבו בשנים 2018-2020 באיור 78. עומק הסקי הנמוך ביותר נמדד בחודש מרץ (0.7 מטר) והגבוה ביותר בחודש יולי (1.8 מטר). השוואה לממוצע הרב שנתי ב-2018-2020 מראה ירידה בעומק הסקי ב-2021 בכל החודשים למעט דצמבר שלא היו בו מספיק צילומים טובים.



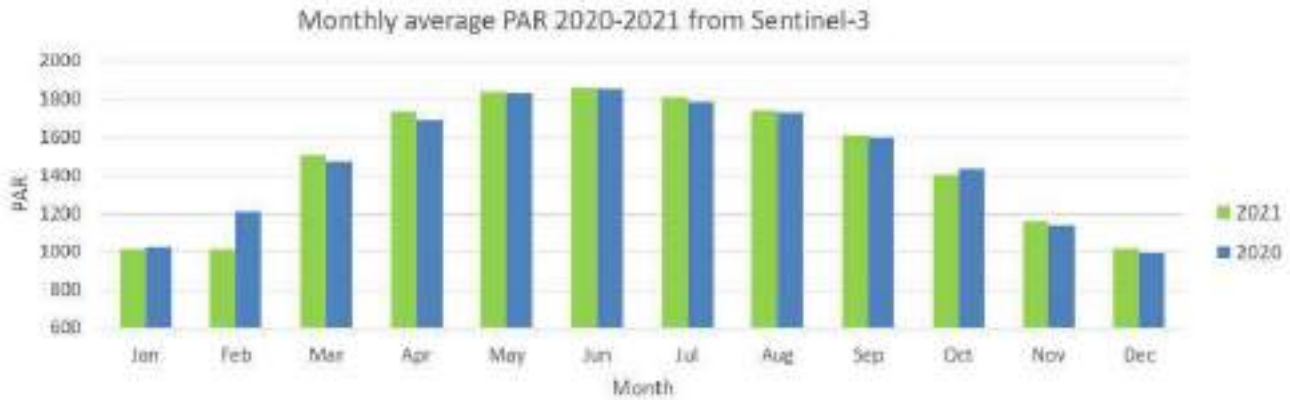
איור 78: עומק סקי (Secchi) חודשי הממוצע האגמי שחושב מנתוני לוויין VIIRS בהשוואה לנתונים שחושבו בשנים 2018-2020. בחודש דצמבר לא בוצע חישוב בגלל מיעוט צילומים טובים.

4. הממוצע החודשי של ריכחי חומר מרחף (TSM) בשנת 2021 חושב על בסיס 227 צילומי לוויין Sentinel-3 ומוצג יחסית ל-2020 באיור 79. נתוני הלוויין מראים שהריכח האגמי הממוצע הגבוה ביותר (6.5 mg/L) היה בחודש דצמבר והנמוך ביותר (2.2 mg/L) בחודש אפריל. למעט חודשים נובמבר-דצמבר ריכחי החומר המרחף הממוצע היה נמוך מזה שחושב לשנת 2020. חשוב לציין שאנחנו עדיין בתהליך של כיול האלגוריתם מול נתוני ה-in situ.



איור 79: ריכחי חומר מרחף (TSM) חודשי הממוצע האגמי שחושב מנתוני לוויין Sentinel-3.

5. הממוצע החודשי של קרינה זמינה לפוטוסינתזה בין אורכי הגל 400-700 ננומטר (PAR-Photosynthetically Available Radiation) בשנת 2021 חושב על בסיס 227 צילומי לוויין Sentinel-3 ומוצג באיור 80 יחסית לנתוני הממוצע החודשי שחושב ב-2020. נתוני הלוויין מראים שריכח הממוצע האגמי הגבוה ביותר ($1860 \mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) היה בחודש יוני והנמוך ביותר ($1015 \mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) בחודשים ינואר-פברואר. השוואה לנתוני 2020 מראה שלמעט חודש פברואר שהיה נמוך ב-2021, הריכחים בשאר החודשים היו דומים ל-2020.

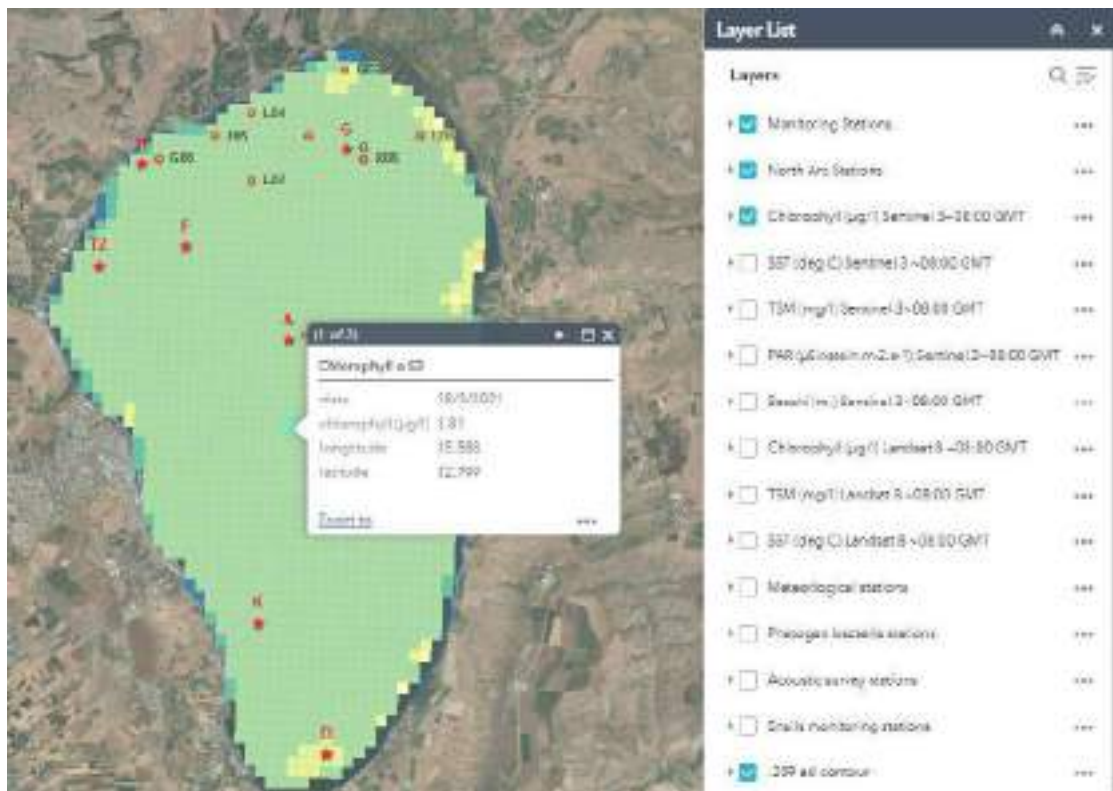


איור 80: ממוצע חודשי של PAR האגמי שחושב מנתוני לוויין Sentinel-3.

6. אנליזות של Chl-a, TSM, SST מלוויין Landsat 8 נעשות כל 16 יום (מותנה בעננות), בשנת 2021 עובדו 8 תמונות. בגלל עננות ואובך ניתן לקבל בממוצע צילום אחד בחודש ולכן לא נעשו חישובי ממוצעים. הרזולוציה של הלוויין (30 מטר) מאפשרת לנו להבין את ההטרוגניות הרבה של הפרמטרים השונים במרחב. צילומי לוויין ה-Landsat 8 וכן הצילומים היומיים של לוויין Sentinel-3 משולבים באפליקציה של מעבדת הכנרת אשר פתוחה לציבור:

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

2.28 מערכת מידע גיאוגרפית באתר האינטרנט - GIS ONLINE



במימון
רשות
המים

מיקי שליכטר

- המידע הגיאוגרפי הנאסף במסגרת תוכנית הניטור מוצג במערכת מידע גיאוגרפית אינטרנטית.
- פותחו כלים עבור המערכת הגיאוגרפית האינטרנטית לצורך צפייה, הורדה ועיבוד של הנתונים.
- כתובת האתר:
<https://iolar.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=da01a069af4e4f568a280a625ec8c50f>

מטרות

- להציג לציבור את המידע הגיאוגרפי באתר האינטרנט של המעבדה.
- לפתח כלים למשתמש לבחירת המידע המוצג ולעיבוד המידע.
- לאפשר למשתמש להוריד את המידע המבוקש.

רקע ותוצאות

למעבדה מידע גיאוגרפי מגוון שנאסף במשך השנים בתחומי הניטור השונים. תוכנת ArcGIS Online של חברת ESRI מספקת את הכלים לפתוח אפליקציות לתצוגת המידע ועיבודו במפות אינטראקטיביות באינטרנט. שכבות המידע המוצגות הן:

בתימטריה של האגם: קונטורים ברזולוציה של 1 מטר.

תחנות הניטור: תחנות המסווגות לפי תחומי הניטור השונים - מטאורולוגיה, ניטור חידקים, סקרי דגים, ניטור חלזונות ועוד.

צילומי לוויין:

תצוגת פיענוח צילומי לוויין בקירוב לזמן אמת.

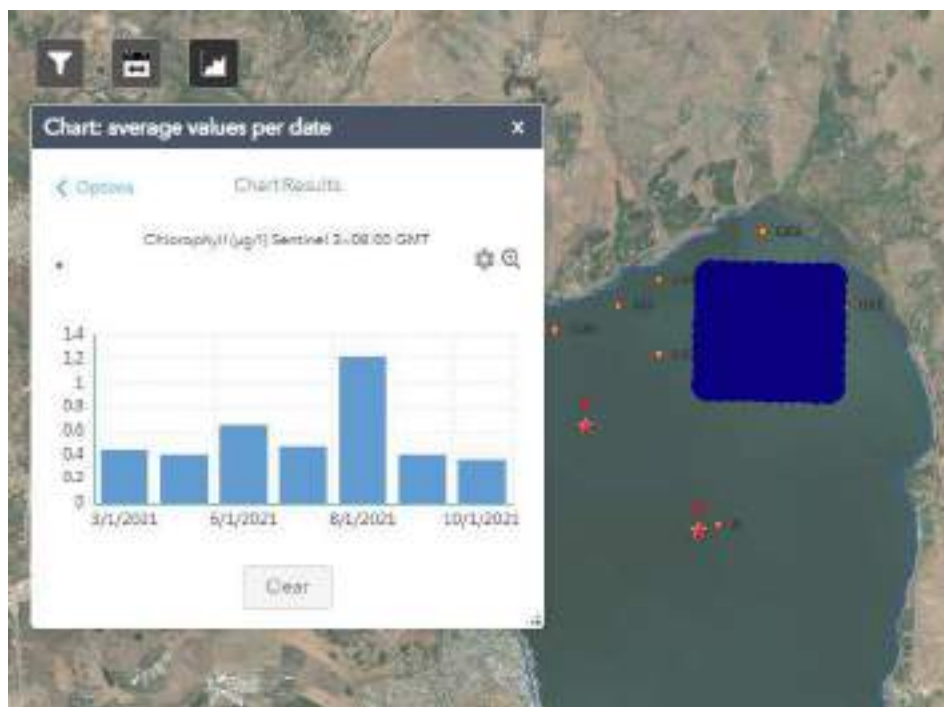
תוצרי עיבוד במערכת SISCAL (טיבור וחוב') של נתוני הלוויין Sentinel-3 (תדירות יומית) ושל הלוויין Landsat 8 (אחת ל-16 יום).

הפרמטרים המוצגים של הלוויין Sentinel-3 כוללים כלורופיל a החל מתאריך 6-1-2020, חומר מרחף TSM החל מתאריך 4-7-2020, עומק סקי החל מתאריך 27-9-2020, טמפרטורת פני המים SST החל מתאריך 22-2-2021, קרינת PAR החל מתאריך 2-10-2020.

הפרמטרים המוצגים של הלוויין Landsat 8 כוללים כלורופיל a החל מתאריך 12-11-2020, חומר מרחף TSM החל מתאריך 12-11-2020, טמפרטורת פני המים SST החל מתאריך 15-1-2021.

הכלים שפותחו במערכת הממ"ג מאפשרים תצוגת שכבות המידע והמקרא, בחירת הפרמטר והתאריך לצפייה, תצוגת טבלת הנתונים לתאריך נבחר או לטווח תאריכים, חישובי סטטיסטיקה על הנתונים בטבלה, תצוגת גרף של ממוצע יומי לטווח תאריכים ולאזור נבחר במפה (איור 81), ייצוא הנתונים לקובץ טקסט.

בשנת 2021 נוספו למערכת 991 תצלומים מהלוויין Sentinel-3 ו-17 מהלוויין Landsat 8.



איור 81: ממוצעים יומיים של נתוני כלורופיל בריבוע נבחר סביב תחנה G בתחילת ינואר 2021.

3 מחקרי כנרת

3.1 אוסף התרבויות הלאומי של אצות ישראל



במימון
חיא"ל

רות נ. קפלן לוי, אלה אלסטר, עכסה לופו

- בשנת 2021 התחלנו לבודד מיקרו-אצות ממקורות מים מתוקים נוספים ואף המשכנו לבודד מהכנרת.
- נכון לדצמבר 2021 האוסף מכיל 130 תרביות חיות של מיקרו-אצות.
- רוב התרביות שייכות ל-3 מערכות: *Cyanobacteria* (33%), *Chlorophyta* (41%), *Charophyta* (17%).
- השנה הגדלנו משמעותית את קבוצת הצורניות מ- 2% בשנת 2020 ל- 6% בשנת 2021 ואת האוסף כולו ב- 12 זנים חדשים.

מטרות INCCA

- יצירת אוסף לאומי מקיף של מיקרו אצות מכלל מקווי המים בישראל – מעיינות, נחלים, ימים ואגמים.
- מטרה נוספת הינה תיוג חיהוי מורפולוגי וגנטי של כלל המינים באוסף.
- להוות בנק לשימור מגוון המינים של מיקרו אצות בישראל.
- להוות משאב לאומי של ידע ותרביות חיות אשר ישמשו את קהילת המדע, החקלאות, התעשייה והחינוך.
- הצטרפות ועמידה בדרישות הארגון העולמי World Federation of Culture Collections.

רקע

משבר האקלים יחד עם הפעילות האנטרופוגנית הגוברת משפיעים על אוכלוסיות המינים בסביבות האקוויטיות בכלל, ועל המיקרו-אורגניזמים בפרט. מיקרו-אצות משמשות כבסיס במארג המזון האקוויט והמגוון שלהן משתנה עם השינויים החלים במערכת אקולוגית זו.

שינויים סביבתיים, טבעיים או אנטרופוגניים, יכולים לגרום לפריחות של מיקרו-אצות העלולות להיות רעילות, כניסה של מינים פולשים, איבוד של מינים אנדמיים ופגיעה במגוון המינים. יתרה מזאת, בשנים האחרונות ענף האצות מהווה מנוע צמיחה בארץ ובעולם. אצות משמשות בתחומים רבים למשל כמקור לאנרגיה חלופית, מקור לחומרים המשמשים בתעשיית הקוסמטיקה והרפואה, תוספי מזון, ותעשיית המזון. מכאן שבנוסף לצורך לשמור ולשמר את מגוון המינים הטבעיים למען הדורות הבאים, קיים גם צורך גדל והולך למצוא מיני אצות חדשים לתועלת האדם. לכן הקמנו את אוסף התרבויות הלאומי של אצות ישראל (INCCA - Israel National Culture Collection of Algae) שנוסד במטרה לשמר את המגוון הביולוגי של האצות באזורנו וכן לשמש כמשאב חומר חי וידע לחינוך, מחקר, שיקום סביבתי ופיתוח טכנולוגיות המבוססות על אצות (Kaplan-Levy et al. 2020).

INCCA ממוקם 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. **מטרתנו היא לזהות, לתעד, לבדוד ולשמר את המגוון הביולוגי של אצות וציאנובקטריה של ישראל.**

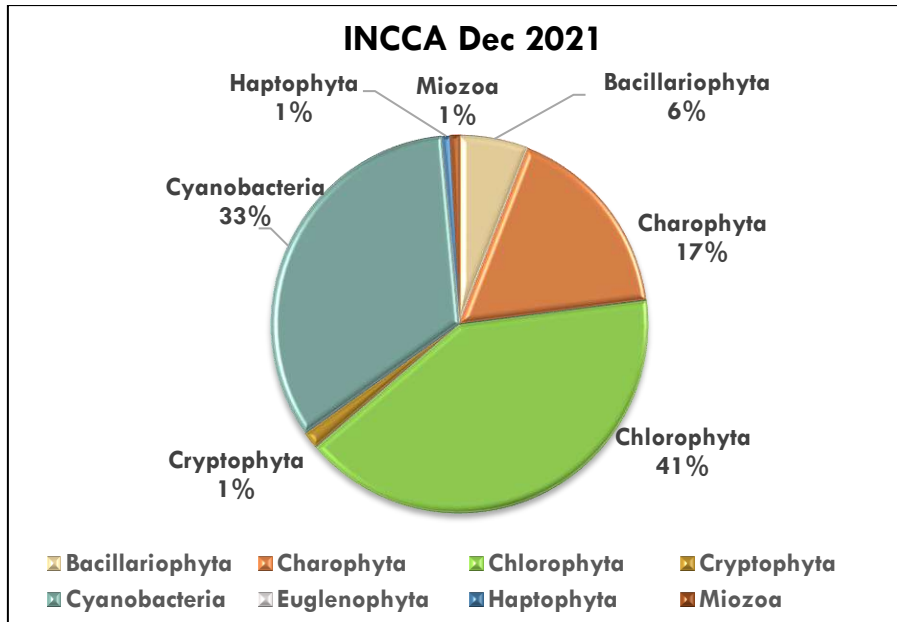
תוצאות ודיון

אוסף התרבויות INCCA גדל השנה ב- 12 תרבויות חדשות שבודדו ומונה 130 זנים של אורגניזמים פוטוסינתטיים (טבלה 8). נכון לסוף 2021 האוסף כולל נציגים משבע מערכות, אולם רוב הזנים שייכים לירוקיות המהוות 41% מהאוסף, 33% הם ציאנובקטריה ו- 17% charophyta (טבלה 8, איור 82). מתוך 130 התרבויות 53 זוהו לרמת המין, כולל 19, 1 Cyanobacteria, 25 Chlorophyta, 6 Charophyta Haptophyta ודינופלגלט אחד. כמו כן, המידע הגנטי עבור תרבויות שונות באוסף הוגדל השנה וכולל רצפי DNA מתוך 18 זנים של ציאנובקטריה, 11 Chlorophyta ו- 10 Charophyta.

טבלה 8 : מספר זני המיקרו-אצות המוחזקים ב-INCCA ממוינים לפי מערכה, מחלקה וסדרה

Phylum	Class	Order	No. of strains (12/2021)	Total
Cyanobacteria	Cyanophyceae	Chroococcales	11	45
		Synechococcales	11	
		Oscillatoriales	9	
		Nostocales	14	
Chlorophyta	Chlorophyceae	Chaetophorales	1	50
		Chlamydomonadales	6	
		Sphaeropleales	29	
		Trebouxiophyceae	13	
		Ulvophyceae	1	
Charophyta	Zygnematophyceae	Desmidiiales	8	23
		Zygnematales	51	
Cryptophyta	Cryptophyceae	Pyrenomonadales	2	2
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Bacillariales	2	8

Phylum	Class	Order	No. of strains (12/2021)	Total
		Fragilariales	1	
		Mastogloiales	3	
	Coccosinodiscophyceae	Melosirales	2	
Haptophyta	Coccolithophyceae	Prymnesiales	1	1
Miozoa	Dinophyceae	Peridinales	1	1
Total strains			301	301



איור 82: מגוון זני INCCA לפי אחוז התרבויות המשתייכות לכל מערכה, דצמבר 2021.

מערכת הצורניות גדלה השנה משמעותית ומשלוש תרבויות שהיו באוסף שנה שעברה, ב- 2021 נוספו 5 תרבויות לקבוצה זו (טבלה 8). קבוצה זו קשה יותר לבידוד ומוחזקת במצע נוזלי בניגוד לרוב התרבויות המוחזקות על פני אגר. כמו כן, בשנה זו העברנו את התרבויות מצלחות פטרי לסלנטים (מצע גידול עם אגר בתוך מבחנות זכוכית) לצמצום המקום בתאי הגידול והקטנת תרומתו של האוסף לפסולת הפלסטית של המעבדה, המצטבר בכל פעם שמעבירים תרבויות.

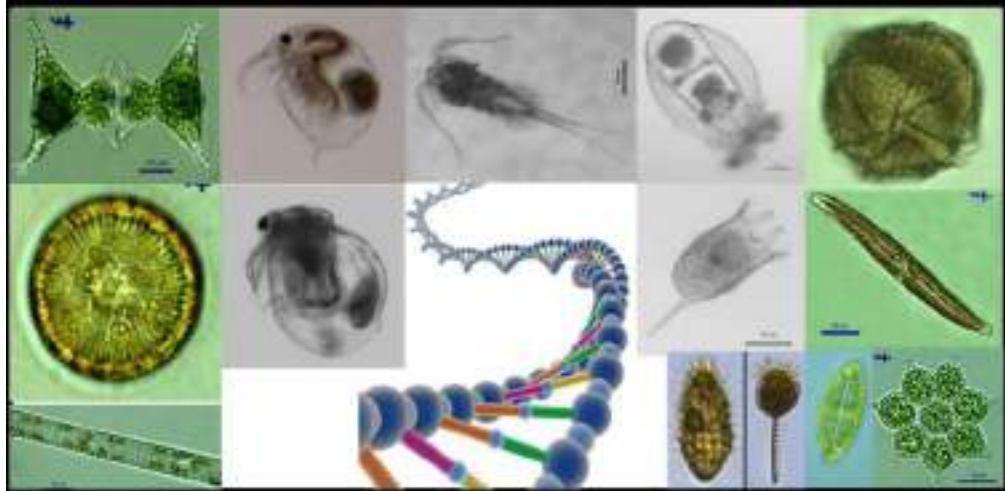
מקורם של רוב התבדידים ב-INCCA הוא מהכנרת, אך בשנת 2021 התחלנו בבידוד של זנים ממקורות נוספים, מ- 12 הזנים החדשים באוסף אחד בודד מאגמון החולה וחמישה בודדו ממעיינות בגולן; 1 מעין ג'ואיזה, 3 מעין אורחה (ג'ואדר) ו- 1 מעין נמרוד.

מטרת INCCA הוא לזהות ולשמר את מגוון המיקרו-אצות של ישראל, אך גם לאפשר לקדם את המחקר של מיקרו-אצות בארץ. ואכן מאז שהוקם האוסף באופן רשמי (2020) נמכרו 16 תרבויות למטרות מחקר, 2 תרבויות למטרות חינוך, ותרבית למחקר בתעשייה.

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

3.2 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*.
- כיום מוגדרים 261 מיני מיקרואורגניזמים בכנרת, מתוכם ל- 43 מינים יש כבר ברקוד גנטי.
- בעקבות המידע הגנטי נוספו לרשימת המיקרו-אורגניזמים של הכנרת 7 מינים חדשים ועודכנו שמותיהם של 16 מינים.

מטרת המחקר

יצירת בסיס נתונים של רצפי DNA נגיש באינטרנט, להשלמה ושדרוג של שיטת זיהוי המיקרואורגניזמים בכנרת. בניית בסיס נתונים זה יאפשר שימוש בשיטות ריצוף DNA מתקדמות לניטור האגם.

רקע

היכולת לזהות ולקרוא לאורגניזם בשם הוא נדבך חשוב בהבנתנו ויכולתנו לשמר את המגוון הביולוגי הקיים בעולמנו. 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 אשר 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, יעילות ובדיק. יתרון נוסף של הברקוד כשיטת זיהוי מינים הינו 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 אמניים ומבוססים של טקסונומיה "קלאסית".

בפרויקט זה אנו יוצרים בסיס נתונים אשר עומד כלבנת ידע ראשונה עליה ניתן יהיה לשפר ולהרחיב את פעילות הניטור במקביל למגוון רחב של מחקרים, תוך מניעת טעויות עתידיות חיהוי מהיר ומדויק של המיקרואורגניזמים בכנרת.

תוצאות ודיון

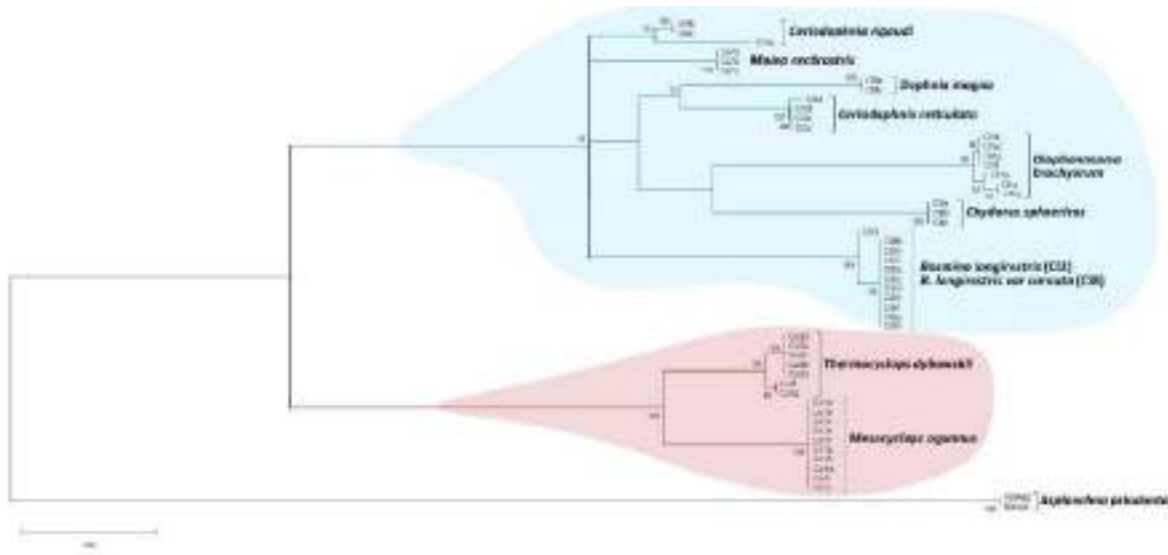
בכנרת ישנן קבוצות של מיקרואורגניזמים מימיים המאופיינים היטב מורפולוגית. קבוצות אלו הינן מועמדות מצוינות לשימוש בברקוד. בקבוצת המיקרו-אצות, הכוללת את הפיטופלנקטון והפיטובנתוס, אנו בחרנו להשתמש ברצפים משני מקטעים בגנום כברקוד, כאשר הראשון הינו מקטע מהגן *rbcL* המשמש לזיהוי הסוג והמקטע, השני נפרש על פני ה- *SSU-ITS* (rRNA Small Subunit – InTragenic Space), המאפשר להבחין בין מינים קרובים אבולוציונית. לעומתם, את ממלכת בעלי החיים מקובל לאפיין לפי מקטע בגן המקודד ל- *Cytochrome c oxidase 1* (*CO1*), לכן מקטע זה נבחר עבור קבוצת הזואופלנקטון והפרוטוזואה. יצירת בסיס נתונים, ברקוד, למיקרואורגניזמים הינו תהליך מתמשך הכרוך בכמה שלבים מאתגרים: (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.

מידע מולקולארי על המינים השונים מאפשר לנו לעדכן, לאמת או לשנות את שמות המינים במאגר המידע של המעבדה לחקר הכנרת וברשימת הניטור ואכן מאז שהחל הפרויקט עודכנו שמותיהם של 16 מינים (טבלה 9). נוספו 7 מינים חדשים לרשימה כאשר 3 מתוכם הינם ציאנובקטריה. השנה הגדלנו את בסיס הנתונים הגנטי של קבוצת הירוקיות מ- 15 מינים ל- 21 ועדכנו את שמותיהם של תשעה מינים.

טבלה 9 : מצב הברקוד הגנטי של ביוטת הכנרת, נכון ל 12/2021
 תיאור משמאל לימין - עמודה ראשונה מתארת את ממלכות המיקרו-אורגניזמים הקיימים בכנרת. בעמודה הבאה רשומה החלוקה למערכות. בעמודה השלישית מוצג מספר המינים שזוהו בכנרת מכל מערכה אשר נלקחו מהמקורות הבאים: פיטופלנקטון Zohary et al., 2014, זואופלנקטון Gal et al., 2014, ציליאטים Madoni 1990. עמודה רביעית מציינת את מספר המינים שמהם הפקנו ברקוד גנטי. אחריה מצוין מספר המינים שנוספו לרשימה בעקבות המידע הגנטי ובעמודה האחרונה מספר המינים ששם השתנה ועודכן לפי הטקסונומיה המודרנית הכוללת מורפולוגיה ורצף גנטי.

Kingdom	Phylum	No. of species in Lake Kinneret	No. of species Barcoded	No of species new to the list	Name update (No. species)
Eubacteria	Cyanobacteria	40	9	3	2
Chromista	Bacillariophyta	20	-	-	-
	Cryptophyta	5	-	-	-
	Haptophyta	1	-	-	-
	Dinophyta	16	-	-	-
	Ciliophora	37	-	-	-
Plantae	Charophyta	17	2	1	-
	Chlorophyta	90	21	2	9
Protozoa	Euglenophyta	6	-	-	-
Animalia	Arthropoda	9	10	1	5
	Rotifera	20	1	-	-
Total		261	43	7	16

רצפי הברקוד של הזואופלנקטון מקבוצת ה- Crustaceae הופקדו, יחד עם תמונות הפרטים וה- metadata שלהם לבסיס הנתונים הבינלאומי (Barcode of Life Data system – <http://www.boldsystems.org/>) BOLD. בוצע ניתוח פילוגנטי של הרצפים המשתייכים לפרטים מאגם הכנרת (איור 83) כאשר הרצפים של ה- *Asplanchna priodonta*, Rotifera מהכנרת, שימשו כקבוצת ייחוס חיצונית (outgroup). מהניתוח הפילוגנטי ניתן לראות בבירור שתת-סדרת ה Cladocera (רקע ורוד, איור 83) נפרדת מתת-מחלקת ה Copepoda (רקע כחול, איור 83) וכל ענף מאושש בביטחון סטטיסטי גבוה. כמו כן ניתן לראות שרצפי כל מין מסתדרים בענפים נפרדים ומחזקים את ההגדרה של כל קבוצת אורגניזמים כמין אחד, מלבד במקרה של *Bosmina longirostris*. בתוכנית הניטור נספרים שני אורגניזמים בשם *Bosmina* האחד מוגדר כ *Bosmina longirostris* והשני כ *Bosmina longirostris var cornuta*. ניתוח רצפי הברקוד של שני זנים אלה מחזק את העובדה שמדובר במין אחד עם שני פנוטיפים, ולא בשני מינים שונים (איור 83). מעניין יהיה לבדוק מתי מופיע כל פנוטיפ ומדוע.



איור 83: ניתוח פילוגנטי של קבוצת הסרטניים בזואופלנקטון של הכנרת, בהתבסס על הגן COI. העץ נבנה בשיטת Maximum Likelihood על פי המודל של Tamura-Nei, (1993), עם מבחן Bootstrap של 500 עצים (ערכים מעל 50% רשומים). הניתוח נעשה על 52 רצפי DNA באורך של 650 בסיסים כל אחד, בעזרת תוכנת MEGA X (Kumar et. al., 2018).

על מנת לבדוק אם ישנה התאמה בין ההגדרה הטקסונומית קלאסית של המינים לרצפי הברקוד שהתקבלו מהם, ביצענו השוואה BLASTN כנגד בסיס הנתונים הבינלאומי (NCBI) כמו גם נבדק מאגר הנתונים של BOLD (טבלה 10). מאנליזת הרצפים נמצא כי עלינו לעדכן את שמותיהם של 3 מינים, להגדיר מחדש 3 מינים קיימים ולהוסיף מין של Cladocera נוסף *Diaphanosoma* sp. שנמצא שישנה שונות של 5% בין שתי קבוצות רצפים Cl1c,d,e,f לעומת b,a,g (איור 83).

טבלה 10: הגדרת מיני תת-מערכת ה Crustacea בפלנקטון של הכנרת על פי רצפי *coi* משמאל לימין – שם תת-מחלקה אליה משתייכים המינים, מיני הזואופלנקטון כפי שהוגדרו עד היום (Gal et al., 2014), מספר הקוד שניתן לכל מין במעבדה, תוצאות השוואת הרצפים שהתקבלו עם בסיס הנתונים הבינלאומי (NCBI), אחת הזוהות בין הרצף מהכנרת לרצף בבסיס הנתונים והצעה לעדכון שם המין בהתאם לתוצאות.

Subclass	Zooplankton species	Code	BLASTN best hit (Accession#)	Identity	Updated name
Copepods	<i>Mesocyclops ogunnus</i>	Co1	<i>Mesocyclops pehpeiensis</i> voucher EES126 (KT962937)	88%	<i>Mesocyclops</i> sp.
	<i>Thermocyclops dybowskii</i>	Co2	<i>Thermocyclops dybowskii</i> (BOLD)	100%	<i>Thermocyclops dybowskii</i>
Cladocera	<i>Daphnia magna</i>	Cl9	<i>Daphnia magna</i> (MK370029)	100%	<i>Daphnia magna</i>
	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	Cl1	<i>Diaphanosoma mongolianum</i> (MW259015)	93%	<i>Diaphanosoma</i> sp.
	<i>Bosmina longirostris</i>	Cl2	<i>Bosmina coregoni</i> (AY075057)	97%	<i>Bosmina</i> sp.
	<i>Bosmina longirostris var cornuta</i>	Cl8	<i>Bosmina coregoni</i> (AY075057)	97%	<i>Bosmina</i> sp.
	<i>Ceriodaphnia reticulata</i>	Cl3	<i>Ceriodaphnia pulchella</i> (MW201524)	97%	<i>Ceriodaphnia pulchella</i>
	<i>Ceriodaphnia rigaudi</i>	Cl4	<i>Ceriodaphnia cornuta</i>	99%	<i>Ceriodaphnia cornuta</i>
	<i>Chydorus sphaericus</i>	Cl6	<i>Chydorus sphaericus</i> (EU719124)	100%	<i>Chydorus sphaericus</i>
	<i>Moina rectirostris</i>	Cl7	<i>Moina micrura</i> (MH708069)	99%	<i>Moina micrura</i>
Rotifera	<i>Asplanchna priodonta</i>	Ro4	<i>Asplanchna</i> sp. (AF499052)	90%	<i>Asplanchna</i> sp.

מקורות ספרות

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

Kumar S., Stecher G., Li M., Knyaz C., and Tamura K. (2018). MEGA X: Molecular Evolutionary Genetics Analysis across computing platforms. *Molecular Biology and Evolution* 35:1547-1549.

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.

Tamura K. and Nei M. (1993). Estimation of the number of nucleotide substitutions in the control region of mitochondrial DNA in humans and chimpanzees. *Molecular Biology and Evolution* 10:512-526.

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.

3.3 השפעת המליחות בכנרת על התבססות מיקרואורגניזמים שמקורם באבק אטמוספרי השוקע באגם



במימון
רשות
המים

שירה ניניו, אסף סוקניק, ירון בארי-שלוין, זהר פריימן

- עם האבק המגיע לכנרת נמצאים מינים של חיידקים חיים, אותם ניתן לבודד ולגדל בתנאי מעבדה.
- מבין חיידקי האבק נמצאים כאלה המסוגלים להשפיע על קצב הגידול של אצות שונות מן הכנרת.
- תבדיד אשר זוהה גנטית כחיידק *E. acetylicum* נמצא כמאיץ את קצב הגידול של הכחולית הרעילה מיקרוציסטיס בתרבית.

רקע

בכל שנה מגיעים לכנרת אלפי טונות של אבק אטמוספרי ממקורות שונים. אבק זה טומן בחובו פוטנציאל כימי וביולוגי להשפיע 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, הנובטים בסביבה המימית ועשויים להתפתח ולשגשג.

לפיכך, יש חשיבות גדולה לאפיין את האבק המגיע לכנרת, כדי לאמוד את תרומתו למערכת האקולוגית, וכמו כן להעריך 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 ניסוי מעבדה. 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.

מטרות

לבחון כיצד עשוי אבק אטמוספרי 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 אטמוספרי הוקמה על מרפסת בניין המעבדה. המערכת מורכבת מקערות נירוסטה שטוחות בקוטר של 40 ס"מ, בעלות פרופיל נמוך, אשר הוצבו על גבי מעמד ייעודי מוגבה. בתוך הקערות הונחו שכבות של גולות זכוכית מעוקרות שמטרתן לכלוא את האבק הנוחת באופן פאסיבי בקערות. קערה אחת שימשה לאיסוף חומר עבור אנליזה גנטית, והשנייה שימשה לאיסוף אבק יבש עבור ניסויי התבססות ואנליזה כימית.

תוצאות ודיון

השפעת תבדידים על קצבי גידול:

הזנים הבאים, שמקורם באגם הכנרת, נבחנו על מנת לאמוד אם קיימת השפעה של חיידקי אבק על קצב הגידול שלהם:

MG (*Microcystis green*)

MB (*Microcystis brown*)

Raphidiopsis raciborskii

Aphanizomenon ovalisporum

Chlorella sorokiniana

Mougeotia sp.



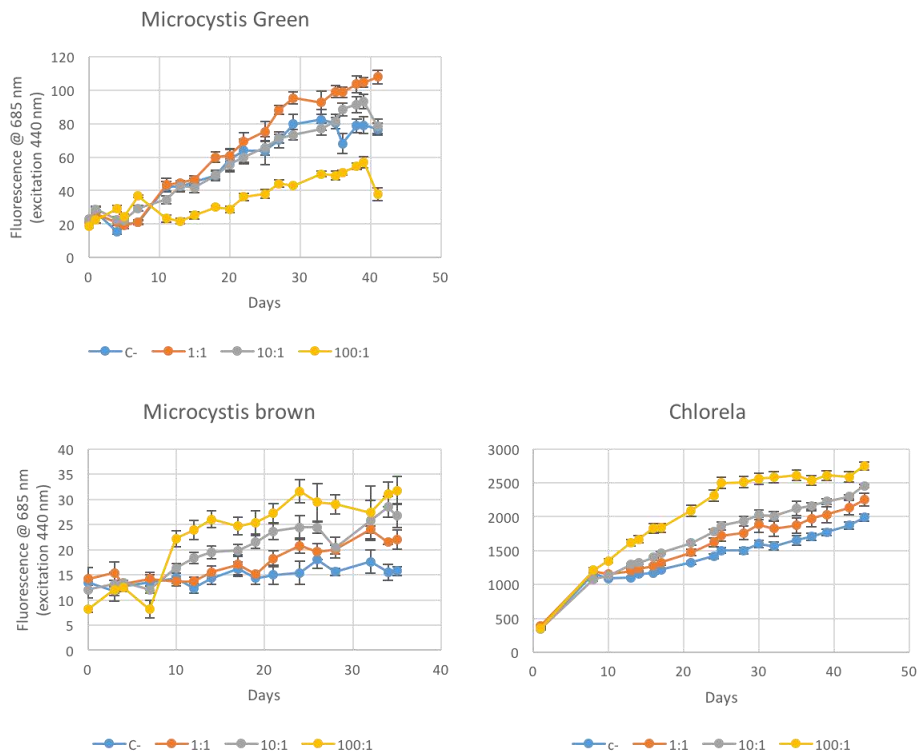
בשלב ראשון נבחנו תבדידים משולבים של מספר זני חיידקים יחד. כל תבדיד מקורו בדגימת אבק שהודגרה בתנאי מליחות שונים, כמפורט בטבלה 11.

טבלה 11: תבדידי האבק שנבחנו ותנאי הבידוד שלהם

Salinity¹	13.2	6.6	3.3
Bacterial stock number	68-70	65-67	62-64

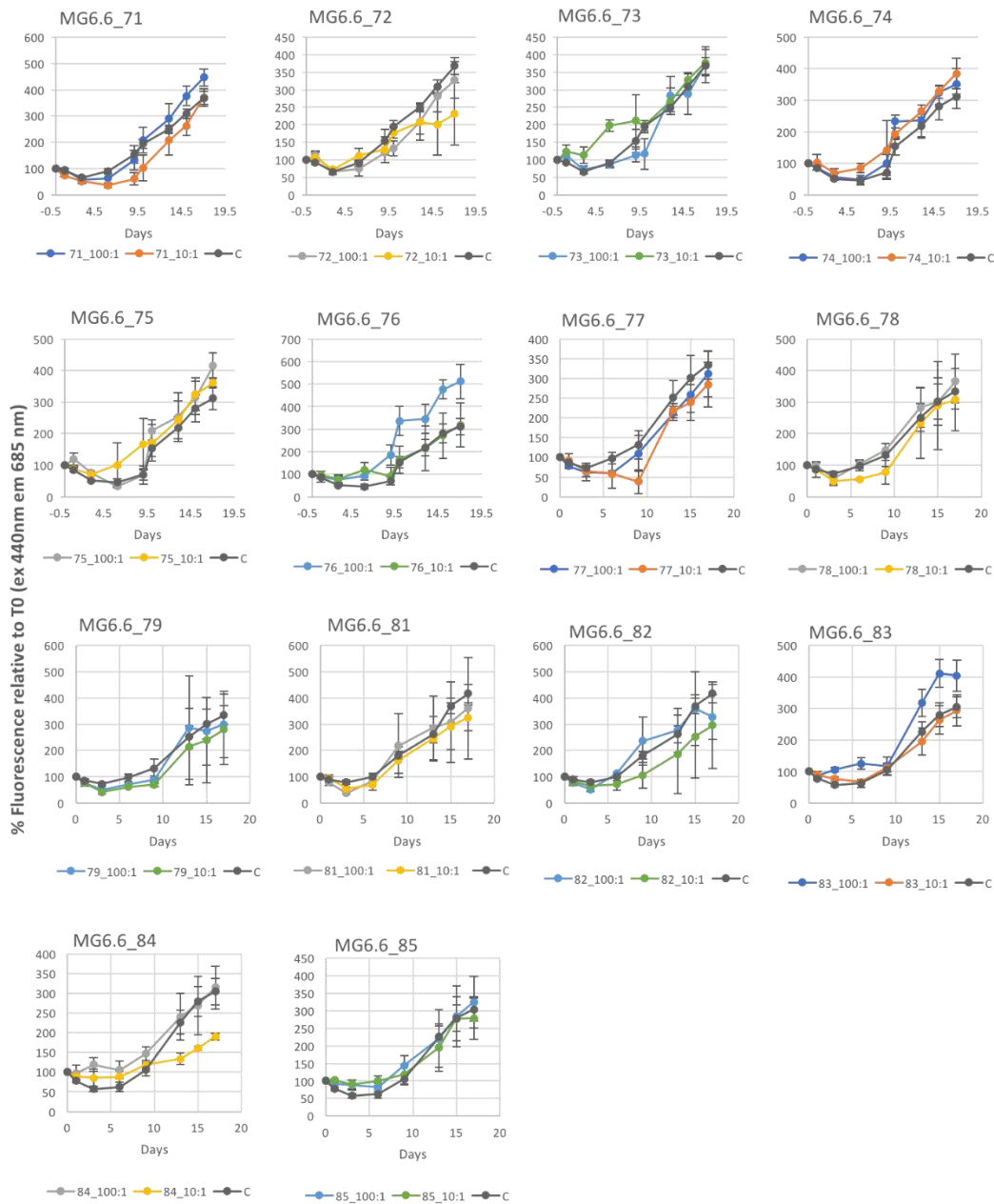
¹ מליחות נתונה כריכוז נתרן ביחידות mM, כאשר הריכוז של 6.6 mM מדמה את התנאים באגם.

התוצאות של בדיקת ההשפעה של מקבץ חיידקים 66 מלמדות שלתערובת חיידקים זו שמקורה מאבק ישנה השפעה חיובית על קצב הגידול של מיקרואורגניזמים חום, וככל שהיחס המספרי בין החיידקים לאצות עולה, כך קצב הגידול של המיקרואורגניזמים גדל (איור 84). לעומת זאת, זן המיקרואורגניזמים הירוק הראה תמונה שונה, ונראה שלא הושפע כלל מתוספת החיידקים, אלא בריכוז הגבוה, אז דווקא נצפה עיכוב בקצב. בירוקית כלורלה גם נצפתה השפעה חיובית קלה על קצב הגידול (איור 84). תוצאות אלה מדגימות שלחיידקי האבק יכולת להשפיע על קצב הגידול של אצות שונות, והשפעה זו ככל הנראה נובעת ממנגנון ספציפי כיוון שאינו נצפה בכל זן אצות באותן האופן.



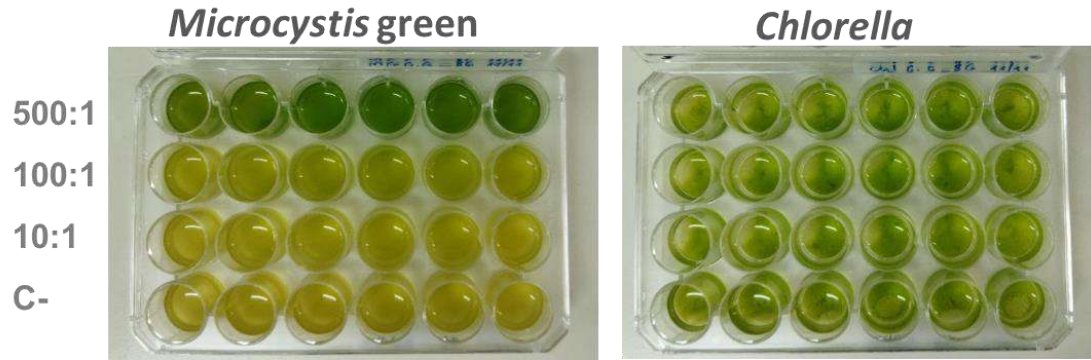
איור 84: השפעת תערובת תבדידים מספר 66 על קצבי גידול של שלושה זני אצות. כל זן נבחן בתוספת שלושה ריכוזי חיידקים וללא כל תוספת חיידקים (c). ריכוזי החיידקים מובאים כייחס בין מספר תאי החיידק למספר תאי האצה בתחילת הניסוי.

על מנת לזהות את החיידק מתערובת 66 שמשפיעה על גידול האצות, פוצלה תערובת החיידקים למספר רב של תבדידים. כל תבדיד נבחן בנפרד ונבדקה השפעתו על קצבי הגידול של המיקרוציסטיס. כך זוהה תבדיד מספר 76 כמין הגורם לזירוז קצב הגידול של הכחולית מיקרוציסטיס (איור 85).



איור 85: השפעת תבדידים מתוך תערובת מספר 66 על קצבי גידול של מיקרוציסטיס. כל זן נבחן בתוספת שני ריכוזי חיידקים וללא כל תוספת חיידקים (c). ריכוזי החיידקים מובאים כייחס בין מספר תאי החיידק למספר תאי המיקרוציסטיס. הגידול מובא כאחוז הפלואורוסנציה יחסית לזו שנרשמה בתחילת הניסוי.

תבדיד 86 נבחן אל מול זן המיקרוציסטיס הירוק ונמצא שבריכוז של 500 תאי חיידק לכל תא מיקרוציסטיס ישנה האצה משמעותית בקצב הגידול של הכחולית (איור 86). לעומת זאת, קצב הגידול של הירוקית כלורלה לא הושפע מהחיידק שהוסף (איור 86).



איור 86: השפעת תבדיד 86 שזהותו - *E. acetylicum* על קצב גידול אצות מהכנרת. בתמונה באריות הגידול של כלורלה ומיקרוציסטיס בסיום הניסוי. יחס מספר תאי החיידק למספר תאי אצה מובא משמאל, c ביקורת שלילית עם בופר ללא חיידקים. כל תנאי בוצע עם שש חזרות ביולוגיות.

מסקנות

תוצאות תקופת מחקר זו מצביעות על כך שבאבק המגיע לכנרת נמצאים מינים של חיידקים חיים אותם ניתן לבדוד ולגדל בתנאי מעבדה. מבין חיידקי האבק נמצאים כאלה המסוגלים להשפיע על קצב הגידול של אצות שונות מן הכנרת. אחד ממינים אלה הינו תבדיד שזיהינו כ- *E. acetylicum*, המאיץ את קצב הגידול של הכחולית הרעילה מיקרוציסטיס. המשך המחקר יתמקד באפיון יחסי הגומלין שבין תבדיד ה- *E. acetylicum* לבין מיקרוציסטיס להבנת טיב היחסים והתלות במליחות. בנוסף ייבחנו תבדידי אבק נוספים שאופיינו בעבודה זו כבעלי השפעה חיובית או שלילית על אצות מן הכנרת. 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.

