



חקר ימים ואגמים לישראל
Israel Oceanographic & Limnological Research

המעבדה לחקר הכנרת ע"ש יגאל אלון
ניטור ומחקרי כנרת לשנת 2023
דו"ח חיא"ל T10/2024



צילום: נטלי קמפר, מבט מחוף המעבדה, חורף 2023

www.ocean.org.il



ניטור ומחקרי כנרת דו"ח שנתי 2023

המעבדה לחקר הכנרת



חקר ימים ואגמים לישראל
דו"ח חיא"ל T10/2024

בעריכת ד"ר גדעון גל ואיילה לובל - ילס

אוגוסט 2024

עיקרי הדו"ח – תמונה כללית: הכנרת בשנת 2023

התמונה הכללית של הכנרת, בשנת 2023, דמתה במובנים רבים לשנה הקודמת (2022). משרעת המפלס במהלך שנת 2023 עמדה על 1.64 מ' בהשוואה ל- 1.71 מ' בשנת 2022. הרום המקסימלי בשנת 2023 נרשם בסוף חודש אפריל והגיע ל-209.94-. המפלס הגבוה של האגם בשנה החולפת מסמן חמש 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 בשנים הקרובות. יחד עם צמצום דאגות המפלס בשנים הקרובות, וכנראה אף מעבר לזה, עולות דאגות לגבי ההשלכות האפשריות של הזרמת מי מערכת לכנרת. בסוף שנת 2022 נערך ניסוי הזרמה ראשוני של המים במתווה של הצלמון על מנת לבחון בין השאר את קצב החילחול של המים לקרקע וכן אופן פיזור המים הנכנסים לכנרת. הרחבנו את הניטור שאנו מבצעים באזור שפך הצלמון על מנת ליצור בסיס מידע ורקע עוד בטרם יחלו בהזרמת המים. נעקוב מקרוב אחרי שינויים אפשריים בעקבות הזרמת המים.

לעליה המבורכת במפלס האגם בשנים האחרונות היו מספר השלכות על האגם שאת חלקן ניתן היה לזהות במהלך השנה וחלקן, על בסיס הידוע לנו מהעבר, יחשפו בעתיד. העליה במפלס לוותה בהמשך ירידה בריכוז הכלוריד באגם עד לריכוז מינימום באפילמיניון בסוף חודש אפריל של 251 מג"ל. הצמחיה החופית שהוצפה במהלך חורף 2018/19 נשארה מוצפת זו ששרדה עד לחורף 2021/22 מתה. המשך תפעול האגם במפלסים גבוהים מסייע בניהול צמחיית החוף בצורה מבוקרת. 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.

איכות המים בכנרת מכומתת באמצעות מדד ייחודי ("מדד הקיימות של הכנרת") שפותח במעבדה לחקר הכנרת. ערך המדד של 2023 היה מעט גבוה מערך המדד בשנת 2022 ועמד על ערך של 52, ערך נמוך 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 2023, 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. בשנה החולפת הסיבות העיקריות לערך המדד הנמוך היו הריכוזים הנמוכים של פרידיניום עקב העדר פריחת הפרידיניום (בדומה לשנים עברו), ריכוז גבוה של כחוליות במים בחורף- אביב, וכן ערכי חנקן נמוכים בקיץ – סתיו.

בשנים האחרונות המעבדה לחקר הכנרת, 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 הכנרת, בתחנה D. בתחילת 2023 הותקן מצוף נוסף בשפך הצלמון לצורך מדידת נתוני רקע באזור הכניסה של מי המערכת לאגם. מטרת שתי התחנות הרציפות החדשות (D,G) היא לעקוב אחר תהליכים המתרחשים באזורים אלו שהינם ייחודיים ושונים באופיים מתחנה A ובעיקר על מנת לעקוב אחר התפתחות פריחות של כחוליות (ציאנובקטריה) באזורים אלו. אתר חדש של המעבדה עם נתוני התחנות הרציפות נמצא בבניה ויעלה לאוויר במהלך שנת 2024.

טבלה 1: עיקר ממצאי הניטור לשנת 2023

משתנה	הממצאים
מפלס	משרעת המפלס במהלך שנת 2023 עמד על 1.64 מ' בדומה למשרעת של 1.71 בשנת 2022. הרום המקסימלי בשנת 2023 הגיע ל-209.94-, לעומת 209.02- בשנת 2022 והרום המינימלי היה 211.58- לעומת 210.73- בשנת 2022. השינוי היומי הגדול ביותר היה 0.11 מ' שנרשם ב- 24.12.2023 לעומת 0.09 מ' בשנת 2022.
מדד הקיימות של הכנרת	ערך המדד הכולל לשנת 2023 היה 52, ערך מעט גבוה מהערך שנרשם בשנת 2022 ונמוך ביחס לערך הרצוי של 60. בינואר-יוני הערך הכולל היה נמוך ועמד על 51 בעיקר לאור היעדר פריחה של פרידיניום ונוכחות של מיקרוציסטיס במים. בחצי השני של השנה, ערך המדד הכולל היה גבוה יותר (53) אבל נמוך מהערך הקביל בעיקר לאור ריכחים נמוכים של חנקן כללי וכלורופיל.
טמפ' המים	שנת 2023 התאפיינה בטמפרטורת מים חמה מהממוצע העשר שנתי של עשרת המטרים העליונים מלבד חודש מאי, בו הטמפרטורה היתה קרה מהממוצע. טמפרטורת ההיפולימניון היתה חמה מהממוצע העשר שנתי לאורך כל השנה. שנת 2023 התאפיינה בשיכוב תרמי יציב יותר וכנראה מכך קצב העמקת התרמוקלינה הייתה איטית יותר. בשנת 2023 לא היה ערבוב מלא של האגם.
כלוריד	הכלוריד באפילימניון ובהיפולימניון היו נמוכים מהממוצע הרב שנתי (עשור). ריכחי הכלוריד באפילימניון בשנת 2023 היו נמוכים מהממוצע הרב שנתי בכ- 20 מג"ל באפילימניון וריכחי הכלוריד בהיפולימניון היו נמוכים מהממוצע הרבה שנתי בכ-10 מג"ל. בסוף שנת 2023 ריכח הכלוריד בעמודת המים העליונה עמד על 262 מג"ל כלוריד לליטר.
זרחן	ערכי זרחן כללי, זרחן מומס וזרחן מומס מגיב באפילימניון של שנת 2023 היו דומים לערכי 2022 וכן לממוצע הרב שנתי אך התאפיינו בתנודתיות חודשית חזקה יחסית. בהיפולימניון המגמות היו דומות לממוצע הרב-שנתיות ושונה מהמגמות של התפתחות מאוחרת יחסית שנצפתה ב-2022.
חמצן	באפילימניון שיא ריכח החמצן המומס היה מוקדם וקצר במרץ ולאחר מכן חלה ירידה מתונה עד יולי-אוגוסט. מגמה זו דומה לאשר אירע בשנת 2022. מיולי - אוגוסט והלאה התבנית באפילימניון הייתה דומה לממוצע הרב שנתי. מגמת התפתחות החמצן בשכבת ההיפולימניון הייתה דומה לממוצע הרב-שנתי מבחינת ההיקף וגובה ערכי החמצן ושיא הערכים בפברואר.

משתנה	הממצאים
חנקן	נרשם שיא מוקדם וגבוה של חנקן כללי באפילימניון בשנת 2023 אשר מבטא בעיקר שיא בחנקן אורגני ומעט תרומה של צורונים אנאורגניים. גם בהיפולמניון נרשמו ריכחים גבוהים של חנקן אורגני בתחילת השנה. אמוניום, ניטריט וניטראט בשתי השכבות הציגו מגמות דומות לממוצע הרב-שנתי, בניגוד לתצפיות בשנת 2022.
קיבוע חנקן	קיבוע החנקן ב- 2023 התפרס על פני עונה קצרה והיה נמוך מהרגיל. נרשמו שני שיאים בקצבי הקיבוע, הראשון בסוף חודש ספטמבר והשני בתחילת נובמבר בזמן שיא פריחת הכחוליות <i>אפניזומנון</i> , וצילינדרוספרצופסיס. בסך הכל קובעו באגם כ- 11 טון חנקן אטמוספרי במהלך פריחת הכחוליות הקייציות של 2023.
ייצור שניוני חידקי	הפעילות החיידקית ההטרוטרופית השנתית שנמדדה בשנת 2023 באזור הפוטי הייתה דומה לזו שנמדדה ב- 2022. ערך השיא השנתי התקבל בחודש אוגוסט לאחר הופעת הכחוליות מקבעות החנקן. זוהי השנה השנייה ברציפות בה לא נראית יותר המגמה של פעילות חיידקית גבוהה שאפיינה את השנים הקודמות.
מאזני פחמן, חנקן וזרחן	שטפי פחמן חנקן וזרחן לאגם ב- 2023 היו נמוכים ביחס לשנה הקודמת, 2022. עבור פחמן, ערכי היצרנות הראשונית והנשימה הקהילתית עלו אך היחס ביניהם נשאר דומה לשנת 2022. שנת 2023 גם אופיינה בערכי קבורה מזעריים של חנקן לסדימנט בקרקעית האגם, ערכים נמוכים כאלו לא נרשמו שנים ארוכות בכנרת.
פיטופלנקטון	לא נצפה שיא בביומסה של הפיטופלנקטון לאורך השנה, אך כן התרחשה שבירה בכמות הביומסה הכוללת במעבר בין חודש יוני ליוני. הפרידיניום נצפה בכמויות ביומסה נמוכות מאד, מאפריל עד יוני. שני מיני ציאנובקטריה מקבעות חנקן שאופייניות לפיטופלנקטון של הקיץ והסתיו, <i>אפניזומנון</i> וצילינדרוספרמופסיס, לא פרחו השנה והופיעו באגם מאוחר מאד, רק לקראת אוקטובר. ניסויי מעבדה מאששים שהסיבה לתופעת החסר אינה יכולה לנבוע מחום הסביבה בלבד ותלויה בגורמים נוספים.
כחוליות רעילות ורעלנים	בשנת 2023, לא זוהו מיקרוציסטינים במי הכנרת בחודשי האביב בין השאר בגלל התפתחות מוגבלת של אוכלוסיית המיקרוציסטיס במהלך חורף-אביב 2023. אנליזת הביומאסה הנצפית באגם באותם חודשים, הראתה ריכח מיקרוציסטינים מירבי של מעל 286 מק"ג לגרם חומר יבש. צילינדרוספרמופסין נמדדו בריכחים נמוכים בכנרת בדוגמאות מים בין החודשים יוני - דצמבר 2023. רמת הרעלן הגיעה לריכח מרבי של 0.55 מק"ג

משתנה	הממצאים
	לליטר במי האגם, כפי שנצפתה בדצמבר 2023. ריכוזים נמוכים אלו מגיעים במקביל לכמעט היעדר אפאניזומנון בכנרת בקיץ-סתיו 2023. הציאנובקטריה אפאניזומנון מהווה את מקור הצילינדרוספרמופסין באגם.
זואופלנקטון	נרשמה ירידה של 18% בצפיפות הכוללת של הזואופלנקטון במהלך 2023 ביחס לשנת 2022 ועמדה על צפיפות ממוצעת של 304.5 פרטים לליטר. ירידה זאת מגיעה אחרי ירידה מתונה של 3% בשנת 2022 ביחס לשנת 2021. בניגוד לשנתיים הקודמות נרשמו ערכי צפיפות נמוכים יחסית של קופפודים לאורך כל השנה. בשנת 2023 נמשכה המגמה של ערכים גבוהים של היחס שבין קופפודים מהסוג מזוציקלופס לסוג תרמוציקלופס. עליה זו משקפת ירידה בלחץ הטריפה שתואמת את התמונה שעולה מהסקר האקוסטי של הדגים.
דגים	לאחר העלייה המהירה של מפלס המים באגם ב-2019, הצפיפות השנתית הממוצעת עלתה פי שניים בערך מ-1.4 ל-2.6 פרטים/מ"ר עד 2020. לאחר מכן, במהלך 2020 - 2023, צפיפות הדגים הממוצעת ירדה פי חמישה. צפיפויות הדגים מכל קבוצות הגודל בכל העונות היו בסדר גודל קרוב לתחומים הנמוכים שנצפו בשנים 2011-2022. בשנת 2023 הצפיפות הממוצעת של דגים הגדולים מ-60dB הייתה 0.52 פרטים / מ"ר. הדגים התרכזו בעיקר באזורים הפריפריאליים של הכנרת, בעיקר בצפון האגם. בדצמבר התגלו דגים בצפיפות גבוהה גם בדרום האגם.
דיג ודגה	לאורך שנת 2023, נצפתה ירידה במספר הסירות הנסקרות לביקור יומי, ועמד על ממוצע של שבין שתיים לארבע סירות. ההסבר לירידה אינו ברור ועלול לנבוע מגורמים הקשורים לאופי הסקירה כמו למשל שינוי מקום פריקת השלל, זמן ההגעה למעגן וכד'. יחד עם זאת, לא נצפתה ירידה בדיג הרשתות בכנרת במהלך המלחמה אשר התחילה באוקטובר 2023, אלא אף נצפתה עלייה בשלל האמונים והקיפונים לעומת השנה הקודמת. בשלל דיג ההקפה נמשכה המגמה של מאמץ של דיג אמנונים וקיפונים אל מול קרפיוניים. בנוסף, השנה נערכה סקירה פרטנית עבור ביולוגיית הרבייה של אמנון הגליל בכנרת לאורך שנות הניטור, ובה נצפתה תחילת העלייה של מדד הרבייה GSI כבר בחודש פברואר, עם ערכים מקסימליים בחודש מאי וירידה שלהם כבר בסוף חודש יוני.
חלזונות	שינויי המפלס הגדולים הובילו להתמעטות קיצונית של החלזונות הטבעיים לכנרת ולהופעת והשתלטות של מין פולש. מאז 2012 ועד היום החילזון הפולש, <i>Thiara scabra</i> , מהווה מעל 95% מסך החלזונות באגם, בריכוזים

משתנה	הממצאים
	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 הכנרת (3 מינים) סובלות משינויי המפלס הקיצוניים ונמצאות בסכנת הכחדה. אנו משערים שהחלזונות הפולשים אוכלים כל חומר אורגני בסדימנט, כולל ציסטות של פרידיניום ובכך תורמים להעלמות הפרידיניום.
חומרי הדברה	בשנת 2023, לא זוהו חומרי הדברה במי האגם מעל ל- 1 מק"ג לליטר. חומרי הדברה נתגלו בריכחים של מעל 10 מק"ג לקילו סדימנט יבש, במספר אתרים באגם. הרעלת דגים מאסיבית אשר נגרמה מהרעלה מכוונת אובחנה בשפך נחל צלמון במאי 2023.
אינדיקטורים לזיהום	שנת 2023 התבלטה בריכחים נמוכים יחסית של חיידקים אינדיקטורים לצואה בכנרת, כולל בתקופת החורף.
קצבי שיקוע	בשנת 2023 קצבי הסדימנטציה הממוצעים בתחנות A, F, K, ו-M היו 1.9, 8.6, 10.3 ו-20.8 גרם חומר יבש/מ"ר/יום, בהתאמה. קצבי הסדימנטציה בתחנות K ו-M היו מעט גבוהים מהממוצעים הרב-שנתיים שלהם, בעוד שקצבי הסדימנטציה בתחנות A ו-F היו נמוכים מהממוצעים הרב-שנתיים.
הנביעה בברבטים	מתחילת ינואר ועד תחילת מאי 2023 עלו ריכחי הכלורידים בצינור הברבטים מ-1,214 מג"ל ל- 1,307 מג"ל ולאחר מכן חלה ירידה מתונה עד 1,244 מג"ל באמצע יולי. עליה נוספת החלה בסוף אוקטובר והגיעה ל- 1,280 מג"ל בינואר 2024. מאפיין בולט הינו מהירות הזרימה בצינור הברבטים המציג שונות גדולה עם הזמן. במהלך 2023 המהירות היומית הממוצעת הייתה בין 0.2 ס"מ/שניה ועד 1.8 ס"מ/שניה.

תוכן העניינים

1.....	הקדמה: שילוב פעולות הניטור והמחקר במעבדה לחקר הכנרת	1
.....	2. ניטור הכנרת	2
3.....	2.1 מבוא	3
9.....	2.2 מדד הקיימות של הכנרת	9
13.....	2.3 מאזני חנקן, זרחן ופחמן בכנרת	13
16.....	2.4 מפלס האגם	16
18.....	2.5 ניטור פיסיקה של האגם	18
22.....	2.6 ניטור מטאורולוגיה של האגם	22
26.....	2.7 קצבי סדימנטציה	26
29.....	2.8 ממצאי הניטור הכימי	29
35.....	2.9 ניטור מתכות כבדות בכנרת	35
39.....	2.10 שטפי זרחן באבק	39
42.....	2.11 קיבוע חנקן	42
45.....	2.12 חומר אורגני ואי-אורגני מומס	45
48.....	2.13 בחינת נוכחות חומרי הדברה במי האגם ובדגה	48
50.....	2.14 מדידת פרמטרים בצינור הברבוטים ושלושה בורות פעילים נוספים באזור	50
55.....	2.15 תכנית הניטור האוטונומית של המעבדה לחקר הכנרת (KLAMP)	55
60.....	2.16 כלורופיל וייצור ראשוני	60
63.....	2.17 ייצור שניוני חיידקי	63
66.....	2.18 חיידקים אינדיקטורים לזיהום צואתי	66
69.....	2.19 ניטור פיטופלנקטון	69
76.....	2.20 רעלני כחוליות	76
80.....	2.21 ניטור זואופלנקטון	80
86.....	2.22 אוכלוסיות הדגים - סקרים הידרואקוסטיים	86
90.....	2.23 ניטור דיג ודגה בכנרת	90
95.....	2.24 חלזונות וצדפות בליטורל	95
99.....	2.25 איכות מי הכנרת באמצעות צילומי לוויין המשולבים במערכת SISCAL	99
105.....	2.26 מערכת מידע גיאוגרפית באינטרנט - GIS OnLine	105
107.....	2.27 מאגר מידע כנרת	107
110.....	2.28 מעקב מוגבר אחר פריחות ציאנובקטריה	110
114.....	2.29 מליחות הכנרת	114
.....	3. מחקרי כנרת	3
118.....	3.1 מרכז אצות לאומי	118

3.2	חקר הגורמים לפריחת פרידיניום בכנרת בגישה רב תחומית המשלבת בינה מלאכותית, פרוטאומיקה וגנומיקה	121
3.3	פיתוח, כיול ויישום מודל ביוגיאוכימי תלת מימדי לכנרת	123
3.4	גלי פני השטח: מודל ותצפיות	128
3.5	ניטור זרמים בכנרת	132
3.6	מערכת ICT לזיהוי תגובת עמידות אקולוגית במערכות מים מתוקים	136
3.7	גיבוש מערך ניטור ויכולות תפעול להתמודדות עם מצב משברי של פריחה חריגה של ציאנובקטריה בכנרת	141
3.8	הפיטופלנקטון באגם הברבורים שליד מפעלי ים המלח	148
4.	מחקרי אגן ההיקוות של הכנרת וגופי מים אחרים	
4.1	ניטור זיהומים ממקור צואתי בנחלי אגן ההיקוות של הכנרת בשיטת MST	156
4.2	ניטור ירדן דרומי	162
4.3	ניטור מעיינות הגולן	168
4.4	ניטור פיטופלנקטון, זואופלנקטון ודגים באגמון החולה	174
4.5	מידול ניהול מערכות מיטבי להידרולוגיה של אגן ההיקוות של הכנרת	185
4.6	הערכת ההשפעה של משטרי אקלים קיצוניים על עומסי נוטריינטים	188
4.7	פיתוח שיטות ניהול מערכתי עבור דיג בר קיימא ומערכות אקולוגיות ימיות	
	בריאות (ECOSCOPE)	192
5.	נספחים	
5.1	סטודנטים לתארים מתקדמים בהנחיית חוקרי המעבדה לחקר הכנרת 2023	198
5.2	פרסומי המעבדה בספרות הבינלאומית	200
5.3	דו"חות המעבדה 2023	204
5.4	ייעוץ לממשלה וחברות במערכות של עיתונים מדעיים	206

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. מחזור הפחמן בכנרת מוצג באופן סכמתי באיור 1. 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 והחידקים. כמן 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, חידקים, זואופלנקטון (ודגים שאינם מוצגים). התהליכים הקושרים בין המרכיבים האלו מסומנים בחיצים.

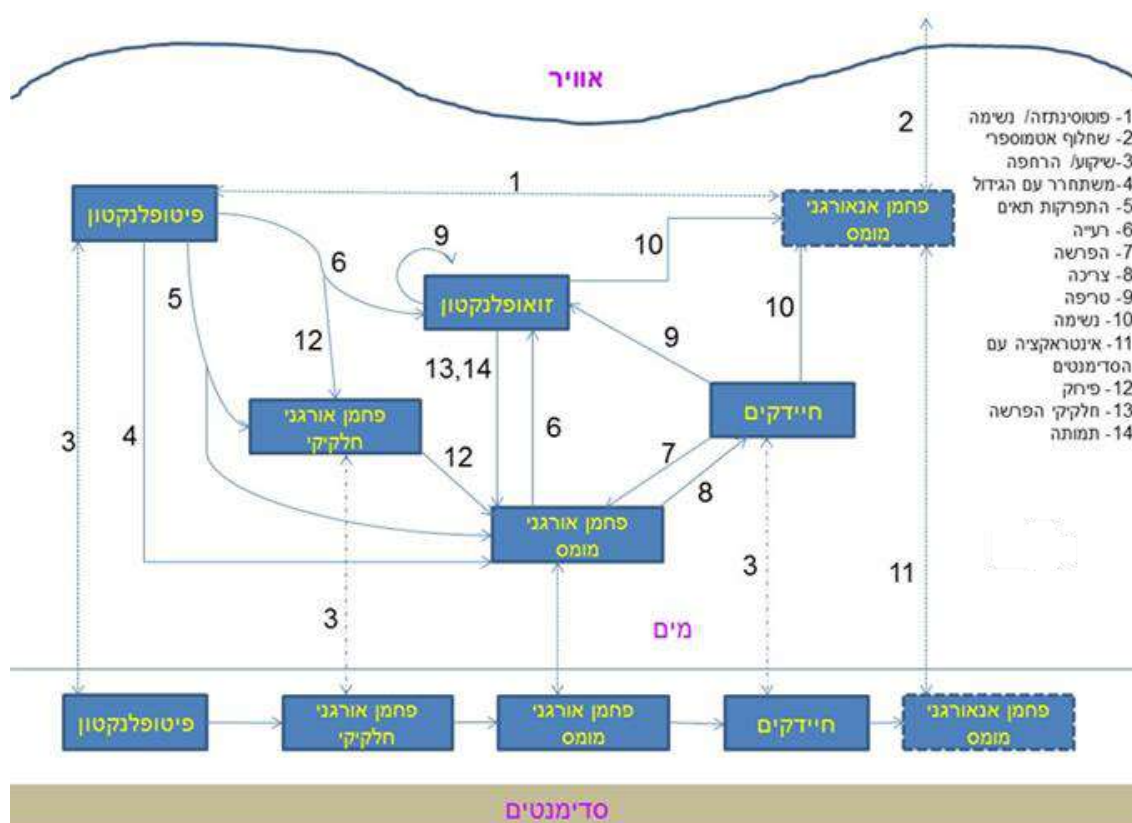
עבודות הניטור והמחקרים המתבצעים במעבדה לחקר הכנרת מיועדים בין השאר גם לשפר את המודלים הכמותיים ולהבהיר מה הם החלקים הקריטיים במערך מורכב זה. בעזרת המודלים ניתן להגיע להבנה מפורטת יותר של מידת השפעת הגורמים השונים על רמת האיטרופיקציה, על איכות המים ועל מצב המערכת האקולוגית.

בשנה החולפת חברי צוות המעבדה לחקר הכנרת היו מעורבים בפעילות מחקרית, מתן חוות דעת למקבלי ההחלטות וגופים ממשלתיים שונים וכן בחינוך. ייעוץ מקצועי לממשלה ניתן ע"י השתתפות של נציגים בוועדות ממשלתיות, השתתפות בדיונים של פורומים ממשלתיים שונים והגשת חוות דעת מקצועיות בע"פ ובכתב. בשנה החולפת חוקרי המעבדה היו שותפים ב-8 פורומים ממשלתיים ומקצועיים, ישראליים ובינלאומיים. בנוסף, החוקרים היו פעילים כעורכים ב-16 כתבי עת מקצועיים בינלאומיים, פרסמו 24 מאמרים בכתבי עת מדעיים, הגישו 24 דוחות לגופים מממנים ולגופים ממשלתיים שונים. בנוסף לכל הפעילויות הללו, החוקרים היו מעורבים בהנחיית סטודנטים החל מפרויקטים של סטודנטים לתואר ראשון ועד להנחיית פוסט-דוקטורנטים. חוקרי המעבדה לחקר הכנרת הנחו במהלך שנת 2023 סה"כ 14 סטודנטים לתארים מתקדמים (מסטר, דוקטורט ופוסט-דוקטורט) ממגוון אוניברסיטאות בארץ ובעולם.

המעבדה לחקר הכנרת מפרסמת כבר שנים רבות את הדוח השנתי הכולל סקירה של הפעילות המחקרית והניטורית של צוות המעבדה. הפעילות המחקרית מתבססת על מימון המגיע מקרנות מימון שונות על בסיס הצעות המחקר המוגשות אליהם ובשנה החולפת חוקרי המעבדה היו פעילים בלמעלה מ-20 מחקרים (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.

אנו שמחים להציג, יחד עם הדוח השנתי, את הלוגו החדש של המעבדה המשקף את המגוון הרחב, והמרשים, של הפעילות שלנו.

ברצוני להודות בהזדמנות זאת לאיילה לובל-ילס, מזכירת המעבדה, אשר סייעה רבות בעריכת הדוח ובעיצוב והכנת הלוגו.



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

2 ניטור הכנרת

2.1 מבוא

במימון רשות המים

צוות המעבדה לחקר הכנרת, חיא"ל

- נתוני הניטור שנאספו בכנרת במשך קרוב ל-55 שנים מהווים בסיס נתונים ומידע ייחודי באופיו, הן בשל רמת דיוק המדידות והן בשל רציפותן, המשמש לקבלת החלטות תפעוליות ומדיניות סביבתית.
- השדרוג המשמעותי במאגר המידע של נתוני הניטור במעבדה מתקרב לסיומו ויהווה אבן דרך משמעותית וקפיצת מדרגה. עם סיום שדרוג מאגר המידע נשפר את יכולות ההנגשה של המידע לציבור.
- פעילות המעבדה לחקר הכנרת באגן ההיקוות של הכנרת מתרחבת עם דגש על ניטור מקורות זיהום ועכברת.
- ניטור הדיג והדגה בכנרת הורחב לכלול ניתוח כמותי של מצב אוכלוסיית אמנונים באגם.



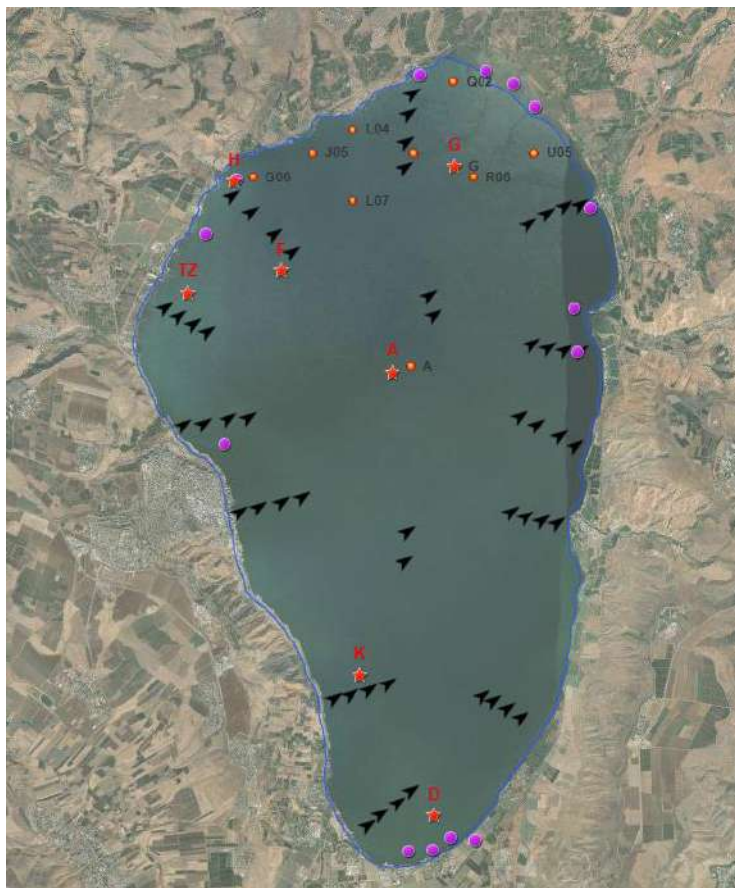
הנחת מצוף בתחנת צלמון (TZ). אוגוסט 2024. צילום: עז צברי-דר.

תכנית ניטור הכנרת המבוצעת על ידי המעבדה לחקר הכנרת ממומנת על ידי רשות המים (הוצאות ישירות) ומשרד האנרגיה (הוצאות עקיפות). מערך הניטור בכנרת פועל מאז 1969, 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 בשנתיים האחרונות לכלול גם ניטור דיג ודגה אשר משלים את תמונת מארג המזון בכנרת. הניטור, על כל מרכיביו, מאפשר את 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 בעמדות המים 4-6 פעמים ביממה. עקב תקלה וצורך בהחלפת הפרופיילר, לא נערכו פרופילים במהלך שנת 2023. בימים אלו מותקן פרופיילר חדש. בתחנות הדיגום הנוספות G, D ו-K, הממוקמות לאורך ציר צפון-דרום, נבדק מספר משתנים מצומצם יותר. במהלך שנת 2020 נוספה תחנת דיגום אוטומטית ורציפה בתחנה G. במהלך שנת 2023 התחנה התחדשה וכוללת שרשרת תרמיסטורים ומכשירי ניטור רב-ערוציים בשני עומקים. כמו כן, בנוסף לתחנת הניטור הרציפה שהוקמה בתחנה D במהלך שנת 2021 הרי שבמהלך שנת 2022 הותקנה תחנה דומה מול שפך נחל צלמון. מטרת התחנה במיקום זה הינה איסוף נתוני רקע מאזור זה עד לתחילת הזרמה של מי המערכת דרך הצלמון. כל זאת בכדי לאפשר לנו לזהות השלכות של הזרמת מי המערכת לאגם. ניתן לזהות באיור 2 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 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 הפרופיילר בתחנה A, טמפרטורה בעזרת שרשרת התרמיסטורים בתחנות A, F ו-D ובצלמון וכן משתנים כגון חמצן מומס, עכירות, כלורופיל וחומציות בעזרת המערכות הרב-ערוציות המותקנות בכל התחנות הרציפות. בנוסף לכלל התחנות הקיימות, אנו מתקינים בימים אלו ארבע תחנות רציפות למדידת גלים באגם אשר ימוקמו בארבעת כיווני הרוחות. נכון לכתיבת שורות אלו, תחנות הותקנו ופועלות במערב (טבריה) ובמזרח (עין-גב). המידע ישמש לכיול ואימות מודל גלים של האגם אשר החל לפעול במהלך 2023.



איור 2: מפה של הכנרת ותחנות הדיגום של תכנית ניטור הכנרת. תחנות הניטור הקבועות מסומנות באדום, הנקודות הכחולות מסמנות את תחנות ניטור הפתגונים, וכן מוצגים חתי הניטור האקוסטי. למפה מפורטת יותר ופרטים נוספים ניתן למצוא באתר ה-GIS המקוון של המעבדה:
<https://iolor.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=da01a069af4e4f568a280a625ec8c50f>

נתוני הניטור שנאספו בכנרת במשך קרוב ל-55 שנים 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 ותוספת של תחנות רציפות כפי שהתבצע בשנים האחרונות. אולם, יש צורך בכלים נוספים כגון רחפן עם אמצעים אופטיים מתקדמים, מערכות חיזוי 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, עין גב	כל 10 דקות
לחות יחסית	גינוסר, A, עין גב	כל 10 דקות
טמפרטורת פני המים	A, עין גב	כל 10 דקות
רוח (כיוון ומהירות)	גינוסר, A, עין גב	כל 10 דקות
קרינה קצרת גל	גינוסר, A, עין גב	כל 10 דקות
קרינה ארוכת גל	גינוסר, A, עין גב	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 שרשראות תרמיסטורים	A, F, D	כל 10 דקות
עומק סקי	A, D, G, H, K*, TZ*	אחת לשבוע
פרופיל חדירות האור	A	אחת לשבועיים
קצבי סדימנטציה	A, F, K, M	אחת לשבוע עד שבועיים
כימיה		
אלקליניות	A, D, G, H, K, TZ	אחת לשבועיים
כלוריד	A, D, G, H, K*, TZ*	אחת לשבוע

סוג הבדיקה	תחנות דיגום	תדירות הדיגום
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
	D, G, H, K, TZ	אחת לשבועיים
pH	A, D, G, H, K*, TZ*	אחת לשבוע
זרחן כללי מומס	A	אחת לשבוע
	D, G, H, TZ	אחת לשבועיים
אורטופוספאט	A	אחת לשבוע
	G, D, H, TZ	אחת לשבועיים
זרחן כללי	A, D, G, H, K*, TZ*	אחת לשבוע
סיליקה	A	אחת לשבועיים
גופרה (סולפאט)	A, D, G, H, K, TZ	אחת לשבועיים
מוצקים מרחפים TSS	A, D, G, H	אחת לשבועיים
עכירות	A, D, G, H, K*, TZ*	אחת לשבוע
פחמן אורגני	A	אחת לשבועיים
חומרי הדברה	A, D, G, H, K, גשר אריק	אחת לשבועיים
רעלני כחוליות	A	אחת לחודש
זרחן באבק	מעבדה, כינר	אחת לשבוע
ביולוגיה		
פיטופלנקטון	A	אחת לשבועיים

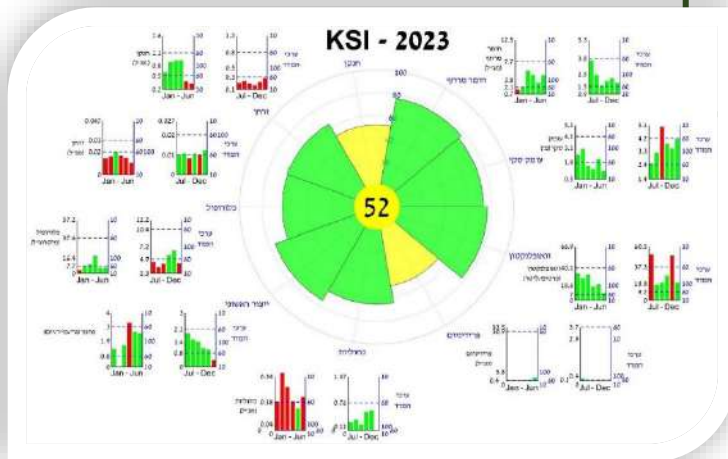
סוג הבדיקה	תחנות דיגום	תדירות הדיגום
כלורופיל	A	אחת לשבועיים
יצרנות ראשונית	A	אחת לשבועיים
זואופלנקטון	A	אחת לשבועיים
דגים (אקוסטיקה)	10 חתכים באגם כולו	עונתי
דיג ודגה (במימון משרד החקלאות)	ניטור דגי שלל ודיגום עם ספינת דיג	אחת למספר שבועות
חיידקים ממקור צואתי	14 תחנות במים רדודים	אחת לחודש
יצרנות חיידקית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

2.2 מדד הקיימות של הכנרת

במימון רשות המים

גדעון גל, נעם שחר

- בשנה האחרונה הערך השנתי של מדד הקיימות היה 52.
- שלושה משתנים עיקריים היו בבסיס ערכי המדד הנמוכים בשנת 2023: הכחוליות, הפרידיניום והזרחן הכללי.



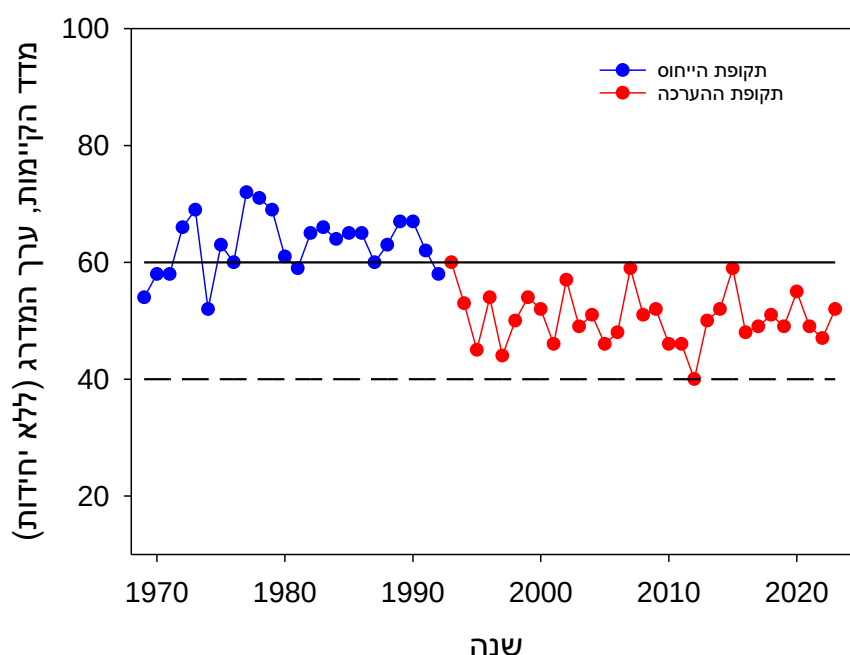
רקע ומטרות

איכות המים בכנרת מכומתת באמצעות מדד ייחודי שפותח במעבדה לחקר הכנרת. המדד המקורי פותח בסוף שנות ה-90, ובמהלך שנת 2014 עבר שינויים עפ"י בקשת רשות המים. בדו"ח 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 קביל. 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 משוכלל עם משקולות למשתנים עם הערכים הנמוכים ביותר. ככל שהערך נמוך יותר כך גובה המשקולת עולה. ערכי מדרג של 60 ומעלה נחשבים כערכים קבילים המצביעים על כך 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 שייסעו בהחזרת המערכת האקולוגית למצב הרצוי.

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.

תוצאות ודין

ערך הממד הכולל לשנת 2023 היה 52, ערך מעט גבוה מזה שנרשם בשנת 2022 (47) ודומה לערכים שנרשמו בשנים האחרונות (איור 3). בחינה של ערכי הממד בשנים האחרונות מעלה כי בין השנים 2016-2022 ערכי הממד הכולל לא השתנו באופן מהותי משנה לשנה ונעו בין 45-52 שהם ערכים נמוכים ביותר. יחד עם זאת, בשנת 2020 נרשמה עליה בערך הממד לערך של 55 שהיה אחד מהערכים הגבוהים ביותר שנרשמו בעשור האחרון. למעשה, מאז שנת 2000 רק ב-4 מקרים נרשם ערך מדד של 55 או גבוה יותר (2002, 2007, 2015, 2020). בנוסף, מאז שנת 2000 נרשמו ערכי מדד גבוהים מערך של 50 בפחות מ-50% מהשנים. המשמעות היא שביותר משני העשורים האחרונים המערכת האקולוגית של הכנרת נמצאת מרחק רב מהמערכת האקולוגית שאנו שואפים לשמר לאורך זמן.

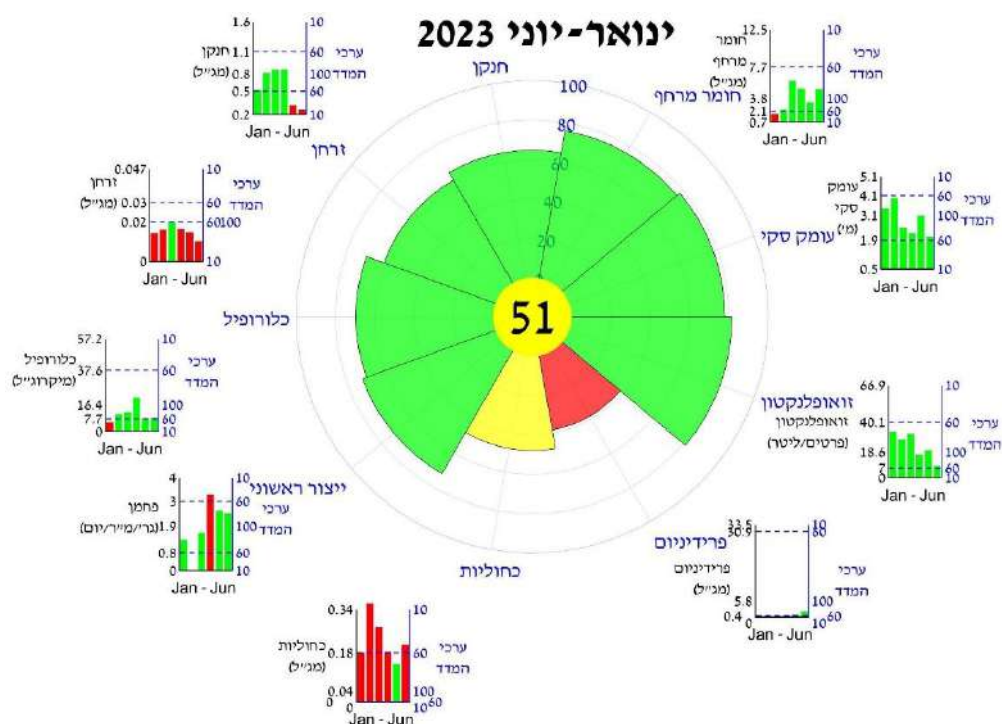


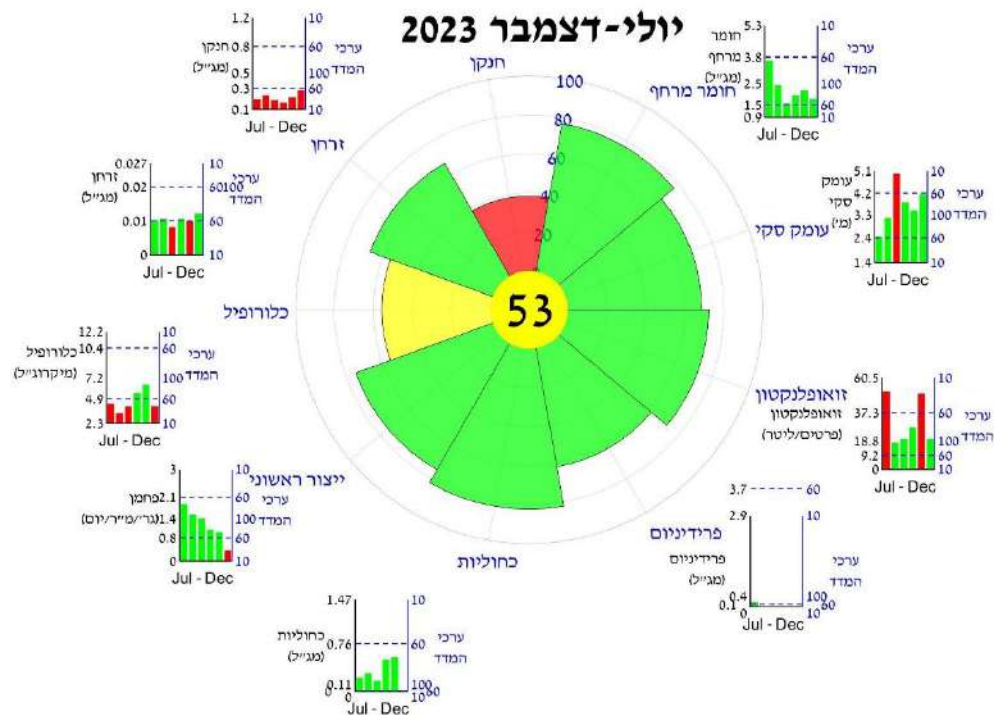
איור 3: תיאור גרפי של מדד הקיימות של הכנרת (KSI) עבור תקופת הייחוס (1969-1991) ובחול (1992-2023) (באדום). הקו האופקי השחור מציין את התחום הקביל של הערכים כך שכל ציון הנופל מתחת לערך 60 נחשב לערך לא קביל ומצב לא רצוי המקשה על שימור המערכת האקולוגית. הקו המקווקו מציין ערך מדד של 40. ערכים מתחת לערך 40 מצביעים על מערכת אקולוגית רחוקה מאוד מהמערכת שרוצים לשמר והצורך ביישום בצעדי ממשק.

בבחינה מעמיקה יותר של ערכי הממד לשנת 2023 יש לשים לב להבדלים בין שתי התקופות החצי-שנתיות ולגורמים שהשפיעו לרעה על ערכי הממד (איור 4). בתקופה שבין ינואר ליוני הערך הכולל עמד על ערך של 51 בעקבות ערכי מדד נמוכים ביותר של פרידניום וכחוליות (38, 48, בהתאמה). ערכים אלו נבעו מהיעדר פרידניום באביב ומופע, לא גדול, של מיקרוציסטיס בעיקר מהמין *M. flos aquae*. במהלך חודשי האביב. בכל שאר המשתנים הערכים היו בתוך הטווח הרצוי וערכי הממד היו גבוהים ואף הגיעו לערכי מדרג של 80.

בחצי השני של השנה, ערך הממד הכולל היה מעט גבוה יותר (53) בזכות ערכים גבוהים של רוב המשתנים למעט החנקן הכללי עם ערך מדד של 38 והכלורופיל עם ערך של 56. יחד עם זה, קיץ 2023 התאפיין, לראשונה מאז שנת 1995, בהיעדר פריחה של כחוליות (ציאנובקטריה) בעיקר של מינים

מהקבוצות צלינדרוספמופסיס (*Cylindrospermopsis raciborskii*) ואפניזומינון (*Aphanizomenon ovalisporum*) ובעקבות כך ערך המדרג של הכחוליות היה לראשונה מעל 80 (82). בחנקן הכללי נרשמו ערכים נמוכים בטווח שבין 25-43 בלבד במשך החודשים יוני-נובמבר ובחודש בדצמבר התקבלו ערכים שהתקברו למצופה. במקרה של הכלורופיל, ערכי המדרג היו נמוכים בכל ברוב חצי-השנה השניה למעט חודשים אוקטובר-נובמבר. ערכים נמוכים אלו מהווים המשך לערכים הנמוכים, אם כי גבוליים, במהלך החצי הראשון של השנה ומאפיינים את השנים האחרונות בכך שערכי הכלורופיל אינם גבוהים ואינם משקפים את הדגם העונתי שנצפה בעבר באגם (ראה פרק מס' 2.16 כלורופיל וייצור ראשוני בעמ' 63).





איור 4: מדד הקיימות של הכנרת (Kinneret Sustainability Index) לשנת 2023. 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 ערכי 9 משתנים הנמצאים בהיקף, כאשר ערכו של כל משתנה מוצג הן מספרית, הן בצבעי הרמזור והן בגודל הגזרה. ככל שהגזרה גדולה יותר כך ערכו מתקרב לערך המקסימלי של 100. לצד כל משתנה מופיע גרף המציג את הערכים החודשיים של כל משתנה (ציר אנכי שמאלי) ואת ערכי המדד (ציר אנכי ימני). צבעי העמודות בגרפים הינם ירוק (אם בתחום הקביל) או אדום אם מחוץ לתחום זה. פרטים נוספים על המדד ניתן לקרוא בדוח השנתי של 2014 או במאמר Gal and Zohary 2017²

ממבט ארוך טווח של מדד הקיימות של הכנרת (איור 3) ברור שהמערכת האקולוגית אינה במצב יציב או במצב רצוי. חוסר היציבות במערכת האקולוגית, הבאה לידי ביטוי במספר אינדיקטורים כגון המדד שמוצג כאן, מצביעה על השינוי הגדול שחל במערכת האקולוגית מאז שנות ה-90. העובדה שבעשורים האחרונים ערכי המדד השנתיים היו מתחת לערך של 55 למעט במהלך 4 שנים, 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 המדד, מקשה מאוד על ניהול נכון שיאפשר שיפור במצב המערכת האקולוגית של האגם. חשוב להדגיש שגם עם הפעלת צעדי ממשק שצפויים לתרום לשיפור במדד 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 במדד הקיימות של הכנרת.

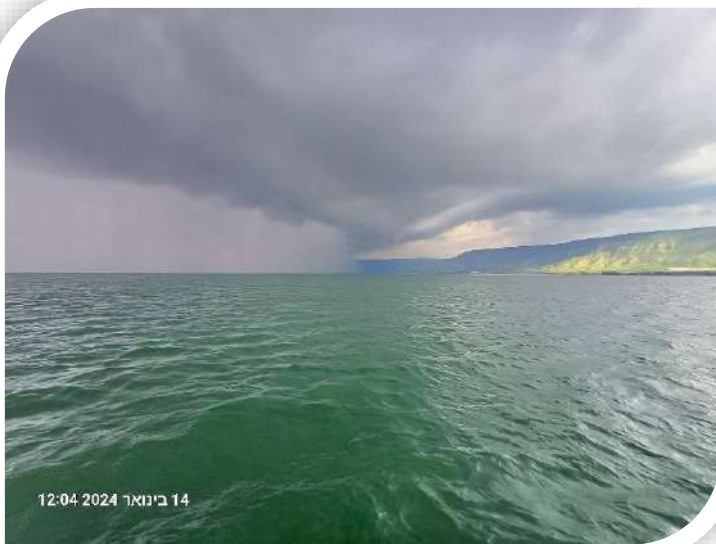
² Gal, G. and T. Zohary (2017). "Development and application of a sustainability index for a lake ecosystem." *Hydrobiologia* 800(1): 207-223.

2.3 מאזני חנקן, זרחן ופחמן בכנרת

במימון רשות המים

ירון בארי-שלוין, ורנר אקרט, שירה ניניו

- שטפי פחמן, חנקן וזרחן לאגם ב- 2023 היו נמוכים ביחס לשנת 2022.
- עבור פחמן, ערכי ה-GPP-עלו השנה וכן CR כך שהיחס GPP/CR נשאר דומה ביחס לשנת 2022.
- שנת 2023 גם אופיינה בערכי קבורה מזעריים של חנקן לסדימנט בקרקעית האגם, ערכים נמוכים כאלו לא נראו שנים בכנרת.



צילום: עוז צברי - דר, ינואר 2024

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 5 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) וזרחן 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, קיבוע חנקן וכן מהערכה של דניטריפיקציה במאזן החנקן בהתבסס על ערכי מקסימום של ניטראט בהיפולמניון בתחילת השיכוב התרמי.

מאזן הפחמן האורגני (OC) בכנרת עבור 2023 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 שנישאר 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, 31.7 טון, מתבסס על ערכי מקסימום של זרחן כללי בהיפולימניון וערך של כ- 53.5 טון עבור הקבורה לסדימנט (סדימנטציה נטו) משלים את המאזן הכללי. על כן, ערכים אלו מובילים לערכי סדימנטציה של כ- 85.2 טון בשנה. ערכי הסדימנטציה (כללי ונטו) השנה נמוכים מבשנת 2022. לעומת זאת המיחזור הפנימי השנה גבוה במעט ביחס לשנת 2022.

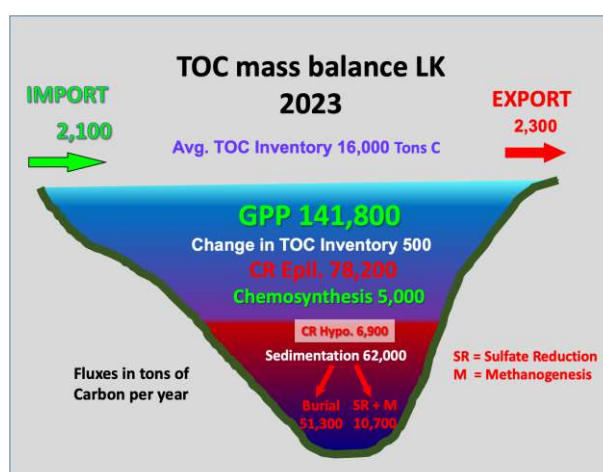
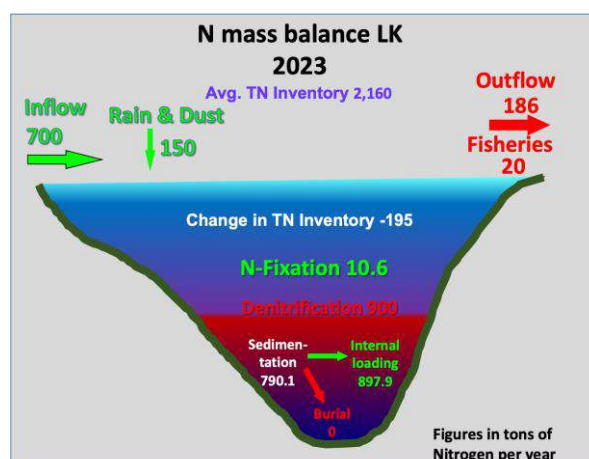
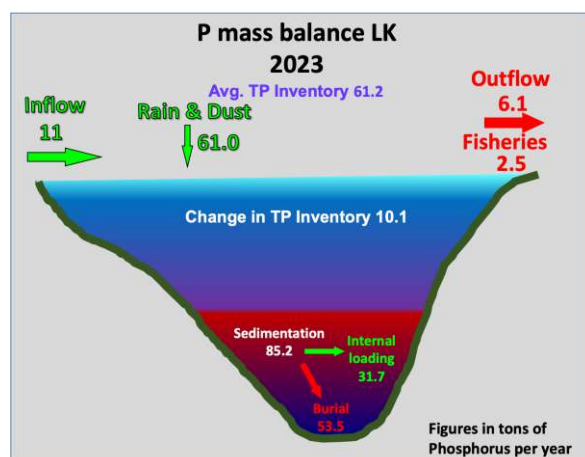
מאזן החנקן

חישוב מאזן החנקן מורכב יותר. כמות החנקן שעובר דניטריפיקציה בתהליכים חיידקיים וחוזר לאטמוספירה מחושב ל- 900 טון בהתבסס על ערכי מקסימום של ניטראט בהיפולמניון בתחילת השיכוב התרמי. המיחזור הפנימי בכנרת, 897.9 טון, מבוסס על ערכי מקסימום של אמוניה בהיפולמניון. הקבורה המוערכת בכ- 0 טון סוגרת את המאזן זהו ערך נמוך שלא נצפה מאז 2016. ערכים אלה מובילים לערכי סדימנטציה בסך של כ- 790.1 טון בשנה. בהשוואה לשנים קודמות, שנת 2023 מראה ערכי מיחזור פנימי, קבורה וסדימנטציה נמוכים ביחס לשנת 2022.

מאזן הפחמן

בניגוד למחזורי החנקן והזרחן באגם, מאזן הפחמן מושפע באופן ניכר מיצרנות אוטיגנית. הערכה של יצרנות ראשונית ברוטו (GPP) ב- 2023 הינה 141,800 טון פחמן הדומה לממוצעים של השנים 2001-2011 גם ערכי הנשימה הקהילתית (CR) עלו ל 78,200 טון וכך נשמר היחס GPP/CR בדומה לשנה הקודמת. ביחס למספר זה, הכניסות והיציאות לאגם (2,100 ו- 2,300 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: 78,200 טון. בהיפולימניון הידלדלות בחמצן מומס וניטראט תואמת מינרליזציה של 6,900 טון פחמן אורגני בהתבסס על ריכוזים במים בתחילת השיכוב התרמי באגם. הצטברות של סולפיד בהיפולימניון כתוצאה של חיזור בקטריאלי של סולפאט (SR) ושל מתאן (M, כ- 70% מחיזור הסולפאט בכנרת) מעידה על פירוק

של 10,700 טון פחמן אורגני בדומה לשנים 2020-2022. מכיוון ששני התהליכים מתחילים באזור הסדימנט, הם מייצגים חלק משטף שקיעת הפחמן האורגני החלקיקי. ההערכה הכוללת שלנו עבור שטף השקיעה הינה 62,000 טון פחמן. מאזן הפחמן שלנו נסגר ע"י ייחוס שארית של 51,300 טון פחמן אורגני לקבורה בסדימנט תוך התחשבות בשינוי מינורי באינוונטר באגם בשנה זו.



איור 5: מאזני חנקן, זרחן ופחמן בכנרת עבור שנת 2023. בכחול שטפים פנימה ובאדום שטפים החוצה מהאגם. השטפים הינם בטונות לשנה.

2.4 מפלס האגם

גדעון גל

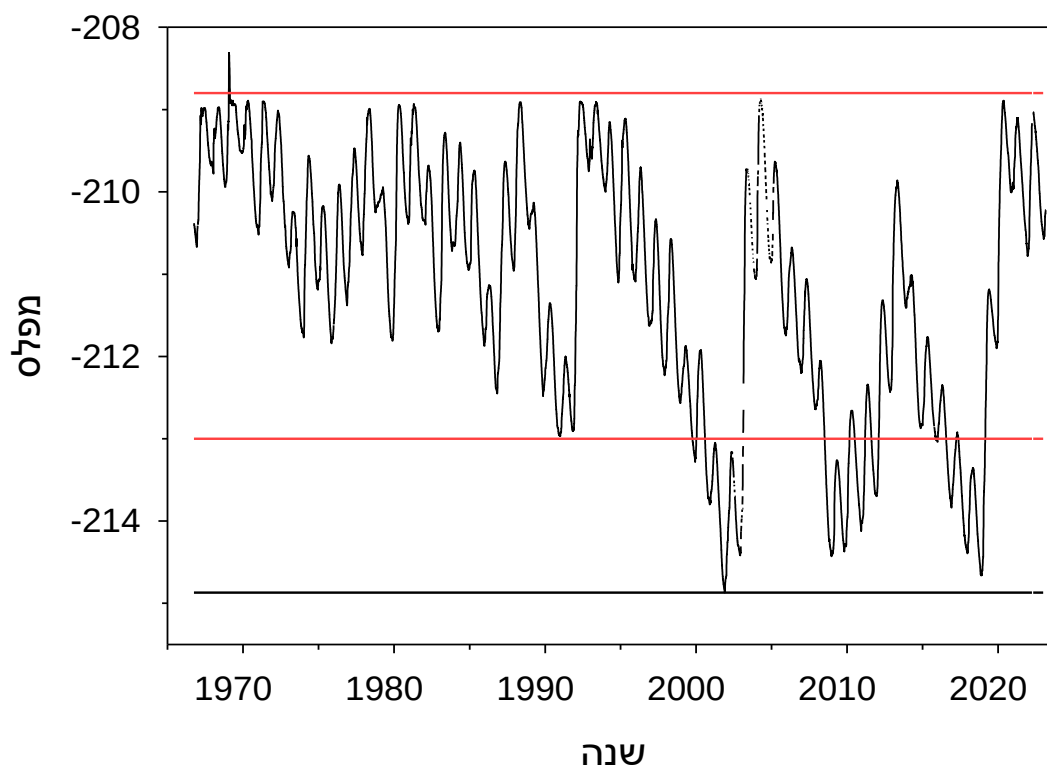
- משרעת המפלס במהלך שנת 2023 עמד על 1.64 מ' בדומה למשרעת של 1.71 בשנת 2022.
- הרום המקסימלי בשנת 2023 הגיע ל-209.94-, לעומת 209.02- בשנת 2023.
- הרום המינימלי היה 211.58- לעומת 210.73- בשנת 2022.
- השינוי היומי הגדול ביותר היה 0.11 מ' שנרשם ב-24/12/2023 לעומת 0.09 מ' בשנת 2022.



שינויים במפלס הכנרת, מבט מחוף המעבדה. למעלה: נובמבר 2023, למטה: מרץ 2024 צילום: נטלי קמפר

מפלס המים בכנרת משפיע במגוון דרכים על המערכת האקולוגית של הכנרת ועל כן ישנה חשיבות רבה במעקב לאחר השינויים במפלס לאורך השנה ולאורך 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 6) 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), העליה היממתית המקסימלית

הייתה 0.11 מ' לעומת עליה יממתית מקסימלית של 0.23 מ' במהלך שנת 2020. החורפים של השנים 2020/21, 2021/22, 2022/23 המשיכו את השנים הגשומות שהחלו בחורף של 2018/19 ונרשמו 4 שנים של רמת משקעים השווה לממוצע ההיסטורי או גבוהה יותר, רצף חריג ביותר. במהלך שנת 2023 המפלסים היו נמוכים יותר מאשר נרשמו במהלך שנת 2022. הרום המקסימלי של מפלס הכנרת היה 209.935-, לעומת 209.015- בשנת 2022, ונרשם בין ה-28.4 ל-4.5 והמפלס המינימלי היה 211.575- (210.725- ב-2022) שנרשם ב-11.12-12.11. משרעת התנודות במהלך 2023, אם כן, הייתה 1.64 מ' לעומת 1.71 מ' בשנת 2022. השינוי היומי הגדול ביותר של 0.105 מ' נרשם ב-24.12.2023 לעומת 0.09 מ' בשנת 2022 (6.2.2022). יש לציין שעליה גדולה יותר של 0.15 מ' נרשמה בחורף 2023/24 בתאריך 15.1.2024. בניגוד לעליית המפלס האיטית בחורף 2022/23, עם עליה של 0.3 מ' בלבד עד לתחילת מרץ 2023, הרי שבחורף 2023/24 נרשמה עליה של 1.87 מ' עד לתחילת מרץ 2024.



איור 6: מפלס הכנרת, מה-1.10.1966 ועד 1.4.2024. מוצגים "הקוים האדומים", העליון (208.80- מ') והתחתון (213- מ'), וכן הקו השחור (214.87- מ'), המיינמום של כל הזמנים שנרשם בכנרת בנוב' 2001. הנתונים באדיבות השירות ההידרולוגי, רשות המים.

2.5 ניטור פיסיקה של האגם

במימון רשות המים

שקד שטיין, יעל אמיתי

- שרשראות הטרימיסטורים בתחנות F ו G לא פעלו בכל שנת 2023 וחזרו לפעילות רק בינואר 2024.
- טמפרטורת עמודת המים העליונה בחודש מאי הייתה קרה יותר כאשר חודשי החורף היו חמים יותר בהשוואה לממוצע העשר שנותי.
- טמפרטורת ההיפולימיניון הייתה גבוהה יותר בכל חודשי שנת 2023 בהשוואה לממוצע ה-עשר שנותי.



מטרות

מטרת הניטור הפיסיקלי היא להבין ולבחון תופעות באגם, הנגרמות משינויים בטמפרטורה הכללית של האגם ובטמפרטורה של האפילימיניון וההיפולימיניון. הניטור הפיסיקלי הינו הבסיס להבנת התהליכים האקולוגיים המתרחשים באגם.

רקע

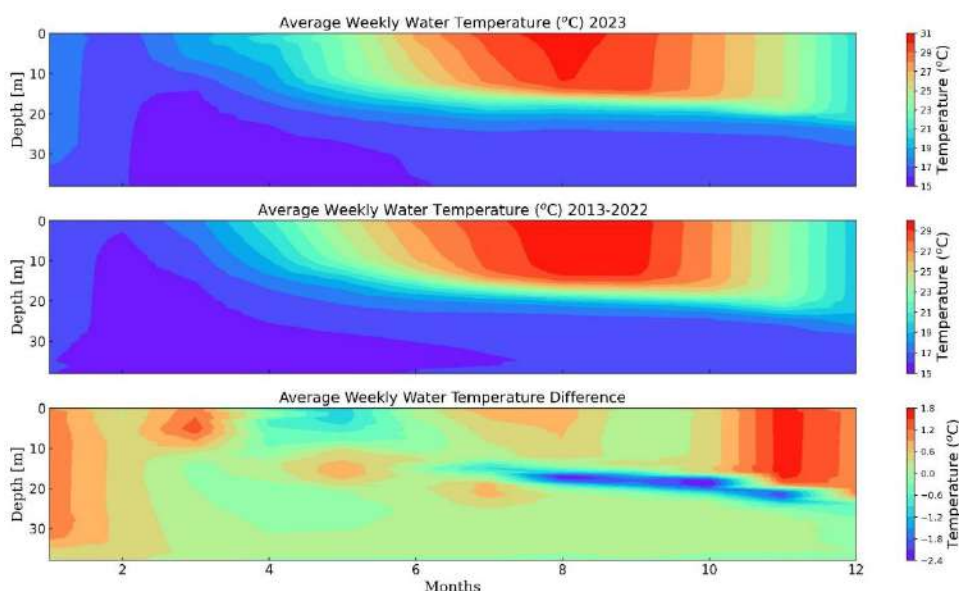
באחריות המעבדה לחקר הכנרת נמצאות 5 תחנות (A, F, D, G TZ) המנטרות באופן רציף, בעזרת שרשראות של טרימיסטורים, את הטמפרטורה בעומקים שונים בתדירות של אחת ל-10 דקות. בנוסף, אל תחנות אלו מגיעה פעם בשבוע סירת מחקר המורידה CTD אשר נותן תיקוף למדידות הרציפות וקושרות אל נתוני הטמפרטורה גם נתוני מוליכות חשמלית.

תחנה G, אשר הפסיקה לפעול בסוף 2022 לא פעלה במשך כל 2023. הפעלתה מחדש החלה רק בינואר 2024. תחנה F גם היא התחילה לעבוד רק בינואר 2024.

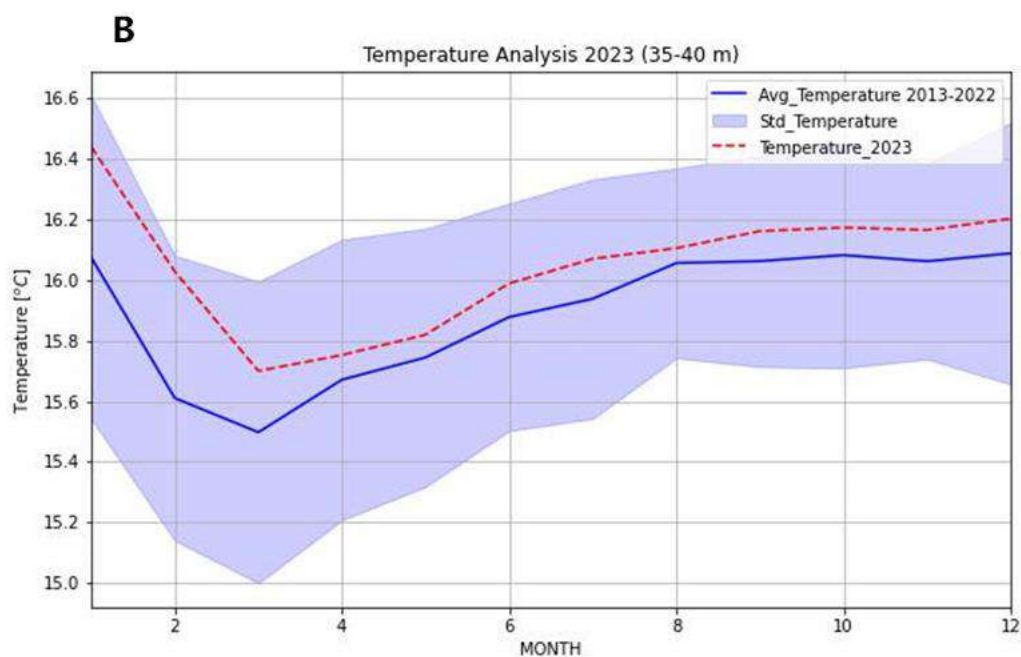
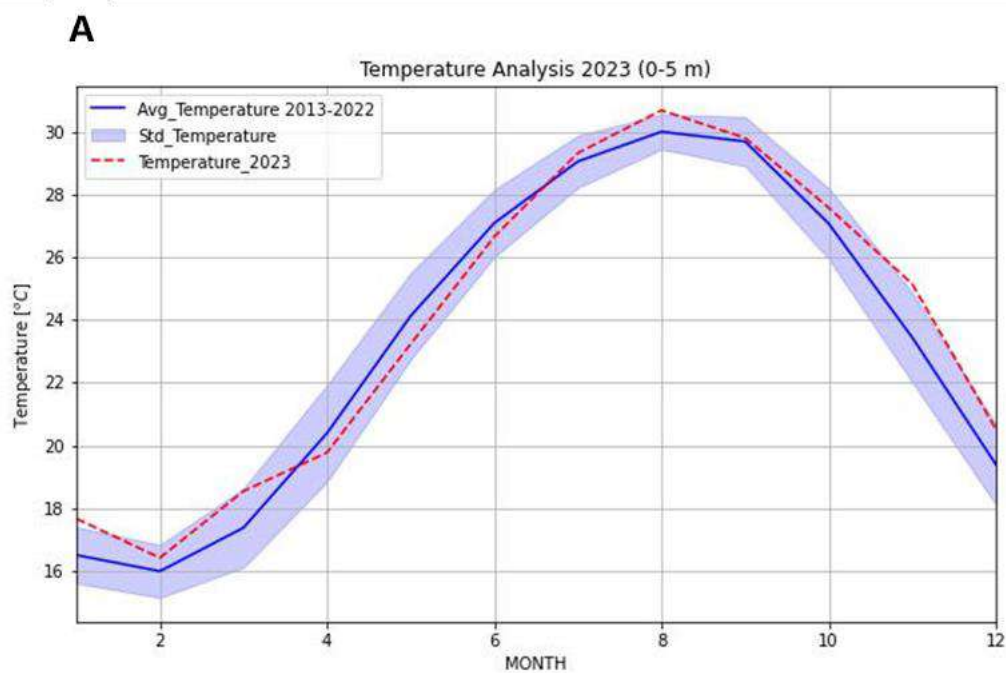
תוצאות ודין

פרופיל טמפרטורת גוף המים נבנה על בסיס מדידות שבועיות, באמצעות CTD במרכז האגם (תחנה A) וברחלוציה אנכית של 0.1 מטר. באופן כללי, הפרופיל של טמפרטורת המים היה קרוב לממוצע הרב שנתי

(איור 7). ניתן לראות שבחודשי החורף והקיץ חלקו העליון של האגם היה חם מהממוצע, דבר הנראה גם באיור 8, כאשר באביב, טמפרטורת המים העליונה הייתה קרה יותר מהממוצע הרב שנתי. לעומת חלקו העליון של האגם, חלקו התחתון של האגם היה חם יותר מהממוצע הרב שנתי לכל אורך שנת 2023 (איור 8B). כתם הקור הנראה לעין באיור 7 (פאנל תחתון) מחודשי הקיץ עד נובמבר במרכז עמודת המים נובע משיכוב יציב יותר בשנת 2023 מאשר בממוצע 10 השנים הקודמות וייתכן שהתקדמות התרמוקלינה מטה הייתה איטית יותר. הפיזור המרחבי של ממוצע הטמפרטורות החודשי בכל תחנות המדידה (איור 9) לאורך שנת 2023 נראה די דומה בין תחנה לתחנה עם שינויים מזעריים שכנראה נובעים משעת המדידה. איור 10 מראה את הטמפרטורה הממוצעת של 10 המטרים העליונים ביום הראשון והאחרון בכל חודש (כחול-יום ראשון של החודש, כתום-יום אחרון של החודש). הצגת נתונים זו מראה את המגמה היממתית של הטמפרטורה. ניתן לראות שבכל חודש ינואר כמעט ואין הבדל יממתי של הטמפרטורה. כאשר נכנסים לחודש פברואר, היום האחרון מראה שינויים לא סדירים במהלך היום ומחודש מרץ כבר רואים שיא של טמפרטורה בשעות הצהריים. המגמה של שיא טמפרטורה בצהריים נשמר לכל חודשי הקיץ ומתמתן בחודשי הסתיו והחורף. עוד תופעה שניתן לראותה בנתונים היא סך השינוי בטמפרטורה בין תחילת החודש לסופו. ניתן לראות שבחודש ינואר 2023 הטמפרטורה ירדה בכ-1.5 מעלות בין תחילת החודש לסופו ומחודש פברואר, יש התחממות של עמודת המים העליונה. התחממות זו נפסקת בחודש אוגוסט כאשר טמפרטורת המים בתחילת החודש ובסופו מראה על ערכים דומים. לאחר חודש אוגוסט ישנה התקררות בטמפרטורות בעמודת המים העליונה.

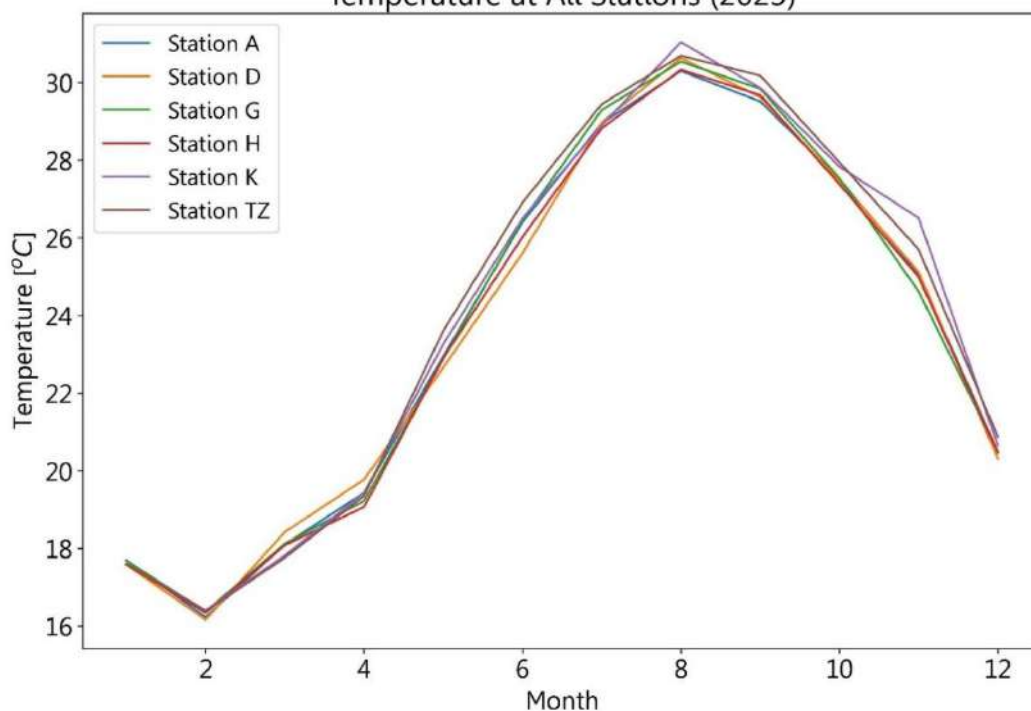


איור 7: פרופיל טמפרטורה של עמודת המים במרכז האגם, למעלה- פרופיל טמפרטורה לשנת 2023, אמצע- ממוצע לשנים 2013-2022, ולמטה- הפרש טמפרטורות בין שנת 2023 ל-10 שנים קודמות. יש לשים לב להבדלים בסקאלת הצבעים בשני האיורים העליונים.

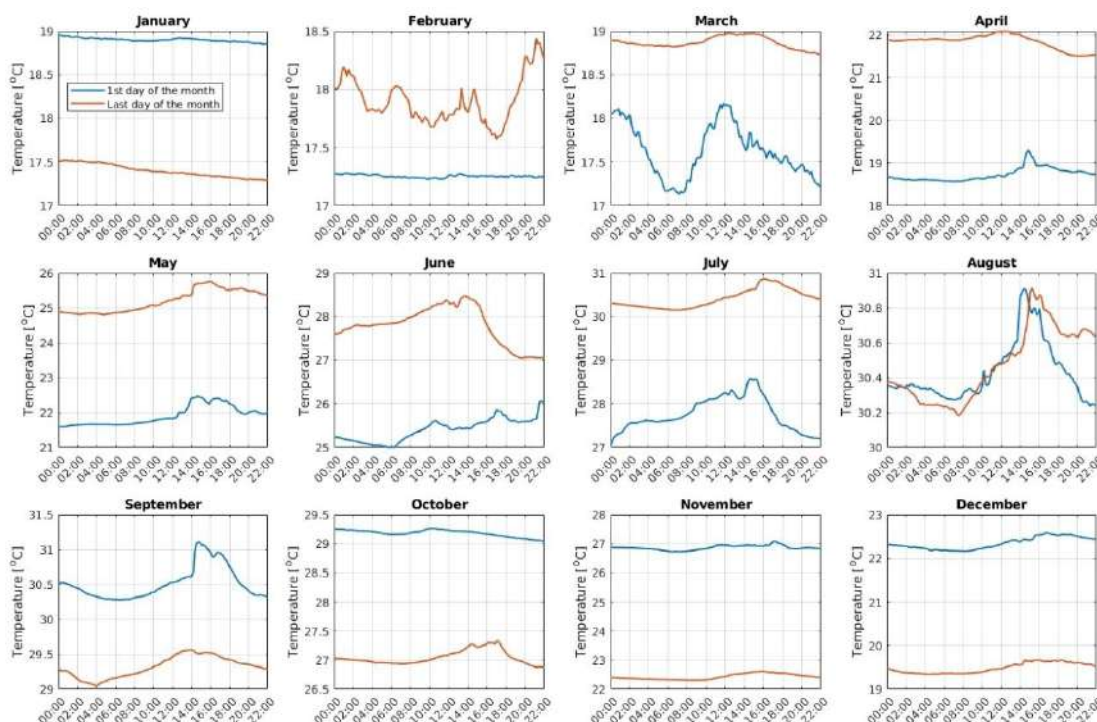


איור 8: (A) ממוצע טמפרטורות חודשי של עמודת המים העליונה (0-5 מ'). (B) ממוצע טמפרטורות חודשי של עמודת המים התחתונה (35-40 מ'). הקו האדום המקווקו מייצג את נתוני שנת 2023, הקו הכחול מהווה את ממוצע 10 השנים האחרונות, והאזור הסגול מהווה את סטיית התקן של 10 השנים האחרונות.