3.4 סקר רעלני כחוליות בעזרת מקלות זיהוי (סטריפים)



זריחה בכנרת. צילום: עוז צברי-דר

במימון
רשות
המים

פלא אסטרחן, דיתי ויינר - מוציני

- בקיץ שנת 2021, נבחנה יכולת זיהוי רעלני ציאנובקטריה מסוג צילינדרוספרמופסין בעזרת שימוש בסטריפים לאבחון תוצרת Eurofins abraxas בחופי הכנרת.
- ניתן להבחין בקלות רבה יחסית ברעלן בריכוזים גבוהים, עם זאת אנליזה באמצעות מקלות אלו בריכוזי צילינדרוספרמופסין נמוכים אינה מדויקת.
- יש לבחון סקר שימוש באמצעים אלו כגורם מתריע בפני ריכוזים גבוהים של רעלן בחופים בעונת הרחצה.

מטרה

מטרת הניסויים היא הערכת יכולת השימוש בערכות הסטריפים ככלי ראשוני מהיר לאבחון נוכחות גבוהה של רעלן במים בעונה. מעבר ליכולת הבחינה המהירה, השימוש בערכות אלו פשוט וקל ליישום גם בתנאי שדה ללא צורך בציוד מעבדה או כוח אדם מיומן, ויכול להיעשות גם ע"י מפעילי חופים, פקחים או דוגמים.

עם זאת, אמצעי זה אינו מדויק בטווח הריכחים המתקיים בכנרת (0-1.5 מיקרוגרם לליטר) ובא לשמש ככלי ניטורי ראשוני המזהה עלייה מהירה בריכחי הרעלן, בעיקר בחופי הרחצה, אותו ניתן לאמת במעבדה לאחר אנליזה אנליטית.

רקע

אפאניזומנון הינה קבוצה של ציאנובקטריה המייצרת טוקסין תוך תאי הקרוי צילינדרוספרמופסין. טוקסין זה מופרש ברובו למים. מינים מקבוצה זו פורחים בכנרת בעיקר בחודשים אוגוסט-אוקטובר במהלך עונת הרחצה. לפי ארגון הבריאות העולמי (WHO), ריכחי הרעלן במי שתיה המחייבים התייחסות מיוחדת ומחייבים לכן טיפול במי הגלם, הינם ריכחים מעל 0.7 מיקרוגרם לליטר ובמקביל, ממליץ ארגון ה- WHO על הימנעות מרחצה במים בהם ריכח הרעלן הוא מעל 6 מיקרוגרם לליטר, במקרים כאלו יש לשקול את סגירת החוף באפן זמני^{1,2}. המעבדה לחקר הכנרת, היא"ל, מבצעת אנליזות של ריכחי הרעלן במי הכנרת כחלק מתוכנית הניטור, דוגמאות אלו נדגמות במרכז האגם או באתרי שאיבת מים למי שתיה. מכיוון שהצינאובקטריה אינה מפזרת באופן הומגני ברחבי האגם ולרוב ישנה הצטברות באזורים מוגנים מרוחות, עולה החשש לריכחים גבוהים של רעלנים באזורים חופיים ואזורים בהם המתרחצים באים במגע עם מי הכנרת. לאור חשש זה, והצורך לתת מענה לאבחון ריכחי רעלנים חריגים ומסוכנים, ביצענו פיילוט לבחינת כלי נגיש וקל לתפעול אשר אם יוכח כמתאים, יופעל ע"י מפעילי החופים לצורך ניטור ראשוני לרמת ריכח הרעלנים בחופי הרחצה. בפיילוט זה בחנו את השימוש בערכות בדיקה "סטריפים" המאפשרות בחינה מהירה של ריכחי הרעלן הנ"ל במים נבחנים (ראה תמונה 4).

מהלך הניסוי

בחדשים יוני-ספטמבר, נבחנו ריכחי הצילינדרוספרמופסין בעזרת ערכות הסטריפים (תוצרת חברת Eurofins abraxi). מי הניסוי נדגמו בתדירות של אחת לחדש בחופים אמנון, עין גב, מעבדת הכנרת ותחנה A בפני השטח. במקביל לבדיקה עם הסטריפים נערכה בדיקה אנליטית של המים בשיטה הקלאסית הכוללת ייבוש ואנליזת HPLC. תוצאות שתי השיטות הושו לצורך בדיקת האמינות והדיוק של ערכות הסטריפים. סך הכל נערכו 8 בדיקות (טבלה 12) בארבעת האתרים. בדומה לערכות בדיקה דומות לצרכים אחרים, התוצאות של הסטריפים באים לידי ביטוי בהמצאות, או אי-המצאות של קווים במקומות שונים בסטריפ (תמונה 4). ניתן להבחין בתמונה 4 כי כאשר אין רעלן במים, שני הקווים הוורודים במרכז הסטריפ בעלי סמן חזק בעוצמה דומה. ככל שמעלים את הריכח, גדלה עוצמת הסמן השמאלי ויורדת בסמן הימני עד להעלמות הסמן השמאלי בריכחים גבוהים ביותר (~10 מיקרוגרם לליטר).

טבלה 12: תאריכי דיגום

תאריכי דיגום סטריפים
23.06.2021
25.07.2021
10.08.2021
22.08.2021
19.09.2021
17.10.2021
15.11.2021

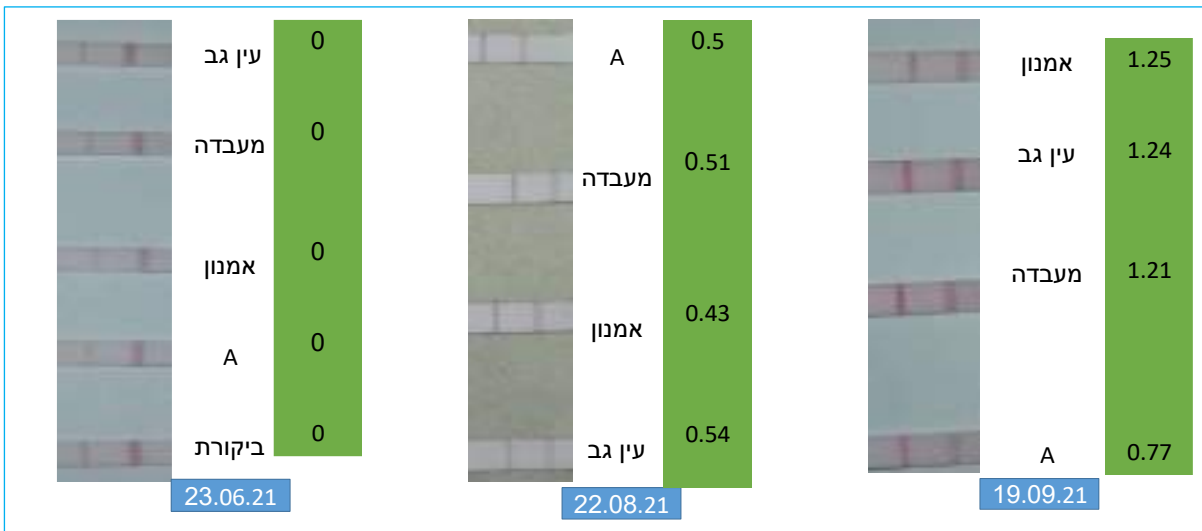


תמונה 4: ערכות הסטריפים הנבחנות בריכחי רעלן שונים. המספרים מימין מציינים ריכחי צילינדרוספרמופסין במיקרוגרמים לליטר (במים מזוקקים).

תוצאות

דוגמאות מי הכנרת השנה הכילו בין 0 ל- 1.25 מיקרוגרם צילינדרוספרמופסין לליטר כפי שאומתו ע"י הבדיקה הקלאסית ב- HPLC. לאחר השוואה בין שתי השיטות ניתן לראות כי בעזרת שימוש בסטריפים בדוגמאות מי הכנרת, ניתן לאבחן עלייה בריכח באופן ברור (איור 87) אך קשה לעמוד את הריכח המדוייק בין 0.5 ל- 1 מיקרוגרם לליטר, זאת יש לציין על פי התבוננות פרטנית בלבד של הבוחנים בעבודה זו. ניתן לתאר את התוצאות כך:

- בריכחים של 0 צילינדרוספרמופסין כפי שאומת ע"י HPLC ב- 23.06.2021, עוצמת הסמן הימני חזקה ביותר.
- סביב 0.5 מיקרוגרם לליטר צילינדרוספרמופסין כפי שאומת ע"י HPLC ב- 22.08.2021, עוצמות הסמנים פחות או יותר שוות בימין ובשמאל.
- סביב 1 מיקרוגרם לליטר כפי שאומת ע"י HPLC ב- 19.09.2021, עוצמת הסמן השמאלי חזקה יותר.



איור 87: תוצאות מייצגות המשוות בין בחינת מי הכנרת בחופים עין גב, אמנון, המעבדה ותחנה A בשיטת הסטריפים (תמונות) ולאחר אנליזה בשיטה קלאסית של HPLC (בירוק). ככל שהסמן השמאלי חזק יותר ובמקביל חלש יותר הסמן הימני, כך ריכוז הצילינדרוספרמופסין גבוה יותר.

סיכום

ניתן להשתמש בערכה זו לזיהוי ראשוני של ריכחי צילינדרוספרמופסין המופיעים במי הכנרת, אך לא ניתן לכמת באופן מדויק בריכחים בין 0-1 מיקרוגרם לליטר. ניתן לשלב את מערך בדיקות הסטריפים בעונה, בחופי הרחצה ולספקם לפקחים ואף לבעלי חופים לאחר הדרכה קצרה. כלים אלו יוכלו לשמש בעלי חופים כמדד לעלייה מהירה בריכוז הטוקסין מעל 1 מיקרוגרם לליטר. החל משלב זה, עלייה מהירה בריכוז הרעלן עלולה להוות סכנה למתרחצים ולכן ניתן לכלול שימוש באמצעים אלו לפני כניסת המתרחצים במקום לבצע דיגום מים, שליחתם למעבדה והמתנה לתוצאות.

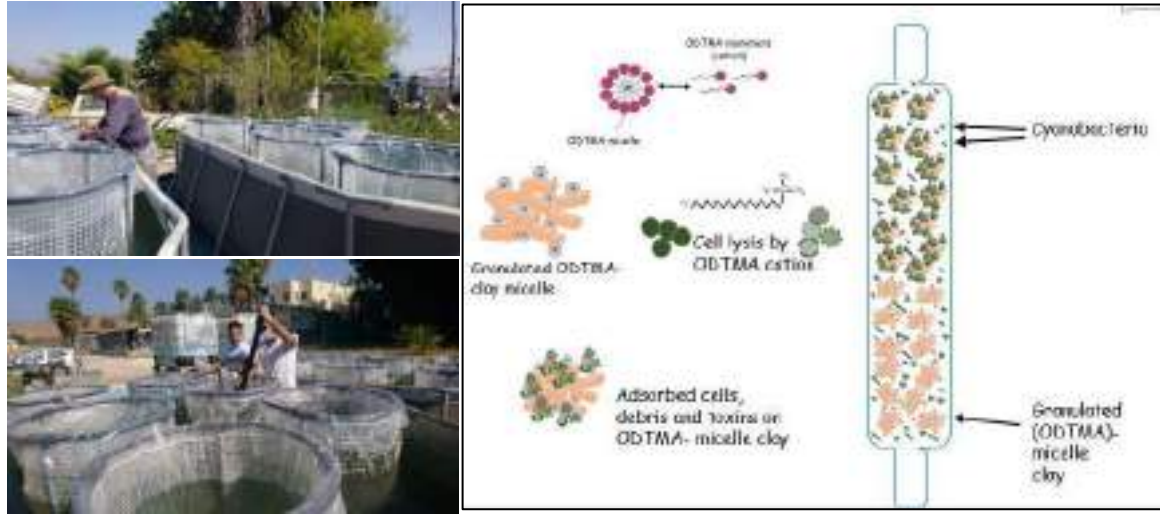
לאחר התבוננות בתוצאות הניסוי במספר ריכחי הרעלן במים מזוקקים (תמונה 4) ותוצאות מדגמיות לניטור החופים (איור 87), ניתן להבחין בשוני מסוים באיכות הסמנים הוורדים בשני המקרים. שוני זה יכול לנבוע ממיסוך המתקיים במדיום השונה בשני המקרים (מים מזוקקים ומי כנרת). לכן מומלץ לבצע סריקה נוספת של ריכחי רעלן גבוהים המוספים למי כנרת.

המלצות: 1. מומלץ לכלול שימוש בסטריפים לקראת עיצומה של העונה בה הריכחים סביב 1 מיקרוגרם לליטר בכדי להתריע על ריכחי רעלן גבוהים במי החופים. 2. יש לבחון מעשית את תדירות ביצוע הבדיקות על כן מומלץ לערוך בשנה הקרובה פיילוט מצומם במספר קטן של חופים כאשר הבדיקות ייעשו ע"י מפעילי החופים. 3. יש לבחון בהמשך את הצורך בשימוש בערכות דומות לקראת בוא האביב בכדי לבחון את היכולת לאבחן את פריחות הציאנובקטריה מיקרוציסטיס המייצרת את הרעלן מיקרוציסטיין, ויוצרת צופת בריכחים גבוהים (מעל 10 מיקרוגרם לליטר) בעיקר באזורי החופים והמעגנות. 4. בנוסף ליישום הפעלת הסטריפים ככלי לזיהוי והתראה, יש צורך בפיתוח פרוטוקול דיווח מסודר וקבוע שיכלול דרגות שונות של דיווח והתראה, בדומה לצבעי דגלים בחופי הים.

ספרות

1. U.S. EPA. *Health Effects Support Document for the Cyanobacterial Toxin Cylindrospermopsin*; 2015. doi:820R15102
2. World Health Organization W. *Cyanobacterial Toxins: Saxitoxins Background Document for Development of WHO Guidelines for Drinking-Water Quality and Guidelines for Safe Recreational Water Environments*; 2019.

3.5 גישות חדשניות לבקרה ומניעת פריחות של ציאנובקטריה רעילות בגופי מים



**במימון
משרד
המדע**

**אסף סוקניק בשיתוף עם אהרון קפלן ושלמה ניר, א. עברית
ופרופ' לירונג סונג IHB CHINA**

- ריכוזים נמוכים של מי חמצן מהווים שיטה יעילה לחיסול סלקטיבי של כחוליות בגלל הרגישות הגבוהה של הכחוליות בהשוואה לאצות ומיני פיטופלנקטון אחרים.
- חומרים פעילי שטח מקבוצת אמינים רבעוניים אורגניים **alkyl trimethyl ammonium (ATMA)** פוגעים בפעילות הפוטוסינתטית בציאנובקטריה ומעכבים את הגידול. בעזרת חומרים אלו ניתן לבער פריחות של כחוליות שכן פעילותם היא סלקטיבית ופגיעתם במיני פיטופלנקטון אחרים מוגבלת.
- גרנולות מורכבות של חרסית מיצלות **ODTMA** מסלקות בעילות מיקרוציסטינים. יעילות הסילוק של מיקרוציסטינים מסוג **RR** פחותה יחסית למיקרוציסטינים אחרים.
- לאור האירועים החוזרים של פריחת כחוליות רעילות בכנרת, יש מקום לשקול יישום כלים של הדברה כימית לטיפול בפריחה של כחוליות רעילות באגם.

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 *Microcystis* sp המייצרים משפחה של רעלני כבד הקרויים מיקרוציסטינים (MC) ו *Aphanizomenon* המייצר רעלן הנקרא צלינדרוספרמופסין. באתרים שונים בעולם, הצטברות מאסיבית של ביומסת ציאנובקטריה הביאה למשבר באספקת מי שתייה בגלל נוכחות רעלנים של ציאנובקטריה. בישראל פריחות ציאנובקטריה מדווחת מדי שנה בבריכות דגים ובמאגרי מי השקיה, וחשוב מכך, מיני מיקרוציסטיס ו *Aphanizomenon* 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.

תוצאות והישגים

למחקר שנמשך שלוש שנים הישגים רבים שפורסמו בספרות המקצועית הרלוונטית ומהווים בסיס להמשך פילוח ויישום. להלן עיקר הממצאים ברובם עם ציטוט של המאמר הרלוונטי: נמצא ובודד חומר פעיל שמופרש על ידי החיידק *veronii Aeromonas* אשר בודד מהכנרת ומעכב התפתחות של מיקרוציסטיס. החומר הפעיל זוהה כ lumichrome².

נמצא והודגם שהשראת מוות תאי מתוכנן PCD בציאנובקטריה רעילה מתקבלת על ידי שני טיפולים עוקבים בגורם מחמצן (מי חמצן). ממצא זה עשוי לשמש לטיפול בפריחות של ציאנובקטריה ושליטה באוכלוסיות הפיטופלנקטון³.

נמצא שחומרים פעילי שטח, קטיונים אורגניים מקבוצת ה- alkyltrimethyl ammonium (ATMA) כגון octadecyltrimethyl ammonium bromide (ODTMA-Br), פועלים כציאנוצידים המעכבים בעילות את הפוטוסינתזה והצמיחה של ציאנובקטריה. אצות ירוקות נמצאו פחות רגישות מאשר ציאנובקטריה לתרכובות ATMA⁴.

המחקר הדגים את ההשפעה הרעילה של ATMTs על ציאנובקטריה וביסס את היישום שלהם כציאנוצידים לטיפול ושליטה בפריחות של ציאנובקטריה⁵.

היישום הפוטנציאלי של ATMA של לבקרה של פריחה ציאנובקטריאלית באגמים, מאגרי מים או נהרות הוכח במערכת מזוקסמוס. היישום של ATMA נמצא יעיל בדומה ליישום של פראוקסידים⁴. עמודות סינון המכילות גרנולות של מיצלות ODTMA-Br חרסית-בבנטוניט, הוכחו כאמצעי יעיל לסילוק מיקרוציסטינים (MCs) מהמים. יעילות ההרחקה השתנתה בין סוגי המיקרוציסטינים השונים. הרחקת הרעלן cylindrospermopsin הייתה פחות יעילה בגלל התכונות הכימיות של הרעלן⁶. מודל סינון/ספיחה יושם על מנת לחזות הרחקה של מיקרוציסטינים וצילינדרוספרמופסין והראה שלגרנולות של החומרים המרוכבים יש יכולת הרחקה של הרעלנים בקנה מידה גדול.

² Weiss, G. et al, 2019. *Environmental microbiology*, 21:1140-1150, and Weiss, G., et al., 2019. *Metabolites*, 9(6), p.110.

³ Daniel, E., et al. 2019, *Environmental Microbiology Report* 629-621, (5)11

⁴ Wu X., et al., 2021. *Chemosphere* 274:129778

⁵ Zhang, X., et al 2021. *Microorganisms*, 9(11):2258

⁶ Sukenik, A., et al., 2021. *Applied Nano*, 2(1), pp.67-81

המודל הורחב למצב שבו מתרחש פירוק של טוקסינים בתוך המסנן באמצעות חיידקים מיוחדים שהתפתחו במסנן תוך ניצול הטוקסינים כמזון. סימולציה של סינון מים שהכילו את הטוקסין MC-LR הביאה למסקנה שמערכת זאת יכולה להרחיק את הטוקסין בעילות גם בריכוזים גבוהים יותר ובקיבול של 20 מ³ לק"ג של פחם פעיל. מערך הטיפול המוצע, שבו מסנן הפחם הפעיל המים יגיעו למסנן המכיל את גרנולות החומר המרוכב, מה שיבטיח את איכות הטיפול וימנע דליפה של חיידקים למים המטופלים.⁵

המודל שימש גם לתכנון ממדי עמודות סינון ופרמטרים תפעוליים ליישום פוטנציאלי בקנה מידה גדול במפעל לטיפול במי שתייה⁵ (DWTP).

ממצאי המחקר זמינים ליישום באירועים של פריחת ציאנובקטריה בגופי מים הן במערכת האקוויטית והן במערכות טיפול במים. יתר על כן ממצאי המחקר היוו בסיס למאמר סקירה מרכזי בנושא:

"Cyanobacterial Harmful Algal Blooms in Aquatic Ecosystems: A Comprehensive Outlook on Current and Emerging Mitigation and Control Approaches."

שפורסם בגיליון מיוחד של כתב העת Microorganisms שערכו החוקרים הראשיים.⁷

⁷Sukenik A, Kaplan A., 2021. Microorganisms, 9(7):1472



3.6 חומרים נדיפים כחתימה כימית יעילה לשינויים באוכלוסיות ציאנובקטריה בכנרת



צילום: מוטי דיאמנט 18.4.21

**במימון
רשות
המים**

פלג אסטרון, אדית לייבוביץ'

- 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.
- בשנת 2021 נצפו ריכוזי החומר Disulfide, bis(1-methylethyl) בעיקר בחודשי האביב וסוף הקיץ.

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 ו/או 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 מגוון 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 שיטות המחקר לגופים רבים ובעלויות נמוכות יחסית. שיטות אלו כללו שימוש במיצוי על גבי סיבים ייעודיים Solid Phase Micro Extraction (SPME) 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 אורוגינחה. המשך סגר הקורונה גם בשנת 2021 בנוסף על המיעוט בפריחות השפיע גם הוא ולכן מעט תוצאות יחסית נותחו. בדו"ח זה אתמקד בתרומתו של חומר בודד בשם Disulfide, bis(1-methylethyl) בעל פרגמנט ייחודי ($m/z=150$) לניתוח המצאות אוכלוסיות ציאנובקטריה באגם.

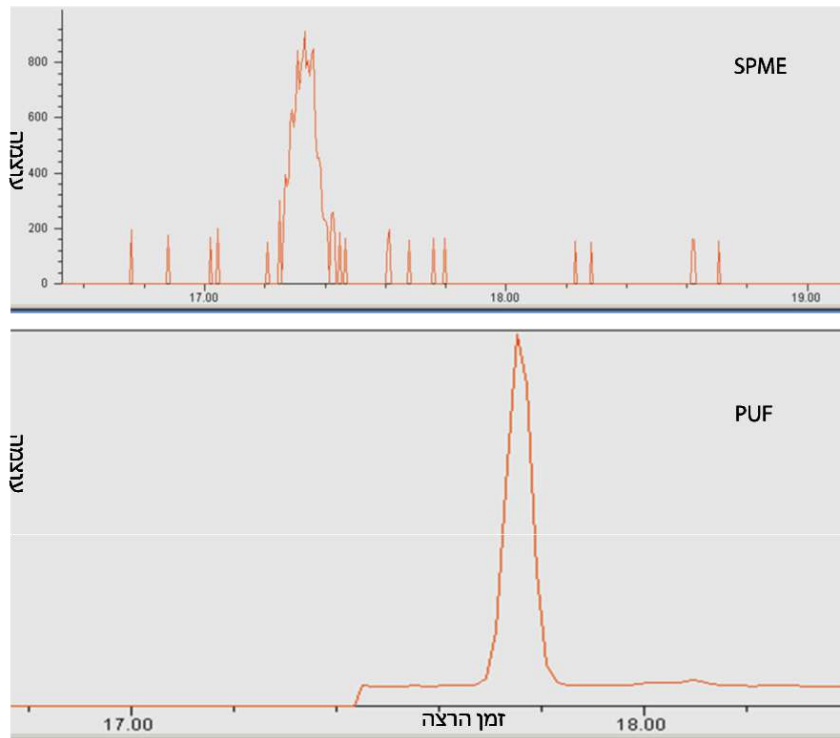
שיטות

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, כאשר לאלו המזוהים ברמה גבוהה נרכש סטנדרט לאימות סופי.

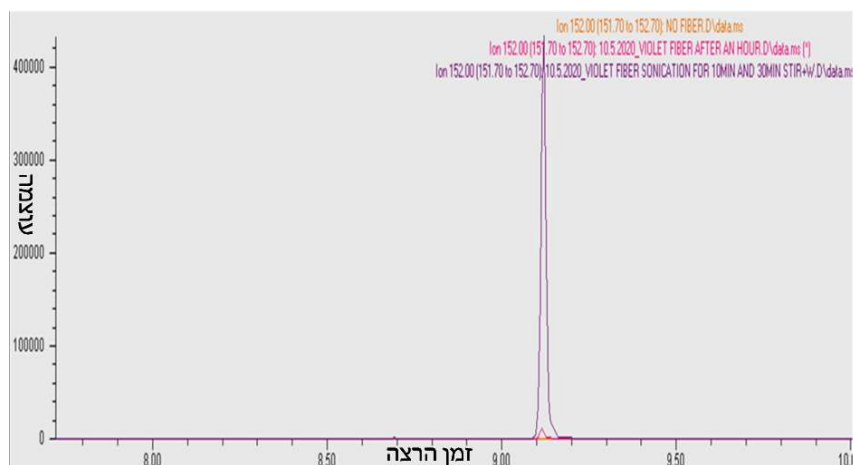
תוצאות ודיון

אחד החומרים הייחודיים העולה בבדיקות שונות של מיקרוציסטיס במקורות ספרותיים המרכזים בחינת תרביות מיקרוציסטיס הינו Disulfide, bis(1-methylethyl). חומר זה (כמו גם אחרים המדווחים בספרות) לא נמצא בדגימות שטח, רק בתרביות. לכן הצלחה במציאת חומר זה בדוגמאות שטח הינה בעלת ערך רב. ראשית בוצעו ניסויי כיוול לבחינת דרכים שונות לאיתור החומר בתרביות, כפי שהחזר בדוחות הקודמים. כפי שניתן לראות באיור 88, ניתן לאבחן את הימצאותו בתרביות מעבדת הכנרת כפי שדווח בספרות המקצועית.



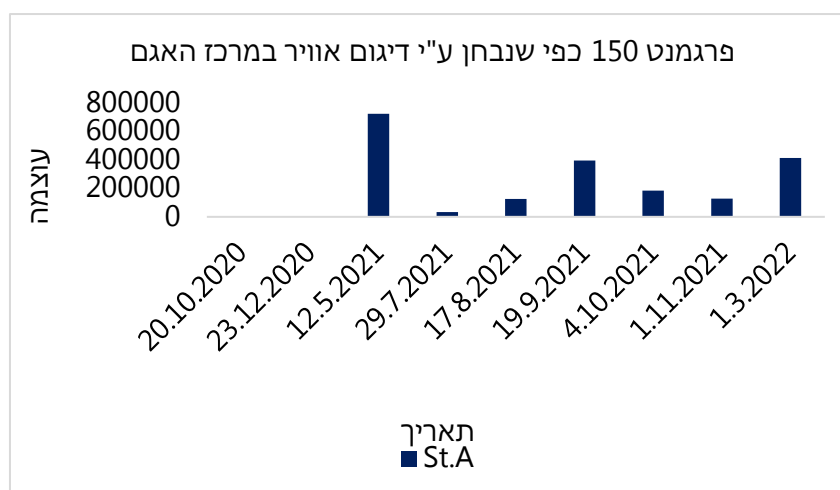
איור 88: דוגמא לזיהוי החומר Disulfide, bis(1-methylethyl) לאחר איסוף ע"י שיטות שונות כגון SPME (למעלה) ו PUF (למטה). אפיון החומר בוצע ע"י ניתוח הדוגמא ב GC/MS לאחר 17.7 דקות, בתמונות מוצג פרמנט $m/z=150$. יחידות העוצמה הן יחידות שרירותיות.

ניתן לראות כי לאחר שאיבת אוויר דרך סופח מסוג PUF ניתן לספוח בקלות רבה יחסית חומר זה ולנתחו ע"י GC/MS במעבדה. על פי מחקרים שונים, מולקולה זו ייחודית למין ה- PCC 7086¹ ואף ל- *Microcystis auroginosa*^{1,2}. ניתן לציין כי לאחר בדיקת תרביות המעבדה, חומר זה מצוי גם בתרביות *Aphanizomenon* אך ככל הנראה בריכוזים נמוכים יותר. בחינת המצאות חומרים נוספים כגון β -Cyclocitral בתרביות הראתה כי ניתן בקלות רבה יחסית לאבחן גם חומרים אלו שאינם ייחודיים למין *Microcystis* יחיד¹ כמוצג באיור 89, הכמות היחסית שלהם בפאזה גאזית עולה באופן ניכר לאחר 10 דקות סוניקציה בעוצמה נמוכה. תוצאות מעקב אחר פרמנט $m/z=150$ בדוגמאות כנרת מוצגות באיור 90.



איור 89: דוגמא לאיסוף (SPME) ואפיון מולקולת ה- β -Cyclocitral בעזרת שימוש בזיהוי פרגמנט m/z -152 ע"י ניתוח תוצאות GC/MS. בכתום מוצגת ביקורת אנליזת GCMS ללא תרבית, באדום מוצגת אנליזת SPME לתרבית מיקרוציסטיס ללא סוניקציה ובסגול- לאחר 10 דקות סוניקציה בעוצמה נמוכה.

- יחידות העוצמה הן יחידות שרירותיות.



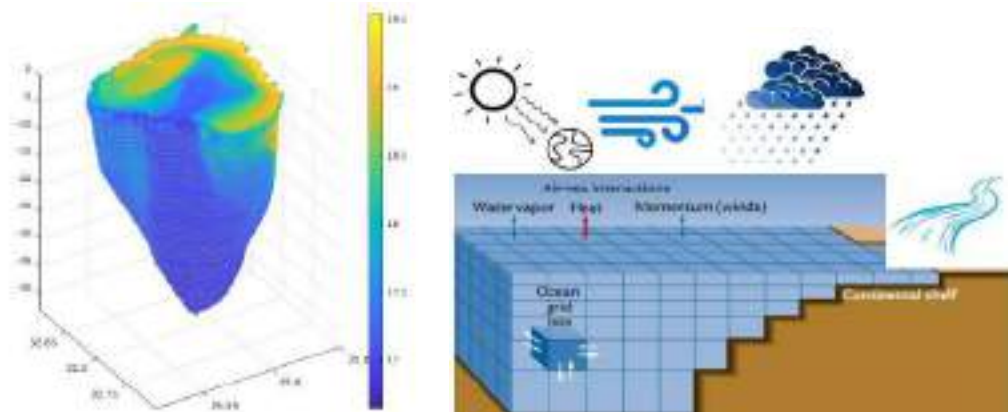
איור 90: פרגמנט $m/z = 150$ (T=17.7min) המבחן את נוכחות המולקולה Disulfide, bis(1-methylethyl) כפי שנמדד בתחנה A.

ניתן להבחין בעליה בריכוזי החומר בחודשים בהם עליה בריכוזי ציאנובקטריה (סוף הקיץ ואביב), וכפי שנצפה בתרביות, עלייה חדה יותר בחודשי האביב בהם מאובחנות אוכלוסיות מיקרוציסטיס בהשוואה לאפאניזומנון. יש לציין כי הסתכלות ראשונית זו אינה מספקת ונובעת מהחוסר בימי דיגום בשנת הקורונה ומחוסר בפריחת אצות מיקרוציסטיס מאסיבית. עם החזרה לשגרה השנה, יבוצעו דיגומים רבים יותר ולכן תתקבל תוצאה מייצגת יותר.

ספרות

1. Jüttner F. Characterization of Microcystis Strains by Alkyl Sulfides and β -Cyclocitral. *Zeitschrift für Naturforsch C*. 1984;39(9-10):867-871. doi:doi:10.1515/znc-1984-9-1002
2. Ye C, Yang Y, Xu Q, et al. Volatile organic compound emissions from Microcystis aeruginosa under different phosphorus sources and concentrations. *Phycol Res*. 2018;66(1):15-22. doi:10.1111/pre.12201

3.7 פיתוח, כיול ויישום מודל ביוגיאוכימי תלת מימדי לכנרת



**במימון
רשות
המים**

יעל אמיתי

- הרצת מודל עם פלט שעתי של השנים 2019-2021 משמשת לווידוא המודל אל מול מדידות מרחביות שונות.
- השוואת פרופילי עומק של תחנה A מראה התאמה טובה של התפתחות השיכוב הממוצעת לאורך החודשים.
- השוואת טמפרטורה מתחנות סביב האגם מראה כי גם דרום האגם מיוצג היטב על ידי המודל.
- כדי להשוות נתוני לויין של פני השטח, יש להשוות שונות מרחבית ולא ערכים מוחלטים.

מטרת המחקר

פיתוח, כיול ויישום מודל ביוגיאוכימי תלת מימדי לכנרת על בסיס המודל הפיזיקלי שנבנה לכנרת בשנת 2012, על מנת לבסס מענה עתידי לסוגיות אקולוגיות מרחביות, כגון עיתוי ותפוצה של פריחות אצות. מטרת המשנה הן:

- א. איסוף, בדיקת איכות והכנת קלט המודל הכולל: רוחות, אטמוספירה, ספיקה וטמפרטורת מי הירדן.
- ב. בחינת תוצאות המודל מול מדידות עומק בתחנות השונות בכנרת שנמדדות אחת לשבוע/שבועיים כחלק מתוכנית הניטור השוטפת של המעבדה לחקר הכנרת.
- ג. בחינה מרחבית של תוצאות המודל אל מול נתוני לויין ברזולוציה גבוהה.

רקע

בשנת 2012 נבנה מודל תלת מימדי ראשוני עבור הכנרת ברזולוציה אופקית של 400 מטר וחזלוציה אנכית של עד מטר. במחקר הנוכחי המודל מכויל עם פרמטריות ערבוב חדשות, נבנה עם חזלוציה מרחבית נוספת של 100 מטר ועובר שיפורים נוספים. המודל מתבסס על מודל אוקיאני גרי (MITGCM) אשר הותאם לבתימטריה ולמאפיינים הפיזיים של הכנרת. הפרמטרים הפיזיקליים של המודל מכוילים בהתאם למדדים הפיזיים של האגם. המודל מקבל מהמשתמש תנאי שפה כפי שמפורט בטבלה 13.

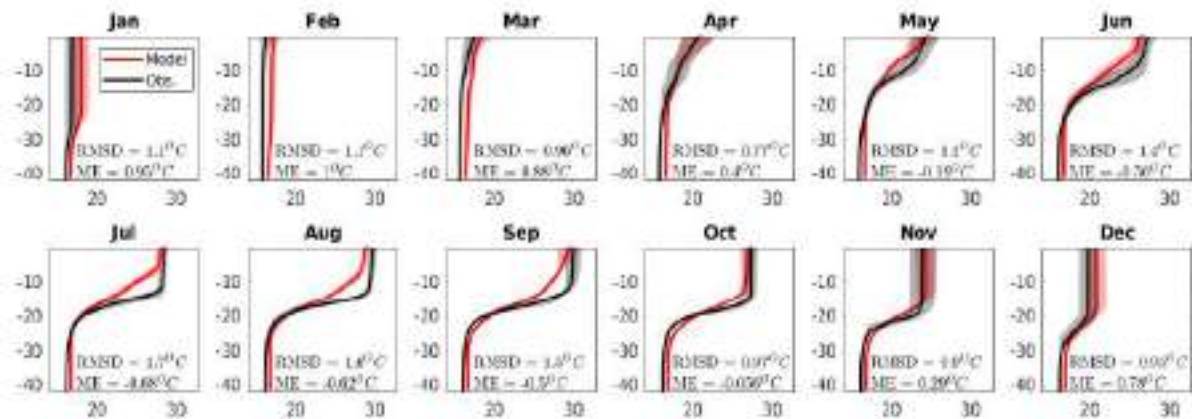
טבלה 13: סוגי קלט למודל התלת מימדי

סוג קלט	מקור קלט	רזולוציה עיתית	רזולוציה מרחבית
רוחות	מודל COSMO מהשירות המטאורולוגי	שעתית	2.5 ק"מ
טמפ' אוויר, לחות יחסית, משקעים	תחנות מטאורולוגיות בצמח, בבטחה, בגינוסר ובתחנה A במרכז האגם	כל 10 דקות	4 תחנות פזורות במרחב
קרינה ארוכת וקצרת גל	תחנה מטאורולוגית בגינוסר	כל 10 דקות	תחנה חופית בצפון מערב הכנרת
ספיקת הירדן	השירות ההידרולוגי	יומית	נקודתית בירדן
טמפרטורה וריכוז כלוריד במי הירדן	מקורות	כל כמה ימים	נקודתית בירדן

הפלט הבסיסי של המודל כולל טמפרטורה, מליחות, גודל וכיוון זרם בכל נקודת שריג במרחב התלת המימדי. בדו"ח זה אסקור השוואות בין תוצאות המודל לתצפיות מרחביות שונות ואדון במידת ההתאמה שלו. בהמשך העבודה המודל יקבל קלט ביוגיאוכימי ויעבור כיוול נוסף עבור פרמטרים במערכת האקולוגית.

תוצאות ודיון

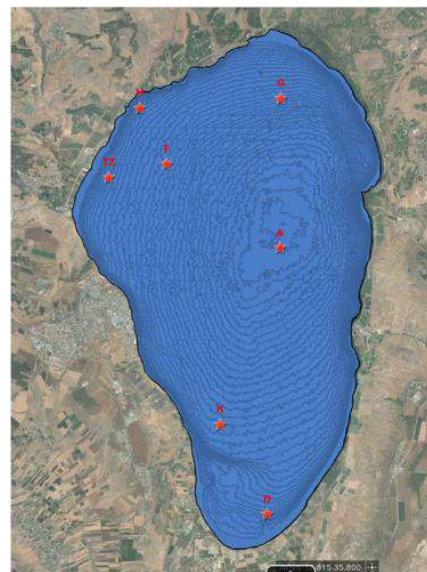
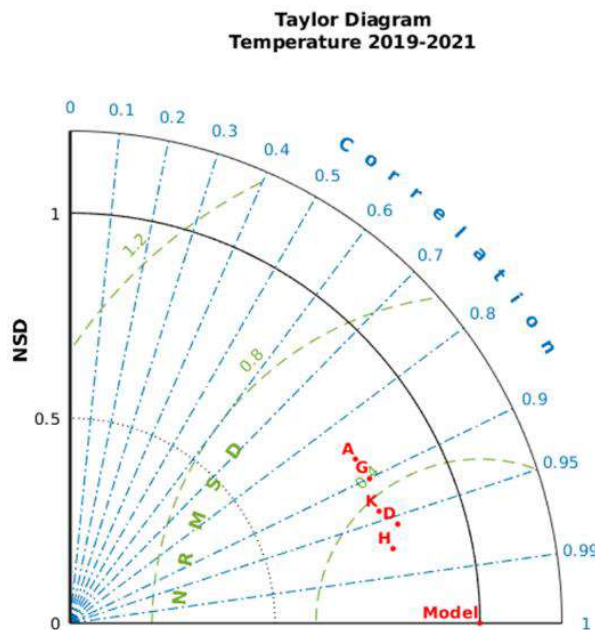
הרצת המודל לשנים 2019-2021 עם קלט מפורט ברזולוציה שעתית נבדקה מול מדידות פרופילי טמפרטורה מתוכנית הניטור (פעם בשבוע) בתחנה A (איור 91), מול מדידות טמפרטורה מכל מרחב האגם (איור 92) ומול תמונות לוויין של טמפרטורת פני השטח. נתוני הקלט שאינם ברזולוציה שעתית עובדו ועברו התאמה. למשל, לטמפרטורת הירדן הולבש מחזור יממתי (על פי ממוצע שעתית של מדידות טמפרטורה ברזולוציה גבוהה אשר נאספו בשנים 2010-2016) כיוון שטמפרטורת מי הירדן משתנה באופן משמעותי במהלך היום.



איור 91: השוואת פרופילים חודשיים של טמפרטורה בין תצפיות מהניטור (שחור) לבין המודל (אדום) בתחנה A. ממוצע על פני 2019-2021.



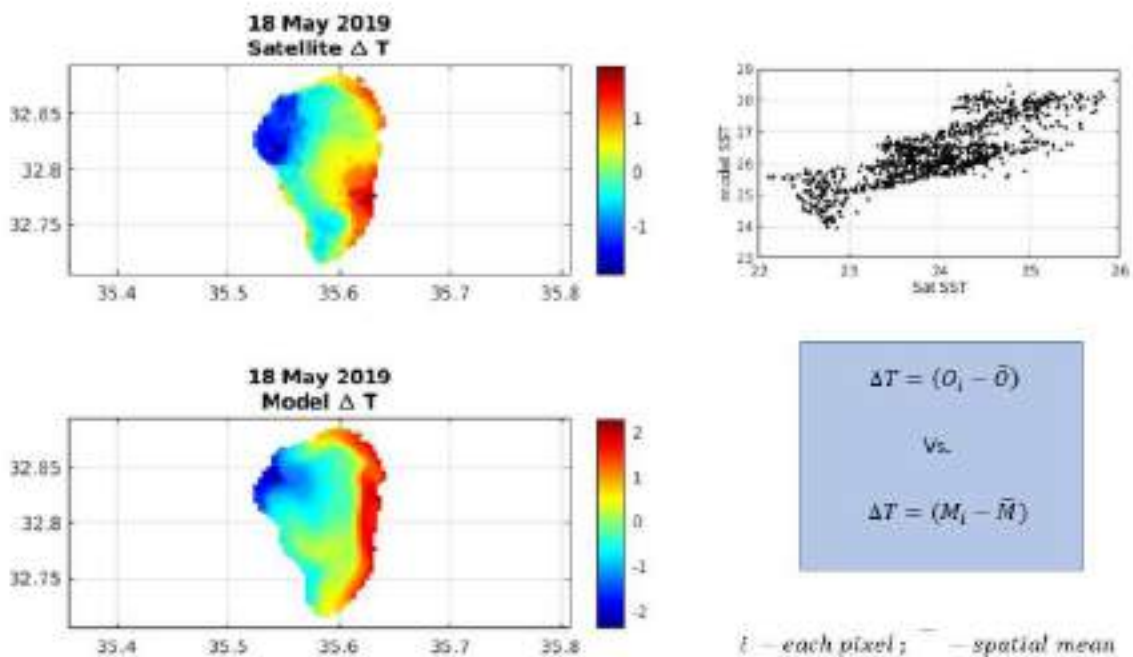
באיור 91, נראה כי ישנה התאמה סטטיסטית טובה בטמפרטורה של עמודת המים לאורך השנה. נראה כי המודל מדמה היטב את השיכוב שמתחיל להתפתח במרץ ואת הערבוב ההומוגני של עמודת המים בינואר. הקו השחור המודגש הינו ממוצע על פני כל מדידות העומק שנאספו בתוכנית הניטור של המעבדה בין השנים 2019-2021, עבור כל חודש וסביבו באפור מופיעה סטיית התקן מהמדידות. ובהתאמה, הקו האדום המודגש הינו כל פרופילי העומק מהמודל שמתאים לתאריכים ולשעות איסוף הנתונים, ובוורוד סטיית התקן של נתוני המודל. בכל חודש מצוינת הטעות הממוצעת של המודל מהמדידות ושורש ממוצע הריבועים. ניתן לראות שישנם חודשים בעלי התאמה יותר או פחות טובה אך מהשוואות בין שגיאות המודל של הכנרת ושגיאות מודלים של אגמים אחרים ברחבי העולם, השגיאה הינה בגדר טווח הטעות המוכר. על מנת להמשיך את ההשוואה למרחב האגם, נבדקו מדידות מתוכנית הניטור של כל התחנות הנדגמות אחת לשבוע (או שבועיים) באגם מול נתוני המודל המתאימים ביום, בשעה ובמיקום (איור 92). מדיאגרמת טיילור, המרכזת את סטיית התקן המנורמלת, שורש ממוצע הריבועים המנורמל והקורלציה של כל הנתונים בכל תחנה בשנים 2019-2021, ניתן לראות שישנה התאמה טובה. לכל התחנות יש קורלציה של מעל 0.9 בין המדידות למודל. סטיית התקן המנורמלת (סטיית התקן של המודל חלקי סטיית התקן של המדידות) מעידה על כך שהשונות בטמפרטורה מהמדידות גדולה, בכל התחנות, מהשונות של המודל ($<1NSD$). תופעה זו מוכרת גם היא ומוסברת על ידי כך שהמדידות מייצגות רגע אחד בעוד המודל הינו ממוצע על פני שעה. כמו כן, במדידות יהיה תמיד יותר "רעש" שקשור למערכת או לאמצעי המדידה בהשוואה לתוצאות המודל.



איור 92: דיאגרמת טיילור המייצגת במספר פרמטרים סטטיסטים את ההתאמה של מדידות הטמפרטורה בתחנות ניטור סביב האגם עם המודל (משמאל) ומפת התחנות (מימין).

שורש ממוצע הריבועים המנורמל (קו ירוק בהיר באיור 92) גם הוא מעיד על כך שהמודל מדמה בצורה מספקת את הטמפרטורה הנמדדת בתחנות ברחבי הכנרת. נתון מרחבי נוסף שמשמש לזיהוי המודל הינו תמונות לוויין של טמפרטורת פני השטח (SST). נתוני הלוויין המשמשים במחקר זה הינם מלוויין LandSat8 אשר עובר מעל הכנרת פעם ב-16 יום עם רזולוציה של 30 מטר, המאפשרת להבחין בשינויים מרחביים קלים. שלב מתקדם של שימוש בנתונים אלו הוא התאמה בין זרמים מהמודל לבין שונות מרחבית של חומר מרחף שלעיתים נראה על יד החזר של ספקטרום האור הנראה.

בהשוואה בין SST מהלוויין לטמפרטורת השכבה העליונה מהמודל מתגלה כי תמיד נתוני הלוויין יעידו על טמפרטורה קרה בכ-3 מעלות מטמפרטורת השכבה העליונה של המודל. זוהי שגיאה הנובעת מכך שהלוויין מתצפת את המיקרומטר העליון של הכנרת בלבד ולא את השכבה העליונה שלה. אידיוי מהמיקרומטר העליון גורם לכך שה-SST יראה קר מטמפרטורת המים עצמם. על כן יש להשוות את השונות המרחבית של הטמפרטורה בין הלוויין למודל על ידי הפחתת הממוצע המרחבי עבור כל מפה (איור 93). נראה כי יש התאמה ויזואלית טובה בשונות המרחבית של הטמפרטורה בתמונת לוויין שצולמה ב-18 במאי 2019 מול תוצאות המודל מאותו יום באותה שנה. השוואה זו אפשרית כאשר יש כזו שונות מרחבית מובהקת אך היא בעייתית כאשר אין שונות מרחבית באגם (כאשר השכבה העליונה מעורבת לחלוטין למשל). בהשוואת הערכים הגולמיים (פאנל ימני עליון באיור 93) ניתן לראות כי יש התאמה בין הערכים למרות ההבדלים האבסולוטיים ביניהם.



איור 93: השוואה בין שונות מרחבית של הטמפרטורה בפני השטח מהלוויין (מפה עליונה) ומהמודל (מפה תחתונה) והשוואת הערכים האבסולוטיים של שני מקורות המידע (גרף ימני עליון). משוואת חישוב השונות המרחבית מוצגת מימין.

לסיכום, נראה כי המודל מצליח לדמות היטב את שדה הטמפרטורה והשונות המרחבית והאנכית של שדה זה. השוואה זו נערכה גם עבור ערכי המליחות עם התאמה פחות טובה בגלל משתנים שאינם נלקחים בחשבון (למשל, נביעות מלוחות מקרקעית הכנרת). בחודשים הקרובים יתווסף רכיב ביוגיאוכימי שידרוש כיול וזיודא נוסף של המודל מול תצפיות מייצגות של המערכת האקולוגית בכנרת אולם הבסיס הפיזיקלי המוצג בדו"ח זה הינו משמעותי להמשך.

3.8 בדיקת השפעת הזרמת מי התפלה לכנרת באמצעות מודל תלת מימדי



שיטפון בנחל צלמון מרץ 2022. צילום: מוטי דיאמנט

במימון
רשות
המים

יעל אמיתי

- מים מותפלים שיוזרמו לכנרת ימהלו במהירות אך עלולים להצטבר בשכבת האפילימניון לאחר שנים רצופות של הזרמה בפני השטח ושאיבה מהעומק.
- בהזרמת מים מותפלים רק בחצי שנה הראשונה של השנה עדיין ישנו צפי ל-5% מים מותפלים בשכבת האפילימניון.
- להזרמת מים מותפלים השפעה מסוימת על יציבות השיכוב של עמודת המים באגם. מאפיין זה עשוי להוות גורם מתקן להשפעת שינויי האקלים על האגם.