Temperature at All Stations (2023)



איור 9: פיזור מרחבי של ממוצע טמפרטורות חודשי בתחנות השונות באגם בשנת 2023.



איור 10: טמפרטורה ממוצעת על פני ה-10 מטר העליונים, לאורך היממה הראשונה (קו כחול) והאחרונה (קו כתום) של כל חודש בשנת 2023 משרשרת התרמיסטורים בתחנה A.

2.6 ניטור מטאורולוגיה של האגם

במימון רשות המים

יעל אמיתי



- חודשי סוף שנת 2023 היו חמים בכ-3 מעלות בממוצע מהעשור הקודם.
- גלי חום ממושכים ביולי ואוגוסט, אשר פקדו את כל הארץ, נראו במדידות טמפרטורת האוויר במרכז הכנרת.
- החודשים מרץ ואפריל היו גשומים מהממוצע באופן ניכר. עם כמויות גשם גדולות יותר בצפון הכנרת מאלו של דרום הכנרת.

ענן ממטיר ישירות על הכנרת. צילום: עוז צברי, 8 פברואר 2023.

מטרה

מטרת הניטור המטאורולוגי היא להבחין במגמות מטאורולוגיות בסביבת הכנרת ולהבין את השפעתם על התנאים הסביבתיים באגם. בנוסף, מטרת הניטור הינה לזהות אירועים מטאורולוגיים חריגים במהלך השנה. ניטור שינויים קצרי וארוכי טווח בסביבה הפיסיקלית של האגם חשובים להבנת התהליכים האקולוגיים המתרחשים באגם.

רקע

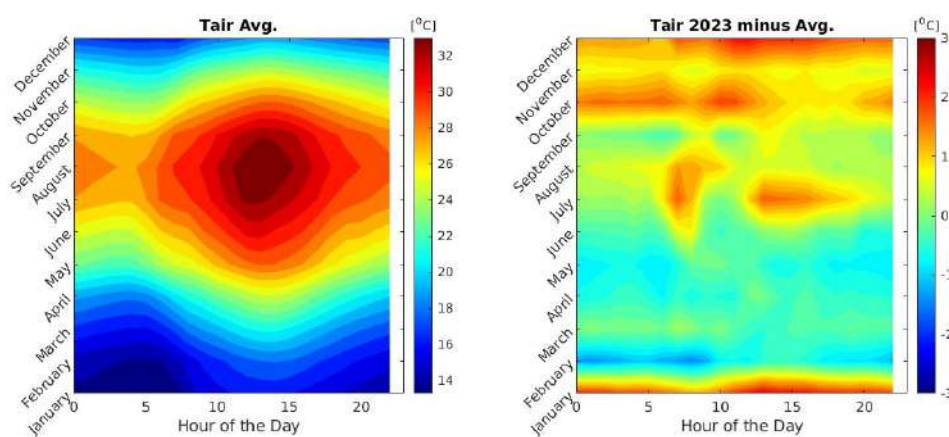
באחריות המעבדה לחקר הכנרת נמצאות שלוש תחנות מטאורולוגיות פעילות כיום:

- תחנת גינוסר- הוקמה ב- 1996 בטבחה ועברה ב- 2007 למזח של קיבוץ גינוסר.
- אקו-ראפט A – פעילה מ- 2003 בשיתוף עם השירות המטאורולוגי.
- עין גב- משנת 2021. התחנה ממוקמת במעגן של קיבוץ עין גב.

כל התחנות מודדות בתדירות של 10 דקות את המשתנים הבאים: טמפרטורת אוויר, לחות יחסית, מהירות וכיוון רוח. חלק מהתחנות מודדות גם קרינה ארוכת גל וקרינה קצרת גל. כמו כן, בסיס הנתונים של הכנרת מכיל שתי תחנות מטאורולוגיות באחריות השירות המטאורולוגי בצמח ובבטיחה אשר מודדות, בנוסף למשתנים האחרים, גם משקעים. תחנה מטאורולוגית על רפסודה מיני -אקוראפט G הייתה פעילה בין השנים 2020-2022 אך היא אינה פעילה כיום.

תוצאות ודין

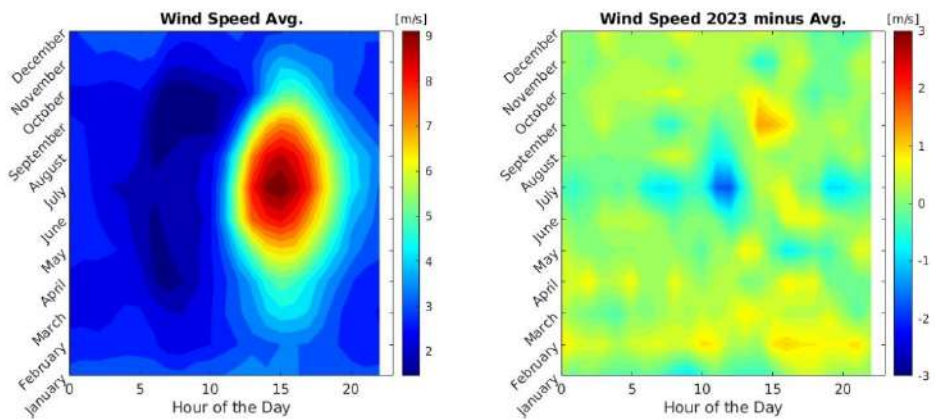
סיכום המדידות המטאורולוגיות לשנת 2023 מיוצג על ידי ממוצע שעתי (תנודה יומית) על פני חודשי השנה (תנודה עונתית) של טמפ' האוויר (איור 11), עוצמת הרוח (איור 12) והקרנה קצרה וארוכת הגל (איור 13). באיורים 11 ו-12 ישנה השוואה בין ממוצע על פני 2022-2013 (משמאל) לבין שנת 2023 (הפרש מהממוצע, מימין) בהתבסס על המדידות בתחנה המטאורולוגית ב-A. באיור 13 מוצגים ההפרשים בין הממוצע הרב שנתי על פני 2022-2015 לבין שנת 2023, קרינה קצרת הגל וארוכת הגל שנמדדו בתחנה המטאורולוגית של גינוסר. איור 14 מסכם את המשקעים החודשיים הצבורים בתחנות מצפון (בטיחה) ומדרום (צמח) לכנרת.



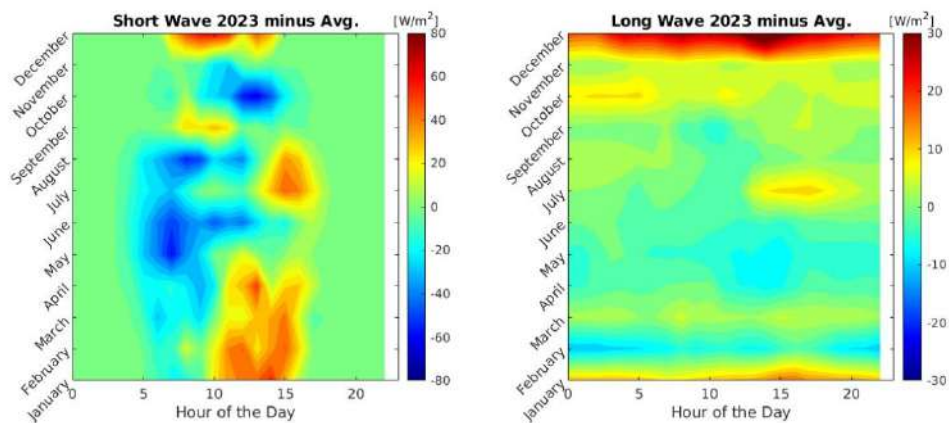
איור 11: ממוצע שעתי בכל חודש של טמפ' האוויר בממוצע על פני 2022-2015 (שמאל) וההפרש בין הממוצע לשנת 2023 (ימין).

שנת 2023 התאפיינה בגלי חום ממושכים ביולי ואוגוסט (אנומליה חיובית - אדום) ובמזג אוויר קר מהרגיל בגלל הסופה "ברברה" בתחילת פברואר (אנומליה שלילית - צבע כחול: איור 11 מימין). חודשים אוקטובר ודצמבר היו חמים מהממוצע באופן מובהק כך שבדצמבר טמפ' האוויר היו גבוהות בכ-3 מעלות לאורך כל שעות היממה. כמו כן ניתן לראות שבאביב (מרץ עד מאי) היה קר מהממוצע הרב שנתי בכמעלה אחת לאורך כל היום.

משטר הרוחות הממוצע האופייני לכנרת שבו נושבות רוחות מערביות חזקות בשעות אחה"צ של חודשי הקיץ, המגיעות לכנרת בגלל הבריזה הים-תיכונית, החל ממאי ועד לספטמבר נראה בבירור מערך הממוצע הרב שנתי (איור 12 משמאל). מההפרש בין 2023 לממוצע הרב שנתי (איור 12 מימין) ניתן לראות באמצע ספטמבר אנומליה חיובית, כלומר רוחות חזקות יותר, אשר כנראה קשורות לאירוע גשם חריג שפקד את ישראל בעקבות מעבר הסופה "דניאל" באזור יוון.

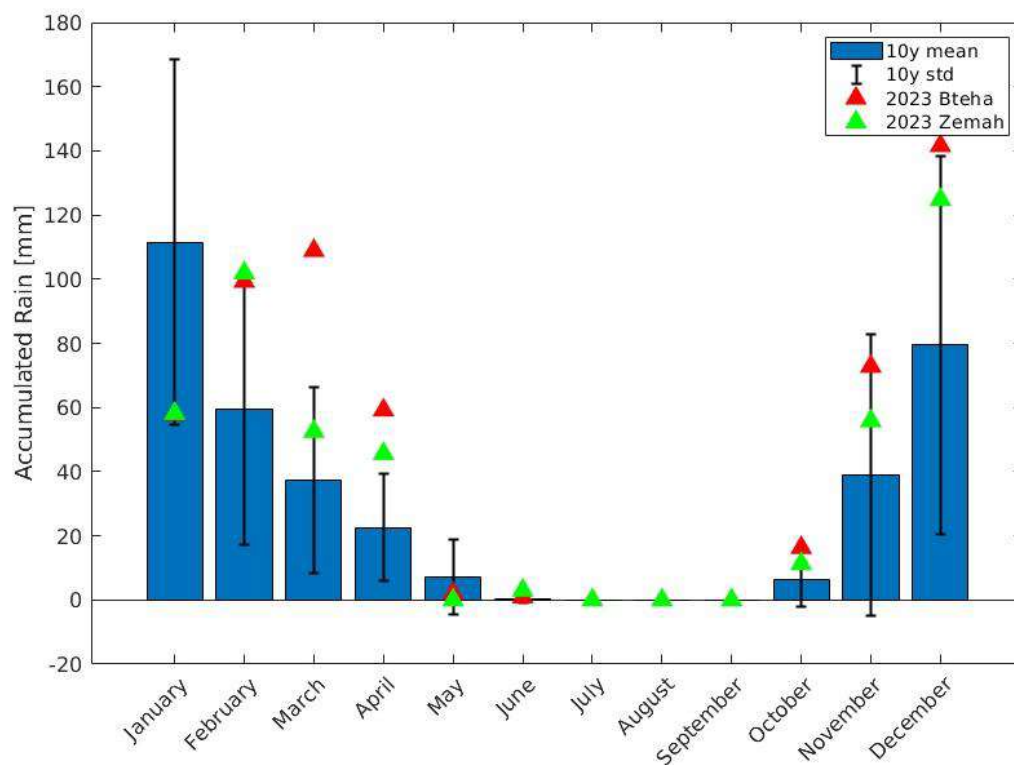


איור 12: ממוצע שעתי בכל חודש של עוצמת הרוח בממוצע על פני 2015-2022 (שמאל) וההפרש בין הממוצע לשנת 2023 (ימין).



איור 13: הפרש בין שנת 2023 לבין ממוצע שעתי בכל חודש על פני 2015-2022, של הקרינה ארוכת הגל (מימין) ושל הקרינה קצרת הגל (משמאל).

ניתן לראות שהקרינה ארוכת הגל שנמדדה בתחנת גינוסר בדצמבר 2023 הייתה גבוהה משמעותית מהממוצע הרב שנתי (איור 13 מימין). תצפית זו יכולה להסביר את העובדה כי טמפרטורת האוויר הייתה גבוהה משמעותית בדצמבר 2023 (איור 11). ההפרשים בקרינה קצרת הגל מראים אנומליות חיוביות ושליליות הפזורות לאורך השנה ולאורך היממה ולא מעידים על מגמה מובהקת. בבחינת הגשם הצבור בתחנות באחריות השירות המטאורולוגי הנמצאות בצפון ובדרום הכנרת נראה כי סופת "ברברה" בחודש פברואר הביאה לאזורינו משקעים גבוהים מהמוצע. כמו כן, חודשי האביב היו יותר גשומים משמעותית בשנת 2023 בשל מספר מערכות גשמים ארציות. כך, אף נראית חריגה בכמות המשקעים מסטיית התקן העשר שנתית. בנובמבר ודצמבר נראה כי היו יותר משקעים מהממוצע אבל עדיין בטווח סטיית התקן העשר שנתית. ניתן אף להבחין כי התחנה בצפון הכנרת זכתה ליותר גשמים מזו שבדרומה, מה שמעיד על פיזור משקעים לא הומוגני במרחב האגם.



איור 14: ממוצע רב שנתי של המשקעים הצבורים החודשיים בתחנות המטאורולוגיות בצמח ובבטיחה (עמודות כחולות) וסטיית התקן על פני 2013-2022. הגשם החודשי המצטבר בבטיחה (משולשים אדומים) ובצמח (משולשים ירוקים) מוצג עבור שנת 2023.

לסיכום, מגמת התחממות האוויר מעל הכנרת ממשיכה לתוך שנת 2023 ביתר שאת. המגמה מוסברת בחלקה על ידי הבדלים בקרינה. בנוסף, חודשי שנת 2023, מלבד ינואר, היו יותר גשומים משנה ממוצעת.

2.7 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. תנודות מפלס גדולות באגם בשנים האחרונות השפיעו על תהליכי ההרחפה של הסדימנטים ושינויים בפזור המרחבי של החלקיקים. אלה גרמו לשינויים בולטים במשטר הסדימנטציה באזורים השונים של קרקעית האגם. ניתן לקשור את השינויים בקצבי הסדימנטציה לתנודות בעומסי הסדימנטים המגיעים לאגם מאגן ההיקוות ובתנודות המשמעותיות במפלס פני האגם.

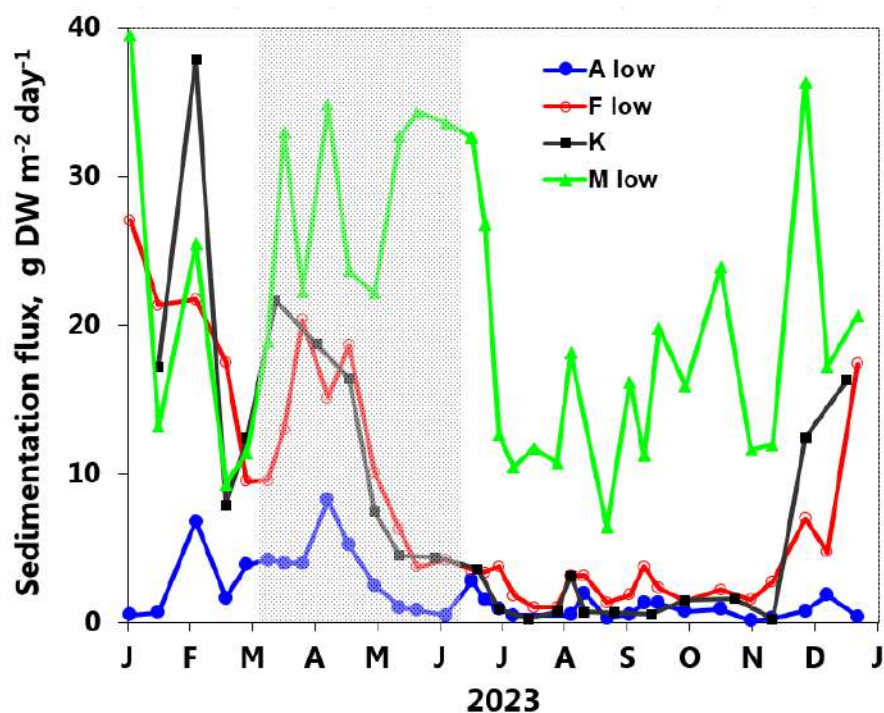
שיטות

קצבי סדימנטציה נמדדו ב- 4 תחנות באגם: A, F, M, ו- K. המלכודות הסטנדרטיות מורכבות מ- 4 צינורות בעלי קוטר של 5 ס"מ ואורך - 50 ס"מ. בתחנה A מוקמה המלכודת התחתונה 3.3 מ' מעל הקרקעית ובתחנה F מוקמה המלכודת התחתונה 1.8 מ' מעל הקרקעית, בעוד שבתחנות M ו- K המלכודת 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 ריכוזי נוטריינטים בחלקיקים.

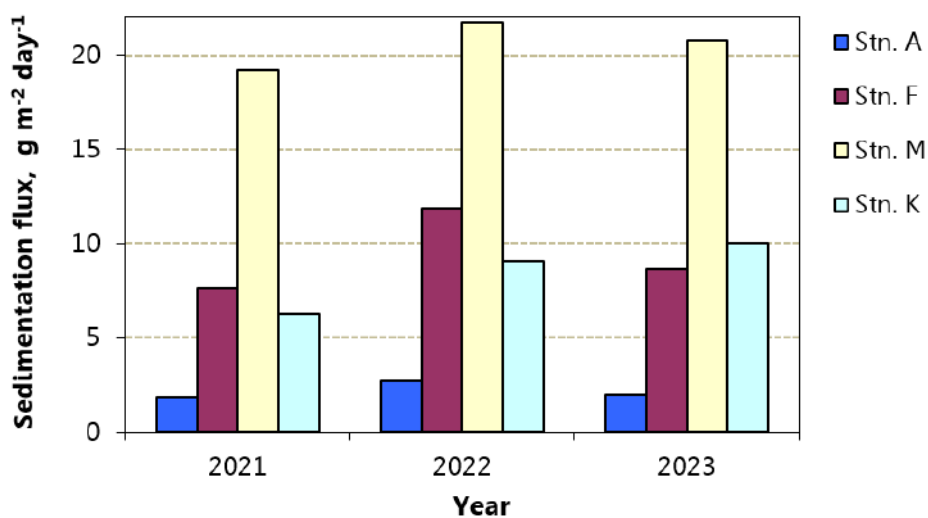
תוצאות ודין

הדינמיקה של קצבי הסדימנטציה בכנרת בשנת 2023 מוצגת באיור 15. בתחנה העמוקה – A, קצבי הסדימנטציה היו נמוכים בשיעור ניכר ביחס לאלה שנמדדו בשאר התחנות. במהלך חורף-אביב 2023 נצפו שיעורי שיקוע גבוהים בכל התחנות אשר נגרמו כתוצאה מהשקעת חומר אלוכטוני שהוסע מאגן ההיקוות עם השיטפונות (מתחילת פברואר עד אמצע אפריל) ובשל שקיעת קלציט מסיבית (מתחילת מרץ עד תחילת יוני). בתחנות A, F ו- K נצפה קצב שיקוע מוגבר עד תחילת מאי, בעוד שבתחנה הרדודה ביותר (M) נמדד קצב שיקוע גבוה עד סוף יוני. אי לכך, קצבי הסדימנטציה פחתו בכל התחנות כך שבמהלך הקיץ – סתיו נעו בין 0.2 ל- 4 גרם/מ"ר בתחנות A, F ו- K ובין 6 ל- 24 גרם/מ"ר בתחנה M. בסוף הסתיו (סוף נובמבר ודצמבר), נמדדו קצבי סדימנטציה גבוהים בתחנות F ו- K כתוצאה מההעמקה המהירה של התרמוקלינה והרה-סוספנסיה העוקבת של סדימנטים מהקרקעית בקרבת תחנות אלה (איור 15).

ב- 2023 קצבי הסדימנטציה הממוצעים בתחנות A, F, K, ו- M היו 1.9, 8.6, 10.3 ו- 20.8 גרם חומר יבש/מ"ר/יום, בהתאמה (איור 16). בשנים 1999-2022 קצבי הסדימנטציה הממוצעים הרב-שנתיים בתחנות A, F, ו- M היו 3.1 ± 0.2 , 9.4 ± 0.5 ו- 13.5 ± 1.1 גרם חומר יבש/מ"ר/יום, בהתאמה. בשנים 1999-2022 קצב הסדימנטציה הממוצע הרב-שנתי בתחנה K היה 7.7 ± 0.5 גרם חומר יבש/מ"ר/יום. בשנת 2023 קצבי הסדימנטציה בתחנות K ו- M היו מעט גבוהים מהממוצעים הרב-שנתיים שלהם, בעוד שקצבי הסדימנטציה בתחנות A ו- F היו נמוכים מהממוצעים הרב-שנתיים.



איור 15: דינמיקה עונתית של קצבי הסדימנטציה בתחנות השונות ב- 2023. תקופת השקעת CaCO_3 מתחילת מרץ עד תחילת יוני 2023.



איור 16: קצבי סדימנטציה ממוצעים במיקומים השונים ב- 2021 - 2023.

2.8 ממצאי הניטור הכימי

במימון רשות המים

ירון בארי שלזין, אדית לייבוביץ,

יורי לצ'ינסקי, מיקי שליכטר



צילום: עוז צברי דר. ספינת החרמונה בכנרת.

- באפילימניון נרשמה התפתחות מוקדמת באביב של שיאי חמצן מומס, ניטראט ומוצקים מרחפים ביחס לשנה הקודמת.
- נצפו שיאים מוקדמים באפילימניון של חנקן אורגני וכללי מינואר ועד אפריל, החורגים מעל לממוצע הרב שנתי.
- עבור רב הפרמטרים ובשתי השכבות- הריכוזים ומגמות ההתפתחות היו דומות ב- 2023 הרבה יותר לממוצע הרב שנתי בהשוואה למגמות של השנה הקודמת, 2022.

מטרת המחקר

ניטור שוטף של הגיאוכימיה של האגם.

רקע

כמו בשנים קודמות, מוצגים נתוני הניטור הכימי משכבת האפילימניון וההיפולמניון בתחנה A בשנת 2023 בהשוואה לממוצעים רב שנתיים (עשר שנים: 2021-2012) וכן לשנה הקודמת, 2022.

תוצאות ודיון

להלן סיכום הממצאים לשנת 2023 (ראה איור 17).

אלקליניות וסידן

התפתחות ערכי האלקליניות והסידן בשכבת האפילימניון בחצי הראשון של 2023 ובעיקר הירידה החריפה בערכים אלו באביב מיוחסת בדרך כלל לשקיעת קלציט בעקבות פעילות ביולוגית באביב. בשנת 2023 הירידה הייתה מתונה יותר ביחס לשנה הקודמת, 2022, בעיקר בקלציום. מגמת ההתפתחות של אלקליניות וסידן בשכבת ההיפולמניון דמתה באופן כללי למגמה הרב שנתי ולערכי השנה הקודמת.

כלוריד:

ערכי הכלוריד באפילימניון ובהיפולימניון היו נמוכים מהממוצע הרב שנתי ומייצגים שנה טובה מבחינת משקעים כמו שנת 2022. כמו כן, יש להתחשב בכך שהממוצע הרב שנתי מייצג עשור ובו 5 שנות בצורת באגן ההיקוות של הכנרת. ערכי המינימום של כלוריד באגם היו באפילימניון במאי (כ- 251 מג"ל). השנה הקלנדרית הסתיימה בערכי כלוריד של 255 מג"ל בהיפולימניון ו- 262 מג"ל באפילימניון.

חמצן:

ערכי החמצן בשנת 2023 באפילימניון הראו שיא מוקדם בסביבות מרץ שהיה קצר בהיקפו וממרץ נצפתה ירידה מתונה בערכי החמצן המומס אשר הסתיימה ביולי-אוגוסט, בדומה לשנה הקודמת ומאוחר יחסית לממוצע הרב שנתי. מיולי -אוגוסט והלאה התבנית באפילימניון דומה לממוצע הרב שנתי. מגמת התפתחות החמצן בשכבת ההיפולימניון דמתה לממוצע הרב שנתי מבחינת ההיקף וגובה ערכי החמצן ושיא הערכים בפברואר.

ערכ הגבה (pH):

ערכי הגבה באפילימניון במהלך שנת 2023 תאמו את הערכים והמגמות של שנת 2022 וכן את המגמות הרב שנתיות. לעומת זאת בהיפולימניון, ערכי ה- pH נשארו קבועים יחסית רוב השנה חזת לעומת המגמה הרב שנתית המראה ירידה בערכי ה- pH ממרץ ועד יולי-אוגוסט.

זרחן:

ערכי זרחן כללי, זרחן מומס וזרחן מוגיב באפילימניון של שנת 2023 היו דומים לערכים של הממוצע הרב שנתי וכן לערכי השנה הקודמת 2022, אך התאפיינו בתנודתיות חודשית רבה יותר ביחס לשנת 2022. בהיפולימניון תחילת העליה בערכי זרחן, כל הצורונים ביוני ומגמת ההתפתחות בהמשך ועד סוף השנה הייתה דומה למגמות הרב שנתיות ושונה מהמגמות של התפתחות מאוחרת שנצפתה בשנת 2022. בנוסף, ערכי 2023 היו בשיא העליון של הממוצע הרב שנתי.

חנקן:

ערכי חנקן כללי ואורגני באפילימניון של 2023 הראו שיאים מוקדמים גדולים ביחס לשנה שעברה וביחס למגמה הרב שנתית. שיאים אלו בעיקר בסביבות אפריל, לא נצפו בצורונים האנ-אורגניים ולכן עיקר התרומה של שיא החנקן הכללי היה חנקן אורגני. גם בהיפולימניון נראו ריכחים גבוהים בצורה אנומלית של חנקן אורגני מינואר ועד אפריל ובמידה מסויימת גם של חנקן כללי.

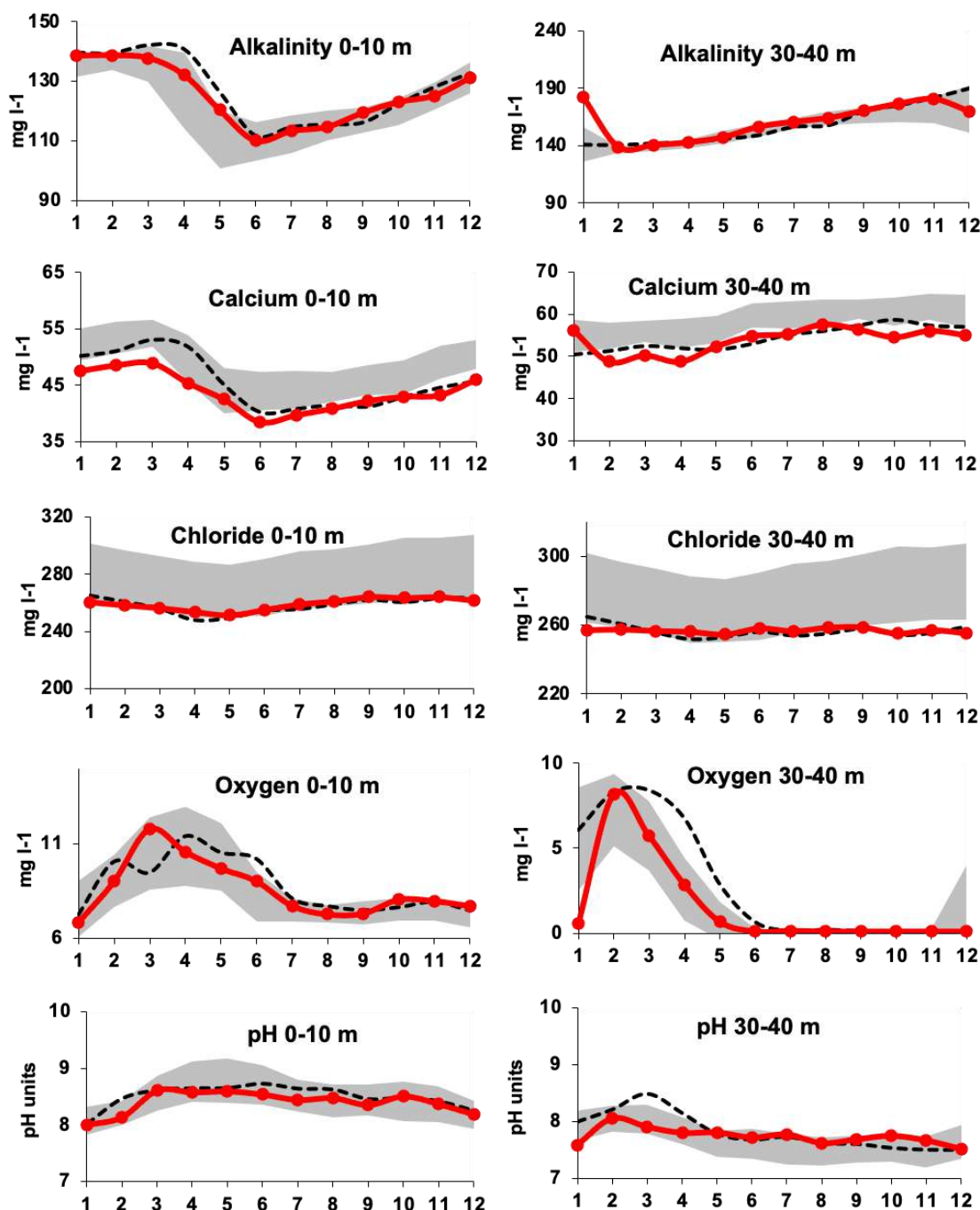
הצורונים האנ-אורגניים אמוניים, ניטריט וניטראט בשתי השכבות הראו לרוב מגמות דומות לממוצע הרב שנתי למעט אי קיום שיא שני של ניטריט בהיפולימניון ושיא מאוד קצר של ניטראט, בפברואר באפילימניון. למרות סטיות אלו- המגמות של הצורונים האנ-אורגניים בשנת 2023 היו דומות הרבה יותר למגמות הרב שנתיות בהשוואה למגמות של שנת 2022.

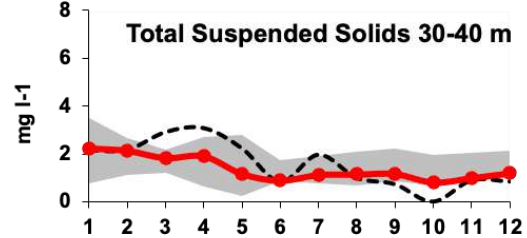
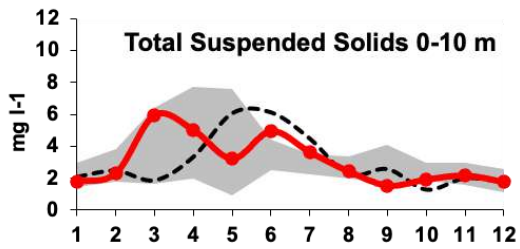
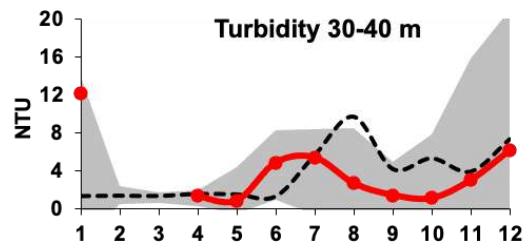
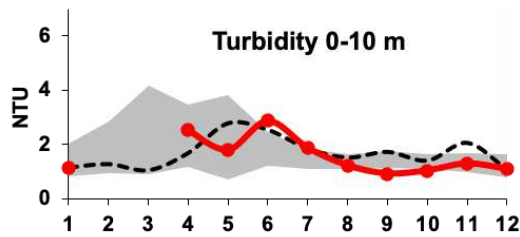
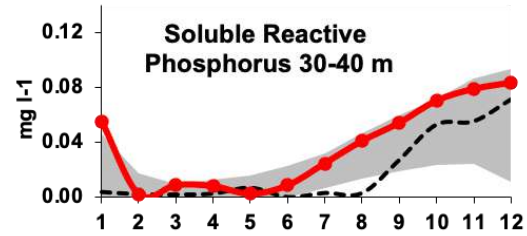
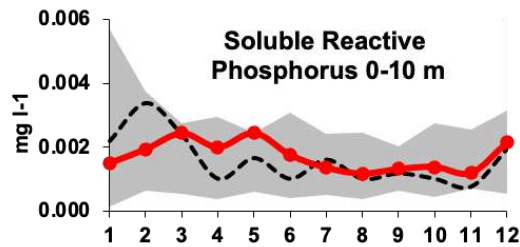
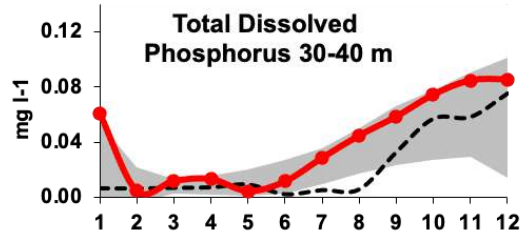
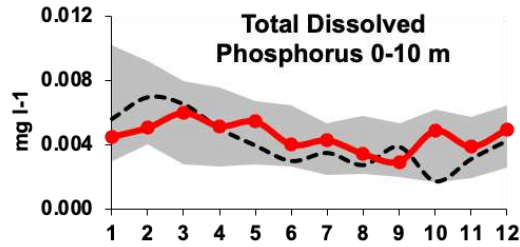
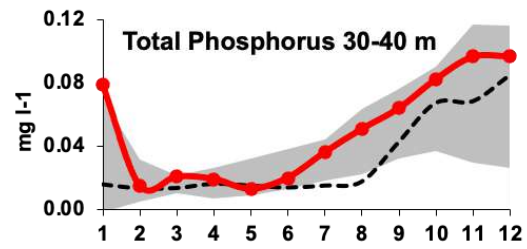
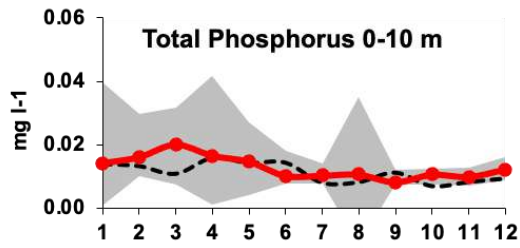
עכירות ומוצקים מרחפים:

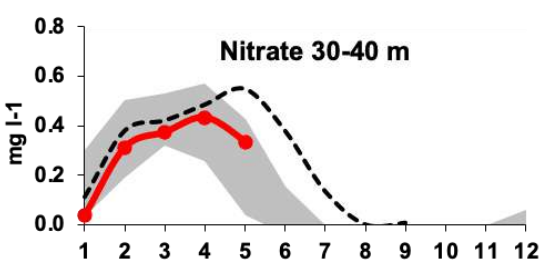
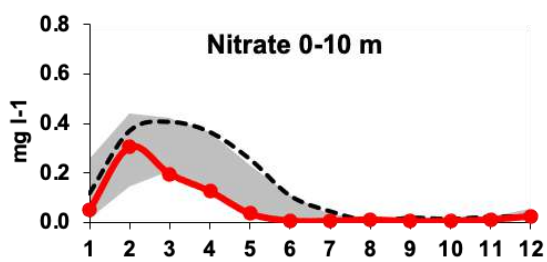
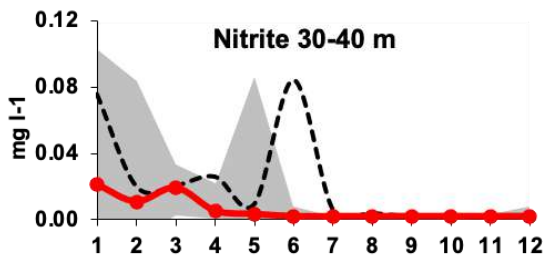
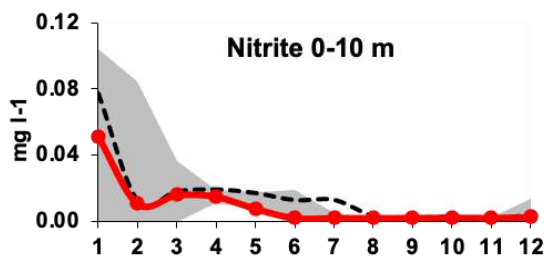
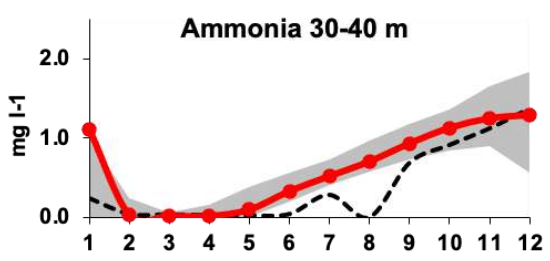
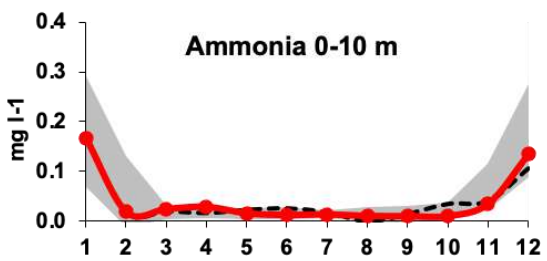
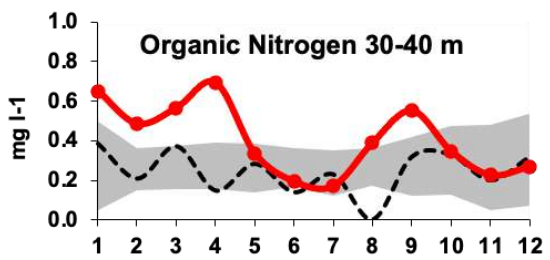
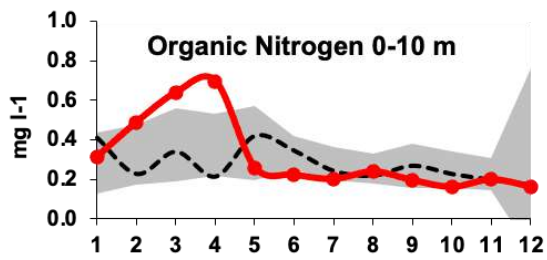
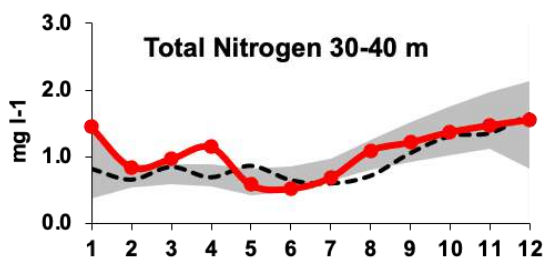
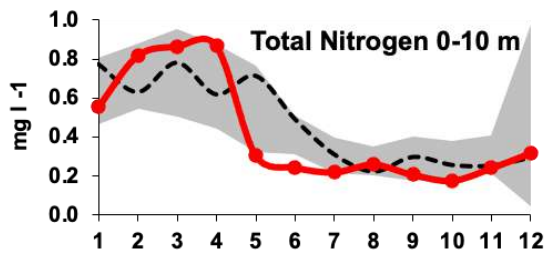
ערכי עכירות וסך המוצקים המרחפים בשנת 2023 בשתי השכבות הציגו מגמות הדומות למגמה הרב שנתית של העשור הקודם כאשר עבור סך מוצקים מרחפים באפילימניון נראה שיא מוקדם יחסית השנה במרץ ושיא קטן שני ביוני – האחרון דומה לשיא העיקרי של השנה הקודמת 2022. עבור עכירות, אפיון המגמות השנתיות מעט קשה יותר עקב מחסור בנתונים בעיקר במחצית הראשונה של השנה.

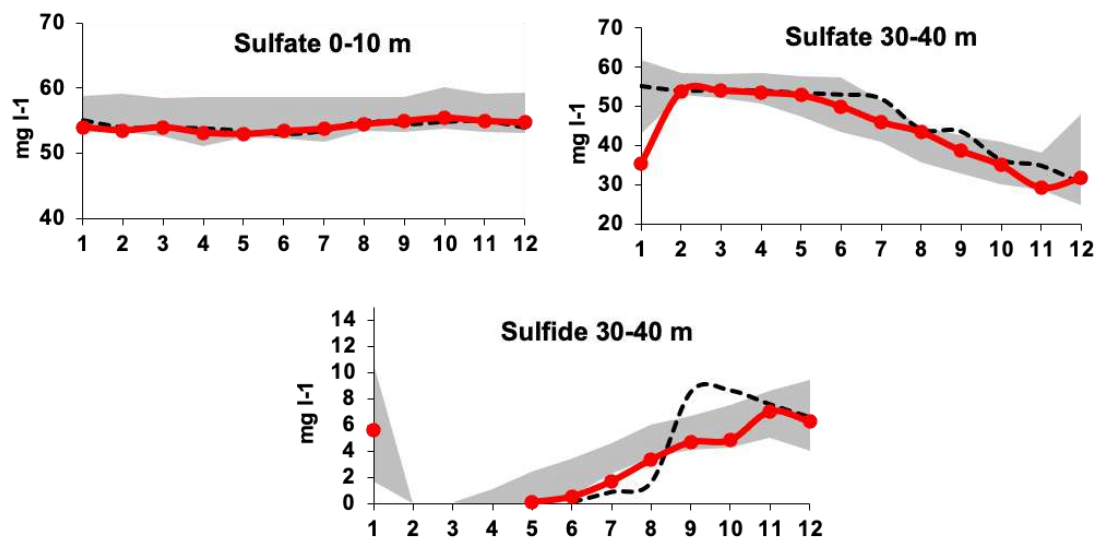
גופרית:

סולפאט באפילימניון של 2023 הציג יציבות לאורך השנה סביב ערכים של כ- 55 מג"ל, בדומה לממוצע הרב שנתי ולשנה הקודמת, 2022. עבור סולפאט, המגמה בהיפולימניון בשנת 2023 הייתה דומה יותר למגמות הרב שנתיות מאשר בשנת 2022. הירידה בסולפאט התחילה מוקדם הרבה יותר (סביב מאי) והייתה רציפה ופחות גלית ביחס לשנת 2022. גם העליה הקבילה בסולפיד הייתה דומה יותר למגמה הרב שנתית, התחילה במאי ועלתה באופן רציף. בנוסף, מגמת העליה הייתה פחות קופצנית בהשוואה למגמה בשנת 2022. עם זאת, הערכים היו בטווח הנמוך של הממוצע הרב – שנתי.







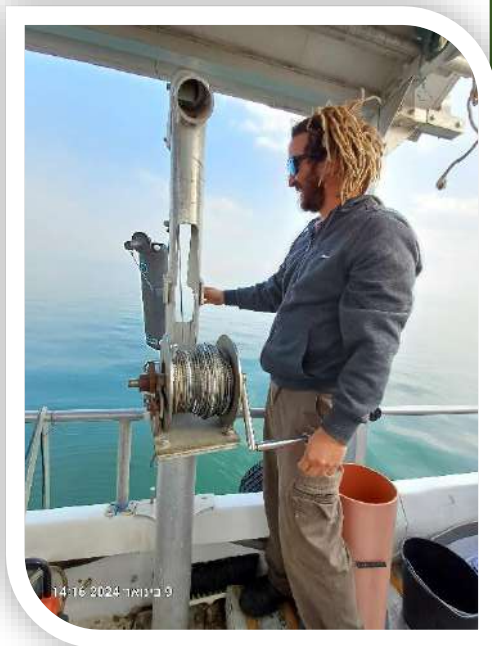


איור 17: ממוצעים חודשיים של ריכוזי הפרמטרים השונים בכנרת בשנת 2023 (קו אדום) בהשוואה לשנה הקודמת (2022, קו שחור מרוסק) ולממוצע הרב שנתי $\pm$ סטיית תקן אחת של עשר השנים שלפניה (2011-2020, רקע אפור). הנתונים מוצגים בנפרד עבור שכבת המים העליונה (1-10 מ' עומק) והתחתונה (30-40 מ' עומק).

2.9 ניטור מתכות כבדות בכנרת

במימון רשות המים

ירון בארי-שלוין, גלית שרעבי (המכון
הגיאולוגי)



- ברב המוחלט של דוגמאות המים בכנרת, ריכוז המתכות היה נמוך מאוד ביחס לערך תקן מי שתיה.
- חריגות של אבץ- Zn מומס במי האגם נמצאו במספר מקרים גדול יותר מאשר בשנת 2022 ובהתאמה מדאיגה למגמה הרב שנתית של עליה בחריגות אלו.
- מגמות התפתחות פרופיל האבץ - Zn באגם דומות לשנים הקדומות ורומזות על תרומה ממקור אטמוספרי בתקופת סוף הקיץ- סתיו.
- חריגות מעטות בערכי אלומיניום- Al הינן רק בפאזה החלקיקית בשפכי הירדן והמשושים.

דיגום מתכות כבדות ינואר 2024. צילום: עוז צברי-דר

מטרת המחקר

ניטור שוטף של מתכות קורט באגם ובמוצא הירדן והמשושים.

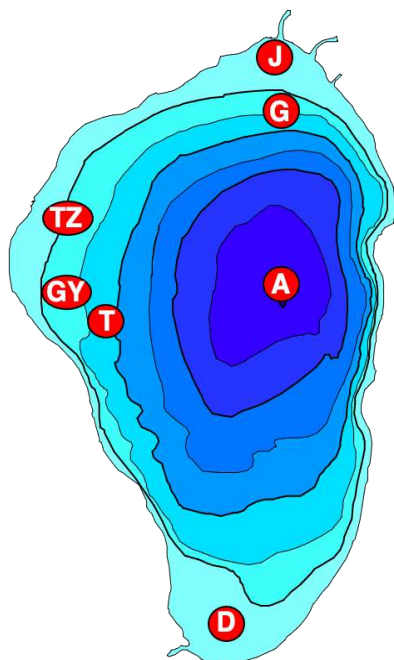
רקע

הדו"ח הנוכחי מציג את פעולת ניטור מתכות הקורט באגם הכנרת לשנת 2023. עבודה זו מתבצעת במסגרת פרויקט הניטור הרב שנתי, הנעשה בשיתוף פעולה בין המכון הגיאולוגי הישראלי לבין המעבדה לחקר הכנרת, חיא"ל, ובמימון 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.

שיטות

פעולת הניטור השנה כללה חמישה פרופילי עומק במרכז האגם (תחנה A) בפברואר, אפריל, יוני, אוקטובר ודצמבר וכן מספר פרופילים בתחנות שונות במרחב האגם: בדרומו (D) בצפונו (G) בין שפך

הצלמון לשאיבת טבריה (GY) ובשפך הירדן (J). במקביל לכל סט דיגום -נדגמו מי שפך הירדן (גשר אריק) ושפך המשושים (איור 18).



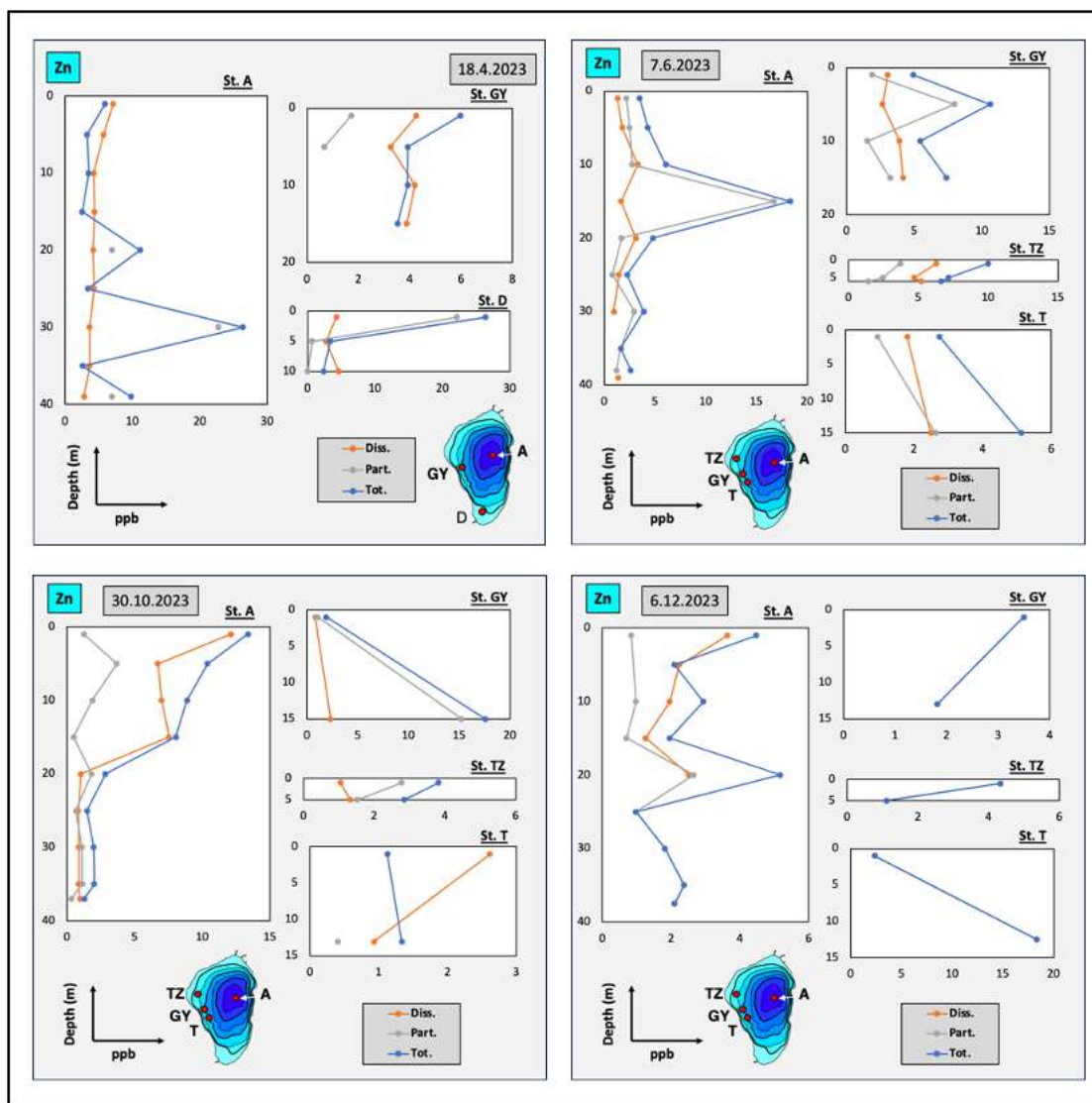
איור 18: מפת הכנרת עם תחנות הדיגום.

דוגמאות מים באגם נאספו באמצעות משאבה פריסטלית (Masterflex L/S® Easy-Load Head) במרווחים של 5m וברזולוציה גבוהה יותר בתקופת השיכוב, סביב האוקסיקלינה. דוגמאות המים נאספו בבקבוקי 125mL LDPE שנשטפו מראש עם HNO_3 15.6 N (1:4), ANALYTICAL GRADE, כאשר עבור ריכוז מתכות כללי נוספו מיד 15mL חומצה חנקתית מרוכזת ($\text{Backer INSTRA-ANALYZED HNO}_3$). 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-2 ס"מ. מי חללים הופרדו ע"י צנטריפוגה במהירות של 4000 סל"ד, הועברו בסיון 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 הנותר עבר ייבוש בליאופיליזר ונטחן באמצעות מכתש קרמי. אנליזות המים בוצעו באגף לגיאוכימיה וגיאולוגיה סביבתית במכון הגיאולוגי. הדוגמאות הוחמצו עם חומצה חנקתית ו-5ppm Sc 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 ודין

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 במספר מקרים התקבלו באבץ- Zn בפאזה המומסת בעיקר בתחנה A (איור 19) ובשפכי הירדן והמשושים (לא מוצג). היסוד אבץ- Zn מראה לאורך השנים מתחילת המדידות בשנת 2000 עליה מתונה בריכוזים, כך שבשנים האחרונות מתגלות שוב ושוב חריגות ברמה מוגבלת בריכוז יסוד זה בפאזה המומסת במי האגם. חריגות נוספות בערכי אלומיניום- Al נמצאו מספר פעמים לאורך השנה במוצאי הירדן והמשושים, אולם חריגה זו מוגבלת אך ורק לפאזה החלקיקית. גם תופעה זו אינה ייחודית לשנת 2023.

התפתחות פרופילי נבחנה גם השנה בפירוט (איור 19) ומראה בסך הכל מגמות דומות לשנים קודמות – אם כי בין השנים ישנן וריאציות מסויימות בתזמון האירועים ובהיקפם. איור 19 מראה את ההתפלגות ריכוזי אבץ- Zn בשלושה מימדים: במרחב האגם בתחנות שנמדדו, בעומק, ובזמן עבור מספר תחנות: A במרכז האגם, D בדרום, TZ GY ו- T במערב הכנרת. באפריל ריכוזי האבץ- Zn היו נמוכים (פחות מכ- 4 ppb) והומוגניים לאורך פרופיל העומק. פרופיל אפריל בתחנה A היה ברובו הומוגני אולם חלה קפיצה בריכוז הכללי בעומק 30 מטר המיוחסת ברובה לפאזה החלקיקית. העשרה זו עשויה לייצג תרומה של הירדן המגיע לתחנה A בעומק. פרופיל יוני הציג שיא מקומי התואם את מיקום התרמוקלינה, שוב בדומה לשנים קודמות. בדו"חות קודמים הסברנו מגמה זו בהרחפת סדימנטים ותנועה אופקית באזור המתלימניון. בהמשך השנה פרופילי אוקטובר ודצמבר הציגו מעט העשרה ובעיקר העשרה באפילימניון, אולם בעיקר בולטת עליה הדרגתית כלפי פני השטח. תופעה זו דומה לשנים הקודמות ומראה כנראה על תרומה ממרכיב אטמוספרי בתקופה של הקיץ המאוחר -סתיו. מידע אחר הקשור בניטור ומחקר של אבק שוקע בסביבת האגם בשנים האחרונות מצביע דווקא על תרומה עיקרית של זרחן מוקדם יותר בשנה. יחד עם זאת תרומה מאוחרת של אבק נושא אבץ עשויה לייצג שינוי במקור האבק בתקופה ביחס לאביב.



איור 19: פרופילי אבץ Zn, בעונות השונות ובתחנות השונות באגם מאפריל ועד דצמבר 2023. ריכח כללי: קו ועגולים כחולים, ריכח מומס: קו ועיגולים כתומים, ריכח חלקיקי (מחושב): קו מקווקו ועיגולים אפורים. התקן לאבץ במי שתיה עומד על 5 ppb.

2.10 שטפי זרחן באבק

במימון רשות המים

ירון בארי-שליון, אדית לייבוביץ, ניר קורן

- שטפי זרחן זמין באבק באתר ספיר: 44.5 טון/שנה ובתחנת כינר (עד יולי) 76.9 טון/שנה. ערכים גבוהים מאוד ביחס לשנים קודמות אשר מייצגים בעיקר שטפים אביביים מאד גבוהים.
- ממוצע לכנרת-65 טון/שנה, גבוה מאוד ביחס לממוצע הרב שנתי.
- מגמות רב שנתיות מראות עליה בכמות הזרחן באבק המגיע לכנרת וכן כי תחנת כינר מאופיינת בשטפים גבוהים מתחנת טבחה.



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 שגרתית של הזרחן באבק במסגרת מערך הניטור של האגם ומפברואר 2014 נוספה גם תחנה קבועה במזרח הכנרת (בכינר). על כן, זוהי השנה ההתשיעית בה קיימות שתי תחנות ניטור זרחן באבק סביב הכנרת. בשנת 2023, עקב בעיות טכניות, תחנת כינר נדגמה רק עד יולי.

שיטות

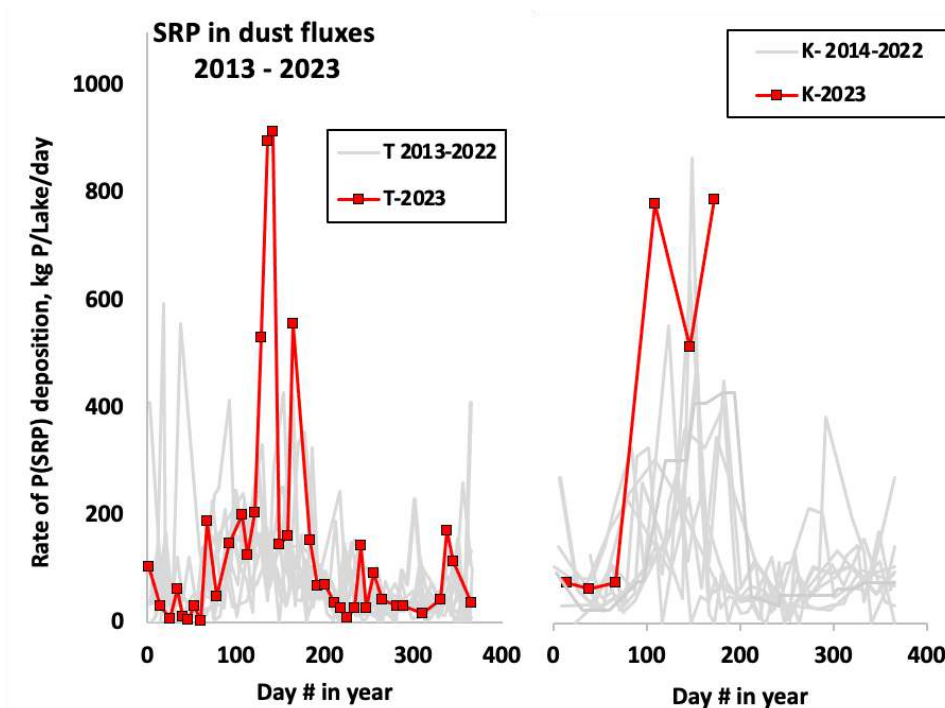
דיגום האבק מבוצע ע"י הצבת 4 דליים מלאים במים מזוקקים מורעלים בסודיום אזיד על גג המעבדה לחקר הכנרת (תחנת טבחה), וכן עוד 2 דליים בחוף כינר (תחנת כינר) במזרח האגם. נפח הדלי המלא הוא כ- 18 ליטר ושטח הפנים העליון שלו 650 סמ"ר. הדליים נדגמים למדידת זרחן מומס אחת לשבוע לערך ומים מזוקקים לקיזוז הפסדי אידיי מוספים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

תוצאות ודיון

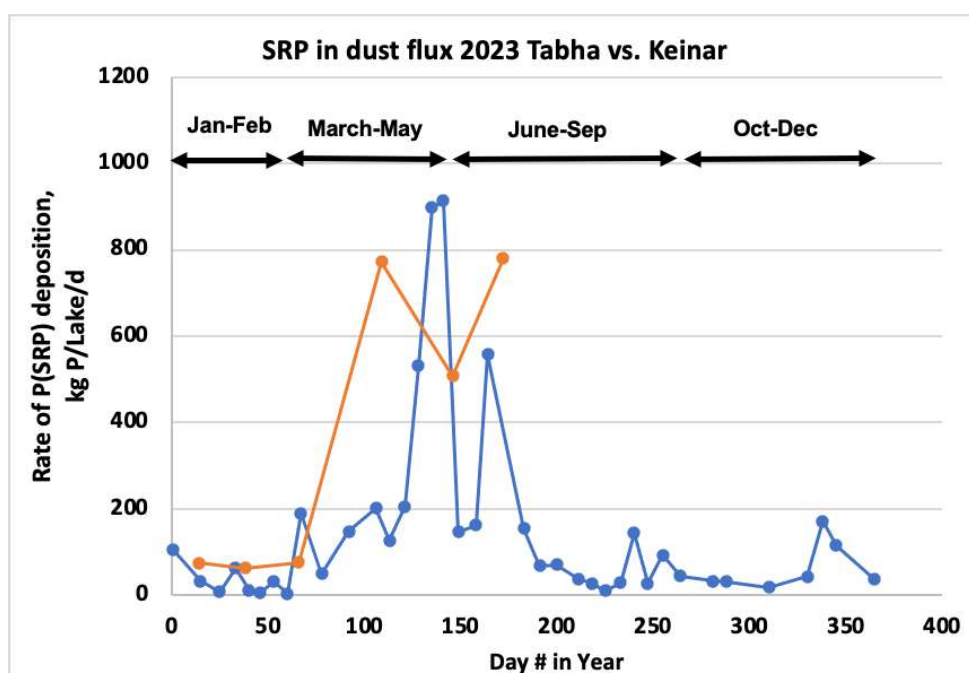
בתחנת טבחה ניתן להבחין בשתי תקופות עיקריות של שטפי זרחן באבק בשנת 2023 (איורים 20 ו-21): אביב מאוחר עד תחילת קיץ עם שטפים גדולים יחסית וקיץ-סתיו-חורף עם שטפים נמוכים יותר. שיא השטפים השנה בטבחה הינו מאמצע עד סוף חודש מאי, מוקדם משנים קודמות. אולם, השיא בשנת 2023 (כ- 900 ק"ג/יום) היה גבוה בהרבה מרב השנים, פי 3 משיאי 2022 ופי 1.5 משיאי 2016 ו- 2018 שאופיינו עד כה עם שיאי השטפים הגבוהים ביותר. עבור תחנת כינר המצב דומה ואף חריף יותר: אמנם השיא של כ- 500 עד 780 ק"ג/יום גבוה רק פי 1.8 משיא 2022 ואף נמוך מהשיא שנרשם ב- 2017, אלא שבשנת 2023 כמו גם ב- 2022 ושנים אחרות שיאי האביב נמשכו כחודשיים כך שסך השטפים באביב -תחילת הקיץ בתחנה זו היה גדול בהרבה משנים קודמות.

כמו בשנים קודמות – תקופת השיא של שטפי אביב - תחילת קיץ התאפיינה לא רק בשטפים גדולים יחסית אלא גם בתנודתיות רבה והיא נעה בין ערכים של כ- 50 עד כמה מאות ק"ג זרחן מומס זמין לאגם ליום. השוואה בין שנת 2023 לשנים הקודמות (איור 20) מראה כי למרות השינויים בגודל השטפים בתקופת האביב ומיקום שיא השטפים ביחס לרב השנים הקודמות, 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. הפסקת המדידות עקב בעיות טכניות בתחנת כינר לא מאפשרת לקבוע האם השטפים גם שם ירדו בקיץ למרות הרקע אולם בהתחשב בדמיון המגמות של תחנה זו השנה עד יולי ניתן להניח שאכן זה היה המצב.

כאמור שטפי אביב- תחילת קיץ גבוהים אפיינו את שתי התחנות בשנת 2023. סך השטף השנתי ל- 2023 ממדידות בתחנת בטבחה היה כ- 44.5 טון, כ- 150% ביחס לממוצע עבור השנים 2013-2022. בכינר השטף השנתי שנמדד עד יולי היה כ- 76.9 טון. עבור שאר השנה שטפי הזרחן הוערכו משטפי תחנת טבחה שכן התבנית הרב שנתית מראה כי מסוף הקיץ והלאה שטפי הזרחן יורדים ודומים בשתי התחנות. הערכה זו נותנת שטף שנתי בכינר של 84.7 טון פי שתיים ביחס לממוצע עבור השנים 2014-2022. ממוצע בין שתי התחנות לפי ערך זה לכינר נותן ערך של 64.6 טון /שנה זרחן מאבק לכנרת כ- 180% ביחס לממוצע הרב שנתי. בחינה של שטפים שנתיים לאורך שנות המדידה מצביעה על עליה ארוכת טווח (בין 2013-2014) בכמות הזרחן באבק המגיע לכנרת וכן כי תחנת כינר מאופיינת תמיד בשטפים גבוהים מתחנת טבחה.



איור 20: השוואת שטפי זרחן מומס עבור השנים 2013-2023 בתחנות טבחה (גג המעבדה לחקר הכנרת) והשנים 2014-2023 בתחנת כינר.



איור 21: שטפי זרחן מומס בכנרת כפי שנמדדו בתחנות טבחה (גג המעבדה לחקר הכנרת): קו כחול, וכינר: קו אדום-חום בשנת 2023.

2.11 קיבוע חנקן

במימון רשות המים

שירה ניניו, זהר פריימן, עכסה לופו,

נטלי קמפר

- קיבוע החנקן ב- 2023 התחיל מאוחר, התפרס על פני עונה קצרה והיה נמוך מהרגיל. נרשמו שני שיאים בקצבי הקיבוע, הראשון בסוף חודש ספטמבר והשני בתחילת נובמבר בזמן שיא פריחת הכחוליות אפניזומנון וצילינדרוספרמופסיס.
- בסך הכל קובעו באגם כ- 11 טון חנקן אטמוספרי במהלך פריחת הכחוליות הקייציות של 2023.



רקע

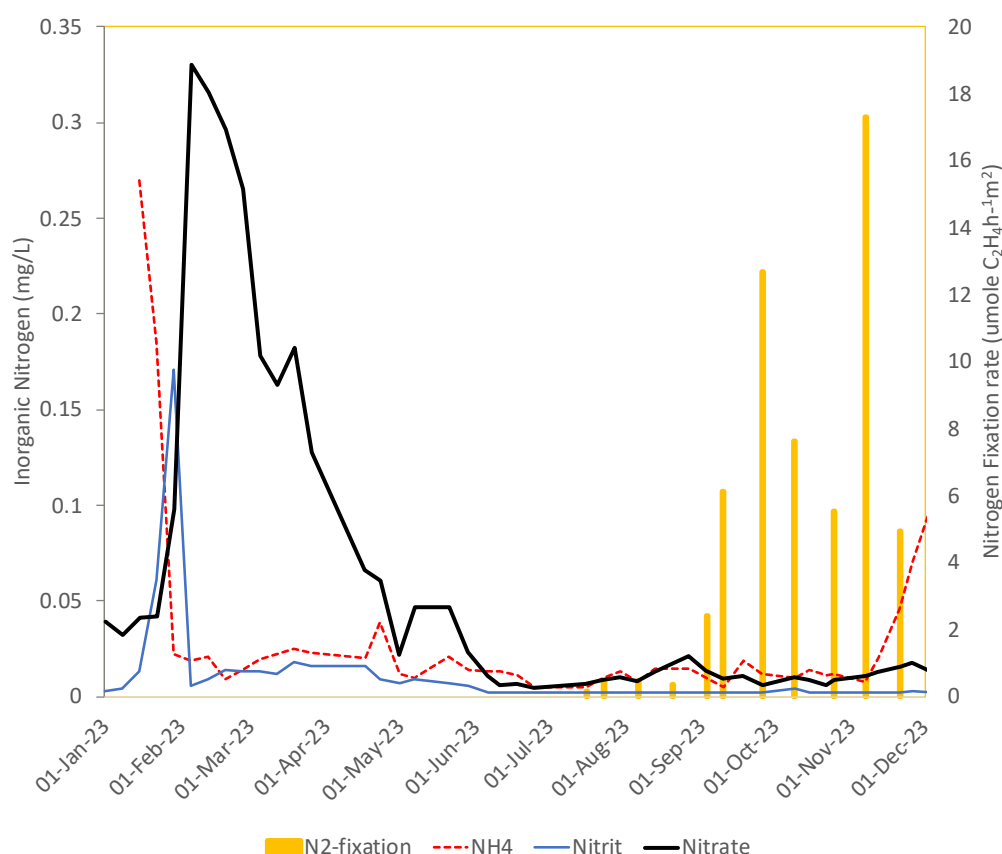
מאזן החנקן באגם מושפע ממספר תהליכים התורמים לכניסה ויציאה של חנקן מהמערכת האקולוגית של הכנרת. אחד מתהליכים אלו הינו תהליך ביולוגי של קיבוע חנקן אטמוספרי המתרחש בחודשי הקיץ, זמן בו ניתן לצפות בפריחות של ציאנובקטריה מקבעות חנקן כמו אפניזומנון וצילינדרוספרמופסיס המתרכזות באזור הפוטי. ללא מדידה אמינה של רכיב קיבוע החנקן במאזן האגמי, תחזיות ומאזנים עונתיים ושנתיים לוקים בהערכה חסרה. לפיכך, ישנה חשיבות רבה לבחינת התרומה היחסית של קיבוע החנקן במאזנים העונתיים במדידות סדירות של קיבוע חנקן בכנרת. מדידות של קיצבי 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 *situ in*. 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 בעבר שקיבוע החנקן העונתי בכנרת תלוי באנגריית אור, עולה עם הזמן, מעוכב על ידי אמוניה ומתרחש רק באור.

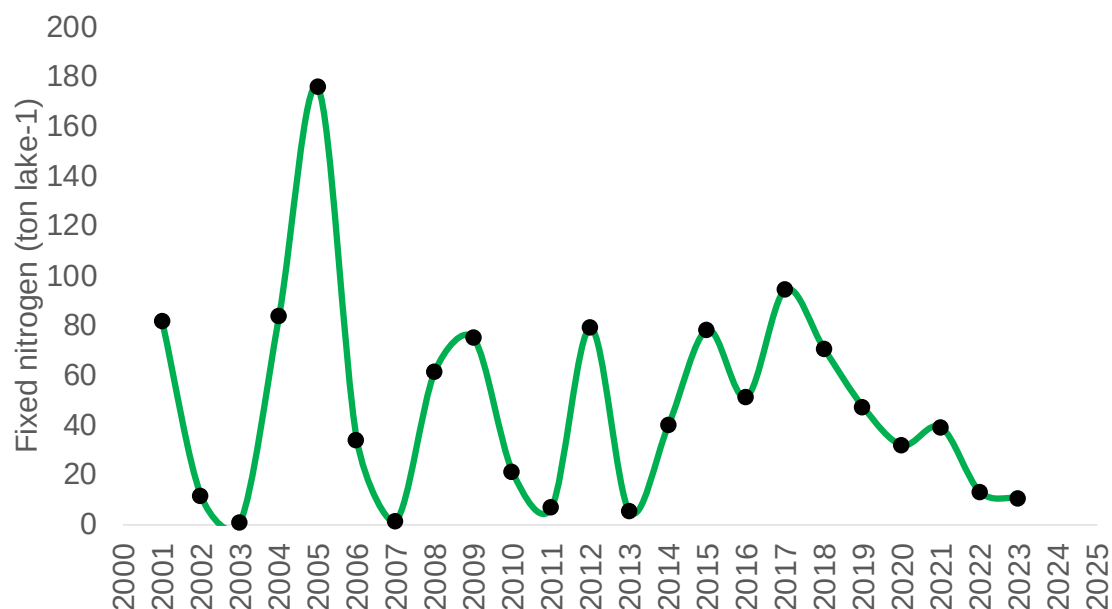
תוצאות דיון

קיימת תלות בין הפריחות של ציאנובקטריה המקבעות חנקן באגם לבין ההרכב הכימי של עמדות 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. בשנת 2023 נצפתה תלות זו אולם אוגר החנקן באגם היה נמוך יחסית, ולמרות שריכוז הניטראט ירד לערכים נמוכים מאוד כבר בסוף חודש יוני, קיבוע החנקן התחיל השנה רק חודשים אחר כך בחודש ספטמבר (איור 22). הסיבה לעיכוב בתחילת עונת הקיבוע איננה ידועה, ולא נמצא קשר ברור לשינויים בטמפרטורת המים או במליחות, אולם ייתכן והדבר קשור במספר גורמים סביבתיים שונים הפועלים יחד ומונעים את שיגשוגן של הכחוליות הקייציות. עונת הקיבוע התאפיינה בשני שיאים, הראשון בסוף חודש ספטמבר והשני בתחילת נובמבר (איור 22). שיאים אלה חופפים לתקופת פריחת הכחולית *אפניזומנון וצילינדרוספרמופסיס* שהייתה קצרה מהרגיל והתאפיינה בספירות נמוכות יחסית לשנים קודמות. בסוף חודש נובמבר הסתיימה עונת הקיבוע (איור 22).



איור 22: קצב קיבוע חנקן לעמדות מים וריכוזי חנקן אי-אורגני מסיס ב-1 מ' (מיליגרם לליטר) ב-2023.

ערכי קיבוע החנקן בשנת 2023 היו נמוכים יחסית לשנים שקדמו לה (טבלה 3), והנמוכים ביותר שנמדדו מאז שנת 2013. סה"כ קיבוע החנקן לשנת 2023 הסתכם ב- 11 טון לאגם, בהשוואה ל- 13 טון ב- 2022 ו- 39 טון ב- 2021, ונמשכה מגמת הירידה בקיבוע החנקן שהחלה בשנת 2017 (איור 23).



איור 23: קיבוע חנקן שנתי מחושב לאגם מאז 2001 ועד 2023. הקיבוע מובא ביחידות של טון חנקן לאגם.

טבלה 3: קיבוע חנקן בכנרת בין השנים 2007-2023

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
2022	13.2
2023	10.7

2.12 חומר אורגני ואי-אורגני מומס

במימון רשות המים

ורנר אקרט, בני סולימני



- בשנת 2023 ריכוזי ה-DOC היו קרובים לממוצע הרב שנתי.
- בהעדר פריחות של פיטופלנקטון, עליה בריכוזי החומר המרחף קשורה בעיקר לשיטפונות חורף.

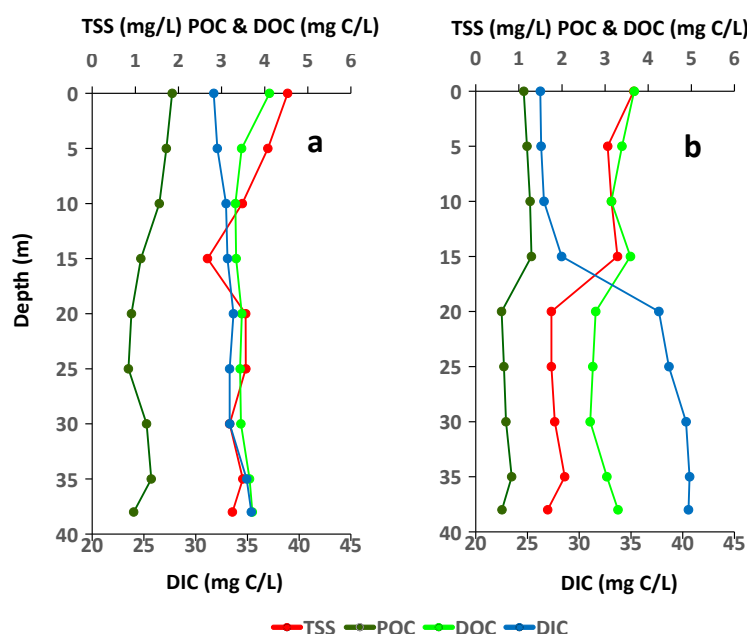
הקדמה

במסגרת הניטור מדדנו את ריכוזי הפחמן המומס בעמודת המים של הכנרת ב-8 עומקים, זאת במקביל למדידה של החומר החלקיקי באותם העומקים. הדיגום בוצע במקום העמוק באגם, בתחנת הדיגום השגרתי (תחנה A). החומר החלקיקי נאסף ע"ג פילטר סיבי זכוכית (GF/F), בעל קוטר נקב ממוצע של 0.7 מיקרון ואילו התסנין של דוגמאות אלה שימש לקביעת ריכוז הפחמן האורגני המומס (DOC) והאי-אורגני המומס (DIC) במים. המדידה בוצעה באמצעות מכשיר של חברת SHIMADZU המודד את ערכי הפחמן ע"י חישן אינפרא אדום.

השתמשנו בפילטרים שקולים ושרופים מראש על מנת לקבוע את סך כמות המוצקים המרחפים (TSS) לאחר ייבוש ב-110°C למשך הלילה, ולשם קביעת תכולת החומר האורגני לפי איבוד המשקל לאחר 4 שעות שריפה ב-540°C. לפי זה כמות הפחמן האורגני החלקיקי (POC) תואמת למחצית החומר השרוף. בשנת 2023 הריכוזים הממוצעים של DOC בעמודת המים של הכנרת היו 0.51 ± 3.36 מג"ל פחמן, גבוהים יותר ב-0.5 מג"ל מבשנת 2022, וקרובים לממוצע של העשור האחרון (3.42 מג"ל). כמו בשנים קודמות, הפיזור של DOC בעמודת המים היה אחיד יחסית עם ריכוזים הנעים בין 3 ל-4 מג"ל בתקופת החורף/אביב (איור 24a) וקיץ/סתו (איור 24b), הריכוזים באפילימניון בתקופת השיכוב, מעט גבוהים יותר. כמו בשנים קודמות, השיכוב התרמי ובעקבותיו השינויים הכימיים בעמודת המים השפיעו בצורה מועטה על ריכוזי ה-DOC. בשונה לכך, במקרה של פחמן אי-אורגני מומס (DIC), המראה פרופיל ריכוז בעמודת המים המשתנה בין האביב לסתו כאשר הריכוזים בהיפולימניון עלו בתקופת השיכוב מ-33 ל-41 מג"ל פחמן, ואילו באפילימניון ירדו מ-32 ל-26 מג"ל. תופעה זו ניתנת להסבר על ידי שקיעה להיפולימניון של חלקיקים

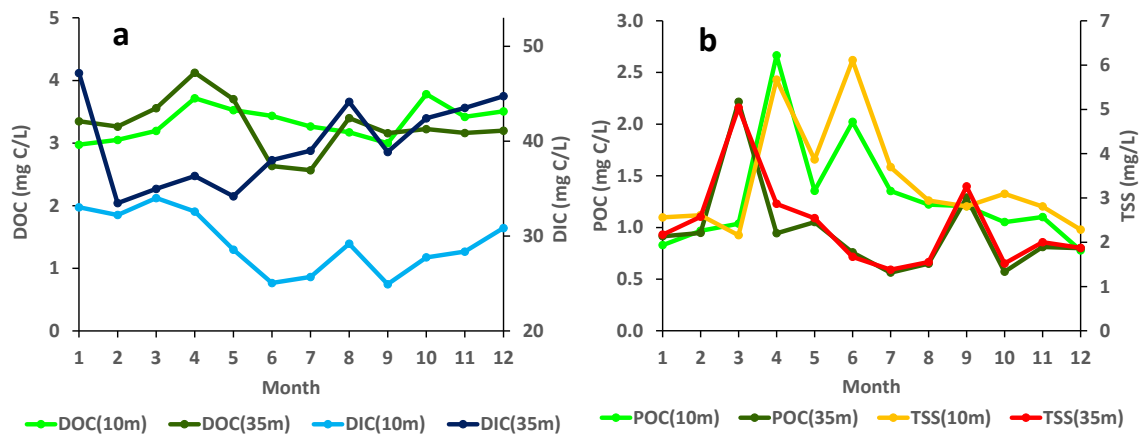
שנוצרו באביב המכילים פחמן אי-אורגני שם הם מתפרקים ומתמוססים חלקית בשל הירידה ב pH. תופעה זאת מודגמת באיור 25a המראה שינויים עם הזמן של הממוצעים החודשיים של ריכוז ה- DIC במים בעומק של 10 מטר לעומת 35 מטר.

תוצאות מ 2023



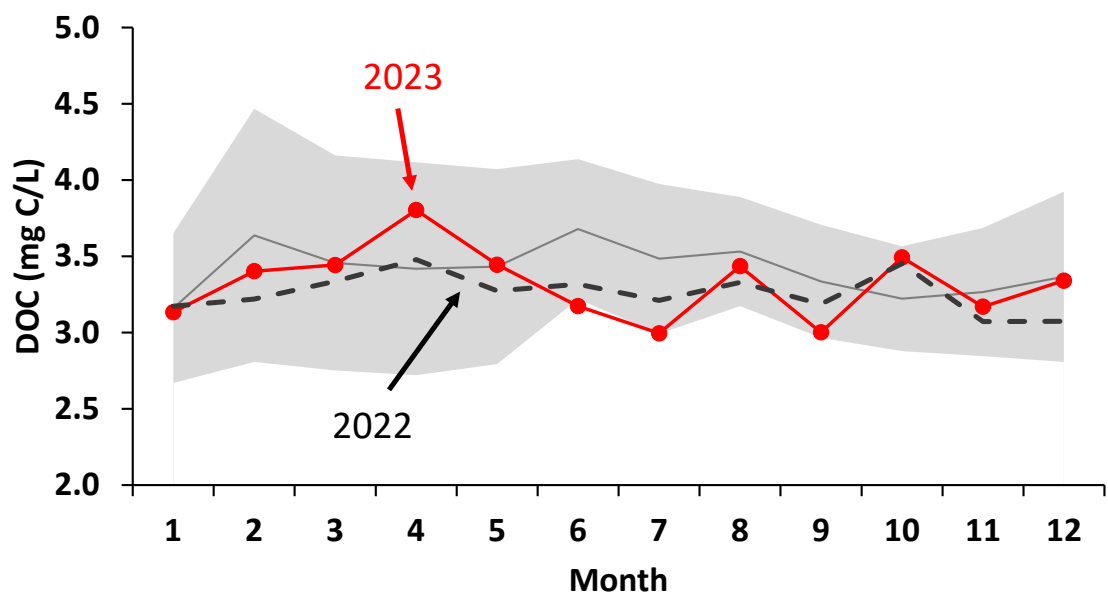
איור 24: ממוצעים עונתיים של TSS, POC, DOC, ו- DIC בעומדות המים של הכנרת שנמדדו ב: a. פברואר-אפריל 2023. b. יולי-ספטמבר 2023.

ההומוגניות היחסית של ריכוזי ה- DOC ($0.51 \pm$ מג"ל פחמן) בעומדות המים מודגמת גם באמצעות השינויים העיתיים של ממוצעי הריכוזים החודשיים בעומקים 10 ו- 35 מטר (איור 25a). ריכוזי ה- TSS וה- POC באפילימניון הגיעו לשני שיאים, אחד באפריל עם 5.7 ו- 2.6 מג"ל פחמן, בהתאמה, ושני ביוני עם 6.1 ו- 2 מג"ל לפני הדעיכה בתקופת הקיץ והסתו לערכים של 2.3 ו- 0.8 מג"ל (איור 25b). בהעדר פריחה אביבית של פיטופלנקטון, ערכי השיא באביב הם כנראה בשל עליה בכמות החומר המרחף שמקורו בשיטפונות חורף. בעומק 35 מטר, POC היווה 40% מה- TSS במהלך כל 2023 כפי שניתן לראות מהעקומות הזהות כמעט של השינויים עם הזמן בממוצעים החודשיים (איור 25b). לאחר השיא באפריל, ריכוזי ה- TSS וה- POC בהיפולימניון צנחו מ- 5 ל- 1.5 מג"ל, ומ- 2.3 ל- 0.7 מג"ל פחמן, בהתאמה.



איור 25: שינוי עיתי בממוצעים חודשיים של: DOC ו DIC (a) POC ו TSS (b) במהלך 2023 בעומקים 10 ו-35 מטר.

בהשוואה למגמות הרב שנתיות, בשנת 2023, הממוצעים החודשיים של ריכוז ה- DOC בעמודת המים של הכנרת בתחנה A היו 3.3 מג"ל פחמן, דומה מאוד לממוצע הרב שנתי שעומד על 3.4 מג"ל. המשרעת של ערכי הריכוזים שנמדדו תאמה את אלו של העשור האחרון עם סטיות של ± 0.5 מג"ל פחמן (איור 26).



איור 26: ממוצעים חודשיים של ריכוזי פחמן אורגני מומס בעמודת המים של תחנה A שבמרכז האגם ב- 2023 בהשוואה לשנת 2022 ולטווח הערכים בעשור האחרון.

2.13 בחינת נוכחות חומרי הדברה במי האגם ובדגה

במימון רשות המים

פלג אסטרון, אדית

לייבוביץ



- בשנת 2023, לא זוהו חומרי הדברה במי האגם מעל ל- 1 מק"ג לליטר.
- חומרי הדברה נתגלו בריכוזים של מעל 10 מק"ג לקילו סדימנט יבש, במספר אתרים באגם.
- הרעלת דגים מאסיבית אובחנה בשפך נחל צלמון במאי 2023.

מטרה

מעקב אחר שאריות חומרי הדברה בכנרת ואימות מקרי הרעלת דגים מכוונת בחומרים אלו.

רקע

חומרי הדברה רבים המצויים בשימוש האדם מגיעים למקווי מים ובכללן גם אגם הכנרת. המקור העיקרי לחומרי הדברה באגם הינו אגן ההיקוות הכולל אזורים רבים המשמשים לחקלאות. מי הנגר הנשטפים ממקורות אלו מוצאים את דרכם דרך נחלי הצפון לכיוון האגם. משקעים אטמוספריים הינם מקור נוסף לחומרים אלו. ערבוב חומרי ההדברה במים אינו מושלם שכן לאלו האחרונים מסיסות נמוכה במים, עובדה זו בנוסף לכמויות המים האדירות באגם, הן הבסיס לריכוזים הנמוכים באגם שהינם לרוב מתחת ל 1 מק"ג לליטר. היות ומתקיימות נישות אקולוגיות שונות וכן משטר ייחודי לתנועת מים באגם, נערך דיגום לחומרי הדברה בכנרת בפריסה רחבה. ניתן לציין כי כפי שדווח בעבר, באזור האגם מתקיים מדי פעם שימוש עברייני בחומרי הדברה בכדי ללכוד כמויות דגה גבוהות בזמן קצר באזורים סבוכים בהם לא ניתן להשתמש ברשת.

שיטות

דגימות מים נאספות בתחנות G,H,K,D,A בכנרת מעומק 1 מטר, בתדירות של פעמיים בחודש. הדגימות עוברות מיצוי כימי ואנליזה בעזרת גז כרומטוגרף. במקרים של הרעלת דגים מבוצעת דיסקציה של הפרטים החשודים ומיצוי כימי של רקמות הדג.

תוצאות ודין

גם השנה ריכחי חומרי ההדברה במי האגם היו נמוכים מ 1 מק"ג לליטר בכל תחנות האגם. מספר חומרי ההדברה הינם בעלי יכולת שרידות גבוהה בסביבות אקולוגיות רבות ובכללן סביבות אקוויטיות ולכן הנושא העלה בעבר שאלה לגבי מיקומם הסופי של חומרי ההדברה המגיעים למי האגם. בפרוייקט הממומן ע"י משרדי המדע הגרמני והישראלי, מבוצעות אנליזות סדימנטים מהאגם שהראו כי חומרי ההדברה כגון DDE (תוצר פירוק של DDT), אנדוסולפן ואחרים מאובחנים בריכוזים של מעל 10 מק"ג לק"ג סדימנט יבש. אלו מרוכזים במספר מוקדים מרכזיים בכנרת. ריכוזים אלו גבוהים אף מאלו המאובחנים ברקמות דגי האגם. בהמשך ייבחנו גם קבורה אפשרית של חומרי ההדברה בעקבות שקיעת חומר חלקיקי בשכבת הסדימנט. ניתן לציין כי חומרים כמו אנדוסולפן ו DDE אסורים לשימוש יותר מכמה עשורים אך עדיין מאובחנים בסדימנט וברקמות דגים מאזורים שונים כולל ממאגרי מים ברמת הגולן כפי שנבחן במעבדתנו בספטמבר 2023. בחודש מאי 2023, מוטי דיאמנט (המעבדה לחקר הכנרת) דיווח כי זיהה תמותת דגים מעוררת חשד באזור שפך נחל צלמון ליד מלון גינוסר (איור 27).



איור 27: תמותת דגים ראשונית שזוהתה ע"י מוטי דיאמנט (מימין) והמיקומים הראשוניים בהם זוהתה התמותה (שמאל), מאי 2023.

בוצעה אנליזה כימית וסריקת גז כרומטוגרף לדגימות דגים ומים שנאספו באזור. הבדיקות העלו כי קיימים ריכחי אנדוסולפן חריגים וגבוהים במיוחד הן במים והן בדגים. עובדה זו הצביעה על הרעלה מכוונת בעזרת חומר ההדברה זה. כמויות הדגים המתים עלו במרוצת הזמן בנחל עצמו והגיעו לממדים המחייבים פינוי הגופות ע"י איסוף אקטיבי שבוצע למחרת, ובמקביל הופצה המלצה להימנע זמנית מרכישת דגי מאכל מהכנרת. עבודות אלו תועדו ולהן נערך סיקור תקשורתי רב הן במדיה המצולמת והן בעיתונות הכתובה. הנחת העבודה הייתה כי תחלופת המים בנחל אכזב בתחילת הקיץ הינה נמוכה מאוד ומושפעת בעיקר מחדירת מים מהאגם, זאת בניגוד למאסות מים הקיימות באזור האגם עצמו. לכן ניתן היה לשער כי גם חומר ההדברה הנ"ל לא יישטף במהרה מהנחל ויהווה מקור הרעלה לזמן ממושך. הנחה זו אומתה כעבור שבועיים. דיגום מי הנחל שנערך לאחר תקופה זו הראה כי ריכוז האנדוסולפן (2 מק"ג לליטר) עדיין גבוה בסדרי גודל מהריכוז המתקיים באגם במשך שאר ימות השנה, ונמוך רק פי 8 מהריכוז שנמדד בזמן ההרעלה (16 מק"ג לליטר).

2.14 מדידת פרמטרים בצינור הברבטים ושלווה בורות פעילים נוספים באזור

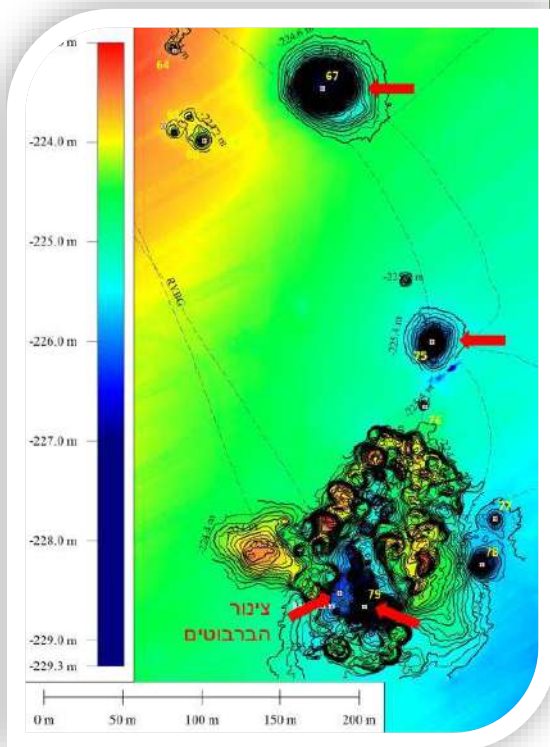
במימון רשות המים

גדעון טיבור, שקד שטיין, אדית לייבוביץ',

אסף גלעדי, עמי נשרי, תמי זילברמן

(מכון גיאולוגי)

- מתחילת ינואר ועד תחילת מאי 2023 עלו ריכוזי הכלורידים בצינור הברבטים מ-1,214 ל-1,307 מג"ל ולאחר מכן חלה ירידה מתונה עד 1,244 מג"ל באמצע יולי. עליה נוספת החלה בסוף אוקטובר שממשיכה גם בתחילת ינואר 2024 ומגיעה ל-1,280 מג"ל.
- 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.
- מאפיין בולט של מהירות הזרימה בצינור הברבטים הוא השונות הגדולה עם הזמן, הן בסקלות זמן שעתיות והן בטווחי זמן של שבועות. במהלך 2023 המהירות היומית הממוצעת הייתה בין 0.2 ס"מ/שניה ועד 1.8 ס"מ/שניה.
- ריכוזי הכלורידים, המוליכות החשמלית וטמפרטורת המים קרוב לבסיס הנביעות של שלושת הבורות הנמצאים באזור הברבטים (ראה תמונה בתחילת הפרק) מצביעים על כך שהם פעילים, מלוחים ודומים לנביעת הברבטים.



מטרות הניטור

- קביעת שטפי מים מליחים מצינור הברבטים לכנרת.
- קביעת שטפי מים מליחים משלושה בורות פעילים נוספים באזור לכנרת.
- ניסיון לקביעת המנגנונים השולטים בשפיעת הנביעות.

רקע

לאחר בניית הכיפה המנקזת מעל הנביעה התת-ימית בפוליה A בשנת 2019 נשאר רק צינור הברבטים ובורות נוספים באזור כספק מליחות לאגם שמקורה בנביעה אדבקטיבית מוכרת, בתוך האגם. שאר כניסות המליחות לכנרת הן כנראה בעיקר באמצעות דיפוזיה מהקרקעית באזורים ליטורליים מסוימים וכמו כן

מעט גלישה של מעיינות חופיים מליחים (כנרת 7). כך מתוך מאזן מלח ניתן לצפות שלברבוטים ולבורות הנוספים באזור תהיה חשיבות בתרומת מלח ואי לכך יש עניין במדידות פרמטרים שונים בנביעות אלו. ניטור נביעת הברבוטים ע"י המעבדה לחקר הכנרת, חיא"ל, החלה בדצמבר 2007 וכוללת מגוון של פרמטרים אשר נדגמים מצינור הברבוטים בצורה רציפה פעם בשעה (מהירות זרימה, טמפרטורה, מוליכות חשמלית) ואנליזת מעבדה של דגימות מים הנלקחות מבסיס הצינור (מוליכות חשמלית, כלורידים וניטרט). ניטור הבורות הנוספים, בשלב זה פעם בחודש, החל באמצע 2023 והוא כולל אנליזת מעבדה של דגימות מים הנלקחות פעם בחודש מבסיס הנביעות (מוליכות חשמלית, כלורידים וניטרט), ומדידה רציפה במשך 20 דקות של מגוון פרמטרים (מהירות זרימה, טמפרטורה, מוליכות חשמלית).

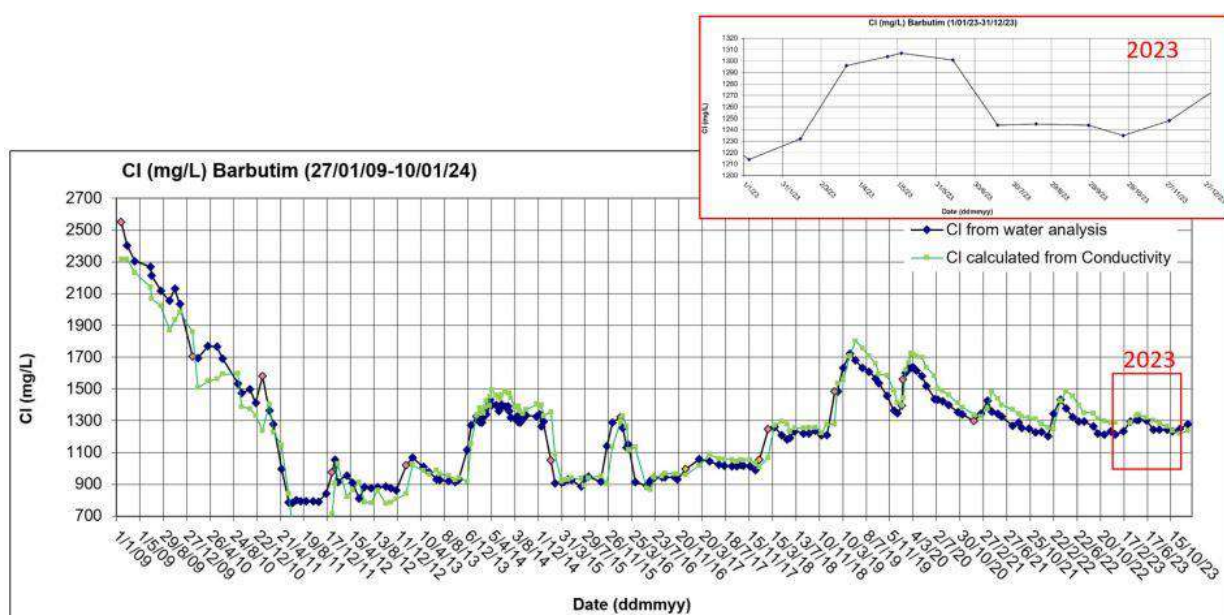
תוצאות

מגמות השנה האחרונה: מתחילת ינואר ועד תחילת מאי 2023 עלו ריכחי הכלורידים בצינור הברבוטים מ-1,214 ל-1,307 מג"ל. לאחר מכן חלה ירידה מתונה עד 1,244 מג"ל באמצע יולי. עליה נוספת החלה בסוף אוקטובר, ממשיכה גם בתחילת ינואר 2024, והגיעה ל-1,280 מג"ל (איור 28). המוליכות החשמלית מצויה במתאם גבוה ($R^2=0.98$) עם ריכח הכלוריד והיא עוקבת אחרי המגמה שהתקבלה בכלוריד (איור 29) וגרף ירוק באיור 28). החל מספטמבר 2021 נעשית מדידה רציפה (כל שעה) ואוטומטית של המוליכות החשמלית באמצעות סנסור ה-Manta. מתחילת דצמבר ישנה תנודתיות גבוהה במוליכות החשמלית אשר מגיעה לשיא של 4,690 מיקרוסימנס לס"מ בתחילת ינואר 2024 (איור 29ב). ריכחים של הניטראט ב-2023 נעו בין 0.58 מג"ל באמצע מרץ ועד 0.24 מג"ל בסוף אפריל. תופעה זו חזרת על עצמה ממאי 2014 שמאז ערכי הניטראט לא עולים מעל 0.83 מג"ל (איור 30). לא נמצא מתאם בין ריכחי הניטראט לריכחי הכלוריד ו/או המוליכות החשמלית. מהירות הזרימה השעתית הממוצעת ל-24 שעות במהלך 2023 מוצגת באיור 31. הזרימות מינואר עד סוף מרץ נעו בין 0.2-1.8 ס"מ/שניה. בין החודשים אפריל - אוקטובר הסנסור היה בתיקון ובכיל. מסוף אוקטובר ועד סוף דצמבר 2023 המהירויות הממוצעות נעו בין 2.5 ל-0.6 ס"מ/שניה. ריכחי הכלורידים, המוליכות החשמלית וטמפרטורת המים קרוב לבסיס הנביעות של שלושת הבורות הנמצאים באזור הברבוטים (ראה תמונה בתחילת הפרק) מצביעים על כך שהם פעילים, מלוחים ודומים לנביעת הברבוטים (איור 32ב,ג,ד). גם בבורות אלו המוליכות החשמלית מצויה במתאם גבוה ($R^2=0.98$) עם ריכח הכלוריד (איור 32א).

דיון

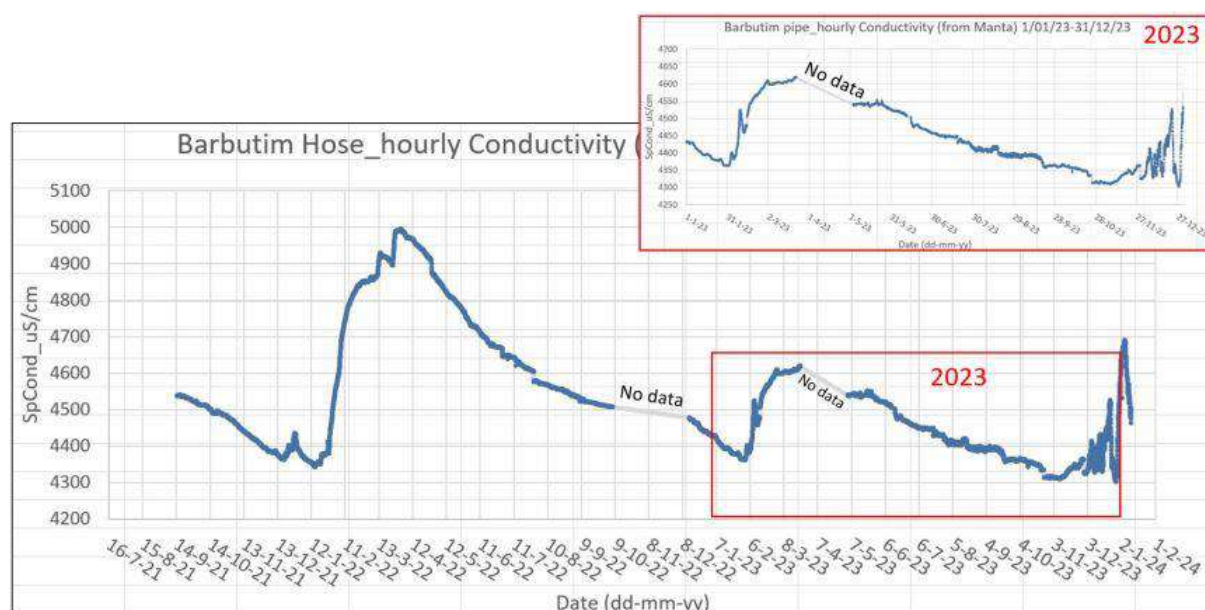
הנחת הבסיס של ניטור צינור הברבוטים היא שריכח המליחות שנמדד בנביעה משקף את היחס שבין תרומת הספיקה של המרכיב המלוח לתרומת המרכיבים המתוקים, כך ששינויים במליחות משקפים שינויים ביחסי תערובת זו. על סמך עבודות שבוצעו בעבר, מליחות תמלחת הקצה באזור הכנרת אמורה להיות בסביבות 18,000 מג"ל ואי לכך במליחות של כ-1,300 מג"ל (ממוצע של הברבוטים ב-2022) מי הנביעה המלוחה אמורים להכיל בממוצע רק כ-7% מי תמלחת. מכאן, שינויים משמעותיים בספיקה שנמדדת בצינור הברבוטים (למשל עליה של פי 2: איור 28) נובעים בעיקר משינויים בספיקה של המרכיב המתוק. מאידך ה"שליטה" בהרכב הכימי (כלוריד, נתרן, ברומיד) של התערובת נובעת בעיקר מתרומת מרכיב הקצה המלוח. אי לכך ניתן לצפות למתאם הופכי בין ספיקת הנביעה למליחות שלה אבל (ראה איורים) תוצאות שנת 2022 סותרות הנחה זו ואי לכך מרכיב הקצה המלוח של הברבוטים כנראה "מתוק"

בהרבה מכך. תימוכין למודל זה הם העליה במליחות הברבוטים בכל חורף כתוצאה מירידת גשמים ותוספת לחץ הידראולי. המלחת הנביעה נובעת משינוי ביחס שבין ספיקות המים המלוחים-חמים מהאקוויפר המלוח העמוק המקומי לבין המים המתוקים שמקורם באקוויפרים הקנומן-טורונים או האקוויים בזלתיים. לדעתנו בעקרון המודל של גולדשמידט משנות השישים בכללותו נכון, תוספות גשם עונתיות מעלות את העומד ההידראולי של כל האקוויפרים המקומיים ותוך כדי כך עולה הגרדיאנט ההידראולי שמתקיים בין מפלסי האקופירים המקומיים לנביעת הברבוטים. לדעתנו ספיקת נביעת הברבוטים עולה בחורף כתוצאה מעליה בספיקות המים המתוקים מהאקוויפרים העליונים וכמו כן ספיקת התמלחת מהעומק אף היא עולה. אלא שספיקת התמלחת העמוקה עולה יותר מכיון שהמוליכות ההידראולית של אקוויפר זה גדולה יותר מאשר המוליכות ההידראולית של האקוויפרים המתוקים. יש לזכור שהתמלחת עולה ורטיקלית באמצעות מערכות סידוק. כך המודל שאנחנו מציעים שה- driving force שמניע את התמלחות כלפי מעלה (מספק את האנרגיה הקינטית הנדרשת) הוא עליה רגיונלית של מפלס מי התהום.



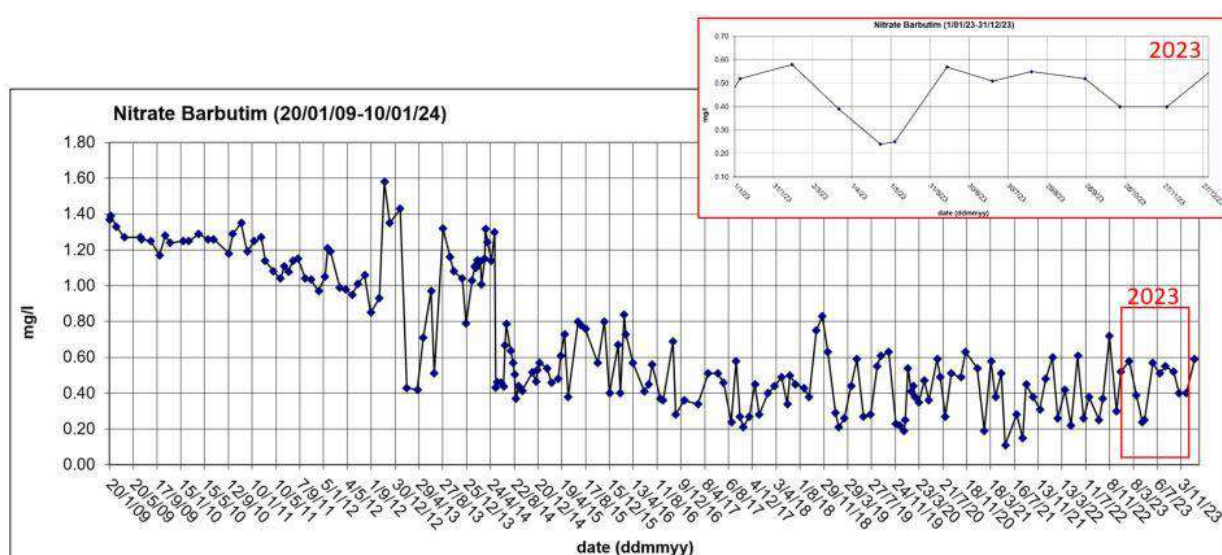
איור 28: ריכוז כלוריד בבסיס צינור הברבוטים בין השנים 2009 לינואר 2024 (במג"ל). הגרף בכחול מייצג את נתוני אנליזות המים החודשי והגרף הירוק הוא חישוב ריכוז כלורידים מתוך נתוני המוליכות החשמלית. האיור העליון היא הגדלה של שנת 2023.

א.

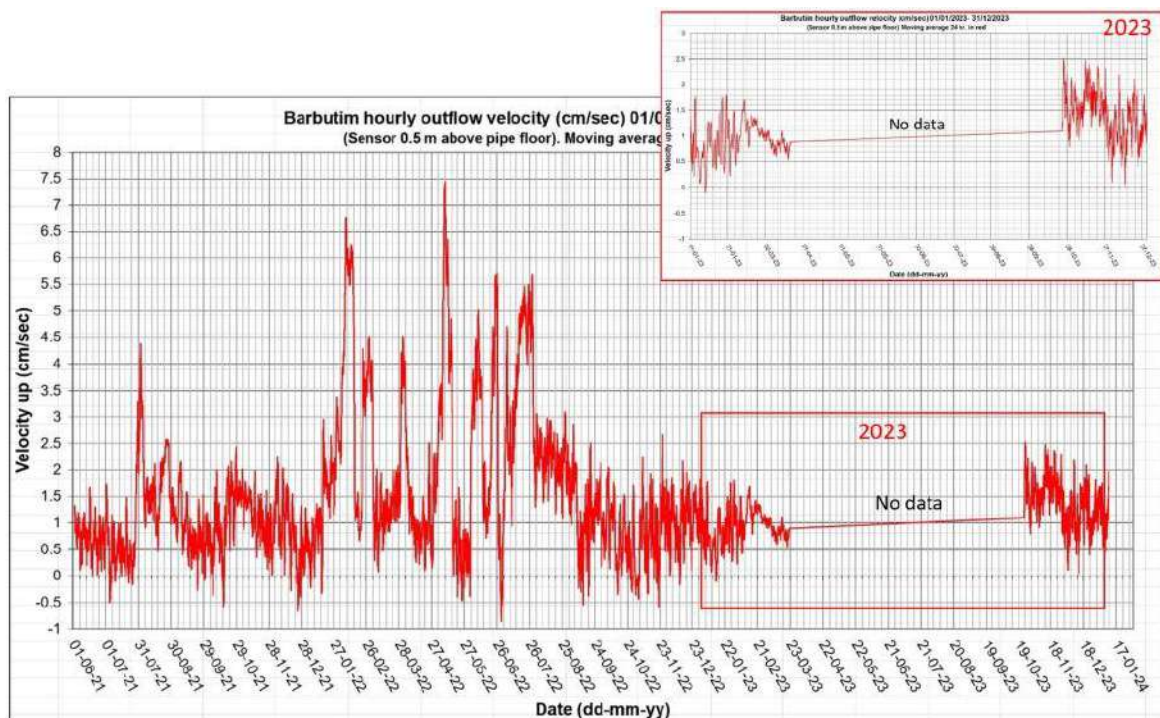


ב.

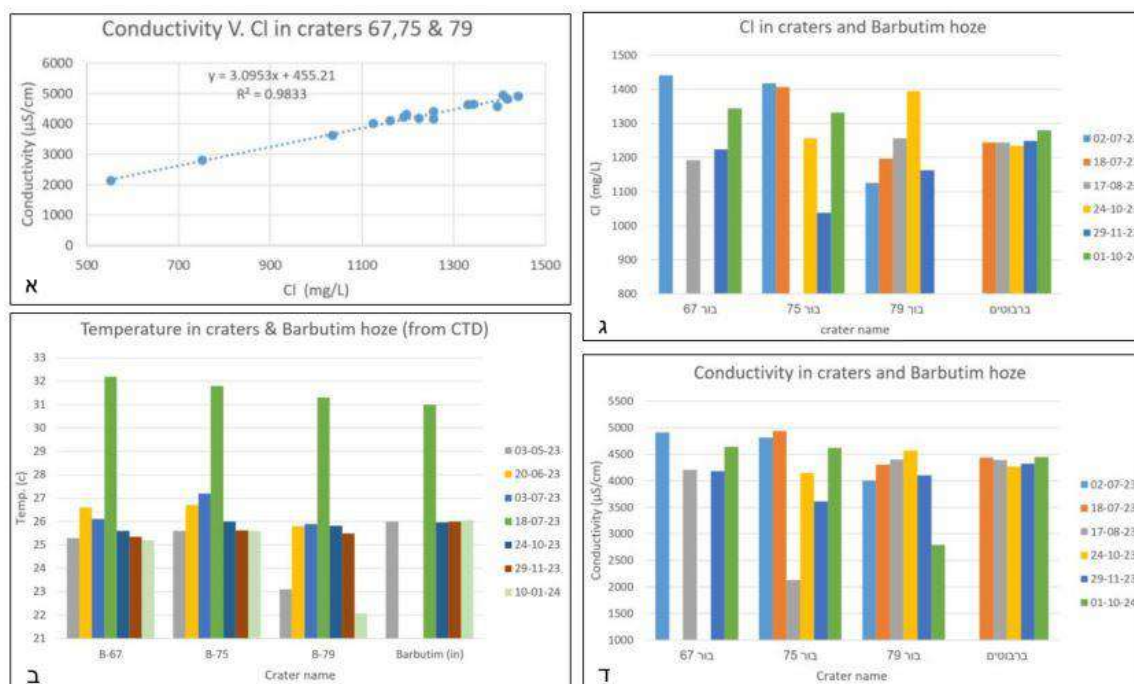
איור 29: א. המוליכות החשמלית בברבוטים בין השנים 2012 לינואר 2024 (במיקרו-סימנס לס"מ) כפי שנמדדה מאנליזות דיגום המים החודשית. האיור העליון הינו הגדלה של המוליכות בשנת 2023 ו-ב. המוליכות החשמלית בברבוטים ספטמבר 2021 עד תחילת ינואר 2024 כפי שנמדדה ברציפות (תדירות של שעה) באמצעות סנסור ה-Manta. האיור העליון הינו הגדלה של המוליכות בשנת 2023.



איור 30: ריכוז הניטרט בברבוטים בין השנים 2019 לינואר 2024 (במיליגרם חנקן לליטר). באיור העליון מוצגת הגדלה של ריכוז הניטרט ב-2023.



איור 31: מהירות שעתית בציר Z ("ספיקת מים") שנמדדה בבסיס צינור הברבוטים בין השנים יוני 2021 ועד ינואר 2024 ומוצגת כממוצע רץ של 24 שעות (קו אדום). באיור העליון מוצגת הגדלה של המהירות בציר Z ב-2023 (נקודות כחולות מייצגות נתונים שעתיים).



איור 32: תוצאות אנליזות מעבדה של דגימות מים ומדידות CTD משלושת הבורות הפעילים באזור הברבוטים. (א). היחס בין מוליכות חשמלית לריכוזי כלורידים, (ב). השוואת טמפרטורת המים בבסיס הבורות ובצינור הברבוטים בתאריכים שונים, (ג). השוואת ריכוזי הכלורידים בבסיס הבורות ובצינור הברבוטים בתאריכים שונים ו- (ד). השוואת המוליכות החשמלית בבסיס הבורות ובצינור הברבוטים בתאריכים שונים. מיקום הבורות מופיע בתמונה בתחילת הפרק.

2.15 תכנית הניטור האוטונומית של המעבדה לחקר הכנרת (KLAMP)

במימון רשות המים

ורנר אקרט, יורי ליצ'נסקי, בני סולימני

- בשנת 2023 ערבוב מלא של עמודת המים התרחש מאוחר יחסית, בתחילת פברואר.
- בסוף דצמבר, ניתן היה להבחין בהיפולימניון יציב, עשיר בסולפיד מתחת לעומק 30 מטר.
- בתחנה D נצפה אירוע של עליית מים מהקרקעית לפני השטח (upwelling) כתוצאה מרוחות דרומיות חזקות.



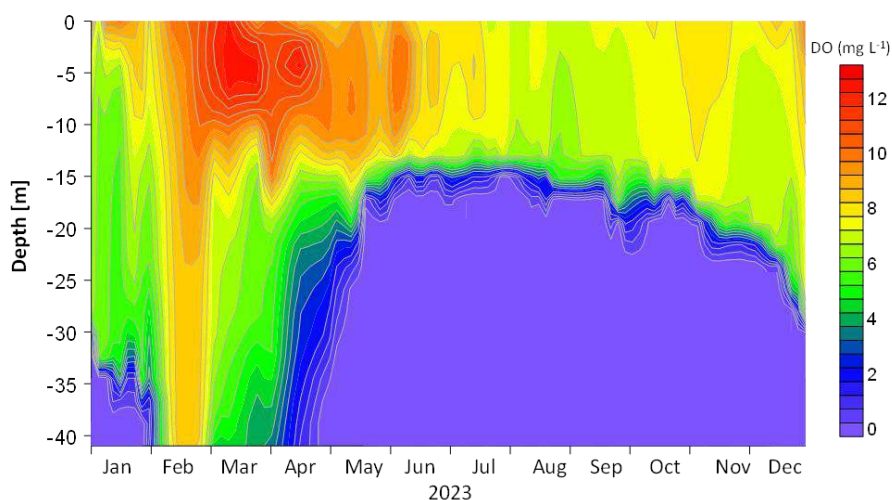
רקע

בשנת 2002 החלה המעבדה לחקר הכנרת לנטר את עמודת מי האגם בעזרת ציוד אוטומטי, פרופיילר RUSSE המופעל מדוברת האקוראפט בתחנה A (Apprise Technologies, Duluth, Minnesota). בשנת 2009 הוחלפה יחידת ה- RUSSE/YSY אשר פעלה במקום בשנים 2002-2008, במכשיר המופעל על ידי כננת שעליה מורכב דוגם רב חיישנים מדגם MANTA II (Eureka, Austin, Texas), ומפרופיילר עצמאי מותאם למקום, אשר פותח על ידי חברת Instrumental Solutions Inc, Vicksburg, Mississippi. היחידה הייתה ניתנת לתכנות מרחוק לביצוע של עד 8 פרופילים ביממה של עומק, טמפרטורה, חמצן מומס (DO), pH, מוליכות חשמלית (EC), פוטנציאל חמצון חיזור (ORP), עכירות וכלורופיל a, ברזולוציה של כל חצי מטר. בסוף מרץ 2022 הדיגומים הופסקו כתוצאה מבעיה באספקת החשמל מהמערכת הסולרית שגרמה להשבתה של הדוגם ויחידת הבקרה של הפרופיילר. במשך שנה נעשו ניסיונות לתקן את המערכת אך ללא הצלחה. במקביל החליטה המעבדה לחקר הכנרת להרחיב את תכנית הניטור ולהוסיף שתי תחנות מדידה נוספות: פרופיילר ISI נוסף בתחנה G החל לפעול מאוגוסט 2020 ומצוף נתונים נוסף בתחנה D שהחל לפעול מה- 16 לפברואר 2022, שניהם מצוידים בחיישנים מסוג Manta+. בתחנה D עומק המים הוא 8-10 מטר, מנוטרים פרמטרים של איכות מים בתדירות של כל 10 דקות בעומק קבוע של 1 מטר, זאת בנוסף לשרשרת טרמיסטורים המספקת תמונה על פרופיל הטמפרטורה בתחנה. המיניאקורפט בתחנה G

עבדה היטב עד 6 לאוקטובר 2022, כאשר שטף הנתונים פסק בפתאומיות בשל התהפכות הרפסודה. הסיבה לתקלה החמורה הייתה חדירת מים לדוברת האלומיניום בגלל חורים שנוצרו כתוצאה מראקציית גלווני. באותו הזמן, היצרן של המערכת, חברת ISI, חדלה להתקיים והתחלנו לחפש מערכות דיגום אחרות. בסופו של דבר הוחלט לרכוש כננת חדשה לתחנה A ולהחליף את הדוברת ששקעה בתחנה G במצוף נתונים בעל שני דוגמים רבי חישנים שימדדו בשני עומקים קבועים 1 מטר ו 20 מטר, בשילוב עם שרשרת טרמיסטורים בכדי לעקוב אחר תמונת הטמפרטורה בתחנה. בפברואר 2024 הותקן המצוף החדש (Nexsense, CB 650) יחד עם שרשרת טרמיסטורים הכוללת 20 חישני טמפרטורה (Nexsense) ושני דוגמים רבי חישנים מסוג Manta + (Eureka). בנוסף לתחנות A, G ו D ובהתייחס לתוכנית להזרמת מים מותפלים לכנרת דרך נחל צלמון, הותקן בפברואר 2023 מצוף נתונים נוסף מסוג CB 450 סמוך לקיבוץ גינוסר בעומק של 10 מטר בניצב לשפך הנחל.

תוצאות מ 2023

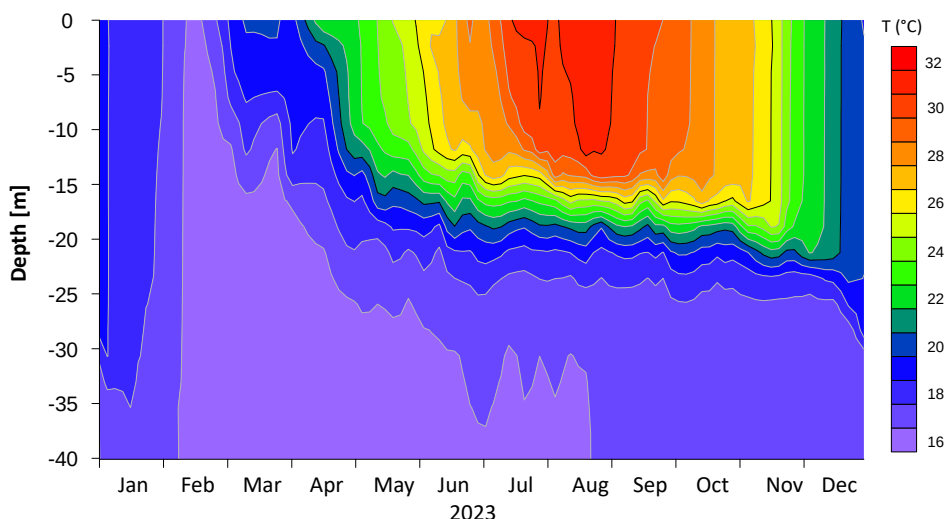
בהעדר פרופילר אוטומטי במרכז האגם השתמשנו בדוגם נייד רב חישנים מסוג Manta בכדי למדוד באופן ידני פרופילים שבועיים של עמודת המים של הכנרת בתחנה A במטרה לעקוב אחר התפתחות השיכוב התרמי והכימי. בתחילת 2023 האגם היה עדיין משוכב תרמית כאשר עומק הטרמוקלינה היה בין 30 ל- 35 מטר. ההיפוך של עמודת המים בחורף 2023 התרחש בין 29 לינואר ל- 12 בפברואר כאשר טמפרטורת המים עמדה על 15.8°C (איור 33).



איור 33: תנודת האיזותרמות בעמודת המים של תחנה A במהלך 2023.

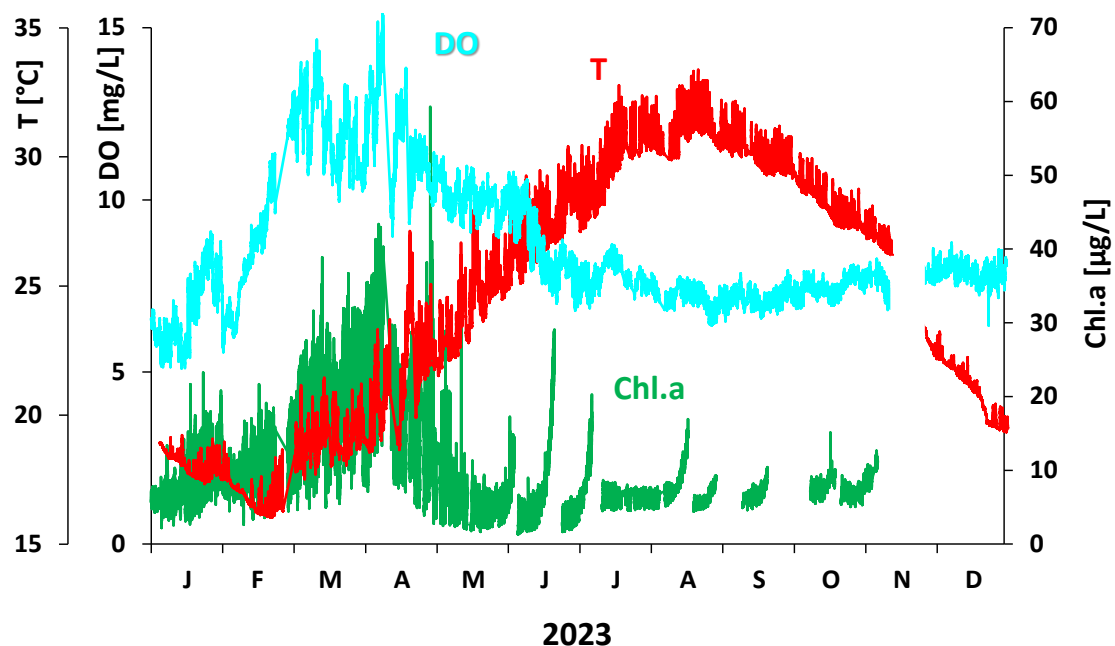
העירבוב המלא של עמודת המים משתקף גם בריכוז החמצן המומס, 10 מג"ל, האחד לכל העומק (איור 34). ערכים מרביים של חמצן מומס וטמפרטורה נמדדו סמוך לפני המים עם 13 מג"ל באפריל (איור 34) ו- 31°C בסוף יולי (איור 33) בהתאמה. עם התחלת השיכוב התרמי במרץ החלה ירידה בריכוז החמצן המומס באזור הקרוב לקרקעית, שהפך חסר חמצן במהלך אפריל לפני שהאוקסיקלינה עלתה והתייצבה סמוך לטרמוקלינה בסוף מאי, וכל ההיפולימיניון הפך חסר חמצן. לאחר 4 חודשים של שיכוב תרמי קייצי

יציב, תהליך ההתקררות של האפילימניון הביא להעמקה איטית של התרמוקלינה והאוקסיקלינה. כמו ב-2022 כך גם בסוף 2023 האגם היה עדיין חסר חמצן מתחת ל-30 מטר זאת בשל הפרש טמפרטורה של 3°C על פני התרמוקלינה.



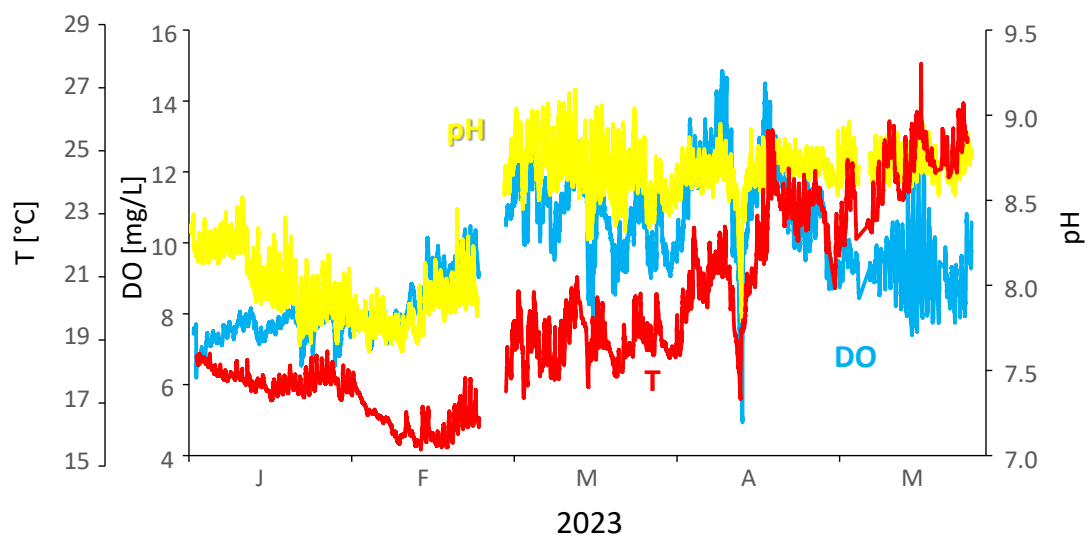
איור 34: דיאגרמה של קיום שווי טמפרטורה (איזופלטות) של ריכוז החמצן המומס בעמודת המים של תחנה A ב-2023.

בנוסף לפרופילים השבועיים הידניים במרכז האגם, קיים עדיין הפרופילר הנייח הישן בתחנה A המתוכנת למדוד פרמטרים הידרוכימיים בתדירות של כל 10 דקות בעומק קבוע של 1 מטר (איור 35). סיכום נתוני כלורופיל a, טמפרטורה וחמצן מומס ב-2023 הראו מגמות שנתיות ברורות עבור שלושת הפרמטרים. החמצן המומס והכלורופיל עלו מינואר עד אפריל מ-6 ל-15 מג"ל ומ-5 ל-30 מיקרוגרם לליטר, בהתאמה. השונות הגבוהה של הסיגנלים מקורה במחזורי היממתיים של צריכה ויצירה של חמצן מומס או באור יום במקרה של כלורופיל a הנמדד באמצעות חישן אופטי. לאחר השיא של עונת האביב ריכחי החמצן המומס והכלורופיל ירדו באופן הדרגתי לקראת הקיץ והגיעו לערכים סביב 7 מג"ל לחמצן מומס ומתחת ל-10 מיקרוגרם לליטר עבור כלורופיל a. הטמפרטורות בעמודת המים מראות גם הן שונות יממתית גבוהה בשל מחזורי רציפים של חימום וקירור, מערכי מינימום של 16°C בפברואר ועד לשיא של 32°C באוגוסט, ולאחריו שוב התקררות איטית עד 20°C בסוף 2023.



איור 35: נתוני ניטור בתדירות גבוהה של טמפרטורה, חמצן מומס וכלורופיל a במרכז האגם בעומק 1 מטר.

התוצאות מהחיישנים האופטיים הנוספים לריכוזים של פיקואריטרין ופיקוציאנין היו נמוכים מתחת לסף הגילוי.

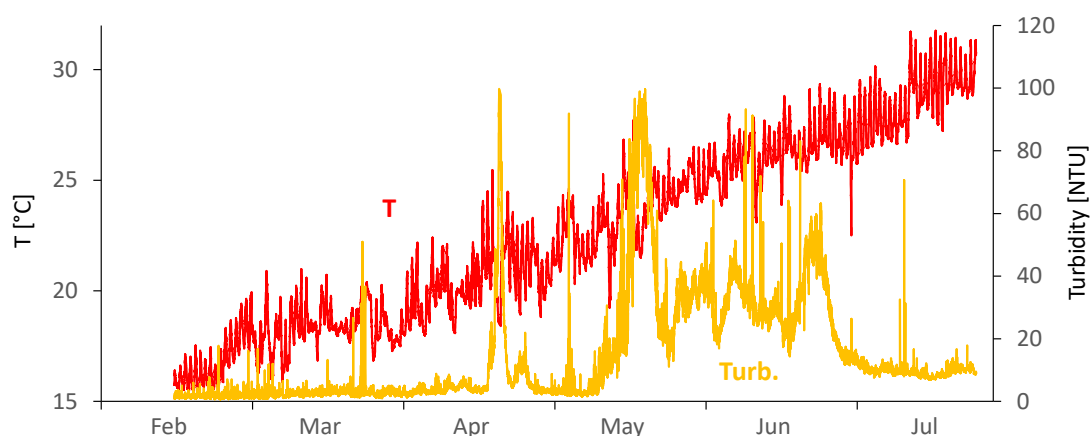


איור 36: נתוני ניטור בתדירות גבוהה של טמפרטורה, חמצן מומס ו pH בתחנה D בעומק 1 מטר.

ב- 2023 תחנה G הייתה עדיין מושבתת, מתחנה D הצלחנו להפיק סט נתונים מלא יחסית מינואר עד לסוף מאי (איור 36) אז החלו בעיות באספקת החשמל שגרמו לפערים משמעותיים באיסוף הנתונים. מהנתונים שנאספו טמפרטורה, חמצן מומס ו- pH היו הרציפים והאמינים ביותר וניתנים להצגה. הטמפרטורה בתחנה D הגיעה למינימום באמצע פברואר עם תנודתיות קטנה בין יום ללילה. לאחר מכן

החלה התחממות שלווה בעליה בערכי ה- pH מ- 7.8 ל- 8.7 עם תנודות בין יום ללילה של כ- 0.5 יחידות pH.

ריכוז החמצן המומס עלה אף הוא מ- 8 מג"ל בחורף לשיא של 14 מג"ל באפריל. אירוע שהתרחש במהלך חודש אפריל (איור 36) אופיין בירידה חדה של שלושת הפרמטרים (4°C במקרה של טמפרטורה, 2- יחידות pH ו-10 מג"ל חמצן מומס). נראה כי הירידה נבעה מרוחות דרומיות חזקות שגרמו לעלית מים מהקרקעית לפני השטח (upwelling) (ד"ר יעל אמיתי, מידע בע"פ). בהשוואה לתחנות A ו-D, וללא הזרמה של מים מותפלים, לא נצפתה שונות גדולה בנתונים מהתחנה החדשה בשפך נחל צלמון שהחלה לפעול בפברואר 2023. טמפרטורות המים הראו עליה קבועה מ- 15°C בפברואר ל- 30°C ביולי ותנודות יממיות של כ- 0.5°C (איור 37). הפרמטר היחיד שהראה שינויים עם הזמן הוא העכירות שלאחר שני שיאים בולטים של כ- 100 NTU באפריל ואמצע מאי, נשארה גבוהה יחסית עד לסוף יוני. לאחר בדיקה מעמיקה עם נתוני הרוח מהתחנה המטאורולוגית הקרובה בגינוסר לא מצאנו הוכחה לתהליך הרחפה מוגבר כמקור לעכירות הגבוהה ואנחנו עדיין מחפשים את הסיבה.



איור 37: נתוני ניטור בתדירות גבוהה של טמפרטורה ועכירות בתחנה שבשפך נחל צלמון מעומק 1 מטר.

תכניות להמשך

מפברואר 2024 כל התחנות הכלולות ב- KLAMP אוספות נתונים. תחנה A מודדת לעת עתה פרמטרים הידרוכימיים מעומק קבוע בלבד וכרגע אנחנו מצפים להגעתו של פרופילר אוטומטי חדש באפריל. ברגע שיותקן הוא ימדוד פרופילים במרווחי זמן קבועים וגם ימשיך למדוד בעומק קבוע בין הפרופילים. שני נושאים נוספים שכרגע בעבודה הם שיפור התקשורת בתחנה G וסט סוללות חדש לתחנה D שכרגע אוספת נתונים רק בשמש מלאה.

2.16 כלורופיל וייצור ראשוני

במימון רשות המים

ורנר אקרט, דוד קמינגס, זהר פריימן, ניר קורן



צילום: ורנר אקרט

- באפריל 2023 נמדד שיא של כל הזמנים ביצרנות הראשונית.
- ריכוזי כלורופיל a שנמדדו מיולי עד דצמבר היו הנמוכים ביותר שנרשמו מאז החלה תכנית הניטור.
- עומק הסקי הגיע לשיא של כל הזמנים, 5 מטר בספטמבר.

מטרת המחקר

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

רקע

ריכוז 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. ריכוזי הכלורופיל וקצבי הייצור הראשוני מנוטרים בכנרת מאז 1969 (כלורופיל) ו 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, באמצע שנות ה-90 עקומת היצרנות הראשונית השתטחה בעוד שעקומת הביומסה מראה שיא סתווי בנוסף לשיא האביבי.

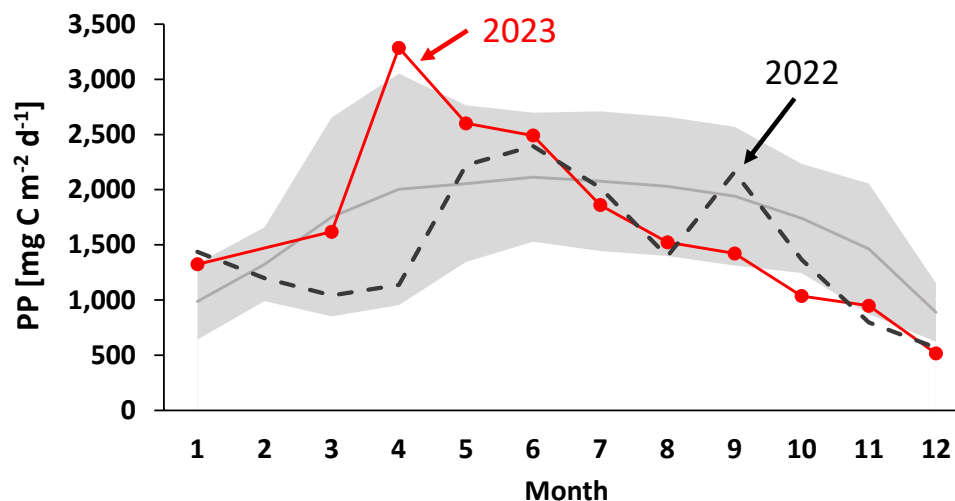
שיטות

מים למדידת ריכוזי 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

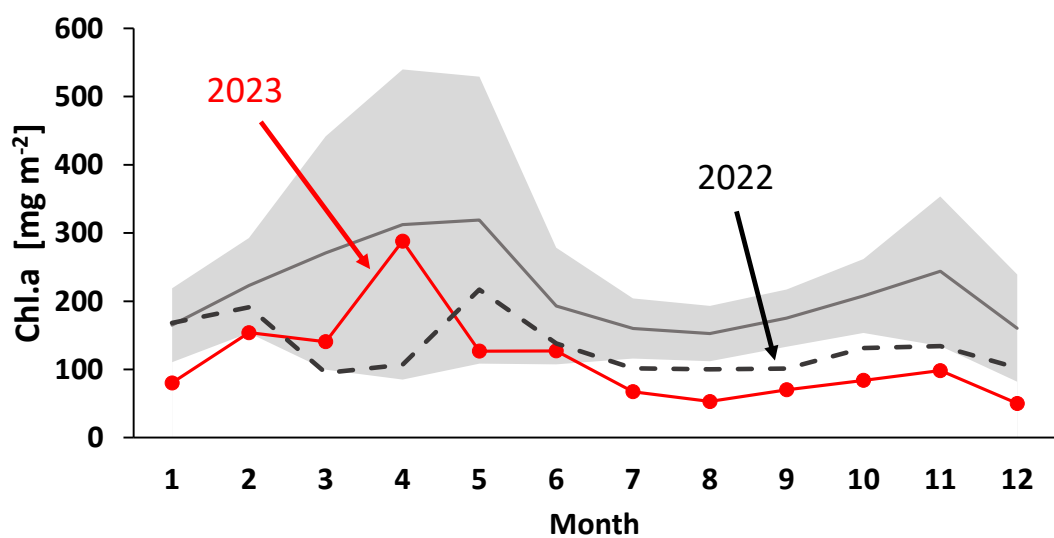
באצטון 90% לכ-18 שעות. ייצור ראשוני נמדד בשיטת הפחמן המסומן רדיואקטיבית לפי Steeman-1952 לאחר אינקובציה של 2-3 שעות in-situ בעומקי הדיגום.

תוצאות ודיון

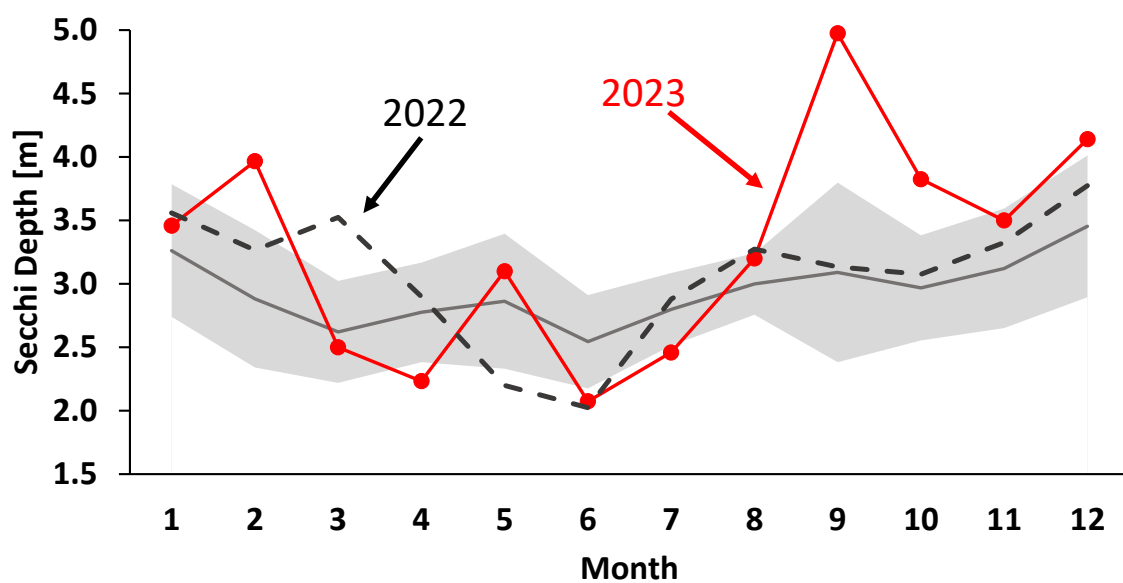
בניגוד לשנת 2022, בשנת 2023 הממוצעים החודשיים של קצבי היצרנות הראשונית באזור הפוטי של הכנרת היו גבוהים יחסית באביב (איור 38). בהסתכלות על השונות של הממוצעים החודשיים בעשור האחרון, הערכים הגיעו לשיא של כל הזמנים 3,250 מ"ג פחמן למ"ר ליום. תצפית זאת בהחלט מפתיעה משום שריכח הכלורופיל שנמדד באותו הזמן הגיע לשיא שנתי של 290 מ"ג למטר מרובע בלבד, ערך שאינו עולה על הערכים הממוצעים לעשור (איור 39). לפי ד"ר תמר זהרי (מידע בע"פ) הסבר אפשרי לערכי היצרנות הראשונית הגבוהים הוא שכיחות גבוהה יחסית של מיני אצות ירוקיות קטנות כגון *Chodatella citrifomis* ו-*Coelastrum reticulatum* באותה התקופה. לאחר קיבוע פחמן בקצב ממוצע ביולי הערכים ירדו לתחתית טווח הנתונים של העשור האחרון בסתו. במקרה זה, הירידה בקצבי היצרנות נובעים מריכחים נמוכים ביותר של כלורופיל a בחודשים יוני עד דצמבר שנשארו מתחת ל 100 מ"ג למ"ר (איור 39). ערכי הכלורופיל הנמוכים הינם אחת הסיבות לשיא של כל הזמנים במדידת עומק הסקי החודשי הממוצע שהגיע ל 5 מטר בספטמבר (איור 40). מלבד הערך הגבוה בסתו, ערכי עומק הסקי היו קרובים לממוצע הרב שנתי, עם ערכים נמוכים (2 מטר) באביב שהיו מתחת לממוצעים הרב שנתיים, וערכים גבוהים יותר לקראת הקיץ.



איור 38: המהלך השנתי של הממוצעים החודשיים של קצבי ייצור ראשוני ב-2023 (קו אדום) בהשוואה ל-2022 (קו שחור) (קו שחור) ולסטיות התקן סביב הממוצע לעשור 2013-2022 (ענן אפור). הערכים מוצגים ליחידת שטח, לאחר אינטגרציה לאורך 15 המטר העליונים של עמודת המים.



איור 39: כמו איור 38 עבור ריכוזי כלורופיל



איור 40: כמו איור 38 עבור עומק סקי בתחנה A.

2.17 ייצור שניוני חיידקי

במימון רשות המים

זהר פריימן, שירה ניניו

- הפעילות החיידקית ההטרורופית השנתית שנמדדה בשנת 2023 באזור הפוטי הייתה דומה לזו שנמדדה ב-2022.
- ערך השיא השנתי התקבל בחודש אוגוסט לאחר הופעת הכחוליות מקבעות החנקן.
- זוהי השנה השנייה ברציפות בה לא נראית יותר המגמה של פעילות חיידקית גבוהה שאפיינה את השנים הקודמות.



רקע

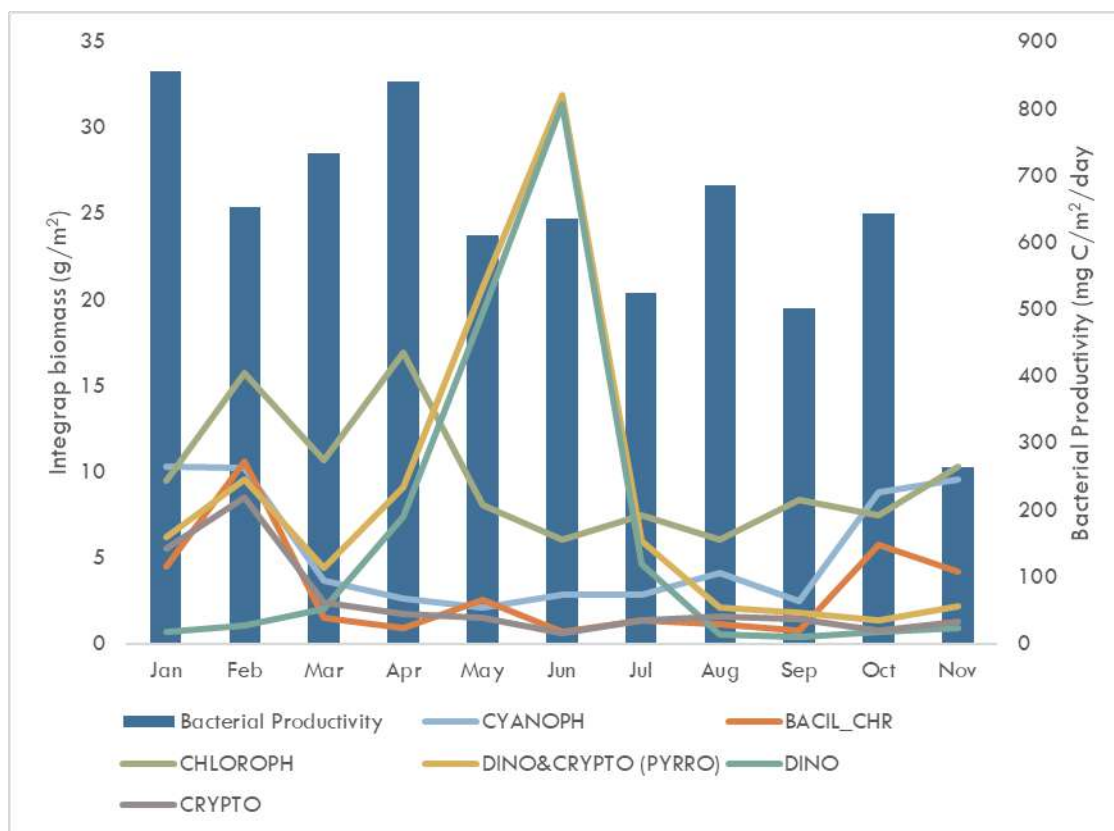
חיידקים הטרורופיים הם מרכיב חשוב במארג המזון, עם תפקיד מרכזי בפירוק חומר אורגני ומחזור נוטריינטים. החיידקים מגיבים מהר לשינויים באגם כולל פריחות של אצות או עליה אחרת בביומסה. התחקות אחר פעילות חיידקית מאפשרת קבלת תמונה של פיזור תהליך הפירוק של חומר אורגני באגם בזמן. מעקב שגרתי אחר פרמטר זה חשוב בכדי 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-2023 בתדירות של פעם בחודש.

תוצאות ודיון

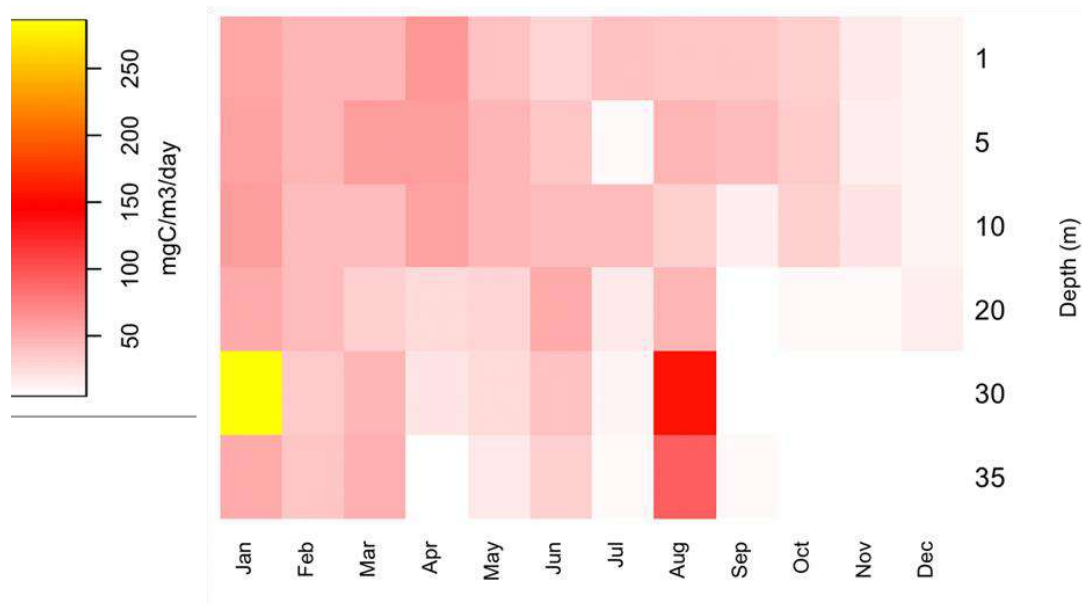
הייצור החיידקי הכולל שנמדד ב-2023 היה דומה לזה שנמדד ב-2022. באזור הפוטי נמדדו ערכי שיא שנתיים של מעל 800 מג' פחמן למ"ר ליום בחודשים ינואר ואפריל (איור 41). הנתונים מצביעים על פעילות של חיידקים הטרורופים באזור הפוטי לאורך רוב השנה ללא תלות בפריחה של אצה מסוימת. בחודש נובמבר נמדדה פעילות חיידקית נמוכה במיוחד מסיבות לא ידועות (איור 41).



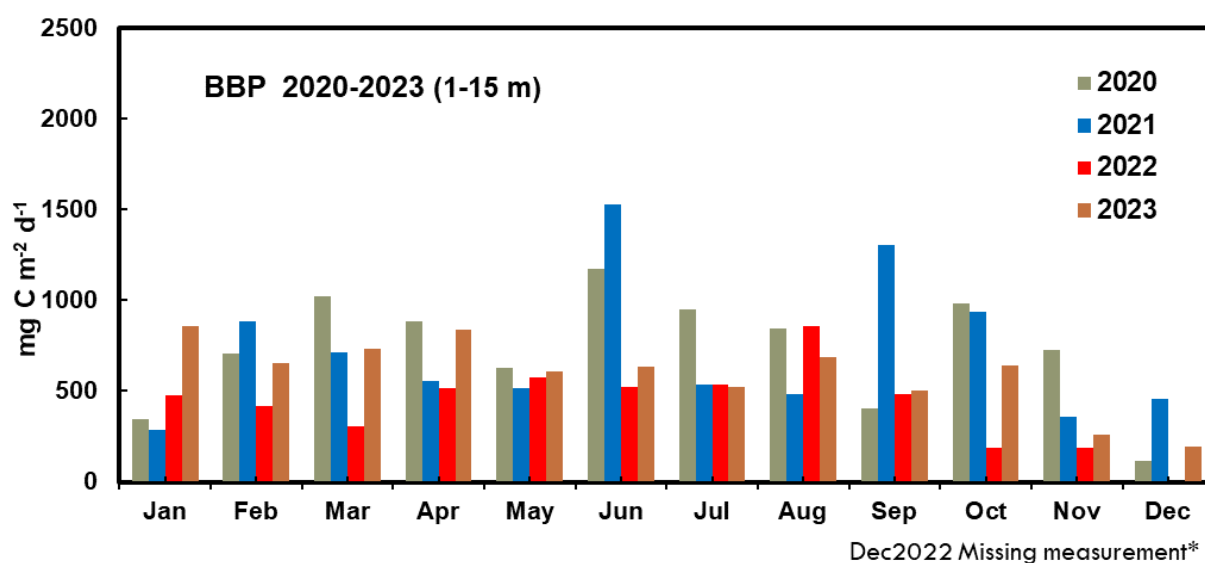
איור 41 : ביומסה של פיטופלנקטון וייצור חיידקי (מג' פחמן/מ"ר/יום) בעמודת המים האפילימנטית ב- 2023 הערכים מייצגים אינטגרציה של ערכים שנמדדו לאורך עמודת המים בעומקים 1-15 מטר.

ניתוח של הפיזור האנכי של הפעילות החיידקית מראה פעילות חיידקית גבוהה לאורך רוב עמודת המים בחודש אוגוסט, כולל שיא בעומק של 30 מ'. פעילות זו משקפת ככל הנראה תהליכי פירוק ביומסה שוקעת של פריחות כחוליות מקבעות חנקן, בשילוב עם תהליכי דניטריפיקציה הטיפוסיים לעונה זו באגם (איור 42).

סך כל הייצור החיידקי שנמדד ב 2023 היה דומה לזה שנמדד ב 2022 (איור 43) והפעילות בשנים אלה הייתה מעט יתר נמוכה מהפעילות שנמדדה באגם בשנים 2020-2021.



איור 42: מפת חום המייצגת את הפיזור האנכי של היצרנות החיידקית בעמודת המים מ-1-35 מ' בשנת 2023. הגוון מייצג את קצב היצרנות שנמדד ביחידות מג' פחמן/מ³/יום, על פי הסרגל שמשמאל.



איור 43: היצרנות החיידקית (מג' פחמן למ"ר ליום) בעמודת המים מ-1-15 מ' בשנים 2020-2023.

2.18 חיידקים אינדיקטורים לזיהום צואתי

במימון רשות המים

נטלי קמפר, עכסה לופו, שירה ניניו



- שנת 2023 התבלטה בריכוזים נמוכים יחסית של חיידקים אינדיקטורים לצואה, כולל בתקופת החורף.

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 2023 נרשמו ריכחים נמוכים של חיידקים אינדיקטורים לצואה בכנרת. הספירות הגבוהות ביותר של קוליפורמים צואתיים היו מול שפך הירדן עם 180 ל- 100 מל' בחודש ינואר. בתקופה זו של השנה נובע הזיהום מזרימות שיטפוניות באגן ההיקוות הכוללות גם נגר עילי, וכשהשיטפונות מועטים גם הזיהום הנלווה נמוך (טבלה 4).

בחדש פברואר נמדד זיהום חריג של אנטרוקוקים מול חוף זאכי עם ערכים של 161 חיידקים ל- 100 מ"ל, מעל הערך המותר לחופי רחצה. מקור הזיהום אינו ידוע, אך על פי הנתונים שבידנו מדובר בזיהום נקודתי שלא השפיע על אזורים אחרים באגם. כיוון שהזיהום האנטרוקוקי לא לווה בזיהום גבוה של קוליפורמים צואתיים או של קולי צואתי, יתכן ומדובר בזיהום ממקור שאיננו צואתי, כגון ביומאסה צמחית או קרקע שנסחפו לאגם.

טבלה 4 : תוצאות ספירות אינדיקטורים חיידקיים לזיהום צואתי (מספר חיידקים ב- 100 מ"ל מים) בתחנות שונות ב- 2023. 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.

STATION:JORDAN

	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	183	56	30
Feb.	0	0	0
Mar.	1	3	4
Apr.	40	13	13
May.	76	14	10
Jun.	17	8	2
Jul.	5	2	3
Aug.	94	42	28
Sep.	18	6	8
Oct.	13	9	7
Nov.	57	18	7
Dec.			

STATION:TIBERIAS INTAKE

	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	1	3	4
Feb.	14	7	17
Mar.	5	0	10
Apr.	6	1	7
May.	13	0	1
Jun.	5	0	2
Jul.	23	5	4
Aug.	6	5	5
Sep.	2	3	1
Oct.	4	4	2
Nov.			
Dec.			