מטרת המחקר

מידול תרחישי הזרמת מי התפלה אל הכנרת ובדיקת פיזור הזרמה זו כתלות בסירקולציה והשיכוב של מי האגם. מטרת המשנה הן:

- הצגת זרימה חדשה של מים מותפלים דרך נחל צלמון לכנרת במודל תלת מימדי.
- בחינת פיזור המים המותפלים ומיהולם במרחב הכנרת בהנחת תרחישים שונים.
- בחינת ההשפעות של הזרמת מים מותפלים על השיכוב בכנרת.

רקע

הזרמת מים מותפלים לכנרת נבחנת באמצעות מודל זרימה תלת מימדי של הכנרת המאפשר מענה עבור ההיבטים הפיזיקליים של הזרמת מים לאגם בתרחישים השונים.

קצב מיהול המים הנכנסים, פיזורם המרחבי, השינויים בשיכוב באגם ועוד נבחנים בעזרת מודל הידרודינמי תלת מימדי.

באמצעות המודל, ניתן להריץ סימולציות עם תנאי שפה שונים, כגון כניסה של מים מותפלים דרך נחל צלמון במהלך חמישה חודשים או שנה שלמה, ולבדוק את פיזור המים הנכנסים כתלות בסירקולציה התלת מימדית בכנרת כפי שיוצג בפרק זה. פיזור המים בכנרת נבדק בעזרת שימוש בחבילת סמן פאסיבי ש'צובע' את המים המותפלים, ובהינתן שדה זרימה, ניתן לאפיין את ההתפשטות במרחב ולעקוב אחר תכונות המיהול של המים המותפלים הנכנסים לאגם דרך תוואי הצלמון.

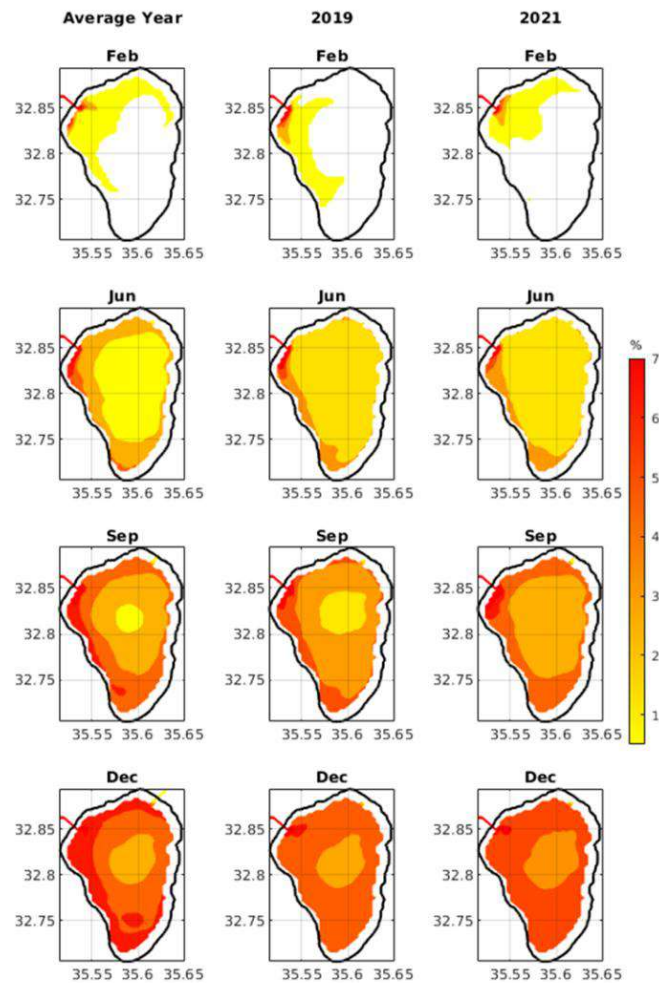
תוצאות ודיון

על מנת לבחון את השפעת הזרמת המים לכנרת דרך נחל צלמון נבחנו מספר תרחישים עם צלמון כנחל פעיל עם ספיקה חודשית משתנה של בערך 20 מלמ"ק לחודש במהלך כל השנה או רק בחודשים ינואר עד מאי, בשנים עם אילוצים אטמוספריים והידרולוגיים שונים (טבלה 14). למים ניתנו תנאי שפה של מהירות חודשית המתאימים לספיקה החודשית במורד הנחל וטמפרטורה במנעד שנתי קטן ממנעד הטמפרטורה בירדן תחת ההנחה שהמים הזורמים בצלמון חשופים לטמפרטורת האוויר (איתה הם בשיווי משקל תרמי) למרחק קצר יותר ממי הירדן. לכן, הם פחות קרים בחורף ופחות חמים בקיץ ממי הירדן. מליחות מי הצלמון נקבעה לאפס. ברוב הסימולציות, הירדן בעל ספיקה ממוצעת כפי שנמדדה בגשר הפקק בין 2015-2020, בשנה ברוכה הירדן בעל ספיקה גבוהה מהממוצעת ובשנה שחונה בעל ספיקה נמוכה מהממוצעת. כל תרחישי ההזרמה בוצעו עם סמן פאסיבי בתוואי הצלמון, כאשר בתרחישים עם ממוצע רוחות נבדקה הצטברות סמן פאסיבי לשנה שנייה של הזרמה. בפרק זה יוצגו תוצאות עיקריות בלבד מהסימולציות שנעשו.

טבלה 14 : סיכום הרצות המודל עבור בחינת תרחישי הזרמת מים מותפלים לכנרת

שם הרצה	כניסת צלמון ספיקה\טמפרטורה	רוחות	משקעים\ירדן
ביקורת – ללא צלמון	אין	ממוצע יומי של 2015-2020 ממודל COSMO	ממוצע יומי של 2015-2020
2019\2020\2021 ללא צלמון	אין	אילוח שעותי 2019\2020\2021 ממודל COSMO	ממוצע יומי של 2015-2020
צלמון חצי שנה	ספיקה מינואר עד מאי. טמפרטורת מים במנעד שנתי קטן מזה של מי הירדן.	ממוצע יומי של 2015-2020 ממודל COSMO	ממוצע יומי של 2015-2020
צלמון שנה שלמה	ספיקה כל השנה. טמפרטורת מים במנעד שנתי קטן מזה של מי הירדן.	ממוצע יומי של 2015-2020 ממודל COSMO	שנה ממוצעת\ברוכה\שחונה
2019\2020\2021 צלמון חצי שנה	ספיקה מינואר עד מאי. טמפרטורת מים במנעד שנתי קטן מזה של מי הירדן.	אילוח שעותי 2019\2020\2021 ממודל COSMO	ממוצע יומי של 2015-2020
2019\2020\2021 צלמון שנה שלמה	ספיקה כל השנה. טמפרטורת מים במנעד שנתי קטן מזה של מי הירדן.	אילוח שעותי 2019\2020\2021 ממודל COSMO	ממוצע יומי של 2015-2020

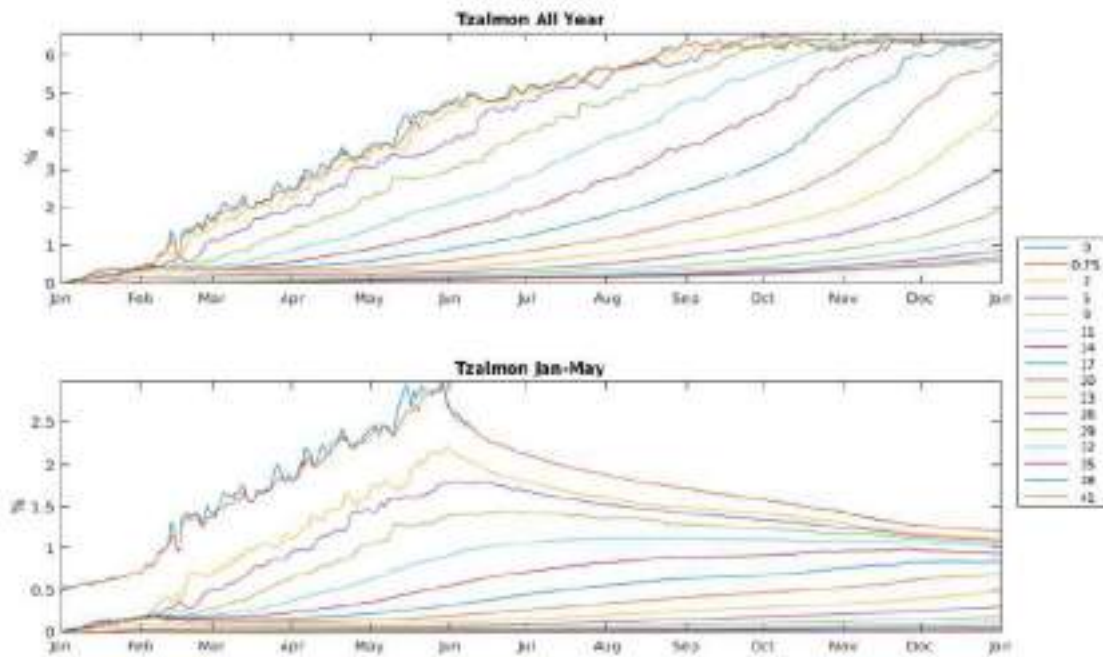
באיור 94 מוצגים ממוצעים אנכיים של אחוז הסמן הפאסיבי אשר הוכנס למים המותפלים בכניסת הצלמון בשנה ממוצעת לעומת שנים עם רוחות שעתיות. ניתן להבחין כי המים המותפלים בתחילת השנה מגיעים בעיקר לאזור פיתחת הצלמון והחופים המזרחיים אך מאמצע השנה ישנו אחוז מסוים של מים מותפלים בכל מרחב הכנרת. כאשר אחוז גדול יותר של מים אלו נמצא על פני עמודות רדודות בליטרול. הפיזור אינו זהה בין השנים כיוון שהרוחות משפיעות על מבנה הסירקולציה בכנרת אך יש בין העמודות באיור 94 דמיון בהתפזרות של הסמן לאורך השנה.



איור 94: ממוצע אחוז מים מותפלים על פני עמודת המים במהלך השנה עבור שנה ממוצעת (עמודה שמאלית), שנת 2019 (עמודה אמצעית) ושנת 2021 (עמודה ימנית).

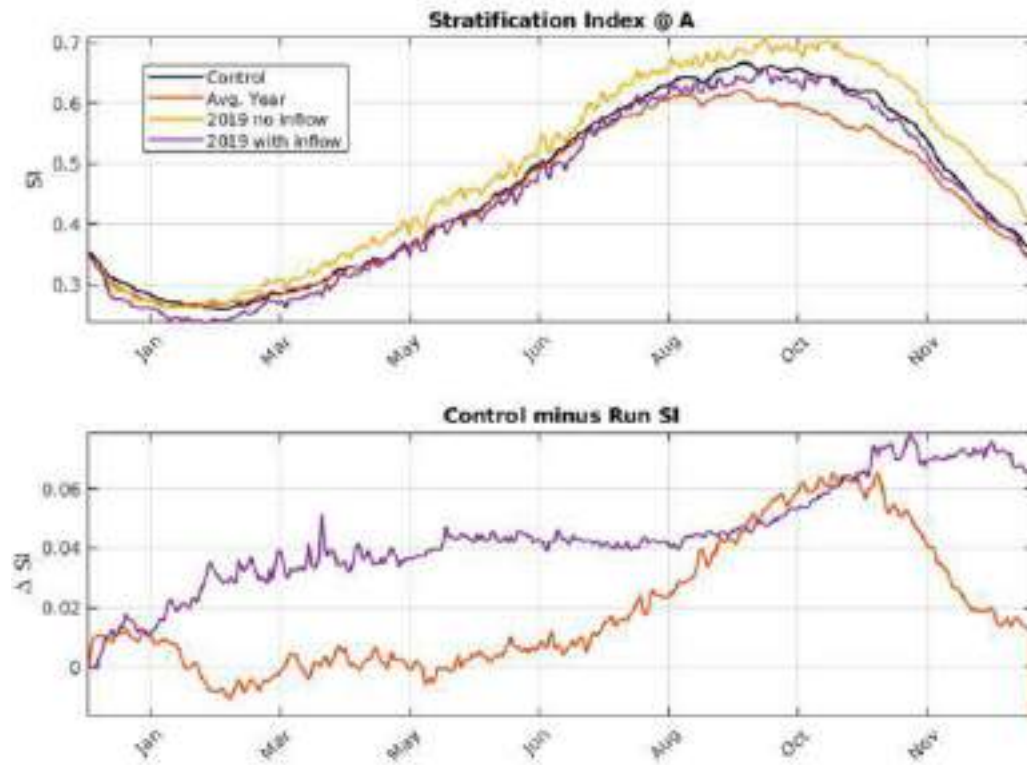
כאשר בוחנים את הסמן הפאסיבי שמסמל את המים המותפלים בשכבות שונות של המודל (איור 95) ניתן לראות שבשנה אחת של הזרמה הממוצע על פני שכבה יכול להגיע לריכוז של יותר מ 6% באפילמניון אם מזרימים במהלך כל השנה (פאנל עליון באיור 95). כלומר, 6% מהמים המותפלים שנכנסו דרך הצלמון התפזרו באפילמניון בכל מרחב בכנרת. בשנה השנייה של הזרמה רצופה (לא מוצג) 10% מהמים המותפלים ימלאו בממוצע את האפילמניון. חשוב לציין שאין במודל שאיבה ויש לצפות שמכיוון שיישאבו מים מותפלים באחוז מסוים, הכנרת תגיע לשיווי משקל של אחוז מים מותפלים בשכבות השונות.

אם מזרימים רק בחצי הראשון של השנה (פאנל תחתון באיור 95) הריכוז הממוצע בסוף השנה הוא עד 1% בכל עמודת המים, ואם גם בשנה השנייה מזרימים רק בחודשים הראשונים (לא מוצג), 5% מהמים המותפלים ממלאים בממוצע את שכבת האפילימניון. בהנחה והשאיבה היא מעומק שנמצא מתחת לאפילימניון, הרי שהחלק היחסי של מים מותפלים באפילימניון יהיה גדול יותר ועשוי להשפיע על המאפיינים הביולוגיים והכימיים של שכבה זאת. רק בהינתן עומקי שאיבה מדויקים וכמויות מים הצפויות להישאב בכל מתקני השאיבה באגם ניתן יהיה לכמת באופן מדויק יותר את התרומה היחסית של מי התפלה לנפח מי האפילימניון.



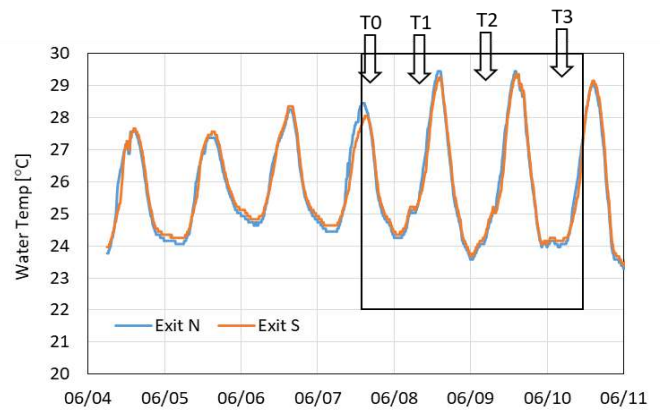
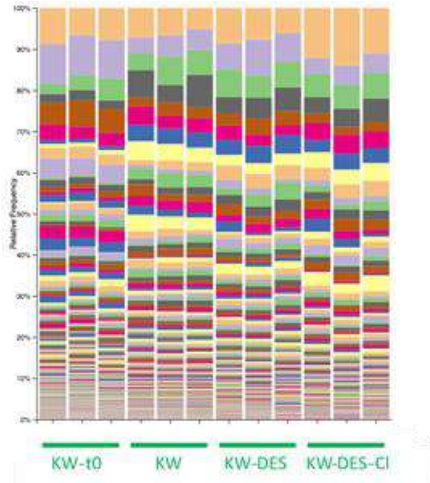
איור 95: ממוצע אחוז מים מותפלים לכל שכבה שלישית של המודל לאורך שנה עם הזרמה שנתית (פאנל עליון) והזרמה עד חודש מאי (פאנל תחתון).

ההשפעה של כניסת מים מותפלים על השיכוב באגם נבדקה בעזרת אינדקס שיכוב שהוא בעצם אינטגרל של תדירות ברנט-ויאסלה המעידה על היחס בין כוח הכובד לבין כוח הציפה של גוף חסר משקל בעמודת המים. ככל שאינדקס השיכוב גדול יותר כך השיכוב של עמודת המים יציב יותר. ניתן לראות בפאנל העליון של איור 96 כי השיכוב בחודשי הקיץ הוא הכי יציב עבור כל הסימולציות, כמצופה. כאשר בוחנים שנה ממוצעת (או 2019) ללא הזרמה של מים מותפלים אל מול שנה ממוצעת (או 2019) עם הזרמה מתמשכת לאורך השנה, ניתן לראות שהשיכוב בתחנה A נחלש (ערכים חיוביים בפאנל התחתון של איור 96). זהו גם המצב בכל מרחב האגם (לא מוצג). היחלשות השיכוב בנוכחות הזרמת מים מותפלים נובעת מכך שנכנסים לכנרת מים יותר קרים מהטמפרטורה באפילימניון (מים לקראת שיווי משקל תרמי עם האוויר) ושוקעים להיפולמניון רוב השנה כך שיש מעבר של מים בין השכבות מה שמחליש את השיכוב. בהשוואה בין 2019 ל-2021 ללא הזרמה כלל (לא מוצג בדו"ח זה) נראה שאינדקס השיכוב משתנה באותו סדר גודל כתלות ברוחות. מכך משתמע שהשינוי בשיכוב בשל הזרמה הוא אינו משמעותי אך יכול להפוך לכזה תחת שינויי אקלים. לסיכום פרק זה, צפוי מיהול מהיר ואפקטיבי של מים מותפלים שיחזרו לכנרת דרך הצלמון. לאחר מספר שנים רצופות של הזרמה עלולים להצטבר בשכבת האפילימניון מים מותפלים כיוון שההזרמה בפני השטח והשאיבה מהעומק. זמן ההוות של המים המותפלים באזורים שונים של עמודת המים ייבדק בהמשך העבודה. בנוסף, תיבחן השפעת ההזרמה על יציבות השיכוב תחת שינויי האקלים הצפויים.



איור 96: אינדקס השיכוב לאורך שנה בה מחרמים מים מותפלים בתרחישים שונים (פאנל עליון) וההבדלים באינדקס השיכוב לאורך שנה בין תרחישים ללא הזרמה לתרחישים עם הזרמה (פאנל תחתון).

3.9 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, דוד קמינגס, חמי רושנסקי

- בניסויי מעבדה נמצאה השפעה על הרכב האוכלוסיות החיידקיות והאוקריוטיות בעקבות המיהול במי התפלה. מיהול במי ביקורת נטולי יונים 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 נמצא שלמיהול מי כנרת במי התפלה לאחר הכלרה והקשיה השפעה ברורה על אוכלוסיות הפיטופלנקטון והבקטריופלנקטון. השפעה זו באה לידי ביטוי בריכוז הכלורופיל והרכב אוכלוסיות הפיטופלנקטון וכן בהרכב האוכלוסיות החיידקיות.
- התוצאות מצביעות על כך שבמי התפלה מוכלרים קיימים רכיבים העלולים להשפיע לרעה על מגוון המינים בכנרת.

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

השערת העבודה: מים מהמערכת הארצית (בעיקר מים שמקורם בהתפלת מי ים, להלן מי התפלה) אשר יוזרמו 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 ומרחפים במים, עם השלכות אפשריות לגבי הביטה של האגם. במערכות אקוטיות, ריכוז והרכב הפיטופלנקטון, הזואופלנקטון והחידקים (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 השפעה של הזרמת מי התפלה לאגם על איכות המים בתחום מקומי או נרחב. ישנה חשיבות במיוחד לשאלה אם תוספת של מי התפלה תעודד או תעכב פריחות של ציאנובקטריה העלולות לפגוע באיכות מי הכנרת.

שיטות**א. ניסויי מעבדה**

בוצעו ניסויי מעבדה בהן נבדקה תגובת אוכלוסיות הפיטופלנקטון, זואופלנקטון ובקטריופלנקטון במי כנרת לתוספות שונות של מי התפלה. הניסויים בוצעו בעונות שונות לייצוג מי כנרת שמקורם באביב ובקיץ-סתיו. בניסויים אלו נמדדו השינויים בהרכב ופעילות אוכלוסיות הפיטופלנקטון והזואופלנקטון ונקבעו השינויים בהרכב אוכלוסיות הבקטריופלנקטון בשיטות ריצוף מתקדמות.

ב. ניסויי שדה - מזוקוסם

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

סיכום התוצאות

בניסויי מעבדה נמצאה השפעה משמעותית על הרכב האוכלוסיות החידקיות והאוקריוטיות בעקבות המיהול במי התפלה. מיהול במי הביקורת נטולי היונים (מי קולונה) השפיע באופן מינימלי על הרכב האוכלוסייה החידקית, בעוד מיהול במי התפלה גרם לתמורות משמעותיות הניכרות בירידה בתפוצה של מינים מסוימים ועליה בתפוצתם של אחרים.

מיהול מי כנרת במי התפלה משפיע על ההרכב הביולוגי של המים ללא תלות באחזי המיהול, והדבר מצביע על כך שבמי ההתפלה קיימים רכיבים האחראים להשפעה זו, ואינם קיימים במים נטולי יונים ששימשו כביקורת.

בניסויי שדה במערכת המזוקוסם 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 זאת על מנת לחזק את הממצאים מניסוי שבחן מים מותפלים 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 המזוקוסם.

למיהול מי כנרת במי התפלה לאחר הכלרה והקשיה השפעה ברורה על אוכלוסיות הפיטופלנקטון. השפעה זו באה לידי ביטוי בריכח הכלורופיל והרכב אוכלוסיות הפיטופלנקטון. 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.

נמדדה פגיעה חריפה בריכחי הפרדיניום בשקים בהם מי הכנרת נמהלו במי התפלה לאחר כלוריניציה והקשיה. לעומת זאת למיהול במי התפלה ללא כלוריניציה הייתה השפעה מתונה על ריכח תאי הפרדיניום. הסתמנה מגמה שלמיהול מי הכנרת במים מותפלים לאחר כלוריניציה והקשיה השפעה מעכבת גם על התפתחות אוכלוסיית מיקרוציסטיס מהמין *M. aeruginosa* בעוד למיהול מי כנרת במי התפלה ללא טיפול, השפעה מעודדת על התפתחות מין זה ומינים נוספים של מיקרוציסטיס. לא ניתן היה לקבוע באופן חד משמעי שאוכלוסיות הזואופלנקטון הושפעו ממיהול מי כנרת עם מים מותפלים שעברו כלוריניציה והקשיה.

אנליזות גנטיות של אוכלוסיות חיידקיות ואאוקריוטיות במערכת המזוקוסם מצביעה על ממצאים דומים לאלה שהתקבלו בניסוי המעבדה. מיהול מי הכנרת במים מותפלים גורם לצמצום מגוון המינים בשקי הניסוי, וניכר שמי התפלה מוכלרים מביאים להשפעה החזקה ביותר על האוכלוסיות החיידקיות והאאוקריוטיות. על בסיס התוצאות עולה אפשרות שבמי התפלה מוכלרים קיימים רכיבים העלולים להשפיע לרעה על מגוון המינים במי הכנרת.

3.10 מערכת ICT לזיהוי תגובת עמידות אקולוגית במערכות מים מתוקים



במימון
משרד
המדע

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

- חישה מרחוק היא כלי חשוב בניטור מרחבי של פריחות אצות וציאנובקטריה בגופי מים.
- פותחה גישה חדשנית, הנסמכת על מידע היפרספקטראלי מלוויינים לכימות פיגמנט מסוג פיקוציאנין (PC) הנפוץ בציאנובקטריה, וכלורופיל (Chl) שהוא פיגמנט אוניברסלי לפיטופלנקטון.
- פותח אלגוריתם לחישוב התפוצה של ציאנובקטריה ואצות אחרות על בסיס הפיגמנטים שלהם ויושם למרחב הכנרת במהלך אירוע פריחה של ציאנובקטריה ובמועדים בהם לא הייתה פריחה.

מטרת המחקר

מטרת הפרויקט הינה פיתוח טכנולוגיה לאיסוף מידע סביבתי, ניתוחו בשיטות של תקשורת מידע (ICT) communication technology Information ויישום לניטור מערכות אקוטיות. יעד מרכזי הוא הדגמת הטכנולוגיה באגם BIWA ביפן ובכנרת בישראל תוך שילוב מידע הנאסף בזמן אמת מהמערכות האקולוגיות והטמעתו בגופי מידע ציבוריים לשיפור דרכי קבלת החלטות תפעוליות. היעדים המחקריים המידיים הינם זיהוי התפתחות אוכלוסיות רעילות של ציאנובקטריה במקום ובזמן וחיזוי פוטנציאל ההתפתחות של פריחות אלו בטווח זמן קצר now casting ובמרחב גוף המים תוך שילוב המידע במערכות תקשורת SMS.

רקע

ניטור אוכלוסיות פיטופלנקטון בגופי מים מתוקים באמצעות הטמעת נתוני חישה מרחוק מאפשר כימות אירועים חריגים של פריחת אצות וציאנובקטריה (Cyanobacteria) ועשוי לתרום לביסוס מערך חיזוי לקבלת החלטות להפעלת אמצעי מניעה ושליטה בפריחה. מגוון אלגוריתמים ביו-אופטיים פותחו להערכת הריכוז של כלורופיל a (Chl a) שהוא אוניברסלי לכל מרכיבי הפיטופלנקטון ול- (PC) phycocyanin שהוא ספציפי לציאנובקטריה זאת בהסתמך על מידע ספקטראלי המתקבל מלוויינים. אלגוריתמים לחישוב ריכוז של Chl a בגופי מים מבוססים בעיקר על פס ספקטראלי אדום-קרוב אינפרא אדום (NIR-Red). האלגוריתמים של יחס רצועת אדום-NIR מושפעים פחות מהפרעות ספקטראליות של מזהמים במים ומניבים דיוק רב יותר במדידת ערכים של ריכוז Chl a גם במים עכורים. הכימות של PC מאפשר לזהות ציאנובקטריה ולהבדיל ביניהן לבין שאר מרכיבי אוכלוסיית הפיטופלנקטון. ל- PC מאפייני בליעה סביב 620 ננומטר, המהווים בסיס טוב לזיהוי ציאנובקטריה מהחלל. כל הגישות משתמשות בערך שנמדד סביב 620 ננומטר או ברצועה הקרובה ביותר האפשרית המכילה מידע על קליטת PC לצורך הערכת PC ו/או כדי לזהות פריחות של ציאנובקטריה. אלגוריתמים אלו רגישים לשגיאות בריכוזי PC נמוכים, עקב טעויות בתיקוני בסיס או בנירמול הערכים, תרומות של פיזור האור, מקדמי בליעה ספציפיים, רגישות לפיגמנטים אחרים, הפרעה של-DOM (חומר אורגני מומס) ובליעה אופטית של חומר מרחף חלקיקי. בעבודה זו פותחו אלגוריתמים חדשים לאומדן במקביל של ריכוזי הפיגמנט הציאנובקטריאליים העיקריים (Chl a ו-PC) מנתוני חישה מרחוק היפרספקטראלית.

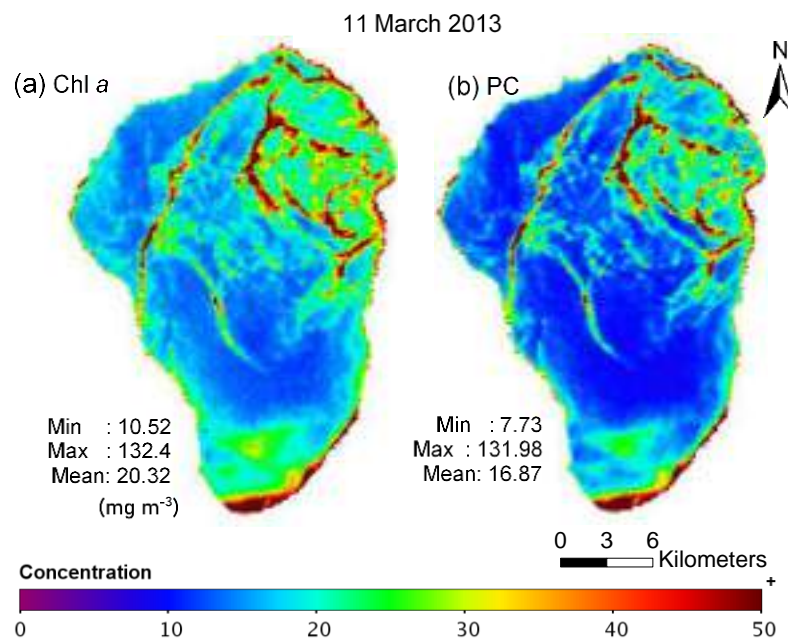
תוצאות ודיון

נתוני ריכוז כלורופיל בפני המים מ 0-1 מ' התקבלו מבסיס נתוני המעבדה לחקר הכנרת עבור מועדים בהם ניתן היה לקבל מידע ספקטראלי עבור הכנרת מחיישן Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean, HICO אשר הותקן בתחנת החלל הבין לאומית בין 2009 ל- 2014. אלגוריתם להערכת ריכוז ה-PC פותח על סמך דגימות המים שנאספו על ידי ד"ר Deepak R. Mishra (המחלקה לגיאוגרפיה, אוניברסיטת ג'ורג'יה) מבריכות הממוקמות ליד סטנוויל, מיסיסיפי, ארה"ב. השיטה של כימות PC תוארה ע"י Mishra et al.,⁸ 2013.

נתוני HICO (Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean) עבור הכנרת הורדו מאתר NASA OBPG (Ocean Biology Processing Group) <https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/HICO>. 29 ותמונות ללא

⁸ Mishra, S., Mishra, D.R., Lee, Z., Tucker, C.S. (2013). Quantifying cyanobacterial phycocyanin concentration in turbid productive waters: A quasi-analytical approach. Remote Sens. Environ. 133, 141–151

הפרעה אטמוספירית ועננים שימשו לניתוח וחישוב הפיזור המרחבי של Chl ו-PC. האלגוריתמים שפותחו לכימות PC ו-Chl על בסיס מדידות חישה מרחוק מתוארים על ידי Dev et al⁹ (2022). אלגוריתמים אלה יושמו על נתונים ספקטראליים שהתקבלו מתמונות החישה מרחוק ונאספו על ידי מערכת צילום-הדמייה היפרספקטרלי (Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean, HICO) שהותקנה בתחנת החלל הבין-לאומית בשנים 2012-2014. התוצאות נבדקו ואושרו לאירועי פריחת ציאנובקטריה בכנרת ולמועדים בהם לא התקיימה פריחה. מבין המועדים שבהם ניתן היה לקבל מידע ספקטראלי אמין, ריכחי הפיגמנטים הגבוהים ביותר בשכבת פני השטח זוהו ב-11 במרץ 2013 במהלך אירוע של פריחת *Microcystis* ויצירת צופת על פני המים (איור 97). התוצאות מראות שאלגוריתמי החישוב אמינים ומציגים את ההטרוגניות המרחבית של פיזור הפיגמנטים PC ו-Chl במרחב הכנרת.

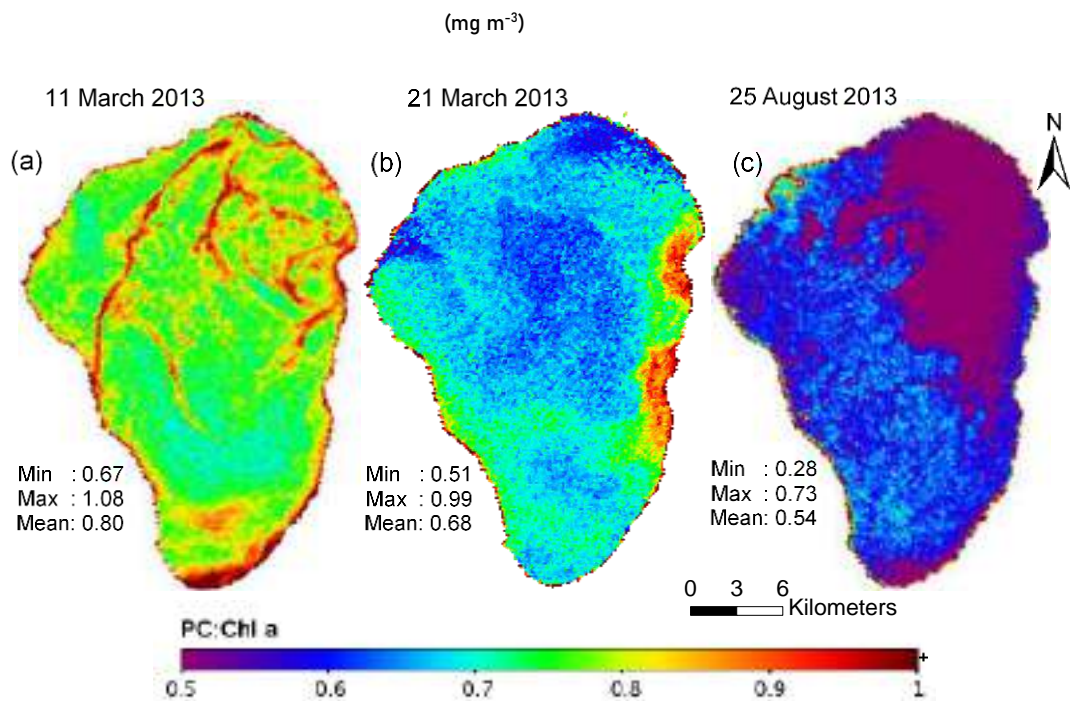


איור 97: התפלגות מרחבית של (a) ריכח כלורופיל *Chl a* ו (b) ריכח PC בכנרת במהלך אירוע פריחה של מיקרוציסטיס ב-11 במרץ 2013. הפיזור המרחבי של הפיגמנטים מוצג כמפת צבע על פי גרדיאנט מכחול לאדום (נמוך -0 לגבוה 50 מיקרוגרם לליטר בהתאמה).

מאחר ו-PC הוא פיגמנט המצוי בציאנובקטריה ו-*Chl a* מצוי בכל מרכיבי הפיטופלנקטון, כולל ציאנובקטריה, ההתפלגות המרחבית של היחס PC/Chl יכולה לספק מידע שימושי לגבי הפרופורציה והשונות המרחבית של ציאנובקטריה מכלל הפיטופלנקטון בגוף המים. השתמשנו באלגוריתמים שפותחו לכימות של ריכחי PC ו-Chl שמקורם בלויין, לחישוב יחס PC/Chl. תוצאות אלו מוצגות עבור שלושה מקרים בהם היחס הממוצע של PC/Chl לכל מרחב הכנרת הוא בין 0.54 ל-0.80, אשר נצפו בתאריכים שונים במהלך שנת 2013 ומציגים דפוסים שונים של התפלגות ציאנובקטריה במים (איור 98). המצבים המתוארים באיור Y משקפים אירוע של פריחת מיקרוציסטיס ב-11 במרץ 2013, אירוע נוסף כ-10 ימים

⁹ Dev P.J., Sukenik A., Mishra D.R., Ostrovsky I. (2022). Cyanobacterial pigment concentrations in inland waters: Novel semi-analytical algorithms for multi- and hyperspectral remote sensing data. *Sci. Total Environ.*150423, 805

לאחר מכן, מצב בו הצטמצמה אוכלוסיית המיקרוציסטיס והתרכזה בעיקר באזור החופי במזרח האגם (21 במרץ 2013), ובתקופת הקיץ במהלך התפתחות אוכלוסייה של אפניזומנון (25 באוגוסט 2013). בעבודה זו אנו מציעים להשתמש ביחס PC/Chl a כמדד אמין למעקב אחר התפתחות אוכלוסיות הפיטופלנקטון לפני, במהלך ואחרי אירועי פריחת ציאנובקטריה ובאופן זה לעקוב אחר הפיזור המרחבי של אוכלוסיות אלו. יישום האלגוריתמים המאוחדים לנתונים שנאספו על פני טווחי זמן ארוכים (עם חיישני עבר, הווה ועתיד) הכרחי לשחזור הולם של דינמיקת אוכלוסיות הפיטופלנקטון בגופי מים שונים. ניתן להשתמש בנתונים כאלה לניתוח גורמי מפתח ותנאים האחראים לשינויים ארוכי טווח של קהילות הפיטופלנקטון ולהתעצמות הגוברת של פריחות CyanoHABs.



איור 98: התפלגות מרחבית של יחס ריכוז PC/Chl a בכנרת בשלושה תאריכים שונים במהלך שנת 2013. התמונות עבור אירוע פריחה של מיקרוציסטיס ב- 11 במרץ (a-משמאל) 10 ימים לאחר אותו אירוע, 21 במרץ (b- במרכז) ובמהלך פריחה של אפניזומנון 25 באוגוסט (c- מימין). הפיזור המרחבי של היחס PC/Chl a מוצג כמפת צבע על פי גרדיאנט מכחול לאדום (נמוך –0.5 לגבוה 1.0, בהתאמה).

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



במימון
ISF

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

- בסתיו, הכמוקלינה מאופיינת בגרדיינטים חדים של ניטראט, ניטריט, מתאן (methane) ואמוניום.
- במהלך המעבר מתנאים אוקסיים לתנאים אנוקסיים, פוטנציאל החמצון-חיזור נותר גבוה בנוכחות ניטראט.
- DNA/ RNA הופקו מכלל הדוגמאות אשר נאספו משכבת הכמוקלינה וניסויי המעבדה, החלה העבודה על כיול וכימות ביטוי הגנים הפונקציונאליים בדוגמאות.

מטרות המחקר

מטרת העל של המחקר היא זיהוי פעילות מטאבולית בקרב האוכלוסיות המיקרוביאליות בכמוקלינה הפלאגית של הכנרת ולבחון את ההשפעה של המעבר מתנאים אוקסיים לאנוקסיים על חיידקים ארופיליים, כפונקציה של ריכח מקבלי / מוסרי אלקטרונים וכן חדירת האור לעמודת המים.

מטרות המחקר הספציפיות הן:

- ניטור במרחב ובזמן של התפתחות הכמוקלינה הפלאגית של הכנרת.
- אפיון וכימות גנים פונקציונאליים עיקריים של האוכלוסיות המיקרוביאליות בכמוקלינה הפלאגית של הכנרת.

- אפיון וכימות גנים פונקציונאליים עיקריים של האוכלוסיה המיקרוביאלית (in vitro), בניסוי mesocosm, תחת תנאי חמצון חיזור מבוקרים ומעבר בניהם.

רקע

הכמוקלינה הפלאגית באגמים משוכבים תרמית, אשר מתווה את הגבול בין שכבות מים אוקסיות לאנוקסיות, מאופיינת בגרדיינטים כימיים חדים. התחרות אחר מקורות אנרגיה זמינות וכן אחר מקבלי אלקטרוניס 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 תאיות, אינן מובנות.

בכדי לנטר את ההתפתחות במרחב ובזמן של הכמוקלינה הפלאגית בכנרת, המחקר המוצע מכוון לבחון את יחסי הגומלין בין פעילות מיקרוביאלית ובין 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 אלקטרוניס וכן חדירת אור את עמודת המים. ההיפוטזה שלנו היא כי שינויים בתנאי החמצון-חיזור בכמוקלינה הפלאגית, מקושרים לקבוצות גנים פונקציונאליים ספציפיים.

שיטות

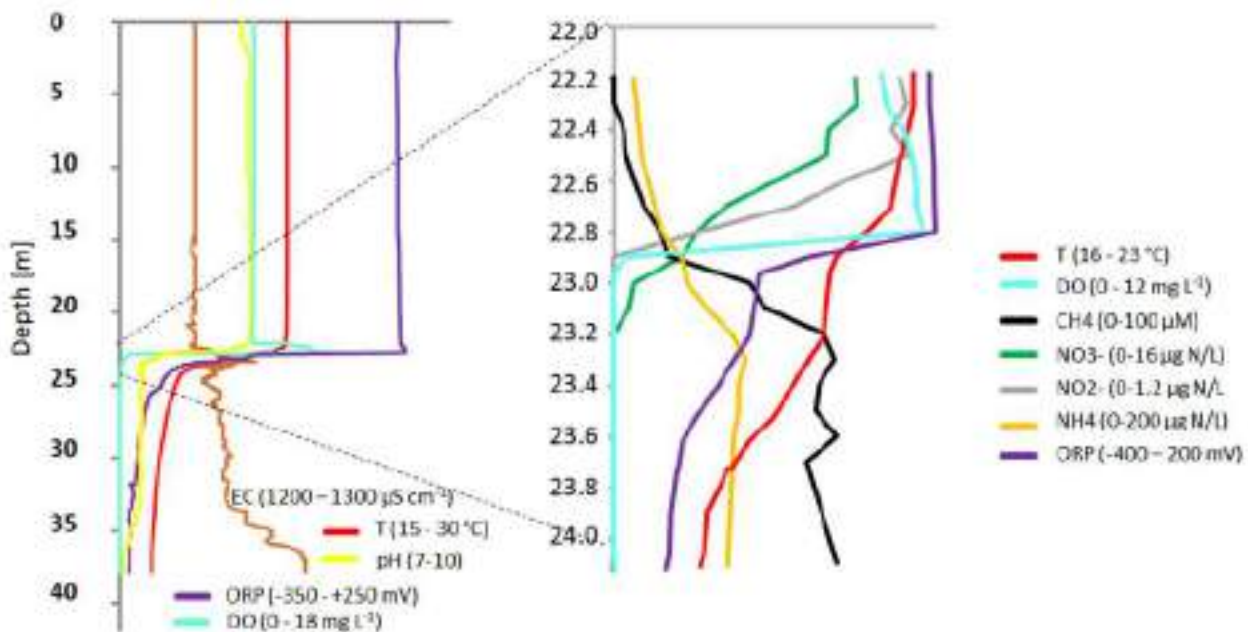
בכדי לענות על היפותזה זו, עשינו שימוש בשילוב של ניטור in situ וכן דיגום ברזולוציה גבוהה, אשר תחמנו ותואמו בהתאם לשיכוב הכימי של עמודת המים בכנרת:

- השיכוב הכימי של עמודת המים נטר באופן רציף (במחזורים של 5-6 שעות), על ידי דוגם פרופיל אוטונומי רציף, אשר הופעל מה - Ecoraft. בנוסף, השתמשנו במהלך הדיגומים במולטי-פרוב מותאם אישית, המצויד בסנסורים לעומק, סולפיד, פוטנציאל חמצון-חיזור (ORP), Temperature, 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, במרווחים/רזולוציה של 10 ס"מ. פתיחה וסגירה חזרות ונשנות של המזרקים, באמצעות לחץ פנאומטי, בשילוב שסתומים חד כיווניים, אפשרה מילוי של שקיות הדיגום ב - 400 מ"ל מים. עומק הדיגום המדויק נקבע ע"י multiprobe, אשר חובר למעטפת ה - syringe sampler.
- מכל שקית דיגום, 300 מ"ל נלקחו לאנליזה מולקולארית של קבוצות גנים פונקציונאליים עיקריות. סינון מידי של המים בוצע בשטח (פילטרים 0.2µm), באמצעות מערכת סינון מותאמת אישית, 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, בוצע ניסוי mesocosm, בתנאי מעבדה. לצורך כך, הוקמה מערכת מים-סדימנט החשופה לשינויי חמצון-חיזור מלאכותיים. הפרמטרים הכימיים נוטרו און-ליין באמצעות אלקטרודות כימיות ו - Membrane-Inlet Mass Spectroscopy (MIMS) ונלקחו דוגמאות מים לאנליזה מולקולרית של RNA/DNA.

תוצאות ודיון

התכנית המחקרית שלנו לשנת 2021 כוונה למספר מטרות: 1. השלמת עבודת השדה, תוך ביצוע 6 דיגומים נוספים של הכמוקלינה באמצעות ה- syringe sampler שברשותנו, במהלך יוני עד נובמבר 2021. 2. העמדת והוצאתה לפועל של מערכת ניסוי ה- mesocosm ו- 3. התחלה של עיבוד הפילטרים מהדוגמאות הרבות אשר נאספו בדיגומים במהלך השנים 2020-2021.

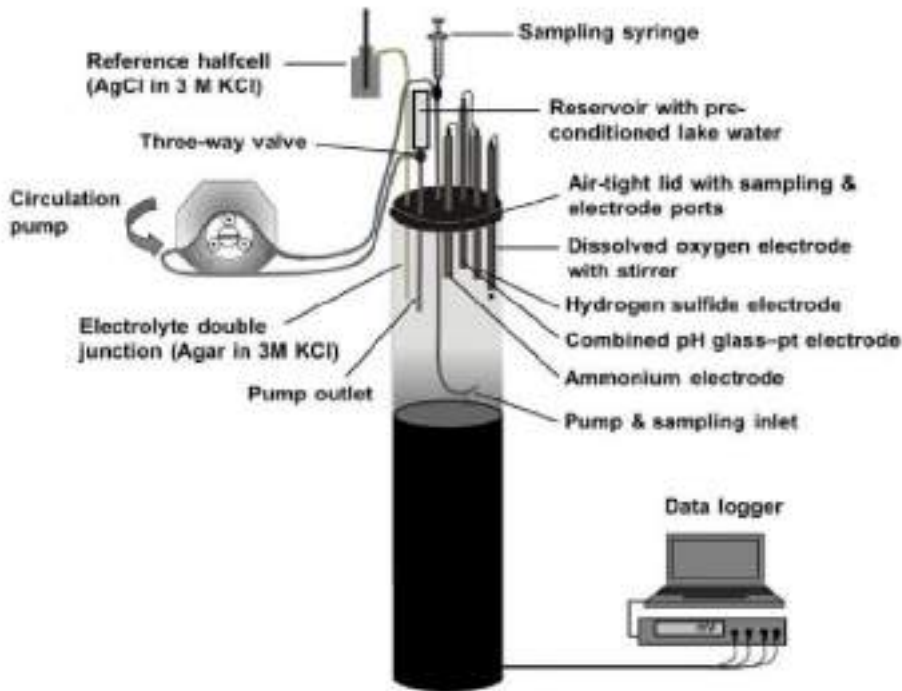
איור 99 מסכם את התוצאות של דיגום השדה האחרון אשר בוצע ב- 24 לנובמבר 2021, במהלך תהליך הדה-סטרטיפיקציה. בתאריך זה התרמוקלינה והכמוקלינה חפפו בעומק 22.8 מטרים, עם ירידה של רמות החמצן המומס (DO) מ 12 מג"ל ל- 0 תוך מספר ס"מ, בליווי ירידה חדה בפוטנציאל החמצון-חיזור בין 200mV – 200 mV. מלבד לשינויים האקולוגיים שנמדדו in situ, האנליזה של דוגמאות המים שנאספו ע"י ה- syringe sampler, העלו גרדיינטים תלולים של ניטריט, ניטראט, מתאן ואמוניום לאורך הכמוקלינה. הימצאותם של גרדיינטים אלו מעידה על התקיימותם של תהליכי חמצון-חיזור מוגברים המתווכים מיקרוביאלית, המאששים את היפותזות ומטרות המחקר הנוכחי. שאלה מעניינת במיוחד אשר עולה מתוצאות אלו היא המצאות הקשר שבין גרדיינטים אלו לרמות הביטוי של הגנים הפונקציונאליים אשר ייבדק בשלב הבא של המחקר.



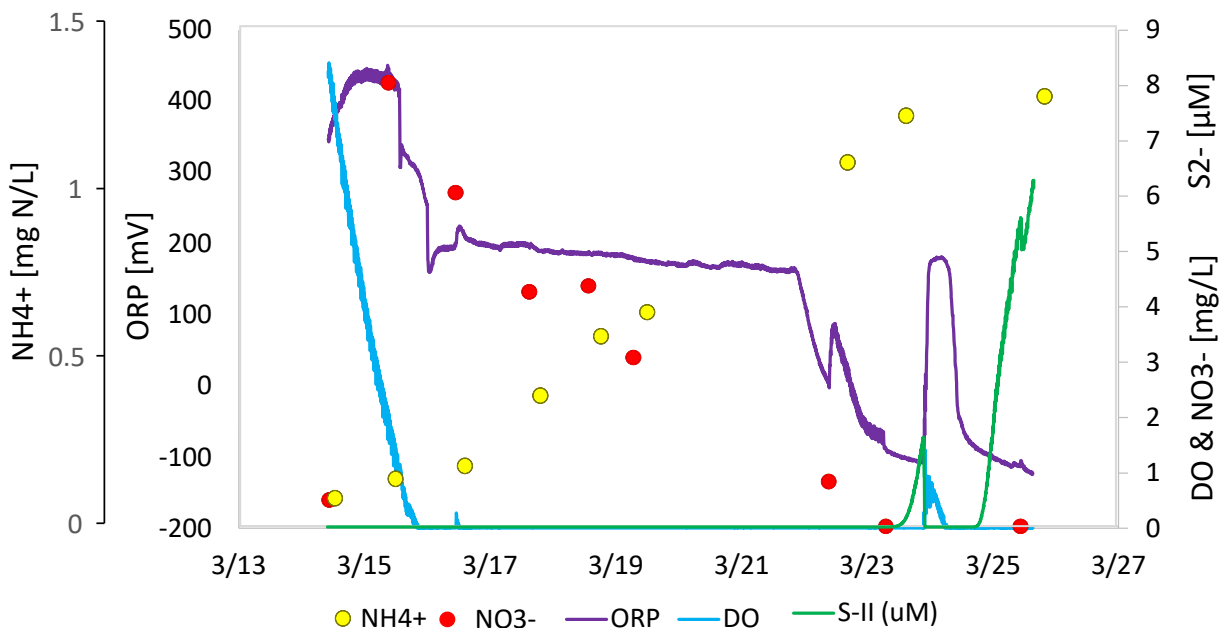
איור 99: השיכוב הכימי של עמודת המים באגם הכנרת, תחנה A (צד שמאל) והשיכוב הצר בשכבת הכמוקלינה (צד ימין), במהלך הדיגום ב- 24.11.21.

באמצעות הקמת מערכת המזוקחם, אשר מתוארת באיור 100, ליבה (core) שלמה של סדימנט הוכנסה למערכת הניסוי בטמפרטורת חדר קבועה של 20°C. לאחר דיגום ראשון ב- 14.03.21, בוצעה הוספה של ניטראט למים שמעל הסדימנט לריכוז סופי של 8 מ"ג חנקן לליטר, בכדי להעלות את יכולת הקיבול של פוטנציאל חמצון חיזור של המערכת. התהליכים שבאו בעקבות כך, התרחשו במעבר מתנאים אוקסיים לתנאים אנוקסיים ומתוארים ע"י השינויים אשר באו לידי ביטוי בשינויי פוטנציאל החמצון-חיזור (redox potential - ORP). אלו עלו לאחר הוספת הניטראט מרמות של 350 ל- 450mV (איור 101). עם התדלדלות החמצן ב- 16.03.21, ה- ORP צנח לרמות של 200mV ולאחר מכן נותר יחסית יציב, עד אשר רמות הניטראט ירדו לפחות מ- 1mg N/L.

מרגע שרמות הניטראט התכלו, נצפתה עליה ברמות ה- hydrogen sulfide (עקומה ירוקה). אלו עלו לאחר הוספה של כמויות קטנות של חמצן ב- 24.03.21. כתוצאה מכך, רמות ה- ORP עלו באופן מדי חזרה ל- 200mV. עם צריכת החמצן, רמות ה- sulfide עלו באופן מהיר ל- 6µM. במהלך כל תקופת האינקובציה, רמות האמוניום עלו באופן מתמיד ובאותו הזמן ריכז המתאן (methane) המומס צנחו מ- 250 ל- 100µM (לא מופיע באיור). במקביל למדידות הכימיות, נלקחו דוגמאות מים לאנליזת DNA/RNA באופן תדיר.



איור 100: תיאור הקמת מערכת ניסוי ה- mesocosm, תוך שימוש בליבה סדימנט שלמה



איור 101: השינויים הכימיים ב- overlying water של ליבת הסדימנט השלמה בניסוי המזוקחם.

במהלך תקופת אינקובציה של 12 יום באמצעות שימוש בערכה (Allprep dna/rna mini kit (QIAGEN), סיימנו את מיצוי ה-DNA/RNA מכל הדוגמאות אשר נאספו במהלך כלל דיגומי הכמוקלינה וכן ניסויי ה-mesocosm המעבדתיים. הריכזים אשר נמדדו באמצעות qubit עבור ה-DNA וכן עבור ה-RNA נמצאו כמתאימים לצורך ביצוע העבודה המולקולארית המתוכננת, ברובן המכריע של הדוגמאות. יוצאי הדופן היחידים בהקשר זה היו ריכזי ה-RNA מניסויי ה-mesocosm, אשר היו נמוכים בשל נפח מים קטן אשר התאפשר בדיגום. לאחר ביצוע ראקציות RT-PCR וקבלת cDNA מדוגמאות אלו, ביצענו ראקציות qPCR מוצלחות עם פריימרים אוניברסאליים ל-16S, המעידות על רמות מספקות של RNA. עם זאת יש צורך להעריך את רמות ה-RNA על בסיס הגנים הפונקציונאליים הרלוונטיים.

השלב האחרון של הפרויקט, יכלול ביצוע כימות של רמות גנים פונקציונאליים רבים (מעל 25), בהקשר לשינויים הכימיים אשר נצפו בדיגומי הכמוקלינה וכן בניסויי ה-mesocosm. בשלב זה ביצענו כיול של תנאי ראקציית ה-qPCR עבור רוב הגנים הפונקציונאליים ומתכננים לסיים כיול זה בשבועות הקרובים. לאחר מכן יבוצעו ראקציות ה-qPCR בדוגמאות נבחרות, תוך התמקדות בדוגמאות הנמצאות מעל ומתחת לנקודת המעבר מתנאים אוקסיים לתנאים אנוקסיים.

3.12 השפעת בצורות מתמשכות ושינויי אקלים על האקולוגיה של הכנרת



צילום: גיל אליהו ג'יני הכנרת במפלס נמוך לאחר סדרת שנות בצורת - חוף רדוד וסלעי

**במימון
משרד
המדע**

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

- זהו מחקר מקיף ראשון הבוחן את השפעת שינויי אקלים על האקולוגיה של הכנרת.
- המחקר בוחן, באמצעות סימולציות של חבר מודלים, השפעת תרחישי אקלים של הפרעות קצרות טווח ולחצים מתמשכים על האקולוגיה של הכנרת.
- בפרק זה של המחקר בוצע כיוול ותיקוף מודל QWET לכנרת. בעזרת התיקוף זוהו חזקותיו וחולשותיו של המודל.

מטרת המחקר

בחינת השפעת בצורות מתמשכות ושינויי אקלים על האקולוגיה של הכנרת, זיהוי האלמנטים של המערכת האקולוגית, הרגישים לשינויי אקלים לצורך ביצוע פעולות לשיפור, שימור וניהול של שירותי המערכת של הכנרת. כמו כן, יבחן החוסן להפרעות חולפות של גלי חום חרימות שטפוניות ולחצים מתמשכים של עליית טמפרטורה ובצורות. בנוסף לכך, יבחן 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 יביאו לזרימה נמוכה בירדן, מה שיגרום למפלס כנרת נמוך 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 מידת ההשפעה ואופן ההשפעה של חלק מהתהליכים מכיוון שהמערכת האקולוגית מורכבת וקשה לחיזוי. להבנת התהליכים יש חשיבות רבה לניהול האגם הן בהיבט שינוי אקלים והן בשאלות אחרות.

מודלים מאפשרים למדענים לבצע ניסויים וירטואליים והם מהווים כלי אפקטיבי לבחינת שאלות אקולוגיות ומשמשים ככלי ניהול של מערכות אקוטיות. קיים מגוון גדול של מודלים של אגמים, מודלים הידרודינמיים ואקולוגיים, מבוססי תהליכים. התהליכים באים לידי ביטוי על-ידי משוואות המכילות פרמטרים. הפרמטרים שונים בין אגם לאגם ונדרש לכייל את המודל עבור האגם הספציפי. כיול המודל נעשה עבור תקופה מסוימת עם תנאי שפה ידועים. נשאלת השאלה, האם המודל ייתן תחזית נכונה גם כאשר נחשף לתנאי שפה שונים מאלו שהוא כויל עבורם? מודלים יכולים להיות נכונים מהסיבות הלא נכונות ולתת תוצאות שגויות בתנאי שפה, כגון תנאי אקלים שונים מאלו שהמודל כויל אליהם. כדי להתגבר על חוסר הוודאות בתוצאות של מודלים הוצעה (Hipsey et al. 2020) מסגרת לביצוע תיקוף (וולידציה) בארבע רמות הנקראת CSPS (Conceptual, State, Process and System validation). תיקוף תפיסתי המתבצע ברמת הבסיס מוודא שהמודל מתאר נכונה את התאוריה האקולוגית. ברמה הראשונה מתבצע תיקוף מצב המשווה את תוצאות המודל עבור משתני מצב (כגון ריכוז החמצן במים או טמפרטורת המים) לערכים הנמדדים באגם, ברמה השנייה מתבצע תיקוף תהליכים בו משווים קצבי תהליכים בין המודל לתצפיות. הרמה השלישית היא תיקוף מערכת, בה בודקים "תכונות נובעות" (emerging properties), שהם קשרים ויחסים בין משתנים של המערכת האקולוגית. תיקוף מחמיר זה, בארבע רמות, מאפשר לאמת את יכולות המודל מצד אחד, ולחשוף, מצד שני, חולשות של המודל שאחרת לא היו מתגלות. בפרק זה של המחקר התבצע כיול ותיקוף בארבע רמות של מודל QWET לכנרת. חבר מודלים (Ensemble modelling) היא גישה שמפעילה מספר מודלים שונים במקביל על אותו אגם. שימוש בחבר מודלים משפר את התחזית, נותן הבנה טובה יותר של אי הוודאות המובנית במודלים ומאפשר השוואה של תהליכים אקולוגיים המודגמים בצורה שונה. בפרק הבא של המחקר ייושם חבר מודלים על הכנרת ובעקבותיו ניתן יהיה לבחון השפעת תרחישי אקלים שונים על האקולוגיה של האגם וזיהוי האלמנטים של המערכת האקולוגית הרגישים לשינויי אקלים. מחקר זה הוא המחקר המקיף הראשון שיבחן את השפעת שינויי אקלים על האקולוגיה של הכנרת.

שיטות

מתווה המחקר הכולל בנוי כך שתוצאות מודל אקלימי אזורי ישמשו לבניית תרחישי מזג-אוויר, תרחישי המשקעים יתורגמו לזרימות בנחלים באמצעות מודל הידרולוגי. תרחישי אקלים יכללו הפרעות קצרות טווח ולחצים מתמשכים של עליה בטמפרטורות, זרימות שטפוניות בנחלים ושנות בצורת. 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.

לעומתם, מודל EwE הוא מודל של מארג המזון המתבסס על אינטראקציות בין הרמות הטרופיות השונות תוך כדי השפעה של תנאים סביבתיים. במודלים DYCD ו-EwE נעשה שימוש במחקרים קודמים בכנרת והם מכילים ופורסמו בעבר.

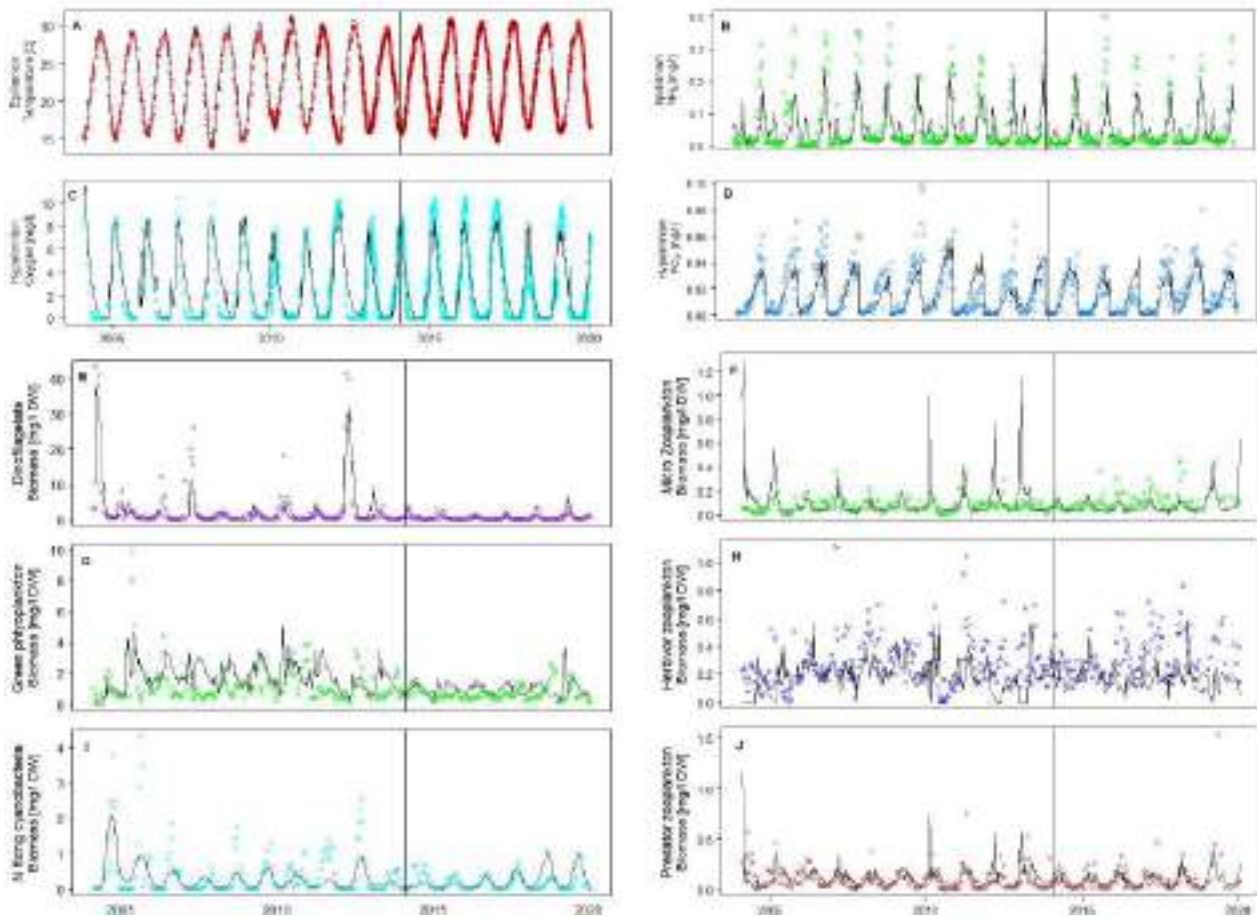
בפרק ראשון של המחקר כוייל מודל QWET והתבצע תיקוף של המודל בארבע רמות על מנת להגדיל את הביטחון בתוצאות המודל. במודל הוגדרו חמש קבוצות פיטופלנקטון ושלוש קבוצות זואופלנקטון. קבוצת הדינופלגלט הוגדרה עם דרישה למיקרונוטריינט אשר מצורף לספיקות הירדן עם קורלציה חיובית לספיקה.



הוכנו תנאים מטאורולוגיים שעתיים מתחנה A וספיקות יומיות של הנחלים. נתוני טמפרטורה, חמצן, חנקן, זרחן וביומסה של פיטופלנקטון חואופלנקטון עובדו מתוך נתוני ניטור הכנרת עבור הכיול והתיקוף של המודל. כיול המודל (כ- 650 פרמטרים) התבצע הן ידנית והן בעזרת תוכנה לכיול אוטומטי (ParSAC) לתקופה 2004-2013. עבור תיקוף המצב נבדקה התקופה 2014-2019 תוך שימוש בארבעה מדדי מתאם שונים (NMAE, R^2 , NSE, KGE). בתיקוף התהליכים בוצעה השוואה של מספר תכונות שהמודל לא כויל עבורן - חדירות אור, יום ההיפוך, ימי שיכוב וכן קצבי תהליכים בהיפולימניון כגון דעיכה של החמצן, ושינויים בריכוזים של אמוניום, ניטראט וזרחן, משך הזמן של ריכוז אמוניום גבוה באפילימניון, קצב סדימנטציה, קיבוע חנקן, יצרנות ראשונית ונשימה קהילתית. בתיקוף המערכת, אותרו קשרים מובהקים בין משתנים נמדדים שונים בכנרת, מבוטאים בעזרת מודל לינארי. 15 קשרים כאלה שהמתאם $R^2 > 0.25$ סומנו כ"תכונות נובעות" ובוצעה השוואה במתאם ובשיפוע לאותם קשרים מתוצאות המודל.

תוצאות

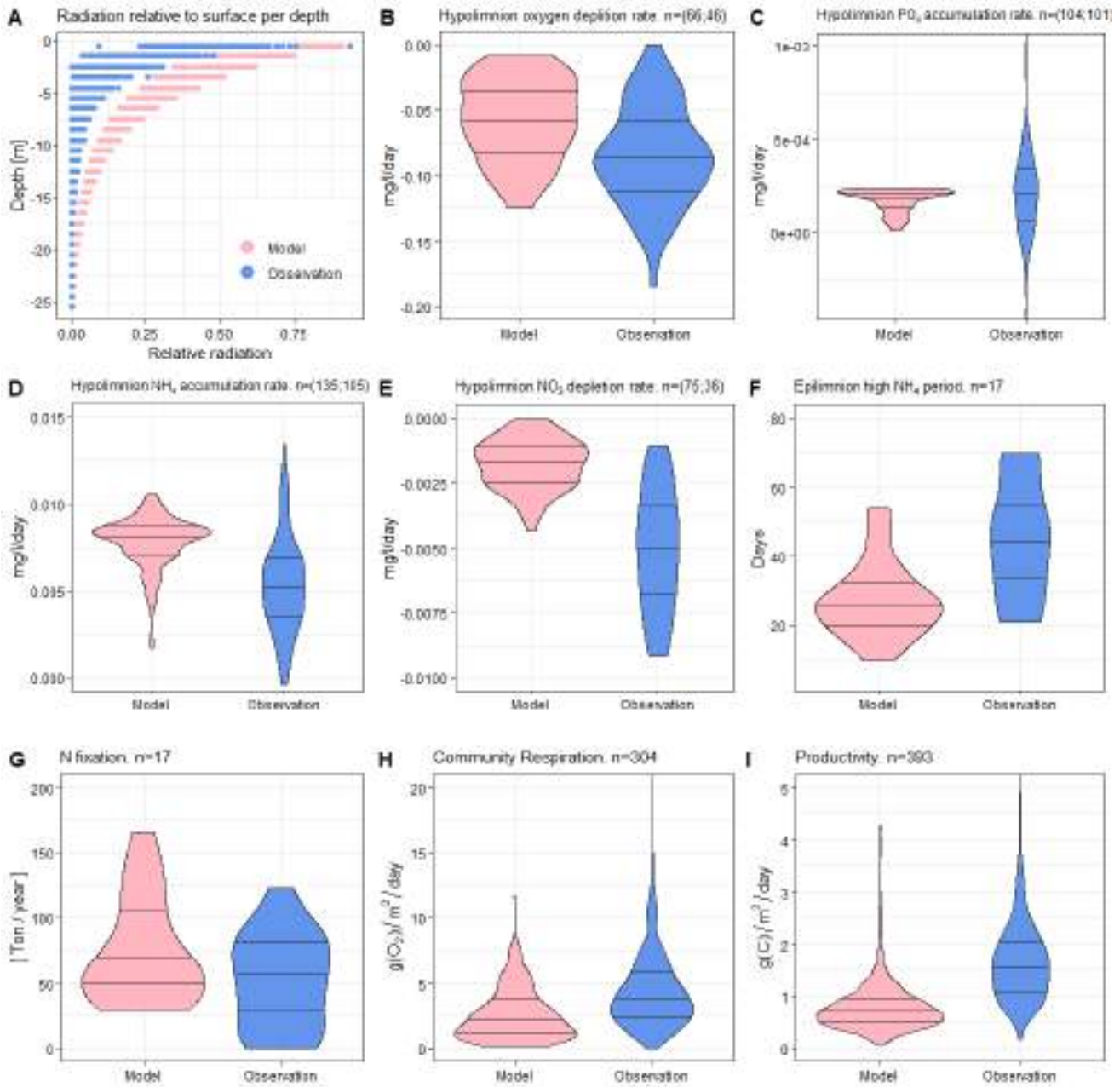
תיקוף תפיסתי (רמת הבסיס) בוצע על-ידי סקירת התייעוד של מודל QWET ושל מחקרים אחרים שיישמו מודל זה. המודל מיישם נכונה את התיאוריה האקולוגית עם הפשטות שונות כגון חישוב מאזן חנקן וזרחן בלבד ללא מאזן פחמן, תהליכי חנקן מופשטים וכמובן עצם היות המודל חד ממדי. תיקוף מצב בוצע לאחר מאמץ כיול משמעותי. המודל מחקה בהצלחה את תהליך השיכוב השנתי, ובהתאם לכך גם את מחזורי החמצן, הזרחן, האמוניום והניטראט (איור 102 D-A). כמו כן המודל מדגים היטב את העונתיות של קבוצות הפיטופלנקטון- דינופלגלטים וציאנובקטריה מקבעת חנקן (איור 102 I-E). המודל נותן תוצאות בינוניות בערכי החנקן, למשל ערכי הניטראט באפילימניון גבוהים מידי בקיץ בהשוואה למדידות, ותוצאות פחות טובות בקבוצות הפיטופלנקטון והזאופלנקטון. מדדי המתאם של מחקר זה דומים למדדי מתאם מ-33 מחקרים שהתפרסמו על אגמים משוכבים. בתיקוף תהליך נבדקו תכונות שהמודל לא כויל אליהם וקצבי תהליכים שונים (איור 103). קצבי התהליך היו ברובם בתוך התפלגות התצפיות, דבר המראה שהתהליכים מודגמים נכון. יום ההיפוך החזוי נמצא בתוך התפלגות התצפיות אך בממוצע מתרחש שבוע לפני יום ההיפוך הנצפה. התהליכים הביוטיים – קיבוע חנקן, יצרנות ראשונית ונשימה קבוצתית מודגמים בצורה טובה מאד. חדירות האור מראה שעל-פי המודל הכנרת צלולה משמעותית יותר מאשר התצפיות. רמז לסיבה האפשרית לכך הוא שקצב הסדימנטציה במודל נמוך מזה הנמדד במלכודות הסדימנטציה. קצבי הצטברות האמוניום בהיפולימניון גבוה במודל לעומת התצפיות אך התקופה בה יש ריכוז גבוה של אמוניום באפילימניון קצרה מהתצפיות. בתיקוף המערכת, מתאם (R^2) ושיפוע של 15 תכונות נובעות מהתצפיות הושוו לשיפוע ומתאם של אותם תכונות מתוצאות המודל. ב-80% מהתכונות הנובעות נמצאה הסכמה בין התצפיות באגם לבין תוצאות המודל, בשתי תכונות, מתוך 15, לא היה מתאם במודל ובתכונה אחת השיפוע היה הפוך מזה שנמצא בתצפיות.



איור 102 : מספר תוצאות מתקופת הכיול והתיקוף. המודל מתואר בקו שחור והתצפיות בנקודות בצבעים. הקו האנכי ב-2014 מציין הפרדה בין תקופת הכיול לתקופת הוולדציה. טמפרטורה באפילימניון (A), אמוניום באפילימניון (B), חמצן בהיפולימניון (C), זרחן בהיפולימניון (D), פיטופלנקטון (E,G,I), זואופלנקטון (F,H,J).

דין

תיקוף ארבע רמות CSPS ייושם למודל QWET של המערכת האקולוגית בכנרת. התיקוף חשף תכונות של המודל שלא היו מתגלות ללא תיקוף מחמיר זה. תיקוף התהליך הראה שהמודל מדמה נכון את רוב התהליכים (10 מתוך 12) ואילו תיקוף המערכת מראה ש-12 מתוך 15 תכונות של המערכת הודגמו במודל, על אף שהוא לא תוכנת או כויל לדמות תכונות אלו. תוצאות אלו מחזקות את הבטחון במודל. התיקוף הצביע על חולשות המודל, המרכזית שבהן היא צלילות גבוהה מידי של המים ומחסור חלקיקים במים. התיקוף המחמיר גילה חולשה זו, שלא הייתה מתגלה אחרת, ובכך מאפשר תיקון החולשה בהמשך המחקר. כמו כן, התיאור המופשט של תהליכי הניטריפיקציה ודה-ניטריפיקציה במודל מתגלה כחולשה שמשפיעה על המערכת הביוטית שכדאי לנסות לתקנה בהמשך המחקר. נכון להיום, המחקר הזה הוא אחד הדוגמאות הבודדות שבהן בוצעו תיקוף מחמיר ומקיף כל כך. התיקוף המחמיר חזק את הבטחון בנכונות המודל מצד אחד, ומצד שני האירה את החולשות שלו ומאפשרת לתקנם. כעת ניתן לבחון בעזרת המודל תרחישים החורגים מהתנאים שעבורם כויל המודל, תוצאה שלא ניתן היה לקבוע בצורה ברורה ללא שתי הרמות הגבוהות יותר של התיקוף.



איור 103: תוצאות תיקוף תהליך קרינה יחסית בכל עומק (A). ערכי ממוצע חודשיים של קצבים שונים: קצב צריכת חמצן וניטראט בהיפולימיניון (B,E), קצב הצטברות אמוניום חרוץ בהיפולימיניון (C,D), נשימה קהילתית (H) ויצרנות ראשונית (I). ערכים שנתיים: תקופה שבה ריכוז אמוניום מעל 0.14 מ"ג/ליטר (F), קיבוע חנקן לכל האגם (G). תקופת התוצאות היא מ-2004-2019.

3.13 יערות אשלים מוצפים – בית גידול חדש בכנרת



תצלום אוויר של חוף הכנרת בצידה המזרחי כשבחזית יער אשלים צפוף מוצף, יוני 2020. התצלום באדיבות יח' עיטם של רשות הטבע והגנים.

**במימון
רשות
המים**

**תמר זהרי, דוד קמינגס, גדעון גל, ירון בארי-שלוין, ורנר אקרט,
איל אופיר, בשת"פ עם דנה בכר (איגוד ערים כנרת), עמית דולב
(רט"ג) ואביטל גזית (אונ' ת"א)**

- יערות האשלים הם סביבה דינמית שמשתנה מאד עם הזמן. בשנת ההצפה השלישית (2021) יערות האשלים נעשו דלילים יותר, והצטמצמו ההבדלים בכימיה וביולוגיה של הסביבה המימית שבתוכם לבין זו שבאזורי ביקורת ללא אשלים.
- ב-2020 הרכב המינים של הפיטופלנקטון והזואופלנקטון ביערות האשלים היה שונה מאד מזה המוכר מ-50 שנות ניטור במרכז האגם, עם מינים רבים שלא נצפו מעולם. ב-2021 ההבדלים דעכו.
- באביב 2022 רוב האשלים המוצפים בכנרת כבר מתים.
- יערות האשלים ימשיכו להיעלם עם השמירה על מפלסים גבוהים ותנודות מפלס מוגבלות כפי שהתרחש בשנים האחרונות. אפשר למזער התפתחות מחודשת שלהם ברצפי שנות בצורת על ידי עקירה ידנית של נבטים.

מטרת המחקר

המחקר נועד ליצור בסיס ידע למתן המלצות לגבי הסרת/עקירת יערות אשלים שהתפתחו סביב הכנרת (כמה להסיר והיכן, איך להסיר) בראיה רחבה של סובב כנרת.

לשם כך הוגדרו מטרות ספציפיות:

- אפיון פיסיקלי, כימי וביולוגי של בית הגידול של יער אשלים מוצף באתרים שונים בכנרת
- א. כימות אוגר הנוטריינטים בקרקע ברצועת תנודות המפלס, כדי להעריך את פוטנציאל הנזק לאגם כשהקרקע מופרת עקב עקירת צמחייה.
- ב. הערכת תרומת בית הגידול של יער אשלים מוצף למערכת האקולוגית של האגם: שטף נוטריינטים, תפקידים במארג המזון (על ידי יישום מודלים).
- בדו"ח זה נתייחס לשתי המטרות הראשונות. ב-2022 נתמקד ביישום מודלים (מטרה ג).

רקע

עקב נידוד הולך וגובר של מפלסי הכנרת התפתח בעשורים האחרונים בשולי הכנרת בית גידול שלא היה קיים בה בעבר: אזורי חוף חשוף נרחבים התכסו ביערות אשלים. כשהמפלס עלה והציף את האשלים, הם נעשו חלק מאזור הליטורל באגם. מחקרים קודמים הראו שסבך האשלים בצפיפות נמוכה או בינונית משמש את הדגה באגם, וחשוב להצלחת הרבייה. לגבי סביבת אשלים בצפיפות גבוהה - היו חסרים נתונים. במקביל, סבך האשלים מסתיר את נוף האגם, יוצר בעיות נגישות, ומקשה על תפעול חופים תיירותיים. רשות המים מקבלת בקשות ממפעילי חופים ומתושבי סובב כנרת לאשר סילוק של סבך הצמחייה מקו החוף שלהם. מכיוון שהצומח החופי המוצף הוא בית גידול חדש בכנרת, מעט ידוע עליו, ועד כה ננקטו צעדי ממשק שלו 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, 2020, התחלנו בדיגום חודשי מסירה בשני אתרי יערות אשלים מוצפים, (מול המעבדה לחקר הכנרת ובבטחה) ובאתר ביקורת ללא אשלים, ובביצוע אנליזות במעבדה. ב-2021 המשכנו בדיגום החודשי, הוספנו שני סקרים של יערות אשלים סביב הכנרת כולה (14 אתרים בכל סקר), וביצענו השוואה של תכולת הזרחן בסדימנטים באזורים עם/בלי אשלים. דיווח זה הוא גרסה מקוצרת של דו"ח מלא שמוגש לרשות המים (זהרי ושות' 2022).

שיטות

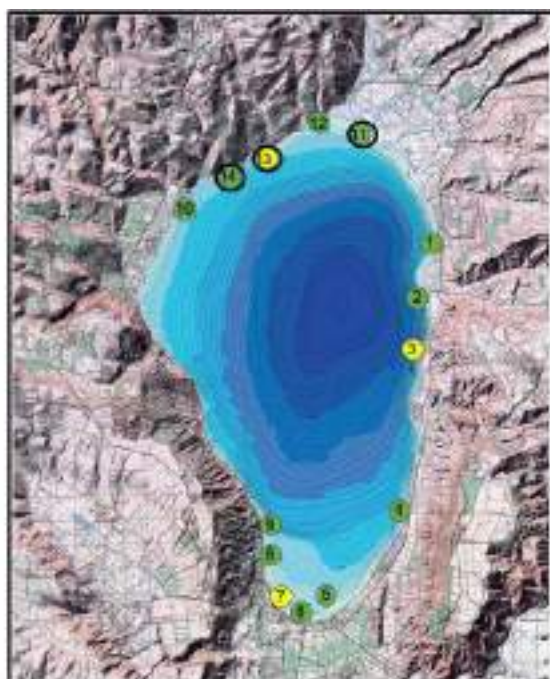
דיגום חודשי: ב-2021 המשכנו בדיגום החודשי בו התחלנו במרץ 2020 בשני אתרי יער מוצף: מול המעבדה (KLL), בבטחה (BTH), ובאתר ביקורת ללא צמחייה (PGH) (איור 104). הדיגום נעשה כמו שדווח ב-2020, בהבדל אחד: במקום לדגום בכל אתר ב-5 תחנות לאורך חתך דרך יער האשלים, דגמנו רק בתחנה האמצעית (תחנה 3 בכל חתך) שנקראה "in", והוספנו תחנת דיגום נוספת בחזית היער (מחוצה לו) לכיוון הכנרת שנקראה "out". הפרמטרים שנמדדו והשיטות האנליטיות – כפי שדווח ב-2020.

סקרים לתיעוד השונות המרחבית: ביצענו שני סקרים, באפריל ושוב ביולי 2021, בהם דגמנו 14 אתרים סביב הכנרת כולה, מתוכם 11 אתרים מכוסים יערות אשלים ו-3 אתרי ביקורת ללא אשלים (איור 104). כל סקר בוצע במהלך 3 ימי דיגום (ראה טבלה מימין לאיור).

בכל אתר דגמנו בשתי תחנות: עמוק בתוך סבך היער (in), ובחזית היער לכיוון הכנרת (out). בכל תחנה: (1) מדדנו באמצעות מולטיפרוב שדה Manta-II, יצרן: Eureka לאורך פרופיל עומק (מפני המים ועד לקרקעית): עומק, טמפרטורה, pH, חמצן מומס, מוליכות חשמלית, (2) במשאבה פריסטלטיית אספנו דוגמאות מים משני עומקים 0.2 - S (S, D: מ' מתחת לפני המים, - 0.2 D מ' מעל הקרקעית) לאנליזות כימיות (נוטריאנטים, פחמן אורגני כללי, חומר מרחף, כלורופיל) במעבדה.



(3) אספנו דוגמאות לפיטופלנקטון וזואופלנקטון מפני המים (S) בתחנות in. האנליזות הכימיות והביולוגיות (נוטריינטים, חומר אורגני, כלורופיל, ספירת אצות, ספירת זואופלנקטון) התבצעו בשיטות המשמשות באופן שגרתי בניטור כנרת.



Site #	Location	Lake side	Day - April 2021	Day - July 2021
1	Tze'elion	East	12	13
2	Samek-South	East	12	13
3*	Nugueyeb viewpoint	East	12	13
4	Ha'Onn North	East	12, 13	13
5	Maagan Island	South	12	6
6	Moet'za building	South	12	6
7*	Jordan Valley YAMIA	South	12	6
8	Ohalo	West	13	6
9	Tzofey Yam	West	13	6
10	Ginossar new hotel	West	13	6
11	Boteha (BTH)	North	21	27
12	Belt Habek	North	21	13
13*	Pilgrims House (PGH)	North	21	27
14	KLL	West	21	27

איור 104: משמאל: מיקום 14 אתרי הדיגום בשני סקרי יערות האשלים, שבוצעו באפריל ושוב ביולי 2021. בטבלה מימין: מיקום אתרי הדיגום לפי מספרם, צד האגם בו נמצא כל אתר והיום בחודש בו נדגם. 3 אתרי הביקורת ללא אשלים מסומנים בצהוב במפה ובכוכבית בטבלה. 3 אתרי הדיגום המשמשים גם לדיגום החודשי מודגשים במפה בעיגול כחול עבה סביב מספר האתר ורשומים באדום בטבלה. בכל אתר נדגמו תחנות in, out, למעט אתרי הביקורת בהן לא היו תחנות in.

תכולת זרחן בגלעיני סדימנט: כדי להבין את ההשלכות של עקירה מהשורש של אשלים, דגמנו גלעיני סדימנט מקרקע שבה גדלו אשלים וגם מקרקע ללא צמחייה, לאנליזות כימיות. גלעיני סדימנט נדגמו בשני אתרים עם אשלים: (1 האון, 2) מושבת כנרת מצפון לחוף צופי-ים. גלעיני ביקורת מאתרים ללא אשלים נדגמו בשני אתרים נוספים: (3 חוף הרחצה של חוקוק, 4) מושבת כנרת, חוף צופי-ים. בכל אתר נדגמו 3 גלעינים במרחק של כ-10 מ' זה מזה ששימשו כשלוש חזרות ביולוגיות. הדיגום בוצע בגילי אלומיניום שקוטרם הפנימי 5 ס"מ ואורכם כ-40 ס"מ שהוחדרו לקרקעית במכות פטיש. עומק החדירה לקרקעית היה כ-15 ס"מ. במעבדה, הגלעינים נחתכו לשלוש פרוסות (=דוגמאות) בעובי של 5 ס"מ כל אחת. מכל פרוסה, תת-דגימה נשקלה, יובשה ב-110°C לקביעת % המים (אחרי שקילה שניה), יובשה שוב ב-550°C ונשקלה בשלישית לקביעת תכולת החומר האורגני בשיטת Loss on Ignition. יתר הדגימה נשמר בהקפאה עד לאנליזה של פרקציות הזרחן החלקיקי השונות בשיטת המיצוי הסדרתי (פרטים בדו"ח חצי שנתי לרשות המים, דו"ח חיא"ל מס' 11-2021T, זהרי ושות' 2021). הנתונים המוצגים הם ממוצעים של 9 דוגמאות (3 גלעינים x 3 פרוסות לגלעין) לכל אתר. לשם השוואה השתמשנו בנתונים דומים מגלעיני סדימנט שנדגמו בעבר בתחנות A (מרכז האגם) ו-S (מול המעבדה, בעומק 12 מ'). בתחנות אלו הנתונים המוצגים הם ממוצעים של עשרות גלעינים. מיפוי חזית האשלים בבטחה. קו חזית האשלים באזור הבטחה מופה באביב של כל שנה על ידי צוות רט"ג, על סמך תצלומי אוויר מיושרים (אורתופוטו) שנתקבלו ממפ"י. המיקום תורגם לקו גובה אבסולוטי מעל פני הים, והשווה לרום מפלס הכנרת שנתיים קודם לכן.

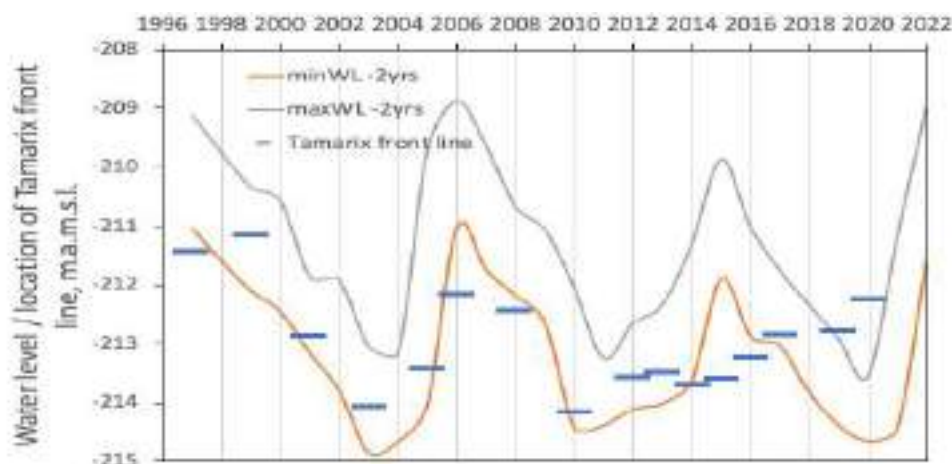
תוצאות ודיון

מטרה א: אפיון פיסיקלי, כימי וביולוגי של בית הגידול של יער אשלים מוצף

שינויים לאורך זמן בתנאי הסביבה ביערות האשלים המוצפים (על פי נתוני המעקב החודשי)

ממצאי המחקר כוללים תוצאות עבור 17 פרמטרים פיסיקליים וכימיים שנמדדו ב-3 אתרים, ובכל אתר ב-2 תחנות (in, out) וב-2 עומקים או בפרופילי עומק מלאים, לאורך קרוב לשנתיים, ממרץ 2020 עד דצמבר 2021. הנתונים מוצגים בדו"ח המוגש לרשות המים. בדו"ח זה נציג גרפים נבחרים ונסכם את עיקרי הממצאים:

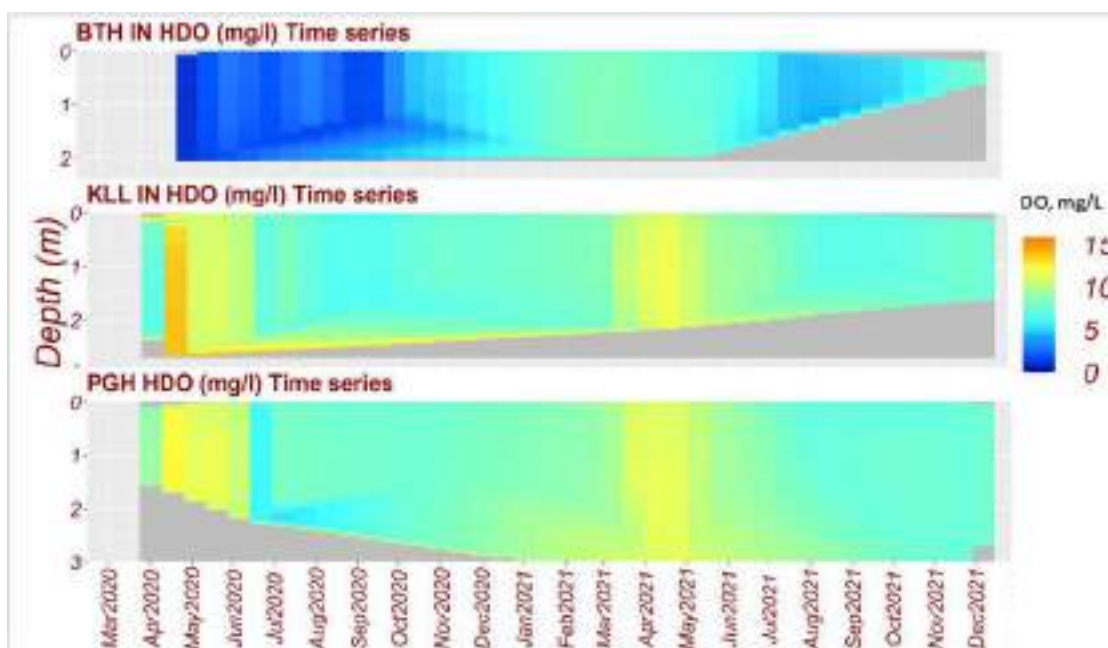
1. תנועת חזית האשלים: ככל שזמן הצפת האשלים התארך צפיפותם של האשלים נעשתה דלילה יותר, בגלל מגבלות פיסילוגיות של האשל ותמותה של העצים כתוצאה מעקה. באביב 2021 האשלים שבקרבת החוף היו מוצפים ברציפות 12 חודשים ואלו שלכיוון הים הפתוח - מעל 24 חודשים (הוצפו לראשונה באביב 2019). התצפיות שלנו מראות שבשנה השלישית להצפה האשלים מתחילים למות. עם כתיבת דו"ח זה במרץ 2022 לאחר 24-36 חודשי הצפה, רוב האשלים המוצפים בכנרת כבר מתים. רוב הפרטים שבקרבת החוף איבדו את כל העלוא למרות שהם עדיין מושרשים ומזדקפים מעל המים. ככל שמתקדמים מהחוף לכיוון מרכז האגם, יותר אשלים שהיו שם לפני שנה כבר נעלמו מתחת לפני המים. בפועל הדבר מתבטא בתזוזת חזית האשלים עם שינויי המפלס, עם זמן תגובה של כשנתיים (איור 105). כלומר, עם ירידת המפלס רב-שנתית רצועת האשלים מתפשטת ותופסת רצועת חוף רחבה יותר, בפיגור של כשנתיים, בעוד שבעליית מפלס רצועת האשלים מתכווצת, גם זה בפיגור של כשנתיים.



איור 105: מיקום טופוגרפי של חזית האשלים באזור הבטחה באביב של כל שנה/שנתיים (מלבנים כחולים) שמופה לפי תצלומי אורתופוטו החל מ-1996. מוצגים גם מפלסי המינימום והמקסימום בכל שנה קלנדרית, אבל בהסתה של שנתיים. למשל, בשנת 2000 לפי ציר איקס מוצגים חזית האשלים של 2000 ומפלסי הקיצון של שנת 2018.

2. חמצן, הגבה, וטמפרטורה: דעיכת צפיפות האשלים עם הזמן התבטאה בהגדלת תחלופת המים דרך היער המוצף, הפחתת ההצללה (עקב הקטנת מספר העצים ליחידת שטח וצפיפות העלווה של העצים) כלומר הגדלת כמות האור הזמין לפוטוסינתזה במים, והפחתה בכמות החומר האורגני הפריק שעל הקרקעית ובעמודת המים (חומר שיכול היה להתפרק-כבר התפרק ואיננו). כתוצאה משינויים אלו מודדנו דעיכה בהבדלים בפרמטרים שונים בין מעבה האשלים למים הפתוחים, הבדלים שב-2020 היו גדולים, עד כדי הגדרת סביבת האשלים כבית גידול שונה, אך ב-2021 הלכו ודעכו.

בפרט, ריכחי החמצן המומס באתר הבטחה תחנה H0 ב-2021 (לרוב בין 5-7 מ"ג לליטר) כבר לא היו נמוכים כמו ב-2020 (כאשר רוב השנה נמדדו ריכחים בין 1-3 מ"ג לליטר), אם כי לכל אורך 2021 ריכחי החמצן המומס בבטחה היו באופן עקבי נמוכים מאלו שנמדדו באתר הביקורת (איור 106). מידע זה יכול להצביע על תנאי קיום שונים שייתכן שהם בעייתיים עבור דגים. יער האשלים שבאתר KLL שמול המעבדה לחקר הכנרת היה מלכתחילה צעיר יותר ודליל יותר מאשר היער בבטחה, דבר שהתבטא בריכחי חמצן דומים לאלו שבאתר הביקורת, למעט אירוע חריג באפריל 2020 כאשר בסבך היער נמצא כתם צפוף של פרידיניום שגרם לריכחי חמצן גבוהים במיוחד עקב פוטוסינתזה מוגברת (איור 106).

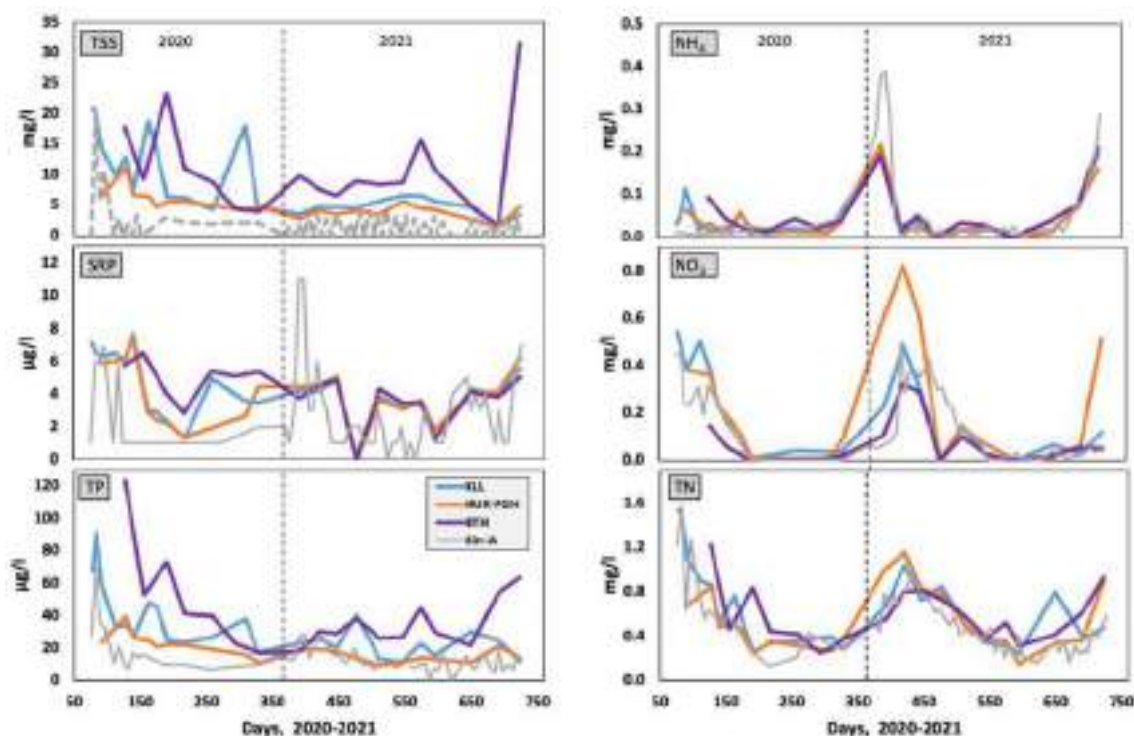


איור 106: שינויים בזמן (מרץ 2000 עד דצמבר 2021) ובעומק (0-3 מ') בריכח החמצן המומס במים בעומק יער האשלים בתחנת הבטחה (למעלה), מול המעבדה לחקר הכנרת (באמצע), ובתחנת הביקורת ללא אשלים (PGH).

דגם השינויים עם הזמן והעומק בערכי ההגבה (pH) היה דומה לזה של החמצן (ערכים נמוכים באופן עקבי באתר הבטחה, ערכים דומים לביקורת באתר KLL) ולכן הנתונים אינם מוצגים. הדגם הדו-שנתי של טמפרטורת המים היה דומה בשלושת האתרים, עם שינויים קלים בעיקר כפונקציה של עומק עמודת המים: ככל שהיא הייתה רדודה יותר - הטמפרטורה הייתה קיצונית יותר (לא מוצג).