STATION: DUGIT

	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	30	10	16
Feb.	12	12	33
Mar.	3	0	3
Apr.	6	0	4
May.	80	16	29
Jun.	1	0	0
Jul.	2	0	0
Aug.	98	17	11
Sep.	8	2	0
Oct.	3	5	3
Nov.	2	1	1
Dec.			

STATION:MAAGAN

	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	5	5	10
Feb.	77	9	12
Mar.	5	0	35
Apr.	0	2	13
May.	4	0	0
Jun.	0	1	0
Jul.	4	3	2
Aug.	1	1	1
Sep.	1	2	1
Oct.	0	0	1
Nov.			
Dec.			

STATION:WATERCARRIER INTAKE

	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	2	3	4
Feb.	10	4	4
Mar.	3	1	10
Apr.	11	3	6
May.	18	2	3
Jun.	15	3	1
Jul.	20	4	9
Aug.	0	0	1
Sep.	8	2	1
Oct.	6	6	3
Nov.	5	1	3
Dec.			

STATION:JORDAN VALLEY INTAKE

	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	13	6	7
Feb.	29	12	10
Mar.	27	5	18
Apr.	6	1	10
May.	12	1	0
Jun.	6	2	3
Jul.	9	1	6
Aug.	6	0	0
Sep.	4	2	2
Oct.	1	0	1
Nov.			
Dec.			

STATION:ZACHI

	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	44	24	24
Feb.	56	31	161
Mar.	7	0	11
Apr.	171	40	30
May.	9	4	4
Jun.	90	64	19
Jul.	5	2	5
Aug.	6	5	3
Sep.	20	1	0
Oct.	14	5	7
Nov.	13	3	0
Dec.			

STATION:ALUMOT

	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	33	20	16
Feb.	66	18	33
Mar.	25	0	14
Apr.	0	1	13
May.	14	1	1
Jun.	1	1	1
Jul.	2	1	1
Aug.	0	0	0
Sep.	0	0	2
Oct.	8	3	1
Nov.			
Dec.			

STATION:GOLAN INTAKE

	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	13	1	25
Feb.	3	1	55
Mar.	40	2	20
Apr.	1	0	3
May.	9	3	4
Jun.	13	4	5
Jul.	7	1	1
Aug.	4	1	1
Sep.	4	0	1
Oct.	9	2	7
Nov.	30	1	8
Dec.			

STATION:KURSY

	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	14	2	8
Feb.	34	0	54
Mar.	3	0	2
Apr.	1	0	3
May.	50	32	48
Jun.	0	1	0
Jul.	6	0	5
Aug.	27	6	2
Sep.	0	0	2
Oct.	5	1	1
Nov.	70	6	10
Dec.			

STATION:AMUD

	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	17	1	40
Feb.	25	6	9
Mar.	0	1	84
Apr.	1	1	4
May.	7	1	1
Jun.	20	6	5
Jul.	2	1	7
Aug.	0	0	0
Sep.	0	1	0
Oct.	1	0	0
Nov.			
Dec.			

STATION:YARMUCH

	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	41	16	23
Feb.	48	17	24
Mar.	13	0	22
Apr.	0	0	1
May.	10	2	0
Jun.	2	0	1
Jul.	1	1	1
Aug.	2	0	1
Sep.	0	0	1
Oct.	0	0	1
Nov.			
Dec.			

STATION:AMNUN

	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	11	6	8
Feb.	58	11	88
Mar.	1	0	2
Apr.	5	3	6
May.	5	0	9
Jun.	4	2	0
Jul.	12	6	5
Aug.	7	5	10
Sep.	5	0	1
Oct.	5	2	2
Nov.	20	1	2
Dec.			

STATION:MASUDIA

	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	33	10	8
Feb.	23	16	35
Mar.	19	0	3
Apr.	145	34	20
May.	9	3	3
Jun.	35	27	7
Jul.	4	1	7
Aug.	11	5	1
Sep.	2	0	1
Oct.	29	14	12
Nov.	3	3	0
Dec.			

TABLE 15 STATION: TZALMON

	Fecal C.	E. Coli	Enteroc.
Jan.	18	11	23
Feb.	13	5	5
Mar.	2	1	18
Apr.	1	0	21
May.	1	0	0
Jun.	21	9	6
Jul.	0	0	2
Aug.	2	0	0
Sep.	22	46	0
Oct.	18	0	0
Nov.			
Dec.			

2.19 ניטור פיטופלנקטון

במימון רשות המים

עודד לירן, אלה אלסטר, תמר זהרי

- לא נצפה שיא בביומסה של הפיטופלנקטון לאורך השנה, אולם כן התרחשה ירידה בכמות הביומסה הכוללת במעבר בין חודש יוני ליולי.
- הדינופלגלט פרידיניום נצפה בכמויות ביומסה נמוכות מאד, מאפריל עד יוני.
- שני מיני ציאנובקטריה מקבעות חנקן שאופייניות לפיטופלנקטון של הקיץ והסתיו, אפניזומנון וצילינדרוספרמופסיס, לא פרחו השנה והופיעו באגם מאוחר מאוד, רק לקראת אוקטובר.
- ניסויי מעבדה מאששים שהסיבה לתופעת החסר אינה יכולה לנבוע מהטמפ' הגבוהה של הסביבה בלבד ותלויה בגורמים נוספים.



צופת של ציאנובקטריה מסוג מיקרוציסטיס בחוף המעבדה לחקר הכנרת. 06.03.24. צילמה: נטלי קמפר

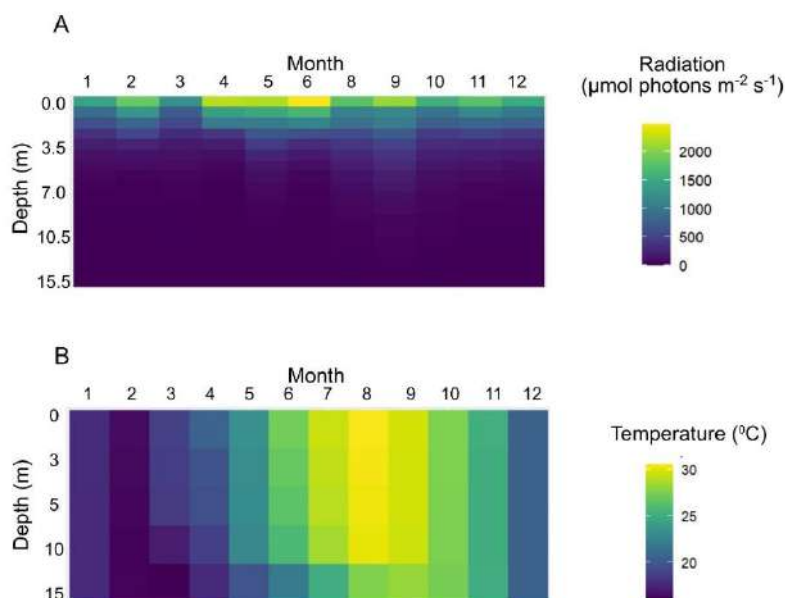
מטרת הניטור

מעקב שוטף אחר הביומסה של המינים השונים, הקבוצות הטקסונומיות, וכלל הפיטופלנקטון בכנרת. אפיון הרכב המינים באירועים חריגים, והסבר טקסונומי להימצאות מיני פיטופלנקטון במקרים של ירידה באיכות המים.

רקע

הפיטופלנקטון באגם הכנרת נחלק לחמש קבוצות עיקריות: אצות כחוליות (ציאנובקטריה) שהינן בקטריות פוטוסינטטיות מסוג גרם-שלילי ללא גרעין תא, ואצות אאוקריוטיות: צורניות (דיאטומאות) המייצרות שריון המכיל אטומי סיליק, ירוקיות; דינופלגלטים וכרומיסטות. מדי פעם נצפים גם מינים מקבוצות טקסונומיות נוספות כדוגמת אאוגלנות, אך אלו מופיעים לאורך העונות בכמויות ביומסה זניחות לעומת הקבוצות המרכזיות. הפיטופלנקטון הן היצרניות הראשוניות העיקריות במערכות אקוויטיות והבסיס למארג המזון כולו. הן מנצלות את אור השמש על מנת לקבץ פחמן דו חמצני אי אורגני לתרכובות פחממניות על ידי תהליך הפוטוסינתזה, אשר תוצאותיו הינם סוכרים וחומרי תשמורת המשמשים לבניין המסה התאית, ולכן יצרנות ראשונית של ביומסה. שני תנאי הבסיס המשפיעים על חיוניותם של התאים הפוטוסינטטיים הינם אור וחום (איור 44, תחנה A, מרכז אגם הכנרת, נתונים נלקחו מתוך המאגר הניטור באחריות דר' ורנר-אקרט).

פרופיל התאורה באגם הכנרת לאורך 2023 הראה עוצמות קרינה חזקות מאוד בחצי המטר העליון של עמודת המים סביב חודשים אפריל-יוני (איור A44). עוצמת התאורה דועכת בצורה מעריכית לאורך עמודת המים וכבר בעומק 3.5 מטרים כמות האור מגיעה לכרבע מזו הפוגעת בפני המים. פרופיל החום באגם הכנרת לאורך שנת 2023 מראה כי בפברואר הטמפ' הממוצעת הייתה נמוכה מ-20 מעלות צלזיוס והחל מחודש אפריל האגם התחמם מדי חודש עד לשיא של 30 מעלות צלזיוס באוגוסט, שיא שעד לאט מאוד עד חודש דצמבר של אותה השנה.



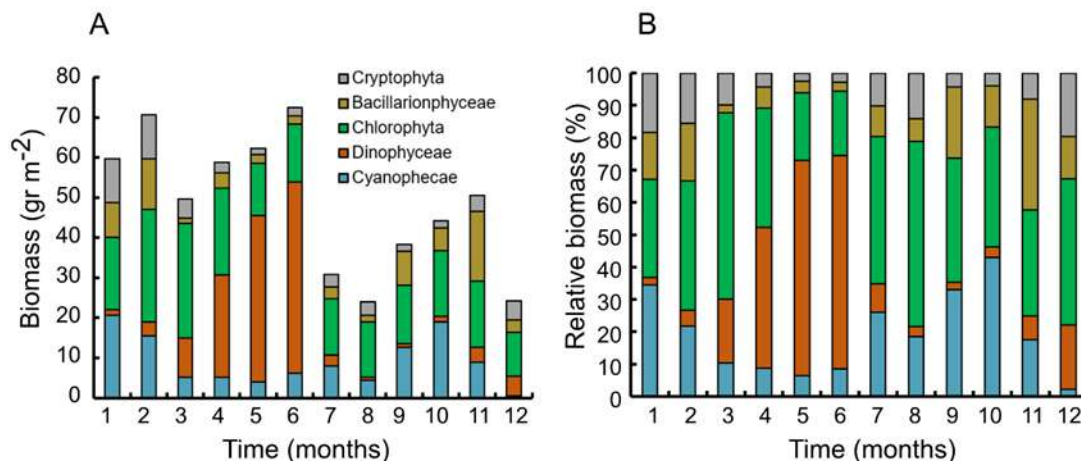
איור 44: נתוני אור וטמפ' ב-15 המטר העליונים של עמודת המים בתחנה A שבמרכז הכנרת לאורך שנת 2023. (A) עוצמת הקרינה (ביחידות של מיקרומול פוטונים למטר רבוע לשניה). הגרף מכיל שני צירים- זמן (חודשים בספרות רומיות), ועומק ביחידות של מטרים. הצבעים בתמונה מסמלים את עוצמת הקרינה כאשר כחול, טורקיז, ירוק וצהוב מסמלים עוצמות אור של 0, 1000, 1500 ו 2000 מיקרומול פוטונים למטר רבוע לשניה, בהתאמה. (B) טמפרטורת המים במעלות צלזיוס לאורך השנה, באותה הצורה כמו פאנל A.

בכנרת, הפיטופלנקטון מהווה אינדיקציה לאיכות המים במספר אופנים: ריכחים גבוהים של פיטופלנקטון הם אינדיקציה לתנאים שמיטיבים עם פריחת אצות כמו ריכחים גבוהים של חומרי דשן במים. מספר מינים של ציאנובקטריה מייצרים רעלנים שפוגעים באיכות המים לשתייה ובאפשרות להשתמש בכנרת לקייט ונופש. מינים אחרים הם מינים רצויים, כמו הדינופלגלטים עתירי חומצות השומן משמשים מזון מועדף לדגים, וכמו אצות הקריפטופיטה, רוב הירוקיות וחלק מהצורניות, אשר משמשים מזון מועדף לזואופלנקטון. בשנת 2023, כמות הביומסה הכוללת שנצפתה בכנרת הייתה נמוכה, פחות מ- 100 גר' לכל מטר מרובע (איור 45). כמו כן נצפו שתי אצות ירוקיות שהופיעו במספרים גבוהים שלא כמו בשנים הקודמות – *Coelastrum cambricum*, *Chodatella citrifomis*.

דיון

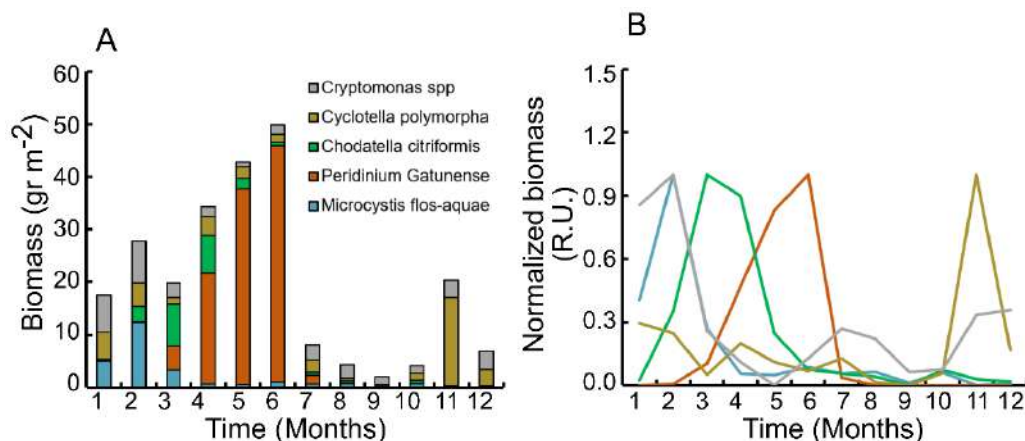
תפוצת המינים באגם לשנת 2023

לאורך השנה נצפתה צבירה בינונית של ביומסה (פחות מ- 100 גרם למטר מרובע). קבוצת הציאנובקטריה מגיעה לכמות ביומסה של 20 גרם למטר מרובע בינואר ולאחר מכן, רק בסתיו סביב חודש אוקטובר. כמות הביומסה הכוללת שהגיעה לשיא של 70 גרם למטר מרובע נחתכה בחצי לכמות של ~30 גרם למטר מרובע בין חודש יוני לחודש יולי, ככל הנראה מעומס החום שהחל להצטבר החל מיולי (השוו בין איור 44B ל-איור 45A). פריחתו של הדינופלגלט פרידיניום הקנתה לקבוצת הדינופלגלטים את כמות הביומסה היחסית הגדולה ביותר בין כל המינים שפרחו השנה (איור 45B), כאשר המסה הגדולה התקבלה בחודשים מאי ויוני.



איור 45: סך הביומסה לפי קבוצות טקסונומיות על פני עמודת המים לאורך שנת 2023. (A) הביומסה המחושבת לפי הקבוצות הטקסונומיות ביחידות של גרם למטר מרובע, כאשר ציר ה- x מבוטא בספרות חודשיות- 1,2,3 וכן הלאה בהתאמה לינואר, פברואר, מרץ וכן הלאה. (B) ההתפלגות היחסית באחוזים של אותו המידע כמו בפאנל A.

כאשר מנתחים את התפלגות המינים מתוך חמשת הקבוצות המרכזיות, בעלי הנוכחות הגדולה ביותר באגם לאורך השנה, נראה כי אפילו שכמות הפרידיניום הייתה קטנה מאוד ביחס לכמות בזמן הפריחות שלו, הרי שתרומתו לסך הביומסה בין אפריל ליוני הייתה הגדולה ביותר (איור 46A). ההפרש בביומסה בין יוני ליוני נהיה חריף יותר עם חיתוך בכ- 80% מתוך הביומסה.

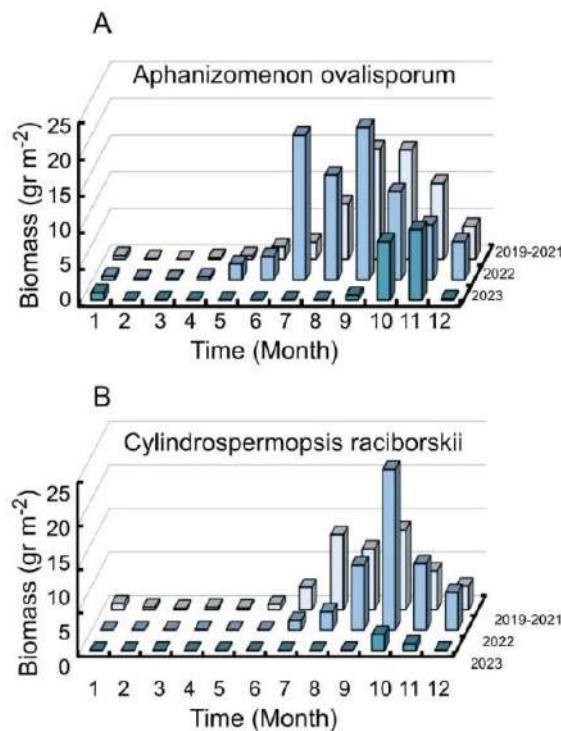


איור 46: התפלגות שנתית של המינים בעלי הביומסה המרבית בכל קבוצה טקסונומית. (A) הביומסה מחושבת על פני כל עמודת המים ביחידות של גרם למטר רבוע לאורך חודשי השנה, כאשר 1,2,3 וכן הלאה על ציר X מסמנים את ספרות החודשים ינואר, פברואר, מרץ וכן הלאה, בהתאמה. צבעי המינים הם כמו המינים המתוארים באיור 44, כאשר מיקרוציסטיס, פרידיניופסיס, שודטלה, ציקלוטלה וקריפטומונס צבועים בטורקיז (ציאנובקטריה), חום (דינופלגלטים), ירוק (ירוקיות), צהוב חאקי (דיאטומאות) ואפור (קריפטופיטה), בהתאמה; (B) מהלך עונתי לכל מין בפאנל A מנומל בין מקסימום למינימום הביומסה של אותו המין. טווח השינוי הוא בין 0-1 על המידע אשר מופיע בפאנל A.

כאשר מנרמלים את המידע הכמותי של הביומסה בין הגבולות הנמוך ביותר לגבוה ביותר בכמות הביומסה של כל מין שולט, נראה שהעליה בביומסה של כל מין תלויה במינים הפורחים לפניו ואחריו (איור 46B). בתחילת השנה פורחים מיקרוציסטיס יחד עם הקריפטומונס, ואז לפי הסדר עולה הירוקית שודטלה, שיוודת כשמתחילה עליית הפרידיניום. ביולי מתרחשת ירידה חדה בנוכחות הפרידיניום ואז לאורך חודשי הקיץ אין שליטה של מין מסוים. לקראת סוף השנה, בסביבות אוקטובר, הצורנית ציקלוטלה מתחילה לפרוח.

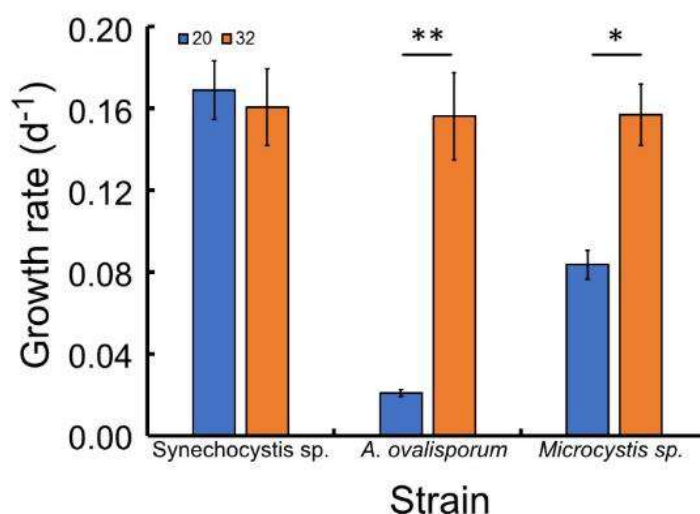
תופעה חריגה – פריחה מאוחרת מאוד חניחה של ציאנובקטריה רעילות לקראת הסתיו

שני מיני ציאנובקטריה מקבעות חנקן, אפניזומנון וצילינדרוספרמופסיס, הופיעו בשנת 2023 באגם בריכחים נמוכים יחסית לארבע השנים הקודמות (איור 47). אפניזומנון התחיל לפרוח כבר במאי, ואילו צילינדרוספרמופסיס ביולי. בממוצע שנתי לאורך שנות 2019-2022, נראה כי שיא הפריחה של אפניזומנון וצילינדרוספרמופסיס חל לקראת ספטמבר - אוקטובר בכל שנה. בשנה שלפני ההיעלמות החריגה, נצפו כמויות גדולות יותר של ביומסה עבור שני המינים.



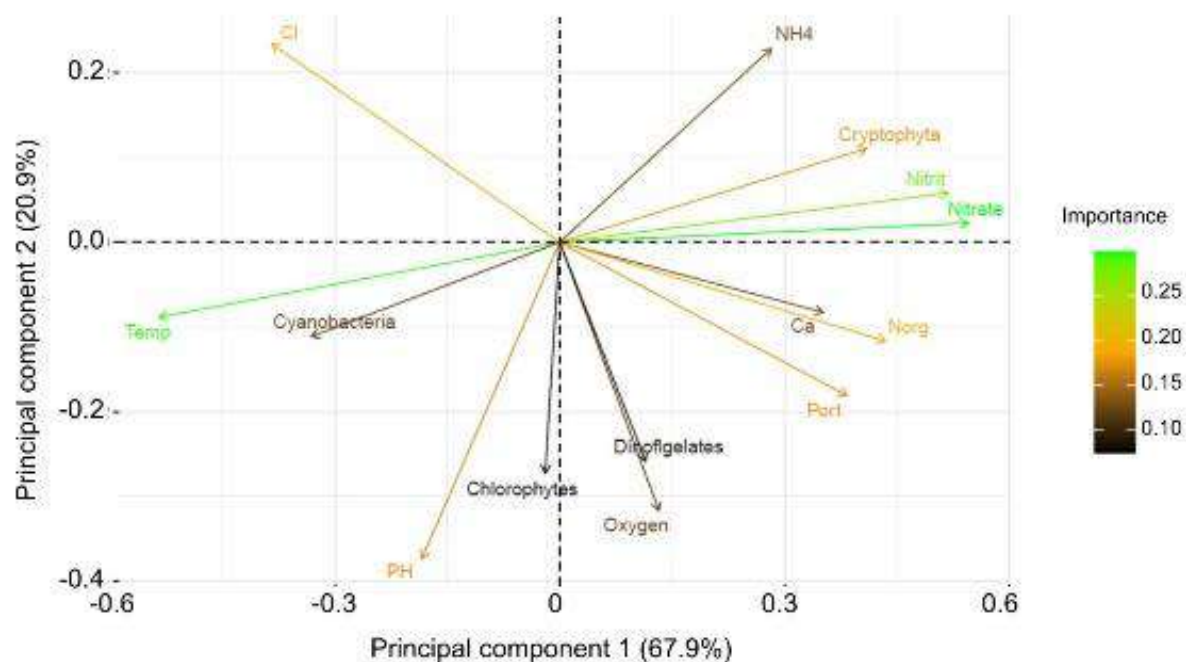
איור 47: השוואת תבנית הפריחה השנתית של שני מיני ציאנובקטריה מקבעות חנקן בין שנת 2023 ושנים קודמות. פאנל (A) ו-(B) מתארים את המהלך העונתי של *A. ovalisporum* ו-*C. raciborskii*, בהתאמה. בגרף העמודות מוצגות שלוש סדרות של נתונים - קדמית, אמצעית ואחרית מתייחסת לשנת 2022, 2023 וממוצע שלוש השנים 2019-2021, בהתאמה. ציר הזמן מייצג את חודשי השנה בספרות רומיות, כאשר 1,2,3 וכן הלאה מייצג את ינואר, פברואר, מרץ וכן הלאה, בהתאמה.

בניסויי מעבדה על תרביות בדקנו את התנהגותו של זן הציאנובקטריה הקייצי אפניזומנון מול התנהגותו של זן הציאנובקטריה החורפית מיקרוציסטיס בשתי טמפרטורות - 20°C , 32°C המייצגות את טמפרטורות המים באגם בקיץ ובחורף (איור 48). כבקרה, בחרנו בזן מייצג של ציאנובקטריה, זן בינלאומי שהגנום שלו ידוע - סינכוציסטיס. נראה שטמפרטורה של 32°C מעלות צלזיוס מיטיבה עם שלושת הזנים והם מראים קצבי גידול סטנדרטיים שאינם שונים זה מזה. ב- 20°C , נראה שזן הביקורת גדל באותו הקצב כמו בטמפ' הגבוהה, אך שני הזנים מהכנרת, החורפי והקיצי, גדלים לאט יותר. לזן החורפי קצב גידול כמעט משולש מן הזן הקייצי ולכן כנראה גם טמון בכך היתרון שלו לפרוח בחורף. הנקודה החשובה בבדיקה הזו מראה כי גם עליה דרסטית של הטמפ' לא הייתה צריכה למנוע את פריחתה של *A. ovalisporum* כפי שנראה בנתוני השדה.



איור 48: השוואת קצב הגידול של שני מיני ציאנובקטריה מבודדים מן הכנרת מול סטנדרט בינלאומי בשתי טמפרטורות. זני הכנרת *Aphanizomenon ovalisporum* ו- *Microcystis sp.* חן בינלאומי (Synechocystis sp. PCC6803) גודלו בעוצמת תאורה של 35 מיקרומול פוטונים למטר בריבוע לשנייה, בשתי טמפרטורות – 20°C, 32°C (צבעי כתום וכחול, בהתאמה), בשקשוק של 100RPM בתנאי מעבדה (מדיום עשיר BG-11 על פי Stanier, 1970). הניסוי נערך בארבע חזרות ביולוגיות, קווי הטעות מציינים את הטעות הסטנדרטית של ממוצע המדגם, והסימונים שתי נקודות ונקודה מסמלים את המובהקות הסטטיסטית של 99.9% ו 99% מובהקות, בהתאמה.

לכן, שאלנו אילו עוד גורמים יכולו להשפיע על הפריחה המאוחרת של ציאנובקטריה זו. ביצענו אנליזה של רכיבים ראשיים על מנת לחפש קשרים בין משתנים נוספים – הנתונים הכימיים של האגם לאורך השנה והעומקים השונים, ובין הקבוצות המרכזיות באגם (איור 49). נראה כי נתוני האגם לשנת 2023, שנבדקו באנליזה מסבירים 88% מתוך סך השונות באנליזה. הרכיב הראשי הראשון מסביר כ- 67% מתוך סך השונות והוא מדגים כיצד החומרים הכימיים משפיעים על ההתפלגות. הרכיב השני מסביר את 21% השונות הנותרת ומדגים כיצד קבוצות הפיטופלנקטון השונות משפיעות האחת על השנייה, ומשפיעות ומושפעות על החומרים הכימיים באגם. במקרה של ציאנובקטריה, טמפ' קשורה בצורה חיובית להופעתן, כך שעליה בחום צריכה להוביל לעליה בביומסה של הציאנובקטריה כפי שנראה בניסוי המעבדה, אך לא כפי שנצפה בפועל בכנרת. גורמים נוספים שמשפיעים על הציאנובקטריה הם ריכוזי החנקן האנאורגני, ניטריט וניטראט, אשר מצויים בקשר חזק והפוך לעלייה בביומסה של הציאנובקטריה. היינו מצפים שעם עלייה בכמות הניטראט, שהוא הצורן הזמין לאורגניזמים, תהיה עלייה גם בציאנובקטריה, אך התוצאה המוצגת אינה מופרכת לחלוטין, מכיוון ש- *A. Ovalisporum* הינה מקבעת חנקן, כך שיכול להיות שכמותה תגדל במים גם בנוכחות חסר של צורני החנקן השונים, תוך יתרון על מינים ללא יכולת קיבוע חנקן. קבוצת הדינופלגלטים נראית כקשורה בצורה חיובית לקבוצת הירוקיות, היא אינה משפיעה על קבוצת הציאנובקטריה וגם לא על קבוצת הקריפטופיטה, על פי אנליזה זו. נראה כי הפרמטרים המשפיעים ביותר על נוכחות הציאנובקטריה אם כן הינם כמות החנקן האנאורגני במים, ערך הגבה (pH) ונוכחות של קבוצות טקסונומיות אחרות במקביל להופעתן של הציאנובקטריה.



איור 49: אנליזת רכיבים ראשיים של קבוצות הפיטופלנקטון ומידע כימי מאגם הכנרת לשנת 2023. הגרף מציג את שני הרכיבים הראשיים המכילים את מירב השונות (88%) במידע. החיצים השונים מייצגים את המשתנים שנלקחו לאנליזה – קבוצות הפיטופלנקטון ונתונים כימיים של המים. המידע כולל את התצפיות לאורך שנת 2023 ובעומקים 1,3,5,10,15 מטרים בתחנה A במרכז האגם. צבעי החיצים מצביעים על חשיבות המשתנה כאשר חום וירוק הם שני קצוות החשיבות עבור החשיבות הנמוכה ביותר והגבוהה ביותר, בהתאמה.

2.20 רעלני כחוליות

במימון רשות המים

פלאג אסטרן, דיתי ויינר-מוציני



- בשנת 2023, לא זוהו מיקרוציסטינים במי הכנרת בחודשי האביב.
- אנליזת הביומאסה אשר נצפתה באגם באותם חודשים באגם, הראתה ריכוז מיקרוציסטינים מירבי של מעל 286 מק"ג לגרם חומר יבש.
- צלינדרוספרמופסין נמדד בריכוזים נמוכים בכנרת בדוגמאות מים בין החודשים יוני- דצמבר 2023.
- רמת הרעלן הגיעה לריכוז מרבי של 0.55 מק"ג לליטר במי האגם, כפי שנצפתה בדצמבר 2023.

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 מיידית לרשות המים ולספקי המים מהכנרת.

שיטות

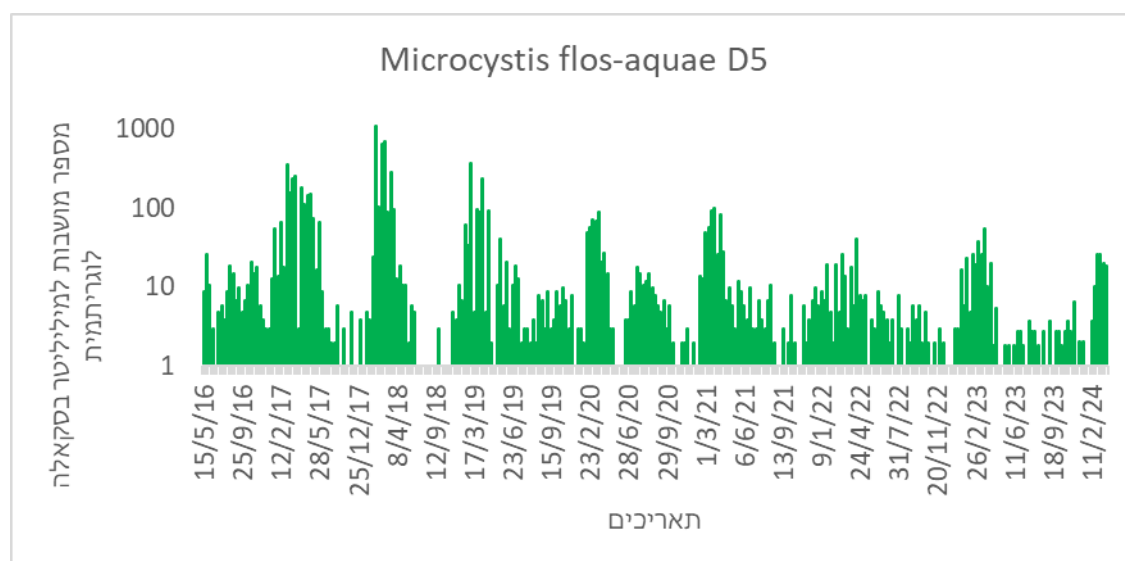
דגימות מים נאספות בתחנה A בכנרת מעומק 1 מטר, בתדירות של אחת לחודש. כאשר עולה ריכוז הציאנובקטריה במים עולה גם תדירות הדיגום לרעלנים. באירועים של פריחת מיקרוציסטיס, היוצרת משטחים צפים, נדגמים גם משטחי הציאנובקטריה וריכוז הרעלנים בביומסה שנאספה. איסוף ביומסת מיקרוציסטיס נערך ע"י סינון מי כנרת ברשת $20\mu m$. לאחר מיצוי, הדגימות נלקחות לאנליזה איכותית וכמותית לרעלנים משתי קבוצות: מיקרוציסטינים (Mic) שמקורם במיקרוציסטיס וצלינדרוספרמופסין (Cyn) שמקורו במיקרואצה בשם אפניזומנון. המדידות מבוצעות בעזרת LC/MS/MS לפי שיטות סטדרט

בינ"ל (EPA 545). התוצאות מוצגות כריכח הרעלן ליחידת נפח מים $\mu\text{g/L}$ או ppb בדוגמאות מים, או כריכח הרעלן בביומסה (ליחידת משקל יבש) בריכחי $\mu\text{g/g}$ (סקלת ריכחים גבוהה בשלושה סד"ג). במקביל נערכות מדידות נוספות באגם לבקשת גופים שונים.

תוצאות ודיון

מיקרואיסטיס ומיקרואיסטינים:

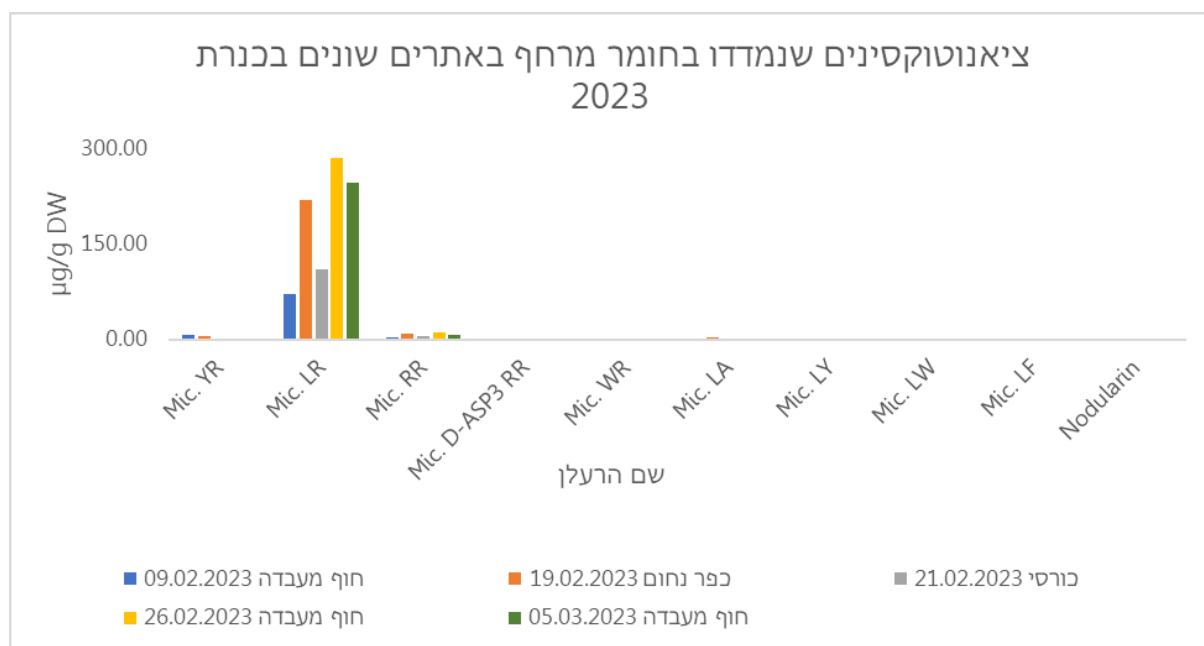
בשנים האחרונות המין השולט באגם הוא *Microcystis flos-aqua* בהשוואה למין *Microcystis aeruginosa*.



איור 50: מספר המושבות מיקרואיסטיס פלוס אקוה למיליליטר שנדגמו בתחנה A, כפי שנספרו במעבדת הכנרת החל משנת 2016. ציר Y הינו בסקאלה לוגריתמית.

איור 50 מתאר את המצאות המיקרואיסטיס פלוס אקוה, במי האגם כפי שנדגמו מפני המים בתחנה A. החל משנת 2020 לא נמצאו יותר מ 100 פריטים למיליליטר ולכן ניתן לאבחן רצף של יותר מ 3 שנים ללא פריחה משמעותית של זן זה. כמות רעלני המיקרואיסטיס במי האגם כפי שנבחנה בתחנה A גם הייתה נמוכה ומתחת לסף הגילוי (נבחנו 10 רעלנים שונים). ממצא זה תואם את הספירות הנמוכות של המיקרואיסטיס באגם.

למרות הנאמר לעיל, כפי שדיווחנו פעמים רבות, גם ללא אירועי פריחה מאסיביים דוגמת שנה זו, ניתן לאבחן חומר צף נקודתית, במקומות שונים בפני האגם. חומר צף זה המכונה "צופת" מכיל תאי מיקרואיסטיס וביתר שאת- רעלני מיקרואיסטיס שונים. כפי שניתן להבחין באיור 51 הרעלן העיקרי שנמדד השנה בחומר הצף שנאסף מאתרים שונים, הינו Mic-LR.

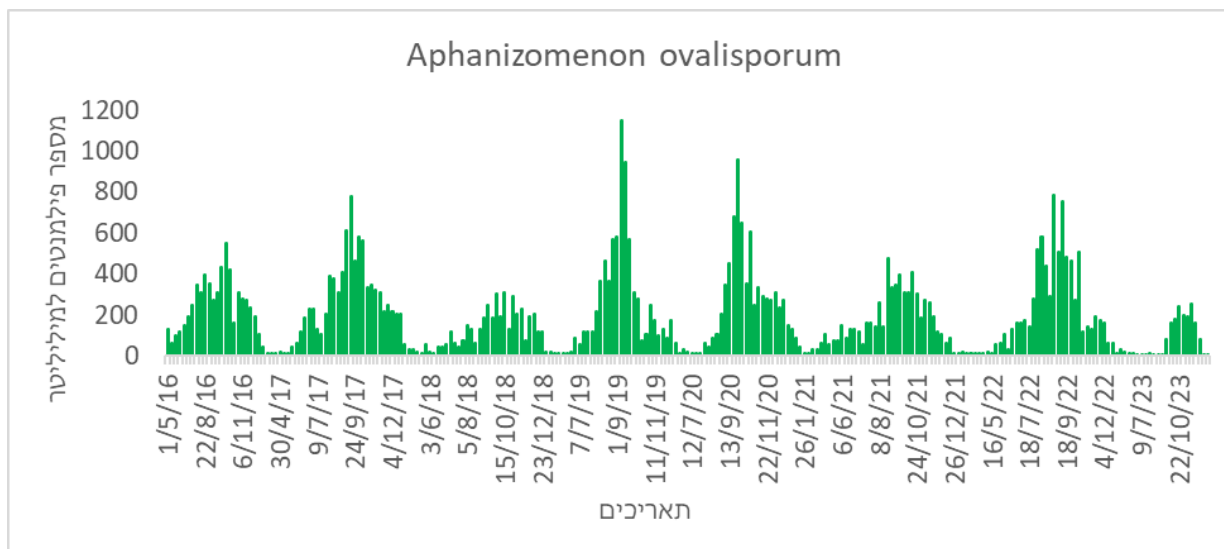


איור 51: ריכוז רעלני המיקרוציסטיס בחומר צף שנאסף באתרים שונים במי אגם הכנרת. הריכוזים הינם ביחידות מיקרוגרם לגרם חומר יבש.

ניתן לציין כי בהתאם להמלצות ארגון הבריאות העולמי, ערך סף מירבי למי שתייה הוא 0.7 מיקרוגרם לליטר, מעל ריכוז זה מבוצעת פעילות הכלרה למי הגלם לשתייה (מי הכנרת למשל) בכדי לחסל את נוכחות הרעלן במים. ריכוזים אלו של מיקרוציסטינים לא התקיימו במי האגם. ריכוזים גבוהים (שאינם מקבילים לריכוזים במים) התקיימו בצופת כפי שהזכר לעיל, בהתחשב באפשרות שמתרחצים עלולים לבלוע את מי האגם, לא קיימת סכנה ממשית אך כן במקרה של בליעה לא מכוונת של צופת. לכן חשיבות אבחון מקרי צופת היא קריטית וכך גם אנליזות החומר הצף ואולי אף בחינת שיטות טיפול בכתמים צפים אלו בקרבת חופי רחצה.

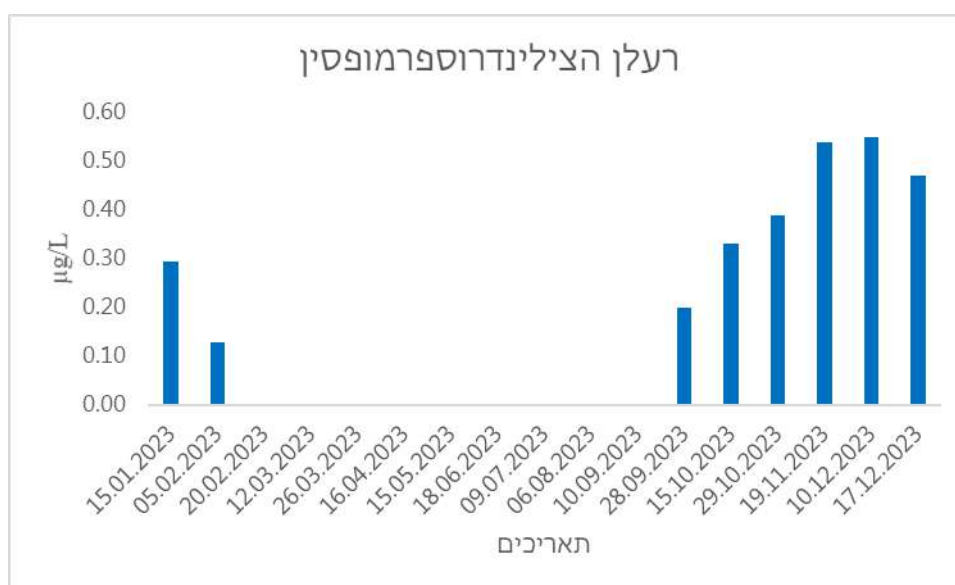
אפאניזומנון וצילינדרוספרמופסין:

בשונה משנים שעברו, גם מספר הפילמנטים של הציאנובקטריה אפאניזומנון – יצרנית רעלן הצילינדרוספרמופסין, הייתה נמוכה ולא חצתה את סף ה- 300 פילמנטים למיליליטר כפי שניתן להבחין באיור 52.



איור 52: ספירת פילמנטים *Aphanizomenon ovalisporum* בעומק 1 מטר בתחנה A בכנרת בין השנים 2016-2023.

מין זה של אפניזומנון מסוגל להפריש רעלן בשם צילינדרוספרמופסין אשר בניגוד לרעלני המיקרוציסטיס, הינו מסיס ביותר ועל כן ניתן לזהותו במים כמדיום עיקרי. כפי שצוין 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 באיור 53. ניתן לראות כי ריכוז הצילינדרוספרמופסין מגיע לשיא של 0.55 מיקרוגרם לליטר בדצמבר (מאוחר אך נמוך יחסית לשנים שעברו). ההופעות המאוחרות ונמוכות יחסית, הן של האפניזומנון והן של הרעלן המופרש צילינדרוספרמופסין, נותרו לפי שעה ללא הסבר.

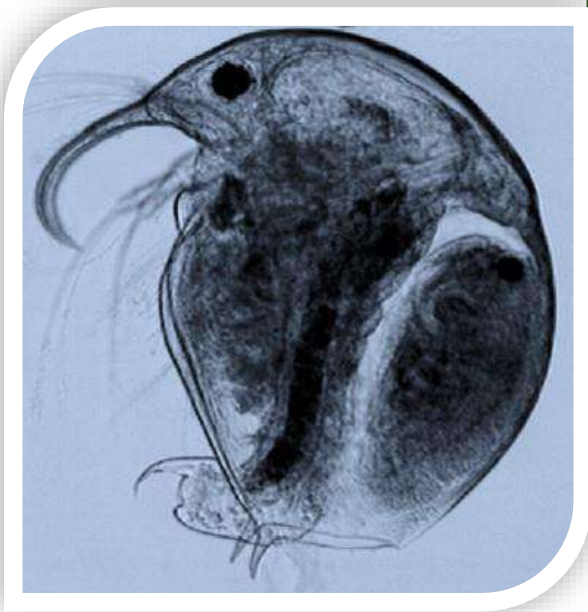


איור 53: ריכוז הרעלן צילינדרוספרמופסין במי הכנרת (תחנה A) במיקרוגרם לליטר

2.21 ניטור זואופלנקטון

במימון רשות המים

גדעון גל, שרון וורולקר



- נרשמה ירידה של 18% בצפיפות הכוללת של הזואופלנקטון במהלך 2023 ביחס לשנת 2022 והיא עמדה על צפיפות ממוצעת של 304.5 פרטים לליטר.
- בניגוד לשנתיים הקודמות נרשמו ערכי צפיפות נמוכים יחסית של קופפודים לאורך כל השנה.
- נמשכה המגמה של ערכים גבוהים של היחס שבין קופפודים מהסוג מזוציקלופס לסוג תרמוציקלופס. עליה זו משקפת 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, הכולל דוגמא אחת שהיא תערובת של מים ממספר עומקים, ומאפשרת 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.

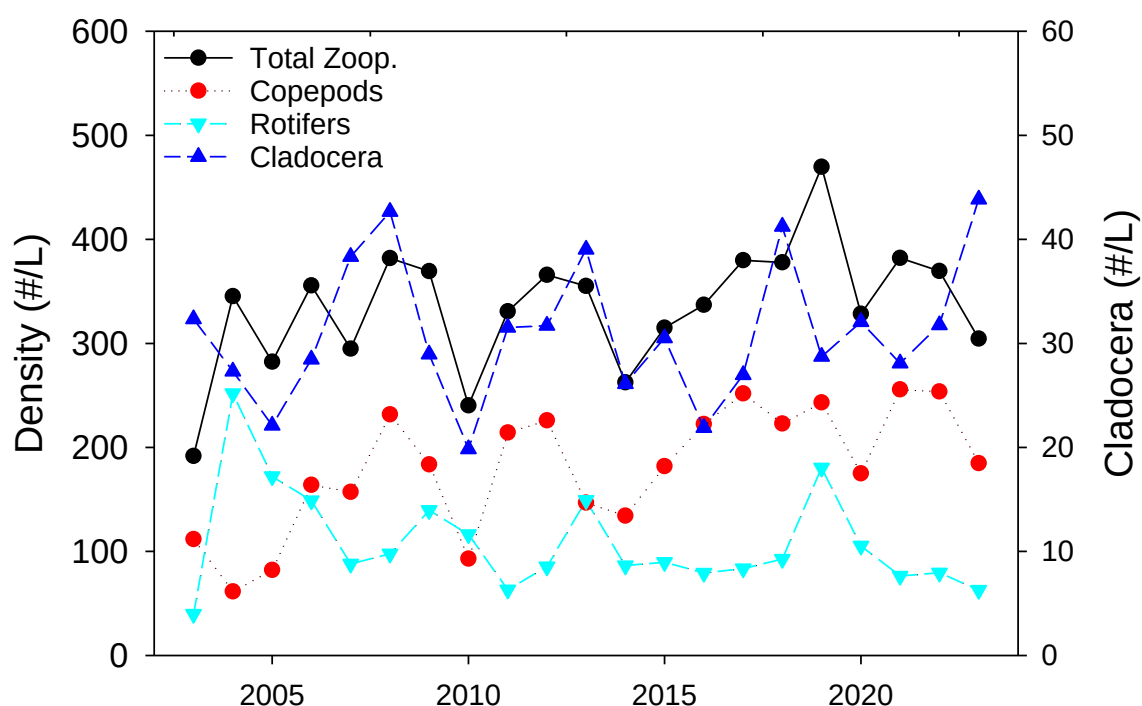
שיטות

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 בה מתבצע דיגום עד עומק תרמוקלינה, בנוסף לדיגום מטר מעל ומטר מתחת לתרמוקלינה. הדגימות, מכל העומקים מרוכזות לכלי אחד ומעורבבות בו היטב. מכלי זה 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 ודין

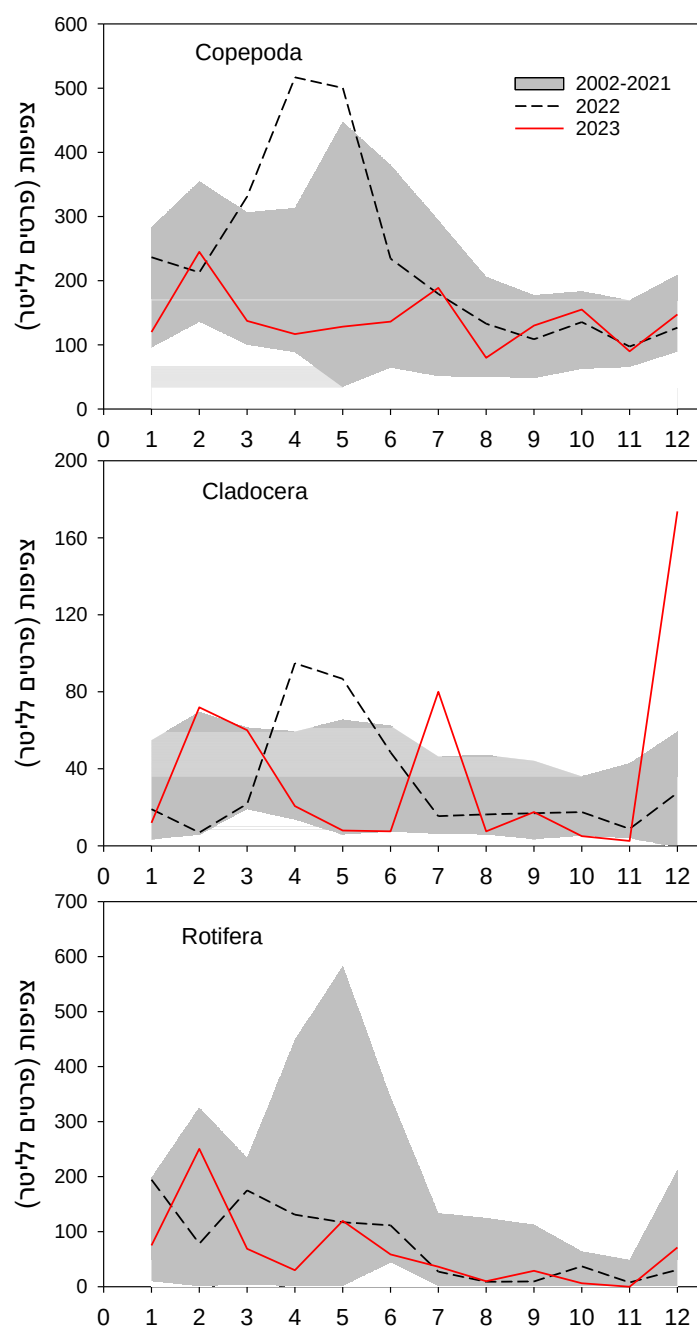
במעקב אחר השינויים בצפיפות הכוללת של הזואופלנקטון באגם מאז 2003, בעזרת דגימות הפרופילים (איור 54), ניתן לראות שבשנה האחרונה, השינויים בצפיפות הזואופלנקטון באגם היו קטנים בכל 3 הקבוצות הטקסונומיות אבל ישנו המשך של המגמה של ירידה בגודל האוכלוסייה כפי שנצפתה בשנת 2022. במהלך 2023, הייתה ירידה בצפיפות הזואופלנקטון הכוללת הממוצעת (סטיית תקן) מערך של 369.7 (185.4) פרטים לליטר לערך של 304.5 (245.3) המהווה ירידה של 18% בנוסף לירידה של כ-3% בשנת 2022 ביחס לשנת 2021. הירידה בולטת ביותר הייתה בקבוצת הקופופודים (שטרגל) עם ירידה ממוצעת של 27% וירידה ברוטיפרים (גלגליות) של 11% בממוצע. יחד עם זאת, הייתה עליה של 38% בקבוצת הקלודצירה (דפנאיים) אך מכיוון שקבוצה זאת מהווה חלק קטן של האוכלוסייה, העליה לא פיצתה על הירידה בשתי הקבוצות האחרות. הצפיפות הממוצעת שנרשמה בשנת 2023 הינה הצפיפות הנמוכה ביותר בעשור האחרון ונרשמו רק בשלושה מקרים בשני העשורים האחרונים עם ערכים נמוכים משמעותית מערך זה (2003, 2010, 2014).



איור 54: צפיפות שנתית ממוצעת של כלל הזואופלנקטון באגם והחלוקה עפ"י קבוצות טקסונומיות, על פי דיגום הפרופילים, בין השנים 2003-2023. ערכי הצפיפות של קבוצות הקלודצירה מופיעים בציר האנכי הימני.



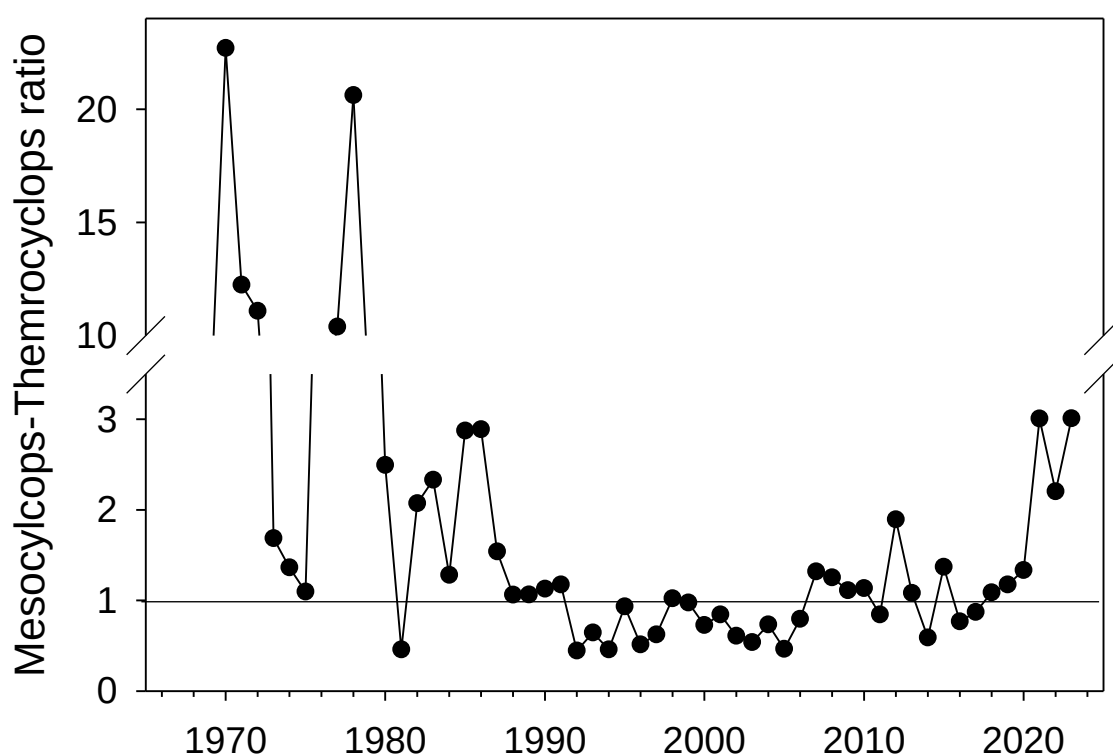
בבחינה של צפיפות הקבוצות הטקסונומיות העיקריות של הזואופלנקטון במהלך שנת 2023, ביחס לשנת 2022, ולממוצע הרב-שנתי בין השנים 2001-2020, ניתן להבחין במספר תופעות בשנה החולפת אשר היוו שינוי ביחס לתצפיות במהלך שנת 2022 (איור 55). בשתי הקבוצות הגדולות, הקופפודים והרוטיפרים נרשמו במהלך השנה צפיפויות דומות לממוצע הרב שנתי (עם סטיות התקן) של שני עשורים (2002-2021) אם כי בטווח הערכים הנמוך. התופעה בולטת במיוחד על רקע הערכים הגבוהים שנרשמו באביב 2022. בנוסף, בשתי הקבוצות הללו בלטו הערכים המוכרים בתקופת אביב-קיץ, בחודשים אפריל-מאי שנצפו במהלך שני העשורים האחרונים. לעומת שתי הקבוצות הללו, בקבוצת הקלדוצירה נצפו מספר פעמים במהלך שנת 2023 ערכים גבוהים מהממוצע וסטיית התקן הרב-שנתיים. ערכים גבוהים אלו לוו בערכים גבוהים, ביחס לשאר השנה, בקבוצות הקופפודים והרוטיפרים, במיוחד במהלך חודש פברואר וגם בחודש יולי, (רק הקופפודים). בהיעדר ניטור שבועי של הזואופלנקטון, לא ניתן לאבחן באופן מדויק את הפרשי הזמן בין ערכי המקסימום של הקלדוצירה ושל הקופפודים על מנת לבחון את יחסי הגומלין בין שתי הקבוצות. יחד עם זאת, עצם העליה המקבילה בשלושת הקבוצות במהלך חודש פברואר ללא המשכיות במהלך חודש מרץ, למעט בקלדוצירה, מצביעה על כך שהשינויים בקבוצות הקלדוצירה כנראה אינם נובעים מיחסי טורף-נטרף עם הקופפודים.



איור 55: צפיפות חודשית ממוצעת של שלושת הקבוצות הטקסונומיות העיקריות של הזואופלנקטון באגם: הקופפודים (איור עליון), הקלדוצירה (איור אמצעי), וההרטיפירים (איור תחתון) בשנים 2022 (קו אדום), 2023 (קו שחור מקוקו) וביחס לממוצע הרב-שנתי וסטיות התקן (שטח אפור) בתקופה 2002-2021 על פי דיגום המיקסים.

בנוסף לערכי הצפיפות הגבוהים של הקופפודים בשנתיים האחרונות אנו עדים למגמת שינוי נוספת באוכלוסיית הקופפודים. בכנרת קיימים בעיקר שני מינים של קופפודים מהסוג *Mesocyclops* והסוג *Thermocyclops*. למרות ששני מינים אלו בעלי מאפיינים דומים, הם שונים בגודלם כאשר המין *Mesocyclops ogunnus* גדול יותר ומגיע לאורך של מעל 800 מיקרון לעומת המין *Thermocyclops dybowski* המגיע לאורך מקסימלי של כ-630 מיקרון. בעקבות הבדלי הגדלים נמצא 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 ביחס מזוציקלופס תרמוציקלופס בשנות השבעים והשמונים. למעשה החל משנת 1988 ערך היחס היה סביב לערך 1 או קטן ממנו, כולל גם ערך מינימום בשנת 2005 של 0.46 וערך דומה (0.46) שנרשם בשנת 1994. ערכים אלו חופפים את התקופה מיד לאחר עליית מפלס מהירה וחריגה. תקופות אלו מתאפיינות באוכלוסיות דגי לבנון חריגים בגודלם בעקבות הצלחת רבייה בולטת בגלל עליית המפלס. האוכלוסיות החריגות הללו מפעילות לחץ טריפה גדול על הזואופלנקטון עד לקריסתן בגלל היעדר כמויות מספיקות של מזון לכלל האוכלוסייה. החל מ-2007 ערכי היחס עלו מעל לערך של 1 ונשארו כך רוב השנים. בין השנים 2007-2017 נרשמה תנודתיות בערכי היחס עם טווח ערכים שבין 0.6-1.9. מאז שנת 2017 אנו עדים למגמת עליה בערכי היחס כאשר בשנת 2021 נרשם ערך של 3.0 ובשנת 2022 ערך של 2.2 ושוב ערך של 3.0 בשנה החולפת. מגמות אלו מבטאות ירידה בלחץ הטריפה על המין מזוציקלופס ותואמות גם את ממצאי הניטור האקוסטי של הדגים (ראו פרק 2.22).

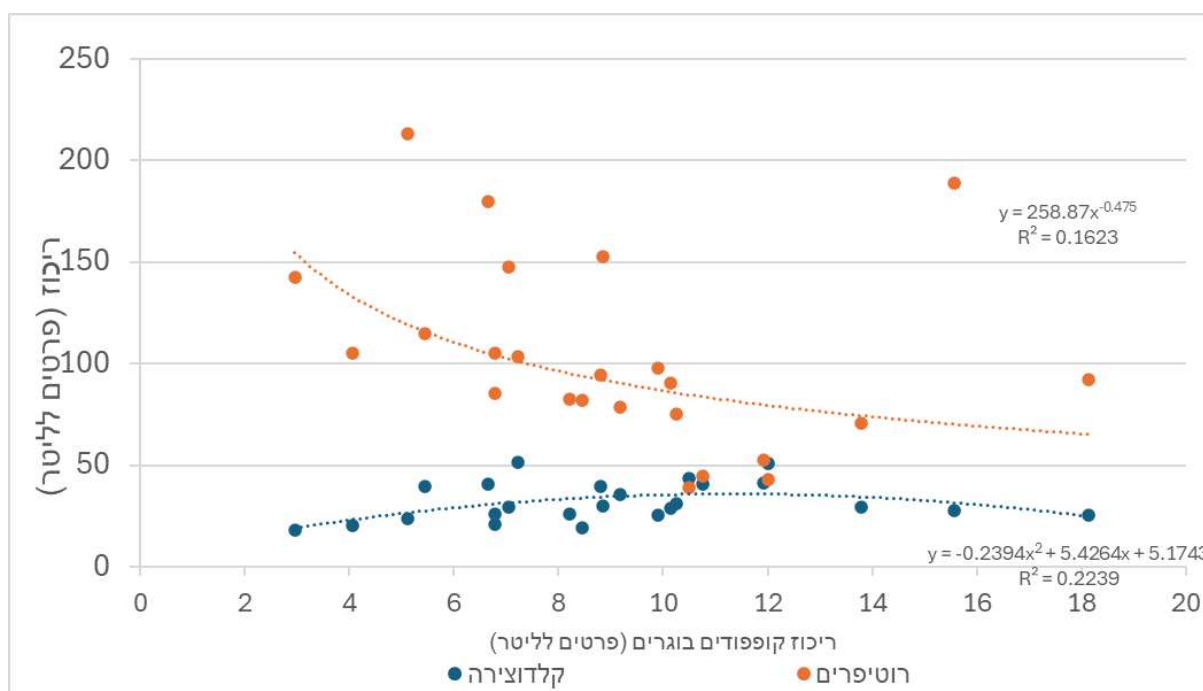


איור 56: היחס שבין ריכוזי שני מיני הקופפודים העיקריים באגם המחושב על בסיס הצפיפות השנתית הממוצעת של שני המינים. הקו הרציף האופקי מייצג יחס של 1.

אנו עדים, אם כך, לשני שינויים מקבילים, ועל פניו סותרים, באוכלוסיית הקופפודים באגם, ירידה בצפיפות שלהם אבל שמירה על חלק יחסי גדול של המזוציקלופס, המין הגדול מבניהם. אם היחס הגבוה של המין הגדול נשמר הרי שמדובר בעדות ללחץ טריפה נמוך יחסית הפועל על הקופפודים. אולם, הירידה בצפיפות הכוללת של הקופפודים יכול להעיד מצד אחד על לחץ טריפה מוגבר, היעדר מקורות מזון או

תנאים סביבתיים אחרים המגבילים את התפתחות האוכלוסייה. לאור החלק היחסי של המזויקלופס יש להניח שאוכלוסיית הקופפודים לא הצטמצמה בשנה האחרונה בגלל לחץ טריפה, אלא ממגבלת מזון או מתנאים סביבתיים אחרים שיש לבחון. ואכן, צפיפות הרוטיפרים הייתה נמוכה בשנה החולפת.

בחינה של היחס שבין ריכזי הקופפודים הרוטיפרים והקלדוצירה מעלה יחס לא ליניארי, כפי שניתן לצפות, עם לא מעט שונות ביחס שביניהם (איור 57). לעומת הקלדוצירה המציגה עליה עם העליה בריכז הקופפודים הבוגרים עד לערך מסוים ומשם ישנה דעיכה בצפיפות שלהם, הרי שבמקרה של הרוטיפרים, מגמת הירידה שלהם היא ברורה כבר בריכזים לא גבוהים של הקופפודים הבוגרים. יתכן והבדלים אלו נובעים מההבדלים הבולטים בצפיפויות של הרוטיפרים לעומת הקלדוצירה והקלות היחסית שבאיתור טרף של רוטיפרים לעומת קלדוצירה עד להגעה לצפיפות סף שמעבר לה ישנו יתרון באיתור קלדוצירה כמקור מזון. מניתוח היחסים שבין הקופפודים הבוגרים וצפיפות הרוטיפרים והקלדוצירה ברור שלחץ הטריפה של קופפודים בוגרים אינו הגורם היחיד שקובע את גודל האוכלוסיות, בעיקר בצפיפויות נמוכות של קופפודים בוגרים. בשנת 2023 נרשמה צפיפות של כ-9 פרטים לליטר, צפיפות שבה עדיין נראתה שונות יחסית גדולה בצפיפות הצפויה של הרוטיפרים והקלדוצירה (איור 57). המשך מעקב אחר יחסים אלו בעתיד יאפשרו לנו להגדיר טוב יותר את יחסי הגומלין בין הקבוצות השונות.



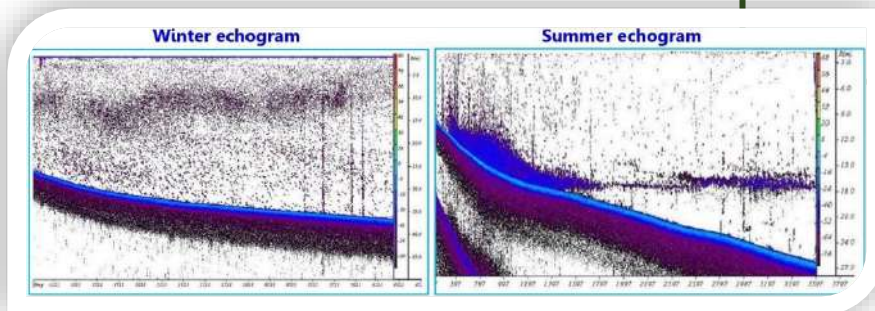
איור 57: היחס שבין צפיפות הרוטיפרים והקלדוצירה (ציר אנכי) בתחנה A בין השנים 2000-2023 לבין צפיפות הקופפודים הבוגרים (ציר אופקי).

2.22 אוכלוסיות הדגים - סקרים הידרואקוסטיים

במימון רשות המים

איליה אוסטרובסקי, סמיון קגנובסקי

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



רקע

הדגים ממוקמים בראש מארגי המזון האקוויטיים, משפיעים על איכות המים, על הפיטופלנקטון, הזואופלנקטון, הזואובונטוס ומשטר הנוטריינטים באגם. לתנודות מפלס האגם ישנה השפעה ניכרת על הביולוגיה והאקולוגיה של הדגים כמו גם על הרבייה, ההישרדות והדינמיקה באגם. 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 מפחרים על פני עמודת המים, לעומת שעות היום בהן הם מקובצים בלהקות. לפני כל סקר כויל האקוסאונדר בעזרת כדור סטנדרט. האקוסאונדר המדעי מצויד במערכת GPS המאפשרת

רישום דגמים מרחביים דו-ממדיים של פיזור המטרות האקוסטיות. מכיוון שאקוסאונדר מפוצל אלומה מאפשר זיהוי מטרות בדידות, 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 Data Acquisition- Balk, Lindem, 2015).

תוצאות ודין

טווח המטרות האקוסטיות חולק לקבוצות: מטרות קטנות עם החזר אקוסטי קטן מ-50dB - משויכות ללריות 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 2023 צפיפות הדגים הקטנים (50dB - 60dB) נעה בין 0.13 ל-0.46 פרטים/מ"ר בסקרים השונים. בחודשים מרץ ודצמבר, הצפיפויות של קבוצות גודלי הביניים והגדולים היו הנמוכות ביותר, כאשר רוב הדגים בהן (בעיקר *M. terraesanctae*) התרכזו באזורים הרדודים למטרות רביה.

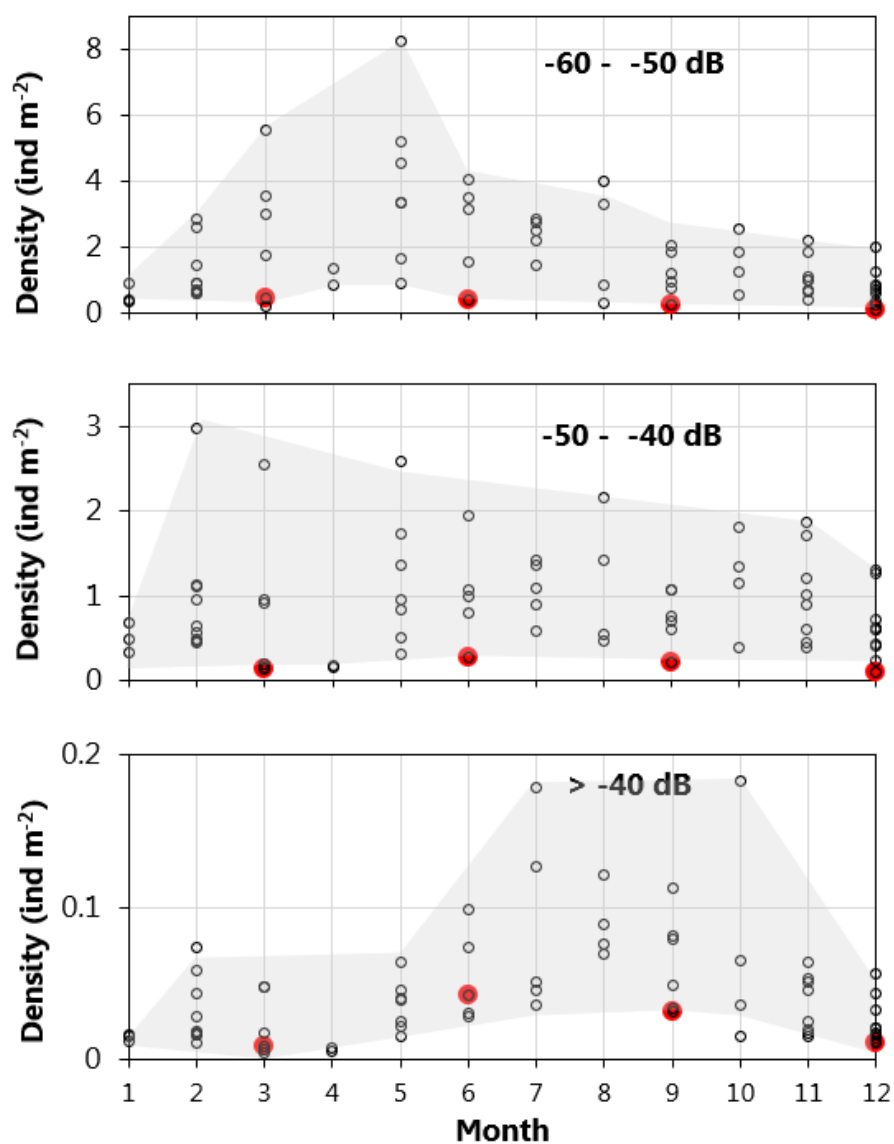
ב-2023 צפיפויות הדגים מכל קבוצות הגודל בכל העונות היו בסדר גודל קרוב לתחומים הנמוכים שנצפו בשנים 2011-2022. הערכים הנמוכים מצביעים על ירידה משמעותית בכל קבוצות הגודל של הדגים (בעיקר לבנון) בשנים האחרונות, בהן המפלס היה גבוה יותר באגם הכנרת. בשנת 2023 הצפיפות הממוצעת של דגים הגדולים מ-60dB הייתה 0.52 פרטים / מ"ר. לאחר העלייה המהירה של מפלס המים באגם ב-2019, הצפיפות השנתית הממוצעת עלתה פי שניים בערך מ-1.4 ל-2.6 פרטים/מ"ר עד 2020. לאחר מכן, במהלך 2020 - 2023, צפיפות הדגים הממוצעת ירדה פי חמישה.

העלייה הגדולה במפלס המים בשנים 2019 ו-2020 לא גרמה לעלייה משמעותית בכמות דגי הלבנון בחודשים העוקבים, כפי שנצפתה בשנים 1992 ו-2003, כאשר עלייה גבוהה באוכלוסיית הדגים הייתה קשורה לעלייה מהירה במפלס המים ולרבייה מוצלחת ביותר של *M. terraesanctae* בחופי הליטורל הסלעי (Ostrovsky et al. 2014). ייתכן שהשינויים באזור החוף בשנים האחרונות, עקב התפתחות כמות גדולה של צמחייה שקועה בחופים במפלסי מים נמוכים וההצפות שלה בחורף-אביב, לא היו מתאימים לרבייה ולשרידות של *M. terraesanctae*. בשנת 2023 התרכזו הדגים באזורים הפריפריאליים של אגם הכנרת, בעיקר בקטע הצפוני שלו (איור 59). ניתן להבחין, כי בדצמבר 2023 התגלו דגים בצפיפות גבוהה גם בדרום האגם, שם מסופקים מים מנחל הירמוך.

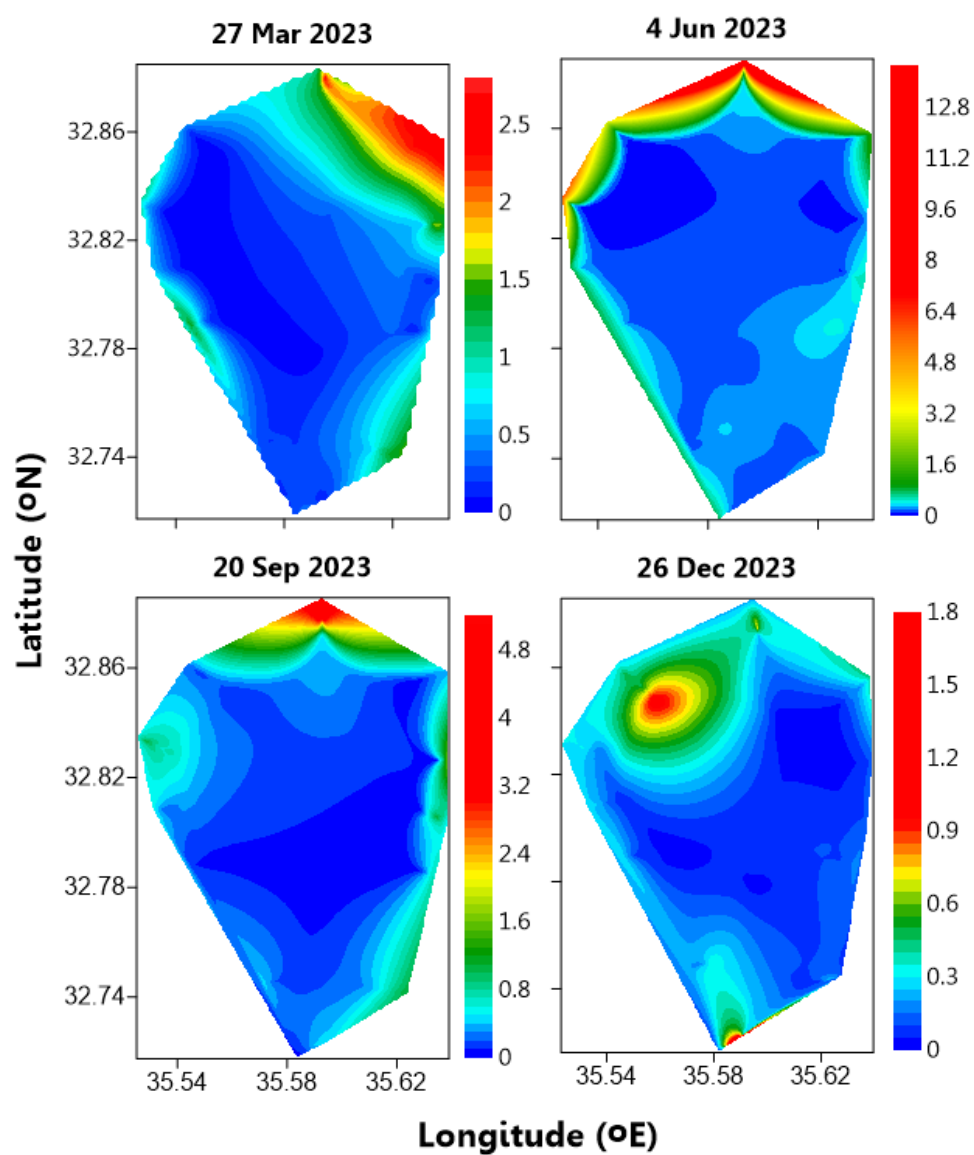
ספרות

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.