3. כימיה (איור 107): בשנתיים של המחקר, ערכי חומר מרחף (TSS) וזרחן כללי (TP) בחופי האשלים היו גבוהים משמעותית מהכנרת לאורך כל התקופה ולרוב גבוהים יותר באתר הבטחה מאשר מול המעבדה. במקביל, ריכחי חנקן כללי בחופי אשלים היו גבוהים מערכי הכנרת הפתוחה בעיקר בסתיו-חורף, כנראה כתוצאה של ערבול גלים מסיבי בתקופה זו.

ריכחי צורונים זמינים של נוטריינטים (NH_4 , NO_3 , PO_4) היו גבוהים ביחס לכנרת הפתוחה בתחילת 2020, אבל פער זה הצטמצם ונעלם ב- 2021. בהשוואה בין שני אתרי האשלים ב- 2020: ערכי TP , PO_4 ו- NH_4 גבוהים יותר אפיינו את הבטחה לעומת NO_3 גבוה יותר מול המעבדה.



איור 107: שינויים עם הזמן מה-19 לפברואר 2020 (יום 50) ועד סוף דצמבר 2021 בפרמטרים גיאוכימיים ביערות האשלים ותחנות ביקורת. מוצגים ממוצעים של הערכים שנמדדו בשני עומקים (פני המים וקרוב לקרקעית) בתחנות in בכל אתר ותאריך, באתרים: חוף המעבדה (KLL), בטחה (BTH), ביקורת באזורים חוקוק ופילגרימסהאוס (HUK-PGH), ולשם השוואה מוצגים גם ריכחי הנוטריאנטים מהניטור השוטף בתחנה A עומק 1 מ' (Kin-A). פאנל ימני למעלה: אמוניום, באמצע: ניטראט, למטה: חנקן כללי (TN), פאנל שמאלי למעלה: חומר מרחף (TSS), באמצע: אורתופוספט (SRP), למטה: זרחן כללי (TP).

4. ביולוגיה: הרכב המינים של הפיטופלנקטון באתרים KLL ו-PGH היה בדרך כלל די דומה למה שנמצא באותו זמן בתחנה A שבמרכז האגם, למעט הבדל בולט אחד: באביב 2020 מצאנו ב-KLL דינופלגלטים בריכחים עד 5x מאשר במרכז האגם, ובעיקר פרידיניום. ב-2021 הבדל זה דעך. לעומת זאת באתר ה-BTH הרכב המינים של הפיטופלנקטון היה שונה מאד מזה שבאתרים האחרים ובמרכז האגם. המינים הדומיננטיים בפיטופלנקטון ביער האשלים בבטחה היו מקבוצת הדינופלגלטים, איגלנופיטה וירוקיות. לפחות 4 מינים של דינופלגלטים שהיו נפוצים בסביבת היער המוצף לא נראו אף פעם קודם לכן בכנרת. גם מיני האיגלנופיטה היו כאלו שמוכרים לנו מאגמון-חולה, לא מהכנרת. והירוקיות היו מינים נדירים לכנרת. המשותף למינים אלו היה שכולם בעלי שוטונים (בעלי כושר שחיה) עם אורח חיים מיקסוטרופי שמאפשר ניצול חומר אורגני כאשר עצמת האור איננה מספקת למחיה מפוטוסינתזה. רוב הכחוליות והצורניות המוכרות מהכנרת היו חסרות, בעיקר היו חסרים המינים החוטיים: אפניזומנון וצילינדרוספרמופסיס מהכחוליות, אאולקוסירה מהצורניות, מוגושיה מהירוקיות. בזואופלנקטון מצאנו תופעה מקבילה, כאשר בדוגמאות מהבטחה נמצאו מינים שונים שלא הכרנו מהכנרת. הרכב המינים שמצאנו ביערות המוצפים אופייני לגופי מים ביצתיים (מים רדודים עם תחלופת מים נמוכה ועושר בחומר אורגני) ומוצלים, ומהווה אינדיקציה נוספת לכך שבית הגידול של היערות המוצפים שונה מבתי גידול אחרים שהכרנו בכנרת.

שינויים במרחב בתנאי הסביבה ביערות האשלים המוצפים (על פי נתוני הסקרים באפריל וביולי)

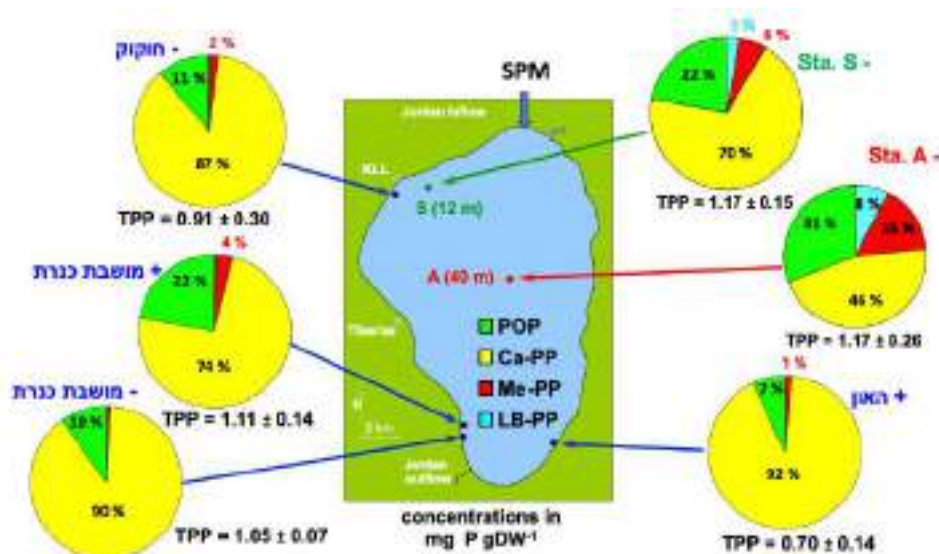
שלושה מתוך 14 האתרים שדגמנו בשני הסקרים הנרחבים ביערות האשלים סביב האגם כולו בלטו בכך שבהם התנאים קיצוניים יותר מאשר באחרים: אתר BTH (נק' 11 באיור 104), אתר נוסף בבטחה מול בית הבק (נק' 12) ומול קיבוץ האון (נק' 4). בשלושת האתרים הללו יערות האשלים היו "זקנים" יותר בגיל, צפופים

יותר, וכיסו רצועת חוף רחבה יותר מאשר באחרים. בשלשת האתרים הללו ריכחי החמצן היו בתת-רוויה, ורמות ה pH נמוכות יותר מאשר באחרים. תיאור מפורט יותר מוצג בדו"ח השנתי לרשות המים. על סמך הממצאים משלושה אתרי המדידה החודשיים אנו מעריכים שאם הסקרים היו נערכים שנה קודם, ב-2020, היינו מוצאים אתרים נוספים שבהם תנאי הסביבה קיצוניים מהרגיל לכנרת.

מטרה ב: כימות אוגר הנוטריינטים בקרקע ברצועת תנודות המפלס

תכולת זרחן בגלעיני סדימנט.

מדדנו את כמות הזרחן החלקיקי בגלעיני סדימנט מאתרים שונים בכנרת (איור 108) כדי להשוות בין תכולת חומרי הדשן בסדימנט באזור הליטורל לבין המים העמוקים של האגם, ובין קרקע בליטורל שבה גדלו אשלים לבין קרקע בליטורל ללא צמחייה.



איור 108: תכולת זרחן כללי חלקיקי (TPP) בגלעיני סדימנט מ-6 אתרים שונים בכנרת, וחלוקת הזרחן הכללי ל 4 פרקציות: POP – particulate organic P, Ca-PP – Ca-bound Particulate P, Me-PP – metal-bound PP-rbonate, LB-PP – labile PP. פרקציית הזרחן הקשור לקרבונט (צהוב) אינו זמין לביטה. הפרקציות האחרות – זמינות ברמה זו או אחרת.

התוצאות מעידות שריכחי זרחן הכללי החלקיקי (TPP) די דומים בכל התחנות, עם ובלי אשלים, ונעים בין 0.7-1.17 מ"ג זרחן לג' משקל יבש. עם זאת, אחוז הזרחן שקשור לקרבונט (Ca-PP), שהוא זרחן שאיננו זמין לביטה, גבוה יותר באזורי הליטורל עם ובלי אשלים (74-92%) מאשר במרכז האגם (46%), שם יש נוכחות גבוהה יותר של הפרקציות האחרות של הזרחן החלקיקי הכללי, שכולן זמינות (יותר או פחות) לביטה. בהנחה שבסדימנטים העליונים בליטורל יש בממוצע כ-1 מ"ג זרחן כללי לג' סדימנט יבש (כלומר 1 ק"ג זרחן לטון סדימנט יבש), שכ-80-90% מהזרחן הזה איננו זמין לביטה ורק 10-20% זמין פוטנציאלית (לצורך החישוב הבא נניח 15% זמין), ושמטר קוב של סדימנט יבש שוקל 1.6 טון, ניתן לחשב כך:

- בטון סדימנט יבש יש 0.150 ק"ג זרחן זמין פוטנציאלית
 - ב-1 מ³ סדימנט שהם 1.6 טון יש 0.24 ק"ג = 0.15 * 1.6 = 240 ג' זרחן זמין פוטנציאלית
 - לשם השוואה, ב-1 מ³ מי כנרת יש כ-10 מ"ג זרחן מומס כללי שזה 4 סדרי גודל פחות.
- לפיכך, למרות שרוב הזרחן בסדימנט במים הרדודים של האגם לא זמין לביטה, עדין המעט שכן יכול להיות זמין (למשל באמצעות אנזימים כמו אלקליין פוספטאז) הוא עדין בסדרי גודל יותר גבוה מהריכח במים.

3.14 עיצוב מדיניות המים למטרות ניהול בר קיימא של מערכות אקולוגיות-חברתיות



צילום: עוז צברי דר

במימון
משרד
המדע

ארקדי פרפוב, גדעון גל

- בעוד שישנו קשר לינארי בין מדדי המגוון הביולוגי וגובה המפלס, הקשר חלש יותר עם עומסי הנוטריינטים.
- הקשר בין מדדי המגוון הביולוגי לטמפרטורת המים באפילימניון הוא תוצאה של היחס ההופכי שקיים בין גובה המפלס לטמפרטורת המים.
- תוצאות מחקר זה תומכות בתפיסה כי מפלס המים הוא כוח מניע עיקרי בניהול ממשק המשאבים באגם.

מבוא

שינויים בהרכב אוכלוסיות הפיטופלנקטון גורמים לשינויים דרסטיים בתפקוד האקולוגי של מערכות אקוטיות. במחקר זה נבדקה ההיפותזה כי השינויים באוכלוסיות הפיטופלנקטון בכנרת הביאו לשינויים ניכרים בקצב מיחזור החומרים של כלל האקוסיסטמה באגם.

מטרות

המטרה העיקרית בשנה השנייה של המחקר הייתה הערכת ההשפעה של השינויים בהרכב אוכלוסיות הפיטופלנקטון בכנרת על קצב מיחזור החומרים של כלל האקוסיסטמה באגם. לשם כך, כמת המגוון הביולוגי של אוכלוסיית הפיטופלנקטון בכנרת והקשר שלו לגורמים מאלצים העלולים להשפיע על המערכת האקולוגית כגון: שינויי מפלס האגם, עומסים של זרחן וחנקן בכניסות, וטמפרטורת המים באפילימניון.

שיטות**כימות המגוון הביולוגי**

נבחרו שני מדדים למגוון הביולוגי: מדד המגוון הטקסונומי של סימפסון (SDI) ומדד המגוון התפקודי על פי מאפיינים ממוצעים של כלל החברה (CWM) (Ricotta and Moretti 2011). המשתנים הבאים נחשבו כמאפיינים תפקודיים (טבלה 15): משקל יבש ונשימה קהילתית ספציפית (CRsp), נמדד משיפוע הישר של הרגרסיה הלינארית של הנשימה הקהילתית כנגד ריכוז כלל המוצקים המרחפים (TSS). מספר אסימילציה ממוצע של פוטוסינתזת הפיטופלנקטון (AN), (פוטוסינתזה ליחידת כלורופיל) (Yacobi and Zohary 2010). CWM[AN] ו-CWM[CRsp] מייצגים למעשה קצבי יצרנות ראשונית ונשימה קהילתית, בהתאמה.

טבלה 15: ערכי המאפיינים התפקודיים (AN, CRsp) ששמשו לחישוב מדד המגוון התפקודי.

Taxonomic groups	CRsp (mgO ₂ mg TSS ⁻¹ d ⁻¹)		AN (mg C Chla ⁻¹ h ⁻¹)	
	Average	Range	Average	Std
<i>Bacillariophyta</i>	0.037	0.056 – 0.039	2.1	1.3
<i>Chlorophyta</i>	0.088	Single determination	2.3	1.1
<i>Cryptophyta</i>	0.091	No data	2.0	
<i>Cyanophyta</i>	0.053	0.020-0.074	4.2	1.6
<i>Dinophyta</i>	0.120	0.067-0.230	1.6	0.8

גורמים מאלצים

השפעתם של גורמים מאלצים אשר עלולים להשפיע על מגוון המינים והתפקוד של אוכלוסיית הפיטופלנקטון במערכת האקולוגית של הכנרת נבדקו ע"י רגרסיה של מדדי המגוון הביולוגי כנגד גורמים מאלצים שונים: גובה המפלס, עומסי נוטריינטים (חנקן זרחן) וטמפרטורת המים באפילימניון. הנתונים נלקחו מבסיס הנתונים של המעבדה לחקר הכנרת וכן מסימולציות באמצעות מודל כנרת מסוג DYRESM-CYDEM.

תוצאות

הסטטיסטיקה של מדדי המגוון (ממוצעים וטווחי הערכים בין אחוזן 5 ל- 95) ומקדמי הקורלציה הלינארית מוצגים בטבלה 16. מדדי המגוון הציגו קשר לינארי ברור עם גובה מפלס האגם בעוד הקשר עם עומסי הנוטריינטים היה חלש יותר (טבלה 17). הקשר עם טמפרטורת המים באפילימניון הוא תוצאה של היחס ההופכי שקיים בין גובה המפלס לטמפרטורת המים ($R = -0.43$). כאשר נבחן הקשר בין מדד המגוון של סימפסון (SDI) למשתנים השונים נמצא מתאם שלילי ($R = -0.55$) בין הממד וגובה המפלס, המצביע על כך שקיימת עליה במגוון הטקסונומי עם הירידה במפלס המים באגם. המתאם השלילי בין היחס $CWM[AN]/CWM[CRsp]$ וגובה המפלס (איור 109A וטבלה 17) מצביע על שינוי פוטנציאלי של האוכלוסייה הביוטית באגם לכיוון אוטורופיה (ערכים גבוהים יותר של היחס יצרנות ראשונית/נשימה קהילתית) עם ירידת המפלס.

טבלה 16: (נתוני אגם). ערכי מדדי המגוון הביולוגי (ממוצעים וטווחי הערכים בין אחוזן 5 ל- 95) ומקדמי הקורלציה של המתאמים הלינאריים (Rtrend) שחושבו ביחס לתקופת הייחוס (1970-1979).

Diversity indices	Mean	5%-95%	Rtrend
SDI (Simpson's index of taxonomic diversity)	0.24	(0.36 – 0.14)	0.71
CWM[AN] (AN based index of functional diversity)	1.76	(1.92 – 1.67)	0.75
CWM[CRsp] (CR based index of functional diversity)	0.114	(0.117 – 0.109)	0.74-
"Biotic budget" CWM[AN]/CWM[CRsp]	15.5	(17.6 – 14.3)	0.75

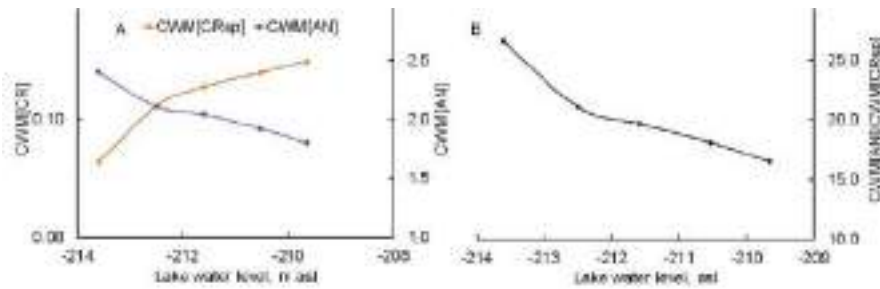
תוצאות ניסויי המידול הציגו מגמות דומות ביחסים שבין מדדי המגוון ובין מפלס המים לאלו שנצפו בנתוני האגם (איור 110). הדמיון במגמות שחשבו על בסיס נתוני האגם לבין תוצאות המודל משמשות כאימות עקיף של מודל כנרת מסוג DYRESM-CYDEM.

טבלה 17: מקדמי קורלציה לינארית (R) בין מדדי המגוון וגורמים מאלצים: מפלס מים (WL), עומסי נוטריינטים (חנקן זרחן) וטמפרטורת מים ממוצעת באפילימניון (Tavg).

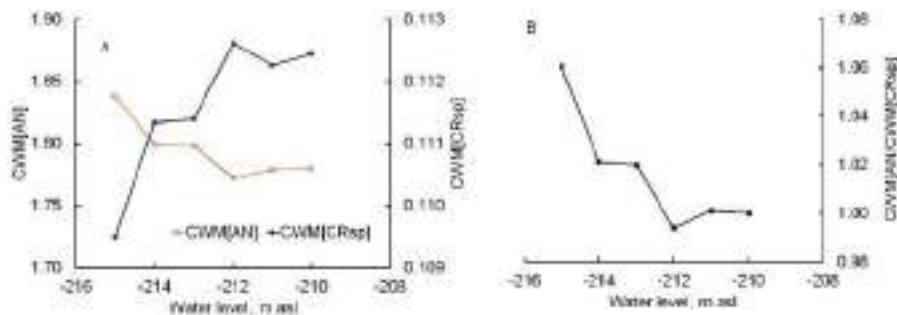
	SDI	CWM[CRsp]	CWM[AN]	CWM[AN]/CWM[CRsp]
#Nload	0.32-	*0.33	*0.37-	*0.37-
#Pload	*0.42-	*0.47	**0.49-	**0.50-
WL	**0.55-	**0.64	**0.65-	**0.66-
Tavg	ns	0.47-	0.50	0.50

*- significant at $p < 0.05$; **- significant at $p < 0.01$; ns – insignificant at $P < 0.05$

נתונים עבור התקופה מ-1978 עד 2012



איור 109: A היחסים בין מדדי המגוון התפקודיים (CWM[AN] and CWM[CRsp]) ובין גובה מפלס המים באגם. B היחסים שבין "המאזן הביזוטי", $CWM[AN] / CWM[CRsp]$, וגובה המפלס. נתוני אגם: ממוצעים שנתיים של גובה מפלס המים באגם.



איור 110: כמו איור 109 אך בהתבסס על תוצאות המודל.

מסקנות

יצרנו ויישמנו גישה מתודולוגית המבוססת על אנליזה סטטיסטית פשוטה של היחסים שבין מדדי מגוון כמותיים והפרעות שונות כגון: ירידה בגובה המפלס, עומסי נוטריינטים וטמפרטורת המים באפילימניון. גישה זו מאפשרת הערכה של המשמעויות האקולוגיות של השינויים בהרכב אוכלוסיית הפיטופלנקטון בכנרת, בעיקר המעבר מדינופלגלטים גדולים לציאנובקטריה קטנים יותר. במהלך התקופה מ-1970 ועד 2019, המערכת האקולוגית של הכנרת עברה שינוי מפיטופלנקטון המורכב בעיקרו מאורגניזמים גדולים המבצעים פוטוסינתזה בקצב איטי יחסית וגורמים לפרוק אירובי אינטנסיבי, לאוכלוסייה הנשלטת ע"י אורגניזמים המבצעים פוטוסינתזה בקצב מהיר יותר עם קצבי פרוק חומר אורגני איטיים יותר. תוצאות מחקר זה תומכות בתפיסה כי מפלס המים הוא כוח מניע עיקרי בניהול ממשק האגם.

ספרות

Parparov A. and Gal G. 2022. The effects of changes in diversity on phytoplankton community metabolism. *Inland Waters* DOI10.1080/20442041.2022.2040406

Parparov A., Berman T., Zohary T. and Gal G. 2014. Seston and organic matter. Chapter 26 in: T. Zohary et al (eds.), *Lake Kinneret, Ecology and Management, Aquatic Ecology Series 6*, pages 473-484

Ricotta C. and Moretti M. 2011. CWM and Rao's quadratic diversity: a unified framework for functional ecology. *Oecologia*, 167:181–188

Yacobi Y.Z. and Zohary T. 2010. Carbon: chlorophyll a ratio, assimilation numbers and turnover times in Lake Kinneret phytoplankton. *Hydrobiologia* 639:185–196

4 מחקרי אגן ההיקוות של הכנרת וגופי מים אחרים

4.1 ניטור זיהום ממקור צואה בנחל משושים ונחל אל על



נחל משושים. צילום: רועי אפטיבי

במימון
רשות
המים

שירה ניניו, עכסה לופו

- נחל משושים ונחל אל על נמצאו עם זיהום צואתי מעל ערכי הסף המותרים רוב תקופת הפרויקט.
- בנחל משושים, סביבו ישנה רעייה של בקר, הזיהום הדומיננטי הוא ממקור בקר, ואילו בנחל אל על ברוב הדגימות לא נמצא זיהום ממקור בקר.
- קיים זיהום כרוני ממקור ביוב בשני הנחלים שנבדקו.
- בדיקות מולקולריות מצביעות על המצאות חיידקי לפטוספירה פתוגניים (עכברת) במי נחל המשושים שמקורם ככל הנראה בעיקר מבקר.

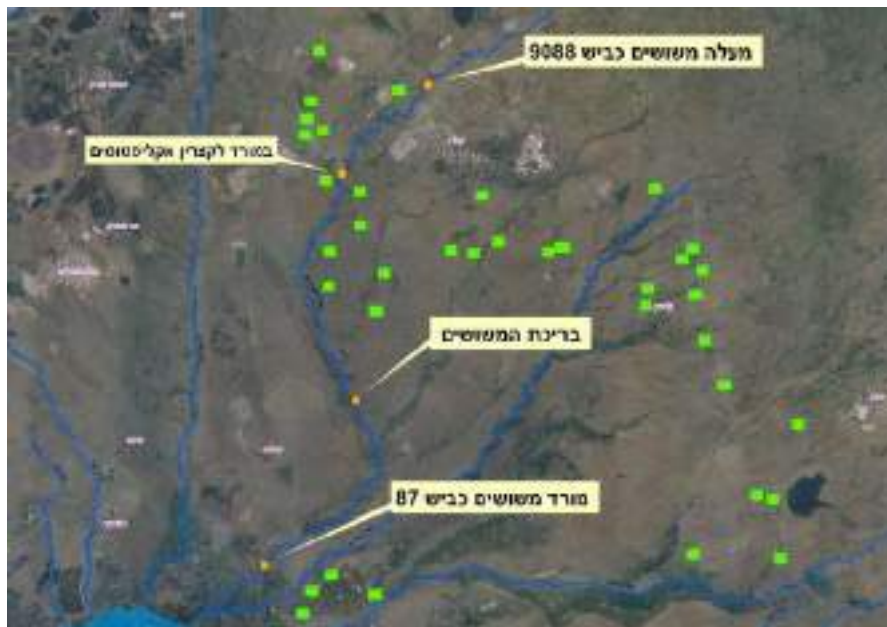
מטרת המחקר

מטרת הפרויקט היא ניטור זיהום צואתי בנחל משושים ושימוש בכלים מולקולריים כגון Microbial Source Tracking (MST) על מנת לאמוד את תרומתם של מקורות שונים לזיהום. נחל משושים נבחר כיוון שקיימת רעיית בקר בסביבתו ויש צורך להעריך עד כמה משפיעה רעיית הבקר על איכות מי הנחל ועל תפוצתם של חיידקים הגורמים למחלת העכברת במי הנחל. תכנית הניטור באה לבחון, בנוסף לשאלת תרומת הבקר לזיהומים, את התועלות בסוג ניטור זה והאם יש לבצעו בהיקף רחב יותר באגן ההיקוות של הכנרת.

רקע

בסביבת נחל משושים קיימת רעייה של עדרי בקר מסחריים כמו גם עדרי "פרא" (בלאדי). כדי למזער את רמות הזיהום ממקור בקר בנחל הוקם מערך של שקתות שהוצבו במעלה ונועדו לצמצם הגעה של בקר לנחל. תכנית הניטור נועדה לתת תמונת מצב על רמות הזיהום הצואתי בנחל משושים כולל בחינת הדינמיקה של הזיהום לאורך תקופה חיהוי מקורות הזיהום. לצורך כך, נדגם נחל משושים בארבע נקודות שונות בתדירות של 1-2 פעמים בחודש לאורך התקופה שבין אפריל לנובמבר 2021. נחל אל על נבחר כנקודת ייחוס ומייצג נחל שאין בקרבתו רעיית בקר. נבחנו בסה"כ 48 דגימות בנחל משושים ותשע דגימות מקבילות בנחל אל על. הפרמטרים שנבדקו באנליזות של הדוגמאות כללו:

1. ספירת חיידקים - נבדקו שלושה אינדיקטורים שונים בשיטת membrane filtration.
2. כימות סמנים לזיהוי מקור הזיהום בשיטת MST.
3. קביעת ריכוז חיידקי לפטוספירה פתוגניים בשיטות גנטיות.



איור 111: מפת נקודות דיגום (בכתום) בנחל משושים על רקע שקתות (בירוק) שהוצבו במקום על מנת לצמצם גישה של בקר לנחל.

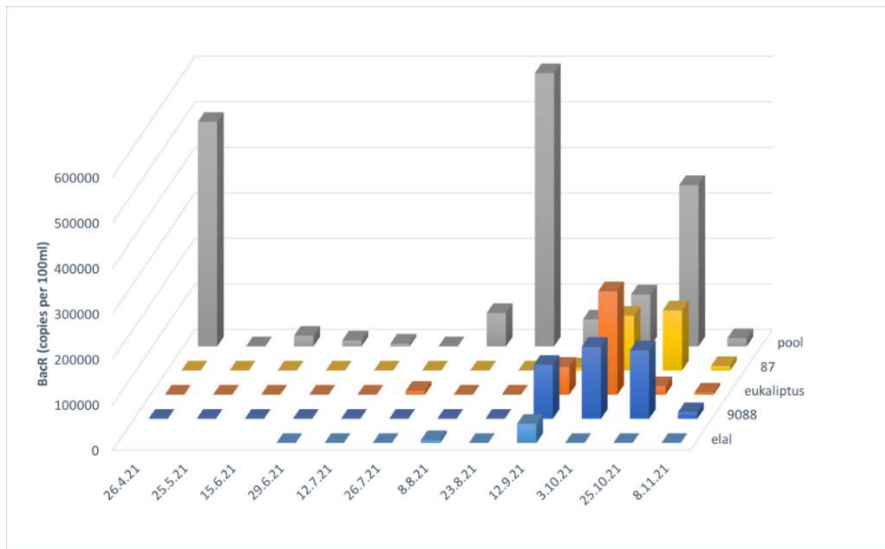
תוצאות ודיון

זיהום ממקור צואה - הזיהום הצואתי בנחל משושים נבדק בשיטות בקטריאליות לאורך כל תקופת המחקר ובכל נקודות הדיגום על ידי מעקב אחר חיידקים אינדיקטורים לצואה. שלושה אינדיקטורים לזיהום נבדקו בשיטת ה- membrane filtration - קוליפורמים צואתיים (Fecal coliforms), אי קולי (*E. coli*) ואנטרוקוקים (*Enterococci*). התוצאות מראות שבשלב מסוים בראשית הקיץ עולה רמת הזיהום והנחל נשאר מזוהם עד נקודת הדיגום האחרונה בנובמבר. חשוב לציין שבמקרים רבים כל שלושת המדדים לזיהום נוטים לעלות יחד, דבר המצביע בסבירות גבוהה על זיהום אמיתי ולא על בעייתיות במדד זה או אחר.

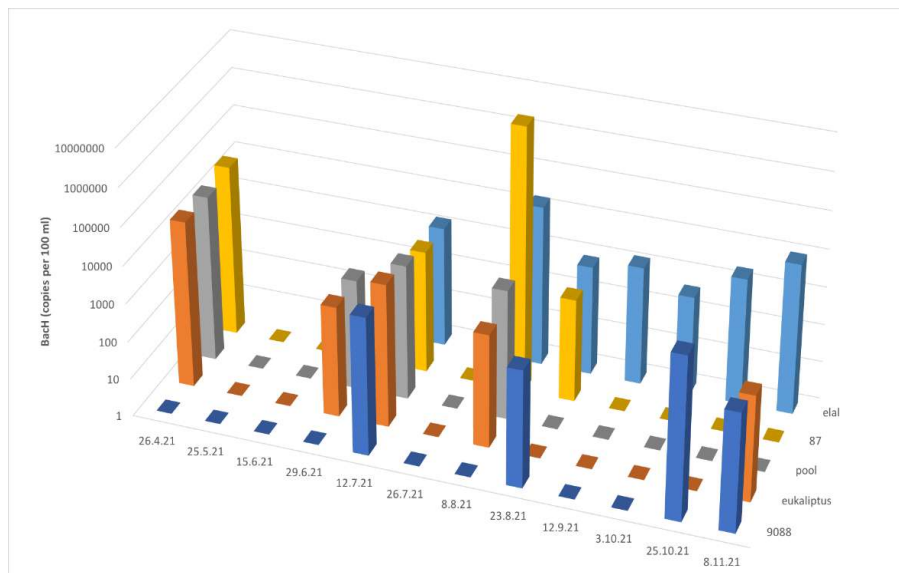
מקורות הזיהום - על מנת לזהות את מקורות הזיהום נעשה שימוש בשיטה המולקולרית Microbial Source Tracking (MST). בשיטה זו משתמשים בסמנים ספציפיים למקורות זיהום שונים המבוססים על זיהוי וכימות של חיידקי *Bacteroidetes* הנמצאים במעי של בעלי חיים שונים. בעבודה זו נעשה שימוש בשלושה סמנים שונים אשר נועדו לזהות את שלושת מקורות הזיהום העיקריים באזור נחל משושים – מעלי גירה (BacR), חזירים (Pig2) ואדם (BacH). שיטת העבודה כללה כימות אבסולוטי של מספר העתקי הסמן בעזרת עקומות כיוול המבוססות על פלסמיד בריכוז ידוע שעבר לינארמציה ומכיל עותק משובט ומרוצף של גן היעד עבור כל סמן. שיטה זו מאפשרת התייחסות לנתונים המתקבלים והשוואתם לנתונים המתקבלים במחקרים אחרים ובמעבדות אחרות בהן נעשה כימות אבסולוטי בעזרת אותם הסמנים.

זיהום ממקור בקר - איור 112 מסכם את רמות הזיהום שנמדדו בעזרת הסמן BacR בתחנות השונות לאורך תקופת המחקר. התוצאות מראות שזיהום ממקור בקר נצפה בכל התחנות, אולם הריכוזים הגבוהים ביותר נמדדו בבריכת המשושים, שם נמצאו 500,000-600,000 העתקים ל- 100 מ"ל בשתי דוגמאות שונות ובדוגמה נוספת נמדדו 350,000 העתקים ל- 100 מ"ל. בכל תחנות הדיגום בנחל משושים נמצאו ערכים הגבוהים מ- 100,000 העתקים ל- 100 מ"ל, כשרוב הזיהום ממקור בקר התרכז בחודשים ספטמבר ואוקטובר. כנקודת ייחוס ניתן ללמוד על משמעות זיהום זה מדגימות עבר – לדוגמה בזמן זרימה שיטפונית בצלמון בינואר 2020 נמדדו ערכי זיהום גבוהים של 270,000 קוליפורמים צואתיים ל- 100 מ"ל ובאותה הדוגמה נמצא בעיקר זיהום ממקור מעלי גירה והוא היה ברמה של 137,000 העתקים ל- 100 מ"ל לפי הסמן BacR. נחל אל על נבחר לייצג את רמות הזיהום בנחלים סביבם אין רעיית בקר, ואכן כמעט ולא נמצאו דוגמאות חיוביות לזיהום ממקור בקר בנחל אל על. רק שתיים מתשע הדגימות היו מעל לסף הדטקציה והראו ריכוזים נמוכים יחסית.

זיהום ממקור הומאני - זיהום ממקור ביובי מגיע לעיתים לערוץ נחל משושים כתוצאה מכשל במערכות הובלת ביוב ביישובי הסביבה ובבסיסים צבאיים סמוכים. רמות הזיהום הביובי נמדדו בעזרת הסמן BacH הרגיש לזיהום ממקור צואת אדם. איור 113 מסכם את תוצאות הכימות של זיהום ממקור זה בזמן תקופת המחקר. התוצאות תואמות את הצפוי מזיהום שמגיע כתוצאה מכשלים אקראיים בביוב, וניכר כי הזיהום בא והולך ללא תבנית ברורה. אפשר ללמוד מהנתונים על חומרת הבעיה – ראשית, אין אזור דיגום שלא נרשם בו זיהום ביובי בשלב זה או אחר, שנית, ברור שלאורך התקופה מתרחשים מספר אירועי זיהום בלתי תלויים, שחלקם משפיעים על כל נקודות הדיגום וככל הנראה מקורם במעלה (למשל ב- 12.7.2021) וחלקם משפיעים על חלק מנקודות הדיגום ולא על אחרות כך שמקורם שונה. התוצאות גם מצביעות על אירוע זיהום אחד חריג במיוחד בחומרתו – המופיע ב- 8.8.2021 בנקודת הדיגום הדרומית ביותר – 87, שם נמדדו ערכים הגבוהים בכמה סדרי גודל מהערכים ביתר הדוגמאות החיוביות. האירוע תואם דיווח מפקח רשות המים ניר לביא ב- 11.8.2021 על גלישת ביוב מאחד הבסיסים באגן ההיקוות של נחל משושים בנפח גדול של מעל 1000 מ"ק. לגבי נחל אל על, הנתונים מצביעים על זיהום כרוני שמקורו בביוב ומופיע כמעט בכל הנקודות שנבדקו.



איור 112: זיהום ממקור מעלי גירה מכומת לפי הסמן BacR ביחידות של מספר העתקים ל- 100 מ"ל מים.



איור 113: זיהום ממקור הומאני מכומת לפי הסמן BacH ביחידות של מספר העתקים ל- 100 מ"ל מים.

חישוב התרומה היחסית לזיהום - שיטת ה- MST מסתמנת בארץ ובעולם כשיטה מועילה לקביעת מקורות זיהום. עם זאת, למרות שהשיטה כמותית מטבעה, לכל סמן ישנה רגישות שונה וריכח שונה בצואה ולכן לא ניתן להשוות בין הסמנים השונים. מסיבה זו, כשמעוניינים לקבוע תרומה יחסית של מספר מקורות זיהום יש צורך לנרמל את התוצאות ולהמירן לערכים של כמות צואה (ולא מספר העתקים). לאחר ביצוע ההמרה ניתן להשוות את ערכי הזיהום ממקורות שונים על מנת להעריך מהי תרומתו היחסית של כל אחד ממקורות הזיהום. חישוב התרומה היחסית של הזיהום בנחל משושים מצביע על הבקר כמקור הזיהום הדומיננטי בכל אירועי הזיהום מלבד אירוע זליגת הביוב של ה- 8-8-2021 שם הגורם הדומיננטי הוא צואת אדם. למרות שזיהום ממקור אדם לא נמצא דומיננטי ברוב המקרים, זיהום ביובי מהווה סכנה בריאותית משמעותית ולכן גם אם תרומתו היחסית נמוכה, חשוב לפעול למניעת דליפות ביוב אל הנחלים.

מסקנות

1. נחל משושים ונחל אל על נמצאו עם זיהום צואתי מעל ערכי הסף המותרים רוב תקופת הפרויקט.
2. מדד ה-FC משקף ברוב המקרים זיהומים אמיתיים כיוון שגם מדדי זיהום נוספים שהינם בלתי תלויים עולים במקביל אליו.
3. בנחל משושים, סביבו ישנה רעייה של בקר, הזיהום הדומיננטי הוא ממקור בקר.
4. בנחל אל על, לידו אין רעיית בקר, נמצאו רמות זיהום בקר נמוכות בלבד.
5. בנוסף לנאמר בסעיפים 3 ו-4, קיים זיהום כרוני ממקור ביוב בשני הנחלים שנבדקו. הזיהום מגיע מאזורים שונים באופן סטוכסטי ומצביע על כשלים חוזרים ונשנים במערך הביוב באזור.
6. בנחל משושים מופיע זיהום מצואת בעלי חיים בעיקר בחודשי ספטמבר ואוקטובר, בהם הזרימה בנחל היא הנמוכה ביותר. יתכן ושמירה על זרימה חזקה יותר במשך כל השנה תצמצם משמעותית את רמות הזיהום בנחל.
7. בדיקות מולקולריות מצביעות על המצאות חיידקי לפטוספירה פתוגניים במי נחל המשושים שמקורם ככל הנראה בעיקר מבקר ואינם מופיעים במקרים של זיהום ממקור חזיר בלבד.

4.2 ניטור ירדן דרומי



צילום: אהוד גבע, רשות המים. מאי 2022

במימון
חיא"ל

ירון בארי-שליון, ניר קורן, רות נ. קפלן-לוי, אלה אלסטר, שירה
ניניו, פלג אסטרחן, אדית לייבוביץ, בני סולימני, עכסה לופו

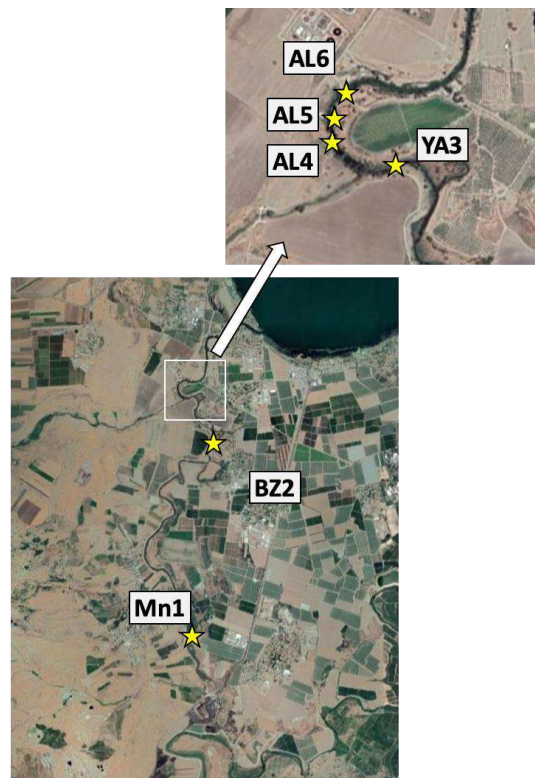
- **גיאוכימיה:** חודשי הקיץ מאופיינים בירידה בערכי החמצן כנראה כתוצאה של פירוק חומר אורגני נרחב יותר. תופעה זו מלווה במידה מסוימת בעליה בעומסי זרחן וחנקן אך נמצאת בעיקר בקורלציה עם טמפרטורות המים.
- **אצות:** מליחות המים הינו הגורם העיקרי המשפיע על מגוון מיני האצות, מה שמאפשר דומיננטיות של מינים גמישים בפיטובנתוס, וירידה במגוון. כמו כן, אנו מבחינים במינים המאפיינים רמת זיהום אורגני גבוה בעיקר בתחנות שבמורד הנחל.
- אנליזות MST מצביעות על זיהום ממקור הומאני כזיהום העיקרי בירדן הדרומי. הזיהום בשיאו בחודשי החורף, ככל הנראה כתוצאה מזליגה של ביוב או מתפקוד לקוי של מכונני טיהור שפכים.

מטרת המחקר

ניטור שוטף, רב מימדי – גיאוכימי וביולוגי של הירדן הדרומי במקטע בין סכר אלומות ועד מנחמיה. מעקב אחר השינויים במערכת האקולוגית של הירדן הדרומי, בין היתר כתלות בפעולות שיקום שונות המתבצעות במקטע זה.

רקע

פרויקט הניטור של מקטע זה של הירדן הדרומי יצא לדרך בסוף שנת 2020 (איור 114) והוא צפוי להתמשך כניטור רב שנתי של אזור זה. הניטור כולל את התחנות הבאות: (1) AL6: מוצא סכר אלומות, (2) AL5: הירדן לאחר כניסת מט"ש ביתניה, (3) AL4: הירדן לאחר כניסת המוביל המלוח, (4) YA3: הירדן לאחר כניסת נחל יבנאל, (5) BZ2: גשר בית זרע, (6) MN1: מנחמיה.



איור 114: מפת דיגום פרויקט ניטור ירדן דרומי. תחנות הדיגום מצפון לדרום: AL6: סכר אלומות, AL5: הירדן לאחר כניסת מט"ש ביתניה, AL4: הירדן לאחר כניסת המוביל המלוח, YA3: הירדן לאחר כניסת נחל יבנאל, BZ2: גשר בית זרע, Mn1: מנחמיה.

שיטות

גיאוכימיה: מים לאנליזות גיאוכימיה נשמרו בקירור עד הגעה למעבדה לחקר הכנרת. אנליזות לנוטריינטים בוצעו במעבדת הגיאוכימיה של המעבדה לחקר הכנרת על פי Standard methods למעט חנקן כללי מומס וניטראט לפי NAS.

כלורופיל ואצות: לאחר הדיגום, 25 מ"ל מהדוגמא, ב-2 חזרות, סוננו על פילטרים GF/C והוקפאו ב-20°C עד להמשך טיפול. יתרת הדוגמא שומרה בלוגול בבקבוק כהה. הפילטרים שימשו למדידה פלואורומטרית של ריכוזי הכלורופיל לאחר מיצוי באצטון 90%.

עשרה מ"ל של דוגמאות משומרות בלוגול נבדקו תחת מיקרוסקופ הפוך לאחר 24 שעות השקעה בתאי שיקוע והאצות זוהו לרמת המין או הסוג על פי הספרות הטקסונומית המקובלת:

Komarek and Anagnostidis 1999, 2005, Komarek and Huber-Pestalozzi 1969, Ettl 1978, Fott 1983, Cox 1996, John et al 2002, Wotowski and Hindak 2003

תדירות ההופעה של כל מין נקבעה לפי סולם התדירות של Korde (1956) המוצג בטבלה 18. ככל שהציון גבוה יותר – המין הופיע בכמות גבוהה יותר.

טבלה 18: סולם תדירות הופעת מינים לפי Korde (1956)

ציון	תדירות הופעתם	מספר תאים שנצפו
0	לא הופיע	0 תאים בתא שיקוע
1	נדיר	1-5 תאים בתא שיקוע
2	מידי פעם	10-15 תאים בתא שיקוע
3	נפוץ	20-30 תאים בתא שיקוע
4	תכוף	1 תא בסטריפ
5	תכוף מאוד	מספר תאים בסטריפ
6	שופע	מספר תאים בכל שדה תצוגה

על סמך ציונים אלו מחושבים עבור כל קבוצה טקסונומית בכל דוגמא סך הציונים שלה. השתמשנו בסך ציונים זה כמדד חצי-כמותי לכמות המיקרואצות מכל קבוצה, ולסכום של הציונים מכל הקבוצות כמדד חצי-כמותי לסה"כ האצות בדוגמא. לספירות של פיטובנתוס בכל תחנה נאספו 5 אבנים שהיו מכוסות במי נהר, בעומק של כ- 30 ס"מ. במעבדה גורד ביופילים שעל פני כל אבן להסתכלות במיקרוסקופ לזיהוי האצות. תדירות ההופעה של כל מין נקבעת לפי סולם התדירות של Korde (1956) המוצג בטבלה 18. מדד איכות המים חושב לפי European Framework Directive ונקבע על פי מינים אינדיקטורים, שיטה זו פותחה בארץ ע"י Barinova 2017s.

MST: השיטה מבוססת על מיצוי של חומר גנטי סביבתי (eDNA) וכימות גנים המאפיינים אוכלוסיות חיידקים ממקורות זיהום שונים בשיטת ה qPCR. הכימות נעשה על ידי שימוש בפריימרים ובפרוב ספציפיים לכל סוג זיהום והרצה של הדוגמאות במקביל לסטנדרטים המשמשים לבנית עקומות כיוול. מקורות הזיהום אותם בדקנו היו אדם (BacH), בקר (BacR) וחזירים (Pig2). התהליך כלל סינון 300 מ"ל מים מהתחנות השונות על גבי פילטר סופור ומיצוי eDNA בעזרת הקיט Power water.

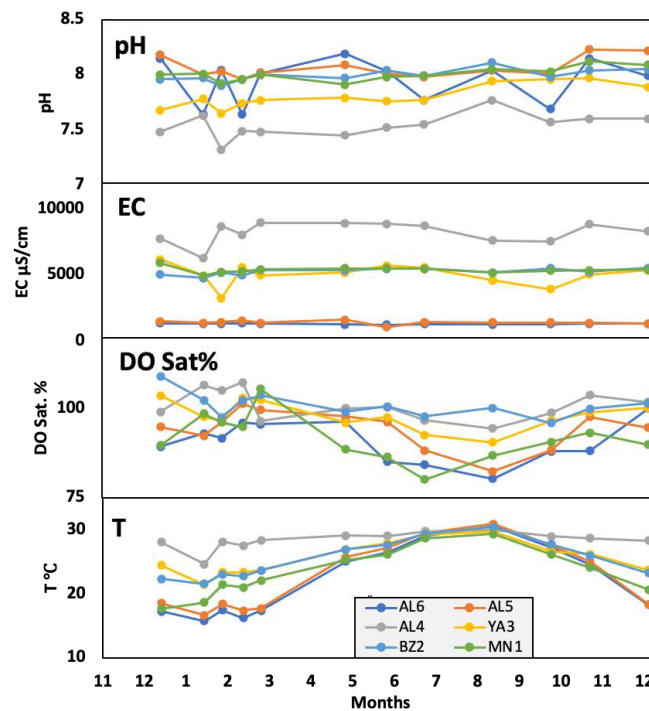
תוצאות ודיון

גיאוכימיה:

תוצאות הניטור הגיאוכימי על ידי המולטיפרום מוצגות באיור 115. ניתן לראות כי עבור pH המוביל המלוח ויבנאל מייצגים ערכי קצה עם pH נמוכים יחסית ואילו שאר התחנות נמצאות בתחום ערכים קרוב ל- 8, בדומה למוצא מהכנרת (סכר אלומות). לא נראית שונות בולטת עם הזמן.

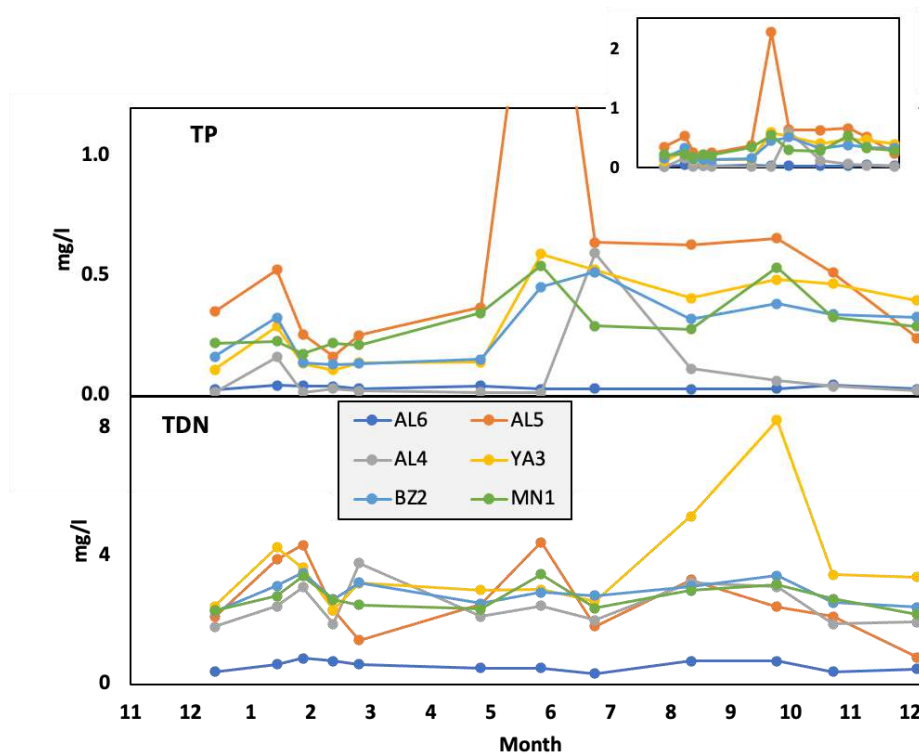
במוליכות חשמלית נראית החותמת הגבוהה של המוביל המלוח בצורה ברורה על שאר התחנות במורד חאת במובדל מערכי מוליכות חשמלית נמוכה באלומות והמט"ש. גם כאן לא מובחנת שונות גדולה בזמן למעט קפיצות קלות בערכי המוביל המלוח בחורף 2021.

ערכי חמצן מומס משתנים עם הזמן ונמצאים בקורלציה עם טמפרטורת המים – כך שבחודשים החמים נראה שקצבי פירוק חומר אורגני גבוהים מיצרנות ראשונית. ערכי זרחן כללי וחנקן כללי מוצגים באיור 116. עבור זרחן, בכל התחנות ערכי זרחן מומס (TDP) זרחן מומס ריאקטיבי (SRP), (לא מוצגים באיור 116), דומים מאד לערכי הזרחן הכללי (TP), ומכאן שרב הזרחן הכללי זמין לביולוגיה. ההשתנות המרחבית ועם הזמן של ערכי הזרחן מצביעה על תרומה חשובה ממט"ש ביתניה אשר משתמרת עד מנחמיה. ישנה עליה בסוף האביב- תחילת הקיץ, המלווה בשיא גבוה בירדן לאחר מט"ש ביתניה ביוני. ערכים גבוהים יחסית נשמרים לאחר אירוע זה עד סוף השנה.



איור 115: מדידות מולטי-פרוב (Manta-II, Eureka) בתחנות הירדן הדרומי שנת 2021.

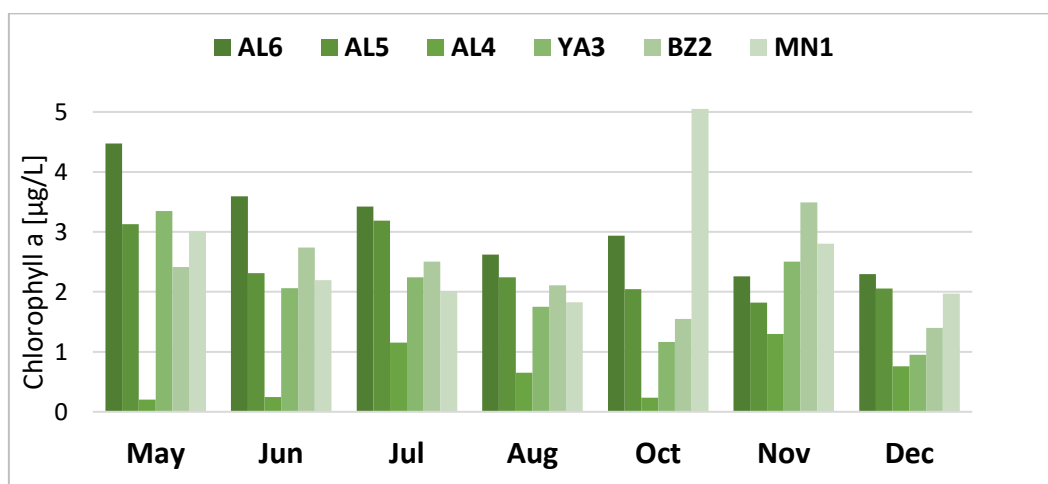
החנקן מציג התנהגות מעט מורכבת יותר. חנקן כללי מומס (TDN) מהווה כ-85% מהחנקן הכללי (TN) ומורכב בעיקר מניטראט (NO₃), ובמידה פחותה מחנקן אורגני מומס (TDN) ואמוניום (NH₄), כאשר ההתפלגות בין הצורונים גם משתנה עם הזמן. מפברואר ועד סוף השנה ישנה עליה כללית בתרומת הניטראט בכל התחנות יחד עם ירידה בתרומת החנקן האורגני. בתחנה AL5 לאחר כניסת מט"ש ביתניה ורק בתחנה זו אובחנה תרומה משמעותית של אמוניום בעיקר בחודשי החורף-אביב. השינויים בזמן בחנקן המומס מראים כי למרות התרומה הגוברת של ניטראט עד סוף השנה – סך החנקן המומס יורד ברב התחנות בסתיו 2021. הן המוביל המלוח והן המט"ש תורמים ניטראט ולכן חנקן מומס וכללי לירדן. נחל יבנאל, למרות ריכוזי חנקן (בעיקר ניטראט) גבוהים בסוף הקיץ, כמעט ואינו משפיע על מורד הירדן.



איור 116: ריכחי זרחן כללי (TP) בפאנל העליון, וחנקן כללי מומס (TDN) בפאנל התחתון עבור תחנות ניטור ירדן דרומי 2021.

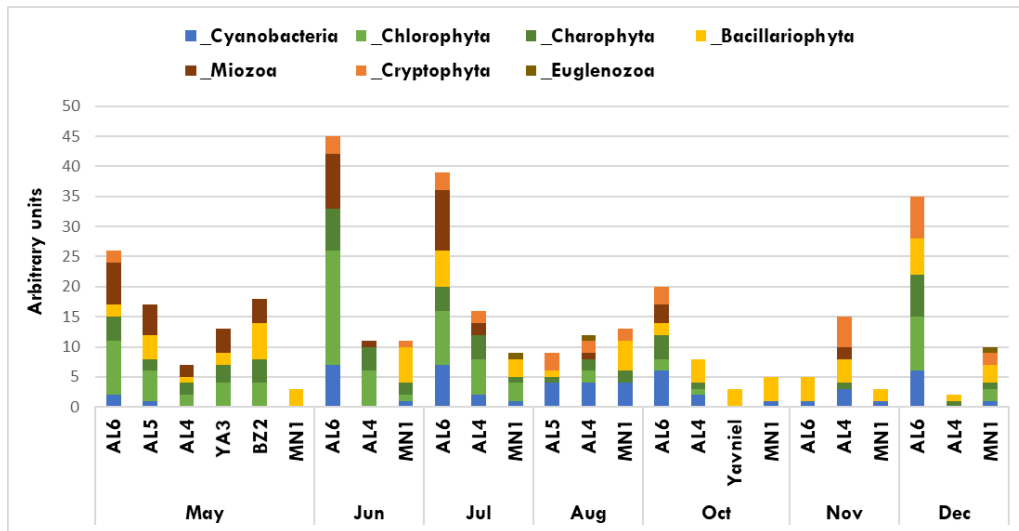
אצות וכלורופיל:

ריכח הכלורופיל בדוגמה מהווה אינדיקציה לביומסת האצות במים. מהבדיקות בירדן הדרומי ניתן להבחין כי ריכחי הכלורופיל נמוכים לאורך כל הנחל עם מקסימום של $5\mu\text{g/L}$ כלורופיל בתחנת 1MN בחודש אוקטובר 2021 (איור 117). למרות הריכחים הנמוכים של הכלורופיל, עדין ניתן להבחין בתבנית ברורה המאופיינת בריכחים גבוהים יחסית בסכר אלומות (6AL), היורדים למינימום עם כניסתו של המוביל המלוח לנהר (4AL), ועולים בחזרה לאחר כניסתם של מי נחל יבניאל לירדן (3YA) (איור 117). ריכחי הכלורופיל משקפים את השפעתם של סוגי המים השונים הנכנסים לנהר, על המערכת האקולוגית של הירדן הדרומי.



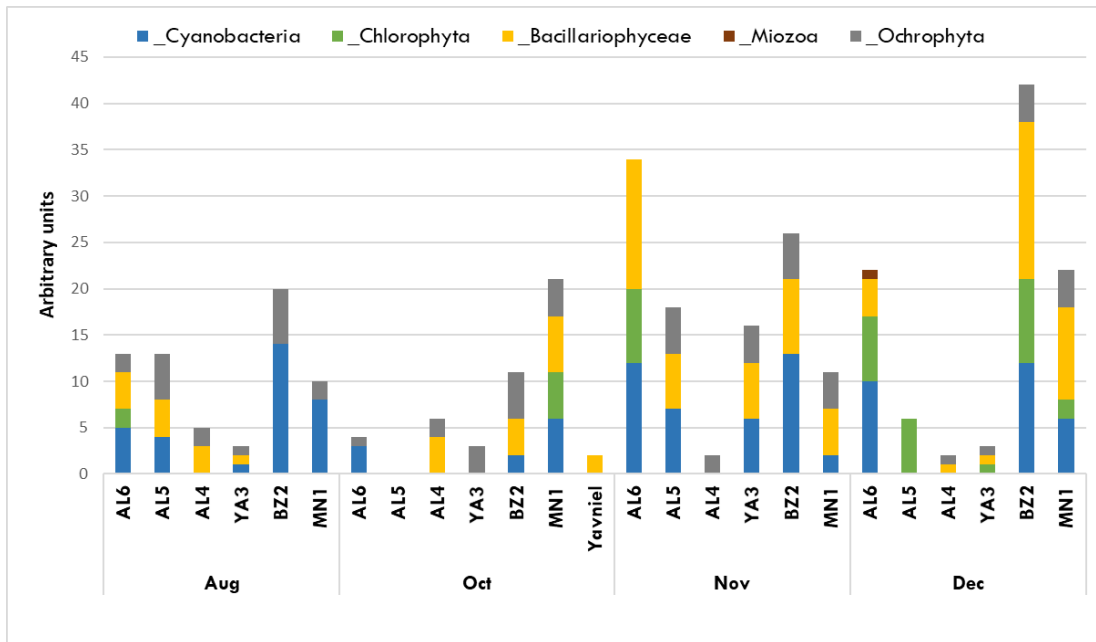
איור 117: ריכחי כלורופיל a לאורך הירדן הדרומי בשנת 2021.

במהלך שנת 2021 נצפו 75 מינים של פיטופלנקטון לאורך נהר הירדן הדרומי כאשר בתחנת סכר אלומות (6AL) הובחנו 50 מיני פיטופלנקטון, בתחנה לאחר כניסת המוביל המלוח 36 (4AL) מינים ובתחנת מנחמיה (1MN) מינים בלבד. מינים אלה שייכים ל- 7 מערכות שונות: קריפטופיטה, עיגניות (Euglenophyta), ירוקיות (Chlorophyta), כחוליות (ציאנובקטריה), צורניות (Bacillariophyta), דינופלג'טה (Miozoa) ונאוניתניות (Charophyta) (איור 118).



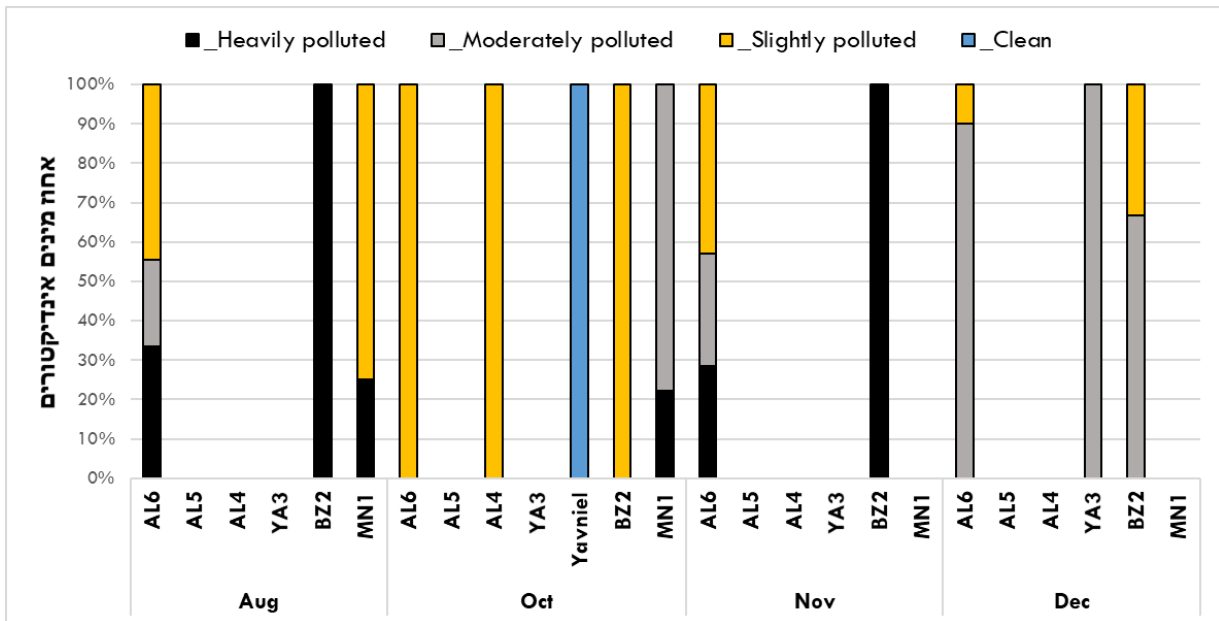
איור 118: מגוון מיני פיטופלנקטון לאורך הירדן הדרומי בשנת 2021.

מהסתכלות על מיני הפיטופלנקטון בירדן הדרומי ניתן להבחין כי בסכר אלומות נמצא מגוון המינים הגבוה ביותר. מינים אלו מקורם מהכנרת והם עוברים דילול לאורך הנחל. במעלה הנחל ניתן לראות דומיננטיות של קבוצת הירוקיות, הדינופלג'טים (Miozoa) והנאוניתניות. אך עם התקדמות הזרם הקבוצות מתחלפות וזאת שקבוצת הצורניות הופכת להיות דומיננטית יותר. מקורן של הצורניות במורד הנחל כנראה מגיע מהבנתוס, כאשר תאים משתחררים מהביופילם בקרקעית, אל עמודת המים (איור 118 ו-119). באירופה נהוג להשתמש באינדקס של צורניות ואצות הנמצאות בבנתוס (פיטובנתוס), כלומר במינים אינדיקטורים, לקביעת מדדי איכות המים בנחל, לכן התחלנו לעקוב אחרי הפיטובנתוס בשליש האחרון של 2021 (איור 119).



איור 119: עושר מיני פיטובנתוס לאורך הירדן הדרומי בשנת 2021.

מגוון המינים של הפיטובנתוס בירדן הדרומי שונה מזה שבפיטופלנקטון כמו גם המינים הדומיננטים. במהלך 2021 זוהו 32 מיני אצות בנתיות כאשר המינים הדומיננטים משתייכים לשלושת המערכות: הצורניות, ציאנובקטריה ו- ochrophyta. מיני הירוקיות היו בעיקר מינים חוטיים בעוד מערכת ה- ochrophyta הוצגה ע"י מין אחד *Heterococcus* sp. באוקטובר צפינו בתופעה בה בבנתוס במעלה הנהר, בעיקר בתחנה AL5, שלט בעל חיים ממערכת ה- Porifera (ספוגיים). אולם כבר בנובמבר אנו צופים בהתאוששות כך שמיני פיטובנתוס מהקבוצות השונות נצפים שוב. תופעה מעניינת נוספת המתרחשת בירדן הדרומי היא נוכחותם של מיני פיטובנתוס הנצפים לאורך כל הנחל כגון הציאנובקטריה *Tapinothrix* sp. וה- Ochrophyta - *Heterococcus* sp, למרות השינויים החלים במערכת הלוטית בעקבות כניסתם של סוגי מים שונים לנחל. מכאן שמינים אלו מאוד גמישים, כלומר הם מסוגלים לשרוד בטווח רחב של תנאי סביבה, לעומתם אנו מבחינים בעונתיות של הצורניות והירוקיות כאשר מינים ממערכות אלו משתנים בין התחנות השונות. בעוד בפיטופלנקטון אנו מבחינים במיני כנרת הנכנסים לנחל, אין לנו מידע על הפיטובנתוס של האגם. לכן, מחקר מעניין יהיה בדיקת אלו מינים בהם אנו צופים בפיטובנתוס של הירדן הדרומי מגיעים לנחל מהכנרת. מיני האצות החיים בבנתוס הינם אינדיקטורים למדדים שונים במערכת הלוטית, שהרי לכל מין דרישה סביבתית שונה להתפתחות. לכן, השתמשנו במדד לאיכות המים על פי מינים אינדיקטורים שפותח בארץ על ידי Barinova (2017) כדי לבדוק את מצב המים בירדן הדרומי (איור 120).

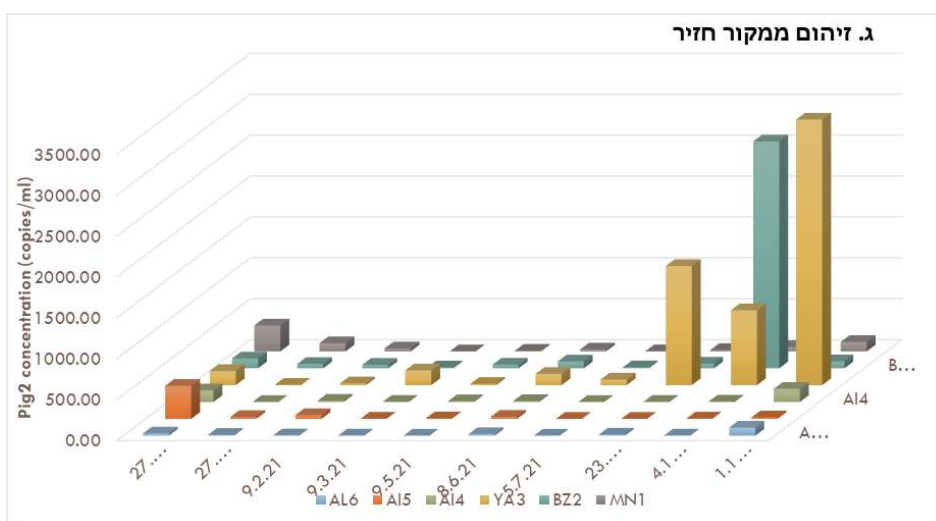
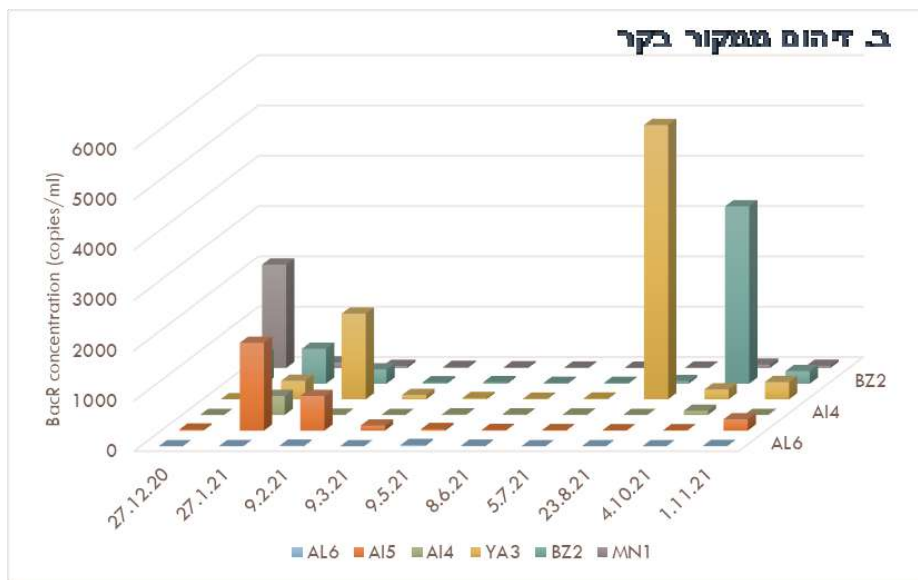
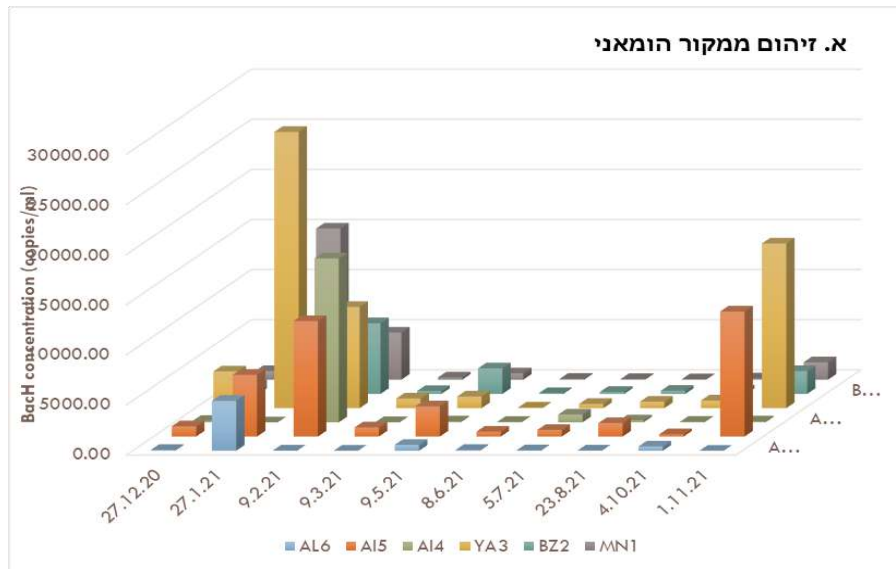


איור 120: מדד לאיכות המים לאורך הירדן הדרומי בשנת 2021 על פי מינים אינדיקטיביים. בתחנות שלא מצוין מדד זה לא נמצאו מינים אינדיקטיביים ידועים.

על פי מדד לאיכות המים ניתן לראות שינויים בחודשים השונים ובין התחנות. באוקטובר אנו רואים כי הנהר היה מזוהם בחומר אורגני במקצת לאורך כל הנחל וכנראה משהו התרחש בין תחנת בית זרע למנחמיה שגרם לעליה ברמת הזיהום. בחודשים אוגוסט ונובמבר רואים שרמת הזיהום בנחל הולכת ועולה לאורך התוואי עם מקסימום זיהום בתחנת בית זרע. בחינת המינים האינדיקטורים מאפשרת לאתר אירועים בעייתיים לאורך הנחל אשר מפרים את המערכת הלוטית.

MST:

התוצאות של מספר העתקי הסמנים למ"ל מים מוצגות באיור 121. העמודות מייצגות את התוצאות בתחנות השונות ובתאריכים השונים. לפי המוצג בגרף א' המתאר זיהום אדם, נצפה זיהום בצואת אדם בחודשי החורף דצמבר 2020, ינואר-פברואר 2021 ונובמבר 2021. בחודשי האביב והקיץ נראה שהזיהום פחת באופן משמעותי. רמת הזיהום הגבוהה ביותר נצפתה בכניסה של נחל יבנאל (YA3) בינואר 2021. לפי המוצג בגרף ב' המתאר זיהום של צואת פרות בתחנות השונות ובתאריכים השונים נצפה זיהום גבוה במיוחד באוגוסט 2021 בכניסה של נחל יבנאל לירדן (YA3) ובאוקטובר 2021 בתחנת בית זרע (BZ2). לפי המוצג בגרף ג' המתאר זיהום של צואת חזירים נצפה זיהום בנחל יבנאל באוקטובר (החודש היחיד בו נלקחה דוגמא מתחנה זו), ובכניסה של נחל יבנאל לירדן בנובמבר. נירמול התוצאות ליחידות של גרם צואה למ"ל מים מאפשר לקבוע מה התרומה היחסית של כל מהם. תוצאות הנומליזציה מצביעות על זיהום ממקור הומאני כזיהום העיקרי בירדן הדרומי (לא מוצג).



איור 121: ריכוז זיהום ממקורות שונים ביחידות של מספר העתקים למ"ל מים

מקורות ספרות (אצות)

- Barinova, S., 2017. Essential and Practical Bioindication Methods and Systems for the Water Quality Assessment. International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources 2)3(doi:10.19080/ijesnr.2017.02.555588.
- Cox E.J. 1996. Identification of freshwater diatoms from live material. Chapman & Hall. London 158 p.
- Ettl H. 1978. Xantophyceae. In: Subwasserflora von Mitteleuropa 3 (1). .Gustav Fisher, Stuttgart 530 p.
- John D.M, B.A. Whitton and A.J. Brook (ed). 2002. The freshwater algal flora of the British Isles: an identification guide to freshwater and terrestrial alga. ,Cambridge University Press Cambridge. 702 p.
- Huber – Pestalozzi G. 1969. Das Phytoplankton des subwassers. Euglenophyceen. 2nd edn. In Thienemann A. (ed.). .Die Binnengewasser 16 (4).Schweizerbart'sche, Stuttgart. 606 p.
- Komarek J., Anagnostidis K. 1999. Cyanoprocariota: Chroococcales. In: Subwasserflora von Mitteleuropa 19 (1). Gustav Fisher, Jena. 548 p.
- Komarek J., Anagnostidis K. 2005. Cyanoprocariota: Oscillatoriales. In: Subwasserflora von Mitteleuropa 19 (2).Elsevier/Spektrum, Heidelberg. 759 p.
- Komarek J., Fott B.1983. Das Phytoplankton des sußwassers.Chlorophyceae (Grünalgen) Ordnung: Chlorococcales. In: Die Binnengewasser 16 (7/1).Schweizerbart'sche, Stuttgart.1044 p.
- Korde N.V. 1956. The methods of biological studies for the bottom deposits of lakes (the field - methods of biological analysis). Pavlovsky E.N. and Zhadin V.I. (eds) Life in fresh waters of USSR. Moscow: Nauka Press, p. 383–413.
- Wotowski K., Hindak F. 2005. Atlas of Euglenophytes. VEDA, Publishing House of the Slovak Academy of Science. Bratislava. 136 p.

4.3 ניטור מעיינות בגולן



במימון
חיא"ל

ירון בארי-שליון, ניר קורן, רות נ. קפלן-לוי, אלה אלסטר, שירה ניניו, עכסה לופו, פלג אסטרן, אדית לייבוביץ

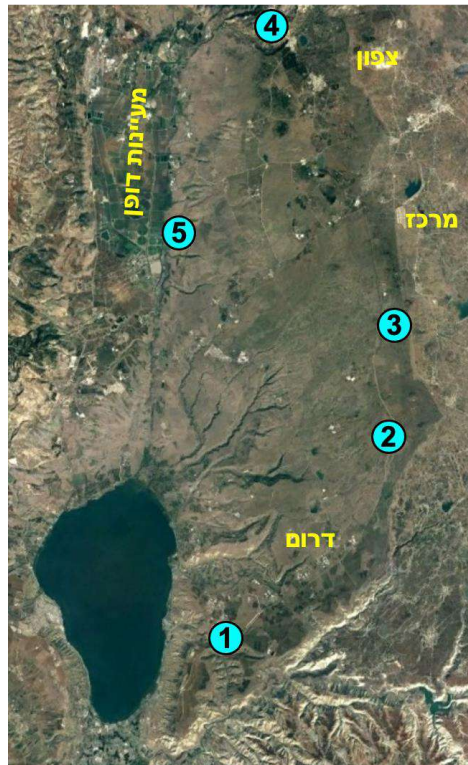
- **גיאוכימיה:** התפתחות ההרכב הכימי ומדדי איכות מים נלווים כגון, pH וחמצן מומס, בזמנים שונים בין המעיינות. כמו כן הרכב זה משתנה בין המעיין לבין הבריכה כמה מטרים עד עשרות מטרים במורד.
- **אצות:** בכל מעיין יש את האוכלוסיות האופייניות לו, כנראה כתלות בעיקר במליחות, טמפרטורה וריכוז הנוטריאנטים. מערכת הצורניות היא הנפוצה ביותר בכל המעיינות, אחריה מערכת הציאנובקטריה והירוקיות. במעיינות בהם קיימת בריכה לאחר הנביעה, ישנם הבדלים באוכלוסיות בין שני המקומות.
- **MST:** האנליזה המולקולרית מצביעה באופן מדויק על שכיחות גבוהה של דוגמאות חיוביות לחיידקים מחוללי עכברת במעיינות עין פיק ועין נמרוד. אופי הזיהום שונה בין שני המעיינות, עם זיהום הומאני כזיהום הדומיננטי בעין פיק, וזיהום ממקור בקר כזיהום הדומיננטי בעין נמרוד. עם זאת, זיהום ממקור הומאני נמצא בשני המעיינות ויש צורך לבחון אם וכיצד מגיע זיהום ביובי למעיינות אלה.

מטרת המחקר

ניטור שוטף, רב מימדי – גיאוכימי וביולוגי של מספר מעיינות בגולן.

רקע

פרויקט הניטור של מעיינות בגולן יצא לדרך בתחילת 2021 והוא פרויקט רב שנתי מתמשך. הניטור מתמקד כיום ב- 5 מעיינות המייצגים אזורים שונים בגולן: (1) עין פיק, (2) עין ג'וחדר (עין אורחה), (3) עין ג'ואיזה, (4) עין נמרוד, (5) עין דרבשיה (איור 122) והוא צפוי להתרחב בעתיד הקרוב לכלול מעיינות נוספים. בשלוש מהמעיינות: פיק, ג'וחדר וג'ואיזה נדגמים מי המעיין ובמקביל מי בריכה בנויה מספר מטרים עד עשרות מטרים במורד.



איור 122: מפת דיגום מעיינות גולן.

שיטות

גיאוכימיה, כלורופיל, התפלגות אצות ראה פרק מס' 4.2 ניטור ירדן דרומי. הבדל אחד הוא שדיגום הפיטובנתוס מתבצע בבריכות המעיין, על ידי גירוד ביופילם מקירות הבריכה. לשם איתור מקור הזיהום בחרנו בשיטת ה- MST (Microbial Source Tracking). שיטת ה- MST מסתמכת על כך שכל סוג בעל חיים מאופיין בהרכב אוכלוסיית חיידקים צואתיים הייחודיים לו, אותם ניתן לזהות ולכמת על ידי בדיקה מולקולרית במכשיר qPCR. בעבודה זו נעשה שימוש בפריימרים ופרובים אופייניים לזיהום הומאני (BacH), זיהום ממקור בקר (BacR) חיהום מחזירים (Pig2).

לשם איתור פוטנציאל לעכברת נעשה שימוש ב qPCR עם פריימרים ופרוב המזהים רצף של הגן המקודד את האנזים ליפאז LipL32 המצוי במינים של חיידקים פתוגניים מהסוג *Leptospira* אך לא במינים לא פתוגניים מאותו סוג. הבדיקות מסתמכות על השיטה של (Stodard et al. 2009).

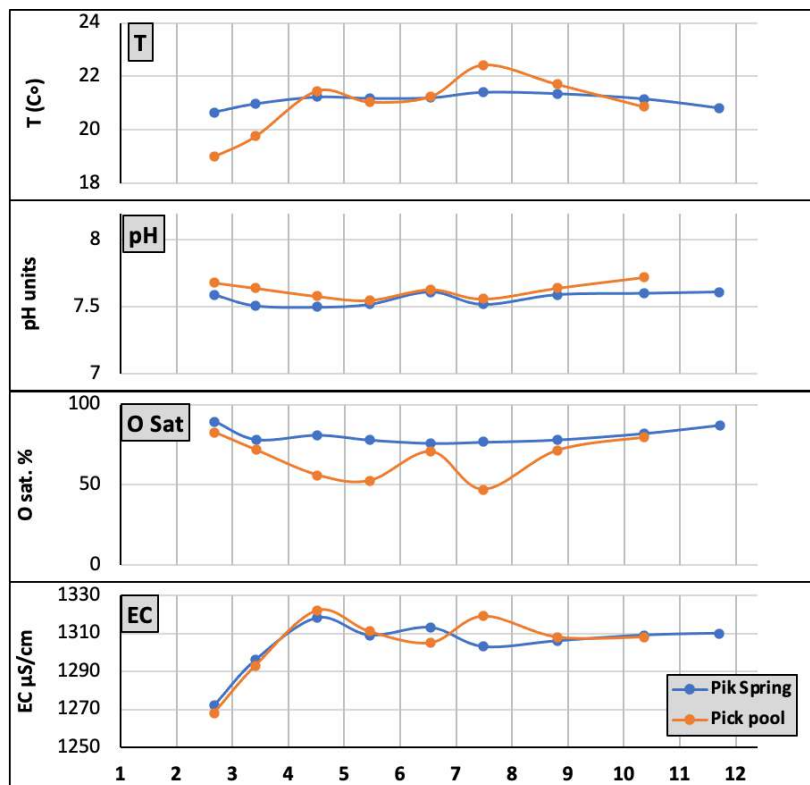
דיגום, מיצוי חומר גנטי סביבתי (eDNA) והרצתו ב-qPCR

כ- 200 מ"ל מים מכל אתר דיגום נשאבו על ידי מזרק בנפח 100 מ"ל וסוננו ישירות באתר הדיגום על פילטר supor 0.2µm (Pall corporation) שהוכנס לסביבון eDNA (Merck) SWINNEX 47mm מוצה מהפילטרים בעזרת הקיט Power water (QIAGEN) וריכזו נמדד בעזרת Qubit. ריאקציה ה-qPCR בוצעה במכשיר Rotor gene, (QIAGEN, Hilden Germany) בטריפליקטים. לצורך כימות אבסלוטי הורצו הדוגמאות לצד דוגמאות של עקומת כיוול המכילות פלסמיד עם מקטע ה-DNA המתאים בריכזים ידועים.

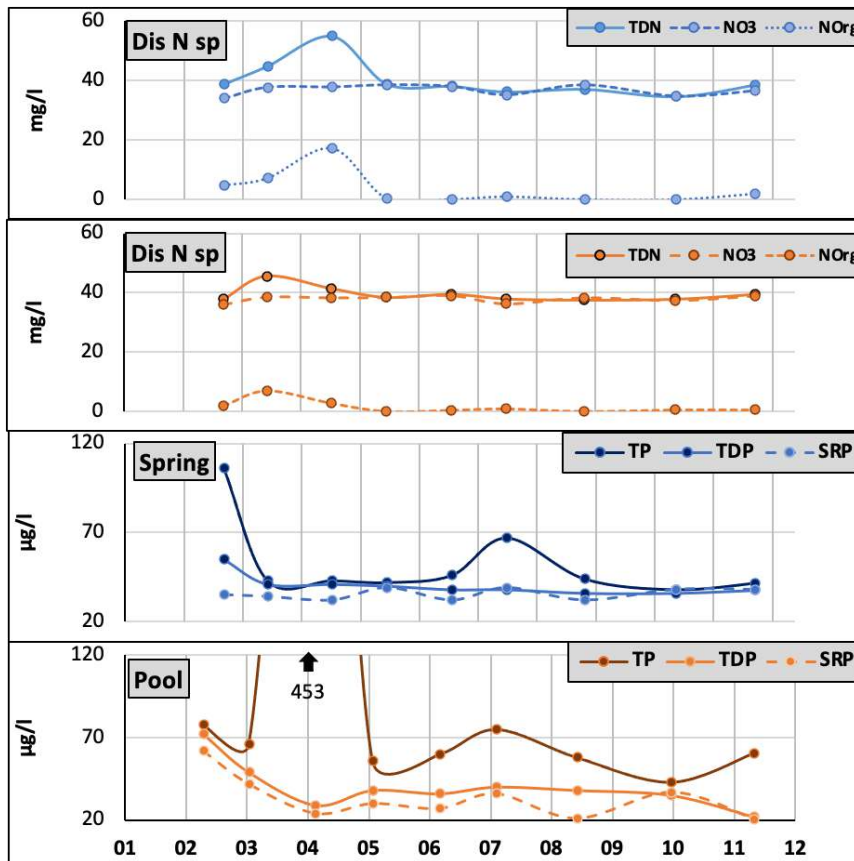
תוצאות ודין

גיאוכימיה:

ההרכב הגיאוכימי של סדרת המעיינות והבריכות הנלוות לאורך שנת 2021 מראה תבניות מעט שונות עבור מעיינות שונים. בדיווח כאן נתמקד בדוגמא של מעיין עין פיק והבריכה במורד מן המעיין (איורים 123 ו-124). ניתן לראות, כמצופה, כי ביחס למעיין עצמו הבריכה עוברת שינויים גדולים יותר בזמן עבור pH, רוויה של חמצן מומס וטמפרטורה. במעיין זה נראית ירידה בערכי החמצן המומס בבריכה בחודשי הקיץ (איור 123) בדומה לבריכת ג'וחדר. בבריכת ג'ואיזה נצפתה מגמה הפוכה ובה בקיץ ערכי הבריכה עולים והם גבוהים כל הזמן ביחס למעיין. ברב המעיינות ריכז הזרחן הכללי המומס (TDP) דומה לזרחן המומס הריאקטיבי (SRP) ואלו מהווים כ-80-85% מהזרחן הכללי (TP) (איור 124). במעבר לבריכות, ישנה ירידה בזרחן המומס והמומס הריאקטיבי ככל הנראה כתוצאה מקליטה באצות. בצורה דומה, רב החנקן הכללי (TN) הינו מומס (TDN), ונשלט ע"י הצורן ניטראט (NO3) (איור 124). במעבר בין המעיין לבריכה בג'וחדר ובג'ואיזה ישנה ירידה בניטראט – שוב, כנראה כתוצאה מקליטה באצות. תופעה זו לא נצפתה בעין פיק. עין נמרוד מראה תבנית התפתחות בזמן שונה הן בהקשר לזרחנים והן בהקשר לחנקנים.



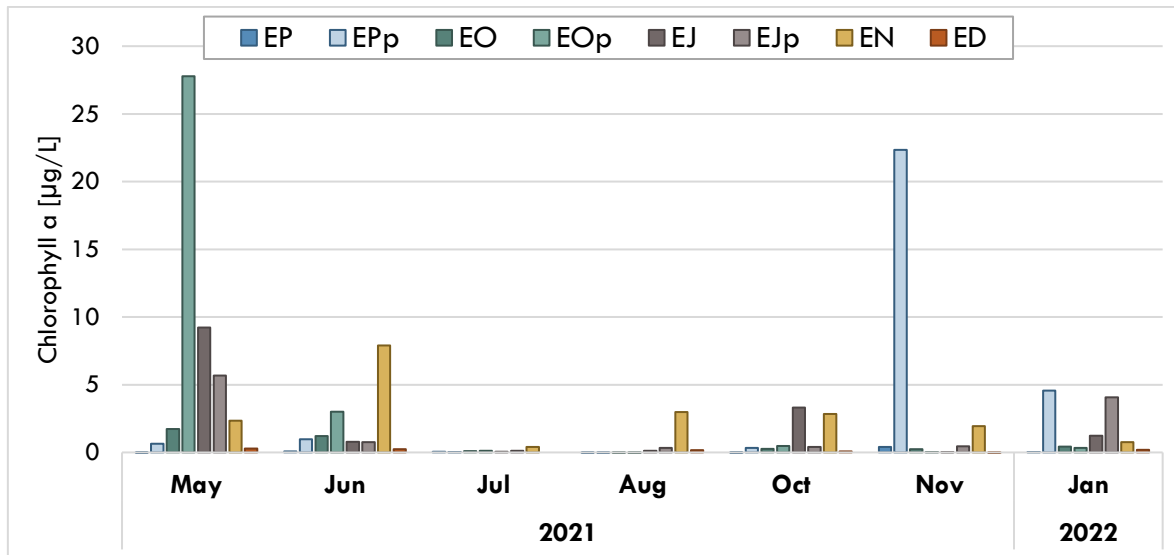
איור 123: תוצאות מדידות מולטיפרוב (Manta-II, Eureka) חודשיות במעיין עין פיק ובבריכה במורד לאורך שנת 2021.



איור 124: ריכוזי זרחן וצורוניו וחנקן מומס וצורוניו במעיין ובבריכת עין פיק לאורך שנת 2021.

אצות וכלורופיל:

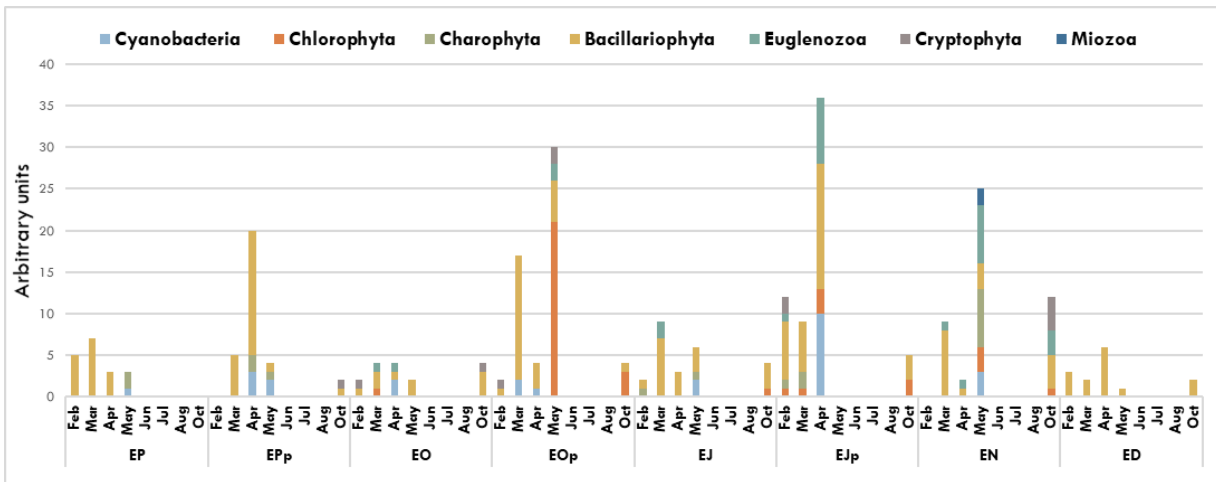
ריכוז הכלורופיל בדוגמה מהווה אינדיקציה לביומסת האצות בעמודת המים. את ריכוזי הכלורופיל במעיינות הגולן התחלנו לבדוק החל מחודש מאי 2021. ניתן להבחין כי ריכוזי הכלורופיל בחציון האחרון של שנת 2021 לרוב הם ערכים נמוכים ($<10\mu\text{g/L}$) בכל המעיינות שנבדקו, מלבד שני מקרים: האחד בבריכת עין אורחה בחודש מאי ($28\mu\text{g/L}$) והשני בחודש נובמבר בבריכת עין פיק ($23\mu\text{g/L}$) (איור 125). באופן כללי ניתן לראות שלרוב ריכוזי הכלורופיל בבריכות גבוה מזה שבנביעות עצמן, מלבד במקרה של עין ג'ואיזה, בחודשים מאי ואוקטובר בהם נצפה מצב הפוך (איור 125).



איור 125: ריכוזי כלורופיל a במעיינות הגולן בשנת 2021. EP – עין פיק; EPp – בריכת עין פיק; EO – עין אורחה (ג'וחדר); EOp – בריכת עין אורחה; EJ – עין ג'ואיזה; EJp – בריכת עין ג'ואיזה; EN – עין נמרוד; ED – עין דבשה (דרבשיה).

סך הכל נמצאו 63 מיני פיטופלנקטון בכל חמשת המעיינות יחד, כאשר עושר המינים הגדול ביותר נמצא בעין אורחה (32 מינים) ועין ג'ואיזה (32 מינים). בעין נמרוד הובחנו 21 מיני פיטופלנקטון, בעין פיק 18 מינים ובעין דבשה 7 מינים בלבד. מינים אלה משתייכים ל-7 מערכות: כחוליות (ציאנובקטריה), ירוקיות (Chlorophyta), נאווניתניות (Charophyta), צורניות (Bacillariophyta), עינניות (Euglenophyta), קריפטופיטה ודינופלג'לטה (Miozoa) (איור 126).

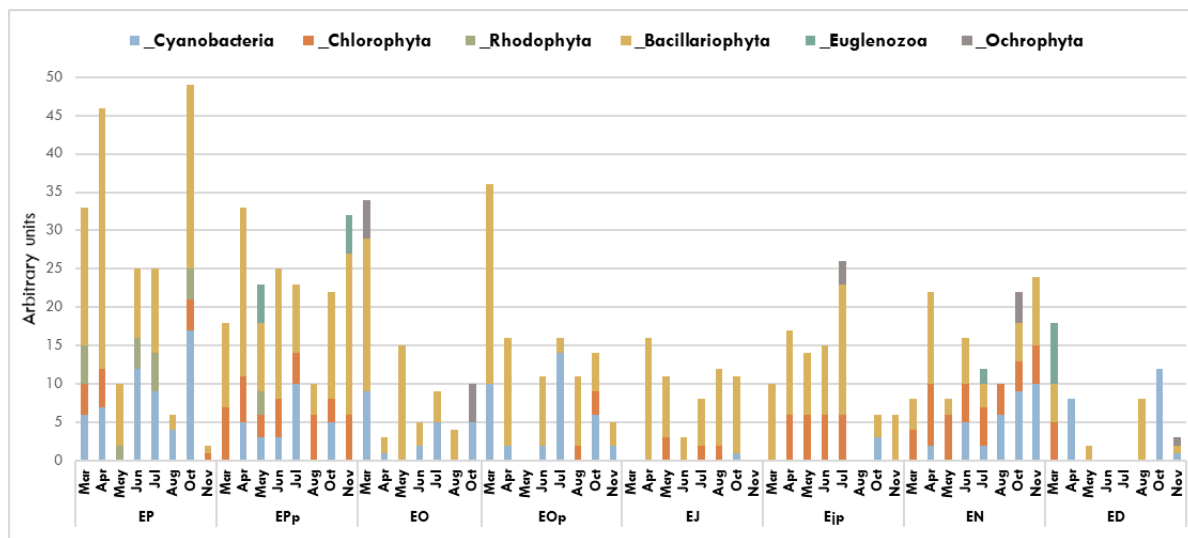
לרוב, ריכוזי הכלורופיל תואמים את מגוון מיני הפיטופלנקטון שנצפו במעיינות השונים במהלך 2021 (איורים 125 ו-126), כגון שיא ריכוזי הכלורופיל שנצפה בבריכת עין אורחה בחודש מאי שמקורו במגוון של מיני ירוקיות שלא נצפו בנביעה. לעומת זאת המגוון הגדול של מיני פיטופלנקטון שנצפה במאי בעין נמרוד איננו מתבטא בריכוזי כלורופיל גבוהים. ניתן להבחין כי הברכה עשירה יותר בפיטופלנקטון לעומת הנביעה של כל מעיין. מגוון המינים הגדול ביותר של פיטופלנקטון במהלך 2021 נצפה באפריל בבריכה של עין ג'ואיזה כאשר שלטו בעיקר מינים משלושת המערכות: עינניות, צורניות וציאנובקטריה. מקבוצת העינניות בלט במיוחד תפוצתו של *Trachellomonas sp*. אך באופן כללי הצורניות היא המערכה הנפוצה ביותר בכל המעיינות שנבדקו, וישנם חודשים בהם מינים אלו שולטים בגוף המים.



איור 126: מגוון מיני פיטופלנקטון במעיינות הגולן בשנת 2021. EP – עין פיק; Epp – בריכת עין פיק; EO – עין אורחה (ג'וחדר); EOp – בריכת עין ג'ואיזה; EJ – עין ג'ואיזה; Ejp – בריכת עין ג'ואיזה; EN – עין נמרוד; ED – עין דבשה (דרבשה).

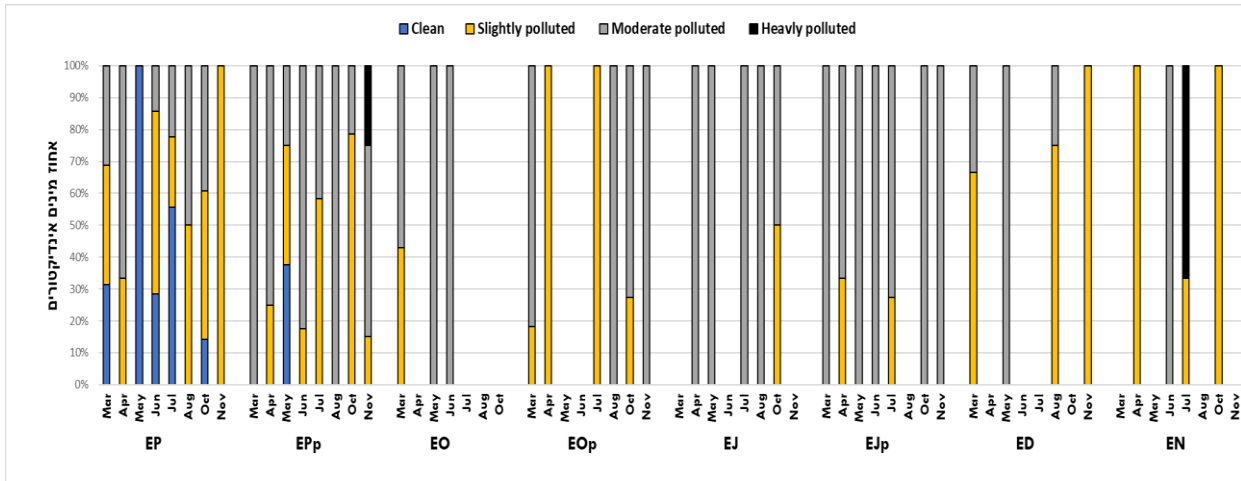
בתחילת פרויקט ניטור המעיינות בגולן נבדקה אוכלוסיית הפיטופלנקטון במעיינות השונים, אך מצאנו כי מספרם נמוך, דבר התואם את ריכחי הכלורופיל שנמדדו וישנם חודשים שלא נצפו כלל (איור 125). לכן הוחלט להמשיך את הניטור על ידי מעקב אחר הפיטובנטוס. הפיטובנטוס משקף את מצב גוף המים בצורה מיטבית יותר במערכות אלו, והם נוכחים רוב השנה (איור 127). שהרי, האוכלוסיות מושפעות ומשתנות בהתאם לשינויים שהתרחשו במערכת.