Ostrovsky, I., M. Goren, J. Shapiro, Z. Snovsky, A. Rynskiy (2014) Fish biology and ecology. Chap. 16. In Lake Kinneret: Ecology and Management. Aquatic Ecology Series, vol 6 (Eds T. Zohary, A. Sukenik, T. Berman, A. Nishri). Springer, Dordrecht. pp 273-292.



איור 58: דינמיקה עונתית של דגים מקבוצות גודל שונות בשנת 2023 באגם הכנרת. הנקודות האדומות המלאות מייצגות את הערכים ב-2023, הנקודות השחורות מייצגות את הערכים של 2011 – 2022. השטחים מייצגים את גבול השונות ב-2011 – 2022.



איור 59: תפוצה מרחבית של דגים באגם הכנרת ב-2023. צפיפות דגים ניתנת בפרטים למטר מרובע (ind./m^2)

2.23 ניטור דיג ודגה בכנרת

במימון אגף הדיג, משרד החקלאות

ניר שטרן, הוד פרויליך, גדעון גל,

דוד קמינגס

- דיג בכנרת מהווה חלק חשוב משירותי המערכת האקולוגית של האגם.
- ניטור סדיר של דיג ודגה הינו הכרחי להבנת מצב בריאות המערכת האקולוגית.
- השנה ניתנת הערכה ראשונית של עונתיות הרבייה של אמנון הגליל אשר נראה כי מתחילה בפברואר ונגמרת לקראת סוף יוני.
- על פי נתוני סקירת השלל, נראה כי הדיג בכנרת לא נפגע במהלך מלחמת "חרבות ברזל".



מדידות דגים על גבי ספינת רשת ההקפה "גיל" של קיבוץ עין גב – 29.01.24
צילום: ניר שטרן.

מטרת הניטור

ניטור סדיר של דיג ודגה ברחבי הכנרת יספק מידע עדכני עבור מצב חברות הדגים לאור השינויים הביזיוניים והא-ביוטיים המתרחשים באגם.

מטרות הניטור הן:

- א. הערכת 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 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 שהאגם מספק. על מנת לייעל את תפוקת האגם לשירות מערכת זה, ישנו מאמץ שנתי מטעם המדינה לאכלס את האגם בשלושה מינים ייעודיים לדיג: *אמנון הגליל* ושני מיני קיפונים. במקביל לפעילות זו, יש צורך מתמשך במידע עדכני עבור מאמץ הדיג, גודל האוכלוסיות המסחריות והרכב השלל בכנרת. זוהי השנה השלישית בה תכנית ניטור הדיג והדגה בכנרת נמצאת תחת אחריות המעבדה לחקר הכנרת, 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, אם כך, הינן הערכת גודל אוכלוסיית הדגים המסחריים באגם ודיוק עונת הרבייה. מידע זה מושג 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.

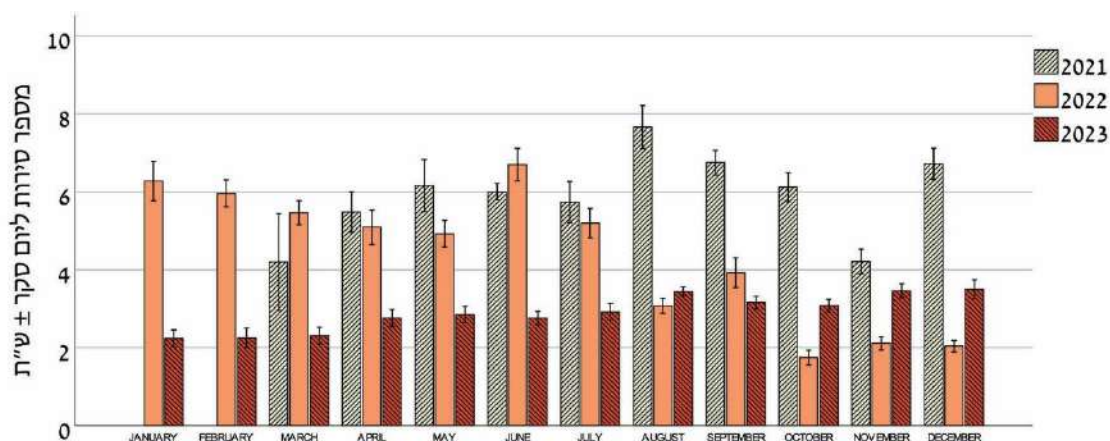
בשנת 2023 דווחו נתוני הפריקה של שלל הדיג בכנרת ע"י סוקר בודד ובתדירות של 23.25 ± 6.24 ביקורים לחודש. הסטייה הגדולה הינה כתוצאה מנתונים חסרים לאורך רוב חודש פברואר בשל סיבות אישיות של הסוקר. במהלך כל ביקור במעגנה נספרו כלי השיט הפעילים בעת הביקור ותועד הרכב המינים והכמויות של כל מין בשלל הפריקה.

בנוסף, במהלך 2023 בוצעו חמישה דיגומים ע"ג ספינת ההקפה של קיבוץ עין גב על מנת להשיג נתוני אורך, משקל, גיל ומצב רבייתי של השלל, בדגש על *אמנון הגליל* *Sarotherodon galilaeus*, המין המסחרי והרווחי ביותר מבין דגי הכנרת.

תוצאות

1. סקירת שלל הדיג

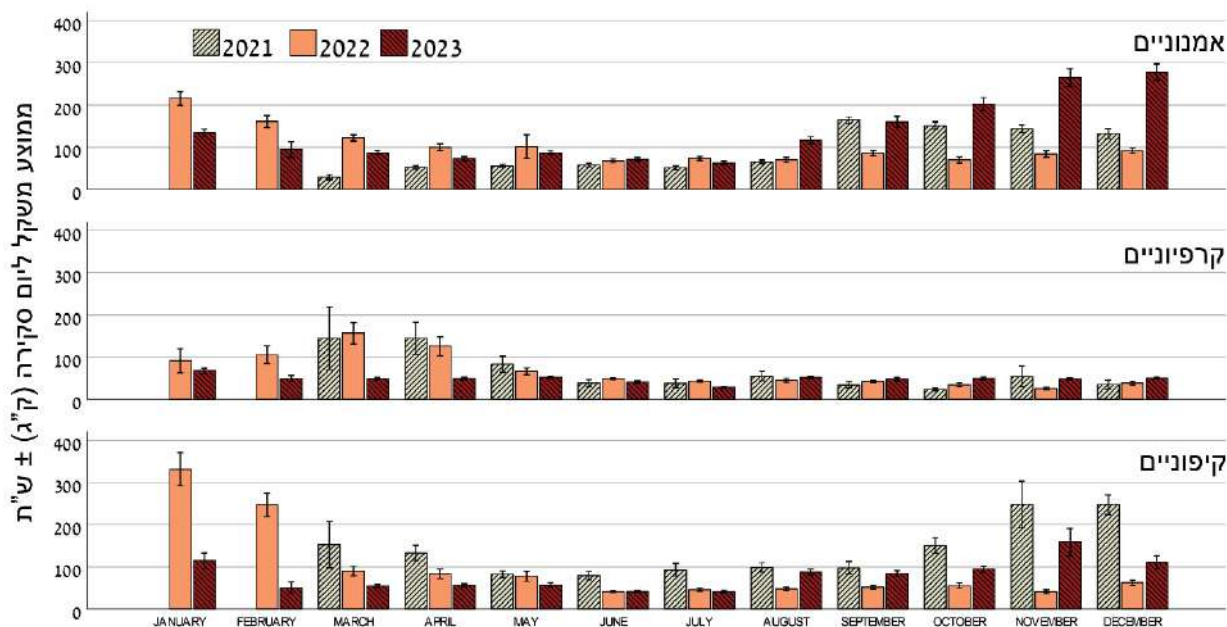
שלל הדיג באגם לשנת 2023 תועד ב-279 ימי סקר במעגנות. לאורך כל שנת 2023, מספר הסירות הממוצע, הנסקרות בביקור יומי במעגנה היה בין שתיים לארבע (איור 60). זהו נתון נמוך בהשוואה לשנים קודמות, למעט בחודשי הסתיו של 2022, שם נסקרו רק שתי סירות בממוצע. יש לציין, כי נתונים אלו אינם בהכרח משקפים את מאמץ הדיג בכנרת, אלא עלולים לנבוע מגורמים הקשורים לאופי הסקירה כמו למשל שינוי מקום פריקת השלל, זמן ההגעה למעגן ועוד. בנוסף, ראוי לציין שלא נצפתה ירידה בדיג בכנרת במהלך המלחמה אשר התחילה באוקטובר 2023.



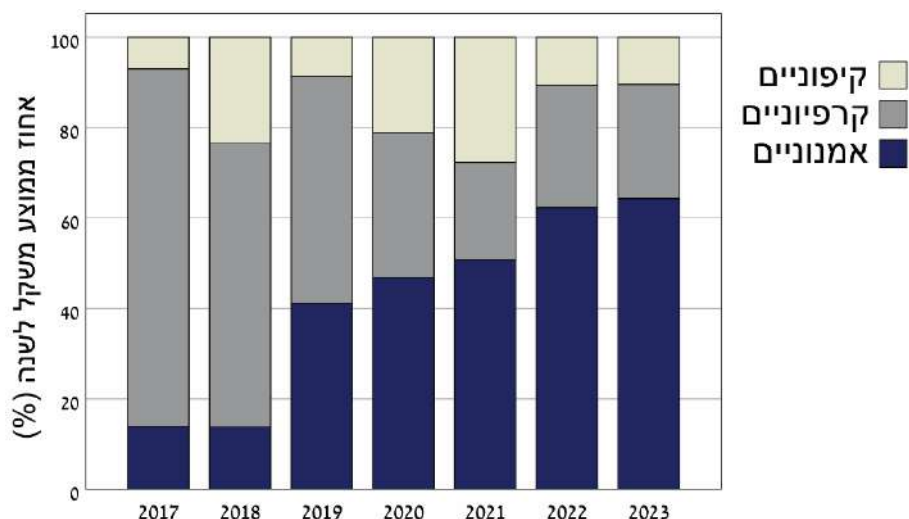
איור 60: ממוצע מספר הסירות ליום. הסקר התבצע לאורך שלושת שנות הניטור 2021-2023

בבחינת נתוני השלל של שלושת משפחות הדגים בדיג רשתות העמידה נצפתה ירידה כללית בין השנים בחצי הראשון של 2023 לעומת השנים הקודמות, ועלייה הדרגתית החל מחודשי הקיץ. שלל האמנונים של שנת 2023 הראה עלייה משמעותית בחודשי הקיץ והסתיו, עם ערך ממוצע מקסימלי לכל שנות הניטור בדצמבר 2023 של 277 ק"ג שלל ליום סקירה (איור 61).

בבחינת נתוני השלל של סירת רשת ההקפה של קיבוץ עין גב לאורך כל שנות המידע הזמין נצפה המשך ירידת השלל היחסי של דיג הקרפיונים והתמקדות בדיג אמנונים וקיפונים (איור 62, טבלה 5).



איור 61: ממוצע משקל ליום סקירה של שלושת משפחות הדגים המסחריות באגם הכנרת לאורך שנות הניטור



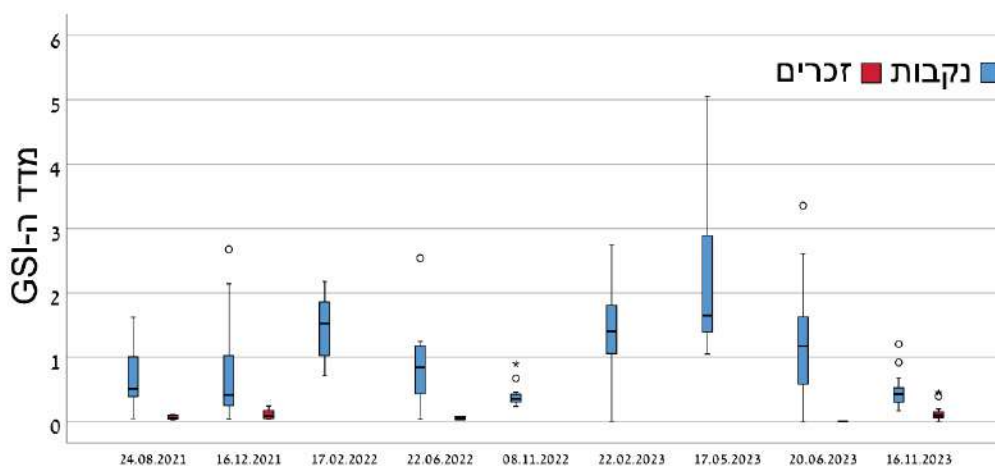
איור 62: אחוז ממוצע המשקלים לשנה של דיג רשת ההקפה בקיבוץ עין גב לפי משפחות ושנות המעקב. סיכום השלל מוצג בטבלה 5.

טבלה 5: סיכום השלל בטונות לסירת דיג ההקפה של קיבוץ עין גב בשנים 2017-2023

משפחה	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
קרפיוניים	90.23	76.46	43.11	56.08	43.44	37.64	41.87
אמנוניים	3.95	4.21	8.85	20.44	25.68	21.65	25.18
קיפוניים	1.98	7.18	1.85	9.20	14.02	3.68	5.26
סה"כ	96.16	87.85	53.80	85.72	83.14	62.97	72.30

2. ניטור דגה (מיקוד באמנון הגליל)

במהלך 2023 התבצעו חמישה דיגומים ע"ג ספינת דיג ההקפה של קיבוץ עין גב לצורך אפיון השלל והערכת האוכלוסייה וביולוגיית הרבייה של אמנון הגליל, לצורך כך, נמדדו ונותרו 101 פרטים. נצפו ערכים גבוהים של מדד הרבייה GSI בחודש מאי וירידה שלהם כבר בסוף חודש יוני, כאשר גם ב-2023 וגם בשנה הקודמת העלייה החלה כבר בחודש פברואר (איור 63).



איור 63: ערכי מדד ה-GSI (Gonado-Somatic Index) באמנון הגליל בהפרדה לפי זוגיים ולאורך שנות הניטור



דיון

על פי הסקרים נראה כי מלחמת "חרבות ברזל" לא פגעה בדיג בכנרת שהתנהל כסדרו גם במהלכה. יחד עם זאת, מספר הסירות הקטן שנדגם במהלך ביקור של הסוקר היה קטן מהרגיל חזר מעיד שוב על צורך ממשי בשיטת ניטור ומעקב מסודרת אשר לא מסתמכת בהכרח על סוקרים חיצוניים. במהלך פגישת וועדת אכלוס של הכנרת בתאריך ה-23.01.24 הועלה שוב הצורך להקמת בית אריזה וחדרי קירור, אשר יוכלו לשמש כצינור דרכו ניתן יהיה לנטר ביעילות את השלל ומאמץ הדיג באגם. השנה נעשו שינויים בכוח האדם המבצע את הניטור, לכן הוקדש זמן רב להכשרה וללמידה. טרם הסתיימה ההכשרה בנושא החישובים הסטטיסטיים להערכת גודל האוכלוסייה באגם.

2.24 חלזונות וצדפות בליטורל

במימון רשות המים

תמר זהרי, בני סולימני,

דוד קמינגס, ניר קורן

- גם ב-2023 החילזון הפולש *Thiara scabra* היה המין הדומיננטי בכנרת והיווה מעל 98% מכלל החלזונות בעומקים 2.5 ו-5 מ'. החלזונות הטבעיים לכנרת נדחקו לשוליים (בעומקים 0.4 מ' או 12 מ') וגם שם נמצאו בריכוזים נמוכים בסדרי גודל מאלו של הטיארה. משני מינים פולשים נוספים שנמצאו לראשונה בכנרת ב-2018, נמצאו ב-2023 רק פרטים בודדים ונראה שהם לא מתפשטים או מצליחים לייצר אוכלוסיות יציבות.
- בשנות המפלסים הגבוהים (בין השנים 2020-2023) ריכוזי הצדפות בכנרת היו נמוכים מאשר בשנות המפלסים הנמוכים (עד שנת 2019).



בתמונה: צדפות הכנרת. למעלה - אוניו, באמצע - קורביקולה; למטה - פוטמידה. עם הזמן מאז התמותה צבע הקשוות הולך ודועך. צילום: תמר זהרי

מטרת המחקר

מעקב אחר אוכלוסיות החלזונות והצדפות בכנרת כאינדיקטורים לתהליכים בליטורל.

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 אזורי הסלעים נשארים מחוץ למים והליטורל ברובו 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 (= מולוסקה, חלזונות וצדפות) בכנרת הן דוגמה 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). הוא דיווח גם על 3 מיני צדפות (ראה תמונת בתחילת הפרק). קונכיות וקשוות של 8 מיני מולוסקה אלו מוכרות מאתרים ארכיאולוגיים וחתכים גיאולוגיים באזור הכנרת, ומעידות 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 תיעדנו עם עדינה דולב את התפשטותו של מין פולש זה בכל חלקי הכנרת. ב-2012 החל ניטור סדיר של חלזונות וצדפות בכנרת.

שיטות

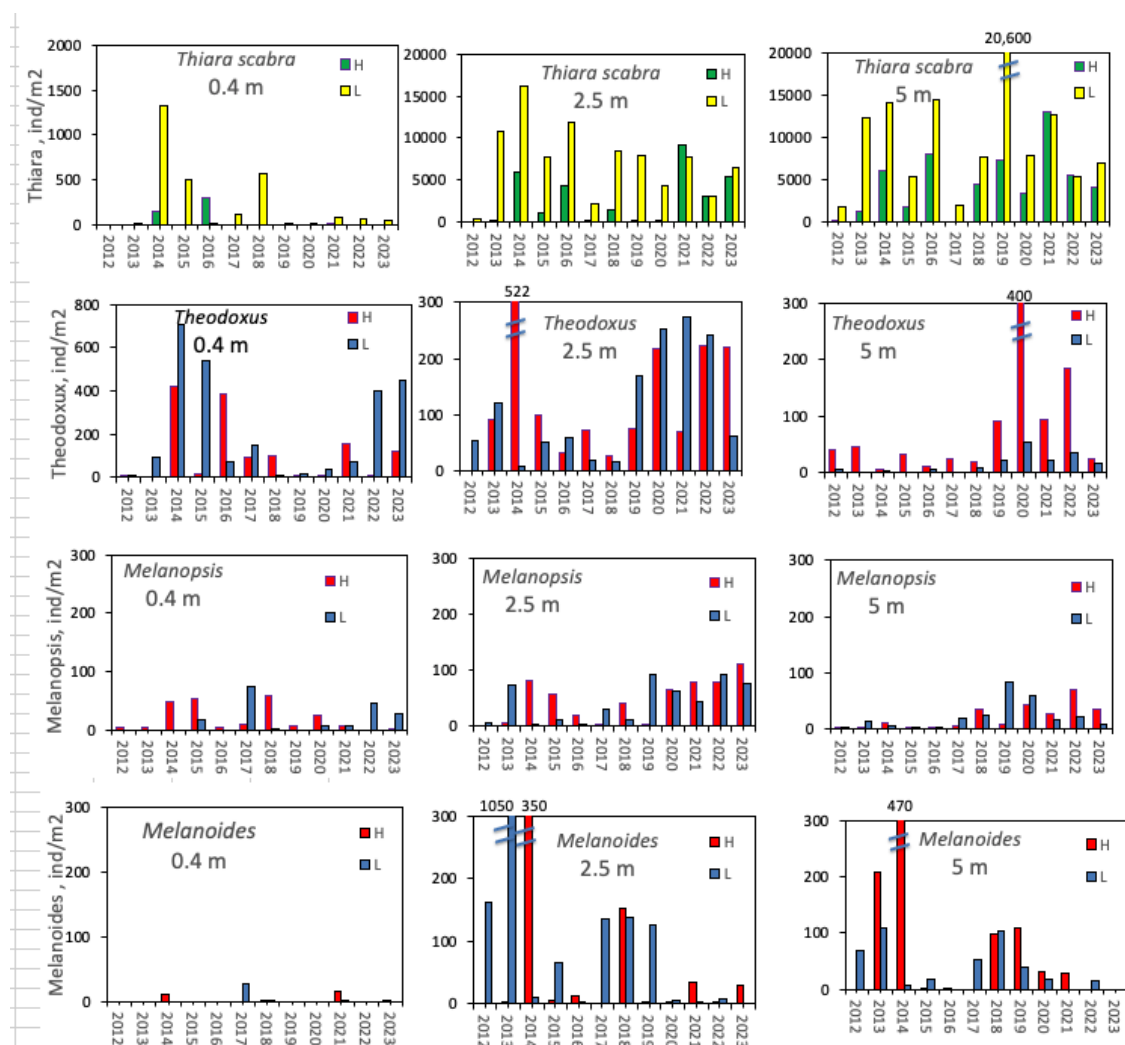
ניטור הרכיכות מתבצע פעמיים בשנה, בתקופת מפלס המינימום (נוב'-דצמ') ושוב בתקופת מפלס המקסימום (אפריל-מאי), בחמישה אתרים (חוקוק, גינוסר, חמי טבריה, גופרה, שיטים). בכל אתר נדגמות רכיכות מהקרקעית בשלוש נקודות לאורך חתך מהחוף לכיוון מרכז האגם, בנקודות בהן עומק הקרקעית: 0.4 מ' (דיגום מהחוף), 2.5 מ' ו- 5 מ' (דיגום בצלילה מסירה), סה"כ 15 נק' דיגום לעונה. מיקום נקודות הדיגום, שנקבע על פי עומק הקרקעית, זז מדיגום לדיגום עם שינויי המפלס. באופן יוצא דופן, כדי לבדוק מה קורה במים עמוקים יותר, בשני מועדי דיגום בדצמבר 2022 ובמאי 2023 הוספנו דיגום בנקודה רביעית ועמוקה יותר, בה הקרקעית ב-12 מ', בשניים מחמשת אתרי הדיגום (גופרה, גינוסר). מסיבות טכניות כל "עונת דיגום" מתפרשת על פני 4-6 שבועות. 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. מאז 2018 אנחנו מפרידים במעבדה בין פרטים קטנים וגדולים של כל מין וסופרים בנפרד כל קבוצת גודל.

תוצאות ודיון

חלזונות:

בדיווח זה נשווה את השינויים לאורך זמן (בין השנים 2012-2023) בריכחים הממוצעים (ממוצע של 5 אתרים דיגום בכל עונה) של החלזונות והצדפות (מינים עיקריים) באביב, בעת מפלס המקסימום השנתי, ובסתיו, במפלס המינימום השנתי, עבור כל אחד משלושת עומקי הדיגום. באופן עקבי, ריכחי הטיארה בעומקים 2.5 ו-5 מ' גבוהים ב 2-3 סדרי גודל מאשר הריכחים של המינים הטבעיים (איור 64). במילים אחרות, בעומקים אלו המין הפולש מהווה 98-100% מכלל החלזונות. בעומק 0.4 מ' ריכחי הטיארה נמוכים יותר מאשר במים העמוקים יותר וריכחי הטיאודוקסוס (סהרונית) דומים לריכחי הטיארה (איור 64). לרוב ריכחי הטיארה היו גבוהים יותר במפלס נמוך מאשר במפלס גבוה, תופעה שחזרה על עצמה בשלושת עומקי הדיגום. אולם, מאז 2020 כשמפלסי הכנרת גבוהים - ריכחי הטיארה היו דומים באביב ובסתיו. 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.



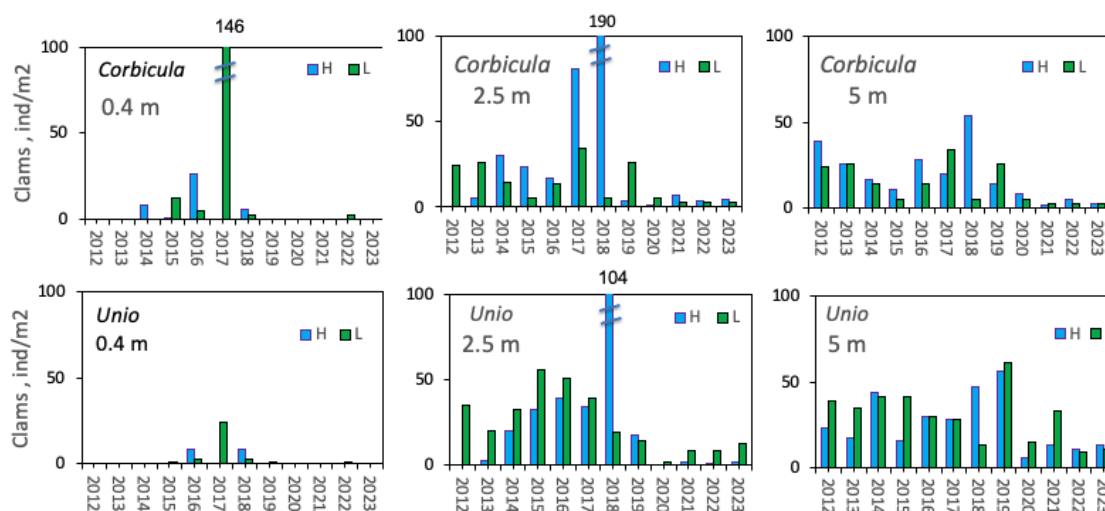
איור 64: סדרת זמן של ריכחי החלזונות בקרקעית (ממוצעים של 5 אתרים) בשלושת עומקי הדיגום, 0.4, 2.5 ו- 5 מ', עבור 4 מיני החלזונות הגדולים, במפלס השנתי המרבי באביב (H) ובמפלס השנתי המזערי בסתיו (L) כל שנה. יש לשים לב להבדלים בסקאלות של הציר האנכי.

לגבי ריכחי המינים הטבעיים בכנרת, לא ניתן להצביע על דגם שחוזר על עצמו בין מפלס גבוה לנמוך. הסהרונים (*Theodoxus*) היא המין הנפוץ ביותר מבין שלושת המינים הטבעיים, היא מופיעה על סלעים במים הרדודים. השחריר (*Melanopsis*), שהיה פעם נפוץ ביותר בכנרת - די נדיר בשנים האחרונות, מופיע מדי פעם על סלעים במים הרדודים. המגדלית (*Melanoides*), שחיה בתשתית חולית, כמעט ונעלמה לחלוטין מאזור המים הרדודים. רק בדיגומים הלא- שגרתיים בדצמבר 2022 ובמאי 2023 בנקודות דיגום עמוקות יותר, 12 מ' (לא מוצג), בתחנת גינוסר וחוקוק מצאנו עשרות פרטים למ"ר ממין זה. ב-12 מ' נמצאה גם הטיארה אך בריכחים נמוכים בסדר גודל מאלו שבועומק 5 מ'. ב-2023 לא מצאנו אפילו פרט אחד של המינים הטבעיים הזעירים, ביטינה זעירה, וקרינית הירדן. מאידך גם לא מצאנו אפילו פרט אחד מהמין

הפולש פירגופורוס ורק בחמי טבריה נצפו בעומק 2.5 ו- 5 מ' כמה עשרות פרטים למ"ר של המין הפולש הנוסף, טרביה. שני מינים פולשים נוספים אלו נצפו לראשונה בכנרת ב-2018, ומאז לא הצליחו לבנות אוכלוסיות יציבות. ידוע מעמק המעיינות שהטיארה מביאה עמה טפילים שגורמים למחלות בדגים, ובפרט את הטפיל *Centrocestus* (טרמטודה) שפוגע באמנונים. הטפיל גורם לנזקים כבדים לגידול הדגים המסחרי בעמק המעיינות (חנוך גלסנר, רמה פאלק, מידע אישי). נושא זה לא נחקר בכנרת ומצריך בדיקה. השערה נוספת שמצריכה בדיקה: בריכחים העצומים של החלזונות בסדימנט של הליטורל – הם ניזונים על חומר אורגני וכנראה מחסלים כל מה שנמצא בסדימנט, כולל ציסטות של פרידיניים, ותורמים להעדר פריחות של אצה רצויה זו, בכך מעודדים פריחות של מיני אצות לא רצויים כמו ציאנובקטריה.

צדפות:

בכנרת שלושה מיני צדפות (ראו תמונה פותחת לפרק זה) הטבעיות לאזור: *Unio terminalis*, *Corbicula* פוטומידה = צדפת אגמים כנרתית. מתוכן השתיים הראשונות היו נפוצות מאד בעבר. מאז 2012 ממוצע ריכחי הצדפות נמוך, לרוב בין אפס עד עשרות בודדות של פרטים למ"ר (איור 65). לא ניכרים הבדלים עונתיים עקביים בין הריכחים במפלס גבוה לנמוך. במהלך כל שנות המפלסים הגבוהים האחרונות, מ-2020 ועד 2023, ריכחי הצדפות בליטורל של הכנרת נמוכים (איור 65). מהמין פוטומידה מצאנו במשך השנים רק פרטים בודדים (לא מופיע באיור). ב-2020 לא מצאנו אפילו פרט אחד של מין זה. ב-2021 מצאנו 4 פרטים של המין, רק בשתיים מתוך 30 הדגימות שנאספו המהלך השנה, ב-2022 נמצאו 8 פרטים, 5 בגינוסר (0.4 מ') ו-3 בגופרה ב-12 מ' וב-2023 רק פרט אחד, בחמי טבריה. האוניו והפוטומידה הם מינים בסכנת הכחדה עולמית, ושינויי המפלס בכנרת בטווח גדול בהרבה מהטבעי תורמים להכחדתם.



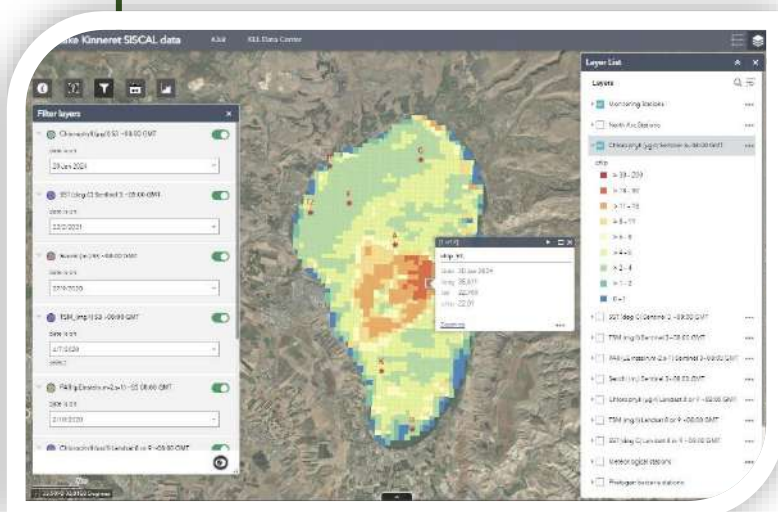
איור 65: סדרת זמן של ריכחי צדפות בקרקעית הכנרת (ממוצעים של 5 אתרים) בשלושת עומקי הדיגום, 0.4, 2.5 ו- 5 מ' עבור 2 מיני צדפות (קורביקולה - למעלה, אוניו - למטה), במפלס השנתי המרבי באביב (H, עמדות כחולות) ובמפלס השנתי המזערי בסתיו (L, עמדות ירוקות) כל שנה

2.25 איכות מי הכנרת באמצעות צילומי לוויין המשולבים במערכת SISCAL

במימון רשות המים

גדעון טיבור, מיקי שליכטר

- הממוצע החודשי של טמפרטורת פני המים (SST) בכל האגם מראה שחודש אוגוסט היה החם ביותר (31.7°) וחודש פברואר היה הקר ביותר (17.5°). השוואה של ה-SST לממוצע הרב שנתי (2019-2022) מראה שלמעט חודשים מאי, יוני ואוקטובר טמפרטורת פני השטח הממוצעת הייתה ב-2023 חמה יותר.
- הממוצע היומי של ריכוזי הכלורופיל (Chl a) בכל האגם מראה שהריכוז האגמי היומי הממוצע הגבוה ביותר ($15.5 \mu\text{g/L}$) היה במהלך חודש נובמבר והנמוך ביותר ($0.17 \mu\text{g/L}$) היה בחודש אפריל. השוואה של הממוצע החודשי לממוצע הרב שנתי (2020-2022) מצביעה על כך שלמעט חודש פברואר ריכוזי הכלורופיל של כלל האגם ב-2023 היו נמוכים מהממוצע הרב שנתי.
- הממוצע החודשי של עומק הסקי (Secchi) בכל האגם השתנה מ-0.4 מטר בחודש אפריל ועד 2.9 מטר בחודש אוגוסט. השוואה של עומק הסקי הרב שנתי (2020-2022) מראה ירידה (עליה בעכירות) בחודשים ינואר-מאי, יולי ונובמבר.
- הממוצע החודשי של ריכוזי חומר מרחף (TSM) בכל האגם מראה שהריכוז הממוצע הגבוה ביותר (4.5 mg/L) היה בחודש יוני והנמוך ביותר (2.6 mg/L) בחודש ספטמבר. למעט חודש אפריל ריכוזי החומר המרחף הממוצע ב-2023 היה נמוך מזה שחושב בממוצע הרב שנתי.
- הממוצע החודשי של קרינה זמינה לפוטוסינתזה (PAR) בכל האגם מראה שהערך הממוצע הגבוה ביותר ($1848 \mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) היה בחודש יוני והנמוך ביותר ($1005 \mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) היה בחודש דצמבר.



מטרות

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) וכתונות לכיול המודלים הלימנולוגיים של הכנרת; 3. הפצת המידע הנאסף לרשויות ולציבור באמצעות אתר האינטרנט של מרכז מידע כנרת ואתר רשות המים.

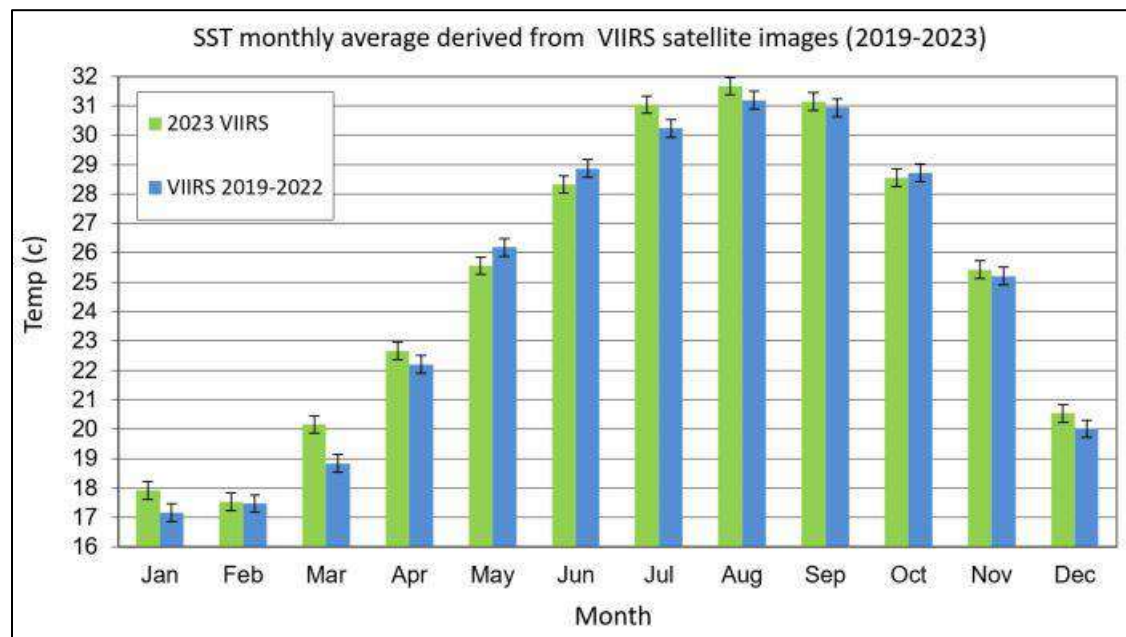
רקע

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 וע"י חקר ימים ואגמים לישראל. הניטור כיום מתבסס על צילומי לוויין יומיים של Sentinel-3 עם חלוציה של 300X300 מטר ו-VIIRS עם חלוציה מרחבית של 750X750 מטר, על לוויין ה-Landsat 8 ועל ה-Landsat 9 שחולפים מעל הכנרת כל 16 יום עם חלוציה בערוצים הרלוונטיים של 30x30 מטר. הנתונים הנאספים קרוב לפני המים ע"י המעבדה לחקר הכנרת בתחנות הניטור הקבועות והנתונים הנאספים בצורה רציפה בתחנה A ובתחנה D משמשים להמשך כיול ובדיקה של האלגוריתמים השונים. עיבוד הנתונים כולל את השלבים הבאים: (1) הורדת צילומי הלוויין קרוב ל"זמן אמת", (2) 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), (3) בדיקה וכיול אלגוריתמים מול נתוני (in situ) שנדגמים בכנרת ו- (4) הפצת המידע הנאסף לרשויות ולציבור באמצעות אפליקציית WEB-GIS באתר האינטרנט של מרכז מידע כנרת ואתר רשות המים שמתעדכנת קרוב לזמן אמת (ראה תמונת כלורופיל בכותרת הפרק מלוויין Sentinel-3 בתאריך 20.01.24).

תוצאות ודיון

אנליזות סינופטיות:

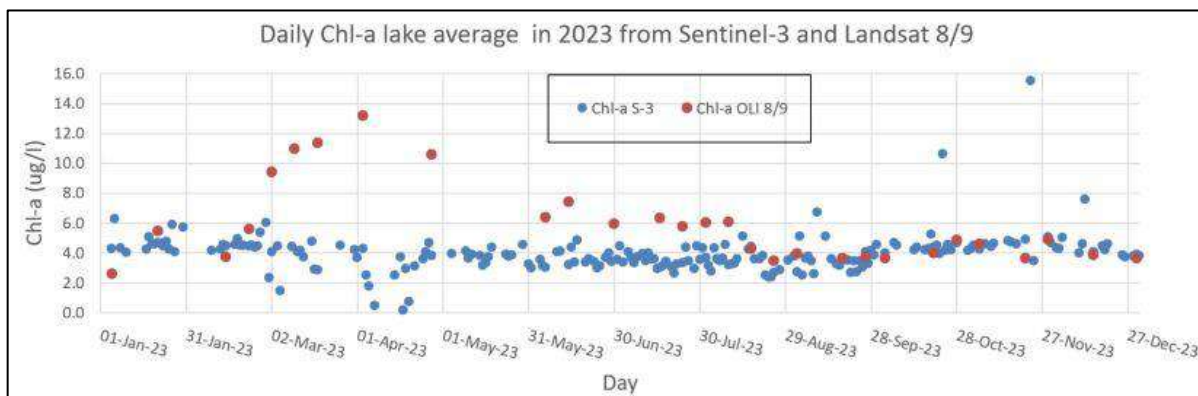
1. הממוצע החודשי של טמפרטורת פני המים (SST) בשנת 2023 חושב על בסיס 278 צילומי לוויין מסוג VIIRS (ברחלוציה של 750X750 מטר) ומוצג באיור 66 יחסית לנתוני ממוצע חודשי שחושבו בשנים 2019-2022. באיור ניתן לראות שחודש אוגוסט היה החם ביותר גם יחסית לממוצע הרב שנתי עם טמפרטורה ממוצעת של 31.7°C וחודש פברואר היה הקר ביותר עם טמפרטורה ממוצעת של 17.5°C. השוואה לממוצע הרב שנתי מראה שלמעט חודשים מאי, יוני ואוקטובר טמפרטורת פני השטח הממוצעת הייתה ב-2023 חמה יותר. ההתאמה בין טמפרטורת פני השטח שנמדדה בלוויין Sentinel-3 יחסית ללוויין ה-VIIRS נותנת דיוק של $R^2 = 0.9946$.



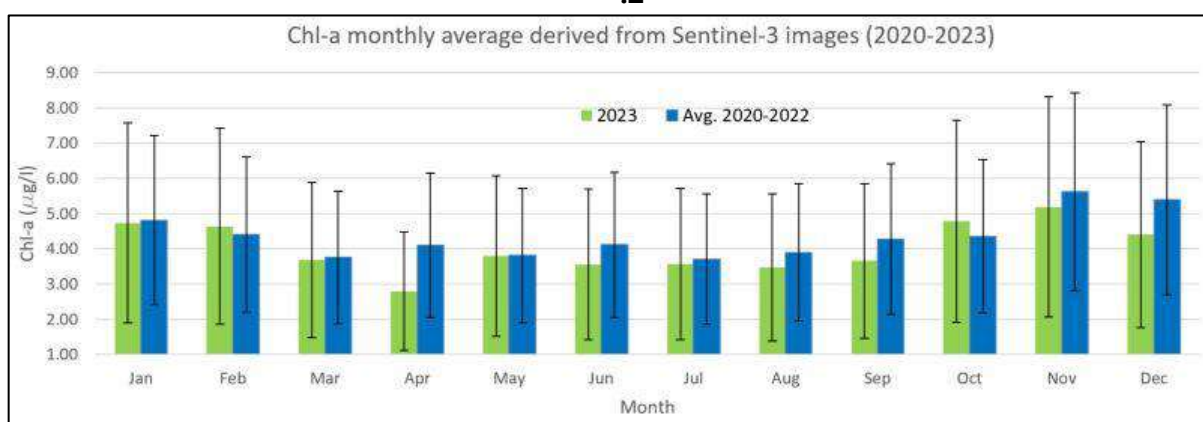
איור 66: התפלגות הממוצע החודשי של טמפרטורת פני השטח (SST) בכול האגם שחושה מנתוני לוויין VIIRS בהשוואה לממוצע בשנים 2019-2022.

3. הממוצע היומי והחודשי של ריכחי הכלורופיל (Chl-a) בשנת 2023 חושב הממוצע היומי מ-235 צילומי לוויין Sentinel-3 ברזולוציה של 300X300 מטר ומ-34 צילומי לוויין מסוג Landsat 8 & 9 ברזולוציה של 30X30 מטר מוצג באיור 67א והממוצע החודשי המתבסס על Sentinel-3 מוצג באיור 67ב. חשוב לציין שתוצאות המיפוי מייצגים את מצב האגם בשעה GMT 08:00 ~ נתוני הליווינים מראים שהריכח האגמי היומי הממוצע הגבוה ביותר (15.5 ug/L) היה במהלך חודש נובמבר והנמוך ביותר (0.17 ug/L) היה בחודש אפריל. השוואת הממוצע החודשי לממוצע הרב שנתי מצביעה על כך שלמעט חודש פברואר ריכחי הכלורופיל של כלל האגם ב-2023 היו נמוכים מהממוצע הרב שנתי.

א.

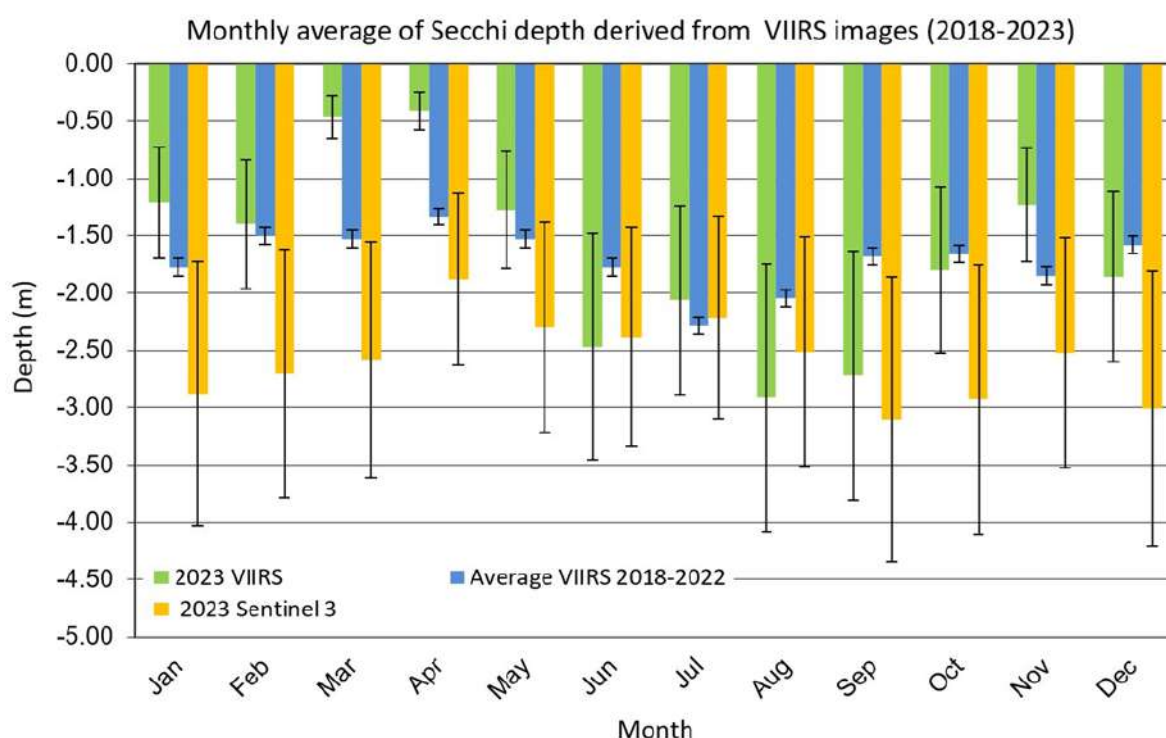


ב.



איור 67: א) ממוצע יומי של ריכוזי כלורופיל (Chl-a) האגמי בשעה ~ GMT 8:00 המתבסס על צילומי לוויין Sentinel-3 ו-Landsat 8/9 (ב) ממוצע חודשי Sentinel-3 לשנת 2023 יחסית לממוצע של השנים 2020-2022.

3. הממוצע החודשי של עומק הסקי (Secchi) בשנת 2023 חושב מ-150 צילומי לוויין VIIRS ומוצג יחסית לנתוני ממוצע חודשי שחושב בשנים 2018-2022 (איור 68). ממוצע עומק הסקי הנמוך ביותר נמדד בחודש אפריל (0.4 מטר) והגבוה ביותר בחודש אוגוסט (2.9 מטר). השוואה לממוצע הרב שנתי מראה ירידה בעומק הסקי (עליה בעכירות) בחודשים ינואר-מאי, יולי ונובמבר. למרות שמספר ההדמיות מלווין Sentinel-3 שמהם ניתן לקבל ערך סקי כל חודש הוא נמוך (~4 הדמיות בחודש) השנה מוצגים באיור 68 גם הערכים מלווין זה בגלל הרחלוצה היחסית טובה שלו (300 מטר).



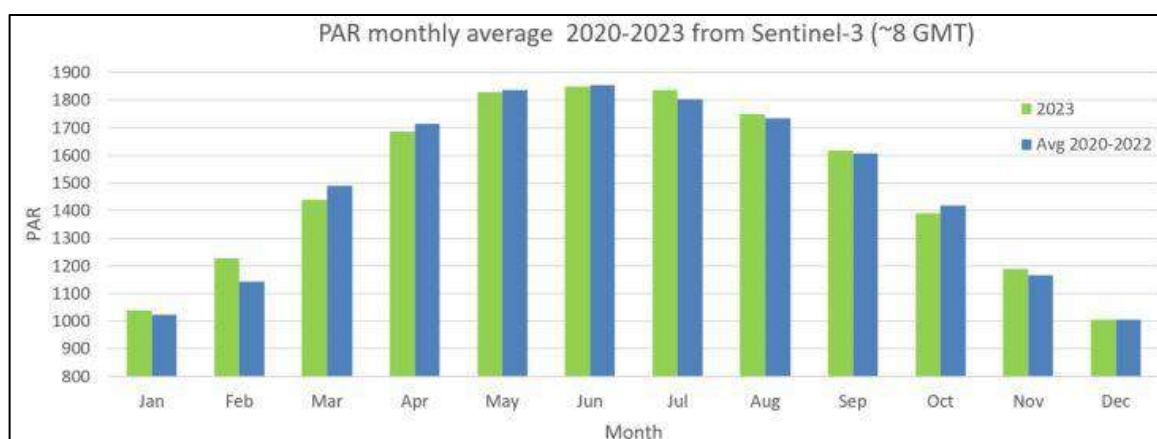
איור 68: עומק סקי (Secchi) חודשי ממוצע האגמי לשנת 2023 שחושב מנתוני לוויין VIIRS ו-Sentinel-3 בהשוואה לממוצע הנתונים שחושבו מלוויין VIIRS בשנים 2018-2022. בחודש ספטמבר לא היו מספיק צילומים טובים לחישוב ממוצע.

4. הממוצע החודשי של ריכחי חומר מרחף (TSM) בשנת 2023 חושב מ-230 צילומי לוויין Sentinel-3 ומוצג יחסית לנתוני הממוצע החודשי שחושב בשנים 2020-2022 (איור 69). נתוני הלוויין מראים שהריכח האגמי הממוצע הגבוה ביותר (4.5 mg/L) היה בחודש יוני והנמוך ביותר (2.6 mg/L) בחודש ספטמבר. למעט חודש אפריל ריכחי החומר המרחף הממוצע ב-2023 היה נמוך מזה שחושב בממוצע הרב שנתי.



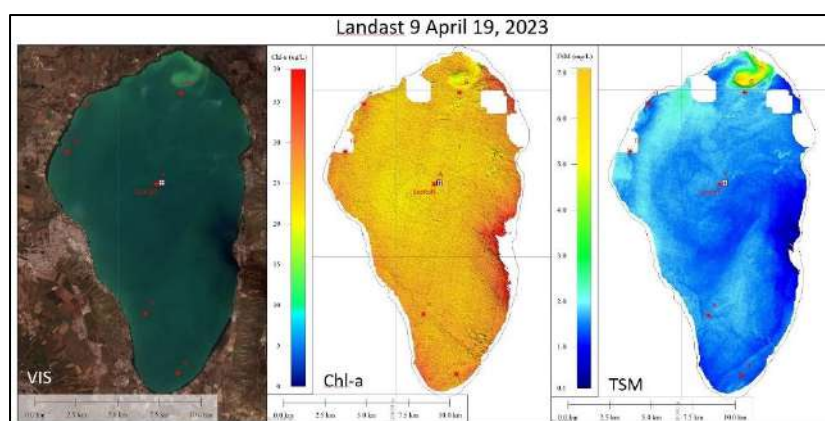
איור 69: ריכחי חומר מרחף (TSM) חודשי ממוצע האגמי לשנת 2023 שחושב מנתוני לוויין Sentinel-3 בהשוואה לנתונים שחושבו בשנים 2020-2022.

5. הממוצע החודשי של קרינה זמינה לפוטוסינתזה בין אורכי הגל 400-700 ננומטר (PAR- Photosynthetically Available Radiation) בשנת 2023 חושבה מ-235 צילומי לוויין Sentinel-3 ומוצגת יחסית לנתוני ממוצע חודשי שחושב בשנים 2020-2022 (איור 70). נתוני הלוויין מראים שכמו בכול השנים הקודמות הריכוז הממוצע האגמי הגבוה ביותר היה בחודש יוני ($1848 \mu\text{mol quanta m}^{-2} \text{s}^{-1}$) והנמוך ביותר ($1005 \mu\text{mol quanta m}^{-2} \text{s}^{-1}$) היה בחודש דצמבר. השוואה לנתוני הממוצע הרב-שנתי מראה שבחודשים ינואר, פברואר, יולי, ספטמבר ונובמבר ערכי 2023 היו גבוהים יותר ובשאר החודשים הם היו דומים או נמוכים מהממוצע הרב שנתי.



איור 70: ממוצע חודשי של PAR האגמי שחושב מנתוני לוויין Sentinel-3 בשנת 2023 יחסית לממוצע הרב שנתי 2020-2022.

6. אנליזות של Chl-a, TSM, SST מלוויין Landsat 8 ו-Landsat 9 נעשות כל 16 יום (מותנה בעננות). בשנת 2023 עובדו 18 צילומי Landsat 8 ו-16 צילומי Landsat 9. הרזולוציה של הלוויין (30 מטר) מאפשרת לנו להבין את ההטרוגניות הרבה של הפרמטרים השונים במרחב (לדוגמא איור 71 מתאריך 9.04.23).



איור 71: דוגמה להטרוגניות של התפלגות כלורופיל וחומר מרחף כפי שהתקבלה מאנליזה של צילום לוויין Landsat 9 ברזולוציה של 30 מטר מתאריך 19.04.23

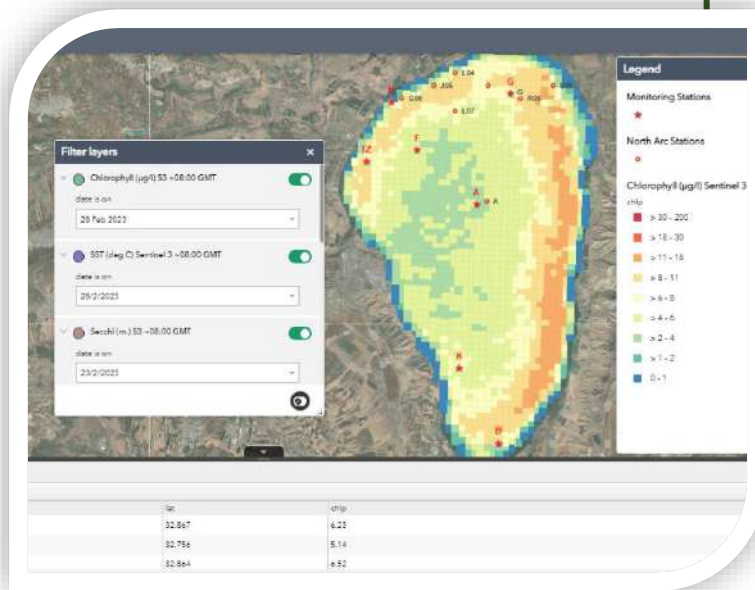
תוצאות האנליזות של צילומי לוויין ה-Landsat 8 וה-Landsat 9 וכן הצילומים היומיים של לוויין Sentinel-3 משולבים באפליקציה של מעבדת הכנרת שפתוחה לחוקרים ולציבור הרחב (תמונת הכותרת).

2.26 מערכת מידע גיאוגרפית באינטרנט- GIS OnLine

במימון רשות המים

מיקי שליכטר

- תצוגה של המידע הגיאוגרפי במפות אינטראקטיביות באינטרנט ויצירת כלים לצפייה, הורדה ועיבוד של הנתונים.



מטרות

להציג לציבור את המידע הגיאוגרפי באינטרנט, לפתח כלים למשתמש לבחירת המידע המוצג ולעיבוד המידע ולאפשר 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 שכבות מידע ועיבודן 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 חיידקים, סקרי דגים, ניטור חלזונות ועוד.
 - תצוגת פיענוח צילומי לוויין בקירוב לזמן אמת.
- תצלומי הלוויין המוצגים במערכת הינם תוצרי עיבוד במערכת SISCAL (ג. טיבור וחוב') של נתוני הלוויין Sentinel-3 (תדירות יומית) ושל הלוויין Landsat 8 ו Landsat 9 (אחת ל- 16 יום). הפרמטרים המוצגים



של הלוויין Sentinel-3 הינם: כלורופיל a החל מתאריך 06/01/2020, חומר מרחף TSM החל מתאריך 04/07/2020, עומק סקי החל מתאריך 27/09/2020, טמפרטורת פני המים SST החל מתאריך 22/02/2021, קרינת PAR החל מתאריך 2/10/2020.

הפרמטרים המוצגים של הלוויין Landsat 8 ו Landsat 9 הנם:

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, ייצוא הנתונים לקובץ טקסט.

בשנת 2023 נוספו למערכת 998 תצלומים מהלוויין Sentinel-3 הכוללים:

214 תצלומים של כלורופיל a

213 תצלומים של TSM

213 תצלומים של PAR

228 תצלומים של SST

130 תצלומים של עומק סקי

בשנת 2023 נוספו למערכת 92 תצלומים מהלוויינים Landsat 8 ו Landsat 9 הכוללים:

30 תצלומים של כלורופיל a

31 תצלומים של SST

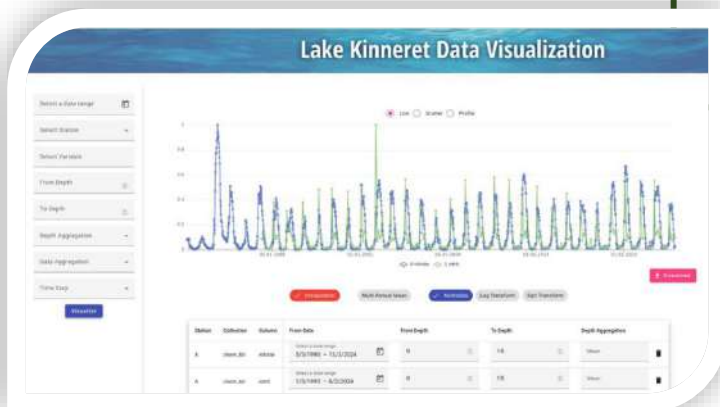
31 תצלומים של TSM

2.27 מאגר מידע כנרת

במימון חיא"ל ורשות המים

אופיר טל, יורי לצ'ינסקי, מיקי שליכטר

- מאגר המידע כנרת מכיל נתונים מגוונים הנאספים כחלק מתכנית הניטור של הכנרת מאז שנת 1969.
- במהלך שנת 2023 פותחה מערכת ענן בטכנולוגיות מתקדמות לאחסון והנגשה של הנתונים. המערכת תוטמע במהלך שנת 2024.



ממשק המשתמש של מערכת הנגשת הנתונים החדשה.

מטרות

- א. איסוף נתונים מתמשך ושמירתם לצרכי מחקר ולצרכי טובת הציבור.
- ב. שמירת נתונים היסטוריים.
- ג. עיבוד המידע והנגשתו לשימוש חוקרי המעבדה.

רקע

מאגר הנתונים של הכנרת מבוסס על תכנית ניטור הכנרת המתבצעת על ידי המעבדה החל משנת 1969. במאגר כלולים נתונים מתחומי המטאורולוגיה, פיסיקה, כימיה וביולוגיה של האגם (טבלה 6). המידע נאסף ברציפות בתחנות דיגום קבועות ובתדירות קבועה. מאגר הנתונים מהווה את הבסיס לניתוח ממצאי הניטור, באמצעותם ניתן לזהות ולבדוק מגמות רב שנתיות המתרחשות באגם. הנתונים המגוונים במאגר מאפשרים בדיקת קשרים בין מרכיבי השונים של המערכת האקולוגית של האגם, ומשמשים בסיס לבניית מודלים לחיזוי ולהבנת תהליכים מורכבים המתרחשים בכנרת בפרקי זמן קצרים וארוכים. במהלך שנת 2023, החל תהליך עיבוד מחדש של הנתונים לטובת תכנון ובנייה של מאגר המידע ומערכת האיסוף על בסיס טכנולוגיות מתקדמות ומחשוב ענן (ראה איור בתחילת הפרק). בימים אלה מושקת מערכת הנגשה וניהול מאגר הנתונים, לציבור הרחב ולצרכי מחקר.

תוצאות

טבלה 6: טבלאות הנתונים שבמאגר המידע כנרת

שנת התחלה	תכולה	סוג המידע
1969	הנתונים המקוריים, ללא שינוי. יעובדו.	מידע גולמי
1969	בסיס נתונים הכולל טבלאות נתונים בתחומים: בטימטריה, מטאורולוגיה ונתוני אגם. נתוני האגם כוללים: טמפרטורות, זרמים, כימיה, פיטופלנקטון, זואופלנקטון, דגים, נתוני ליטורל ונתוני נחלים.	נתוני ניטור
1992	בסיס נתונים הכולל את טבלאות התיעוד בהן מצוי המידע שנאסף אודות טבלאות הנתונים.	תיעוד
2001	אוסף הקבצים המעובדים במערכת הממ"ג: קבצי מפות ותמונות בנושאים: בטימטריה, תחנות ניטור, סקרים מרחביים, אגן ההיקוות, גיאולוגיה, דיגום כלורופיל רב-ערוצי.	נתוני ממ"ג
2004	אוסף נתוני לוויין של הפרמטרים: טמפרטורת פני המים, כלורופיל, סקי ועכירות.	נתוני לוויין
2000	נתונים גולמיים ובסיסי נתונים מסקרים מרחביים חודשיים בין השנים 2000-2004	נתוני המפר"ע
2002	נתונים גולמיים ובסיסי נתונים: טמפרטורת נחלים, מטאורולוגיה, נתונים איכות מים, נתוני אימות למודל.	פרויקט המודלים
2004	נתונים מתחנות מטאורולוגיות צמח, בית צידא, תחנה A, חרמון.	נתוני השירות המטאורולוגי
א. 1970 ב. 2018	1. נתוני חברת "מקורות": נתוני כימיה מתחנות גשר חורי וגשר אריק בירדן. 2. נתוני כימיה מנחלי אגן ההיקוות ומעיינות מלוחים.	נתוני אגן ההיקוות

דיון

סיכום העבודה בשנת 2023: ניהול שוטף של מאגר הנתונים.

- קליטת הנתונים השונים המתוארים בטבלה לבסיס הנתונים.
 - בקרה ותחזוקה של מערכות קליטת נתונים אוטומטית: נתוני 5 תחנות מטאורולוגיות באזור הכנרת, נתוני הפרופילים ממערכת הדוגם האנכי בתחנה A, נתוני דיגום רציף בתחנות G,D,A,TZ ונתוני טמפרטורה משרשראות התרמיסטורים.
 - עיבוד הנתונים.
 - העברת חיתוכי נתונים על פי בקשת החוקרים.
 - העברה רבעונית של בסיס הנתונים המעודכן לרשות המים.
 - העברת נתונים לגורמי חוץ כגון: המשרד לאיכות הסביבה, הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, חוקרים וסטודנטים במוסדות המחקר בארץ ובחו"ל.
 - גיבויים תקופתיים של מאגר הנתונים.
- אפליקציית ענן לניהול והנגשת מאגר הנתונים: תכנון ובניה של מאגר הנתונים בטכנולוגיות עדכניות.

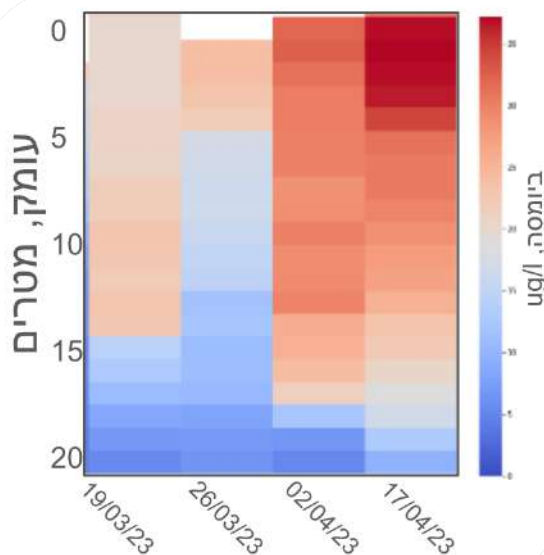
- 
1. הוקמה תשתית ענן הכוללת אוטומציה של קליטת נתונים באמצעות ממשק משתמש אינטרנטי.
 2. הוקמה תשתית ענן לשם הנגשת נתוני מאגר המידע לציבור ולחוקרים. המערכת כוללת אפשרות לביצוע פעולות והנגשת נתונים נוספים לחוקרים המורשים לכך.
 3. כלל הנתונים עוברים תהליך של טיוב וניקוי.
 4. בתהליך פיתוח של מערכת אוטומטית להרצה של מודלים קצרי טווח, ושילוב התוצאות במאגר המידע (מודלים אופרטיביים).

2.28 מעקב מוגבר אחר פריחות ציאנובקטריה

במימון רשות המים

אופיר טל, דיתי ויינר – מוציני

- הפלואורופרוב מספק מידע אודות מבנה האוכלוסייה במרחב הכנרת קרוב לזמן אמת.
- פותחו מודלי לימוד מכונה להערכה מדויקת ורחבה יותר של מבנה האוכלוסייה בכנרת על סמך נתוני הפלואורופרוב הגולמיים ומידע רב שנתי מניטור אוכלוסיות הפיטופלנקטון באגם.
- אוכלוסיית הפיטופלנקטון בחלק המרכזי והעמוק ביותר של האגם, פחות עשירה בביומסה ובמגוון הטקסונומי בהשוואה לתחנות הממוקמות בליטורל.



התפתחות ירוקיות בתחנה G, אביב 2023.
נמדד באמצעות מכשיר הפלואורופרוב.

מטרה

יישום מערכת פלאורוסנציה רב-ערוצית לאפיון הפיזור המרחבי של אוכלוסיות הפיטופלנקטון בכנרת.

רקע

שילוב התנאים הייחודיים בכנרת בשנים האחרונות מדגיש את הצורך להתייחס לאחת הסכנות המיידיות על איכות המים באגם בעקבות הפרשה של רעלנים למים, והשפעה על התנאים הסביבתיים בעת פריחות מסיביות - תיעוד ומעקב אחר אוכלוסיות הפיטופלנקטון בכנרת תוך דגש על התפתחות פריחות כולל פריחות של ציאנובקטריה רעילות ושאינן רעילות. הניטור השוטף בכנרת מכיל מרכיב של תיעוד אוכלוסיות הפיטופלנקטון באופן כללי עם דגש מיוחד על אוכלוסיות ציאנובקטריה. כמו כן, כאשר מזוהות

פריחות של ציאנובקטריה מופעל נוהל בדיקות רעלנים במים. הנוהל מתמקד בדגימות בעומק קבוע במרכז האגם ובהמשך עבור ספקיות המים, נבדקים מים לפני ואחרי הטיפול. המידע המתקבל בנוהל הקיים אינו מאפשר הבנה של התפתחות הפריחה בזמן - הן מבחינה מרחבית באגם והן בפיזור האנכי באתרים שונים. מידע זה חשוב בכדי להיות מוכנים טוב יותר למצב בו יאותרו רעלנים במים ברמות המסכנות אספקות מים בשאיבה. ניתן לאפיין את תבנית הפיזור המרחבי באגם על ידי מדידת הפיזור של אותות פלואורסצנטיים שמקורם באוכלוסיית הפיטופלנקטון בכנרת. המדידה נעשית בעזרת מערכת הפלואורופרוב (איור 72), פרופיילר המספק מידע ספקטרלי על התפוצה של אוכלוסיות הפיטופלנקטון על פי הרכב הפיגמנטים שלהם. ביצוע מדידות בנקודות שונות, תוך שילוב דיגום משלים, ייתן תמונת פיזור מרחבית טובה של פריחה באגם בזמן נתון. ביצוע סט מדידות לאורך זמן יאפשר מעקב אחר התפתחות אירוע פריחה משלביו הראשונים ועד דעיכתו וישרדג באופן ניכר את יכולת הניהול של אירוע פריחה במידה ויתפתח לאירוע המסכן את איכות המים בתחנות השאיבה.

במהלך שנת 2023 החל תהליך פיתוח הרחבת היכולות של הפלואורופרוב בכנרת על ידי שימוש במודלי לימוד מכונה. במסגרת פיתוח המודלים, נעשה שימוש במידע היסטורי אודות מבנה אוכלוסיית הפיטופלנקטון בכנרת, וברישומי אותות הפלואורופרוב. המודל לומד את הקשרים שבין מבנה האוכלוסייה האמיתי, לבין האותות של הסנסור. באמצעות גישה זו, הצלחנו לשפר במידה ניכרת את הערכת מבנה אוכלוסיית הפיטופלנקטון בכנרת, ואף לזהות באמצעותו קבוצה טקסונומית (דינופלגלטים) אותה לא ניתן לזהות באופן ישיר בשימוש המקורי. בעתיד נשתמש בגישה זו גם כדי לחזות מינים דומיננטיים אחרים הקיימים בכנרת.

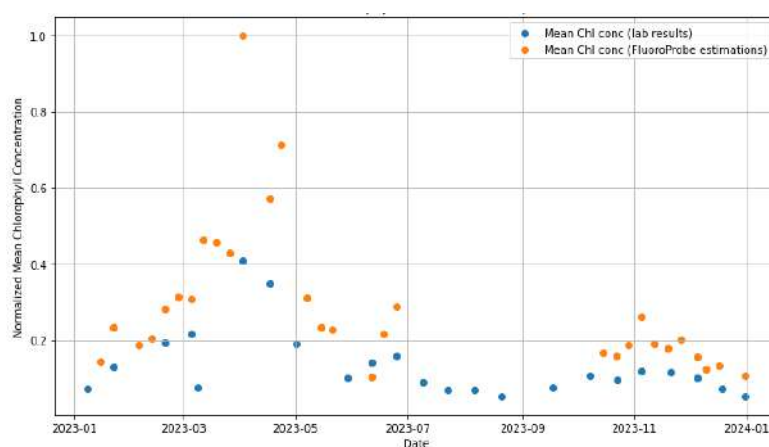


איור 72: בתמונה מכשיר מסוג פלואורופרוב (BBE Fluoroprobe) המשמש לאיסוף הנתונים במרחב הכנרת, כחלק מתכנית הניטור של הכנרת.

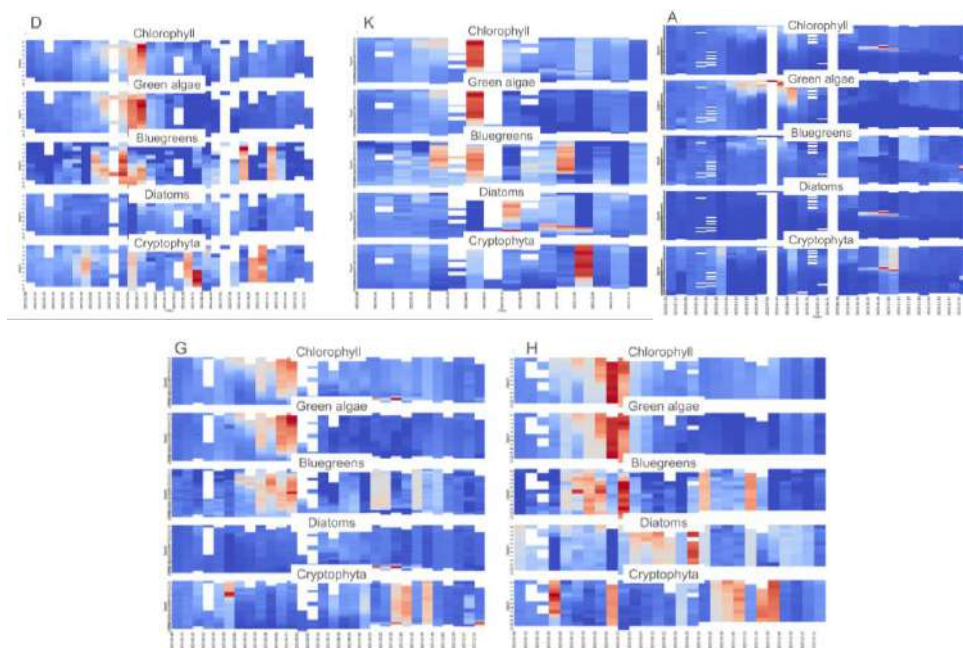
תוצאות

במהלך חלק מחודשי השנה ובמיוחד לאחר חודש יוני, הפלואורופורב היה תקול (ניתן להבחין באיורים באזורים בהם הקריאות חלקיות או חסרות), אך התקלה תוקנה והנתונים נאספו באופן תקין מחודש אוקטובר. השוואה בין ערכי הכלורופיל שנמדדו במעבדה, ובין הערכות הפלואורופורב (איור 73) מראה התאמה כללית טובה בין הערכים, אך הערכים הנמדדים על ידי הפלואורופורב גבוהים יותר (הערכת יתר של ריכוז הכלורופיל על ידי מכשיר הפלואורופורב).

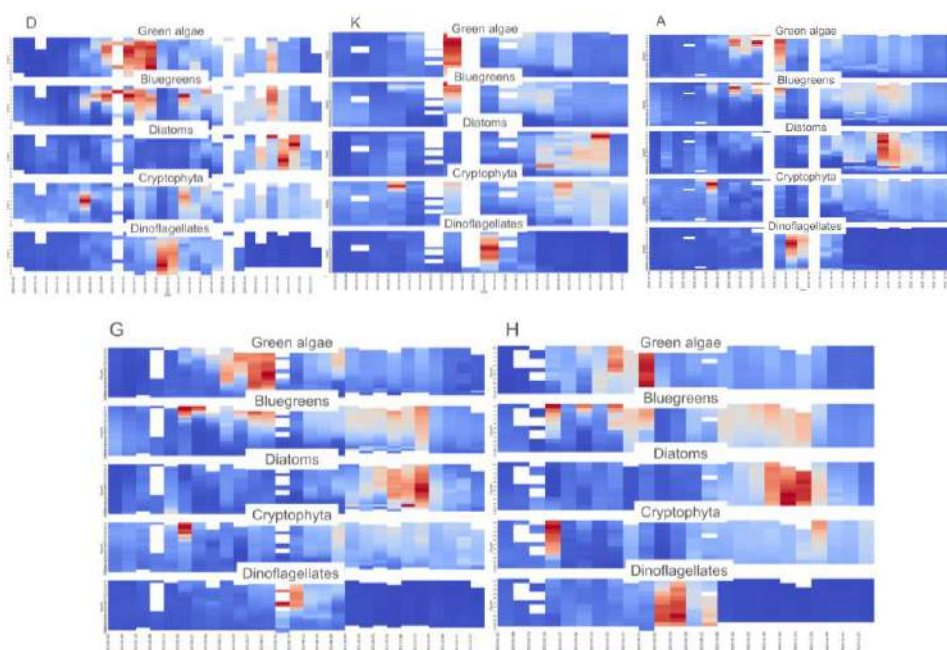
במהלך השנה, ערכים גבוהים של הקבוצות הטקסונומיות השונות נמדדו בתחנות הפריפריאליות G, D, H, K, בהשוואה למדידות שבוצעו בתחנה A העמוקה במרכז האגם. מנתוני הפלואורופורב, ניתן לראות כי ירוקיות היו דומיננטיות בתחנה A בחודשי הקיץ, לעומת התחנות הפריפריאליות, בהן התפתחו קבוצות טקסונומיות נוספות (איור 74). יש לשים לב כי הרמות הגבוהות של הצורניות המדווח על ידי הפלואורופורב בתחנות השונות אינן אמינות ולא משקפות את התפוצה היחסית של קבוצה טקסונומית זו באגם. בכנרת קבוצה טקסונומית נוספת, הדינופלגלטים, המכילים פיגמנטים בעלי מאפייני בליעה דומים לצורניות, וניתן לייחס חלק מהסיגנל הזה לדינופלגלטים. על מנת להתגבר על מגבלה זו, פיתחנו מודלים של לימוד מכונה להערכת ריכוז הביומסה של הקבוצות הטקסונומיות השונות בדיוק רב יותר. השימוש בשיטות של לימוד מכונה איפשר לנו להעריך, לראשונה בכנרת, גם דינופלגלטים על בסיס מדידות הפלואורופורב (איור 75).



איור 73: ריכוז כלורופיל ממוצע מנורמל שנמדד בעומקים 0-10 מטר, בתחנה A בכנרת מחודש ינואר 2023 ועד תחילת ינואר 2024. בכחול מדידות מעבדה. בכתום הערכות הפלואורופורב.



איור 74: הערכת מבנה האוכלוסיה על ידי הפלואורופורב בתחנות השונות בעומקים שונים במהלך השנה. ציר ה-X מציג את תאריכי הדיגום בשנת 2023 (סדר כרונולוגי משמאל לימין), ציר ה-Y מציג את העומקים (קרקעית האגם בראשית הצירים). הצבע פרופורציונלי לריכוז ביומסת הפיטופלנקטון ($\mu\text{g/L}$).



איור 75: הערכת מבנה האוכלוסייה על ידי מודל לימוד מכונה בתחנות השונות בעומקים שונים במהלך השנה. ציר ה-X מציג את תאריכי הדיגום בשנת 2023 (סדר כרונולוגי משמאל לימין), ציר ה-Y מציג את העומקים (קרקעית האגם בראשית הצירים). הצבע פרופורציונלי לריכוז ביומסת הפיטופלנקטון ($\mu\text{g/L}$).

דיון

ניתן להסביר את העושר הרב יותר של פיטופלנקטון בתחנות הפריפריאליות בביומסה ובמגוון, בהשוואה לתחנה A, בקרבה לליטורל, המכיל עומסים גבוהים יותר של נוטריינטים וחומר אורגני בהשוואה למרכז האגם, הרחוק מהחוף ומהקרקעית. השימוש במודלים של לימוד מכונה מאפשר הערכה רחבה ומדויקת יותר של מבנה אוכלוסיית הפיטופלנקטון בכנרת, בתחנות השונות במהלך הזמן.