במהלך שנת 2021 נצפו סה"כ ב-55 מינים של פיטובנטוס (או אצות אפיפיתיות) בחמשת המעיינות יחד. כאשר בבניעה ובבריכה יחד בעין פיק זוהה עושר המינים הגבוה ביותר עם 32 מיני פיטובנטוס. בעין אורחה הובחנו 26 מיני פיטובנטוס, בעין ג'ואיזה 17 מינים, בעין נמרוד 19 מינים ובעין דבשה 14 מינים בלבד. מינים אלה משתייכים ל-6 מערכות שונות: עינניות (Euglenophyta), ירוקיות (Chlorophyta), כחוליות (ציאנובקטריה), צורניות (Ochrophyta), (Bacillariophyta) ואדומיות (phytaRhodo) (איור 127). מערכת הצורניות היא הנפוצה ביותר בכל המעיינות, אחריה מערכת הציאנובקטריה והירוקיות. בכל מעיין יש את האוכלוסיות האופייניות לו, כנראה כתלות בעיקר במליחות, טמפרטורה חיהום אורגני.



איור 127: מגוון מיני פיטובנטוס במעיינות הגולן בשנת 2021. EP – עין פיק; Epp – בריכת עין פיק; EO – עין אורחה (ג'וחדר); EOp – בריכת עין אורחה; EJ – עין ג'ואיזה; Ejp – בריכת עין ג'ואיזה; EN – עין נמרוד; ED – עין דבשה (דרבשה).

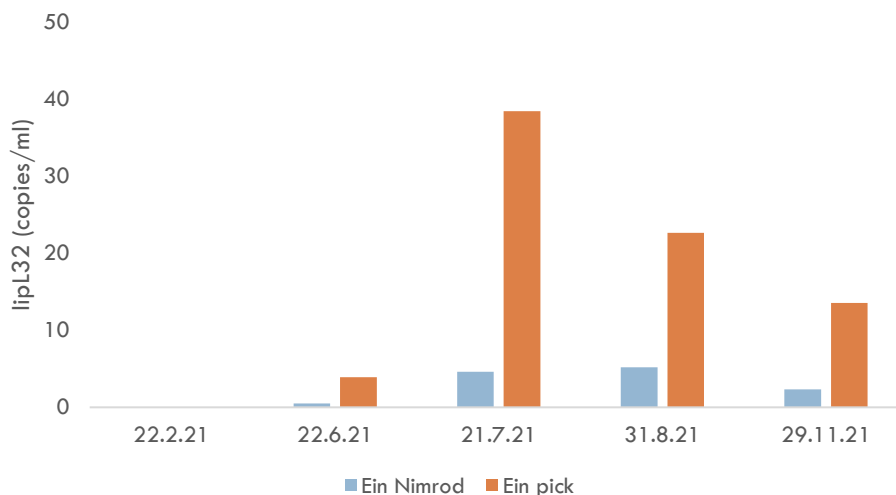
מבדיקה של מדד איכות המים על פי מיני פיטובנתוס אינדיקטורים נמצא כי הנביעה בעין פיק הינה הנקייה ביותר מבין כל המעיינות מזיהום אורגני, בעוד שאר מקורות המים מאופיינים בזיהום ברמה מתונה (איור 128). אירוע יוצא דופן תועד ביולי 2021 בעין נמרוד בה נצפתה העינית *Lepocinclis tripterus* אשר מאפיינת מים עם רמת זיהום אורגני גבוה.



איור 128: מדד לאיכות המים במעיינות הגולן בשנת 2021 על פי מינים אינדיקטורים. בחודשים שלא מצוין מדד זה, הסיבה לכך היא שאין שם מינים אינדיקטורים ידועים. EP – עין פיק; EPp – בריכת עין פיק; EO – עין אורחה (ג'וחדר); EOOp – בריכת עין אורחה; EJ – עין ג'ואיזה; EJp – בריכת עין ג'ואיזה; EN – עין נמרוד; ED – עין דבשה (דרבשה).

עכברת

תוצאות הבדיקות מצביעות על נוכחות של חיידקים מחוללי עכברת בשני המעיינות שנבדקו (איור 129). ניכר שבבריכה של עין פיק ריכוז גבוה יותר של חיידקי לפטוספירה פתוגנים מאשר בעין נמרוד. לא ידועים ערכי הסף שמתחתם לא נשקפת סכנה כתוצאה מטבילה במים נגועים, אולם מצב בו 80% מהדוגמאות חיוביות מצביע על זיהום חוזר ונשנה של לפטוספירה במעיינות שנבדקו, דבר המעלה את הסיכון למבקרים בהם. בשני המעיינות הריכוזים הגבוהים ביותר של לפטוספירה נמדדו בחודש יולי.

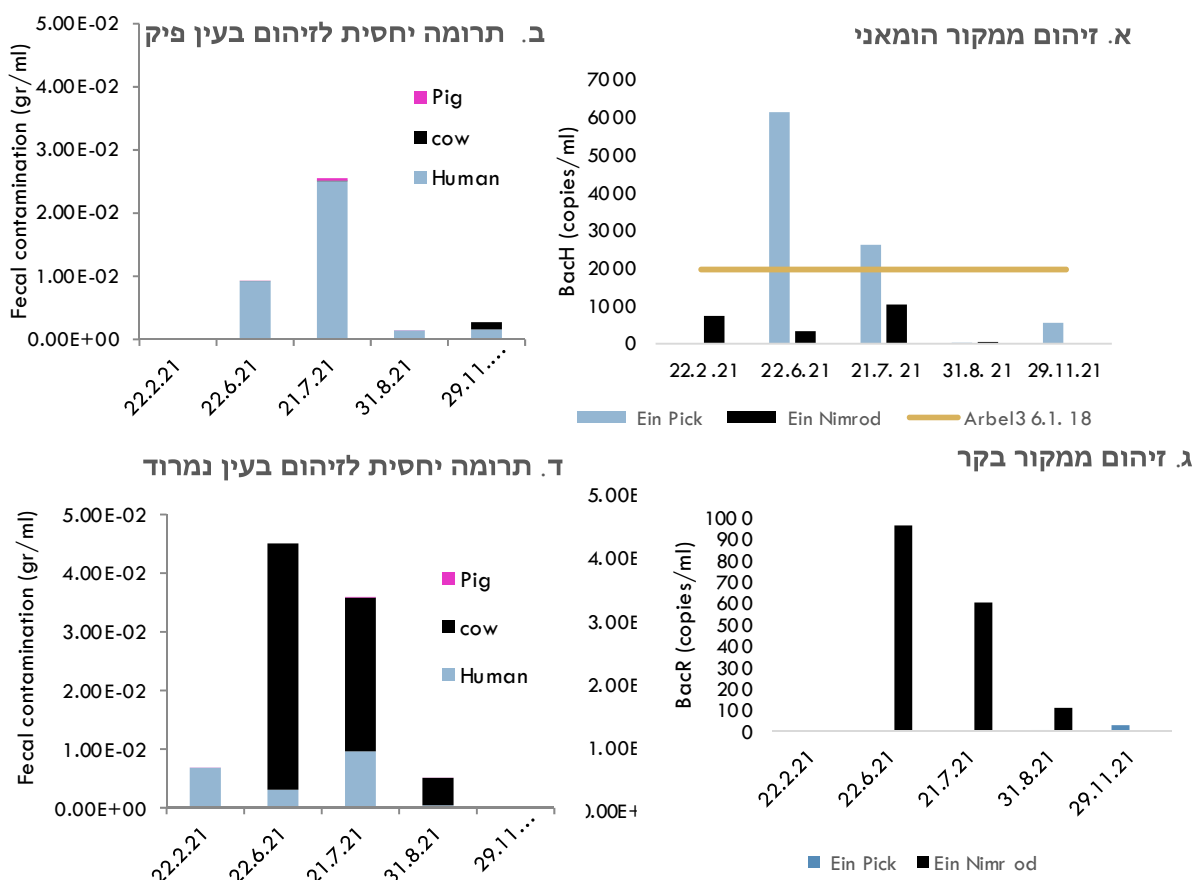


איור 129: ריכוז הסמן לחיידקי לפטוספירה פתוגנים (lipL32) במעיינות עין פיק ועין נמרוד בתאריכים שונים.



MST

מעקב אחר זיהום ממקור צואה בשיטת ה-MST מצביע על זיהום ממקור הומאני בבריכה של עין פיק (איור 130א) כשבחודשים יוני ויולי 2021 נמדדו ערכים חריגים הגבוהים מאלה שנמדדו בזמן שיטפון וכשל ביובי בנחל ארבל ב- 3.6.2018 (סימון כתום, איור 130א). נרמול של התוצאות ליחידות של גרם צואה למ"ל מים מאפשר להעריך את התרומה היחסית של כל מזהם, ומצביע על זיהום ממקור הומאני כזיהום הדומיננטי בבריכה בעין פיק (איור 130ב). זיהום ממקור בקר היה נמוך יחסית בכל הדגימות של עין פיק (איור 130ג) ואילו זיהום ממקור חזיר ניכר בעיקר בדוגמה של חודש יולי בו נמדדו ערכים גבוהים המעידים על תרומה של זיהום ממקור חזיר בדגימה זו (איור 130ד). החותם הזיהומי בעין נמרוד היה שונה מזה של עין פיק, עם בקר כמזהם הדומיננטי (איור 130ג-ד) ועם ערכים נמוכים יותר של זיהום ממקור הומאני, אם כי זיהום מסוג זה מופיע גם בעין נמרוד (איור 130א).



איור 130: תוצאות MST בעין פיק (עמודות כחולות) ובעין נמרוד (עמודות שחורות) לריכוז הסמן ההומאני (א) או סמן הבקר (ג). הקו הכתום הרציף מוצג לצורך השוואה לדוגמה לזיהום הומאני ביובי. תוצאות מנורמלות לריכוז צואה ממקורות שונים בעין פיק (ב) ובעין נמרוד (ד).

לסיכום, האנליזה המולקולרית מצביעה באופן מדויק על שכיחות גבוהה של דוגמאות חיוביות לחיידקים מחוללי עכברת במעיינות עין פיק ועין נמרוד. אופי הזיהום שונה בין שני המעיינות, עם זיהום הומאני כזיהום הדומיננטי בבריכה בעין פיק, זיהום ממקור בקר כזיהום הדומיננטי בעין נמרוד. עם זאת, זיהום ממקור הומאני נמצא בשני המעיינות ויש צורך לבחון אם וכיצד מגיע זיהום ביובי למעיינות אלה.

סיכום

במעיינות בהם קיימת בריכה לאחר הנביעה, ישנם הבדלים באוכלוסיות בין שני המקומות. הדוגמא הבולטת ביותר היא עין פיק, בו רואים מינים המאפיינים מים נקיים בנביעה, בעוד בבריכה מבחינים במינים הגדלים ברמות זיהום גבוהות. ההבדל בין תוצאות ה-MST לבין מדד איכות המים שנצפה בבריכה של עין פיק, נובע מכך, שזיהום ממקור פרות הינו עשיר יותר בנוטריאנטים מאשר ממקור הומאני ולכן האינדיקטור לרמת זיהום גבוהה מופיע בבריכת עין פיק בחודש נובמבר, בו הובחן זיהום ממקור צואת פרות על פי MST. ערכי ריכחי הכלורופיל הגבוהים שנצפו בחודש נובמבר מחזקים סברה זאת. בעין נמרוד נצפתה התאמה בין מדד איכות המים לבדיקות ה-MST בהם אנו רואים זיהום אורגני ברמה גבוהה ביוני 2021 הבא לידי ביטוי גם בעליית ריכחי הכלורופיל.

מקורות

Stoddard RA, Gee JE, Wilkins PP, McCaustland K, Hoffmaster AR. 2009. Detection of pathogenic *Leptospira* spp. through TaqMan polymerase chain reaction targeting the *LipL32* gene. *Diagn Microbiol Infect Dis* 64:247-255

4.4 ניטור פיטופלנקטון, זואופלנקטון ודגים באגמון החולה



מבט לגוף המים מתחנת הדיגום במוצא האגמון. צילם: דוד קמינגס, יוני 2021

במימון
קק"ל
ורשות
המים

דוד קמינגס, אלה אלסטר, רות נ. קפלן-לוי, שרון וורולקר, גדעון גל, תמר זהרי

- התעלות הצפוניות מהוות בית גידול ייחודי באזור האגמון ויש לשמור עליהן בזהירות יתרה מפני התייבשות ותשטיפי חקלאות.
- מגוון המינים והביומסה של הפיטופלנקטון והזואופלנקטון במוצא האגמון גבוהים בהרבה מאשר ב-3 התחנות האחרות, בעוד שתחנת הפרשל דלה ביותר בפלנקטון.
- הקבוצות הדומיננטיות של הפיטופלנקטון היו ירוקיות ועינניות ושל הזואופלנקטון - גלגיות.
- רוב הדגים שנתפסו בקיץ 2021 היו שייכים ל-3 מתוך 15 מיני דגים: אמנון מצוי, גמבוזיה ויבלסת מצויה. התעלות הצפוניות וכניסת הירדן לגוף המים מהווים בתי גידול ייחודיים לדגים מהמינים הנדירים יותר ויש לשמור עליהם.
- מומלץ להוסיף תחנת דיגום לפלנקטון בכניסת תעלה 101 ולוותר על תחנת פרשל שבה צפיפות הפלנקטון זעומה.

מטרת המחקר

מעקב אחר הפיטופלנקטון, זואופלנקטון והדגים באגמון, כדי ללמוד מורכבות מארג המזון ועל תפקוד גוף המים כמערכת אקולוגית.

רקע

מערכות אקולוגיות של מים מתוקים הן בין המערכות האקולוגיות המאוימות ביותר בעולם מבחינת זיהומים, הרס בתי גידול, שינויים אקלימיים ועוד. כל אלו משפיעים בצורה משמעותית על המגוון הביולוגי המתקיים בהן. שינויים ואובדן של המגוון הביולוגי יכולים להשפיע רבות על תפקוד מערכות אקולוגיות בכלל ועל מבנה מארג המזון בפרט. מארג המזון מספק מידע על מעברי האנרגיה בין רמות טרופיות שונות. הפיטופלנקטון הוא היצרן הראשוני במערכות אקווטיות ולכן בעל תפקיד מרכזי במארג המזון. שינויים בהרכב המינים והביומסה שלו משפיעים על המערכת האקולוגית ועל איכות המים. הזואופלנקטון משמש כמקור מזון לדגים, כצרכן ראשוני ושינוי אשר ניזון מרעיית פיטופלנקטון או מטריפת זואופלנקטון אחרים, וכחלק ממעגל הנוטריינטים, כאורגניזמים המפרישים למים חומרים אורגניים ואנאורגניים בכמות המהווה חלק משמעותי ממאגר הנוטריינטים. השפעת הזואופלנקטון על מעברי האנרגיה בין הרמות הטרופיות במים מתבטאת גם כבקרה תחתית (באספקת נוטריינטים וכטרף לאורגניזמים ברמות טרופיות גבוהות ממנו) וגם כבקרה עלית, כזואופלנקטון טורף. הדגים, ברמה טרופית גבוהה עוד יותר, ממלאים תפקידים שבין צרכן שינוי ושלישוני ועד טורפי-על. הם ניזונים מאצות וחסרי חוליות בפלנקטון ובבנתוס, ומטריפת דגים אחרים.

אגמון החולה מהווה מערכת אקווטית ייחודית ואתר תיירותי המושך מאות אלפי מבקרים בשנה. האגם הקטן (1.1 קמ"ר) והרדוד (עומק > 1 מ') נוצר במסגרת פרויקט שיקום החולה ב-1994. האגמון מקבל את עיקר מימיו מתעלת ניקוז ("תעלה 101") הזורמת כל השנה, ובעונת הגשמים מתווספים מים מקטע משוחזר של נהר הירדן. האגמון מהווה תחנת ביניים לציפורים שנודדות מאירופה לאפריקה ובחזרה, ולכן הינו אתר מרכזי לצפרות ותיירות. עם הקמת האגמון בשנת 1994 הופעלה באגם תכנית ניטור כוללת להבנת המערכת האקולוגית הנבנית שבמסגרתה בוצעו, עם הפסקות קצרות וארוכות, מעקבים אחרי הפיטופלנקטון, הזואופלנקטון והדגים. כאתר תיירותי מרכזי ומערכת אקולוגית ייחודית ישנה חשיבות רבה בהמשך קיום תכנית הניטור. בתחילת 2021 חודשה תכנית הניטור על כל מרכיביה, כאשר המעבדה לחקר הכנרת אחראית על ניטור הפיטופלנקטון, הזואופלנקטון והדגים. בדוח זה נציג את תוצאות הניטור שבוצע על ידינו ב-2021.

שיטות

הדיגום: דוגמאות לבדיקת ריכוזי כלורופיל ולזיהוי וספירת פיטופלנקטון חואופלנקטון נאספו ע"י צוות קק"ל מדי חודש (טבלה 19) ב-4 תחנות: פרשל, כניסה לאגמון, מעגן, ומוצא האגמון (איור 131). עקב אילוצים טכניים לא נאספו דגימות באוגוסט ואוקטובר, ודוגמאות דצמבר נאספו ב-30 לנובמבר. לכלורופיל, דוגמאות מים של 25 מ"ל מכל תחנה, ב-3 חזרות, סוננו על פילטרים GF/C והוקפאו ב-20°C, עד להמשך טיפול. לפיטופלנקטון, 100 מ"ל נוספים שומרו בלוגל בבקבוק כהה. לזואופלנקטון, 5 ליטר מי אגמון סוננו דרך רשת של 64 מיקרון לתוך בקבוקון של 22 מ"ל. הזואופלנקטון שנאסף קובע באתנול 99.5%, הוכנס לצידנית מקוררת, ונשמר ב-4°C.



איור 131: מפת האגמון ומיקום תחנות הדיגום. תחנות לדיגום דגים באלקטרושוקר - 8 עיגולים צהובים. תחנות לפיטופלנקטון, כלורופיל חואופלנקטון - 4 העיגולים הצהובים שסביבם פס אדום. המלבן האדום מציין את מיקום פריסת הרשתות הנורדיות לתפיסת דגים. 1. הגן הבוטני. 2. הכניסה לאגמון. 3. חוף צפוני. 4. היציאה מאגמון. 5. תעלת האפס. 6. ירדן צפונית חדשה (מחוץ למפה). 7. פרשל (מחוץ למפה). 8. תעלה 101.

טבלה 19: תאריכים ונקודות דיגום לכלורופיל, פיטופלנקטון חואופלנקטון בשנת 2021.

תחנות	13/01	10/02	08/03	07/04	02/05	02/06	30/06	28/07	01/09	10/11	30/11
פרשל מערב			x	x	x	x	x	x	x	x	x
כניסה לאגמון		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
מעגן			x	x	x	x	x	x	x	x	x
מוצא האגמון	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

דיגום דגים באלקטרושוקר בוצע ב-4 ליוני 2021 על ידי קבלן חיצוני, ב-8 אתרים (איור 131) שמייצגים את מגוון בתי הגידול באגמון (ביצה, בריכה, נחל טבעי, תעלות) בכל אתר התבצעה עבודה פעילה עם שדה חשמלי למשך 15 דקות המחולקות ל-3 פרקים של 5 דקות כל אחד. הדגים שנאספו זוהו ונמדדו בשטח והוחזרו למים כשמרביתם במצב טוב. דיגום דגים נוסף, באמצעות רשתות נורדיות, בוצע בלילה שבין ה-27 וה-28 ליולי 2021. שלוש רשתות נפרסו מזרחית לגשרון כניסת הירדן (איור 131) בשעה 17:00 ונאספו אחרי 13 שעות, ב-6:00 בבוקר שלמחרת. הדגים שנתפסו ברשתות הוכנסו לצידניות עם קרח והובאו למעבדה לחקר הכנרת לזיהוי, מדידת אורך גוף ושקילה.

אנליזות

כלורופיל: הפילטרים הקפואים והדוגמאות המשומרות הועברו למעבדה לחקר הכנרת. הפילטרים שימשו למדידה פלואורומטרית של ריכוזי הכלורופיל לאחר מיצוי באצטון 90% (כנהוג בניטור כנרת).



פיטופלנקטון: עשרה מ"ל של דוגמאות משומרות בלוגול נבדקו תחת מיקרוסקופ הפוך לאחר 24 שעות השקעה בתאי שיקוע והאצות זוהו לרמת המין או הסוג על פי הספרות הטקסונומית המקובלת. תדירות ההופעה של כל מין נקבעה לפי סולם התדירות של (Korde) 1956 (טבלה 20). על סמך ציונים אלו חישובו לכל קבוצה טקסונומית בכל דוגמא את סך הציונים שלה (Sum of scores), פרמטר ששימש כמדד חצי-כמותי לכמות המיקרוואצות מכל קבוצה טקסונומית. סכום הציונים מכל הקבוצות שימש כמדד חצי-כמותי לסה"כ הפיטופלנקטון בדוגמא.

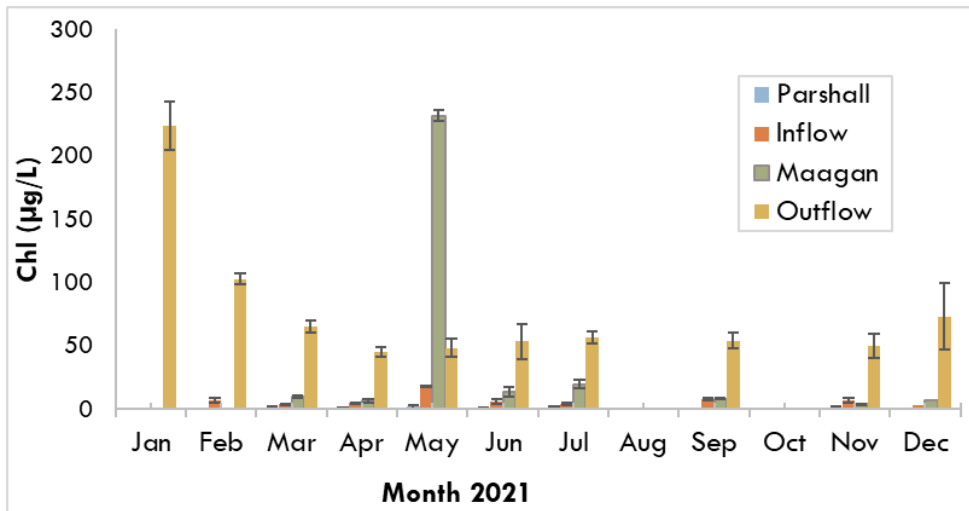
טבלה 20: סולם תדירות הופעת מינים לפי Korde (1956)

מספר תאים שנצפו	תדירות הופעתם	ציון
0 תאים בתא שיקוע	לא הופיע	0
1-5 תאים בתא שיקוע	נדיר	1
10-15 תאים בתא שיקוע	מידי פעם	2
20-30 תאים בתא שיקוע	נפוץ	3
1 תא בסטריפ	תכוף	4
מספר תאים בסטריפ	תכוף מאוד	5
מספר תאים בכל שדה תצוגה	שופע	6

זואופלנקטון: חלק יחסי של דוגמאת הזואופלנקטון המרוכזת נלקח לספירה מיקרוסקופית בהגדלה של פי 50 (קופודה וקלדוצרה) או בהגדלה של פי 100 או 200 (רוטיפרה). הספירות התבצעו באמצעות תוכנת Planktometrix המאפשרת ניהול של ספירות זואופלנקטון לפי מינים. דוגמאות עשירות בחומר אורגני המקשה על הספירה במיקרוסקופ חולקו לשתי פרקציות גודל (מעל 120 מיקרון, מעל 40 מיקרון) שנספרו כל אחת בנפרד. ריכחי הזואופלנקטון מדווחים כמספר הפרטים לליטר.

תוצאות ודיון

כלורופיל: ריכח הכלורופיל בדוגמה מהווה אינדיקציה לביומסת האצות במים. באופן עקבי ולמעט מקרה בודד אחד, ריכחי הכלורופיל בתחנת המוצא (Outflow) היו גבוהים יותר מהריכחים בשלוש התחנות האחרות (איור 132). בינואר 2021 נמדד בתחנת מוצא האגמון ריכח כלורופיל של כ- $220\text{g/L}\mu$, שירד למינימום של כ- $45\text{g/L}\mu$ באפריל והתייצב סביב ערך זה עד לסוף השנה (איור 132). לעומת זאת, בשאר התחנות ריכחי הכלורופיל נעו בין $0.5\text{-}20\mu\text{g/L}$ בלבד, מלבד פריחה חריגה במאי בתחנת מעגן בה הריכח עלה לכ- $230\text{g/L}\mu$. במאי נצפה גם שיא של כלורופיל בתחנת הכניסה (Inflow) ברמה של כ- 20mg/L .

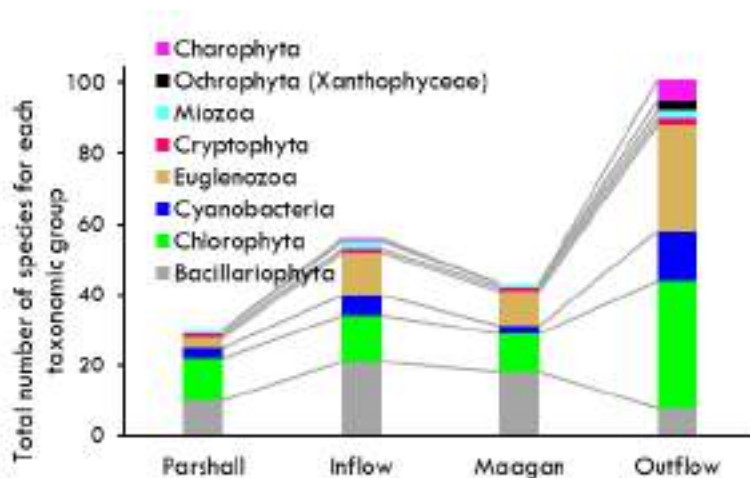


איור 132: ריכחי הכלורופיל באגמון בארבע תחנות הדיגום לאורך שנת 2021. באופן בולט הריכחים בתחנת המוצא מהאגמון היו גבוהים מהריכחים בשלוש התחנות האחרות, למעט בדיגום מאי בו הריכח בתחנת המעגן היה המירבי.

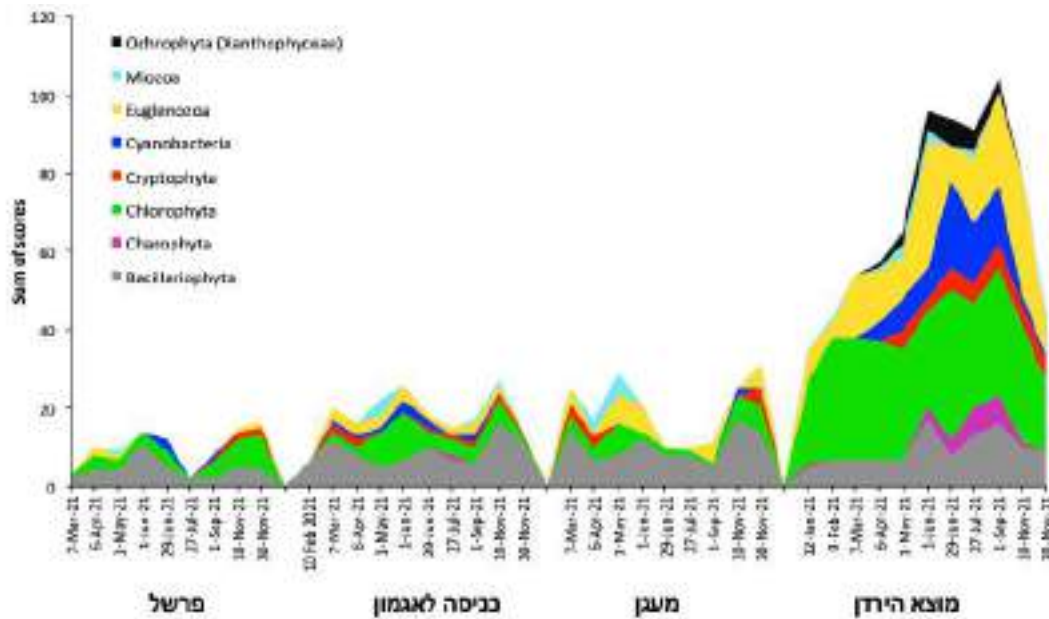
הרכב המינים של הפיטופלנקטון:

במהלך 2021 נצפו 132 מינים/סוגים (להלן: טקסונים) של אצות בפיטופלנקטון של אגמון, השייכים ל-8 מערכות: קריפטופיטה, עיניניות (Euglenophyta), ירוקיות (Chlorophyta), כחוליות (ציאנובקטריה), צורניות (Bacillariophyta), קסאנטופיטה, דינופלג'לטה (Miozoa) ונאווניתניות (Charophyta) (איור 133). בתחנת פרשל נמצאו 30 טקסונים, בכניסה לאגמון 56, במעגן 43 ובתחנת מוצא האגמון 101 טקסונים. מספר המינים/סוגים של אצות בדגימת מים אחת בתחנות פרשל, כניסה ומעגן נע בין 1 ל-15. בתחנת היציאה מספר המינים היה באופן עקבי גבוה בהרבה, ונע בין 16 ל-44.

הרכב המינים וכמות האצות (על פי המדד החצי כמותי של סך הציונים) בתחנות פרשל, בכניסה לאגמון ובמעגן כמעט ולא השתנו במהלך השנה. מקרה יוצא דופן חל במאי, בו צפינו בפריחה של הדינופלגלט *Durinskia oculata* בתחנת מעגן ובכמות נמוכה יותר בכניסת האגמון, בהתאמה לשיאי הכלורופיל באיור 132. בכל החודשים האחרים, הפיטופלנקטון בתחנות אלו היה מורכב ממספר מצומצם של אצות צורניות, ירוקיות ועיניניות ומדי פעם פרטים בודדים של קריפטופיטה וציאנובקטריה (איורים 133, 134). בשלוש תחנות אלו, רוב השנה הצורניות קיבלו ציון sum of scores הגבוה ביותר (איור 134).



איור 133: הרכב טקסונומי של הפיטופלנקטון ב-4 תחנות הדיגום באגמון: סה"כ המינים מכל קבוצה טקסונומית שנמצאו בכל תחנה ב- 2021.

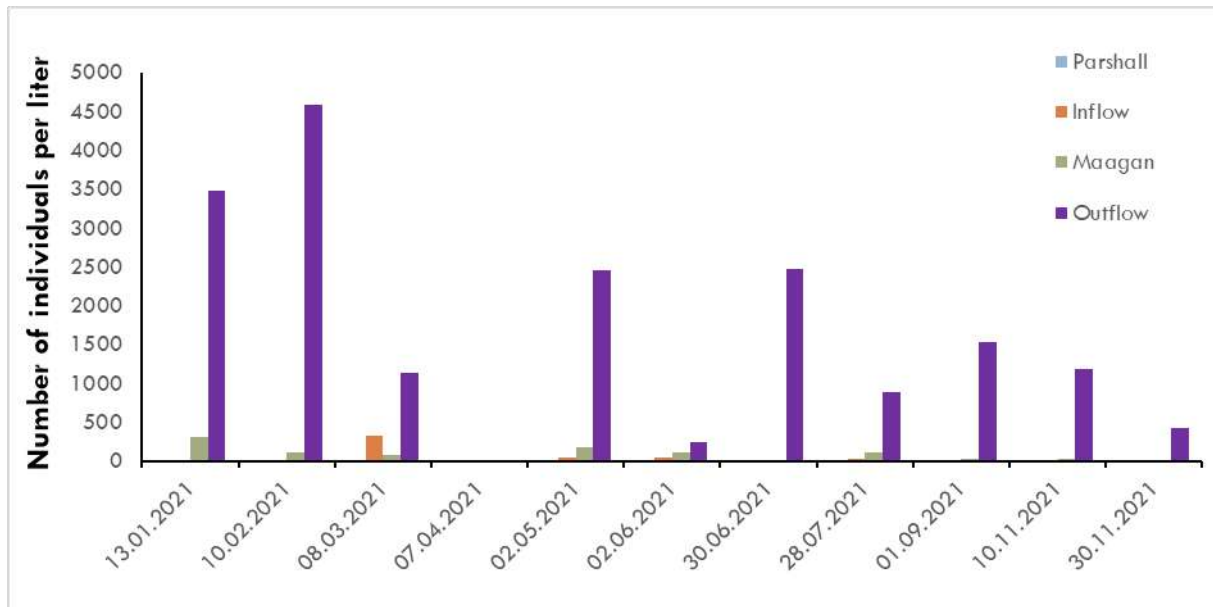


איור 134: שינויים לאורך זמן במהלך 2021 בערך sum of scores - של סך הפיטופלנקטון ושל הקבוצות הטקסונומיות המרכיבות אותו ב-4 תחנות דגימה באגמון.

בתחנת מוצא האגמון אצות צורניות נמצאו לאורך כל השנה בערכי Sum of scores דומים לאלו שבתחנות האחרות. אולם, תרומתן של האצות מהקבוצות האחרות במוצא האגמון הייתה גדולה בהרבה מאשר בתחנות האחרות. לכן, הערך של Sum of scores היה גבוה בהרבה בתחנה זו לאורך כל השנה (איור 134), בדומה לריכחי הכלורופיל הגבוהים יותר (איור 132). במוצא האגמון, במהלך כל השנה אצות ירוקיות היו הקבוצה המגוונת ביותר, ועם הנוכחות הגבוהה ביותר (sum of scores הגבוה ביותר), ואחריה קבוצת העינניות (איור 134). פריחות של ציאנובקטריה וקריפטופיטה נצפו רק במוצא האגמון ורק בקיץ. אצות קסאנטופיטה ונאוונתניות נמצאו רק במוצא האגמון (איור 134). ריכחי הכלורופיל הגבוהים יותר ועושר גדול יותר של פיטופלנקטון הנצפה בתחנת המוצא לעומת התחנות האחרות מעידים על תנאים טובים יותר להתפתחות פיטופלנקטון באזור זה של האגמון לעומת התחנות האחרות, כמו זמן שהות ארוך יותר, זרימה איטית ואולי גם תנאי תאורה משופרים ו/או ריכחי נוטריאנטים גבוהים יותר. יתכן גם שכניסת מינים מתעלה 101 תורמת למגוון הגבוה ולפיכך יש לדגום את הפיטופלנקטון הנכנס מתעלה 101 במקביל לדגיגום מים לאנליזות כימיות באותה תחנה.

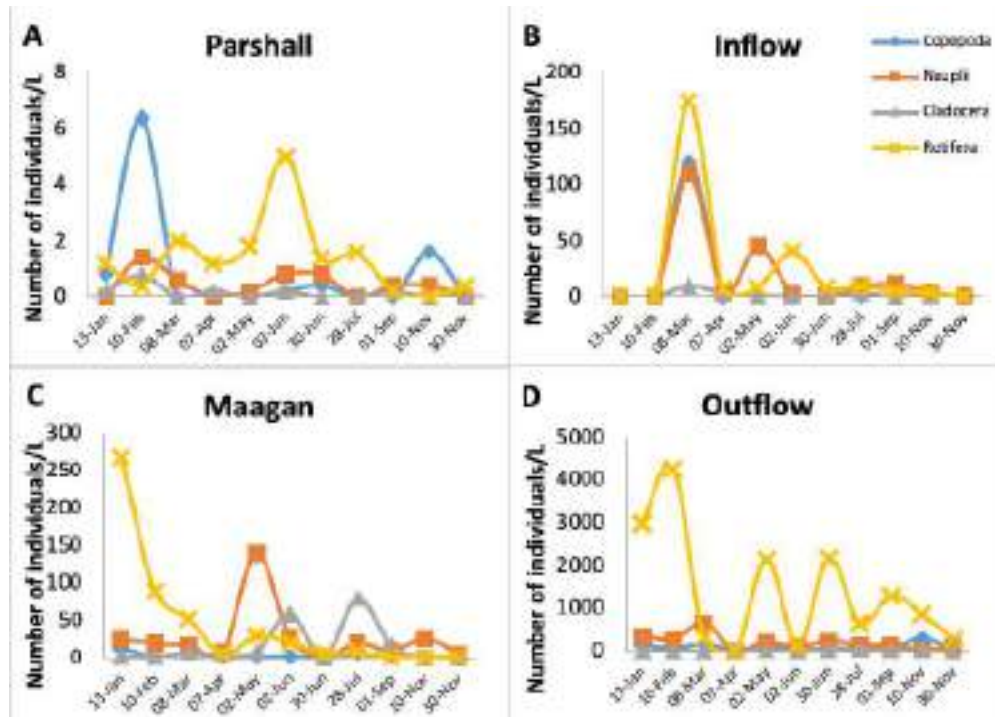
זואופלנקטון:

כמו לגבי פיטופלנקטון, גם לגבי זואופלנקטון - צפיפות הפרטים הגבוהה ביותר נרשמה בתחנת מוצא האגמון (איור 135), בה נצפו פי 18 יותר פרטים לליטר מאשר בתחנת המעגן, בה צפיפות הפרטים הייתה השנייה בגובהה מבין התחנות. בתחנת פרשל נרשמה צפיפות הפרטים הנמוכה ביותר, עם צפיפות ממוצעת של פחות מ-3 פרטים לליטר בהשוואה לאלפי פרטים לליטר ביציאה מאגמון (איורים 135, 136). באפריל כמות הפרטים בכל התחנות הייתה נמוכה משמעותית לעומת יתר חודשי השנה, הסיבה לכך איננה ידועה.



איור 135: זואופלנקטון: צפיפות הפרטים הכוללת לליטר, בכל תחנה עפ"י מועדי הדיגום ב-2021.

מחלוקה של הזואופלנקטון לקבוצות טקסונומיות של דפנאיים (cladocera), גלגליות (rotifera) ושטרגליים, אשר מחולקים בין בוגרים (copepoda) והשלב הצעיר ביותר (nauplii), עולה כי בכל התחנות הצפיפות הגבוהה ביותר הינה של זואופלנקטון ממערכת הגלגליות. לאחריו הצפיפות הגבוהה ביותר של פרטים הינה של ה-nauplii, שטרגליים ודפנאיים. הרכב זה של זואופלנקטון נשמר בתחנות מוצא האגמון וכניסה לאגמון, אך משתנה בתחנת מעגן בה הצפיפות הגבוהה ביותר אחרי הגלגליות הינה של nauplii, לאחריה של הדפנאיים והצפיפות הנמוכה ביותר הינה של השטרגליים הבוגרים (איור 136). לסיכום, תחנות הדיגום שנבחרו מייצגות בתי גידול שונים באגמון ואכן נמצאו הבדלים גדולים בהרכב המינים ובצפיפות פרטי הפיטופלנקטון והזואופלנקטון בין התחנות, כאשר באופן בולט במוצא האגמון נרשמו ריכחי הביומסה והמגוון הגדולים ביותר. בתחנת פרשל שנמצאת באזור עם מים זורמים, צפיפות הפיטופלנקטון והזואופלנקטון היתה נמוכה ביותר, מתחת לערכים בעלי משמעות סטטיסטית, ואנחנו ממליצים להפסיק לדגום בה. במקומה כדאי לדגום בכניסה של תעלה 101, מקור המים העיקרי לאגמון.

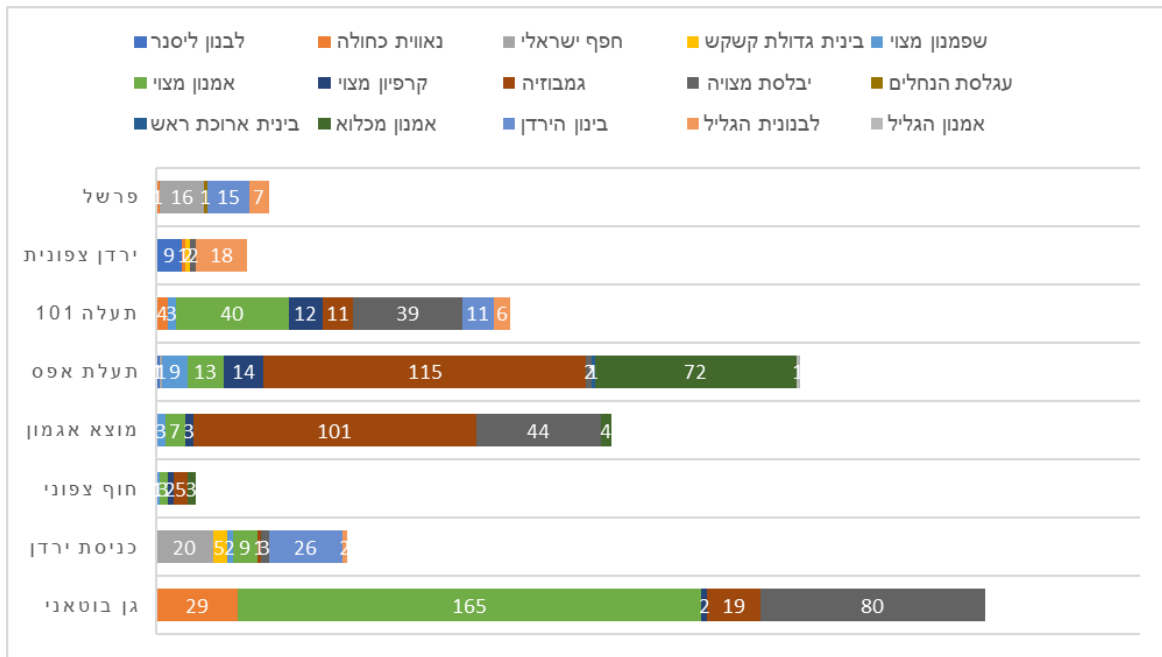


איור 136: צפיפות הזואופלנקטון (פרטים לליטר) לפי הקבוצות השונות בתחנות הדיגום (A) פרשל, (B) כניסה לאגמון, (C) מעגן, (D) יציאה מאגמון, בתאריכי הדיגום השונים. עקב ההבדלים הגדולים בצפיפות הזואופלנקטון בתחנות השונות, סקאלת ציר Y שונה בין גרף לגרף.

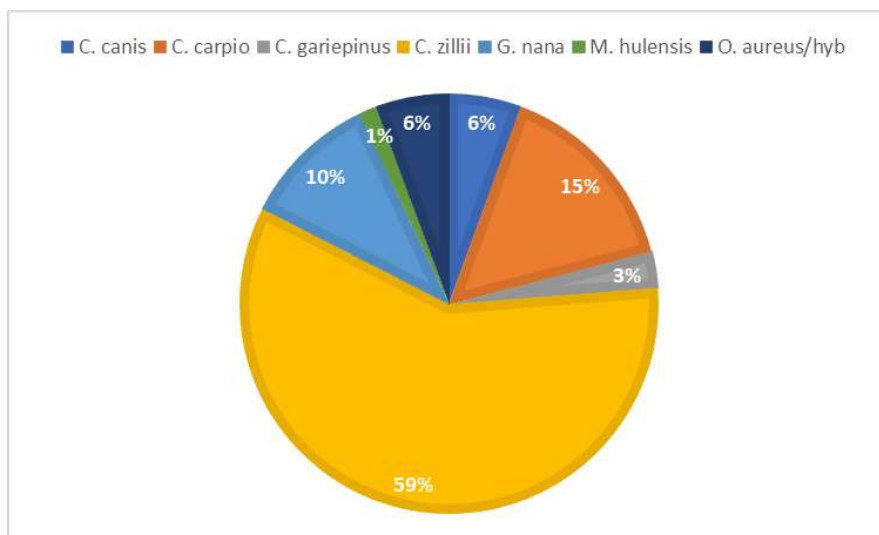
דגים:

במהלך הדיגום באלקטרושוקר ביוני 2021 נתפסו 966 פרטים מ-15 מינים (איור 137). כ-50% מכלל הפרטים היו מהמינים גמבזיה ואמנון מצוי (26% ו-25% בהתאמה). מין נפוץ נוסף היה יבלסת מצויה (18%). יתר הפרטים, שהיוו פחות משליש מסה"כ הפרטים, השתייכו ל-12 המינים הנותרים. התחנות בהן נתפסו הפרטים הרבים ביותר היו אלו שבדרום האגמון (מוצא אגמון ותעלת האפס), תחנת הגן הבוטאני ותעלה 101. בדרום האגמון מרבית הפרטים שנתפסו היו של גמבזיה. פרטים של יבלסת מצויה ואמנון מכלוא נתפסו בכמויות ניכרות במוצא האגמון ובתעלת האפס בהתאמה. בכניסת הירדן ובתעלות הצפוניות נתפסו פרטים ממינים שונים ועם מגוון גדול יחסית. בחוף הצפוני נתפסו 14 פרטים בלבד בדיגום עם מכשיר הדיגיטלי החשמלי וכולם היו דגים קטנים (הפרט הגדול ביותר היה קרפיון מצוי באורך 84 מ"מ).

בדיגום ברשתות נורדיות ביולי 2021 בחוף הצפוני נתפסו דגים בהרכב מינים שונה ובכמויות אחרות מאלו שנתפסו באלקטרושוקר. במהלך 13 שעות הפעילות של הרשתות נתפסו 143 פרטים משבעה מינים וממנעד רחב של גדלים (3-60 ס"מ). אמנון מצוי היה המין הדומיננטי בדיגום זה (59% מסה"כ הפרטים שנתפסו, איור 138). מינים נפוצים נוספים היו קרפיון מצוי ויבלסת מצויה.



איור 137: סיכום של מיני הדגים ומספר הפרטים שנתפסו בתחנות השונות בדיגום עם מכשיר הדיג החשמלי.



איור 138: התפלגות מיני הדגים שנתפסו ברשתות נורדיות ביולי 2021. באופן בולט, 59% מסה"כ הדגים שנתפסו היו של אמנון מצוי.

התעלות הצפוניות מהוות בית גידול ייחודי לדגים באזור האגמון. נמצאו בהן דגים ממינים המעדיפים מים זורמים כגון בינון הירדן ועגלסת הנחלים, שלא נתפסה באתרים האחרים. בינון הירדן הינו דג מוגן ונדיר בישראל. עוד נמצאו בתחנות אלה כמעט כל הפרטים של לבנונית הגליל. תעלות אלה עלולות להיות חשופות לתשטיפים מהשדות החקלאיים הסמוכים ולהתייבשות בשנות בצורת ובכך בית גידול ייחודי זה יכול להינזק. לאור כל זאת יש לשים דגש על שימור התעלות הצפוניות כבית גידול לדגים גם בעתיד. בית גידול ייחודי נוסף הוא אתר כניסת הירדן לגוף האגמון. אזור קטן זה שונה מאד בתנאיו מיתר גוף המים והדבר משתקף במיני הדגים אשר נדגמו שם.

מצד אחד מתקיימים בכניסת הירדן דגים אשר נמצאים גם בגוף האגמון כגון יבלסת מצויה, אמנון מצוי, שפמנון מצוי וביניית גדולת קשקש ומנגד נמצאו בו גם פרטים של בינון הירדן ולבנונית הגליל האופייניים לתעלות הצפוניות וכנראה מוצאים בו מקלט מתנאי האגמון הרחב אשר לא מתאימים להם. אתר זה מספק בית גידול חסר בגוף המים המרכזי של האגמון ויש לשמרו ובמידת הניתן להרחיבו. בתחנת הגן הבוטני נמצאה אוכלוסייה גדולה של נאוויית כחולה לצד אוכלוסייה של גמבחיה. שני מינים אלה מתחרים על אותה נישה אקולוגית ומקורות מזון והגמבחיה, הזרה באזורנו (הוכנסה לארץ בתקופת המנדט הבריטי כדי להילחם ביתושי המלריה) כבר דחקה את הנאוויית הכחולה מבתי גידול רבים בארץ. טמפרטורות חורף נמוכות מקנות יתרון לאוכלוסיית הנאוויית הכחולה. יש לעקוב מקרוב אחר הדינמיקה של שתי אוכלוסיות אלה.

הרשתות הנורדיות נמצאו ככלי יעיל לדיגום דגים במנעד רחב של גדלים. שני מינים (ביניית גדולת קשקש ולבנון ליסנר) שלא נתפסו בדיגום באלקטרושוקר כן נתפסו ברשתות. מצד שני, מיני דגים אחרים כמו הגמבחיה, נדגמו בקלות עם מכשיר הדייג החשמלי אך לא נתפסו כלל ברשתות הנורדיות. נראה אם כן ששתי שיטות הדיגום משלימות אחת את השנייה ליצירת תמונה טובה יותר של חברת הדגים באגמון. המסקנה המתבקשת היא להמשיך ואף להעמיק את השימוש ברשתות הנורדיות לצד המשך העבודה עם מכשיר הדייג החשמלי.

4.5 גישה אינטגרטיבית לקשר שבין הירדן לכנרת



חיבור הירדן לכנרת. צילום: איאד סואעד, 1.6.2022

במימון
רשות
המים

עמי נשרי, איתי גבריאלי (מכון גיאולוגי)

- באביב ובקיץ העומס הפנימי של הזרחה בכנרת שמקורו בזרחה מומס שמשחרר מהקרקעית קטן מאוד והפלורה האפילימנטית "מסתפקת" בעיקר בזרחה שמובא באמצעות שקיעת אבק.
- העומס הפנימי מופחת מאוד באותם חלקים של האגם שמצויים במגע קבוע או זמני עם חמצן מומס. אלה מהווים למעלה משני שלישי מקרקעית האגם.
- התרומה הפנימית היא מקסימלית רק באזור הפלגי אולם זו מתערבבת באפילמנטון רק בתחילת החורף, עם ההיפוך.

מטרת המחקר

מחקר זה עוסק בקשר שבין הירדן לכנרת באמצעות גישה אינטגרטיבית שנועדה לברר מהי ההשפעה של נוטריאנטים המוסעים באמצעות הירדן על הפלורה בכנרת אולם בירור זה מחייב גם התייחסות למקורות נוספים של נוטריאנטים מלבד הירדן. לדוגמא, התרומה האולית של הזרחה באבק ו/או תרומת המקורות

הפנימיים של נוטריאנטים לשכבה הפוטית. במסגרת הפרוייקט נחקרו מספר נושאים הקשורים לאספקת הפחמן, החנקן, הזרחן והסלניום מהירדן לכנרת. בקייץ עם דעיכת ספיקות המים בירדן שיווי המשקל שבין מקורות הנוטריאנטים משתנה ונוטה לכיוון קיום קשירת חנקן אטמוספרי ע"י אצות ספציפיות והשתלטות אצות שמסוגלות לצרוך לא רק פחמן דו-חמצני אלא גם פחמן בצורת יון הביקרבונט וכמוכן מיחזור פנימי של הנוטריאנטים.

רקע

הזרחן נחשב כנוטריאנט שמגביל התפתחות אצות בכנרת ובאגמים אחרים והעומס הפנימי (Internal loading) שלו מהווה אחד ממקורותיו אולם קשה להעריך עומס זה. בשכבה הפוטית צריכת זרחן מומס ע"י אצות היא המנגנון העיקרי של קשירתו לפאזה המוצקה ואילו פירוק החומר האורגני בהמשך מהווה מנגנון לשחרורו כמומס לעמודת המים. חלק מהחלקיקים האורגניים שוקעים לקרקעית ומהווים סוכני הסעה (agents of transport) ורטיקליים של זרחן מהשכבה הפוטית לכיוון השכבות הא-פוטיות שבעומק. מסתבר שגם לחלקיקים אנאורגניים תפקיד דומה.

וכך זרחן שנקשר למוצק בשכבות הפוטיות המחומצנות עשוי להשתחרר ממנו בשכבות העמוקות או בקרקעית שהם לעיתים קרובות מחחרות. במחקרים רבים נמצא ששחרור הזרחן למים תלוי במשטר החימצון-חיזור ששורר בקרקעית ובאופן כללי קרקעית מחחרת מאפשרת שחרור זרחן למים שמעל ואילו קרקעית מחומצנת מונעת שחרור זה והוא נשאר קשור לפאזה המוצקת. האופן שבו הזרחן נשאר קשור לפאזה המוצקת עדיין לא לגמרי ברור ולאחרונה מבוצעים מאמצים לברר מנגנונים אלה. ההשקפה הקנונית ששולטת עשרות שנים בספרות, היא שתחמוצות ברזל מהוות סוכני הסעה מטה של הזרחן וזאת מכיון שהן בעלות כושר ספיחה גבוה ליון הזרחה ומכיון שבהרבה אגמים התחמוצות האלה שכיחות. מעבר לזה שיקוע של תחמוצות לסביבות מחחרות מאפשר את המסתן או חיזורן ותוך כך את שיחרורן כזרחן מומס לעמודת המים הסמוכה. בשכבות העמוקות הסביבה הכימית המחחרת (רדוקס נמוך) מתאפשרת כתוצאה מעצם הפירוק של החומר האורגני במדיום שפיזיקלית הוא מבודד יחסית, ולכן מתאפשרת התדלדלות בחמצן מומס. כך במקרה של תחמוצות הברזל התרחשות חימצון בשכבות העליונות וחיזורן בשכבות התחתונות הוא לגמרי מקובל וסביר ולכן שנים רבות היה מקובל להתייחס למנגנונים אלה כמודל הקלאסי של אספקת זרחן ממקור פנימי. אולם מודל זה לא התאים למקרים שבהם המים שמעל לסדימנט היו מחומצנים ועקב כך (מכיון שהתחמוצות לא הומסו) נמנע שם שחרור הזרחן המומס למים. לעיתים קרובות חלק ניכר מהזרחן החלקיקי השוקע הוא אורגני וגם במקרים אלה התברר שכאשר הקרקעית מחומצנת הזרחן לא משתחרר למים שמעל. ללא ספק גם בתנאים אלו החומר האורגני מתפרק אולם למרות זאת שחרור הזרחן המומס מהקרקעית מוגבל מאוד. בכנרת למשל ריכחי תחמוצות הברזל האפילימנטיים הם מינוריים זה מקטין את הפוטנציאל עבור חלקיקים של תחמוצות ברזל להשתתף בהסעת הזרחן בין השכבות. מעבר לזה רמות ה-pH שמצויות בשכבה הפוטית עשויות להיות גבוהות מדי ובכך להפריע לקשירת הזרחן לתחמוצות המועטות שמצויות שם (יון ההידרוקסיד מתחרה בזרחה על אתרי הספיחה לתחמוצות הברזל). בעשורים האחרונים התברר שגם פאזות מוצקות אחרות כגון חרסיות סופחות זרחה (אם כי במידה פחותה) ומסייעות בהסעה של הזרחן לקרקעית וזאת למרות ששטח הפנים היחסי שלהם שפנוי לספיחה, קטן יותר מזה של תחמוצות ברזל. אולם, בגלל השכיחות היחסית הגבוהה שלהם במי הכנרת חייבים להתייחס אליהם כמנגנון פוטנציאלי. כמו כן, באגמים אלקליים, כמו הכנרת, תתכן גם האפשרות של קופרסיפיטציה של זרחן עם קלציט והמסה שלהם בשכבות העמוקות אף הם עשויים להיות מנגנון הסעה מטה של זרחן.

מהקרקעית האפילמנטית של הכנרת קיים כנראה שחרור מועט של זרחן תודות לכך שהאפילמניון והקרקעית של שכבה זו (האזור הליטורלי) רוב הזמן מחומצנים אולם הקרקעית הסב-ליטורלית שמצויה בין בערך 15 מטר עומק ל-30 מטר (איור 138 טבעת כחולה), והיא אזור הקרקעית הגדול ביותר, חשופה למשטר חימצון-חיזור מעורב ומשתנה תדיר ולגמרי לא ברור באיזו מידה משתחרר שם זרחן מהקרקעית. מאידך, בחלק העמוק ביותר של האגם (איור 138 עגול פנימי) שורר בקייץ-סתיו משטר חימצון רדוקטיבי יציב ובמי שכבה זו אכן מצטבר זרחן מומס.



איור 138: מפה בתימטרית של הכנרת עם האזור דמוי הטבעת (כחול כהה) שמצוי בבסיס ההיפולימניון באוקטובר: משתרע בין 20 ל-30 מ' עומק. בחודשים מאי-יוני הטבעת הזו משתרעת בין 15 ל-30 מ' ושטחה כחצי מקרקעית האגם.

שיטות

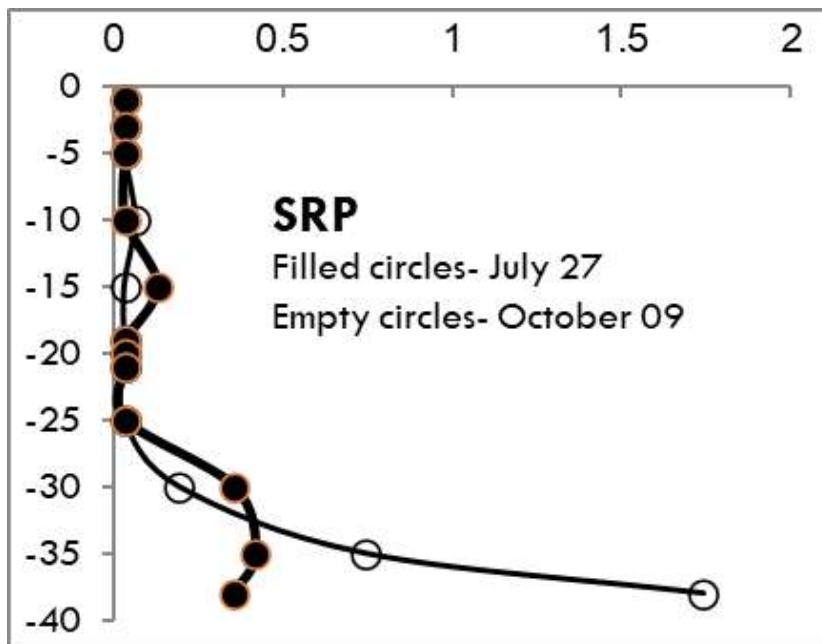
המיחזור הפנימי של הזרחן באגם נחקר באמצעות עיבוד נתוני הניטור הכימי השגרתי של הכנרת וכמו כן בוצעו מספר פרויקטים ייעודיים לברור בעיות ספציפיות תוך שימוש באיזוטופים של חמצן בפוספט, שימוש בחומר שנאסף באמצעות מלכודות סדימנטים וצביעה ב-DAPI של חיידקים. פענוח פרק זה מאפשר גם התייחסות כוללת ל"זכרון ארוך הטווח" של הזרחן בכנרת.

תוצאות ודיון

סינתזה של הנתונים הביאה למסקנה שבקייץ עומס הזרחן הפנימי שמקורו בקרקעית של אותם חלקים של האגם שמצויים במגע כלשהו עם מים אפילמנטיים מכילי חמצן הוא קטן ובעונה זו הפלורה "נאלצת" להסתפק בעיקר במקורות זרחן אלוכטוניים, דהיינו בעיקר זרחן שמובא באמצעות אבק ומעט זרחן מהירדן. מיחזור הזרחן בעמודת המים האפילמנטית מוגבל מאחר וחלק ממנו "נלקח" מעמדה זו באמצעות שיקוע של חלקיקים אורגניים ואנאורגניים. ספיחה ע"י חלקיקים אלוכטוניים אנאורגניים כגון חרסיות או באמצעות קופרסיפיטציה עם קלציט אוטוכטונית ו/או שיקוע כאפטיט, הם המנגנונים ה-אנ-אורגניים. ממגוון של סיבות שנוגעות למשטר החימצון ששורר בקרקעית חזרת הזרחן מהקרקעית האפילמנטית וגם ההיפולימנטית לעמודת המים מוגבלת מאוד ורק החלק העמוק ביותר של עמודת המים, הקרוי Benthic Boundary Layer

מאפשר לחזרת הזרחן (המומס) מהקרקעית למים מאחר והוא מצוי בסביבת רדוקס שלילית במשך כל תקופת השכוב. רק בתחילת החורף עם תחילת תהליך ההיפוך "נזרק" לשכבה הפוטית זרחן מומס שהוכל קודם לכן בשכבת קרקעית עמוקה זו.

לפיזיקה של האגם ולקיום הסייש הפנימי תפקיד מרכזי בהגדרת פוטנציאל החימצון חיזור של שכבת פני הקרקעית ה- (Sediment-Water Interface (SWI). תנועות הסייש הפנימי גורמות לכך שהתרמוקלינה העונתית, שהיא מישור המגע בין ההאפילמניון להיפולמניון, נעה משולי האגם למרכזו במחזור יומי ותוך כך פני השטח המוגדר כסב-ליטורל (טבעת פנימית כחולה כהה באורך 138) נחשפים למשך כשעתיים-שלוש ביממה למים אפילמנטיים מחומצנים וחמים. באוקטובר השטח הסוב-ליטורלי הזה שמוגדר ע"י טבעת זו שמהווה כשליש משטח קרקעית האגם ואילו בחלק הראשון של עונת השיכוב, בחודש מאי, שטח זה אפילו גדול יותר ומהווה כחצי משטח קרקעית האגם. זהו השטח שלגביו חקרנו מהי התרומה הפנימית שלו. בעקרון המחקר בוצע בהנחה שאנחנו יודעים באיזו מידה השכבה ההיפולימנטית שמעל לקרקעית היא מבודדת פיזיקלית מהשכבות השכנות ולכן קצבי ההצטברות של יון הזרחה והפרופילים שלו בעמדות המים מהווים אינדיקציה לשחרורו מהקרקעית ולתנועות הדומיננטיות של המים בשכבות אלו. כך למשל ניתן להבחין שבתקופת השיכוב ריכז הזרחן המומס בשכבה ההיפולימנטית (בין 19 ל-29 מטר) נמוך מאוד (איור 139) ואילו בשכבה התחתונה ביותר (ה-BBL) אכן מצטבר זרחן מומס מכיוון שכבה זו מחזרת לאורך כל תקופת השיכוב ומבחינה זו איננה מושפעת מתנועות הסייש הפנימי.



איור 139: פרופילים טיפוסיים של של זרחן מומס בעמדות המים בכנרת ביולי ובאוקטובר.

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



צילום: Julie Dermansky מתוך: Corbis/ Getty

במימון
משרד
האנרגיה

אלה להב, גדעון גל, איל אופיר, פלג אסטרן

- מודלים אקולוגיים של ים תיכון הורחבו לכלול עקומות תגובה של מינים ימיים לרמות שונות של מזהמים שמקורם מאירוע שפך של דלקים פוסילים.
- המידע שנאסף מסקר ספרות תורגם לעקומות רגישות אשר קודדו למודלים המעודכנים.
- נבנו מפות זיהום המתאימות לתרחישים השונים שאנו מריצים.

רקע

בשנים האחרונות נעשה מעט מאוד מחקר על ההשלכות האקולוגיות האפשריות של אירועי זיהום על ידי 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 פיתחנו ויישמנו 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). אנו מרחיבים מודל מרחבי קיים (Ofir et al. בהכנה) 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.

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 הרחב 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 הנגרמות על ידי אירועי זיהום באמצעות מודלים אקולוגיים.

שיטות

המודל המשמש אותנו במחקר זה 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 רובם של הקבוצות קבענו עקומת תגובה ורגישות אשר נקבעו על בסיס התגובות הביולוגיות של המינים השונים למזהמים השונים. עקומות אלו התבססו על סקירת ספרות מקיפה של מחקרים בספרות הבינלאומית אשר כללה התייחסות למספר נושאים:

1. עקומת התגובה של מינים ימיים לחומרים מזהמים שמקורם בדלקים פוסילים, אשר נאספו מאזורים בהם היו אירועי זיהום (אלסקה ומפרץ מקסיקו), במטרה להתאים את עקומות התגובה למינים דומים המצויים בים התיכון.
2. מודלים זהים 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, ההפקה והשינוע של דלקים פוסילים זהים לחומרים הכימיים שאנו מצפים למצוא בתרחישי הזיהום, כגון חומרים ארומטיים (PAHs, MAHs).

°לאחר שלב זה, הגדרנו את עקומות התגובה של הקבוצות הפונקציונליות למזהמים השונים והעקומות הוצבו במודל האקוספייס.

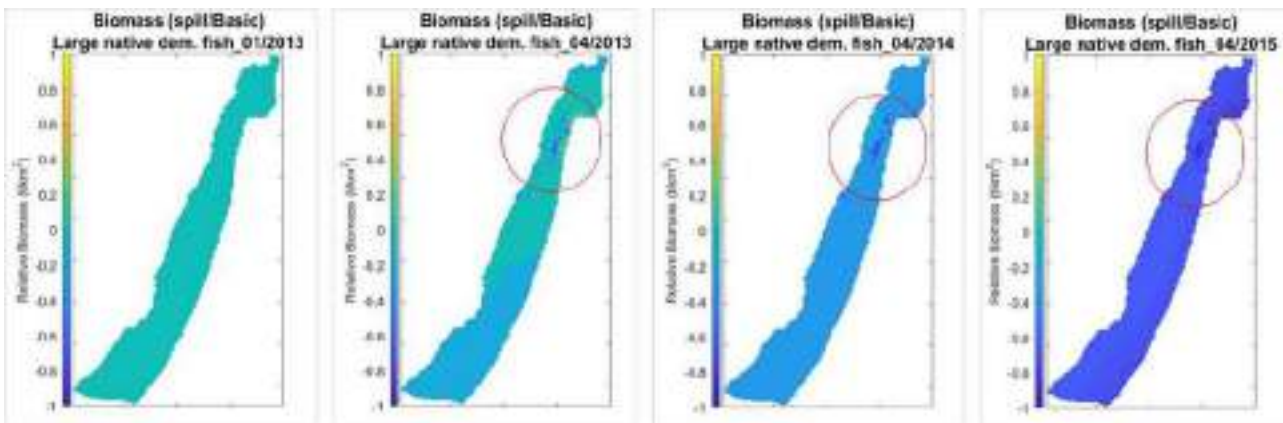
בנוסף, הגדרנו את ריכזי הרעילות המינימליים של המזהמים השונים למינים ובתי גידול שונים, על ידי הצבת הריכזים המינימליים של המזהמים אשר נמצאו שגורמים לתגובות ביולוגיות (בעיקר תמותה) במינים השונים. ההגדרות נעשו בהתאם למידע על מדדי הרעילות שנאספו ובהתאם לריכזים שאנו מצפים למדוד בתרחישים שנבחנו. השלב הבא במחקר יכלול בחינת תרחישים. התרחישים אשר ייבדקו בעזרת המודל יהיו תרחישים כלליים ולא ספציפיים מכיוון שמספר אפשרויות הזיהום (מיקום, מועד, נפח ומשך) הם כמעט אינסופיים. בעזרת התרחישים נבחן את תגובת המערכת האקולוגית למספר רמות של חומרת התרחיש (טבלה 21). חומרת התרחיש נקבעת על פי נפח החומר המזהם, משך הזיהום ושטח הזיהום. את מגוון עוצמות הזיהום נבחן בשלושה אזורים שונים לאורך המים הטריטוריאליים- בצפון, במרכז ובדרום על מנת לבחון רגישות של האזורים השונים לאירועי זיהום. בנוסף, נכלול בתרחישים רמות זיהום שונות בעמדת המים לעומת הסדימנט וכן נבדיל במשך הזיהום בין המים לסדימנט מכיוון שהזיהום בסדימנטים נשאר לאורך זמן ארוך בהרבה מאשר הזיהום בפני המים או בעמדת המים.

טבלה 21: רשימת התרחישים אשר ייבחנו במסגרת הפרויקט. מגוון התרחישים כוללים טווח רחב של דרגות חומרה וכן אירועים אקוטיים וכרוניים.

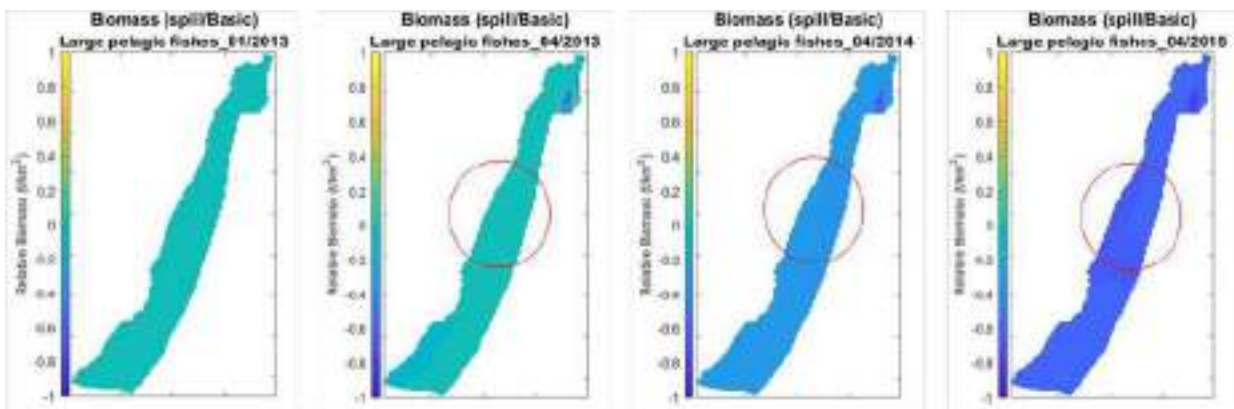
תרחיש	שטח (ק"מ)	שטח זיהום היקפי (ק"מ)	משך- פני המים (חודשים)	משך- סדימנט (שנים)	נפח- פני המים (חביות)	נפח- סדימנט (חביות)	נפח בהיקף- פני המים; בסדימנט (חביות)
קל-שטח מוגבל	10X14	2	3	7	500	500	50
קל-צפון	10X14	2	3	7	500	500	50
קל-דרום	10X14	2	3	7	500	500	50
קל-שטח גדול	50x50	10	3	7	500	500	50
קל-צפון	50x50	10	3	7	500	500	50
קל-דרום	50x50	10	3	7	500	500	50
גדול-שטח מוגבל	10X14	2	3	7	5000	5000	500
גדול-צפון	10X14	2	3	7	5000	5000	500
גדול-דרום	10X14	2	3	7	5000	5000	500
גדול-שטח גדול	50x50	10	3	7	5000	5000	500
גדול-צפון	50x50	10	3	7	5000	5000	500
גדול-דרום	50x50	10	3	7	5000	5000	500
קיצוני-שטח מוגבל	10X14	2	3	7	100,000	100,000	10,000
קיצוני-צפון	10X14	2	3	7	100,000	100,000	10,000
קיצוני-דרום	10X14	2	3	7	100,000	100,000	10,000
קיצוני-שטח גדול	50x50	10	3	7	100,000	100,000	10,000
קיצוני-צפון	50x50	10	3	7	100,000	100,000	10,000
קיצוני-דרום	50x50	10	3	7	100,000	100,000	10,000
DWH-אקוטי	50x50	10	3	7	1,000,000	1,000,000	110,000
DWH-צפון	50x50	10	3	7	1,000,000	1,000,000	110,000
DWH-דרום	50x50	10	3	7	1,000,000	1,000,000	110,000
כרוני	5x3	1	10 שנים	10	100	100	10
כרוני-צפון	5x3	1	10 שנים	10	100	100	10
כרוני-דרום	5x3	1	10 שנים	10	100	100	10

תוצאות ודיון

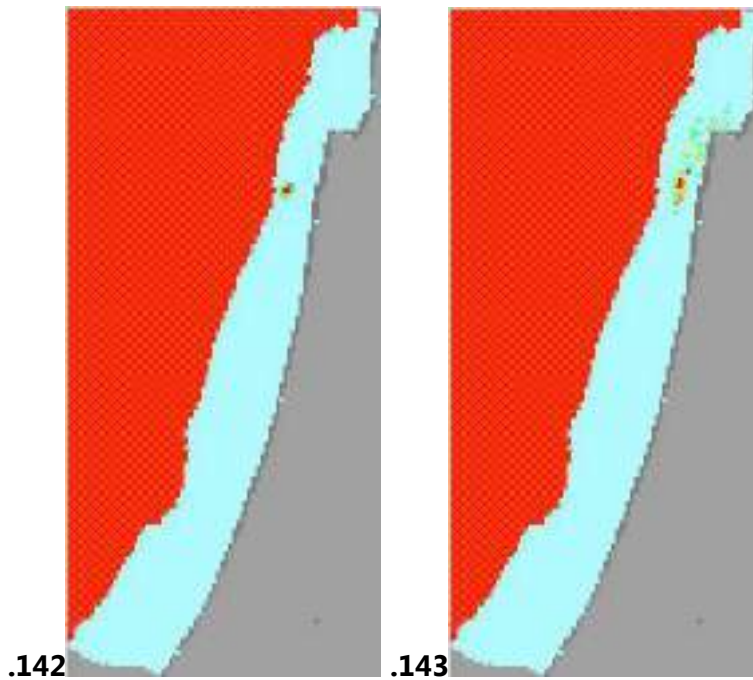
בשלב ראשון של הרצת התרחישים בחנו מספר תרחישי ניסיון על מנת לוודא את רגישות המודל (עקומות התגובה) לעוצמות זיהומים שונים. בתוצאות מבחן הרגישות (איורים 141,140) ניתן לראות את השינוי בביומסה של קבוצת דגים בנתונית ופלגית בעקבות תרחיש הזיהום המוגבר שהורץ לצורך מבחן הרגישות של עקומות התגובה ומפות הזיהום. ניתן לראות ירידה בביומסה של קבוצת הדגים הבנתונית באזור הזיהום, מתחילת שפיכת הזיהום באפריל 2013 ולאורך השנים. לעומת זאת, קבוצת הדגים הפלגית מראה ירידה קלה יותר בביומסה. במקביל, אנו ממשיכים בבניית המידע הנדרש להרצת התרחישים המעודכנים, ניתן לראות באיורים 142, 143 את מפות הזיהום שהוצבו במודל לצורך הרצת התרחיש הראשון בו יש זיהום המתחיל מאסדת לווייתן, בנפח של 500 חביות נפט, בשטח של 10X14 ק"מ, בפני המים ובקרקעית.



איור 140: מפות של האזור הנבדק בינואר 2013 (לפני תחילת הזיהום), אפריל 2013 (תחילת הזיהום), 2014, 2015 המראות את השינוי בביומסה של קבוצת הדגים הבנתונית Large Native Demersal Fish, כיחס בין הביומסה בתרחיש עם זיהום של 500 חביות שהוחל למשך 3 חודשים על פני המים ושנה בקרקעית, לבין הביומסה בתרחיש ללא זיהום, לצורך בדיקת רגישות של המודל. ניתן לראות את השטח שבו עובר כתם הזיהום בעיגול האדום.



איור 141: מפות של האזור הנבדק בינואר 2013 (לפני תחילת הזיהום), אפריל 2013 (תחילת הזיהום), 2014, 2015 המראות את השינוי בביומסה של קבוצת הדגים הפלגית Large Pelagic Fish, כיחס בין הביומסה בתרחיש עם זיהום של 500 חביות שהוחל למשך 3 חודשים על פני המים ושנה בקרקעית, לבין הביומסה בתרחיש ללא זיהום, לצורך בדיקת רגישות של המודל.



איורים 142,143: מפות הזיהום שהוצבו במודל של התרחיש הראשון בו יש כתם זיהום המתחיל מאסדת לווייתן, בנפח של 500 חביות נפט, בשטח של 10X14 ק"מ, בפני המים ובקרקעית, בהתאמה.

מקורות

- 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

5 נספחים

5.1 סטודנטים לתארים מתקדמים בהנחיית חוקרי המעבדה לחקר הכנרת 2021

שם	תואר	אוניברסיטה	נושא	מנחה בחיא"ל	מנחה באוני' באונ'
1	פוסט-דוקטורט	חיא"ל Indian Institute of Technology, Madras.	מערכת ICT לניטור תגובת עמידות אקולוגית במערכות מים מתוקים. מוגש למשרד המדע והטכנולוגיה	א' אוסטרובסקי	
2	פוסט-דוקטורט	Tokyo University of Marine Science and Technology, Japan.	שימוש בציוד אקוסטי מתקדם לזיהוי דגים והערכת ביומסה	א' אוסטרובסקי	
3	דוקטורט	מכון הידרוביולוגי – ויוהאן סין	מחקר אקוסטי של מיקרוציסטיס באגם דאנצ'י	א' אוסטרובסקי	L. Song
4	פוסט-דוקטורט	חיא"ל	הדינמיקה של תהליכי חימצון/חיזור בכמוקלינה של אגם הכנרת – ניתוח כימי-גנטי	ו' אקרט	
5	דוקטורט	אוני' בן-גוריון	מנגנוני חיזור בחל באזור מתאנוגנזה בסדימנטים	ו' אקרט	א' סיון
6	דוקטורט	האוניברסיטה העברית	מודלים הידרולוגיים של אגן הכנרת	י' בארי – שליון ג' גל	ח' גבירצמן
7	מוסמך	תל-חי	חיזוי שינויים במערכת האקולוגית של הכנרת	ג' גל	איגי ליטאור
8	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	מוסמך	אוני' חיפה	Modeling Potential Impacts of Gas Exploitation on the Israeli Marine Ecosystem	ג' גל	ר' בוקמן
10	דוקטורט	אוני' חיפה	A data-driven approach for ecological monitoring of Lake Kinneret	ג' גל	י' להן

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

5.2 פרסומי המעבדה בספרות הבינלאומית המבוקרת ב-2021/22

Amitai, Y., Y. Ashkenazy, 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.

Astrahan, P., L. Korzen, M. Khanin, Y. Sharoni, and Á. 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.

Barinova, S., and **A. Alster**. **2021**. Algae and Cyanobacteria Diversity and Bioindication of Long-Term Changes in the Hula Nature Reserve, Israel. *Diversity* 13:583.

Be'eri-Shlevin, Y., M. Bueno, E. Tessier, A. Romero-Rama, **A. Sukenik, T. Zohary**, and D. Amouroux. **2021**. Biogeochemistry of selenium compounds in the water column of warm monomictic Lake Kinneret. *Biogeochemistry*.157:291-311.

Chang, C., Miki, T., Ye, H., Souissi, S., Adrian, R., Anneville, O., Ban, S., **Be'eri-Shlevin, Y.**, Chiang, Y., Feuchtmayr, H., **Gal, G.**, Ichise, S., Kagami, M., Kumagai, M., Liu, X., Matsuzaki, S., Manca, M.M., Nöges, P., Piscia, R., Rogora, M., Shiah, F., Thackeray, S.T., Agasild, H., Widdicombe, C.E., Wu, J., **Zohary, T.**, Hsieh, C. **2022**. Causal networks of phytoplankton diversity and biomass are modulated by environmental context. *Nature Communications*, 13:1140

Chu, D., **I. Ostrovsky**, and **H. Homma**. **2021**. Acoustic scattering by gas-bearing cyanobacterium *Microcystis*: Modeling and in situ biomass assessment. *Science of the Total Environment* 794, 148573. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148573>

Dev, P. J., A. Sukenik, D. R. Mishra, and **I. Ostrovsky**. **2021**. Cyanobacterial pigment concentrations in inland waters: Novel semi-analytical algorithms for multi-and hyperspectral remote sensing data. *Science of the Total Environment* 805:150423.

- Doubek, J. P., O. Anneville, G. Dur, A. M. Lewandowska, V. P. Patil, J. A. Rusak, N. Salmaso, C. T. Seltmann, D. Straile, P. Venail, R. Adrian, M.B. Alfonso, C.L. DeGasperi, E. De Eyto, H. Feuchtmayr, E. E. Gaiser, S.F. Girdner, J.L. Graham ,H.P. Grossart , J. Hejzlar, S. Jacquet, G. Kirillin, M.E. Llamas, S-I S. Matsuzaki , E.R. Nodine, M. C. Piccolo, D.C. Pierson, A. Rimmer, L.G. Rudstam, S. Sadro , H.M. Swain, S.J. Thackeray, W. Thiery, P. Verburg, **T. Zohary**, J.D. Stockwell and P. Urrutia-Cordero. **2021**. The extent and variability of storm-induced temperature changes in lakes measured with long-term and high-frequency data. *Limnology and Oceanography* 66: 1979-1992
- Elul, M., Rubin-Blum, M., Ronen, Z., Bar-Or, I., **Eckert, W.**, Sivan, O. **2021**. Metagenomic insights into the metabolism of microbial communities that mediate iron and methane cycling in Lake Kinneret iron-rich methanic sediments. *Biogeosciences*, 18, 2091–2106. <https://doi.org/10.5194/bg-18-2091-2021>.
- Genitsaris, S., N. Stefanidou, **Y. Beeri-Shlevin**, **Y. Viner-Mozzini**, M. Moustaka-Gouni, **S. Ninio**, **and A. Sukenik**. **2021**. Air-dispersed aquatic microorganisms show establishment and growth preferences in different freshwater colonisation habitats. *FEMS microbiology ecology* 97:fiab122.
- Golub, M., Thiery, W., Marcé, R., Pierson, D., Vanderkelen, I., Mercado-Bettin, D., Woolway, R.I., Grant, L., Jennings, E., Kraemer, B.M., Schewe, J., Zhao, F., Frieler, K., Mengel, M., Bogomolov, Y., Bouffard, D., Côté, M., Couture, R., Debolskiy, A.V., Droppers, B., **Gal, G.**, Guo, M., Janssen, A.B.G., Kirillin, G., Ladwig, R., Magee, M., Moore, T., Perroud, M., Piccolroaz, S., Vinnaa, L.R., Schmid, M., Shatwell, T., Stepanenko, V.M., Tan, Z., Woodward, B., Yao, H., Adrian, R., Allan, M., Anneville, O., Arvola, L., Atkins, K., Boegman, L., Carey, C., Christianson, K., de Eyto, E., DeGasperi, C., Grechushnikova, M., Hejzlar, J., Joehnk, K., Jones, I.D., Laas, A., Mackay, E.B., Mammarella, I., Markensten, H., McBride, C., Özkundakci, D., Potes, M., Rinke, K., Robertson, D., Rusak, J., Salgado, R., van der Linden, L., Verburg, P., Wain, D., Ward, N.K., Wollrab, S., Zdrovennova, G. **2022**. A framework for ensemble modelling of climate change impacts on lakes worldwide: the ISIMIP Lake Sector. *Geoscientific Model Development Discussions*, 1-57. <https://doi.org/10.5194/gmd-2021-433>
- Grossowicz, M., S. Varulker, N. Koren, and G. Gal. 2021**. Desalination plants do not impact the diversity or abundance of zooplankton of the Israeli coast. *Desalination* 511: 115097

- 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: 11. <https://doi.org/10.1051/alr/2021011>
- Huang, Y., X. Chen, S. Liu, J. Lu, Y. Shen, L. Li, L. Peng, J. Hong, Q. Zhang, and **I. Ostrovsky. 2021.** Converting of nuisance cyanobacterial biomass to feedstock for bioethanol production by regulation of intracellular carbon flow: Killing two birds with one stone. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 149:111364. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111364>
- Keliri, E., C. Paraskeva, A. Sofokleous, **A. Sukenik**, D. Dziga, E. Chernova, L. Brient, and M. G. Antoniou. **2021.** Occurrence of a single-species cyanobacterial bloom in a lake in Cyprus: monitoring and treatment with hydrogen peroxide-releasing granules. *Environmental Sciences Europe* 33:31.
- Kishcha, P., B. Starobinets, **Y. Lechinsky**, and P. Alpert. **2021.** Absence of Surface Water Temperature Trends in Lake Kinneret despite Present Atmospheric Warming: Comparisons with Dead Sea Trends. *Remote Sensing*. 2021; 13(17):3461. <https://doi.org/10.3390/rs13173461>
- Marin, C., O. K. Kumova, and **S. Ninio. 2022.** Characterization of a Novel Regulator of Biofilm Formation in the Pathogen *Legionella pneumophila*. *Biomolecules* 12:225.
- Marmen, S., E. Fadeev, A. Al Ashhab, A. Benet-Perelberg, A. Naor, H. J. Patil, E. Cytryn, **Y. Viner-Mozzini, A. Sukenik**, M. Lalar, and D. Sher. **2021.** Seasonal Dynamics Are the Major Driver of Microbial Diversity and Composition in Intensive Freshwater Aquaculture. *Front Microbiol* 12:679743.
- Naselli-Flores, L., **T. Zohary**, and J. Padisák. **2021.** Life in suspension and its impact on phytoplankton morphology: an homage to Colin S. Reynolds. *Hydrobiologia* 848:7-30.
- Ninio, S, Lupu, A, Eckert, W, Ostrovsky, I, Viner Mozzini, Y, Sukenik, A. 2021** Metalimnetic chlorophyll maxima in Lake Kinneret - Chlorobium revisited. *Freshwater Biology*,; 66: 468–480. <https://doi.org/10.1111/fwb.13653>

- Parparov, A. and G. Gal. In press.** The effects of changes in diversity on phytoplankton community metabolism. *Inland Waters*.
- Parra, G., F. Guerrero, J. Armengol, L. Brendonck, S. Brucet, C. M. Finlayson, L. Gomes-Barbosa, P. Grillas, E. Jeppesen, F. Ortega, R. Vega, and **T. Zohary. 2021.** The future of temporary wetlands in drylands under global change. *Inland Waters* . 11: 445-456
- Recknagel F, Park H-D, **Sukenik A, Zohary T. 2022.** Dissolved organic nitrogen, dinoflagelates and cyanobacteria in two eutrophic lakes: Analysis by inferential modelling. *Harmful Algae* 114: 102229. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2022.102229>
- Rivers, N., Truter, H.J., Strand, H.J., Jay, S., Portman, M., Lombard, A.T., Amir, D., Boyd, A., Brown, Cawthra, H.C., Faure Beaulieu, N., Findlay, K., **Gal, G.**, Grossmark, Y., Perschke, M.J., Pillay, T., Pyrgies, O., Ramakulukusha, M., Smit, K.P., Stockdale, V., Stockill, J., Schwartz, I., Treibitz, T., Vargas-Fonseca, O.A., and E. A. Vermeulen (Miltz). **2022.** Shared visions for marine spatial: Insights from Israel, South Africa, and the United Kingdom. *Ocean and Coastal Management*, 220:106069.
- Seifert-Dähnn, I., I. S. Furuseth, G. K. Vondolia, **G. Gal**, E. de Eyto, E. Jennings, 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
- Shai, Y., M. Rubin-Blum, D. L. Angel, G. Sisma-Ventura, D. Zurel, **P. Astrahan**, and E. Rahav. **2021.** 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.
- Sukenik, A.,** and A. Kaplan. **2021.** Cyanobacterial Harmful Algal Blooms in Aquatic Ecosystems: A Comprehensive Outlook on Current and Emerging Mitigation and Control Approaches. *Microorganisms* 9: 1472.
- Sukenik, A., Y. Viner-Mozzini,** D. Mizrahi, I. Tamam, A. R. Benitez, and S. Nir. **2021.** Removal of Cyanotoxins–Microcystins from Water by Filtration through Granulated Composites of Bentonite with Micelles of the Cation Octadecyltrimethyl Ammonium (ODTMA). *Applied Nano* 2:67-81.

- Uzhansky, E., B. Katsnelson, A. Lunkov, and **I. Ostrovsky. 2021.** Sound field variability in the presence of an Internal Kelvin Wave in the Sea of Galilee. In Proceedings of Meetings on Acoustics 36: 005001.
- Vigderovich, H.S., **W. Eckert**, M. Elul, M. Rubin-Blum, M. Elvert, and O. Sivan. **2022.** Modification of methane oxidation pathways during long-term incubations of methanogenic lake sediments. *Biogeosciences*, 19: 2313–2331.
- Wu, X., **Y. Viner-Mozzini**, **Y. Jia**, L. Song, and **A. Sukenik. 2021.** Alkyltrimethylammonium (ATMA) surfactants as cyanocides-effects on photosynthesis and growth of cyanobacteria. *Chemosphere* 274:129778.
- Zemah-Shamir, Z., Zemah-Shamir, S., Scheinin, A., Tchernov, D., Lazebnik, T., and **G. Gal. 2022.** A systematic review of the behavioural changes and physiological adjustments of elasmobranchs and teleost's to ocean acidification with a focus on sharks. *Fishes*, 7:56.
- Zhang, X., Xia, Y., Jia, Y., **Sukenik, A.**, Kaplan, A., Song, C., Dai, G., Bai, F., Li, L. and Song, L., **2021.** Can Alkyl Quaternary Ammonium Cations Substitute H₂O₂ in Controlling Cyanobacterial Blooms—Laboratory and Mesocosm Studies. *Microorganisms*, 9: 2258.
- Zohary, T.**, G. Flaim, and U. Sommer. **2021.** Temperature and the size of freshwater phytoplankton. *Hydrobiologia* 848:143-155

5.3 דו"חות המעבדה 2021

שם הדו"ח/המעבדה לחקר הכנרת ע"ש יגאל אלון	דו"ח חיא"ל מס'
זהרי, ת'. 2021. יערות אשלים-בית גידול חדש בכנרת. דו"ח חצי שנתי, מוגש לרשות המים.	T1/2021
אסטרך, פ'. 2021. חומרים נדיפים (VOCs) חתימה כימית מרחבית יעילה לעליית אוכלוסיות ציאנובקטריה ופיטופלנקטון ספציפיות באגם הכנרת, מצב פיזיולוגי והרכב המינים. דו"ח חצי שנתי, שנה שניה. מוגש לרשות המים.	T2/2021
סוקניק, א', לנג-יונה, נ', אקרט, ו', טיבור, ג', נשרי, ע', גל, ג'. 2021.. הרחבת ניטור הכנרת לשנים. 2019-2020 דו"ח שנתי, מוגש לרשות המים.	T3/2021
אופיר, א'. 2021. השפעת הצומח החופי על האקולוגיה והפיתוח התיירותי של הכנרת. דו"ח מסכם, מוגש לקרן לשטחים פתוחים.	T4/2021
ניניו, ש', בארי-שליון, י', סוקניק, א'. 2021. השפעת המליחות בכנרת על התבססות מיקרואורגניזמים שמקורם באבק אטמוספרי השוקע באגם. שנה ב', דו"ח חצי שנתי, מוגש לרשות המים.	T5/2021
ניניו, ש', בארי-שליון, י', סוקניק, א'. 2021. השפעת המליחות בכנרת על התבססות מיקרואורגניזמים שמקורם באבק אטמוספרי השוקע באגם. שנה ב', דו"ח שנתי, מוגש לרשות המים.	T6/2021
אסטרך, פ'. 2021. בדיקות דגים בעקבות אירוע זיהום הים - חודשים פברואר מרץ 2021. מוגש למשרד החקלאות, אגף הדייג ולמשרד הבריאות.	T7/2021
צוות המעבדה לחקר הכנרת. 2021. דו"ח שנתי ניטור ומחקרי כנרת לשנת 2020 מוגש לרשות המים.	T8/2021
בארי-שליון, י'. 2021. ניטור מתכות כבדות. דו"ח שנתי 2020. מוגש לרשות המים.	T9/2021
בארי-שליון, י'. 2021. ניטור מתכות כבדות. דו"ח חצי שנתי 2021. מוגש לרשות המים.	T10/2021
זהרי, ת'. 2021. "פרויקט יערות אשלים מוצפים - בית גידול חדש בכנרת". דוח חצי שנתי, מוגש לרשות המים.	T11/2021
ניניו, ש', סוקניק, א'. 2021. פיתוח אינדיקטורים מיקרוביאליים להערכת איכות מים ומצב טרופי של מערכות מים טבעיות - הכנרת כמודל. דו"ח סופי, מוגש לרשות המים.	T12/2021
Ninio, S. 2021. Molecular ecology of the bacterial pathogen <i>Legionella</i> in Lake Kinneret. Final report submitted to the Israel Science Foundation.	T13/2021
אסטרך, פ'. 2021. ניטור נגזרות בנזן BTEX באגם הכנרת כסממנים להמצאות נגזרות דלקים באגם. מוגש לרשות המים.	T14/2021
אמיתי, י'. 2021. פיתוח, כיוול ויישום מודל ביוגיאוכימי תלת מימדי לכנרת. מוגש לרשות המים.	T15/2021

שם הדו"ח/המעבדה לחקר הכנרת ע"ש יגאל אלון	דו"ח חיא"ל מס'
קמינגס, ד'. 2021. ניטור דגים באגמון החולה ע"י רשתות נורדיות באגמון החולה.	T16/2021
ניניו, ש', בארי-שליון, י', סוקניק, א'. 2021. השפעת המליחות בכנרת על התבססות מיקרואורגניזמים שמקורם באבק אטמוספרי השוקע באגם. דו"ח חצי שנתי, שנה ג'.	T17/2021
Belmaker, J., Gavriel, T., Homma, H. , Katsnelson, B., Ostfeld, A., Ostrovsky, I. 2021. Using a novel acoustic broadband echo sounder for fish identification and biomass assessment to optimize fisheries management in Lake Kinneret. Final Scientific Report to Ministry of Science and Technology.	T18/2021
גל, ג', אופיר א', להב א', אסטרון פ'. 2021. פיתוח וישום כלים להערכה וכימות ההשלכות האקולוגיות של אירועי זיהום של דלקים פוסילים על הסביבה הימית. דוח 18 חודשים לפרויקט, הוגש למשרד האנרגיה.	T19/2021

5.4 ייעוץ לממשלה, השתתפות בפורומים ובמערכות של עיתונים מדעיים

כללי

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

להלן דוגמאות להשתתפות חוקרי המעבדה לחקר הכנרת בדיונים מקצועיים ופעולות ייעוץ לגורמים ממשלתיים ובינלאומיים במהלך שנת 2021:

- ✓ מעקב אחר אירוע פריחה חורפית של ציאנובקטריה. דו"ח אד הוק נשלח לרשות המים.
- ✓ מתן ייעוץ לרשות המים בנושא הזרמת מי התפלה לכנרת. בוצעו ניסויים מעבדתיים וניסויים במודלים לבחינת ההשלכות.
- ✓ ייעוץ ומתן חוות דעת בנושא זמן השהות של מי הכנרת וההשלכות על איכות המים.
- ✓ לבקשת רשות המים מתבצע ניטור מורחב של פריחות ציאנובקטריה בכנרת.
- ✓ לבקשת רשות המים הותקנה תחנת דיגום קבועה בצפון הכנרת לצורך מעקב אחרי התפתחות פריחות של ציאנובקטריה באגם.
- ✓ לבקשת רשות המים הותקן מצוף דיגום בדרום הכנרת.
- ✓ ייעוץ לרשות המים בנושא רעלני ציאנובקטריה בכנרת, שכלל פיתוח ויישום פרוטוקול דיווח מדורג לרשות המים, וכן דיגום ואנליזות ייעודיות במקרה של פריחה בכנרת.
- ✓ מספר מקרי חשד להרעלת דגים נבחנו גם השנה (כבכל שנה), הממצאים מצביעים מספר פעמים בשנה על פעילות עבריינית של הרעלת דגים. דיווחים נשלחו לאגף הדיג במשרד החקלאות ולרשות המים.
- ✓ בעקבות אירוע זיהום הנפט בפברואר 2021 בוצעו סדרה אורכה של אנליזות של דגים ובע"ח ימיים נוספים לצורך בחינת המצאות שאריות נפט בע"ח.

השתתפות בפורומים מקצועיים

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 בכנרת, משרד החקלאות (ת' זהרי, חברה, נ' שטרן וג' גל משקיפים).
- ✓ ועדת אינטרדוקציה של בע"ח ואצות, משרד החקלאות (א' אוסטרובסקי, חברה).
- ✓ 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 הבין-לאומי SIL (א' אוסטרובסקי).
- ✓ מזכירה כללית וגזברית של ארגון הלימנולוגים הבין-לאומי SIL (ת' זהרי).

,The management committee at the specialist group on Lake and Reservoir Management ✓
 Internation Water Association (א' אוסטרובסקי).

חברות במערכות של עיתונים מדעיים

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