2.29 מליחות הכנרת

במימון רשות המים

שקד שטיין

- רמת מליחות בכנרת, מתבטאת במוליכות חשמלית וריכוזי כלוריד אשר יורדים עד הקיץ ולאחר מכן עולים.
- ריכוזי הכלוריד באפילימניון בשנת 2023 היו נמוכים מהממוצע הרב שנתי בכ-20 מג"ל כאשר ריכוזי הכלוריד בהיפולימניון היו נמוכים מהממוצע הרב שנתי בכ-10 מג"ל.
- בסוף שנת 2023 ריכוז הכלוריד בעמודת המים העליונה עמד על 262 מ"ג כלוריד לליטר.



מטרה

מטרת הניטור היא לעקוב אחרי מליחות מי הכנרת לאורך השנים על מנת להבין ולנתח מגמות ואילוצים המשפיעים על ריכוז המלחים בכנרת.

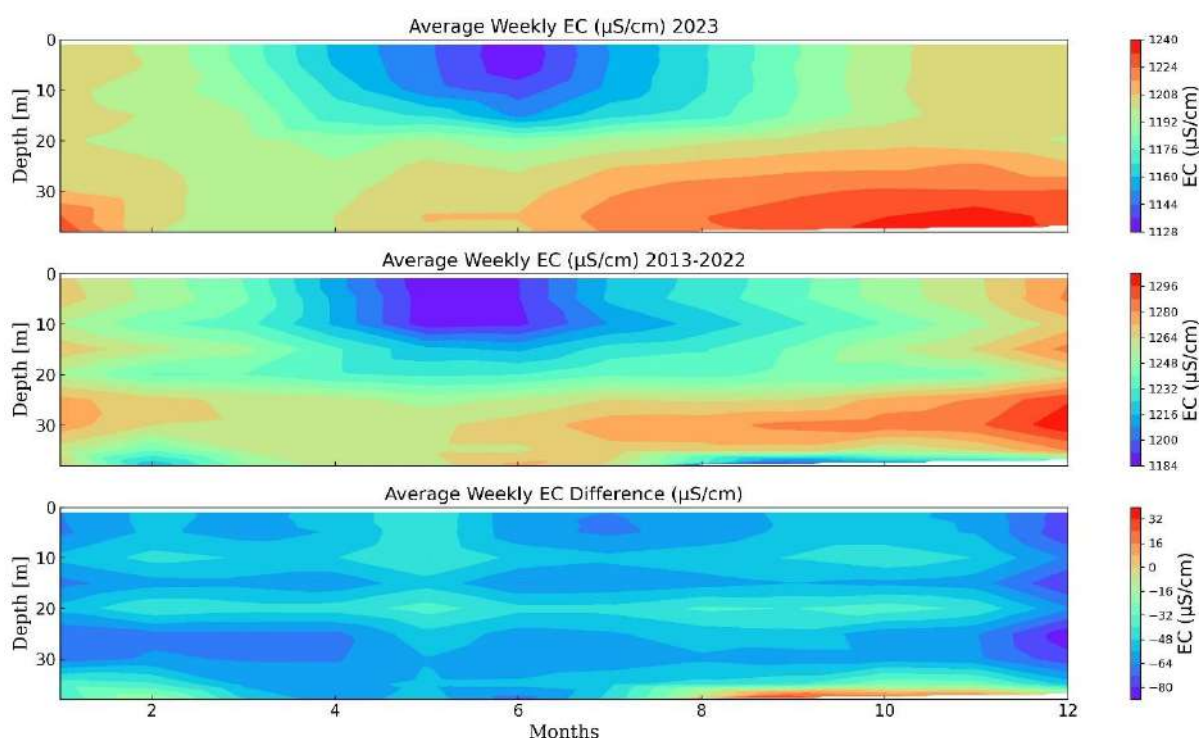
רקע

ניטור המליחות מושתת על דיגומים שבועיים של כלוריד בחמש תחנות באגם ובמספר עומקים. כמו כן, בכל תחנה מתבצעת גם הורדה של CTD אשר מספק פרופיל של מוליכות חשמלית (EC) אשר קיים בינו לבין ריכוז הכלוריד קשר ליניארי הדוק והוא מדד טוב למליחות המים. כאן מוצגת השוואה בין שני המדדים של המליחות: EC וריכוז הכלוריד.

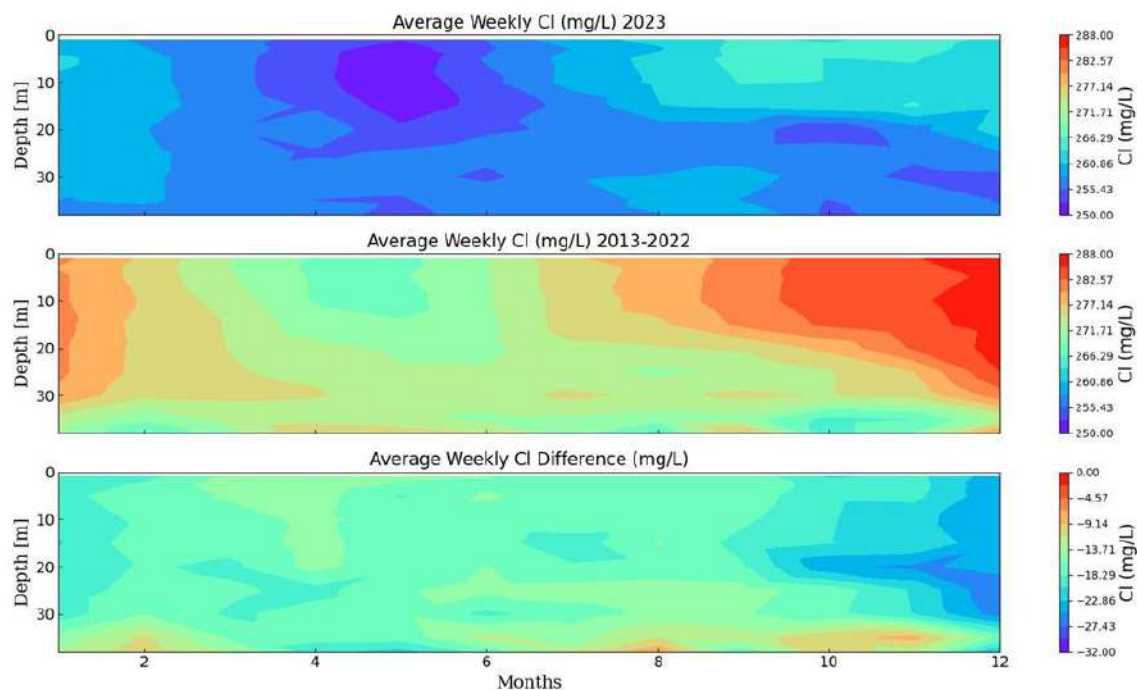
תוצאות

תוצאות המוליכות החשמלית מראות ירידה בערכים באפילימניון מהחורף עד חודש יוני, דבר המבטא דומיננטיות של כניסות מתוקות (איור 76). מחודש יוני עד סוף השנה הערכים בעלייה, מה שמעיד על ירידות בספיקות הנחלים ודומיננטיות של אידוי וכניסות מלוחות אשר מעלה את רמת המליחות באגם (איור 78). בהסתכלות על ערכי שנת 2023 בהשוואה לממוצע הרב שנתי, שנת 2023 התאפיינה בערכי EC נמוכים בכל העומקים מלבד בקרקעית האגם מסוף הקיץ עד תחילת החורף (איור 76).

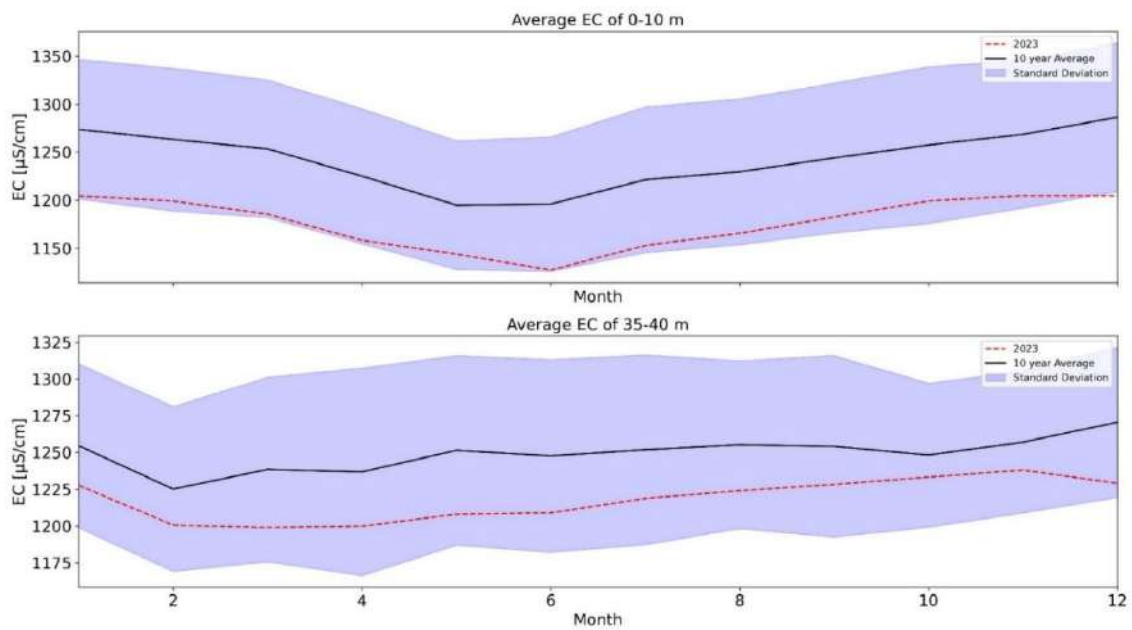
ריכזי הכלוריד מציגים תמונה דומה למוליכות החשמלית עם ירידה בערכים באפילימניון עד חודשי הקיץ ולאחר מכן עליה בריכזי הכלוריד (איור 77). שנת 2023 התחילה עם ריכוז כלוריד של 260 מג"ל והסתיימה בריכוז של 261 מג"ל. בעומקים הרדודים, ריכזי הכלוריד נמוכים בכ-20 מג"ל מהממוצע הרב שנתי לאורך כל שנת 2023. בהיפולימניון, ריכזי הכלוריד בשנת 2023 נמוכים בכ-10 מג"ל מהממוצע הרב שנתי (איור 79). ניתן לראות שבאופן כללי נתוני המוליכות החשמלית הם בהתאמה טובה עם נתוני הכלוריד אך לא באופן מושלם ולכן מומלץ להמשיך ולנטר את שניהם באופן רציף.



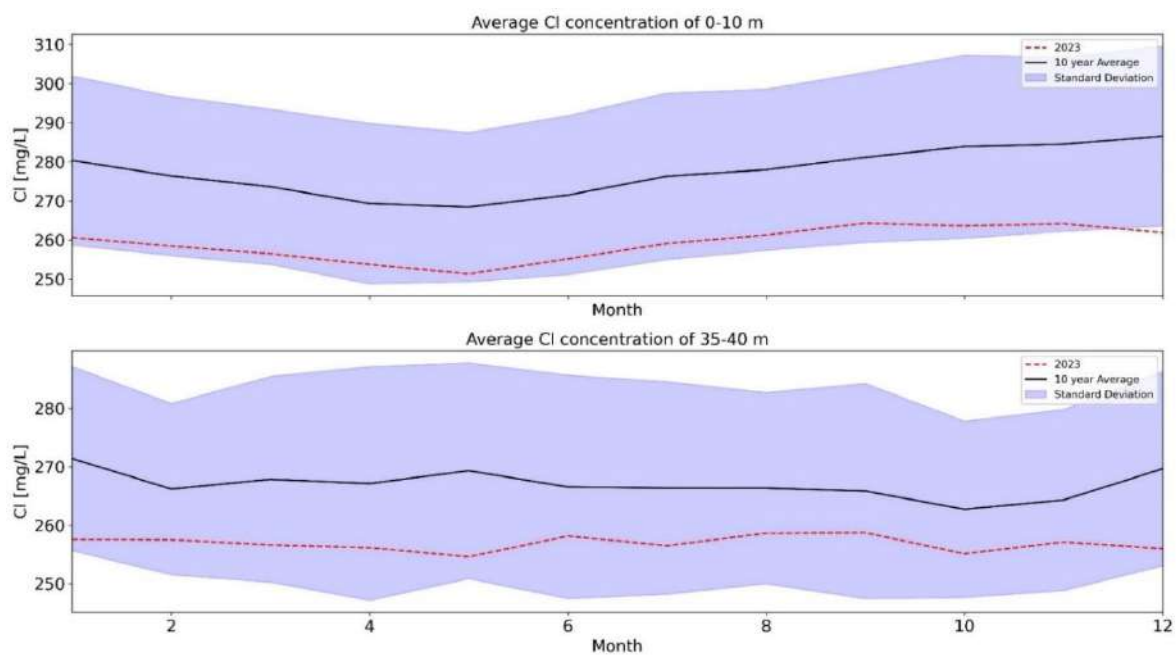
איור 76: פרופיל מוליכות חשמלית (EC) במרכז האגם (תחנה A) לאורך חודשי השנה לשנת 2023, ממוצע 10 שנתי וההפרש בין נתוני 2023 לממוצע ה-10 שנתי.



איור 77: פרופיל כלוריד במרכז האגם (תחנה A) לאורך חודשי השנה לשנת 2023, ממוצע 10 שנתי וההפרש בין נתוני 2023 לממוצע ה-10 שנתי.



איור 78: ממוצע שבועי של מוליכות חשמלית (EC) של עומקים 0-10 מטר (פנל עליון) ועומקים 35-40 מטר (פנל תחתון) לשנת 2023 (קו מקווקו אדום), ממוצע 10 שנתי (קו שחור) וסטיית התקן של הממוצע ה-10 שנתי (שטח סגול).



איור 79: ממוצע שבועי של ריכוז הכלוריד של עומקים 0-10 מטר (פנל עליון) ועומקים 35-40 מטר (פנל תחתון) לשנת 2023 (קו מקווקו אדום), ממוצע 10 שנתי (קו שחור) וסטיית התקן של הממוצע ה-10 שנתי (שטח סגול).

3 מחקרי כנרת

3.1 מרכז אצות לאומי

במימון משרד המדע והטכנולוגיה
ובתמיכת משרד החקלאות ופיתוח הכפר
רות נ. קפלן לוי, אלה אלסטר,
אמילי ארוגטי בן - אור

- אוסף התרבויות הלאומי עומד כיום על 220 זנים שונים של מיקרו-אצות.
- בשנת 2023 הגדלנו את האוסף ב- 71 תרבויות.
- פותחו נהלים למתן שירותים שונים ללקוחות.
- פותח פרוטוקול ריצוף מיקרוביום מזני ציאנובקטריה.



מטרות מרכז האצות

להוות בנק לשימור מגוון המינים של אצות ישראל, לשימוש קהילת המדע, החקלאות, התעשייה והחינוך. תיוג חיהוי מורפולוגי וגנטי של כלל הזנים המבודדים באוסף. להוות מרכז מחקרי וידע בנושא אצות תוך יצירת גשר בין האקדמיה לתעשייה בתחום. להוות מרכז חינוכי בנושא אצות להעברת הידע לדורות הבאים. עמידה בדרישות תקן בינלאומיים (ECCO and WFCC).

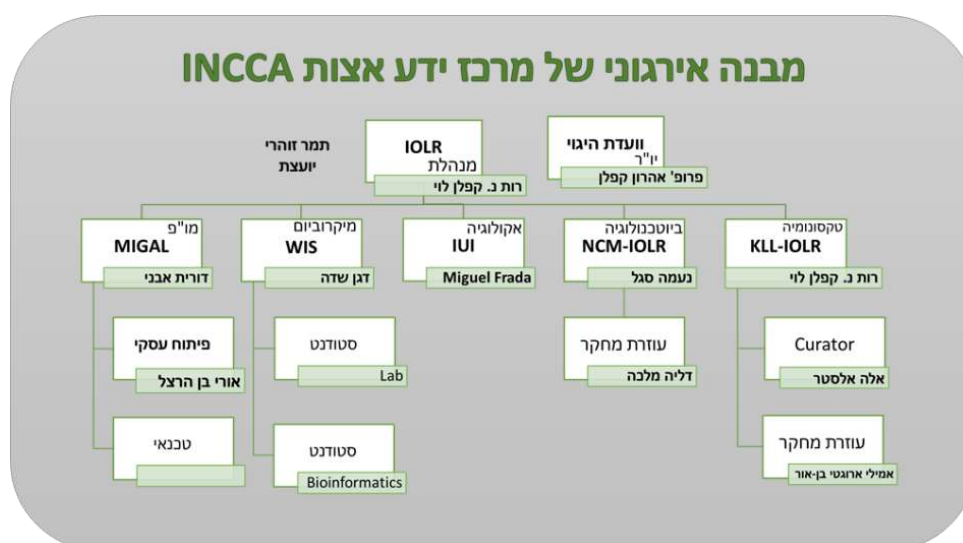
רקע

אצות הן קבוצה מגוונת של יצורים, שהמשותף להם הינה היכולת לקבע פחמן בתהליך הפוטוסינתזה ומכאן שהן היצרניות העיקריות של חמצן על פני כדור הארץ. האצות מהוות את הבסיס למארג המזון בסביבות מימיות ומסייעות בין השאר בוויסות השינויים האקלימיים. בעקבות שינוי האקלים ופעילות אנושית אינטנסיבית חלים שינויים בבתי הגידול הטבעיים, אשר להם השפעה מכרעת על הרכב ומגוון

המינים של האצות. שינויים אלה עלולים להוביל לפריחות לא רצויות של אצות, לעיתים רעילות, אובדן של מיני אצות בעלי תועלות ישירות לאדם (למשל בתחום המזון והפארמה), אובדן מינים אנדמיים וכניסה של מיני אצות פולשות העלולות לשנות את אופיין של מערכות אקולוגיות. מינים שונים של אצות משמשים כמקור ליצירת חומרי טבע המועילים לאדם בתעשיות השונות. בתעשיית המזון הם מהווים מקור לפיגמנטים, חלבונים, רבי-סוכר, חומצות שומן וויטמינים, וטמון בהן הפוטנציאל לספק ביטחון תזונתי. בתעשיית הקוסמטיקה משלבים שמנים ונוגדי חמצון ממינים שונים, וברפואה הם מהווים מקור לחומרים פעילים לפיתוח תרופות חדשות. מינים שונים של אצות מהווים גם מוקד לחקלאות, בכלל, ולחקלאות ימית, בפרט, והביומסה שלהם משמשת גם כמזון לבע"ח ודשן. ניתן לנצל את האצות כמקור לאנרגיה חלופית בצורת ביודזל, ולטיפול ושיקום סביבתי כלוכדות גזי חממה. מספר דוגמאות של אצות המשמשות היום בתחומים השונים הן: *Spirulina*, *Chlorella*, *Nanochloropsis*, *Dunaliella salina* ו-*Haematococcus pluvialis*. לאור החשיבות והיתרונות המהותיים הגלומים באצות, קיים צורך גדל והולך לאתר, לזהות ולשמר מיני אצות לתועלת האדם, יחד עם הצורך לשמר את מגוון המינים למען הדורות הבאים. אוסף התרבויות הלאומי של אצות ישראל (INCCA - Israel National Culture Collection of Algae) נוסד במטרה לשמר את המגוון הביולוגי של האצות בארצנו, וכן לשמש כמרכז ידע לבידוד מיני אצות ופיתוח בסיס מדעי לזיהוי והפקת תועלות לאדם ולחברה.

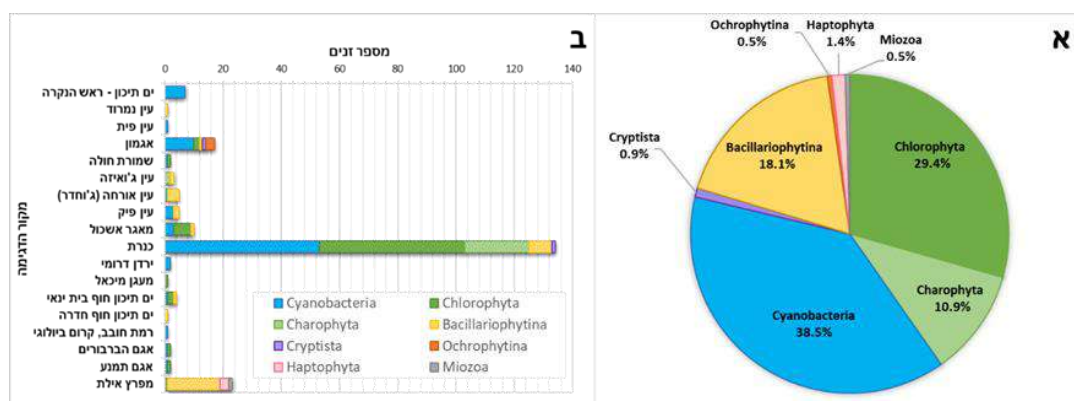
תוצאות ודיון

המרכז הלאומי לאצות INCCA ממוקם במעבדה לחקר הכנרת, חקר ימים ואגמים לישראל (חיא"ל), שבאתר ספיר, על שפת האגם. המרכז הוקם על בסיס שותפות בין כמה גופים: חיא"ל על שלושת שלוחותיו (כנרת, חיפה, ואילת), מכון המחקר מיג"ל שבקרית שמונה, מכון ויצמן למדע ברחובות והמכון הבינאוניברסיטאי באילת (איור 80).



איור 80: מבנה ארגוני של מרכז ידע אצות. באיור רשומים המכונים השותפים, שמות השותפים יחד עם תפקידם במרכז.

כיום אוסף התרבויות של המרכז מונה 220 זנים שמקורם במקווי מים שונים (מים מתוקים, ימיים ומליחים) בארץ, בעיקר ממערכות הציאנובקטריה (כחוליות, 39%), Chlorophyta (ירוקיות, 29%), Bacillariophytina (צורניות, 18%) ו-Charophyta (נאווניתיות, 11%) (איור 81).



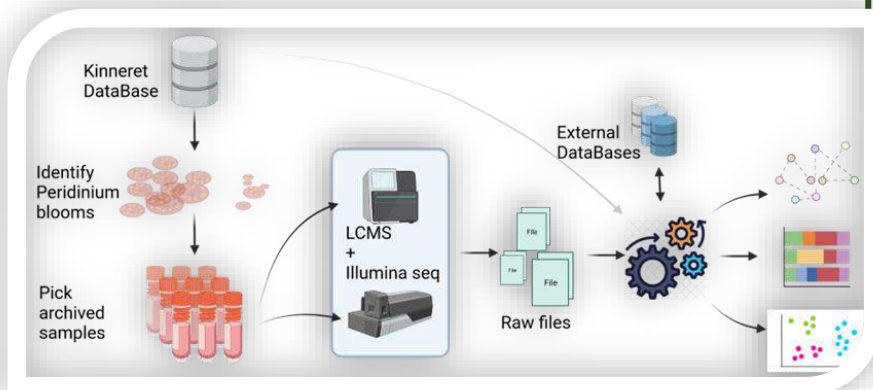
איור 81: מגוון זני האצות ב INCCA סוף 2023. א. מגוון זני האצות על פי חלוקה טקסונומית; ב. מגוון האצות של INCCA לפי מקור בתי הגידול מהם בודדו הזנים.

הזנים באוסף מוחזקים חיים על פני צלחות פטרי או מבחנות, על מצעי גידול מותאמים, נחלי או מוצק, בטמפרטורות ועוצמות אור שונים, בהתאם לתנאים המתאימים לכל זן. על מנת לוודא את החיות של כל הזנים, שלושה העתקים מכל זן מוחזקים ומועברים למצעי גידול טריים כל חודש או שלושה חודשים בהתאם לקבוצה הטקסונומית. האוסף גדל בעשרות זנים כל שנה. הזנים מבודדים מהטבע במיומנות רבה לקבלת תרבית חד-אצתית, כלומר בכל תרבית קיים אורגניזם אחד המבצע פוטוסינתזה ויחד אתו חיים מגוון חיידקים אשר הכרחיים לשרידות שלו, "מיקרוביום", כמו שלנו יש במעי. כחלק מתהליך הבידוד והזיהוי של האצות, יחד עם שותפתנו ד"ר דגן שדה ממעבדתו של פרופ' זיו רייך במכון ויצמן למדע, אנו מזהים את החיידקים הנוספים בתרבית בשיטת metabarcoding. במכון מיג"ל שותפתנו ד"ר דורית אבני סורקת את הזנים השונים למציאת חומרים פעילים לתעשיית הפארמה, קוסמטיקה, חקלאות ועוד. כמו כן, כרגע אנו עומלים על פיתוח פרוטוקולים להקפאה עמוקה של זנים על מנת שנוכל לשמור את הפוטנציאל הגלום בגנום של יצורים אלה ובכך להפחית את עומס ההעברות. היכולת לבדוד זני אצות מכל המדינה מתאפשרת מתוך השותפות בין הגופים השונים המבצעים ניטור של גופי מים בישראל. כך זנים מים תיכון מבודדים תוך שותפות עם חקר ימים ואגמים לישראל – חיא"ל (המכון לאוקיאוגרפיה) חזנים ממפרץ אילת מבודדים על ידי ד"ר מיגל פראדה מהמכון הבינאוניברסיטאי באילת. בעיר הדרומית ביותר גם יושבת השלוחה של חקר ימים ואגמים – מלח"י (המרכז הלאומי לחקלאות ימית), שם ד"ר נעמה סגל המתמחה בביוטכנולוגיה, יכולה להגדיל את נפח תרבית האצות הרצוי לנפחים המתאימים לתעשייה. כמו-כן, אנו מלווים ע"י מר אורי בן הרצל סמנכ"ל פיתוח עסקי במכון המחקר מיג"ל. מרכז INCCA כבר היום מספק שירותים שונים ללקוחות מהאקדמיה, תעשייה וחינוך. סל השירותים המסופקים ע"י INCCA גדל כל שנה, החל ממכירת זנים, זיהוי מורפולוגי וגנטי של זני אצות, יעוץ מדעי ופעילויות חינוכיות. בשנת 2023 הגדלנו את קהל הלקוחות וסיפקנו שירותי טקסונומיה ותרבויות חיות למוסדות שונים.

3.2 חקר הגורמים לפריחת פרידיניום בכנרת בגישה רב תחומית המשלבת בינה מלאכותית, פרוטאומיקה וגנומיקה

במימון רשות המים

אופיר טל, תמר זהרי, שירה ניניו



- דוגמאות היסטוריות של פרידיניום עברו אנליזת חלבונים והפקות דנא לאנליזה מטא-גנומית.
- פיתוח מערכת חישובית לזיהוי גורמים סיבתיים המשפיעים על גדילת הפרידיניום בכנרת.

תיאור סכמטי (משמאל לימין) של שלבי המחקר משמאל לימין: עיבוד נתוני העבר חיהוי אירועי פריחות פרידיניום בכנרת. בחירת דוגמאות היסטוריות על בסיס ניתוח מאגר המידע; ריצוף גנומי ואנליזת LCMS; אינטגרציה והצלבה של התוצאות עם נתוני העבר.

מטרה

זיהוי ומיפוי הקשרים הסיבתיים בין גורמים סביבתיים לשינוי בדפוסי ועוצמות הפריחה של האצה פרידיניום בכנרת. בעזרת אוסף היסטורי של דגימות ושל נתוני הפיטופלנקטון שברשותנו ניתן להתחקות אחר הרכב המינים של פרידיניום ושל חיידקים ופיטופלנקטון שאינו פרידיניום, אשר אפיין את פריחות הפרידיניום לאורך השנים. איפיון גנטי מתקדם של הרכב מיני הפרידיניום יאפשר מעקב אחר שינויים אפשריים במאזן שבין המינים במהלך השנים. אפיון של מיני המיקרואורגניזמים המופיעים יחד עם פרידיניום יאפשר לנו לזהות שינויים ביחסי הגומלין של פרידיניום עם אורגניזמים אחרים כגון אצות צורניות, ירוקיות, ציאנובקטריה או חיידקים אחרים, שעשויים להשפיע על היכולת של פרידיניום לשגשג באגם. אנליזת פרוטאומיקה של הדגימה הסביבתית תאפשר לזהות את החלבונים שהתבטאו בעת לקיחת הדגימה. פרופיל ביטוי החלבונים במצבים הסביבתיים השונים יאפשר מיפוי רשת המסלולים המטבוליים בחברה, חיהוי השפעת המצבים הסביבתיים השונים על ביטוי מסלולים מטבוליים. מתוך אוסף הנתונים נבחר ונשווה שנים של פריחות קיצוניות בעוצמתן הגבוהה ("פריחות חזקות") והנמוכה ("פריחות חלשות") כדי לחקור את ההבדלים ביניהן. באמצעות אינטגרציה של המידע הגנומי והמטבולי עם סדרות הזמן של הנתונים מתכנית הניטור של הכנרת נוכל: א. לאפיין מבנה החברה בתקופות השונות. ב. למפות אינטראקציות המאפיינות את הפריחות השונות. ג. לזהות משתנים ותהליכים סביבתיים המראים קשר סיבתי לדפוסי הפריחות ועוצמתן.

רקע

עד אמצע שנות ה-90 של המאה הקודמת פריחת פרידיניום אביבית הייתה תופעה שחזרה על עצמה משנה לשנה ואפיינה את הכנרת עד כדי כך שהכנרת נחשבה בספרות הבינלאומית כדוגמא קלאסית לאגם שבו המהלך השנתי של הפיטופלנקטון ידוע וחוזר על עצמו. החל משנת 1996 הפרידיניום הפסיקה לפרוח מדי שנה, והיא פורחת רק בשנים גשומות במיוחד, אם כי גם המופע שלה בשנים גשומות הפך לאירוע נדיר. השאלות מדוע באמצע שנות התשעים נפסקו הפריחות האביביות של אצת הפרידיניום ומה ניתן לעשות כדי להחזיר את הפריחות הללו מעסיקות את חוקרי ומתפעלי הכנרת כבר מעל שני עשורים. עד כה התשובות חלקיות בלבד. סיבות אפשריות לשינוי בדפוס הפריחה של האצה פרידיניום עשויות להיות: שינויים במדדים סביבתיים הקשורים לשינויי האקלים (טמפרטורה, קרינה, פחמן דו-חמצני וכד'), שינויים בהרכב אוכלוסיית החי בכנרת ושינויים בהרכב הכימי של מי האגם.

שיטות

המחקר המוצע כולל את השלבים הבאים, המוצגים באופן סכמטי באיור בתחילת הפרק: א. ניתוח ועיבוד נתוני העבר באמצעות שיטות חישוביות מתקדמות, במטרה למפות ולקבץ פריחות פרידיניום. מקבצים אלו שימשו לבחירת דוגמאות פרידיניום מיובשות להמשך אנליזה. הדוגמאות נבחרו לצורך אנליזה גנומית ופרוטאומית ולצורך איפיון מבנה החברה ברזולוציה גבוהה חיהוי מסלולים מטבוליים.

ב. עיבוד נתוני העבר, זיהוי ותיוג של תיעודי פריחות פרידיניום בכנרת. ג. 1. אנליזה גנטית – הפקת חומצות גרעין מדוגמאות הפרידיניום ההיסטוריות, והגברת מקטעים נבחרים לצורך ריצוף מתקדם לקבלת תמונה של הרכב מיני האצות האאוקריוטיות שבדוגמה והיחס הכמותי שביניהן. שיטה זו מאפשרת להבחין בין מינים שונים של פרידיניום הדומים זה לזה מורפולוגית, אם כאלה קיימים, ולצורך מעקב אחר אוכלוסיית הכחוליות הנלוות לפריחה. 2. אנליזה פרוטאומית - דגימות נבחרות יעברו אנליזה ספקטרוסקופית-מסות לקבלת הרכב החלבונים מהותם.

תוצאות

א. עיבוד נתוני העבר ובניית מערכת חישובית לזיהוי סיבתיות במערכת האקולוגית: נתוני העבר עובדו, זוהו פריחות חזקות וחלשות על בסיסן נבחרו דוגמאות לאנליזה פרוטאומית וגנומית. בנוסף, שיטות שונות לזיהוי סיבתיות הוטמעו בקוד לאנליזה סיבתית של הפרידיניום. תחילת אנליזה סיבתית למיפוי שגשוג של הפריחה והבנת האינטראקציות עם יצורים אחרים באגם.

ב. אנליזה גנומית של הדוגמאות ההיסטוריות:

הדוגמאות נמצאות כרגע בתהליך הפקת חומצות גרעין והגברת מקטעים של הגן ל RNA הריבוסומלי מסוג S18 לצורך אנליזה מטא-גנומית. למרות גיל הדוגמאות, תהליך ההפקה מוצלח ברוב המקרים ומתקבל דנ"א שעובר בהצלחה גם את שלב ההגברה לקבלת תוצר ספציפי באורך הצפוי. תוצרים אלה ישלחו בהמשך לריצוף עמוק.

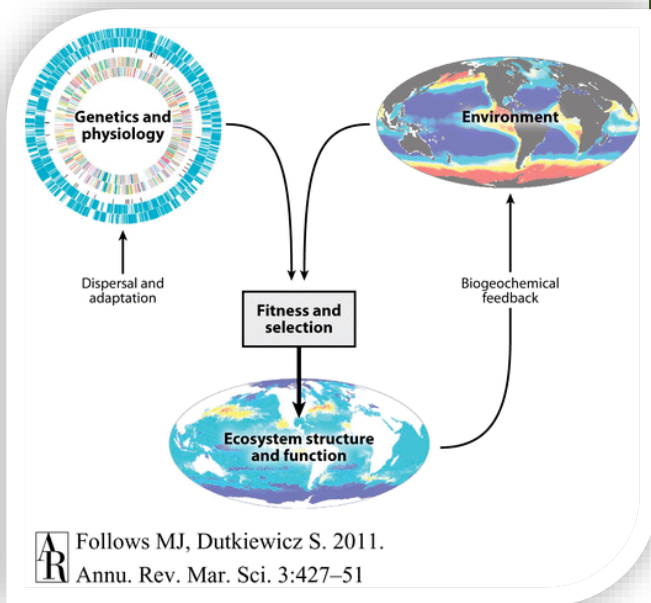
ג. אנליזה פרוטאומית של הדוגמאות ההיסטוריות: התקבלו תוצאות ראשונות מאנליזה החלבונים, והנתונים בתהליך עיבוד.

דיון: המערכת החישובית לזיהוי קשרים סיבתיים בתהליך פיתוח. במהלך שנת 2024, תלמיד מחקר יצטרף לפרויקט לשם ביצוע המחקר.

3.3 פיתוח, כיוול ויישום מודל ביוגיאוכימי תלת מימדי לכנרת

במימון רשות המים

יעל אמיתי



- מודל ביוגיאוכימי תלת מימדי של הכנרת מאפשר בחינה של התפתחות ותפוצה של פריחת אצות בהינתן תנאי הסביבה הפיזיקליים.
- המודל מצליח לדמות את תזמון השיגשוג האביבי של המיקרואורגניזמים ואת תזמון השיגשוג הקיצי של הציאנובקטריה מקבעות החנקן בשנת 2019.
- השונות המרחבית של הפריחות מתבטאת בריכוזים חופיים גבוהים בקיץ ובמרכז הכנרת בחורף. תופעה זו מדומה היטב על ידי המודל גם כן.

סכמה עקרונית המתארת את הרכיבים של המודל הביוגיאוכימי הנקרא Darwin

מטרה

מטרת המחקר היא לפתח, לכייל וליישם מודל פיזיקלי-ביוגיאוכימי תלת מימדי של הכנרת לצורך הבנה וניתוח תהליכים ותופעות אקולוגיות בעלות שונות מרחבית מהותית באגם. באמצעות מודל פיזיקלי-ביוגיאוכימי מרחבי תלת מימדי אפשר, בין היתר, להדמות פיזור חומר מרחף ונוטריינטים המגיעים מפתחי נחלים. בנוסף, ניתן למדל ולהבין תהליכים אקולוגיים כמו אלו הקובעים את השונות המרחבית של פריחת כחוליות ומיני אצות אחרים ואת המניע להתפתחות סוגי פריחות שונות.

רקע

תצפיות רבות בפני השטח, ובעומק עמדות המים, מראות כי, בדומה לאגמים אחרים ולסביבה הימית, ישנה שונות אקולוגית מרחבית בכנרת. למשל, כתמי פריחת אצות, בכלל, ואצות רעילות, בפרט. ריכוזי כלורופיל הנמדד מלוויינים שונים ברזולוציות זמן ומרחב שונות, מעידים על תהליכים בעלי הטרוגניות מרחבית. רבים מהתהליכים הכימיים והביולוגיים בסביבה האקוויטית מושפעים מהסביבה הפיזיקלית בה הם מתרחשים. היכולת למדל, לנתח ולחזות תופעות אלו, ברזולוציה עיתית ומרחבית שרק מודל תלת מימדי מפורט מספק,

היא בעלת חשיבות גדולה הן למחקר לצורך הבנת תופעות אקולוגי באגם והן לתהליך קבלת החלטות אופרטיביות וממשקיות.

שיטות

עבור עבודה זו השתמשתי במודל האקולוגי של מודל הזרימה הפיזיקלי שפותח בMIT ונמצא בשימוש שוטף במעבדה. מודל אקולוגי זה נקרא DARWIN והוא מדמה את המחזוריים הביוגיאוכימיים של פחמן, זרחן, חנקן, סיליקה, ברזל וחמצן בפאזות שונות של חומר אי-אורגני, אורגני, מומס וחלקיקי. המודל מדמה את האינטראקציה בין מספר קבוצות פונקציונליות של פיטופלנקטון חואופלנקטון דרך יצירה, פירוק ושיחלוף חומר אורגני. תמותה והפרשות מעבירים חומר אורגני חלקיקי השוקע, מתמוסס או עובר פירוק חידקי וחוזר למערכת כנוטריינטים בפאזה אי-אורגנית. מודל דרווין מתבסס על שיטה ייחודית שדוגלת בסידור עצמוני של אוכלוסיית פיטופלנקטון באופן אקראי על פי הפונקציות הפיזיולוגיות שלהן (נספחים עם משוואות המודל במאמרים (Follows et al., 2007, Follows and Dutkiewicz 2011). במחקר זה נלקחה תבנית של 5 קבוצות פונקציונליות של פיטופלנקטון, המתוארות על פי אלמנטים עיקריים בטבלה 7. תבנית זו נלקחה כיוון שהקבוצות מתאימות לקבוצות העיקריות ובעלות המשמעות האקולוגית העיקרית בכנרת וכן תואמים למבנה במודלים אחרים שפותחו בשנים האחרונות עבור הכנרת. יש לשים לב שבין הקבוצות שתי קבוצות של ציאנובקטריה, האחת, המיקרוציסטים, שמשגשגת בחורף, והשנייה, של מקבעי חנקן דוגמת הצלינדרוספרמופסין והאפניזומינון, המשגשגים בקיץ-סתיו.

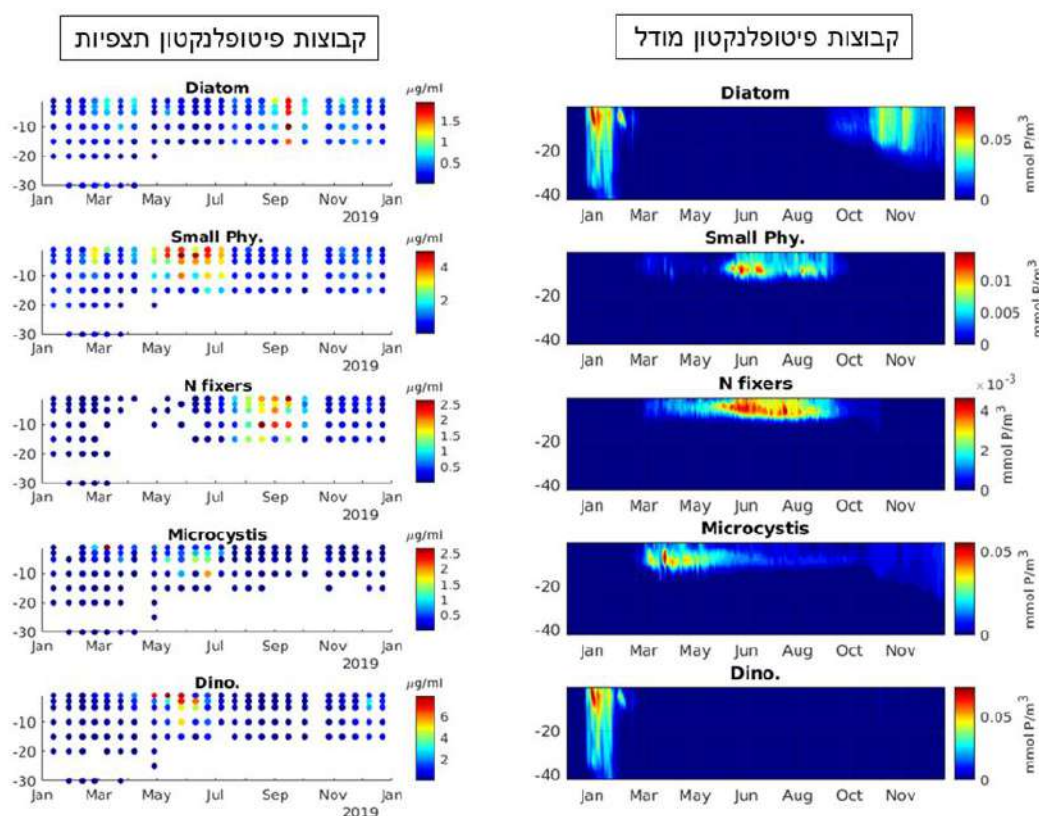
טבלה 7: מאפיינים עיקריים של קבוצות הפיטופלנקטון של המודל האקולוגי

Phytoplankton type	Mu (maximal growth rate [1/d])	Rnp (N/P ratio)	Rfep (Fe/P ratio)	Rsip (Si/P) ratio	KsP (P half saturation [μM P])	KsN (N half saturation [μM N])	KsFe (Fe half saturation [μM Fe])
Diatom	0.4	16	1	16	0.035	0.56	0.035
Dinoflagellates	0.4	16	1	0	0.035	0.56	0.035
Small Phyto.	0.7	16	1	0	0.015	0.24	0.015
N fixing Cyanobacteria	0.7	16	1	0	0.01	0.16	0.01
Microcystis	0.7	16	1	0	0.01	0.16	0.01

תוצאות

תוצאות המודל המצומד (פיזיקלי-אקולוגי) נבחן מול ספירות של פיטופלנקטון חואופלנקטון הנעשות במעבדה במסגרת תכנית הניטור של הכנרת. במעבדה לחקר הכנרת קיימות ספירות דו-שבועיות של קבוצות פיטופלנקטון חואופלנקטון בעומקים שונים מתחנה A, הקרובה למרכז האגם. בהשוואה באיור 82 ניתן לראות שקיימות עליות בביומסה (שגשוג) של קבוצות פיטופלנקטון מסוימות על פני השנה. לצורניות (Diatom, פאנל עליון, איור 82) יש מופע באביב ובסתיו שנראה בתצפיות היטב ובמודל נראה לפני המופע

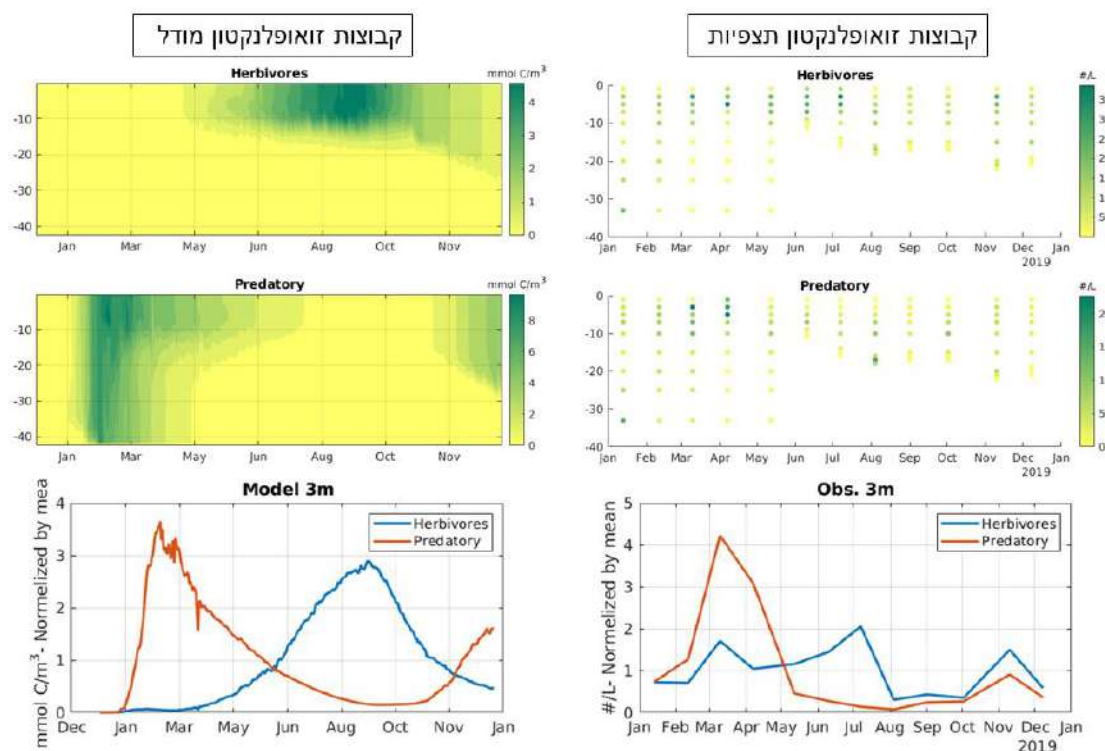
האביבי וקצת אחרי הסתווי. הפיטופלנקטון הקטנים (Small Phy., פאנל שני, איור 82) נספרים תחת שתי קבוצות טקסונומיות במעבדה: ה- Chlorophyta וה- Cryptophyta. נראה כי המודל תואם לתצפיות ויש מופע חלש במרץ ושגשוג בעומקים רדודים בקיץ. אפאניזומנון וצילינדרוספרמופסיס מקבעות חנקן (N-fixers, פאנל שלישי, איור 82) נראות היטב עם פריחה קיצית גם במודל וגם בספירות המעבדה. מיקרוציסטיס (פאנל רביעי, איור 82) מופיע לפני כן ממרץ עד מאי במודל ובספירות המעבדה, עם אי התאמה בחודש אפריל. לבסוף, Dinophyta (פאנל חמישי, איור 82) מראה חוסר התאמה כיוון שבספירות רואים שגשוג ביוני ובמודל בפברואר.



איור 82: משמאל, מדידות שבועיות של ביומסה עבור חמש קבוצות עיקריות של פיטופלנקטון שנספרו במעבדה. מימין, ריכח ביומסה מחושב על פי המודל של חמש קבוצות הפיטופלנקטון שהוגדרו באסטרטגיית מודל דרווין. יש לשים לב ליחידות השונות בין המדידות לתוצאות המודל וגם להבדלי הריכח הגדולים בין קבוצות פיטופלנקטון שונות ולהתייחס לעלייה היחסית של הביומסה במהלך השנה בכל קבוצה בנפרד.

בהשוואת הזואופלנקטון הנספר במעבדה מול זה המחושב במודל (איור 83) יש לשים לב ליחידות השונות בין המדידות (מספר פרטים לליטר) לתוצאות המודל (ריכח פחמן למ"ק), ולכן יש להשוות את השינויים לאורך הזמן. נראה שיש עלייה בריכח של זואופלנקטון צמחוניים באביב ובקיץ גם במודל וגם בספירות עם דעיכה באוקטובר. נתון זה מתאים לכך שפיטופלנקטון קטנים משגשים באביב ולתוך הקיץ (איור 82). כמו כן ריכח הזואופלנקטון הצמחוניים בעומקים הרדודים של עמודת המים מתאימה לעומק בו נמצא המזון שלהם. הזואופלנקטון הטורפים נמצאים בכל עמודת המים בחודשים שבהם עדיין אין שיכוב על פי המודל, וקיימת גם ספירה גבוהה שלהם בעומק בחודש ינואר. ניתן לראות מהמודל בבירור שכאשר ריכח

הזואופלנקטון הטורפים יורד אז ריכח הזואופלנקטון הצמחוניים עולה כמצופה מהתנהגות קלאסית בין טורף לנטרף. בבחינה של סדרות זמן של ריכחי זואופלנקטון בעומק 3 מטרים לאורך השנה (פאנלים תחתונים איור 83), ניתן לראות שקיים שיא ריכח טורפים בתחילת השנה ולאחריו שיא ריכח צמחוניים. הערכים בסדרות זמן מנורמלים לפי ממוצע שנתי כך שניתן להשוות בין הקבוצות הפונקציונליות.

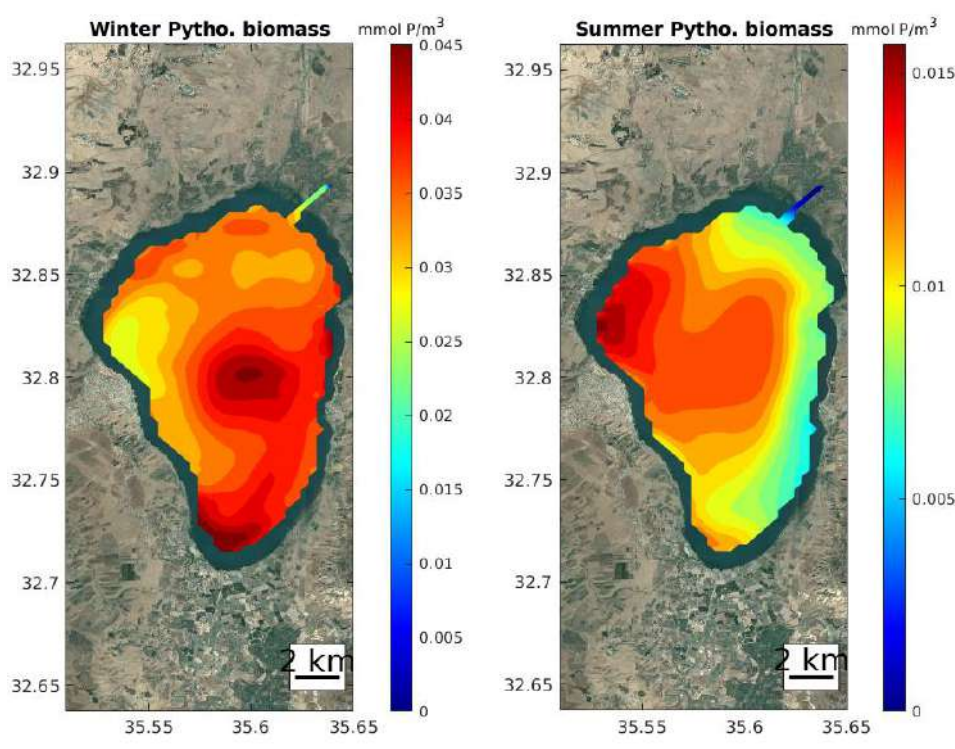


איור 83: משמאל, ספירות חודשיות של פרטי זואופלנקטון עבור שתי קבוצות פונקציונליות שנספרו במעבדה. מימין, ריכח ביומסה מחושב של שני סוגי זואופלנקטון על פי המודל. יש לשים לב ליחידות השונות בין המדידות (מספר פרטים לליטר) לתוצאות המודל (ריכח פחמן). בפאנלים התחתונים סדרת זמן של שתי קבוצות הפיטופלנקטון לאורך השנה, עם ערכים מנורמלים לפי ממוצע שנתי במודל (שמאל) ובספירות (ימין) בעומק 3 מטר.

אחד היתרונות הבולטים של מודל אקולוגי תלת מימדי על פני מודלים אקולוגיים חד מימדים הפועלים המעבדה לחקר הכנרת הוא התוצאה המרחבית. היכן הפריחות השונות מופיעות? האם באזורים חופיים או בסמוך למתקני שאיבה? באיור 84 ניתן לראות מתוצאות המודל שסך הביומסה (בערכי זרחן מקובע למ"ק) המורכבת מכל קבוצות הפיטופלנקטון היא בעלת פיזור הטרוגני במרחב האגם, כתוצאה מתנועת מים ותנאים סביבתיים מועדפים גם בקיץ (יוני עד אוגוסט) וגם בחורף (דצמבר עד פברואר). בעוד בחורף ריכח הביומסה הגבוה הוא במרכז הכנרת, בקיץ הריכח הגבוה מופיע בחוף. נראה כי בקיץ, כאשר הרוחות המערביות נושבות בעקביות כל יום, מערך הזרמים והגלים הפנימיים יוצר ריכחי ביומסה חופיים. זוהי התאמה המספקת כיול מרחבי למודל האקולוגי.

דין

נראה כי יש התאמה טובה בין תוצאות של הרצה של מודל דרווין לבין מדידות של ביומסה וספירות זואופלנקטון, אשר מתבצעות במעבדה לחקר הכנרת בשגרה כחלק מתוכנית הניטור. המודל האקולוגי המדמה מארג מורכב מצליח לדמות חלק מתופעות הפריחה ובהן הופעת פריחות ציאנובקטריה באביב ובקיץ, הנראות בכנרת, ומעסיקות את מקבלי ההחלטות. תזמון שגשוג הזואופלנקטון הצמחוני מול הטורף מראה התאמה טובה עם הספירות. המודל התלת מימדי מראה שקיימת שונות מרחבית עונתית בפריחות כפי שנראית מהלוויין. עם זאת, עבודת המשך מעמיקה בפרויקט זה תאפשר שיפור משמעותי של התוצאות.



איור 84: סך הביומסה בערכי זרחן מקובע למ"ק, בחצי מטר העליון של עמודת המים, מכל קבוצות הפיטופלנקטון בחורף (שמאל) ובקיץ (ימין) על פי תוצאות המודל משנת 2019.

ספרות

Dutkiewicz, S., Hickman, A. E., Jahn, O., Gregg, W. W., Mouw, C. B., & Follows, M. J. (2015). Capturing optically important constituents and properties in a marine biogeochemical and ecosystem model. *Biogeosciences*, 12(14), 4447-4481.

Follows, M. J., Dutkiewicz, S., Grant, S., & Chisholm, S. W. (2007). Emergent biogeography of microbial communities in a model ocean. *science*, 315(5820), 1843-1846.

3.4 גלי פני השטח: מודל ותצפיות

במימון משרד הפנים

יעל אמיתי



- במאי 2022 רוחות מזרחיות חריגות בעצמתן נשבו מרמת הגולן לכנרת, ובשילוב מפלס גבוה של תחילת קיץ, יצרו גלים גבוהים ועוצמתיים שלא נחזו כראוי.
- מהשוואת תצפיות ומודל: הרוח בבטחה יכולה להסביר את ערכי גובה הגל המשמעותיים אשר נצפו מול חוף גולן.
- במהלך 2024 יתבצע כיול מודל גלים מול תצפיות חופיות.

צילום מהרשת: הרס טיילת טבריה בליל הסופה של ה- 15 במאי 2022.

מטרה

מטרת מידול ותצפיות גלי פני שטח הינה לנטר ולחזות אירועים חריגים של גלים שעלולים לגרום להרס בחופים כפי שנצפה במאי 2022 בטיילת טבריה. מודל הגלים אשר נבנה עבור הכנרת יספק תחזית פרטנית של 3 ימים עבור חופי הכנרת. תצפיות רציפות של גלי פני שטח נועדו לכייל את המודל. שילוב מדידות גלים בפעילות השוטפת של המעבדה לחקר הכנרת יעזור בהבנת תהליכים נוספים כגון הרחפת סדימנטים במתקני שאיבה חופיים.

רקע

באמצע מאי 2022 גלים גבוהים בגובה של עד 3 מטר היכו בחופי הכנרת המערביים וגרמו נזקים חריגים לרכוש בטיילת טבריה. למרות התרעה על רוחות מזרחיות חזקות ברמת הגולן ובמורדות המזרחיים של הכנרת, לא הייתה התרעה גלים חריגים בהינתן גורמים נוספים, כגון מפלס האגם, ועל כן הנזק שהתרחש לא היה צפוי ולא הייתה היערכות מוקדמת שעשויה הייתה לצמצם את מימדי הנזקים. מערכת ניטור וחיזוי גלי פני שטח בכנרת הייתה יכולה להתריע על הצפי לפעילות גלית חריגה זו והייתה מאפשרת היערכות מתאימה. על מנת לבנות ולהפעיל מערכת זאת בכנרת יש לפעול בשני כיוונים מקבילים - מדידות ומידול.

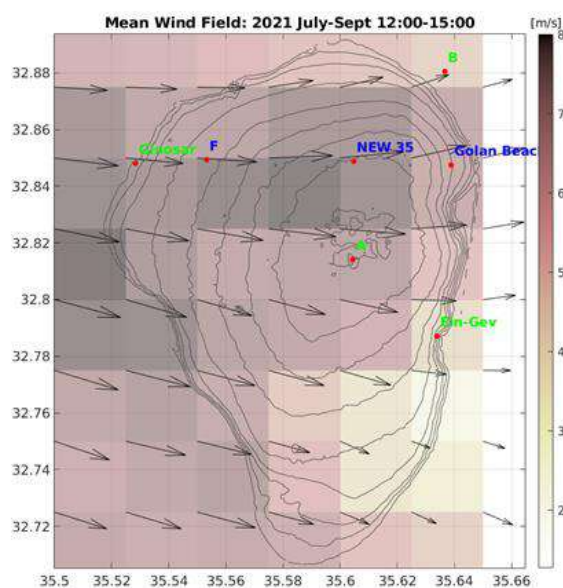
שיטות

א. מדידות

1. באוגוסט 2023 נערכה מדידת גלים בשלושה מיקומים בכנרת (איור 85) בעזרת מדי זרם אשר מודדים גם גלים שסופקו על ידי המעבדה של פרופ' ירון טולדו מאוניברסיטת תל אביב. מדי זרם-גלים הוכנסו למים ב- 2.8.2023 והוצאו ב- 11.9.2023.
2. במהלך שנת 2023 נרכש ציוד להקמת תחנות מדידת גלים חופיות בטבריה, עין גב, כפר נחום וגינוסר. תחנות המדידה כוללות מד לחץ, אוגר נתונים, וספק כוח. סנסורי הלחץ ימדדו את לחץ עמודת המים מעליהם בתדירות גבוהה (10 hertz) והנתונים הגולמיים ישמשו לחישוב עוצמת ותדירות הגלים באופן רציף. הציוד יוקם על עמודי מזח בכל מיקום במהלך שנת 2024.

ב. מודל גלים

מודל ה-WAVEWATCH III, אשר בשימוש נרחב באגמים וימים נבחר והותקן במעבדה. המודל מקבל תחזית אטמוספירית מהשירות המטאורולוגי בכל יום ומספק תחזית עבור 90 השעות העוקבות. המודל נבדק אל מול נתוני הגלים והרוח אך דרוש כיול נוסף מול התחנות החופיות שיוקמו במהלך 2024.

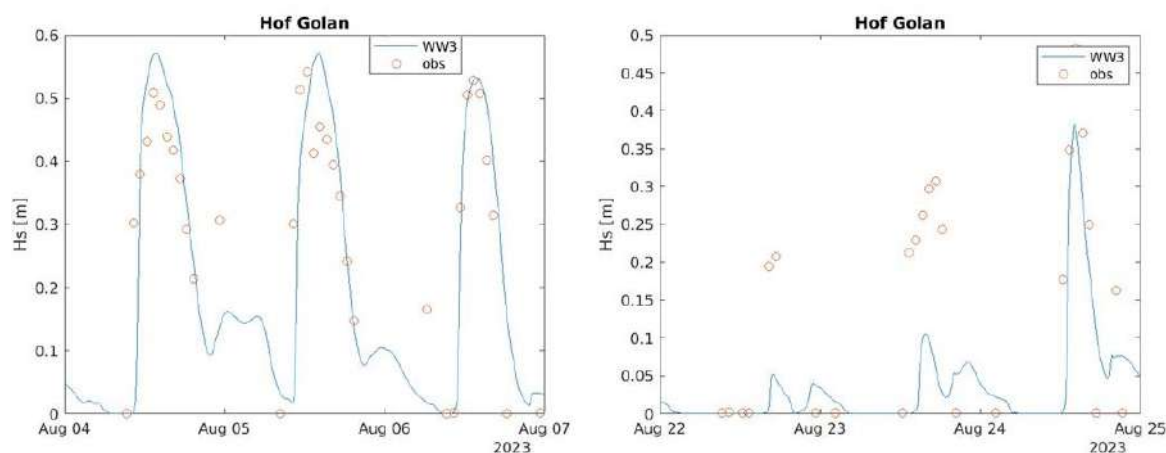


איור 85: משמאל, מפת רוחות ממוצעת בשעות אחה"צ בחודשי הקיץ עם מיקומי התחנות המטאורולוגיות (כיתוב ירוק) והתחנות בהם מוקמו מדי הגלים (כיתוב ירוק). מימין, תמונות מדי הזרם בעלי רכיב מדידת לחץ למדידת גלים אשר ירדו למים ב- 2.8.2023 והוצאו ב- 11.9.2023.

המדד אליו מתייחסים גם בעבודת המידול וגם בתצפיות נקרא גובה גל משמעותי (significant wave height). ערך זה מייצג את הגובה הממוצע של השליש העליון (הגבוה ביותר) של הגלים במשך זמן נתון. גובה הגל המשמעותי הוא גם הערך ש"צופה מנוסה" (למשל איש צוות של ספינה) יאמוד מתצפית ויזואלית של מצב הים.

תוצאות

השוואה של גובה הגל המשמעותי מתצפיות ממד הגלים שמול חוף גולן ומתוצאות המודל שמופעל במעבדה מראה ימים בתחילת אוגוסט 2023 בהם ההתאמה היא טובה וימים בסוף אוגוסט בהם ההתאמה אינה טובה (איור 86).

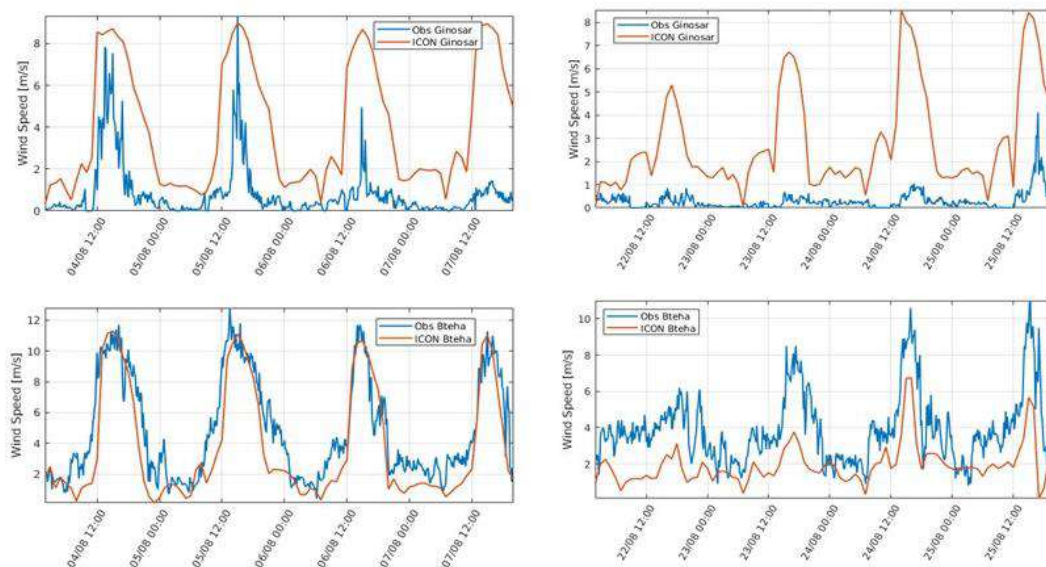


איור 86: השוואת מדידות גובה גל משמעותי הנצפה על ידי מד הגלים שאל מול חוף גולן (מיקום נראה באיור 85) עם תוצאות המודל עבור אותו מיקום באותם זמנים.

הסיבה להבדל בין התצפיות לתוצאות המודל נעוצה באילוף הרוחות אותן המודל מקבל כקלט שעתי. אילוף הרוחות מגיע ממודל אייקון, שהוא מודל התחזית הארצית שהשירות המטאורולוגי מפעיל, אשר מספק תחזית של 90 שעות כל יום. ניתן לראות באיור 87 שבתחילת אוגוסט תצפיות הרוח בבטחה תאמו היטב את תחזית הרוח של המודל ועל כן הייתה ההתאמה טובה בין מדידת הגלים לתוצאות מודל הגלים. באותם ימים המודל העריך את הרוח בגינזור בעודף מהתצפית בשטח. לעומת זאת, בסוף אוגוסט לא הייתה ההתאמה בין המודל לתצפיות באף אחת מהתחנות המטאורולוגיות. אייקון חזה בגינזור רוחות חזקות שלא נצפו על ידי התחנה המטאורולוגית הנמצאת שם, כאשר בבטחה ההתאמה הייתה יותר טובה אך המודל חזה רוחות פחות חזקות מאלו שנצפו. כלומר, אם אילוף הרוח למודל הגלים היה על סמך מדידת הרוח החזקה אז מודל הגלים היה "מייצר" גלים בעלי גובה גל משמעותי בערכים הקרובים יותר לאלו שנמדדו.

דיון

המסקנה העולה מן התוצאות היא שהרוח הנצפית בתחנה המטאורולוגית בבטחה בסוף אוגוסט יכולה להסביר את ערכי גובה הגל המשמעותי שנצפים מול חוף גולן. הפער הנובע בתקופה הזו בין המודל לתצפיות נובע מהפער בין תחזית הרוחות לרוחות המדודות בבטחה. על מנת להמשיך ולכיל את מודל הגלים יש לבחון תצפיות גלים חופיות שיתקבלו מהתחנות העתידות לקום בעין גב, טבריה, כפר נחום ובדרום הכנרת. בנוסף, כדי לספק תחזית גלים המסתמכת על יותר ממודל אטמוספרי אחד יש להסדיר נוהל הורדת נתוני תחזית ממספר מודלים ולבסס סטטיסטיקת התרעות לחופי הכנרת.



איור 87: השוואת רוחות מדדות מהתחנה המטאורולוגית בגינוסר (פאנלים עליונים) והתחנה המטאורולוגית בבטחה (פאנלים תחתונים) עם תוצאות רוח ממודל התחזית של השירות המטאורולוגי עבור שתי התקופות באיור 86.

3.5 ניטור זרמים בכנרת

במימון חיא"ל

יעל אמיתי

- בקיץ הזרמים המזרחיים בפני השטח הם הזרמים הכי חזקים בכנרת.
- בשכבת האפילמניון, שדה הזרמים משנה כיוון בתדירות המעידה על פעילות גלים פנימיים.
- בשכבת ההיפולמניון הזרמים חלשים.



מד זרם השייך למעבדה של פרופ' ירון טולדו מאוניברסיטת תל אביב מורד לעומק הכנרת. אוגוסט 2023

מטרות

1. לכייל את מודל הזרמים התלת מיימדי הפועל בכנרת באופן רציף משנת 2019.
2. לזהות אירועי זרמים חריגים ואת השפעתם על רכיבי המערכת האקולוגית (עירבוב מוגבר וכדומה)
3. לייצר מסד נתונים ארוך טווח של זרמי הכנרת על מנת לזהות הקשרים עם פיזור אצות, אירועי הרחפת סדימנט ועוד.

רקע

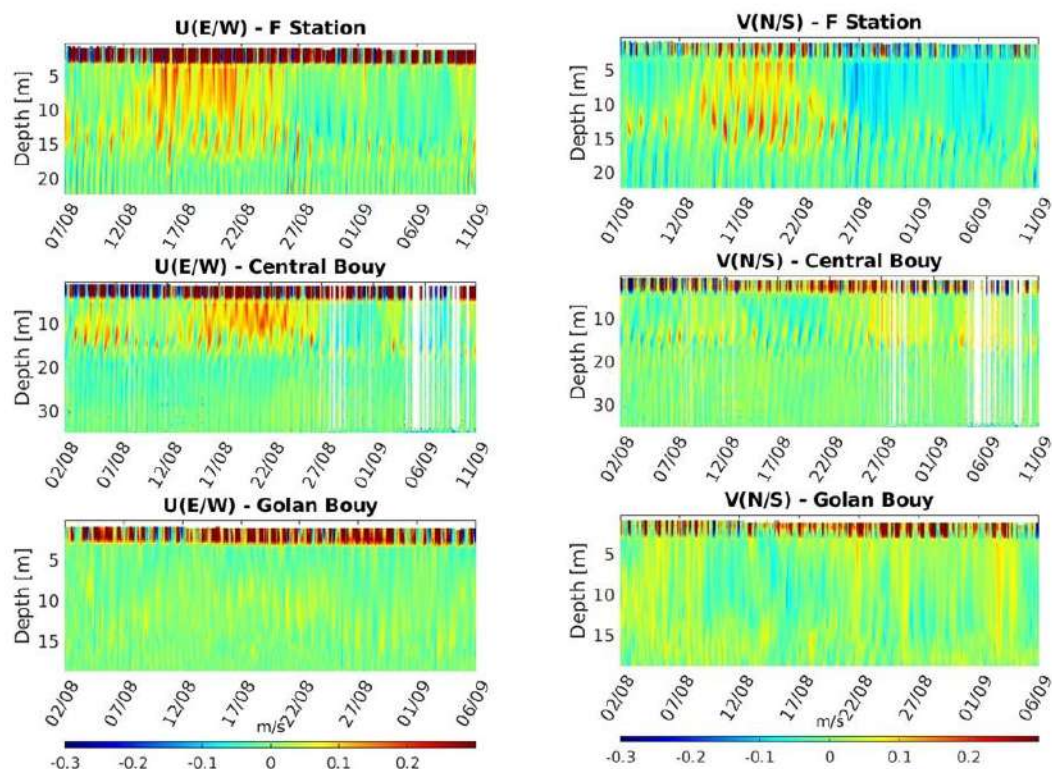
ישנן מדידות ספורדיות בזמן ובמרחב של זרמים באגם הכנרת. מאז 2020 קיים מד זרם נקודתי אשר מועבר בין מיקומים שונים ברחבי הכנרת על מנת לאפיין את הזרם בתוך הכנרת אשר נוצר מהזרימה השטפונית בצלמון או בירדן. ניטור ארוך טווח של הזרמים בכנרת לא בוצע מאז סוף שנות ה-90, למרות הקשר המשמעותי לפיזור חומרים ולשדה הזרימה. ולכן, במהלך 2023 הוצבו שלושה מדי זרם באדיבות מעבדת פרופ' ירון טולדו מאוניברסיטת תל אביב בצפון הכנרת במיקומים המתוארים באיור 85 בפרק הקודם "גלי פני השטח: מודל ותצפיות" ובדצמבר 2023 הוצבו שני מדי זרם במזרח ובמערב האגם על מנת לספק כיסוי מרחבי ועיתי ארוך טווח של הזרמים בכנרת עבור המטרות המוגדרות מעלה. זוהי סקירה ראשונית של המדידות שנעשו באוגוסט 2023.

שיטות

מד זרם דופלר אקוסטי (ADCP) הוא מד זרם הידראוקוסטי הדומה לסונאר, המשמש למדידת מהירויות זרם מים בטווח עומק באמצעות אפקט דופלר של גלי קול המפזרים בחזרה מחלקיקים בתוך עמודת המים. טווח תדרי העבודה של ADCPs נע בין 38 קילו-הרץ למספר מגה-הרץ. שלושה מכשירי ADCP מחברת RD Instruments הוצבו במהלך אוגוסט 2023 בצפון הכנרת כאשר הם מוקמו בכיוון הרוח העיקרי, ממערב למזרח. התחנה הכי מערבית הוצבה במצוף F, התחנה הכי מזרחית הוצבה כ-600 מטר מחוף גולן, באותו איזובט של תחנה F וביניהם הוקם מצוף חדש אשר נקרא Central Bouy (איור 85 בפרק הקודם) והעומק שלו הוא כ-35 מטר, תלוי במפלס הכנרת. מדי הזרם הוצבו על הקרקעית ומדדו ברזולוציה אנכית של רבע מטר לאורך כל עמודת המים את רכיבי המהירות בכיוון צפון-דרום (V) ומזרח-מערב (U) בין ה-2.8.2023 ל-11.9.2023.

תוצאות

בבחינת תוצאות המדידה בקיץ 2023 ניתן להבחין בבירור בזרמים חזקים מאוד בפני השטח בשלושת המיקומים (איור 88). הזרם בכיוון מזרח\מערב מראה ערכים גבוהים יותר מאשר הזרם בכיוון צפון\דרום עם ערכים חיוביים (זרם לכיוון מזרח). תוצאה זו מתכתבת עם העובדה שבימי הקיץ הבריזה הים תיכונית המגיעה ממערב שולטת במשטר הזרמים הקרובים לפני המים. מעל התרמוקלינה (המצויה באופן אופייני ב-15 מטר באוגוסט) מצוי סיגנל מהירות גבוה נוסף בעל תדירות עיתית של כ-12 ו-24 השעות. תדירות זו מזוהה עם הגלים הפנימיים המדווחים בכנרת בתקופת הקיץ בה הבריזה הים תיכונית היומית נושבת כל אחת"צ ומניעה את שכבת האפילמניון, ולאחר מכן מתחיל שדה גלים פנימיים (הגל שנוצר מהפרשי צפיפות בין האפילמניון להיפולמניון) המקיף את האגם בתדירות סיבוב כדור הארץ – גלי קלווין. עם העמקה לקרקעית, בשכבת ההיפולמניון, ישנם זרמים הרבה יותר חלשים.

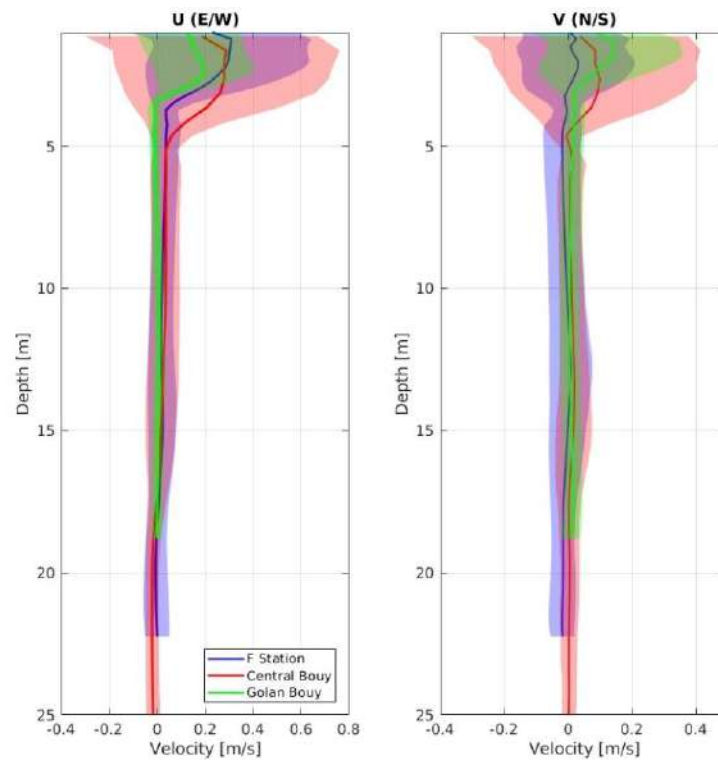


איור 88: מהירויות אופקיות בכיוון צפון\דרום (מימין) ומזרח\מערב (משמאל) של כל תקופת המדידה בשלושת המיקומים אשר באיור 85 בפרק הקודם. ערכים שליליים מציינים זרימה דרומה ומערבה, הערכים החיוביים מציינים זרימה צפונה ומזרחה, בהתאמה.

כאשר מחשבים ממוצע וסטיית תקן על פני כל התקופה לאורך עמודת המים (איור 89), ניתן להבחין בכך שבחוף גולן הזרם צפונה בפני השטח הוא דומיננטי ובממוצע יותר חזק מהזרם צפונה בתחנה F המערבית ובמצוף המרכזי. לעומת זאת, הזרם הממוצע מזרחה בחוף גולן הוא קטן מהזרם הממוצע מזרחה במערב ובמרכז הכנרת. בנוסף, ערכי המדידה של הזרם מזרחה גבוהים כמעט פי 2 מערכי הזרם צפונה. בעומקים רדודים 5 מטרים יש שונות גדולה כפי שנראה מסטיית התקן שסביב הממוצע וקיימים זרמים גם דרומה ומערבה שאינם באים לידי ביטוי בערך הממוצע. מתחת לעומק של 5 מטרים הזרמים יותר חלשים וניתן לראות שהממוצע הוא סביב ה-0. כלומר, יש זרמים בכל הכיוונים שבממוצע מבטלים זה את זה (ערכים חיוביים ושליליים באותה כמות), עוד נתון המעיד על מעבר גלים פנימיים בשכבה העמוקה.

דיון

על מנת לספק תמונת זרמים מרחבית ומלאה של הכנרת יש להמשיך ולתחזק את מדי הזרם בכנרת במהלך כל השנה. בהמשך תידרש הצבת מדי זרם בדרום הכנרת, שם קיים ידע מועט על משטר הזרמים באזור.



איור 89: פרופיל ממוצע וסטיית התקן של הזרמים בכיוון צפון/דרום (מימין) ומזרח/מערב (משמאל) בשלושת המיקומים אשר באיור 85 בפרק הקודם על פני כל התקופה. ערכים שלילים מציינים זרימה דרומה ומערבה, הערכים החיוביים מציינים זרימה צפונה ומזרחה, בהתאמה. יש לשים לב להבדל בערכי ציר ה-X.

3.6 מערכת ICT לזיהוי תגובת עמידות אקולוגית במערכות מים מתוקים

במימון משרד המדע

איליה אוסטרובסקי, אסף סוקניק,

בשיתוף עם פרופ' קומאגי מ'

(University Ritsumeikan, Japan)

- נבנתה ונבחנה בכנרת סירה אוטונומית זעירה המופעלת בעזרת אנרגיה סולרית (SASV) ונושאת חיישנים להערכת הריכוז של כלורופיל a ופיקואריתרין.
- המערכת מאפשרת זיהוי הפריסה המרחבית של אוכלוסיות הפיטופלנקטון בכנרת על פי הערכת ריכוז הפיגמנטים.
- התפתחות פריחה של ציאנובקטריה והתפשטותה באגם נבחנה באמצעות מערכת חיזוי קצרת טווח מותאמת למערכות אקולוגיות.



מטרת המחקר

מטרת הפרויקט הינה פיתוח טכנולוגיה לאיסוף מידע סביבתי, ניתוחו בשיטות של תקשורת מידע Information Communication Technology (ICT) ויישומו בניטור מערכות אקוויטיות. יעד מרכזי הוא הדגמת הטכנולוגיה באגם BIWA ביפן ובכנרת בישראל תוך שילוב מידע הנאסף בזמן אמת מהמערכות האקולוגית והטמעתו בגופי מידע ציבוריים לשיפור דרכי קבלת החלטות תפעוליות. היעדים המחקריים הם לזהות במקום ובזמן התפתחות אוכלוסיות רעילות של ציאנובקטריה ולחזות את פוטנציאל ההתפתחות של פריחות אלו בטווח זמן קצר nowcasting בגוף המים.

רקע

ניטור אוכלוסיות פיטופלנקטון בגופי מים מתוקים באמצעות הטמעת נתונים הנאספים בגישות שונות מאפשר לכמת אירועים חריגים של פריחת אצות וציאנובקטריה (CyanoHAB) וחשוב להקמת מערכת חיזוי לקבלת החלטות ליישום אמצעי מניעה ובקרת הפריחה. כדי לעקוב אחר הדינמיקה והפיזור המרחבי של אוכלוסיות הפיטופלנקטון בכנרת, הוצע להשתמש בסירה זעירה הנשלטת מרחוק על ידי מחשב ויכולה להפליג באופן אוטונומי. בשנת 2022 נבנתה סירת ניטור אוטונומית (SASV) על ידי צוותו של פרופ' קומאגי ביפן, לניטור נוכחות אצות וציאנובקטריה בכנרת, באמצעות חיישנים אופטיים המודדים כלורופיל, פיקוציאנין ופיקואריתרין. ה-SASV נבדק באגם; עם זאת, הניסויים הראו כי מודל זה לא יכול להיות מופעל בשל בעיות תקשורת Wi-Fi במרחב האגם. על כן, נבנה מודל מתקדם המבוסס על תכנון מראש של מסלול השיט ואיסוף נתונים בעזרת חיישנים אופטיים.

חיזוי הפיזור של פריחת ציאנובקטריה דורש מידע פיסיקלי כמו רוחות גלים והמבנה החומני של עמודת המים. על בסיס מידע זה והתכונות הביופיסיקליות של אוכלוסיות הפיטופלנקטון ניתן לכייל ולהתאים מודלים סביבתיים שיתבססו על מצב נתון ויחזו שינויים בתפוצת הפיטופלנקטון בלוחות זמנים קצרים (מספר ימים).

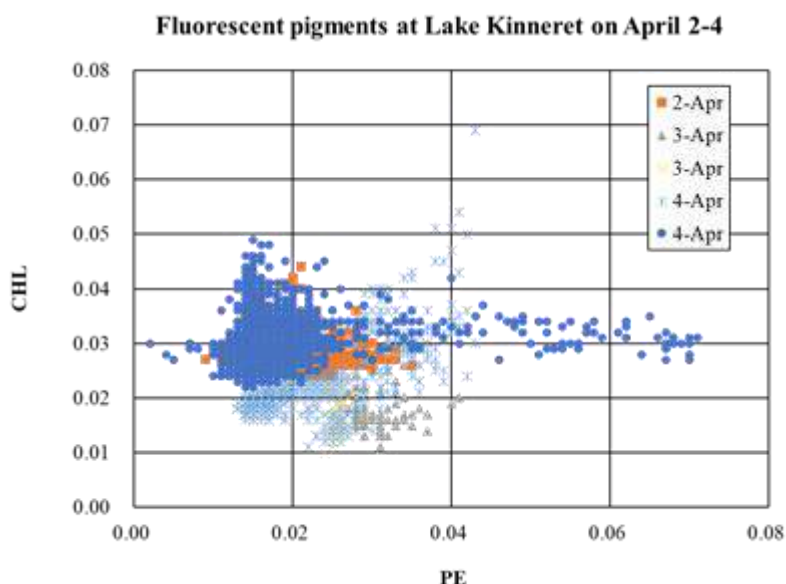
תוצאות ודין

בנייה ותפעול של סירת ניטור זעירה אוטונומית המופעלת על אנרגיה סולרית (SASV) הייתה משימה חשובה של הפרויקט. לאחר הארכת הפרויקט בשנתיים, עקב מגפת COVID-19, ערכנו בדיקות SASV באגם הכנרת באוגוסט 2022 ובאפריל 2023. כפי שניתן לראות באיור 90 (פאנל שמאלי), אורכו של ה-SASV מודל 2 הוא 160 ס"מ, רוחבו 55 ס"מ וגובהו 45 ס"מ. הסירה מצוידת בפאנל סולארי עם ESR של 100 ואט (10A). המודל הנוכחי של ה-SASV יכול להפעיל שלושה ערוצי מדידה בזמנית, הוא מצויד בחיישן לטמפרטורת המים, ובחיישן אופטי למדידת כלורופיל *a* ופיקואריתרין PE- (איור 90, פאנל ימני). מאחר שפיקואריתרין (PE) הוא פיגמנט הקשור לציאנובקטריה וכלורופיל-*a* (CHL) אופייני לכל הפיטופלנקטון (ציאנובקטריה ואצות), היישום של שני חיישנים אלה מאפשר להבחין בין קבוצות פיטופלנקטון אלה בזמנית ולהשתמש במדידות אלה כמידע מאמת לכיול נתונים ספקטרליים הנאספים בחישה מרחוק באמצעות לוויינים.

במהלך הפעלת מערכת ה-SASV בכנרת בתאריכים 2-4 לאפריל 2023, הצלחנו לראשונה לבצע תצפיות רציפות לאורך טרנסקט ולקבל תוצאות מבטיחות. מדידות של CHL ו-PE לאורך טרנסקט ימי ב-2 באפריל 2023 הראו תנודות מחזוריות מובהקות של PE שיש להן פרק זמן של כ-2 דקות, המתאים להתקדמות הסירה למרחק של 120 מטר. שינויים דומים זוהו גם עבור ריכוז CHL. תופעה כזו ניתן לייחס לפיזור מרחבי של ציאנובקטריה. ציאנובקטריה נוטה לצוף ויכולה להיות מרוכזת עקב תנועות מים. סביר להניח שמצב התכנסות/התפצלות (convergent/divergence) בתדר (אורך גל) של כ-120 מ' נוצר בחלק העליון של הכנרת המרוכזת תרמית על ידי סירקולציה אנכית (Langmuir circulation). נצפה קשר מעניין בין השונות של CHL ו-PE (איור 91). הנתונים מראים כי ב-4 באפריל, כאשר תנאי מזג האוויר היו רגועים למדי, ריכוזי CHL השתנו מעט, בעוד השונות של PE הייתה גבוהה. המדד האחרון מצביע על הצטברות של ציאנובקטריה באזורים ספציפיים והיווצרות של כתמי שטח, האופייניים לאוכלוסייה צפה של ציאנובקטריה.

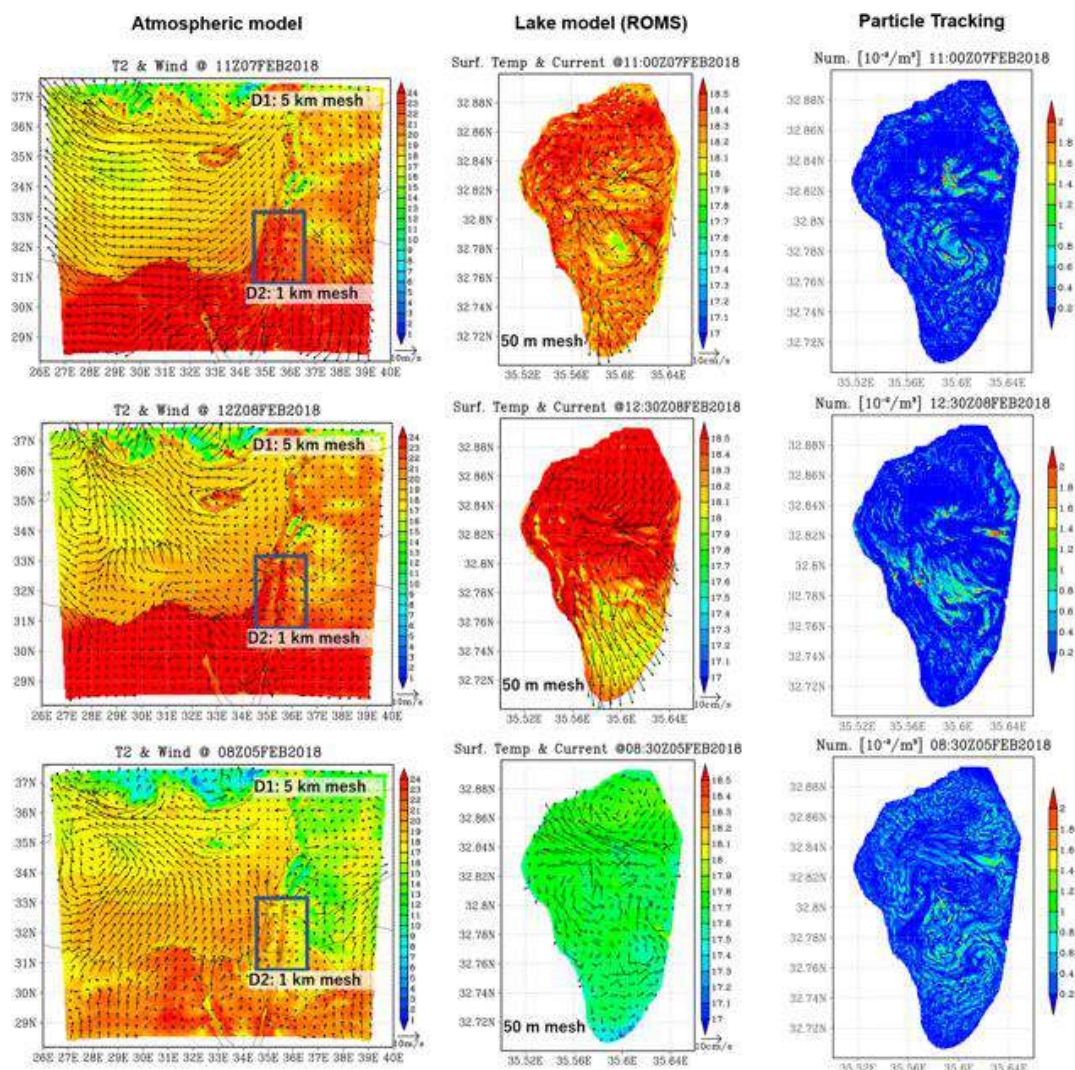


איור 90: סירה אוטונומית זעירה (Solar powered Autonomous Vehicle) SASV מודל 2 שנבנתה ביפן והועברה לכנרת בסוף שנת 2023 לבדיקה והפעלה באגם.



איור 91: הקשר בין ריכוזי כלורופיל *a* (CHL) ופיקואריתרין (PE) (לא מכויל) שנמדדו לאורך טרנסקט ימי באגם הכנרת ב-2 באפריל 2023. הנתונים מראים שונות גדולה של ריכוזי פיקואריתרין בהשוואה לאלה של כלורופיל *a*.

הפיזור המרחבי של אוכלוסיית הציאנובקטריה בשכבת המים העליונה של אגמים תלויה בשדה הזרימה, בריבוד הטמפרטורה ובמערבולות, ולכן דורשת מידול מדויק של השפעת גורמים סביבתיים וביולוגיים על היווצרות כתמים של ציאנובקטריה. מאמצים מיוחדים הוקדשו ליישום תוצאות ניטור דינמיקת פריחות של מיקרוציסטיס והטמעת נתונים מטאורולוגיים במודל סימולציה נומרית. בהמשך לדיונים בין שני צוותי המחקר, הקבוצה היפנית הצליחה לשחזר את זרמי אנרגיית הרוח והשמש בכנרת בהתבסס על נתונים מטאורולוגיים (Takatama et al. 2020; Wells et al 2022). יישום זה מאפשר פיתוח של תוכנית למעקב אחר מושבות ציאנובקטריה מרחפות בכנרת ובחינת ההשפעה של זרמים ומערבולות. התוצאות מודגמות באיור 92 המציג שדות רוח וטמפרטורה (איורים שמאליים ואמצעיים) בזמנים שונים (איור עליון, אמצעי ותחתון). האיורים הימניים מציגים את השינויים בהתאמה בריכוזי החלקיקים בשכבה העליונה של הכנרת. הנתונים מתארים את היווצרות צבירת מושבות מיקרוציסטיס ביחס לתנאים המטאורולוגיים המשתנים.



איור 92: תוצאות מודל סימולציה נומרית לאגם הכנרת (Takatama et al). משמאל – מודל אטמוספרי אזורי (SCALE); אמצע – מודל אגם הכנרת (ROMS) לתנועות מים וטמפרטורה; מימין – מודל מעקב אחר חלקיקים באגם הכנרת. כל אחת משורות האיורים מיצגת תאריך שונה במהלך חודש פברואר 2018 (7, 8 ו 5 בפברואר, בהתאמה).

מאגרים של מידע ארוך טווח, הקיימים עבור אגם ביווה ביפן ועבור הכנרת, יכולים לשמש להדגמת שינויים מבניים באוכלוסיות הפיטופלנקטון בשני האגמים בעשורים האחרונים. נתונים אלה מתוכננים להיות מושווים וישמשו להגברת המעורבות של מקבלי החלטות והציבור באזורים האגמיים בשתי המדינות. המחקר שלנו הראה את החשיבות של גורמי סביבה להתפתחות פריחת של מיקרוציסטיס. הדגשנו את התפקיד הספציפי של תנאי מזג האוויר, זרמים מונעי רוח ורמת מערבולות בהתפשטות פריחת כחוליות, תפוצתם האנכית והיווצרות הכתמים במרחב האגם. חשוב להעריך את יציבותן של מיקרו-מערכות אקולוגיות המתערערות עקב התפתחות ציאנובקטריה, להעריך את הסיכונים המובילים לשינויים אלו, ולפתח מערכת המשתמשת ב-שיתוף הציבור כדי לאתר במהירות שינויים סביבתיים. תוצאות מחקר זה מדגישות את חשיבות המידע המרחבי על פריחת ציאנובקטריה בכנרת ועל פיזור אוכלוסיות החיידקים המלוות את הפריחה בשלביה השונים.



ספרות

- Takatama K., Uchiyama Y., Miyoshi T. 2020. Simulations of lake currents toward the prediction of blue-green algae cases of Lake Biwa and Lake Kinneret- The 2nd R-CCS International Symposium, Kobe, Japan, 17 February 2020.
- Wells J., Liu X., Goto N., Nagano T., Ostrovsky I., Zhang Z., Irie M., Ban S., Rempfer D. 2022. Evaluating the skill of hydrodynamic simulations in two stratified lakes by Principal Component Analysis. 36th Congress of the International Society of Limnology, 7 – 10 August 2022, ON040.

3.7 גיבוש מערך ניטור ויכולות תפעול להתמודדות עם מצב משברי של פריחה חריגה של ציאנובקטריה בכנרת

במימון רשות המים

אסף סוקניק, גדעון טיבור, תמר זהרי,

ורנר אקרט, אהוד רם, יעל אמיתי, דיתי

ויינר - מוציני, אלה אלסטר

- גובשה שיטה אנליטית לכימות הפיגמנטים העיקריים של ציאנובקטריה (פיקוציאנין PE ופיקואריטרין PE).
- השיטה שגובשה יושמה למדידת ריכוז הפיגמנטים בכנרת ובמערכי ניסוי במעבדה ובמזוקוסם.
- בוצע סקר שבועי של ריכוז פיגמנטים פוטוסינתטיים (Chl, PC, PE) ב 4-6 תחנות דיגום במרחב הכנרת. המידע שנאסף נבחן מול הרכב אוכלוסיות הציאנובקטריה ומידע ספקטראלי שנאסף מלווינים.
- בוצעו מספר סקרים בכנרת ששילבו אמצעי חישה מרחוק עם מדידות ישירות של פיגמנטים.
- בוצעו ניסוי כיוול של מערכות חישה מרחוק נישאת על רחפן אל מול תרביות של ציאנובקטריה שאוכלסו במערכת מזוקוסם המחקר את תנאי הכנרת.
- נבחנו השפעה של מי חמצן על אוכלוסיות ציאנובקטריה במערכת המזוקוסם ובניסוי מעבדה.



הצגה סכמתית של המתודולוגיות ועיקרי הפעילות המחקרית במטרה הכוללת של שכלול מערך הניטור וגיבוש טכנולוגיות להתמודדות עם מצב משברי של פריחה חריגה של ציאנובקטריה בכנרת.

רקע

בכנרת כמו במערכות מים מתוקים (אגמים, מאגרים, בריכות ונחלים) ובאוקיאנוסים, אוכלוסיות הפיטופלנקטון הן הבסיס למארג המזון. גודל אוכלוסיית הפיטופלנקטון, הרכב המינים ופעילותם הפוטוסינתטית (יצרנות ראשונית) מהווים מדד לאיכות המים, ושינויים עונתיים ורב שנתיים באוכלוסיות הפיטופלנקטון משקפים מגמות ותהליכים של שינויים באיכות המים. לנוכחות אוכלוסיות של כחוליות (ציאנובקטריה) בגופי מים השפעה שלילית על איכות המים, בגלל יכולתם ליצר אוכלוסיות צפופות (פריחה) שלעיתים מתרכזות בפני המים ויוצרות משטחים צפים (צופת) באזורים נרחבים של גוף המים. צופת זו מוסעת ומתרכזת בחופים או מתפזרת בעמדות המים כתלות בתנאי מזג האוויר (רוחות, גלי שטח, זרמים וטמפרטורת המים) [1]. מינים שונים של ציאנובקטריה מייצרים מגוון רעלנים העלולים לפגוע בצרכני המים, בני אדם כמו גם בעלי חיים [2], ולכן ראוי לבחון בהקפדה את המשמעות של פריחות של ציאנובקטריה רעילות (cyanoHAB) בכנרת, והשפעתן על האגם וסביבתו ועל מערכת אספקת המים בישראל ולשכנותיה. עליית הטמפרטורה מגבירה את קצבי הגידול והפוטוסינתזה בציאנובקטריה [3, 4] וההתחממות הגלובלית מעודדת התפתחות כחוליות על חשבון פיטופלנקטון מקבוצות אחרות [5]. לאור זאת קיים צפי להתגברות אירועי פריחה של ציאנובקטריה בכנרת, בדומה לתהליכים שהתקיימו באגמים אחרים ברחבי העולם [6]. לפיכך נשאלות השאלות: **האם ישראל ערוכה למצבי קיצון בהם מתפתחות בכנרת פריחות חריגות של ציאנובקטריה רעילות? כיצד ניתן לזהות ולכמת את התופעה? מה ניתן לעשות לצמצום ולשליטה בעוצמת הפריחה? כיצד לטפל במים ולהביא לסילוק המטרד מהאגם?**

מטרות

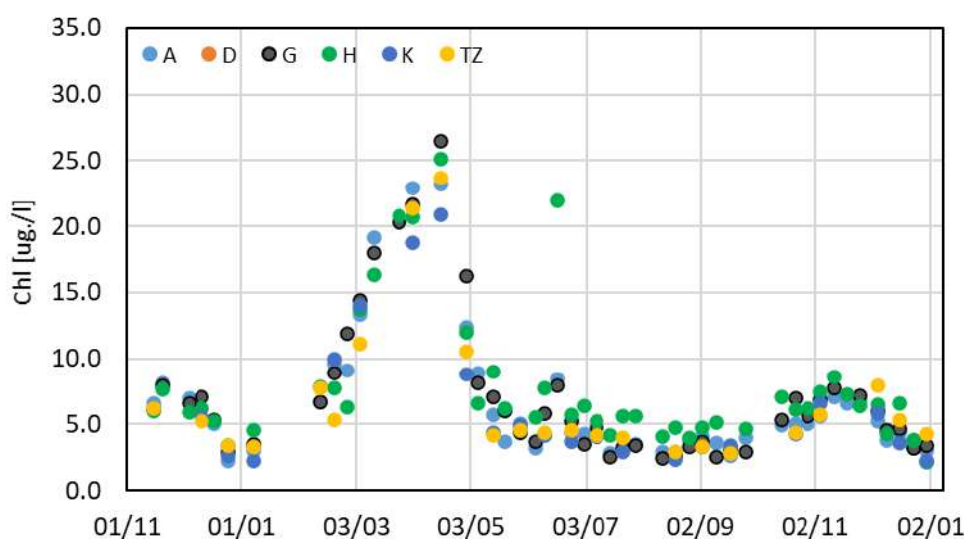
שכלול מערך הניטור וגיבוש טכנולוגיות להתמודדות עם מצב משברי של פריחה חריגה של ציאנובקטריה רעילות, העלול לסכן את היכולת להשתמש במי הכנרת כמקור למי שתייה, ובאגם כאתר נופש וקייט. להשגת המטרות הוגדרו יעדי המשנה הבאים:

- 1) איסוף מידע לימנולוגי ממערכות ניטור קיימות והשלמת פערים על ידי איסוף מידע ספקטרלי מהכנרת ואנליזה של תפוצת פיגמנטים (כלורופיל ופיקוציאנין) והרכב אוכלוסיות הפיטופלנקטון באתרים נוספים במרחב האגם.
- 2) שילוב מצלמות רבות-ערוצים נייחות או נישאות על פלטפורמות מוטסות, במטרה לאסוף מידע ספקטרלי לאיתור זיהוי וכימות התפתחות של פיטופלנקטון בדגש על ציאנובקטריה במרחב הכנרת.
- 3) בחינה ובדיקה של גישות שונות לטיפול, שליטה ובקרה בפריחה של ציאנובקטריה בכנרת.
- 4) עדכון פרוטוקול תגובה לפריחת ציאנובקטריה בכנרת - הכללת ערכי סף להפעלה של כלים לטיפול בפריחה, בהתאם לצרכי משק המים ומשתמשים אחרים בשרותי המערכת.

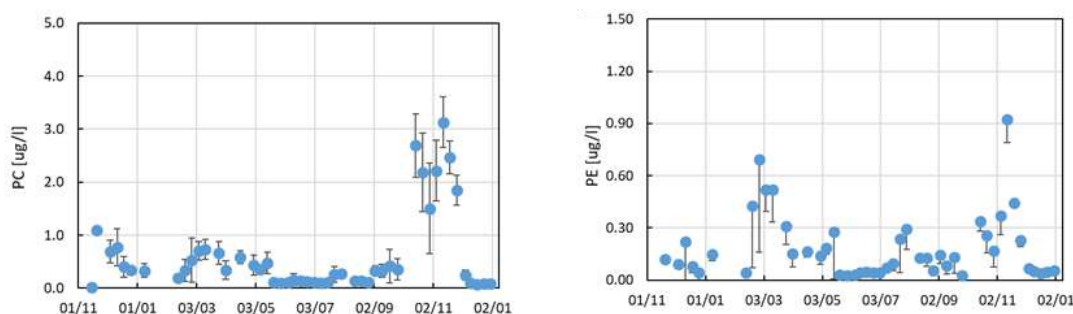
תוצאות

בשנת הפעילות הראשונה המחקר התרכז ביעדים 1-3. גובשה שיטה אנליטית למדידה של ריכוז פיגמנטים פוטוסינתטיים של ציאנובקטריה, פיקוציאנין-PC ופיקואריתרין-PE. השיטה יושמה למדידת ריכוז הפיגמנטים בכנרת ובמערכי ניסוי במעבדה ובמזקוסם. בוצע סקר שבועי של ריכוז פיגמנטים פוטוסינתטיים (Chlorophyll-a Chl, Phycocyanin-PC, Phycoerythrin-PE) ב 4-6 תחנות דיגום

במרחב הכנרת. המידע שנאסף נבחן מול הרכב אוכלוסיות הציאנובקטריה ומידע ספקטרלי שנאסף מלווינים.



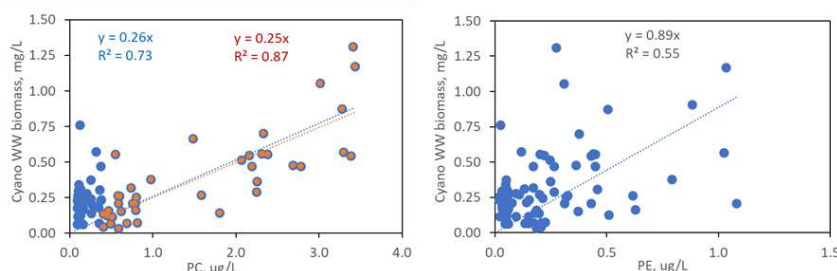
איור 93: ריכוז כלורופיל שנמדד ב 6 תחנות ניטור בכנרת מנובמבר 2022 ועד סוף דצמבר 2023. במרבית מועדי הדיגום נמדדה שונות קטנה יחסית בין התחנות.



איור 94: משמאל - ריכוז PC שנמדד ב- 6 תחנות ניטור בכנרת מנובמבר 2022 ועד סוף דצמבר 2023. מימין - ריכוז PE באותן תחנות. ערכי ה- PC הם בסקלה של עד 5 מיקרוגרם לליטר וערכי ה- PE הינם בסקלה של עד 1.5 מיקרוגרם לליטר. התוצאות מוצגות כממוצע לכלל תחנות הניטור באגם וסטית התקן (קיום אנכיים לממוצע). במרבית מועדי הדיגום נמדדה שונות קטנה יחסית בין התחנות. שונות גבוהה בין התחנות נמצאה עבור PC באוקטובר-דצמבר 2023 ועבור PE במרץ אפריל ושוב בנובמבר-דצמבר 2023.

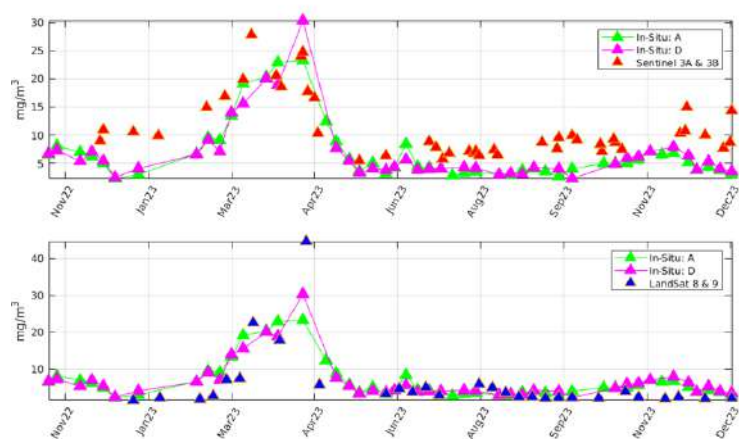
נאסף מידע משלים על הרכב אוכלוסיות הפיטופלנקטון בכנרת מתחנות ניטור נוספות (G ו H בנוסף לתחנה A). בדגימות שנאספו במהלך שנת 2023 זוהו ונספרו 22 מיני ציאנובקטריה, בהם 4 מינים של הסוג מיקרוציסטיס (מסדרת ה-Chroococales) ו-3 מינים של ציאנובקטריה מקבצי חנקן מקבוצת ה-Nostocales (*Anabaena boergei*, *Aphanizomenon ovalisporum*, *Cylindrospermopsis raciborskii*). מינים נוספים שהיו נפוצים מאד חלק מהזמן היו *Cyanodictyon imperfectum* (קוטר: 0.5 מיקרון), ו-*Romeria* sp. המהלך העונתי של ביומסת הציאנובקטריה ב-2023 היה דומה למהלך העונתי של הפיגמנטים PC ו PE (איור 94). בהשוואת ערכי הביומסה של ציאנובקטריה בשלושת התחנות לערכי ריכוזי הפיקוציאנין והפיקואריתרין שנמדדו באותן דוגמאות נמצא קשר ליניארי בין הפרמטרים, כשהקשר החזק יותר ($R^2=0.73$) הוא עבור פיקוציאנין (איור 95). המובהקות הסטטיסטית של הקשר בין PC לריכוז הביומסה של ציאנובקטריה גדלה כאשר מבצעים את הרגרסיה רק עם דגימות בהן ריכוז ה- PC הוא מעל

0.4 מיקרוגרם לליטר ($R^2=0.87$), ערך שהתקפות האנליטית שלו גבוהה. המתאם הלינארי הגבוה בין ריכוז PC והביומסה של ציאנובקטריה מעלה את האפשרות שמדידה ישירה של PC או חישוב ריכוז PC על בסיס מדידה פלאורומטרית (פלאורופורב לדוגמה) או על פי החזר ספקטרלי (מצלמה רב ערוצית) יכול לשמש להערכה ראשונית של ריכוז הביומסה של ציאנובקטריה בגוף המים, ובמידה רבה לצמצם את הצורך באנליזה מיקרוסקופית של דגימות מים לזיהוי וכימות אוכלוסיית הציאנובקטריה. בנוסף חשוב לציין שבמהלך כל 2023 ריכוזי הציאנובקטריה בכנרת היו נמוכים יחסית לשנים אחרות. סביר שבזמני פריחות מאסיביות יותר של ציאנובקטריה מדידות של ריכוזי ה-PC וה-PE יתנו אומדנים טובים לביומסה.



איור 95: רגרסיה ליניארית של ריכוז הפיקוציאנין (משמאל) או פיקואריתרין (מימין) מול כלל ביומסת הציאנובקטריה, בדוגמאות מים שנאספו בכנרת מתחנות A, G, H מעומק 2 מ' במהלך 2023. המתאם של הרגרסיה הלינארית בין ריכוז PC לביומסה של ציאנובקטריה גבוה יותר כאשר המבחן מבוצע רק עם דגימות בהן ריכוז ה-PC הוא מעל 0.4 מיקרוגרם לליטר ($R^2=0.87$), שהוא מעל סף הכימות (נקודות אדומות בגרף משמאל).

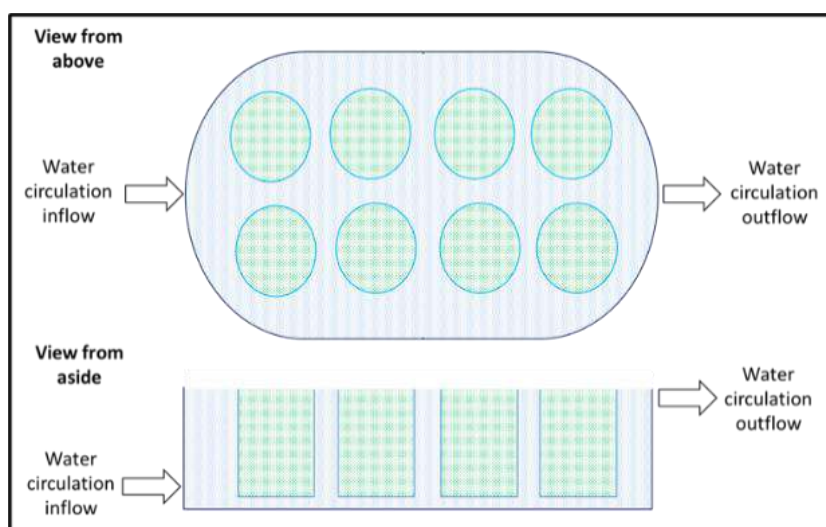
בתקופה שבין ינואר לדצמבר 2023, עובדו 278 צילומי לוויין מסוג Sentinel-3 ו-18 צילומי לוויין מסוג Landsat 8 ו-16 צילומי לוויין מסוג Landsat 9. הלוויינים חלפו מעל הכנרת בסביבות השעה 8 GMT בתדירות יומית (Sentinel-3) ובתדירות של 16 יום (לווייני ה-8 & 9 Landsat). האלגוריתם למיפוי ריכוזי כלורופיל (NN algorithm for turbid water) הקיים כמוצר מעובד (OLCI level 2) עבור צילומי הלוויין Sentinel-3, כויל והותאם מול תוצאות מדידת ריכוז כלורופיל בדגימות שנאספו פעם בשבוע בתחנות של הניטור השגרתי (A, D, G, H, K, Tz). עבור ריכוזי כלורופיל של עד כ-6 $\mu\text{g/L}$, ההתאמה הייתה טובה אולם עבור ריכוזים גבוהים יותר (לתקופה פברואר – אפריל) ההתאמה הייתה חלשה. במטרה לגשר על הפער בין הערכת ריכוזי הכלורופיל המחושבים מול המדדים מנתוני לנדסט לחודשים פברואר ואפריל, נתוני הלוויינים הורדו בצורתם הגולמית ממאגרי המידע הרשמיים של כל לוויין. נעשה להם תיקון אטמוספרי ריכוז הכלורופיל במי הכנרת חושב בעזרת אלגוריתם Normalised Difference Chlorophyll Index, או על פי היחס של החזר אורך הגל הכחול לירוק על פי המקובל במי ים.



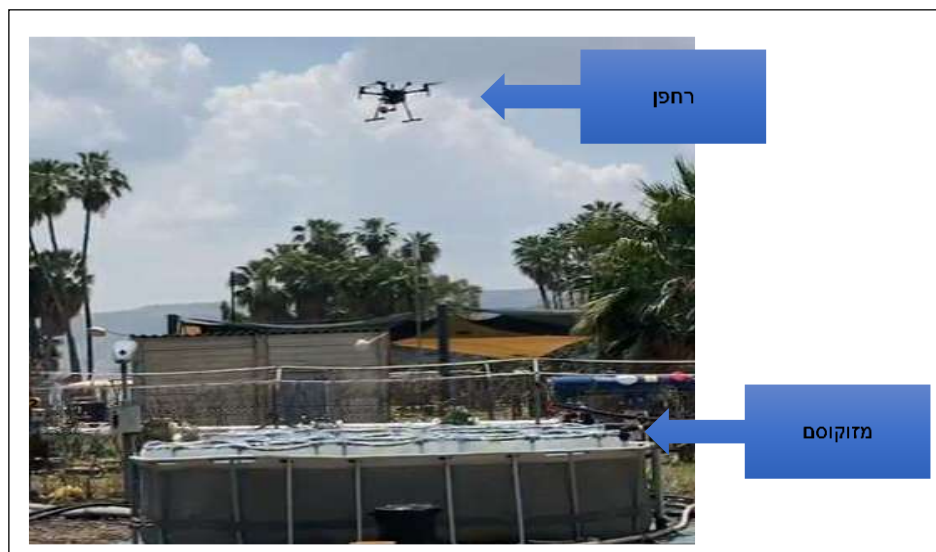
איור 96: ריכוזי הכלורופיל שנמדדו בתחנה A (ירוק) ובתחנה D (ורוד) קרוב לפני השטח בהשוואה לריכוזי הכלורופיל המחושים מלוויין Sentinel-3 (אדום – פאנל עליון) ו-Landsat 8 ו-9 (כחול- פאנל תחתון) במהלך שנת 2023. ריכוזי הכלורופיל המחושים מהלוויין הינם ממוצע מרחבי על פני כל האגם (למעט תאריכים עם עננות\אבק\החזר משובש).

התוצאות שהתקבלו (איור 96) מדגימות שעבור ערכי כלורופיל נמוכים, חישוב ריכוז כלורופיל על בסיס ההחזר מלנדסט מתאר בקרוב טוב את הריכוזים שנמדדו בכנרת בעוד תוצאות החישוב מתוך נתוני סנטינל מראים סטיה גבוהה יחסית, במיוחד בערכים הנמוכים. ככלל, שני הלוויינים מאפשרים הערכה משביעת רצון, ומדגימים את העלייה והירידה בריכוזי הכלורופיל סביב חודשי האביב: מרץ-מאי.

בוצעו ניסויי כיוול של מערכות חישה מרחוק נישאות על רחפן אל מול תרבויות של ציאנובקטריה שאוכלסו במערכת מזוקוסם המחקר את תנאי הכנרת. בניסויים אלו נבחנה גם השפעה של מי חמצן על אוכלוסיות ציאנובקטריה במערכת המזוקוסם. סכמה כללית של מערכת המזוקוסם מוצגת באיור 97 וצילום המערכת במהלך הפעלתה וביצוע מדידות בעזרת רחפן, מוצג באיור 98.

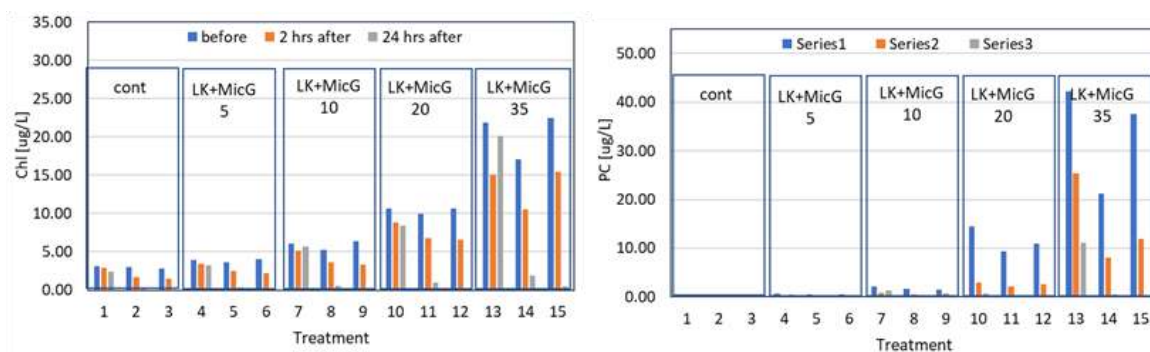


איור 97: הצגה סכמטית של מערכת המזוקוסם. בריכה אליפטית, בשטח של 15 מ"ר ובגובה 1.2 מ', מכילה עד 8 יחידות זהות של שקי פוליאטילן (כ 400 ליטר כ"א) המחזקים במסגרת של צנרת ורשת פלסטיק.

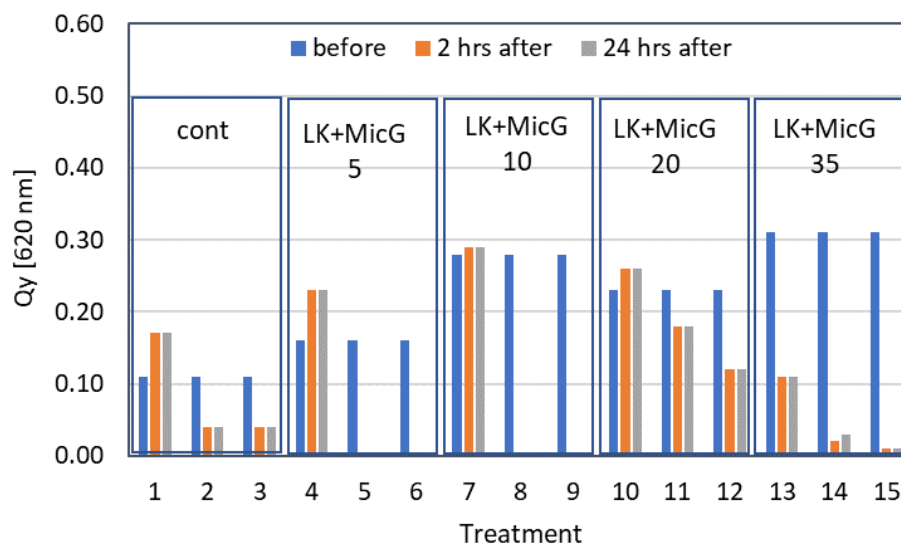


איור 98: מערכת המזקוסם ורחפן מעליה במהלך ביצוע צילום במצלמה רב-ערוצית הנישאת על רחפן.

במהלך שנת 2023 בוצעו במערכת המזקוסם 3 ניסויים עם 3 מינים של ציאנובקטריה ונבדקה ההשפעה של טיפולים במי חמצן (או תרכובות שמשחררות מי חמצן) על שרידות של אוכלוסיית הציאנובקטריה. להלן מוצגות תוצאות מניסוי עם מיקרוציסטים (זן G). איור 99 מציג תוצאות של ריכוז כלורופיל ופיקוציאנין לפני ואחרי היישום של מי חמצן. ההשפעה של מי חמצן על הפעילות הפוטוסינתטית של אוכלוסיות הציאנובקטריה מוצגת באיור 100.

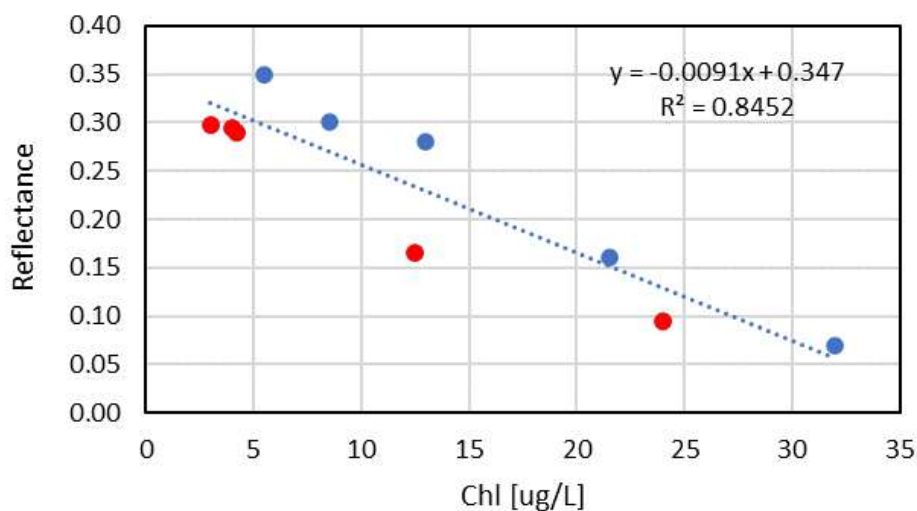


איור 99: שינויים בריכוז כלורופיל (משמאל) ופיקוציאנין (מימין) במהלך ניסוי חשיפה של אוכלוסיית מיקרוציסטים (זן G) למי חמצן במזקוסם. העמודות מייצגות מדידות לפני יישום מי חמצן (כחול) שעתיים אחרי היישום (כתום) ו- 24 שעות אחרי היישום (אפור). שקים הממוספרים 1, 4, 7, 10 ו- 13 לא נחשפו למי חמצן (בקורת), שקים 2, 5, 8, 11 ו- 12 נחשפו ל- 5 מג"ל מי חמצן ושקים 3, 6, 9, 12, ו- 15 נחשפו ל- 10 מג"ל מי חמצן. הכיתוב בראש כל קבוצה מציין את התוספת של תרבית מיקרוציסטים למי כנרת על בסיס ריכוז הכלורופיל הצפוי.



איור 100: שינוי ביעילות הפוטוסינתטית Qy של אוכלוסיות מיקרואיסטים (זן G) במהלך ניסוי חשיפה למי חמצן במזוקוסם. העמודות מייצגות מדידות לפני יישום מי חמצן (כחול) שעתיים אחרי היישום (כתום) ו 24 שעות אחרי היישום (אפור). להסבר נוסף ראו במקרא של איור 99.

במהלך ניסוי המזוקוסם, בוצעו מדידות ספקטרליות של האור המוחזר מהשקים. נמצא קשר לינארי בין ריכוז הכלורופיל בשקים להחזר הספקטרילי ב- 430 ננומטר (איור 101). תוצאות אלו מבססות את הגישה לכיול אמין של המערכות הספקטרליות שמשמשות לחישה מרחוק של אוכלוסיות הפיטופלנקטון להערכה אמינה של ריכוז הכלורופיל ופיגמנטים נוספים של אוכלוסיות הפיטופלנקטון בגופי מים.



איור 101: מתאם בין ריכוז כלורופיל מדוד להחזר אור (420-440 ננומטר) בניסויי מזוקוסם בהם בוצע אכלוס עם תרבית מיקרואיסטים (זן G). מדידות בוצעו מיד לאחר אכלוס (נקודות כחולות) ו 24 שעות אחרי אכלוס (נקודות אדומות) של תרבית מיקרואיסטים G בשקי המזוקוסם.

3.8 הפיטופלנקטון באגם הברבורים שליד מפעלי ים המלח

במימון "המארג", אוניברסיטת תל אביב
תמר זהרי, ירון בארי-שלווין, ניר קורן,
אלה אלסטר, אדית לייבוביץ, דיתי ויינר-
מוציני

- אגם הברבורים הוא אגם רדוד של מים מליחים באזור צחיח, עם מליחות שמשנתנה עונתית בטווח רחב, הנתון לשינויי טמפרטורה יממתיים ועונתיים גדולים. הוא כולל שני חלקים, צפוני ודרומי, שכנראה לא מתערבבים ביניהם.
- רוב החנקן המומס במים הוא אורגני, כל השנה, מה שמקנה יתרון למיני פיטופלנקטון מהצורניות והקריפטופיטה, שמסוגלים לנצל אותו.
- מיני המיקרו-אצות האינדיקטורים מעידים על איכות מים בינונית בקיץ-סתיו ונמוכה בחורף-אביב, בשני האגנים. לא נמצאו אצות הידועות לנו כמייצרות רעלנים.
- לצמחייה הטבולה שמצפה את קרקעית האגם באביב מקום חשוב בתפקוד האקולוגי של האגם ומתבקש לחקור אותה.



אגם הברבורים, אגם מים מליחים מוקף צמחייה סבוכה של עצי אשל וקנה מדרום למפעלי ים המלח. מראה ממערב, יולי 2023. צילום: תמר זהרי.

מטרת המחקר

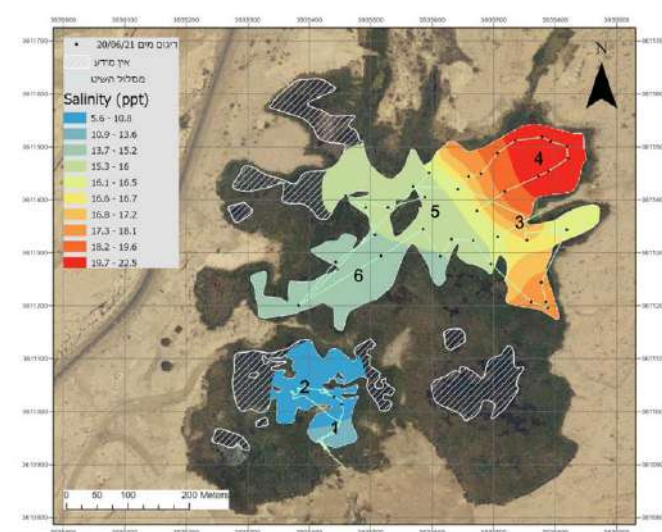
תיאור ראשון ומקיף, לאורך שנה מלאה, של אוכלוסיות הפיטופלנקטון ופרמטרים נלווים באגם הברבורים, והערכת מצבו האקולוגי של גוף המים.

רקע

אגם הברבורים הוא אגם טרמינלי קטן (שטח: כ-0.4 קמ"ר) ורדוד (עומק מרבי: 2 מ') של מים מליחים, השוכן במדרום למפעלי ים המלח וממזרח לכביש 90, במניפת סחף קדומה של נחל צין. זהו גוף מים חדש יחסית, שנוצר בהדרגה החל משנות ה-2000 המוקדמות עקב עליית מי תהום כתוצאה מכריית חול. בשולי האגם התפתחה צמחייה חופית עבותה, בעיקר של אשל וקנה. לאגם שני חלקים, צפוני ודרומי, המופרדים זה מזה על ידי פס צמחייה עבותה. לא ברור אם קיימת גם הפרדה פיסית מלאה מתחת לצמחייה ומה מידת תחלופת המים בין שני החלקים. גוף המים והצמחייה סביבו מהווים אתר ירוק בנוף הצחיח (ראו תמונת כותרת), בעל ערך נופי ותיירותי. מקורות המים לאגם הם תעלה המנקזת מי שיטפונות מנחלים שמעברו המערבי של כביש 90, ומים עודפים ממפעלי ים המלח. לפי הצורך, לעיתים מפעלי ים המלח גם שואבים ממנו מים. באירוע של זיהום קיצוני של נחל אשלים בחומצה תעשייתית עם ריכוזים גבוהים של פלואור, גופרית, זרחן ומתכות כבדות ב-30 ליוני 2017, נפגע גם אגם הברבורים. השפעת זיהום זה על האקולוגיה של האגם לא ברורה דייה עקב העדר נתונים מלפני האירוע. מתצלומי לוויין שנאספו אחרי הזיהום נמצא שמדי שנה באביב מתפתחת באגם פריחה מאסיבית של מיקרו אצות. ניטור הפיטופלנקטון בגוף המים בוצע במסגרת תכנית ניטור רחבה, בהובלת "המארג" של אונ' תל אביב. מטרת התכנית הייתה לאפיין את מצבו האקולוגי של האגם בהתבסס על התנאים הפיזיקו-כימיים ועל סמך אפיון ומעקב אחר האצות. המידע חשוב כדי להבין האם מתרחשים באגם תהליכי שיקום או שנדרשת התערבות ממשקית, וכדי לגבש המלצות לשיפור תפקוד המערכת האקולוגית.

שיטות

הדיגום באגם בוצע על ידי צוות "המארג" של אונ' ת"א, אחת לחודש בשעות הבוקר המוקדמות, מקיפק מתנפח, ב-6 תחנות בכל דיגום, מהן תחנות 1, 2 בגוף המים הדרומי ותחנות 3-6 בצפוני (איור 102). בוצעו 12 דיגומים חודשיים בין ספטמבר 2022 ועד ספטמבר 2023. נקודות הדיגום נבחרו לאחר סקר מליחות גוף המים, כך שיכסו אזורים בעלי מליחיות שונות (איור 102).



איור 102: מיקום 6 תחנות הדיגום באגם הברבורים (ממוספרות), על גבי תצלום לוויין של גוף המים והצומח שבו. המפה מציגה את הפיזור המרחבי של מליחות המים באזורים ללא צמחייה, ששימש לבחירת מיקום תחנות הדיגום. נתוני המליחות נאספו במהלך שייט בקיפק (שמסלולו מוצג במפה) ביוני 2020 על ידי רייל הורוביץ. המפה הוכנה בתכנת GIS על ידי מיכל קורן. באדיבות המארג.

דוגמאות המים הועברו למעבדה לחקר הכנרת, בה בוצעו אנליזות כימיות וביולוגיות, בשיטות הנהוגות בניטור כנרת. על הדוגמאות בוצעו אנליזות של נוטריאנטים (זרחן כללי, זרחן כללי מומס, אורתופוספט, חנקן כללי, חנקן כללי מומס, ניטרט, אמון), חומר אורגני, כלוריד, מוליכות חשמלית, כלורופיל, זיהוי וספירת פיטופלנקטון. המים נדגמו בעומק של כ-20 ס"מ מתחת לפני השטח באמצעות כד דגימה בנפח 5 ל'. דוגמאות המים נשמרו בקירור עד הבאתן למעבדה להמשך טיפול. הדוגמאות לספירת פיטופלנקטון שומרו בלוגול מיד לאחר הדיגום. בכל תחנת דיגום נמדדו גם עומק הקרקעית, עומק סקי, ופרופיל עומק באמצעות מולטיפרוב שדה (YSI Professional plus) שמודד עומק, טמפרטורה, pH, מוליכות חשמלית וריכוז חמצן מומס. במאי 2023 צוות המעבדה לחקר הכנרת הצטרף לצוות הדיגום כדי לבדוק אם יש התפתחות אביבית של פיטובנתוס ו/או צמחייה עילאית טבולה, תופעה אופיינית לגופי מים רדודים. לקביעת הרכב מיני הפיטופלנקטון, דוגמאות חיות ומשומרות בלוגול הובאו למעבדה לשיקוע ובדיקה במיקרוסקופ הפוך. מיני הפיטופלנקטון שבדוגמא זוהו וכומתו באופן חצי-כמותי, ומינים אינדיקטורים לאיכות מים ומליחות נרשמו. כל מין קבל ציון בין 0 עד 6 לפי הכמות שלו בדוגמא, כאשר 0 = לא נמצא, 6 = נפוץ מאד. הפרמטר Sum of Scores שמוצג באיורים הוא סך הציונים לכל המינים מקבוצה טקסונומית או מקטגוריה של מינים אינדיקטורים. המינים האינדיקטורים שנמצאו קובצו לפי קטגוריות איכות מים (5 קטגוריות, מגרוע ועד מצוין) או מליחות (אדיש למליחות, הלופיל או מזהלוב) והוצגו כסך הציונים לכל קטגוריה.

תוצאות

ברוב הפרמטרים שמדדנו נמצא דמיון גדול בין הערכים בארבע התחנות באגן הצפוני, וכן בין הערכים בשתי התחנות באגן הדרומי. לעומת זאת, הערכים באגן הצפוני היו באופן עקבי שונים מאלו שבדרומי. לפיכך התוצאות מוצגות כממוצעים וסטיות תקן של הערכים בכל אגן. בדוח מקוצר זה מוצגים נתונים רק לגבי אוכלוסיות הפיטופלנקטון. נתונים מהממצאים הפיסיקו-כימיים ניתן למצוא בדוח המסכם מחקר זה, זהרי ושות' 2023, דוח חיא"ל מס' T23-2023.

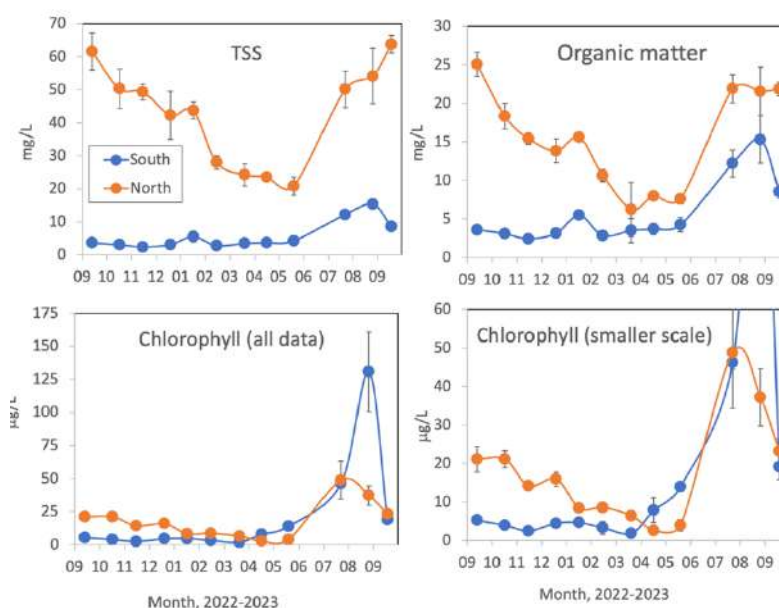
לאורך כל שנת המחקר, עומק הקרקעית בתחנות הדיגום באגן הדרומי (2.0 - 1.5 מ') היה גדול יותר מאשר באלו שבאגן הצפוני (1.3 - 0.6 מ'), בעוד שמליחות המים הייתה תמיד גבוהה יותר באגן הצפוני. ריכוזי הכלוריד נעו בין 3300-5600 מ"ג לליטר בדרום ובין 8000-11000 מ"ג לליטר בצפון. בצפון נרשמה דעיכה במליחות מספטמבר 2022 עד אפריל 2023, אולי עקב מיהול במי שיטפונות. בשני האגנים המליחות הגיעה לשיאה בקיץ. שקיפות המים (עומק סקי) הייתה גבוהה יותר באגן הדרומי מספטמבר 2022 ועד מרץ 2023. מאפריל ואילך ההבדלים בין האגנים בפרמטר זה נעלמו, בהתאמה לדינמיקה של ריכוזי החומר המרחף, החומר האורגני והכלורופיל (ראו בהמשך). טמפרטורת המים נעה בין 16-32 מעלות והייתה הפרמטר היחיד שהיה דומה בשני האגנים, כל השנה. ערכי pH נמוכים במיוחד (7 - 6.5) נמדדו בקיץ ובסתיו. ערכים אלה המעידים על סביבה חומצית.

בתחילת תקופת הדיגום נרשמו באגן הדרומי ריכוזים נמוכים יותר של זרחן וחנקן כללי, אך מינואר 2023 (זרחן) ופברואר 2023 (חנקן) הריכוזים בשני האגנים היו דומים. עם זאת, באגן הצפוני, חנקן כללי היה מורכב כל השנה בעיקר מחנקן מומס ואילו בדרומי חנקן מומס תרם את רב המסה רק עד מאי בעוד שחנקן חלקיקי (ככל הנראה אורגני) היווה מסה חשובה בהמשך השנה. בשני האגנים לאורך כל השנה

הרב המוחלט של חנקן מומס במים היה חנקן אורגני בעוד הצורנים האנאורגניים היו זניחים. באגן הדרומי, זרחן המומס היווה את רב הזרחן הכללי עד אפריל 2023 אך משם ואילך זרחן חלקיקי היה המרכיב החשוב. זרחן מומס באגן הדרומי היה מורכב באופן משמעותי מזרחן מסיס ריאקטיבי. באגן הצפוני לעומת זאת, זרחן חלקיקי, אולי באסימילציה לפיטופלנקטון, שלט כל השנה.

כלורופיל, חומר מרחף וחומר אורגני:

מספט' 2022 עד מרץ 2023 הכלורופיל באגן הצפוני היה גבוה באופן עקבי מזה שבדרומי זאת למרות שבאגן הצפוני הכלורופיל ירד עם הזמן בעוד שבאגן הדרומי הכלורופיל היה יציב לאורך הזמן (איור 103). באפריל חל היפוך מגמות: הכלורופיל בדרום החל לטפס והגיע באוגוסט 2023 לשיא עצום של 130 מיקרוגרם לליטר. באגן הצפוני הכלורופיל המשיך לרדת עד מאי אך טיפס ביולי לשיא של 49 מיקרוגרם לליטר (איור 103). יתכן שפספסנו בין דיגומים שיא גבוה יותר בצפון. המהלך העונתי של חומר מרחף (TSS) ושל חומר אורגני חלקיקי (OM) היה דומה לזה של הכלורופיל, עם ערכים גבוהים יותר באגן הצפוני לאורך כל השנה ושיא באגן הדרומי באוגוסט 2023 (איור 103). זה לא מפתיע, פיטופלנקטון ידוע כמרכיב עיקרי של החומר המרחף והחומר האורגני במים.

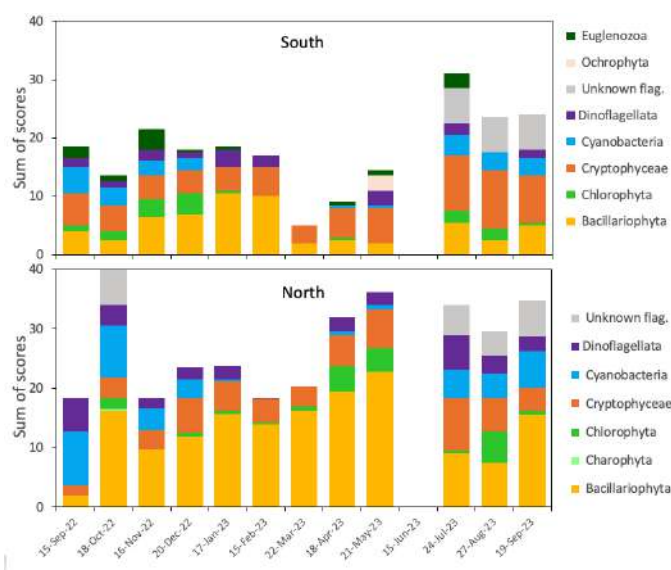


איור 103: המהלך השנתי של חומר מרחף (TSS), חומר אורגני (Organic matter) ושל כלורופיל, באגן הצפוני ובאגן הדרומי של אגם הברבורים. נתוני הכלורופיל מוצגים פעמיים: משמאל - כל הנתונים. מימין - ללא ערך הקיצון של אוגוסט 2023 באגן הדרומי, כדי לראות את פרטי הדינמיקה בחודשי הניטור המוקדמים.

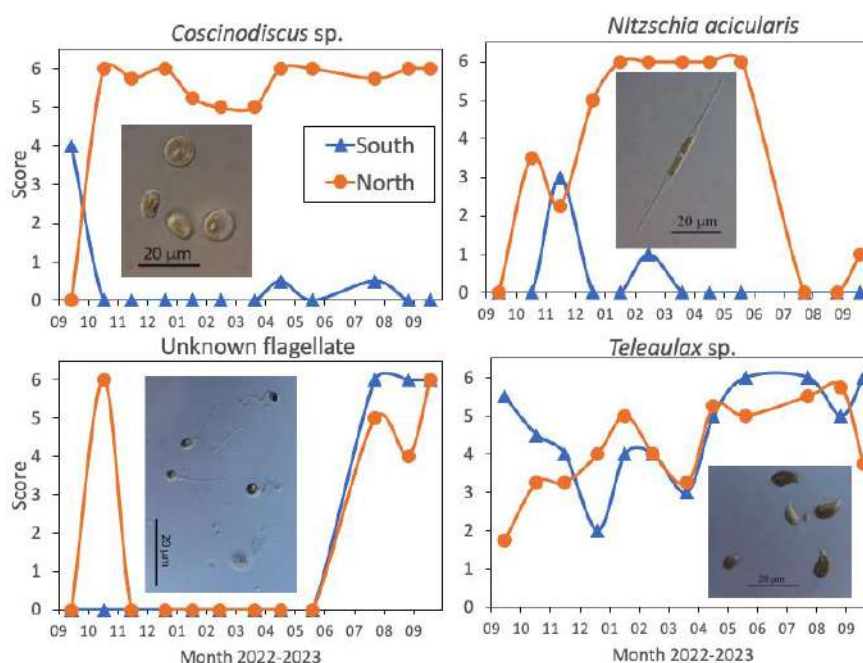
הפיטופלנקטון:

הקבוצות הטקסונומיות עם נוכחות גבוהה יותר מאשר אחרות בשני האגנים ולאורך כל השנה היו קבוצת הצורניות ואחריה הקריפטופיטה (איור 104). ירוקיות, דינופלגלטים וציאנובקטריה (כחוליות) היו נפוצות יותר בצפון מאשר בדרום. ציאנובקטריה נכחו בשני האגנים רק בקיץ-סתיו ונעדרו בחורף-אביב. מינים מקבוצת האיגלנחואה והאוקרופיטה נמצאו רק באגן הדרומי.

שני מינים של צורניות היו נפוצים (ציונים 5-6 רוב השנה) ביותר באגן הצפוני אך כמעט ולא נצפו בדרומי: *Coscinodiscus* sp., *Nitzschia acicularis* (איור 105), בעוד שהמין *Cylindrotheca* sp. היה נפוץ רק באגן הדרומי. מבין הקריפטופיטים, המין *Teleaulax* sp. היה נפוץ מאד בשני האגנים, כל השנה. מקבוצת הירוקיות, הסוג *Oocystis* נכח בדוגמאות (בצפון יותר מאשר בדרום), בעוד סוגים אחרים היו נדירים. אצה שוטונית בלתי מזוהה שכינינו unknown flagellate הייתה נפוצה בשני האגנים בקיץ. הכחוליות באגם הברבורים לא כללו מינים מקבעי-חנקן, ולא נמצאו מינים המוכרים כמייצרי רעלנים.

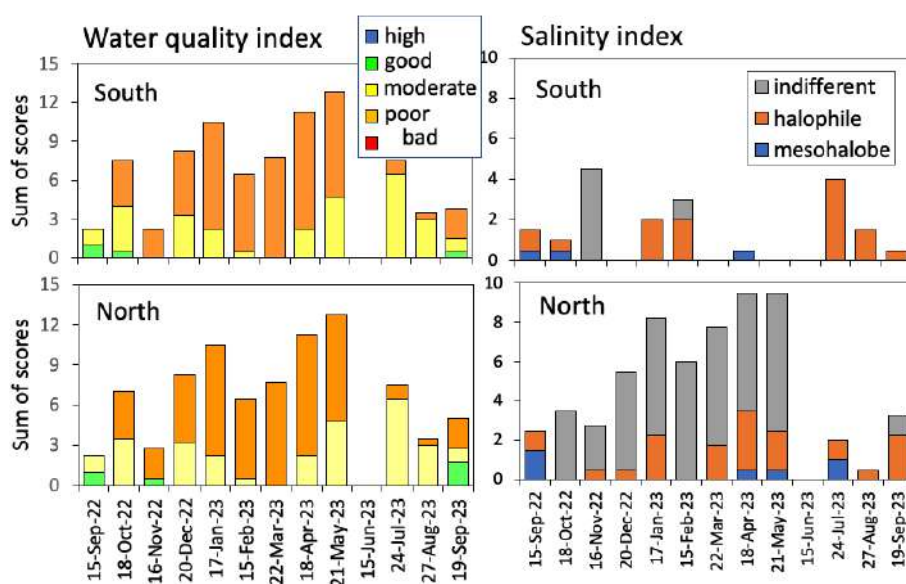


איור 104: הרכב אוכלוסיות הפיטופלנקטון באגן הדרומי (למעלה) ובצפוני (למטה). מוצגים ערכי ה-Sum of Scores לכל קבוצה טקסונומית בכל תאריך דיגום.



איור 105: המהלך השנתי של ארבעת המינים הנפוצים ביותר שנצפו באגם הברבורים, בשני האגנים, עם תמונות מיקרוסקופ של כל מין.

חלק מהמינים שנמצאו באגם הברבורים הם מינים אינדיקטוריים לאיכות מים ו/או למליחות. בחודשי החורף והאביב הייתה דומיננטיות של מינים אינדיקטורים לאיכות מים נמוכה (poor) בעוד שבקיץ הייתה דומיננטיות של מינים המעידים על איכות מים בינונית (moderate), בשני האגנים (איור 106). מבחינת מליחות, באגן הדרומי נמצאו מעט מינים אינדיקטורים למליחות ולכן קשה להסיק מסקנות. באגן הצפוני המינים שעמידים לטווח מליחות רחב (indifferent) היו הדומיננטיים מאוקטובר ועד מאי, בהתאמה לשינויים הגדולים עם הזמן שנרשמו במליחות המים. בקיץ, כשהמליחות בשני האגנים הגיעה לשיאה השנתי שלטו מינים הלופיליים, אוהבי מליחות (איור 106).



איור 106: פיטופלנקטון כאינדיקטור לאיכות המים (משמאל) או למליחות (מימין) באגן הדרומי (למעלה) והצפוני (למטה) במועדי הדיגום השונים.

צמחיית מים טבולה

בדיגום מאי הצטרפנו לצוות הדיגום כדי לבדוק אם מתפתחת פריחה של אצות בנטיות ו/או של צומח עילאי טבול, מרכיב חשוב במערכת האקולוגית ובמארג המזון של אגמים רדודים שלא קיבל כל התייחסות. מצאנו שבשני האגנים קרקעית גוף המים הייתה מכוסה ב"שמיכה" עבה של הצמח העילאי נהרונית חוטית *Potamogeton filiformis* (זיהוי טנטטיבי על ידי ד"ר דידי קפלן; איור 107).



איור 107: משמאל: מרבדי נהרונית חוטית *filiformis* מכסים את תחתית אגם הברבורים ב-21 למאי 2023. מימין: תצלום מקרוב של הצמח.

מרבדי הנהרונית לא נראו מהחוף, אבל כששטנו מעליהם הם נראו בבירור, לאורך כל מסלול השייט בין נקודות הדיגום, באגן הצפוני והדרומי. סביר שמרבדי הנהרונית הופיעו כבר באפריל או במרץ, אבל אין לכך תיעוד. בדיגומי יולי ואוגוסט, כשהדוגמים חיפשו אקטיבית את המרבדים, מרבדי נהרונית נצפו שוב באגן הצפוני אבל לא בדרומי. בספט' 2023 הנהרונית נעלמה גם בצפון.

דיון

על סמך הנתונים הפיסיקו-כימיים אנו מעריכים ששני חלקי אגם הברבורים, הצפוני והדרומי, נפרדים זה מזה, ואם קיים חיבור תת קרקעי, הזרימה דרכו איטית. החלוקה לשני גופי מים שונים מתבטאת בהבדלים הגדולים במליחות המים בין שני האגנים לאורך כל השנה. מספטמבר 2022 עד מרץ 2023 ההפרדה בין שני האגנים התבטאה גם בריכוזי זרחן כללי, חנקן כללי, חומר מרחף, חומר אורגני, כלורופיל, ושקיפות המים. מאפריל ואילך היינו עדים להתכנסות של חלק מהפרמטרים הללו לערכים דומים, בעיקר ריכוזי חנקן זרחן, ושקיפות המים. התכנסות זו אולי מצביעה על הגברה עונתית בתחלופת מים בין שני האגנים. מיני הפיטופלנקטון שהיו נפוצים באגם הברבורים הם כאלו שמסוגלים לנצל את החנקן האורגני כמו הקריפטופיט *Teleaulax*, והצורניות. מאפיינים נוספים של המינים שהיו נפוצים הם עמידות לטמפרטורות מים מעל 30 מעלות ולטווח מליחות רחב. חלקם מינים ימיים כמו *Teleaulax*, אחרים מינים שחיים גם במים מתוקים וגם מי ים, כמו *Nitzschia acicularis*. איננו יודעים מי המין שתרם את הכלורופיל לפריחה באוגוסט 2023 באגן הדרומי. המינים שקיבלו ציון 5 או 6 בזמן הפריחה קיבלו ציונים דומים גם בתאריכי דיגום אחרים. אנו משערים שמין פיטופלנקטוני כלשהו, קטן מדי לזיהוי המיקרוסקופי, היה אחראי לשיא הכלורופיל. שיא הכלורופיל באוגוסט בדרום היה מלווה בשיא בזרחן כללי. זה לא מפתיע, הזרחן הכללי כולל את הזרחן בפיטופלנקטון. בכל הפרמטרים האחרים שנבדקו לא מצאנו אינדיקציה לשיא הכלורופיל הזה. בפרט היה מפתיע שלא מצאנו עדות לכך בחמצן מומס או pH. אפשרות להסביר זאת היא שבאביב עיקר הפוטוסינתזה באגם הברבורים הייתה על ידי הצמחייה הטבולה ולא על ידי הפיטופלנקטון. הצמחייה הטבולה מתחרה בפיטופלנקטון על חומרי דשן. פריחת הנהרונית המאסיבית במאי, יחד עם ההנחה שהנהרונית התחילה להתפתח מוקדם יותר, יכולים להסביר את הדעיכה המתמשכת בריכוזי



הכלורופיל במים במהלך האביב. באופן בו דגמנו מים לכלורופיל לא נכללו בדגימה חלקי נהרונים ולכן הכלורופיל משמש פרקסי לביומסת הפיטופלנקטון בלבד. העלמות הנהרונים בקיץ, אולי בגלל טמפרטורת המים הגבוהה, הייתה כנראה (לא עקבנו ולא דגמנו) מלווה בתמותה ופירוק מסת הצומח ולכן שחרור חומרי דשן למים, שעודדו פריחת מיקרו אצות. זה יכול להסביר את שיא הכלורופיל ביולי באגן הצפוני ובאוגוסט באגן הדרומי.

צמחייה טבולה היא מרכיב חשוב באקולוגיה של גופי מים רדודים. היא תורמת ליצרנות הראשונית ויכולה להיות גורם דומיננטי בייצור הראשוני. היא מהווה מצע לצמחייה אפיפיטית, וכן מזון ומסתור מטורפים לחסרי חוליות ודגים. היא מקטינה את קצבי זרימת המים. הפריחה האביבית של הנהרונים היא כנראה אירוע שמשפיע על היצרנות הראשונית, רמות החמצן, וה- pH , ושרשרת המזון באגם. יתכן שהפריחות האביביות שנצפו באמצעי חישה מרחוק - היו של הצומח הטבול ולא של מיקרו אצות במים. אבל תכנית הניטור לא כללה את צמחיית המים הטבולה ולכן לא למדנו אותה. במחקר עתידי חיוני לכלול מעקב גם אחרי מרכיב חשוב זה של המערכת האקולוגית.

ומהיבט של שמירת טבע בישראל: נהרונים חוטית היא צמח עילאי שתפוצתו באזור הממוזג של חצי הכדור הצפוני. בישראל המין נדיר ונמצא בסכנת הכחדה. עד כה צמח זה לא תואר מאזור ים המלח ויתכן שהתצפית שלו חשובה. נציין שבשלב זה הזיהוי עדין לא סופי.

הערכת מצבו האקולוגי של גוף המים:

אגם הברבורים הוא אגם מים מליחים רדוד באזור צחיח, עם מליחות שמשנתנה עונתית בטווח רחב, ושינויי טמפרטורה יממתיים ועונתיים גדולים. למרות עומקו הרדוד קרקעיתו לרוב לא נראית עקב נוכחות חומר מרחף אורגני ואנאורגני במים. רוב החנקן המומס במים הוא אורגני, כל השנה, מה שמקנה יתרון למינים שידעים לנצל אותו. ריכוזי pH הנמוכים בקיץ עשויים להיות שריד של הזיהום ב-2017 בחומצה גופרתית. מיני המיקרו אצות האינדיקטורים מעידים על איכות מים בינונית בקיץ-סתיו ונמוכה בחורף-אביב, בשני האגנים. לא נמצאו אצות הידועות לנו כמייצרות רעלנים. אנו משערים שלצמחייה הטבולה שמצפה את קרקעית האגם באביב מקום חשוב בתפקוד האקולוגי של האגם.

תודות: אנו מודים לאלה פסטרנק מהמארג, אונ' ת"א, שביצעה את הדיגום באגם הברבורים.

4 מחקרי אגן ההיקוות של הכנרת וגופי מים אחרים

4.1 ניטור זיהומים ממקור צואתי בנחלי אגן ההיקוות של הכנרת בשיטת MST

במימון רשות המים

עכסה לופו, נטלי קמפר, זהר פריימן, שירה

נינו, בשיתוף רשות המים

- ניטור מקורות הזיהום הצואתי באגן ההיקוות של הכנרת בשיטת MST המשיך גם בשנת 2023, עם 21 אתרי דיגום שנדגמו לאורך השנה בתדירות של בין אחת לשבועיים לאחת לחודש.
- רמות הזיהום הגבוהות שהתקבלו בסקר זה מצביעות על תמונה עגומה של מצב נחלי הצפון. מרבית נקודות הדיגום מלבד שלוש נמצאו עם זיהום החורג מהמותר לאורך רוב תקופת הדיגום.
- התוצאות מצביעות על בקר כעל המזהם העיקרי באתרי הסקר בשנת 2023.



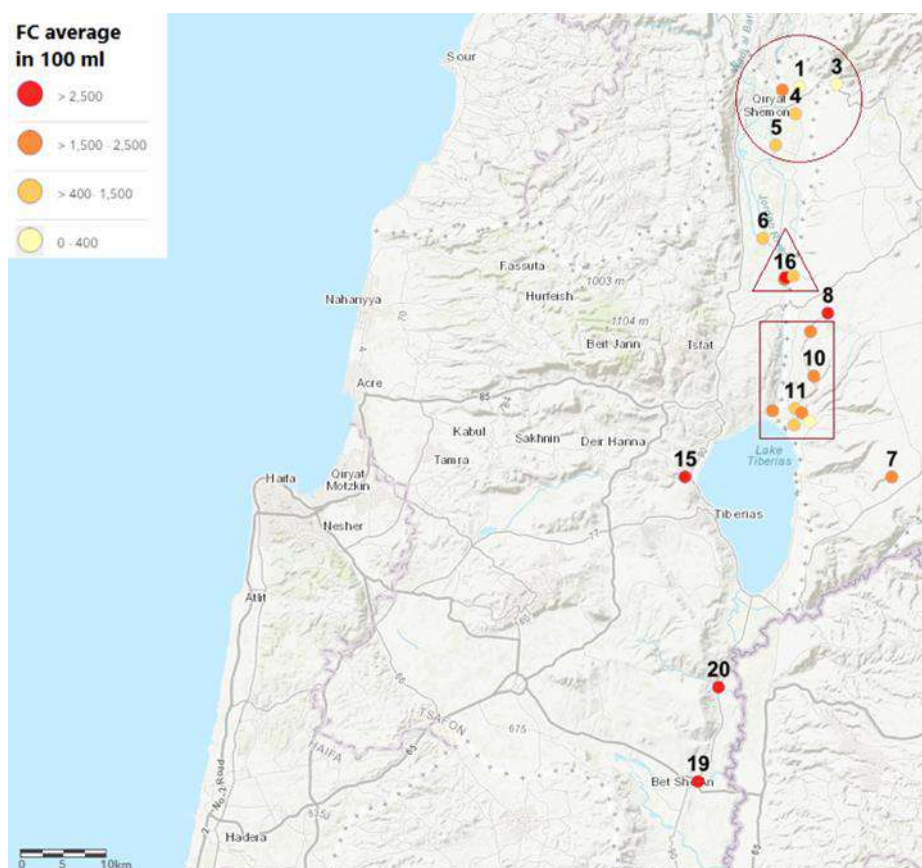
רקע

מטרת הפרויקט היא ניטור זיהום צואתי באגן היקוות של הכנרת ושימוש בכלים מולקולריים כגון Microbial source tracking (MST), על מנת לאמוד את תרומתם של המקורות השונים לזיהום. תכנית הניטור נועדה לתת תמונת מצב על רמות הזיהום הצואתי בנחלים נבחרים באגן ההיקוות של הכנרת, כולל בחינת הדינמיקה של הזיהום לאורך השנה וזיהוי מקורות הזיהום. זוהי השנה השלישית בה מתבצע ניטור

MST באגן ההיקוות. לתכנית הדיגום נוספו גם נקודות בנחלים תבור וחרוד, אשר נמצאים באגן ההיקוות של הירדן הדרומי, על מנת לבחון את התאמת השיטה לנחלים הנחשבים מזוהמים יותר.

שיטות

תוכנית הניטור נמשכה בין החודשים אפריל-ספטמבר 2023 וכללה דיגום של 21 תחנות במס' נחלים באגן ההיקוות של הכנרת, כפי שמופיעות באיור 108. תדירות הדיגום לאורך תקופת הניטור הייתה בין פעם לפעמיים בחודש, בהתאם לעונה. הפרמטרים שנבדקו באנליזות של הדוגמאות כללו: ספירת קוליפורמים צואתיים (Fecal Coliforms Fc) בשיטת Membrane Filtration וכימות סמנים לזיהוי מקור הזיהום בשיטה המולקולרית MST. על מנת לזהות את מקורות הזיהום נעשה שימוש 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 שנועדו לזהות את שלושת מקורות הזיהום העיקריים באגן ההיקוות – מעלי גירה (BacR), חזירים (Pig2) ואדם (BacH). שיטת העבודה כללה כימות אבסולוטי של מספר העתקי הסמן ומאפשרת התייחסות לנתונים המתקבלים והשוואתם לנתונים המתקבלים במחקרים אחרים ובמעבדות אחרות, בהן נעשה כימות אבסולוטי בעזרת אותם הסמנים.

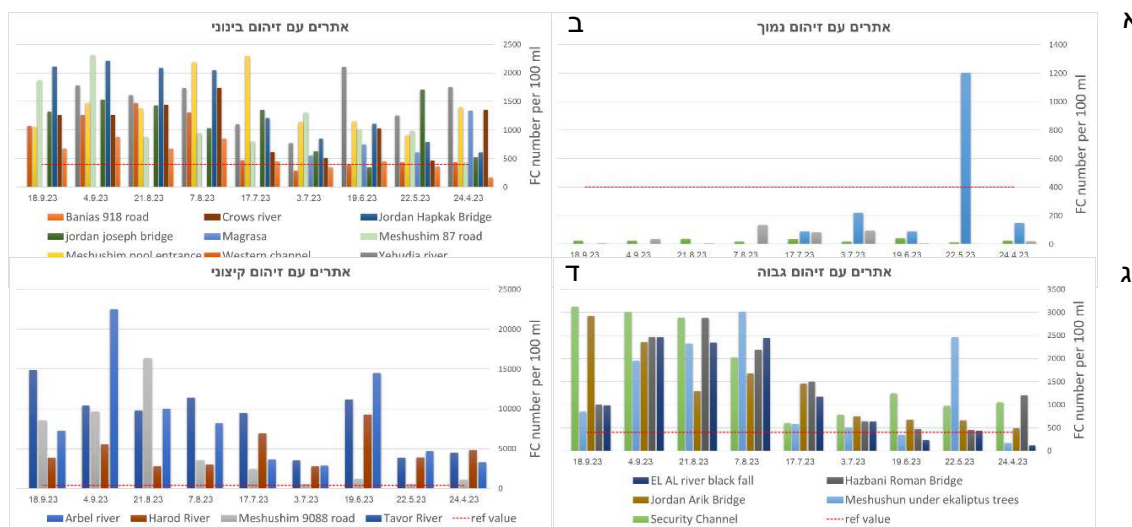


איור 108 : מיקום נק' הדיגום. צבע כל נק' מסמן את רמת הזיהום הממוצעת ב100 מ"ל מים הנמדדה בתקופת הדיגום עפ"י הערכים המופיעים במקרא.

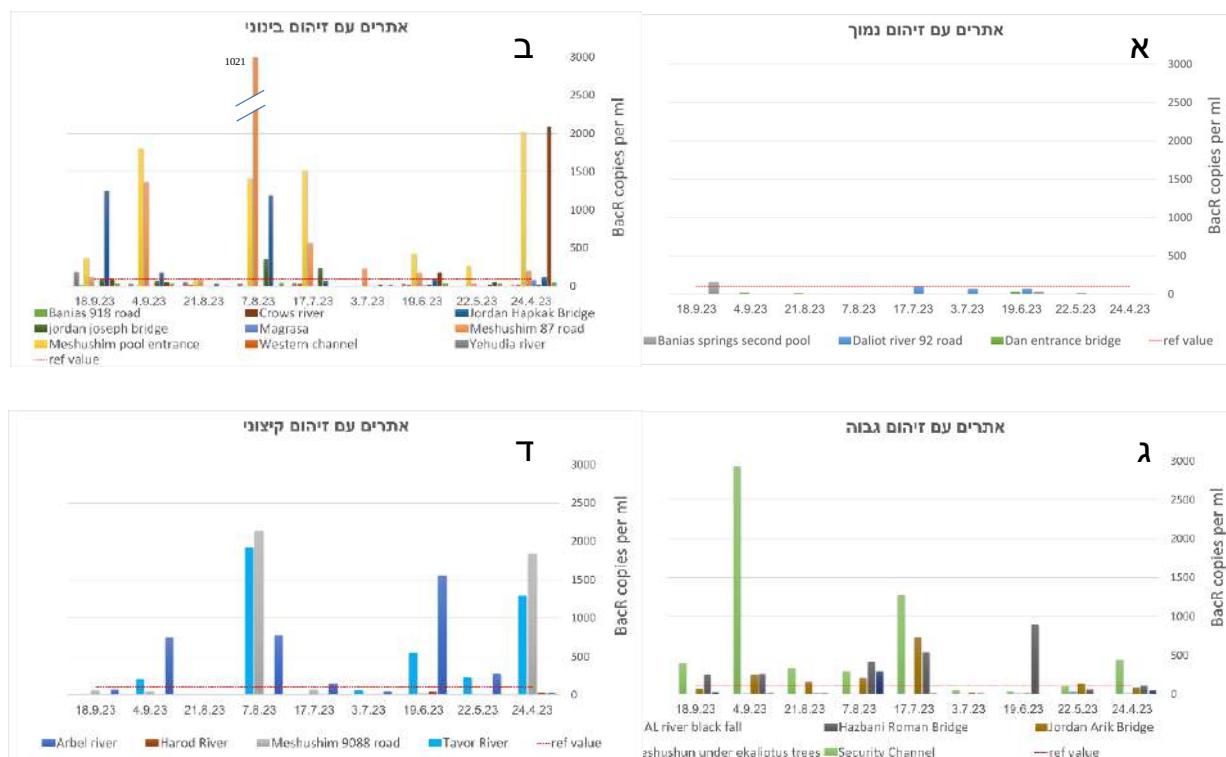
תוצאות ודין

זיהום ממקור צואה - הזיהום הצואתי בנחלים נבדק בשיטות בקטריאליות לאורך כל תקופת הפרויקט ובכל נקודות הדיגום על ידי מעקב אחר חיידקים אינדיקטורים לצואה מסוג קוליפורמים צואתיים. התקן שמעליו נחשבים מי הנחלים לבלתי ראויים לרחצה, שונה לאחרונה על ידי משרד הבריאות, והוחמר ל 400 קוליפורמים צואתיים ל 100 מ"ל. מהנתונים עולה שקיים פער גדול בין רמות הזיהום בנקודות השונות, כאשר הזיהום החמור ביותר נמצא בנקודות הדיגום שמדרום לאגם. עם זאת, רוב נקודות הדיגום הראו רמות גבוהות של זיהום, מלבד מספר נקודות בודדות בצפון. נתוני הבדיקות הבקטרילוגיות מוצגים באיור 109 יחד עם ערך הסף של קוליפורמים צואתיים, אשר מעליהם מוגדר הנחל כמזהם. נקודות הדיגום קובצו לארבע קבוצות שונות, בהתאם לרמות הזיהום הממוצעות שנמצאו בהן במהלך הסקר. כל קבוצה מוצגת בגרף נפרד, עם מערכת צירים מתאימה.

זיהום ממקור בקר - איור 110 מסכם את רמות הזיהום שנמדדו בעזרת הסמן BacR בתחנות השונות במהלך 2023. התוצאות מראות שבנקודות בהן הריכוז הממוצע של קוליפורמים צואתיים נמוך, נמצא ריכוז אפסי של סמנים לזיהום ממקור בקר (איור 110-א). ביתר נקודות הדיגום מופיע זיהום ממקור בקר בזמנים שונים, ומגיע לעיתים לערכי קיצון (איור 110-ב-ד).

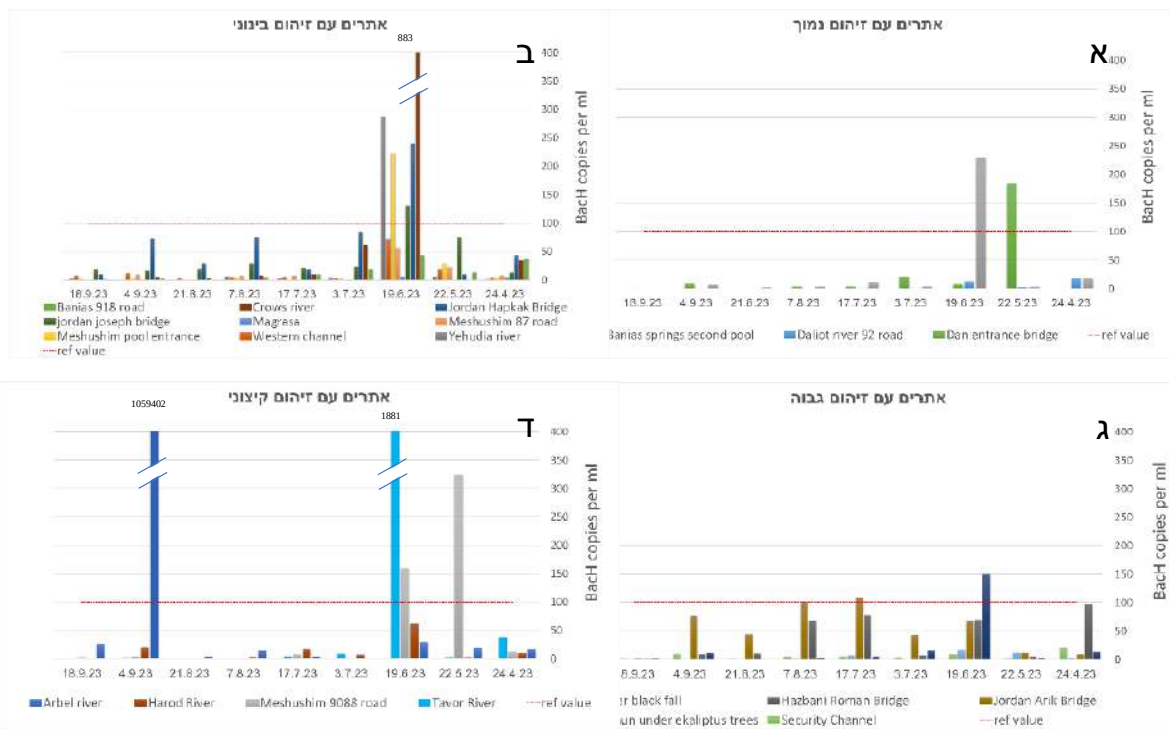


איור 109: קוליפורמים צואתיים בנקודות דיגום עם ערכי זיהום א. בעלי ממוצע הקטן מ 400 ב 100 מ"ל, ב. עם ממוצע בין 400 ל 1500 מ"ל, ג. ממוצע בין 1500 ל 2500 מ"ל ו- ג. עם ממוצע מעל 2500 ב 100 מ"ל. ערך הסף המותר בנחלים מוצג כקו אדום מקווקו.



איור 110: תוצאות MST עם הסמן לזיהום ממקור בקר BacR. התוצאות מובאות ביחידות של מספר העתקים למ"ל, הקו האדום מסמן את ערך הסף של 100 העתקי BacR למ"ל, תחתיו רמת הזיהום נחשבת נמוכה. נקודות הזיהום מקובצות על פי רמות הקוליפורמים הצואתיים, א-נמוך, ב-בינוני, ג-גבוה, ד-קיצוני.

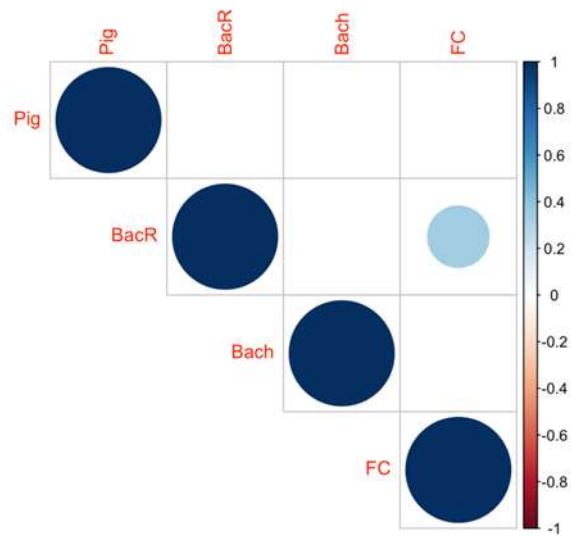
זיהום ממקור הומאני - זיהום ממקור ביובי מגיע לעיתים לערוצי הנחלים כתוצאה מכשל במערכות הובלת ביוב ביישובי הסביבה ובבסיסים צבאיים סמוכים. רמות הזיהום הביובי נמדדו בעזרת הסמן BacH הרגיש לזיהום ממקור צואת אדם. רוב אתרי הדיגום שנבדקו ב- 2023 נמצאו עם רמות נמוכות של זיהום ממקור הומאני ברוב תאריכי הדיגום (איור 111). יוצאים מן הכלל היו חלק מדיגומי חודש יוני, אז נמצאו רמות גבוהות של הסמן BacH במספר נקודות, הבולטות מביניהן הן נחל עורבים ונחל תבור ובנוסף בחודש ספטמבר נמצאו רמות קיצון של BacH בנחל ארבל. תוצאות אלה משקפות ככל הנראה כשל זמני במערכות ביוב באזורים סמוכים. נוכחות זיהום הומאני בנחלים, גם בריכוז לא גבוה, מהווה אינדיקציה לכך שביוב מגיע לנחלים, מצב המהווה סכנה בריאותית לציבור. כידוע, ביוב עלול להכיל גורמים מחוללי מחלה כגון וירוסים וחיידקים, כמו גם שאריות של תרופות והורמונים. לפיכך השאיפה היא לראות ריכוזים אפסיים של הסמן ההומאני בנחלים.



איור 111: תוצאות MST עם הסמן לזיהום ממקור הומאני BacH. התוצאות מובאות ביחידות של מספר העתקים למ"ל, הקו האדום מסמן את ערך הסף של 100 העתקי BacH למ"ל, תחתיו רמת הזיהום נחשבת נמוכה. נקודות הדיגום מקובצות על פי רמות הקוליפורמים הצואתיים, א-נמוך, ב-בינוני, ג-גבוה, ד-קיצוני.

זיהום ממקור חזיר - בעזרת הסמן Pig2 נעשה מעקב אחר כמות הזיהום שמקורה בחזירי בר. מהתוצאות עולה שבדומה לתוצאות סמן הבקר, גם זיהום ממקור חזיר לרוב נמצא בריכוזים נמוכים מאוד בקבוצת האתרים שאופיינה בזיהום קוליפורמים צואתיים נמוך. יוצא הדופן היה חודש מאי בו נמדדו ערכים גבוהים של זיהום שמקורו בחזירי בר בדרום ובדליות. בייתר נקודות הדיגום נמצאו ברוב השנה ערכים נמוכים של זיהום ממקור חזיר, עם קפיצה בערכים בחודשי האביב, ככל הנראה כתוצאה מפעילות עדרים עונתית. מתאם בין זיהום קוליפורמים צואתיים וסמני MST - ריבוי נקודות הדיגום ומספר הדגימות הרב בכל נקודה איפשרו לנו לערוך בדיקות מתאם בין ריכוז הסמנים השונים ובין רמת הזיהום של הקוליפורמים הצואתיים. תוצאות המיתאמים מראות שריכוז קוליפורמים צואתיים נמצא במתאם חיובי עם זיהומים ממקור בקר (איור 112). **לא נמצא מתאם בין ריכוז קוליפורמים צואתיים לבין הסמנים לזיהום ממקור חזיר או זיהום ממקור הומאני. תוצאות אלה מצביעות על בקר כעל המזהם העיקרי באתרי הסקר בשנת 2023.**

לסיכום, רמות הזיהום הגבוהות שהתקבלו בסקר זה מצביעות על תמונה עגומה של מצב נחלי הצפון. מרבית נקודות הדיגום, מלבד שלוש, נמצאו עם זיהום החורג מהמותר לאורך רוב תקופת הדיגום. דווקא האתרים ה"נקיים" המעטים עשויים להוות כלי מועיל לבחינת התנאים הסביבתיים המביאים לשמירה על איכות מי הנחלים ומניעה של זיהומים ממקורות שונים.



איור 112: מתאם בין ריכח סמני ה MST וריכח חיידקי הקוליפורמים הצואתיים. המתאם בוצע עם כל נתוני הדיגום מלבד נקודות בהן התגלה זיהום קיצוני של ערכים מעל 5000 קוליפורמים צואתיים ל 100 מל. צבע הנקודות מייצג את ערך המיתאם שהתקבל, על פי הסרגל שמימין. המתאם חושב בעזרת מבחן Spearman והנקודות המוצגות מראות ערכי מובהקות של $P < 0.005$.

4.2 ניטור ירדן דרומי

במימון רשות המים וחי"ל

שקד שטיין, ירון בארי-שלזון, שירה ניניו,
עכסה לופו, רותי קפלן-לוי, אלה אלסטר,
אדית לייבוביץ, ניר קורן, בני סולימני,
בשיתוף רשות המים



- בכניסת מט"ש ביתניה לנחל נמצאו עושר מיני האצות הגדול ביותר.
- זוהתה נוכחות של זיהום ממקור ביוב בנחל לאורך כל תקופת הסקר, עם ערכים מקסימליים בחודשים מרץ יולי ונובמבר.
- נחל יבניאל הביא איתו הכי הרבה חנקן לנחל וריכוזי הזרחן הגבוהים ביותר נמצאו לאחר כניסת מט"ש ביתניה.

מטרה

ניטור שוטף, רב מימדי- גיאוכימי, וביולוגי של הירדן הדרומי בקטע שבין סכר אלומות למנחמיה. מעקב אחר השינויים במערכת האקולוגית של הירדן הדרומי, בין היתר כתלות בפעולות השיקום השונות המתבצעות במקטע זה.

רקע

פרויקט הניטור של מקטע זה של הירדן הדרומי התחיל בסוף שנת 2020 (איור 113) והוא צפוי להתמשך כניטור רב שנתי של האזור. הניטור כולל את התחנות הבאות: (1) AL6: מוצא סכר אלומות, (2) AL5, לאחר כניסת מט"ש ביתניה, (3) AL4: לאחר כניסת המוביל המלוח, (4) YA3: לאחר כניסת נחל יבניאל, (5) BZ2: גשר בית זרע, (6) MN1: מנחמיה.

שיטות

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

כלורופיל ואצות: לאחר הדיגום, 25 מ"ל מהדוגמה, ב-2 חזרות, סוננו על פילטרים GF/C והוקפאו ב-20- מעלות צלזיוס עד להמשך טיפול. יתרת הדוגמה שומרה בלוגול בבקבוק כהה. הפילטרים שימשו למדידה פלואורומטרית של ריכוזי הכרלורופיל 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. דיגום לספירות של אצות בנתוניות (פיטובנתוס) התבצע, כך שבכל תחנה נאספו 5 אבנים שהיו מכוסות במי נהר, בעומק של כ 30 ס"מ. במעבדה גורד ביופילים שעל פני כל אבן להסתכלות במיקרוסקופ ולזיהוי האצות על פי הספרות הטקסונומית המקובלת. תדירות ההופעה של כל מין נקבעה לפי סולם התדירות כפי שתואר בדו"ח השנתי של המעבדה לשנת 2022 (T12-2023) לקבלת ערכים חצי-כמותיים, כלומר ככל שהציון גבוה יותר – המין הופיע בכמות גבוהה יותר.

מיקרוביולוגיה ו-MST: אנליזות לכימות מקורות זיהום צואתי שונים בוצעה בכל אחת מתחנות הדיגום בתדירות של אחת לחודש. מקורות הזיהום שנבדקו בשיטת MST הם זיהום ממקור אדם (BacH), זיהום ממקור בקר (BacR) זיהום ממקור חזיר (Pig2).

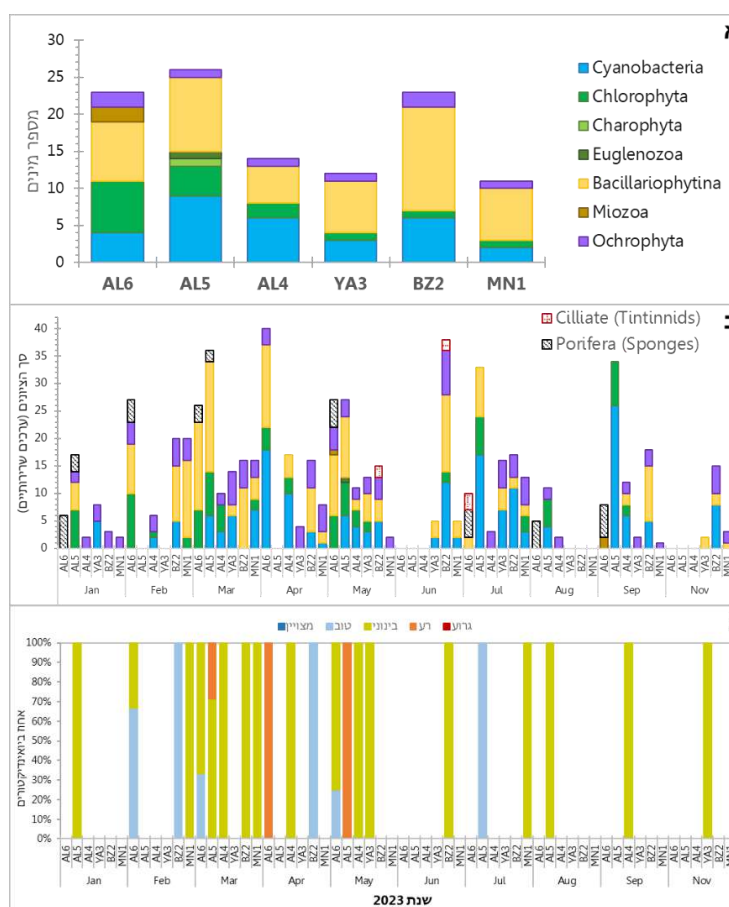


איור 113: אזור הניטור בירדן הדרומי ומיקומי ששת תחנות הניטור

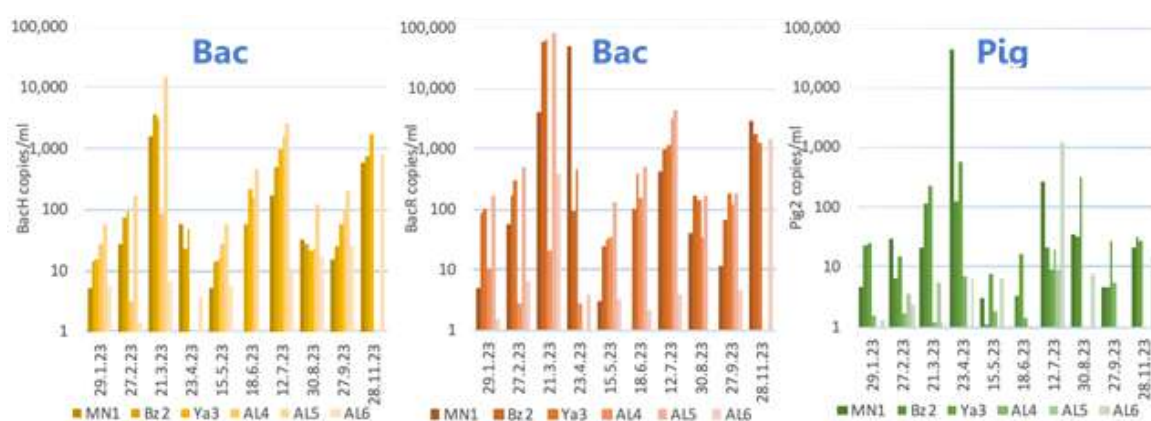
תוצאות ודין

אצות בנתוניות (פיטובנתוס): שנת 2023 בירדן הדרומי אופיינה ב- 48 מיני פיטובנתוס שזוהו לאורך הנחל, מ- 7 מערכות שונות: הצורניות הן הקבוצה הגדולה ביותר עם 20 מינים (Bacillariophytina), אחריה קבוצת הירוקות (Chlorophyta) עם 11 מינים, הציאנובקטריה עם 10 מינים, ומינים בודדים מהמערכות: Ochrophyta (2), Miozoa (2), Euglenozoa (1) ו- Charophyta (1). באיור 114 א' ניתן לראות כי תחנה AL5, (כניסת מט"ש ביתניה) היא בעלת עושר המינים הגדול ביותר (27), בעוד בתחנה MN1 נצפו 11 מינים בלבד. התפוצה היחסית של מיני הפיטובנתוס לאורך הירדן הדרומי בשנת 2023 מוצגים באיור 114 ב'. במבט כללי ניתן לראות כי ישנה דומיננטיות של כחוליות בקיץ (יולי-ספטמבר). תופעה מעניינת נוספת המתרחשת בירדן הדרומי היא נוכחותם של מיני פיטובנתוס הנצפים לאורך כל הנחל כגון הציאנובקטריה *Tapinothrix* sp. וה- *Heterococcus* sp - Ochrophyta, למרות השינויים החלים במערכת הלוטית בעקבות כניסתם של סוגי מים שונים לנחל. תופעה זו נצפתה מתחילת ניטור הפיטובנתוס בשנת 2021 ועד היום, מה שמראה על היכולת של מינים אלה לשרוד בטווח רחב של תנאי סביבה. מדד Saprobity מעיד, על בסיס מינים אינדיקטורים, על יכולת המערכת של גוף המים הנבדק לווסת את עצמו ולפרק חומרים אורגניים. בשנת 2023 (איור 114 ג') ניתן לראות כי בחלק גדול מהשנה לא נצפו מינים אינדיקטורים בנחל, אך כאשר אלו זוהו נמצא כי מדד הזיהום היה לרוב בינוני. היעדר מינים אינדיקטורים מקובלים, לאורך רב השנה מצביע על הצורך לייצר אינדקס אינדיקטורי ייחודי לישראל.

איור 114: עושר ותפוצה יחסית של מיני פיטובנתוס לאורך הירדן הדרומי בשנת 2023. **א.** עושר מיני הפיטובנתוס בכל תחנת דיגום לאורך הירדן הדרומי; **ב.** תפוצה יחסית ע"פ תחנות של פיטובנתוס ואפיפיטים הטרוטרופים (פרוטוזואה) לאורך הנחל; **ג.** מדד לאיכות המים לאורך הירדן הדרומי בשנת 2023 על פי מינים אינדיקטורים. בתחנות שלא מצוין מדד זה לא נמצאו מינים אינדיקטורים ידועים.



מיקרוביולוגיה ו-MST: התוצאות של הסמן BacH מצביעות על נוכחות של זיהום ממקור הומני (ביוב) בנחל לאורך כל תקופת הסקר, עם ערכים מקסימליים בחודשים מרץ יולי ונובמבר (איור 115). בערכי השיא הגיע הזיהום לערכים הקרובים ל 10,000 העתקים למ"ל, שהוא ערך גבוה ויכול להצביע על מקרה קיצון כגון פריצת ביוב או קריסה של מכון טהור שפכים. תוצאות מהסמן BacR, המצביעות על זיהום מבקר, מדגימות תבנית זיהום הדומה בעיקרה לזו של זיהום הנצפה ממקור אדם. הדמיון הזה מצביע על כך שהזיהום משני מקורות אלה מגיע במנגנון דומה, ויתכן שמשמעות הדבר היא שביוב שאיננו מטופל כראוי מגיע לנחל וכולל גם ביוב של רפתות. תופעה דומה נראתה גם בסקר של 2022, אולם הערכים ב-2023 גבוהים יותר ומרמזים על תפקוד פחות יעיל של מכוני הטיהור הרלוונטיים. זיהום ממקור חזיר היה נמוך יחסית רוב התקופה, למעט בחודש אפריל אז נרשם זיהום גבוה באתר הדיגום מנחמיה, ככל הנראה כתוצאה מנוכחות של עדר חזירים באזור.



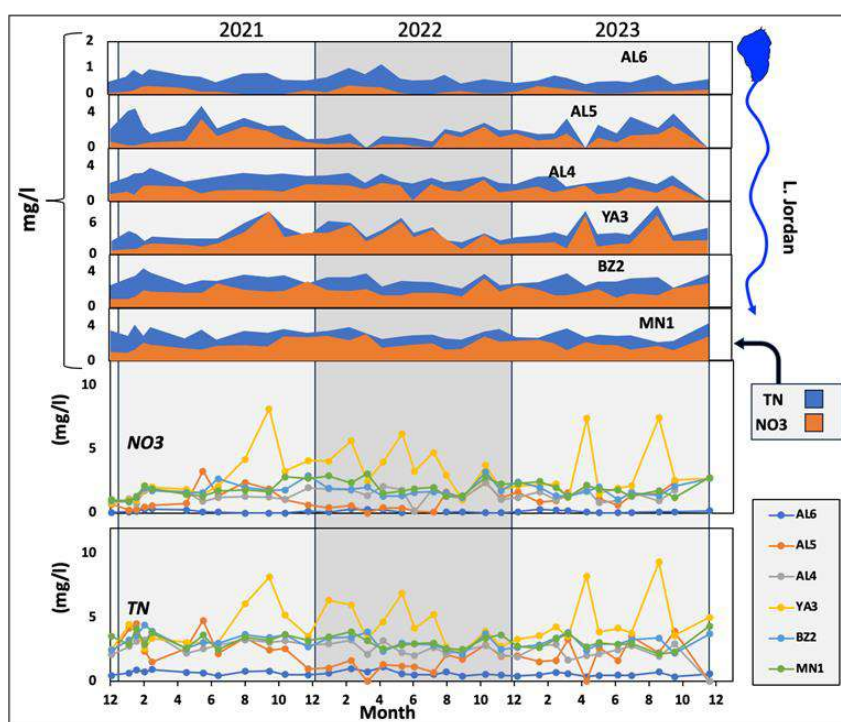
איור 115: כימות מקורות זיהום צואתי לאורך הירדן הדרומי בשיטת (MST) microbial source tracking. ריכוז הסמנים הגנטיים לזיהום ממקור אדם (BacH), בקר (BacR) וחזיר (Pig2) נקבע בעזרת qPCR כמותי והתוצאות מוצגות כמספר העתקים במ"ל שהתקבל בכל אחת משש תחנות הניטור לאורך תקופת הסקר. הערך המוצג הוא ממוצע של שלוש חזרות טכניות.

גיאוכימיה: שנת 2023 הייתה השנה השלישית של הניטור הגיאוכימי המתמקד בצורוני הנוטריינטים הראשיים, חנקן זרחן וכן בחומר מרחף כללי ואורגני. איורים 116 ו-117 מראים את ריכוזי החנקן הכללי (TN) מול הצורון ניטראט (NO3) ושל הזרחן הכללי (TP) מול הצורון המומס הריאקטיבי (SRP) בהתאמה. למרות השונות בריכוזי צורוני החנקן והזרחן לאורך שלוש השנים וגם במהלך שנת 2023, המאפיינים העיקריים של התפלגות הצורונים נשאר דומה.

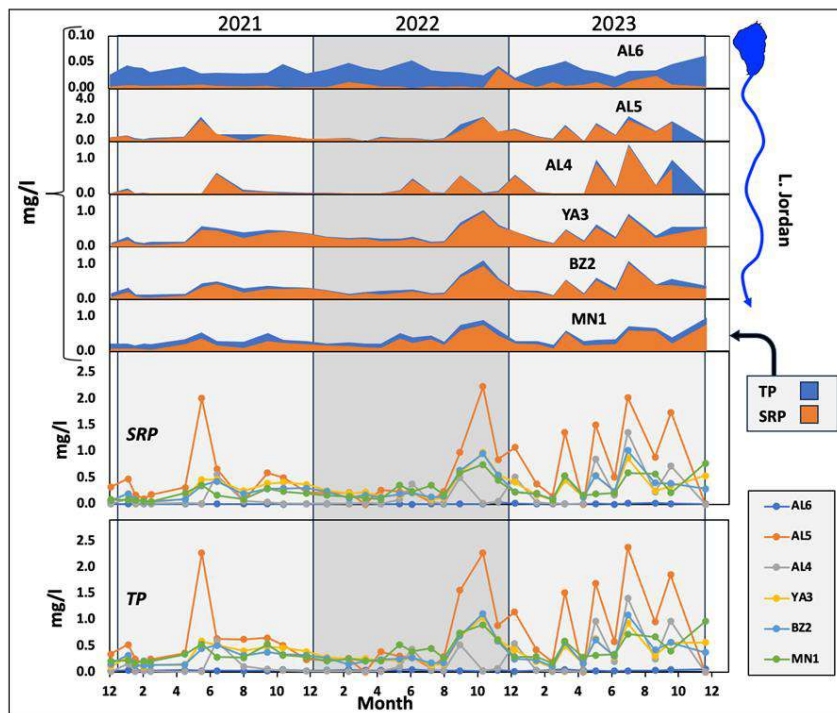
חנקן כללי במי הירדן הדרומי היה ברובו מומס והפאזה השולטת הייתה ניטראט, אם כי החלק של ניטראט מתוך החנקן כללי היה בין 50%-65% עבור תחנות AL5 ומטה עד MN1 לעומת תחנות אלומות (AL6) שבה היחס היה נמוך בהרבה ועמד על כ-20%. יש לזכור כי גם הריכוזים של צורוני החנקן בתחנות אלומות היו נמוכים בהרבה מהתחנות במורד (איור 116). מגמות השתנות רב-שנתיות חשובות מיוצגות בשתי תחנות AL5, ו-YA3. לאורך השנים 2021 – 2022 ניתן לראות בתחנה AL5 (מתחת לשפך ביתניה) תחלופה בין תקופות בהן ריכוזי ניטראט בהם סדר גודל של 1-3.3 מ"ג/ליטר לתקופות בהם היה נמוך מ-1 ואף מ-0.5 מ"ג/ליטר. שנת 2023 לעומת זאת הציגה ברובה ריכוזי ניטראט גבוהים

בין 1 ל- 2.5 מ"ג/ליטר. תצפית המצביעה על ירידה באיכות המים הנתרמים משפך מט"ש ביתניה אל הירדן. תחנה YA3 המייצגת את תרומת היבנאל מראה לאורך שלוש השנים גם היא השתנות בין תקופות עם ריכחי חנקן משמעותיים (ניטראט מעל 4 מ"ג/ליטר) לבין תקופות עם ניטראט נמוך בהרבה, בסדר גודל של 2 מ"ג/ליטר. לא נראה כי 2023 בתחנה זו התאפיינה בריכחים גבוהים יותר או לאורך זמן ארוך יותר.

עיקר הזרחן במים בכל התחנות, למעט סכר אלומות (AL6), היה זרחן מומס ומתוכו הפאזה הדומיננטית הייתה זרחן מומס ריאקטיבי (איור 117). ניתן לראות כי בדומה למצב עבור חנקן, מי תחנת אלומות שמרו לאורך כל השנה על ריכחי זרחן מאד נמוכים ביחס לתחנות במורד בהתאמה למקורם כמי כנרת ששהו בירדנית. תחנה AL5, במורד משפך מט"ש ביתניה הייתה התחנה עם ריכחי הזרחן הגבוהים ביותר. בתחנות במורד מתחנת סכר אלומות, AL5 עד קצה אזור הניטור- תחנת מנחמיה (MN1), הריכחים בשנתיים הקודמות 2021-2022 התאפיינו בריכחי רקע נמוכים יחסית עם שיאי זרחן בחצי השני (2021) או בשליש האחרון (2022) של השנה. שנת 2023, לעומת זאת התאפיינה בסדרת שיאים עבור כל התחנות והמשיכה את הערכים הגבוהים של סוף 2022 ברב חלקי השנה בסדר גודל דומה או אף מעט גבוה משיאי השנתיים הקודמות (למשל בתחנת AL4, איור 117 פאנלים עליונים).



איור 116: ריכחי חנקן כללי (TN) וניטראט (NO3) עבור תחנות הניטור בירדן הדרומי לאורך שלוש שנות הניטור. שני הפאנלים התחתונים מראים את השינויים בזרחן כללי ובזרחן מומס ריאקטיבי עבור כל 6 התחנות. הפאנלים העליונים מראים את השינוי בזמן בריכחים של הזרחן הכללי והמומס הריאקטיבי והיחס ביניהם עבור כל תחנה.



איור 117: ריכוזי זרחן כללי (TP) וזרחן מסיס ריאקטיבי (SRP) עבור תחנות הניטור בירדן הדרומי לאורך שלוש שנות הניטור. שני הפאנלים התחתונים מראים את השינויים בזרחן כללי ובזרחן מומס ריאקטיבי עבור כל 6 התחנות. הפאנלים העליונים מראים את השינוי בזמן בריכוזים של הזרחן הכללי והמומס הריאקטיבי והיחס ביניהם עבור כל תחנה.

4.3 ניטור מעיינות הגולן

במימון חיא"ל

ירון בארי-שליון, ניר קורן, רות נ. קפלן-

לוי, אלה אלסטר, אדית לייבוביץ

- לאחר שלוש שנות ניטור ניתן לאפיין מגמות גיאוכימיות עונתיות אופייניות ברב המעינות וכן את היחס האופייני בין מעיינות לבריכות במורד.
- עבור כל המעינות חנקן מומס מהווה את הפאזה העיקרית של החנקן ומתוכו ברב המקרים ניטראט הוא הצורן הבולט. בזרחן מגמות דומות בהן זרחן מומס ריאקטיבי שולט רב הזמן אולם בולטים אירועים עם שיאי זרחן כללי גבוהים ללא עליה בזרחן מומס.
- רמת הזיהום האורגני ברוב מעיינות הגולן הינה בינונית לאורך השנה, מלבד עין פיק בו צפינו במינים אינדיקטורים לזיהום אורגני גבוה בנביעה שהחל כנראה בחודש אפריל ונמשך עד ספטמבר.



מטרת המחקר

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

רקע

פרויקט הניטור של מעיינות הגולן יצא לדרך בתחילת 2021 והוא פרויקט רב שנתי מתמשך. הניטור מתמקד כיום ב- 6 מעיינות המייצגים אזורים שונים בגולן: (1) עין פיק, (2) עין ג'וחדר (עין אורחה), (3) עין ג'ואיחה, (4) עין נמרוד, (5) עין דרבשיה ו (6) עין פיט מעיין חדש שהצטרף לסט באוגוסט 2023

(איור 118). סט המעיינות צפוי להתרחב עוד בעתיד ולכלול מעיינות נוספים. בשלוש מהמעיינות: פיק, ג'וחדר וג'ואיזה נדגמים מי המעיין ובמקביל מי בריכה בנויה מספר מטרים עד עשרות מטרים במורד.



איור 118: מפת דיגום מעיינות גולן.

שיטות

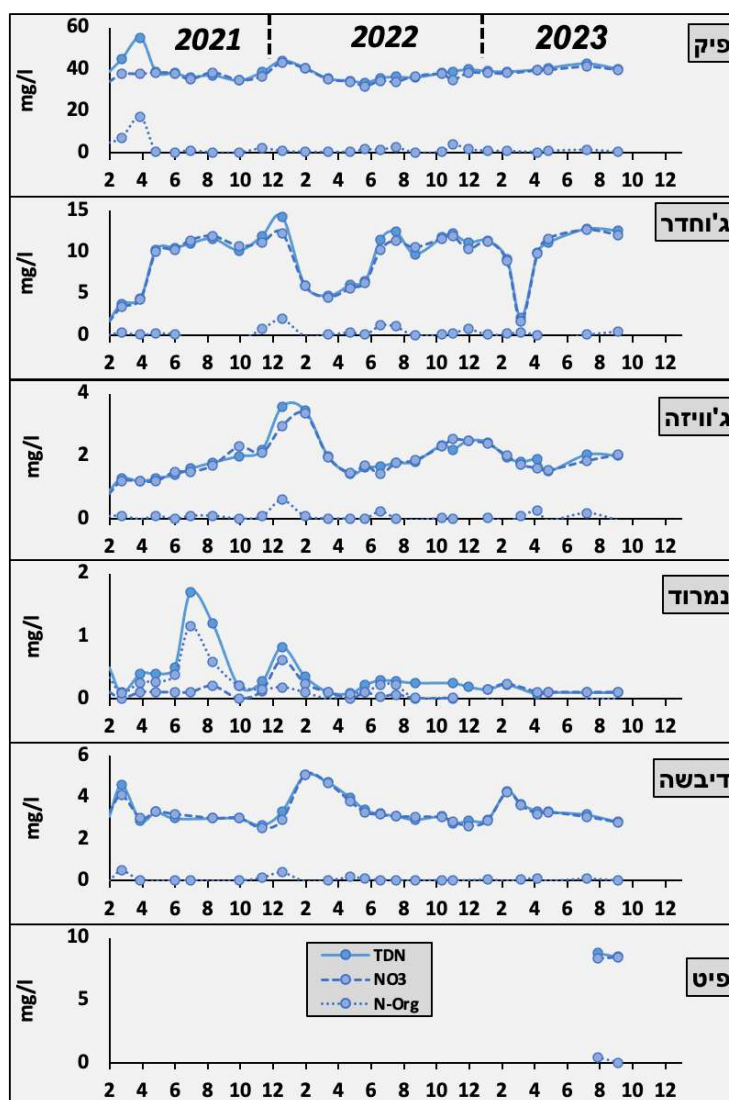
דיגום מים ודוגמאות פיטובנתוס בוצע במעיינות כל חודש ובבריכות הנלוות כל מספר חודשים. דיגום הפיטובנתוס התבצע בבריכות המעיין, על ידי גירוד ביופילם מקירות הבריכה. אנליזות לגיאוכימיה והתפלגות אצות (פיטובנתוס) בוצעו במעבדה לחקר הכנרת, חיא"ל (ראו פרק קודם - ניטור ירדן דרומי).

תוצאות ודיון

א. גיאוכימיה:

ההרכב הגיאוכימי של סדרת המעיינות והבריכות הנלוות לאורך שנת 2023 היה שונה בין המעיינות השונים המנוטרים בפרויקט זה. יחד עם זאת, המגמות העיקריות היו דומות בין המעיינות, וכן היחס בין המעיינות לבריכות. כך למשל בכל המעיינות עיקר החנקן (הכללי) נמצא בפאזה המומסת (חנקן כללי מומס) אשר הוצגה ברובה ע"י ניטראט (איור 119) למעט עין נמרוד שם הצורן הבולט היה חנקן אורגני.

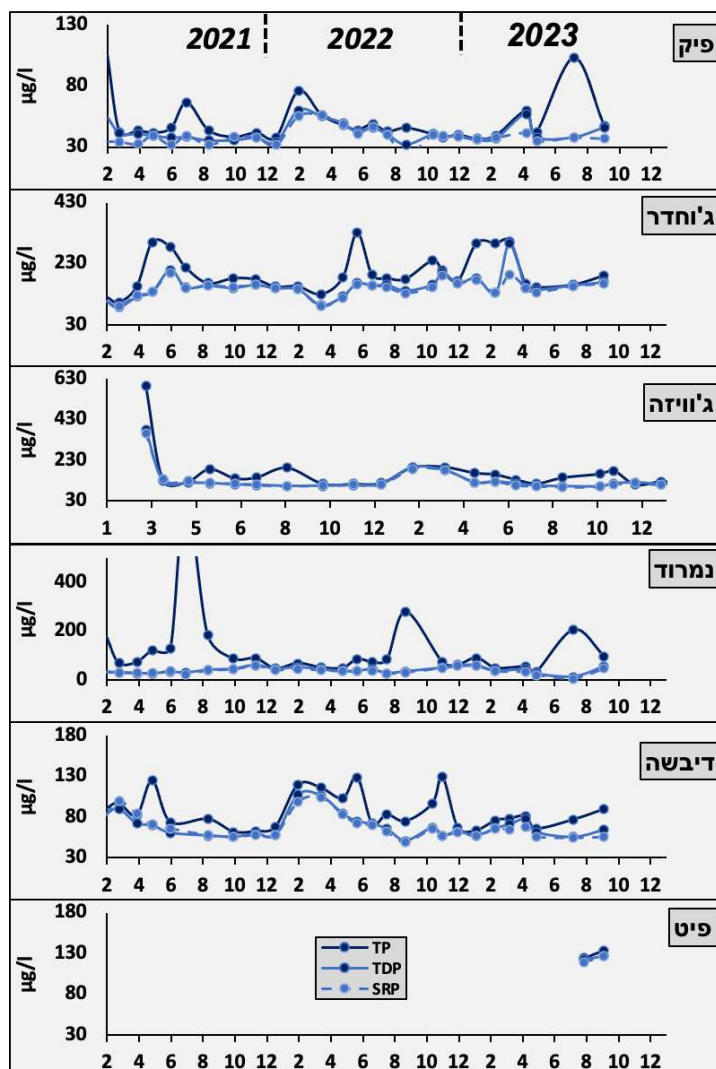
גם בזרחן הפאזה המומסת שלטה רב הזמן ברב המעיינות, ובה הזרחן המומס הריאקטיבי בלט (למעט עין דבשה) אולם בולטים אירועים בהם הייתה עליה גדולה בזרחן הכללי ללא עליה במומס- כלומר אירועים בהם הייתה פאזת זרחן חלקיקי משמעותית – כנראה הרחפה של חומר אורגני (איור 120).



איור 119: גיאוכימיה של מעיינות הניטור. צורוני חנקן מומס, מומס אורגני, וניטראט.

השוואה בין שלוש שנות הניטור מראה בחלק מהמקרים תבניות שנתיות אחדות המעידות כנראה על התנהגות האקוויפר. כך למשל ניתן לראות בחנקן (איור 119) מחזור שנתי במעין הג'וחדר ובמידה מסויימת בג'וויזה שבו ריכחי החנקן צונחים משמעותית בחורף-אביב. בדיבשה ירידה זו נמשכה אל תוך הקיץ. לעומת זאת עין נמרוד ועין פיק לא הראו התנהגות כזו ובעין נמרוד הייתה ירידה ארוכת טווח בריכחי החנקן. מבין המעיינות אשר נוטרו בפרויקט, עין פיק בלט עם מוליכות חשמלית גבוהה (עד כ- 1100-1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ לעומת כ- 200-400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ עבור שאר המעיינות). בשנת 2022 חלה ירידה

משמעותית בערך זה ובסופה ואל תוך 2023 הייתה התייצבות מחדש לערכים הדומים לשנת 2021. עין פיק גם בלט בחנקן גבוה יחסית לשאר המעיינות אך ללא זרחן גבוה במקביל (איורים 119 ו-120).

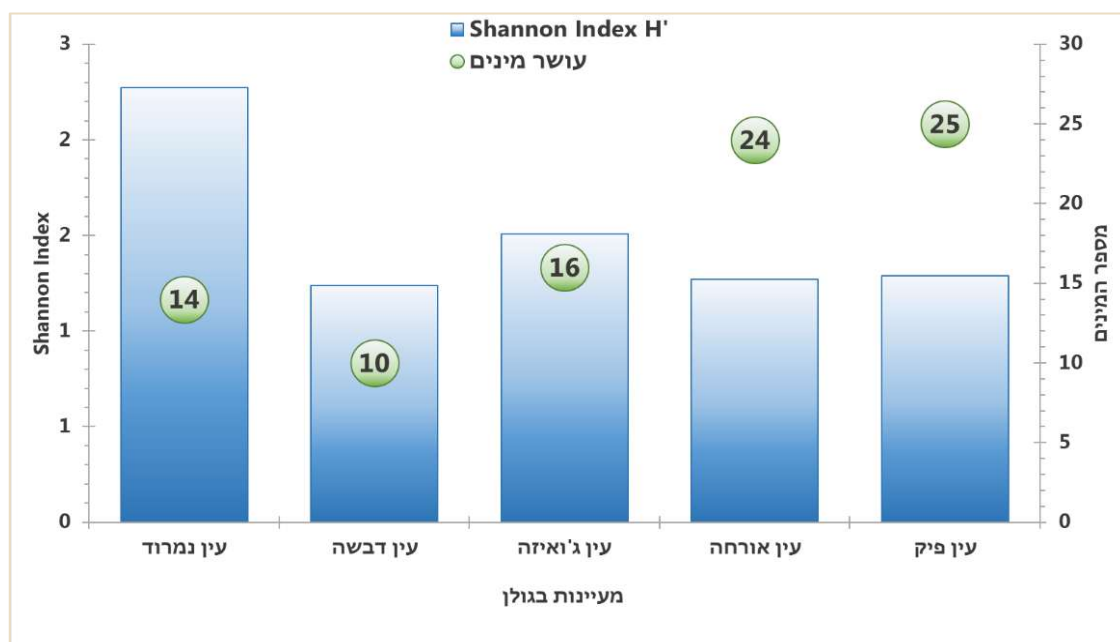


איור 120: גיאוכימיה של מעיינות הניטור. צורוני זרחן : זרחן כללי, מומס ומומס ריאקטיבי.

ב. פיטובנתוס

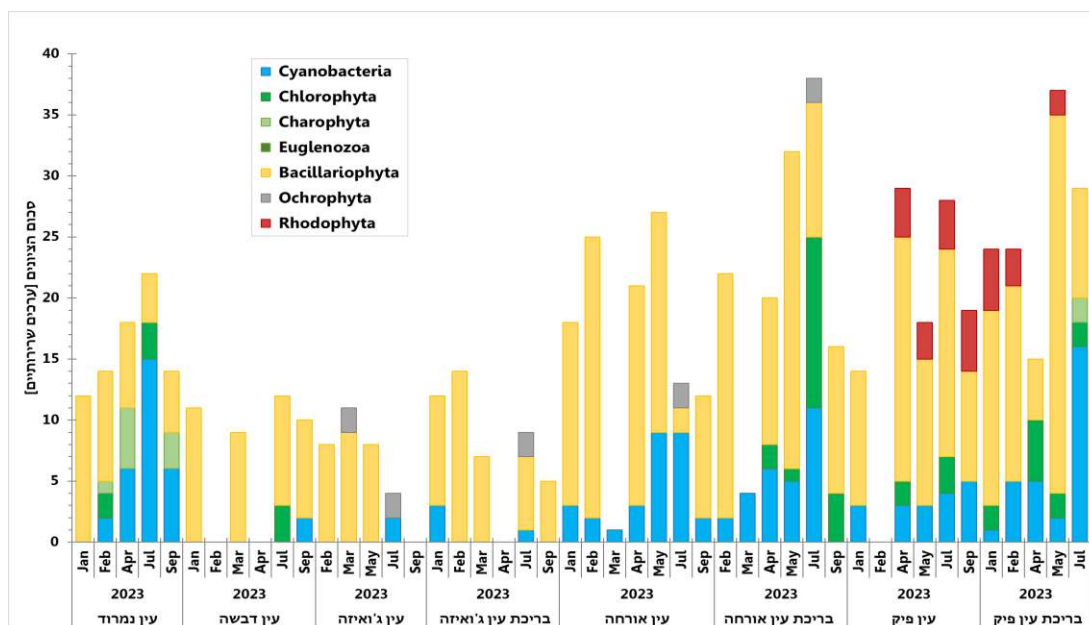
במהלך 2023 נצפו סה"כ 44 מיני פיטובנתוס (או אצות אפיפיות) בשבעת המעיינות שנבדקו השנה יחד, לעומת 54 מינים בשנת 2022. עושר המינים הגדול ביותר נצפה בעין פיק עם 25 מינים (איור 121). אחריו עין אורחה עם 24 מינים, עין ג'וויזה עם 16, עין נמרוד עם 14 מינים ובעין דבשה נצפו 10 מיני פיטובנתוס בלבד. מינים אלה שייכים ל- 6 מערכות שונות: כחוליות (ציאנובקטריה), ירוקיות (Chlorophyta), נאוויתניות (Charophyta), צורניות (Bacillariophyta), Ochrophyta (למערכה זו שייכות אצות זהוביות) ואדומיות (Rhodophyta). כאשר הצורניות מהוות את המערכה העיקרית בחברת הפיטובנתוס של כל המעיינות (איור 122). עם זאת, לכל מעיין יש את מגוון הפיטובנתוס האופייני לו

(Shannon Index) (איור 121). לדוגמא, *Audouinella hermannii* הינה האדומית היחידה שזוהתה במעיינות, ונצפתה אך ורק בעין פיק. בנוסף, ניתן לראות כי בעוד עין פיק הוא בעל עושר המינים הגדול ביותר, החברה בעין נמרוד היא המגוונת ביותר.



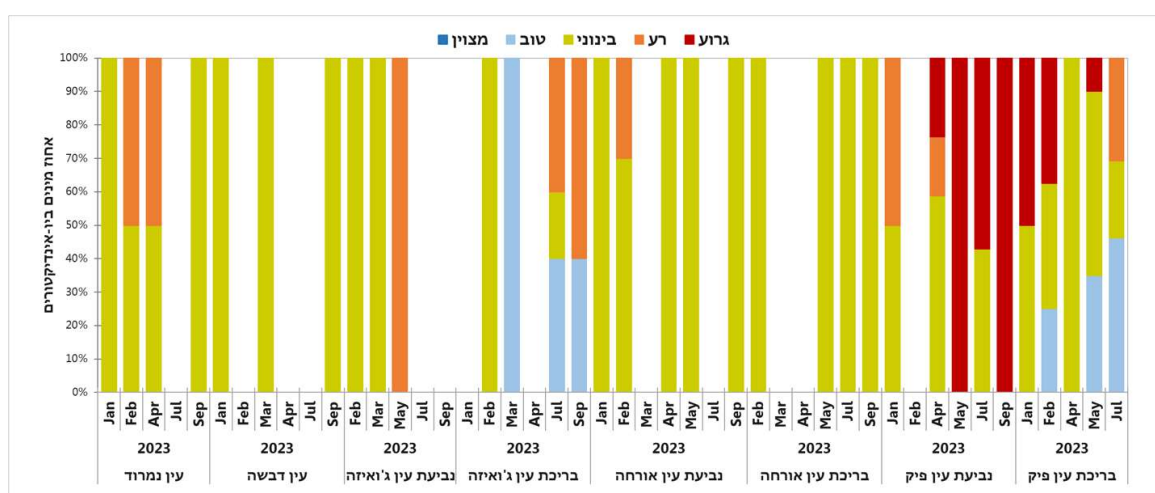
איור 121: עושר ומגוון מיני הפיטובנתוס במעיינות הגולן לפי Shannon Index. ציר Y שמאלי מראה את ערכי מגוון המינים על פי מדד Shannon, ציר Y ימני מראה את עושר המינים בכל מעיין (ציר X).

התפוצה היחסית של הפיטובנתוס לאורך שנת 2023 בכל מעיין מוצגת באיור 122. בהסתכלות שנתית על העונתיות של האוכלוסיות ניתן להבחין שמערכת הצורניות לרוב דומיננטית בכל המעיינות לאורך השנה, כאשר מופע מינים ממערכת הציאנובקטריה מתגבר בחודשים החמים. בחודשים מאי-יולי בהם כמות המטיילים בגולן גדלה, ניתן לצפות בשינויים במגוון חברת הפיטובנתוס בעיקר במעיינות בהם ישנה בריכה.



איור 122: תפוצה יחסית של מיני פטובנטוס במעיינות הגולן לאורך שנת 2023.

מתוך רשימת מיני הפטובנטוס והתפוצה היחסית שלהם ניתן לחשב את מדד איכות המים עבור המעיינות (איור 123). מדד זה נקבע על פי מינים אינדיקטורים, תוך שימוש במדד Saprobity של כל מין. מדד הספרוביות מראה את יכולת המערכת של גוף המים הנבדק לווסת את עצמו ולפרק חומרים אורגניים. לפי שיטה זו רואים כי רמת הזיהום האורגני ברוב מעיינות הגולן הייתה בינונית לאורך השנה, מלבד עין פיק בו צפינו במינים אינדיקטורים לזיהום אורגני גבוה בנביעה, שהחל כנראה בחודש אפריל ונמשך עד ספטמבר.



איור 123: מדד לאיכות המים במעיינות הגולן לשנת 2023 על פי מינים אינדיקטורים. בתחנות שלא מצוין מדד זה לא נמצאו מינים אינדיקטורים ידועים. מדד איכות המים עלול להשתנות בעקבות שינויים בהגדרת האצות לרמת המין.

4.4 ניטור פיטופלנקטון, זואופלנקטון ודגים באגמון החולה

במימון מיג"ל

רות נ. קפלן-לוי, אלה אלסטר, שרון

וורולקר, גדעון גל, דוד קמינגס,

הוד פרוייליך, תמר זהרי

- הפיטופלנקטון של האגמון מאופיין בעושר של צורניות, ירוקיות, ועינניות (Euglenozoa) והזואופלנקטון בעושר של גלגליות. אלו גם היו הקבוצות עם ריכוזי הפרטים הגבוהים ביותר.
- כמו בשנתיים הקודמות, ריכוזי הכלורופיל, מגוון המינים וריכוזי הפרטים של הפיטופלנקטון והזואופלנקטון במוצא האגמון היו גבוהים בהרבה מאשר בכל התחנות האחרות. תחנות הפרשל וכניסת הירדן היו דלות במיוחד בפלנקטון. רב הדגים שנתפסו באביב 2023 היו שייכים ל-2 מתוך 15 מיני דגים שנמצאו באגמון: יבלסת מצוייה וגמבוזיה.
- כניסת הירדן והתעלות הצפוניות המשיכו להוות בית גידול ייחודי לדגים מהמינים היותר נדירים ויש לשמור עליהם מפני התייבשות ותשטיפי חקלאות.



נקודת הדיגום במוצא האגמון. צילמה: תמר זהרי.

מטרה

מעקב אחר הפיטופלנקטון, הזואופלנקטון והדגים באגמון על מנת ללמוד את מורכבות מארג המזון ולזהות שינויים בהרכב המינים ובמערכת האקולוגית.

רקע

מערכות אקולוגיות של מים מתוקים הן בין המערכות האקולוגיות המאוימות ביותר בעולם מבחינת זיהומים, הרס בתי גידול, שינויי אקלים ועוד. כל אלו משפיעים בצורה משמעותית על המגוון הביולוגי המתקיים בהן. שינויים ואובדן של המגוון הביולוגי משפיעים 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 אקוטיות ולכן בעל תפקיד מרכזי במארג המזון. שינויים בהרכב המינים והביומסה שלהם משפיעים על המערכת האקולוגית ועל איכות המים. הזואופלנקטון משמש כמקור מזון לדגים, כצרכן ראשוני ושינויי אשר ניזון מרעיית פיטופלנקטון או מטריפת זואופלנקטון אחרים, וכחלק ממעגל הנוטריינטים, כאורגניזמים המפרישים למים חומרים אורגניים ואנאורגניים בכמות המהווה חלק משמעותי ממאגר הנוטריינטים. הדגים, ברמה טרופית גבוהה עוד יותר, ממלאים תפקידים שביניהם צרכן ראשוני ושינויי ועד טורפי-על. הם ניזונים מאצות וחסרי חוליות בפלנקטון ובבנתוס, ומטריפת דגים אחרים. אגמון החולה מהווה מערכת אקוטית ייחודית ואתר תיירותי המושך מאות אלפי מבקרים בשנה. האגם הקטן (~ 1.1 ק"מ²) והרדוד (עומק > 0.5 מ') הוקם ב-1994 במסגרת פרויקט שיקום החולה. האגמון מקבל את עיקר מימיו מתעלת ניקח ("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 ב-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. לאחר הפסקה של שנתיים בתחילת 2021 חודשה תכנית הניטור על כל מרכיביה, כאשר המעבדה לחקר הכנרת אחראית על ניטור הפיטופלנקטון, הזואופלנקטון והדגים. בדו"ח זה מוצגות תוצאות הניטור שביצענו בשנת 2023.

שיטות

מהלך הדיגום:

דוגמאות לבדיקת ריכוזי כלורופיל ולזיהוי וספירת פיטופלנקטון חואופלנקטון נאספו מדי חודש על ידי דנה קליין ממיג"ל ב-4 תחנות: פרשל, כניסת הירדן המשוחזר לאגמון, תעלה 101 ומוצא האגמון (איור 124). מים נאספו מהחוף בכד פלסטיק. לכלורופיל נדגמו 25 מ"ל, ב-3 חזרות, סוננו על פילטרים GF/C והוקפאו ב-20°C, עד להמשך טיפול. לפיטופלנקטון, 100 מ"ל של מים שומרו בלוגול בבקבוק כהה. לזואופלנקטון, 5 עד 15 ליטר מי אגמון (תלוי בריכוז האורגניזמים בתחנת הדיגום) סוננו דרך רשת של 64 מיקרון לתוך בקבוקון של 22 מ"ל. הזואופלנקטון שנאסף קובע באתנול 99.5% והוכנס לצידינית מקוררת.



איור 124: מפת האגמון ומיקום תחנות הדיגום בשנת 2023. תחנות לפיטופלנקטון, כלורופיל חואופלנקטון - 4 העיגולים הצהובים שסביבם פס אדום. תחנות לדיגום דגים באלקטרושוקר - עיגולים צהובים (כולל תחנות דיגום הפלנקטון). מיקום התחנות ושמותיהן בטקסט: 1. הגן הבוטני. 2. הכניסה לאגמון. 4. מוצא האגמון (בתוך גוף המים). 5. תעלה האפס (בתעלה מחוץ לגוף המים). 6. ירדן צפונית חדשה (מחוץ למפה). 7. פרשל (מחוץ למפה). 8. תעלה 101. 9. תעלה מערבית מחברת (מחוץ למפה). משולשים אדומים - מיקום פריסת 5 רשתות נורדיות לתפיסת דגים בגוף המים באביב 2023.

דגים נדגמו באביב (אפריל 2023) בשתי שיטות שמסלמות זו את זו: באלקטרושוקר (דגם EL64IIIGI מתוצרת חברת Hans Grassl GmbH גרמניה) וברשתות נורדיות, בתחנות המצוינות באיור 124. דיגום נוסף בסתיו לא יצא לפועל ב-2023 מסיבות ביטחוניות. אתרי הדיגום שנבחרו לדיגום באלקטרושוקר מייצגים את מגוון בתי הגידול האקוויטיים באגמון ובגופי המים שבקרבתו (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 בשיטה זו זוהו ונמדדו בשטח והוחזרו למים כאשר מרביתם במצב טוב או שנלקחו בצידניות עם קרח למעבדה לחקר הכנרת להמשך זיהוי ומדידות.

דיגום דגים באמצעות רשתות נורדיות, בוצע בלילה של ה-19 לאפריל 2023 בקרבת כניסת הירדן וגם בתעלה ההיקפית שבצד המזרחי של האגמון (איור 124). הדיגום ברשתות משלים את הדיגום במכשיר החשמלי בכך שנתפסים ברשתות דגים מכל מנעד הגדלים כמו גם מינים שבורחים מהזרם החשמלי. בדיגום נפרסו חמש רשתות למשך 13 שעות בין 17:00 אחה"צ עד ל-6:00 בבוקר שלמחרת. הדגים שנתפסו הוכנסו לצידניות עם קרח והובאו למעבדה לחקר הכנרת לזיהוי ומדידות. בכל נקודת דיגום נמדדו גם תנאים אביזטיים (טמפרטורה, pH וחמצן מומס) ע"י מכשיר Eureka Manta2.

אנליזות

כלורופיל: הפילטרים הקפואים והדוגמאות המשומרות הועברו למעבדה לחקר הכנרת. הפילטרים שימשו למדידה פלואורומטרית של ריכחי הכלורופיל לאחר מיצוי באצטון 90% (כנהוג בניטור כנרת). **פיטופלנקטון:** עשרה מ"ל של דוגמאות משומרות בלוגל נבדקו תחת מיקרוסקופ הפוך לאחר 24 ש' השקעה בתאי שיקוע והאצות זוהו לרמת המין או הסוג על פי הספרות הטקסונומית המקובלת. כל מין שנמצא בדוגמא קיבל ציון בין 1 (נדיר) ל-6 (דומיננטי ונפוץ מאד). ציונים אלו הוחלפו באומדן ריכח יחידות הפיטופלנקטון (טבלה 8), כלומר מספר התאים (במינים של תאים בודדים) או המושבות (במינים מושבתיים, כולל חוטיים) במ"ל, בהתבסס על הקשר בין הציונים לריכחים מדודים של יחידות הפיטופלנקטון, שהוצג על ידי Alster et al (2023). את מספר יחידות הפיטופלנקטון למ"ל חיברנו עבור כל המינים מכל קבוצה טקסונומית (כחוליות, צורניות, ירוקיות וכן הלאה) או קבוצה אינדיקטורית לקבלת אומדן לריכח המשוער של סך יחידות הפיטופלנקטון בכל קבוצה. להערכת איכות מי האגמון בהתבסס על מינים אינדיקטוריים של פיטופלנקטון שנמצאו בדוגמא, השתמשנו ברשימה של Barinova (2017), הכוללת מעל 8000 מינים של אצות וציאנובקטריה, עליהם נאסף מידע לגבי העדפות אקולוגיות שלהם מתוך הספרות המדעית, כאשר לכל מין יש עדיפות אקולוגית לפחות לאחד מ-10 משתנים סביבתיים (Barinova and Fahima 2017). המינים האינדיקטוריים שנמצאו בכל דוגמא קובצו לקבוצות, לפי קטגורית איכות המים שהן מאפיינות, ולכל קבוצה חושב סך אומדן יחידות פיטופלנקטון למ"ל.

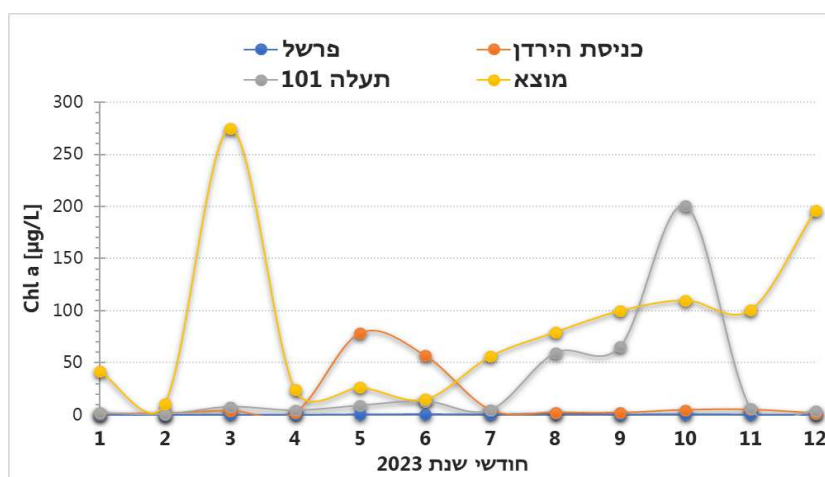
טבלה 8: סולם תדירות הופעת מינים בדוגמא נספרת לפי Alster et al (2023).

מספר יחידות פיטופלנקטון שנצפו	תדירות הופעתם	ציון	אומדן יחידות פיטופלנקטון למ"ל
0 יח' בתא שיקוע	לא הופיע	0	0
1-5 יח' בתא שיקוע	נדיר	1	11
6-15 יח' בתא שיקוע	מידי פעם	2	25
16-30 יח' בתא שיקוע	נפוץ	3	58
1 יח' בסטריפ	תכוף	4	133
מספר יח' בכל סטריפ	תכוף מאוד	5	305
מספר יח' בכל שדה תצוגה	שופע	6	701

זואופלנקטון: חלק יחסי של דוגמת הזואופלנקטון המרוכזת נצבע בצבען Eosin ונלקח לספירה מיקרוסקופית בהגדלה של 50x (קופודה וקלדוצרה) או בהגדלה של 100x או 200x (גלגליות = 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. **דגים:** הדגים שהובאו למעבדה זוהו לרמת המין, הזוויג, נמדדו (אורך כולל) ונשקלו.

תוצאות ודין

כלורופיל: ריכוז הכלורופיל בדוגמה מהווה אינדיקציה לביומסת הפיטופלנקטון במים. גם בשנת 2023, כמו בשנתיים הקודמות, ריכוזי הכלורופיל הגבוהים ביותר נרשמו במוצא האגמון (איור 125), אם כי ב-2023 נרשמו ערכים גבוהים גם בכניסת הירדן (במאי ויוני) ובתעלה 101 (מאוגוסט עד אוקטובר). לאורך כל השנה הריכוזים בפרשל היו נמוכים בסדרי גודל מהריכוזים בשלושת אתרי הדיגום האחרים. גם השנה, כמו בעבר, נרשמה באביב רמת כלורופיל נמוכה בכל התחנות (מלבד כניסת הירדן). סביר שבאביב רוב הכלורופיל באגמון נמצא במרבדים של אצות בנתוס, אבל מרכיב זה של האקוסיסטמה לא נדגם.



איור 125: ריכוזי הכלורופיל באגמון בתחנות הדיגום לאורך שנת 2023.

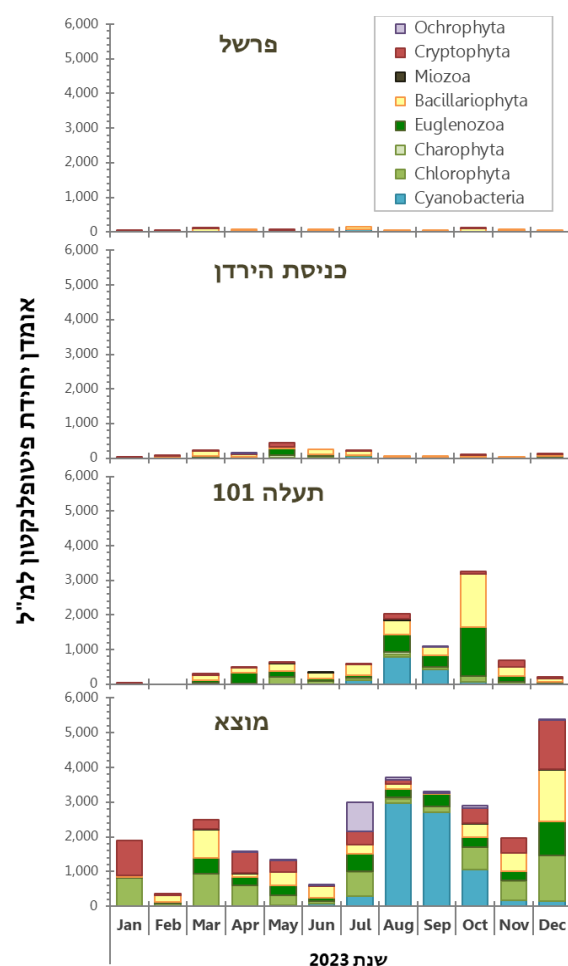
פיטופלנקטון - הרכב המינים: במהלך 2023 נצפו 110 מיני פיטופלנקטון בכל תחנות האגמון (טבלה 9), מתוכם 10 מינים חדשים, לעומת 136 מינים שזוהו בשנה שעברה. מיני הפיטופלנקטון שנצפו מסווגים בין 8 קבוצות טקסונומיות. עושר המינים הגדול ביותר נצפה בתחנת המוצא עם 92 מינים, אחריה תעלה 101 עם 58 מינים, ועושר המינים הנמוך ביותר נצפה בתחנת פרשל, עם 26 מינים מ-5 קבוצות טקסונומיות בלבד. בעוד שבתחנת מוצא האגמון הקבוצה העשירה ביותר הייתה הירוקיות (28 מינים) ואחריה העינניות (26 מינים), בשאר התחנות קבוצת הצורניות הייתה העשירה ביותר (טבלה 9).

טבלה 9: מספר מיני הפיטופלנקטון לפי מערכות, שנצפו במהלך 2023 בכל תחנות דיגום האגמון

פרשל	כניסת הירדן	תעלה 101	מוצא האגמון	מערכה	Division
2	4	5	12	כחוליות	Cyanobacteria
7	5	15	28	ירוקיות	Chlorophyta
0	1	2	3	נאוניתיות	Charophyta
4	9	12	26	עינניות	Euglenozoa
12	14	17	12	צורניות	Bacillariophytina

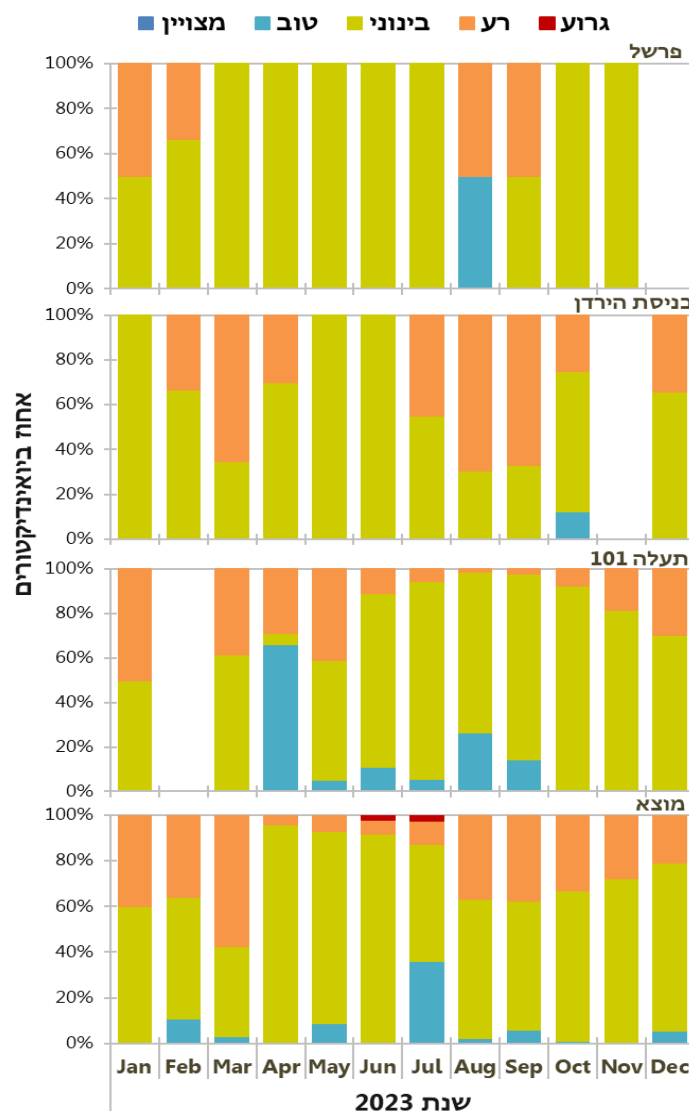
פרשל	כניסת הירדן	תעלה 101	מוצא האגמון	מערכה	Division
1	2	3	3		Cryptista
0	0	2	2	דינופלגטים	Miozoa
0	1	2	6		Ochrophyta
26	36	58	92	סה"כ	

חברת הפיטופלנקטון בתחנות הדיגום השונות: בתחנת פרשל וכניסת ירדן מספר מיני הפיטופלנקטון נמוך, כמו גם תפוצתם היחסית ביחס לתחנות תעלה 101 ומוצא האגמון (איור 126). בשתי התחנות האחרונות הרכב חברת הפיטופלנקטון מגוון יותר עם נציגות גדולה של ציאנובקטריה באוגוסט וספטמבר ונוכחות של Ochrophyta ודינופלגטים (Miozoa), שלא נצפו בתחנות הפרשל וכניסת הירדן.



איור 126: הרכב חברות הפיטופלנקטון באגמון, לפי חלוקה למערכות, בנקודות הדיגום השונות, במהלך 2023. מוצגים הרכב המינים וכמות האצות היחסית (על פי אומדן יח' פיטופלנקטון למ"ל) בכל תחנה.

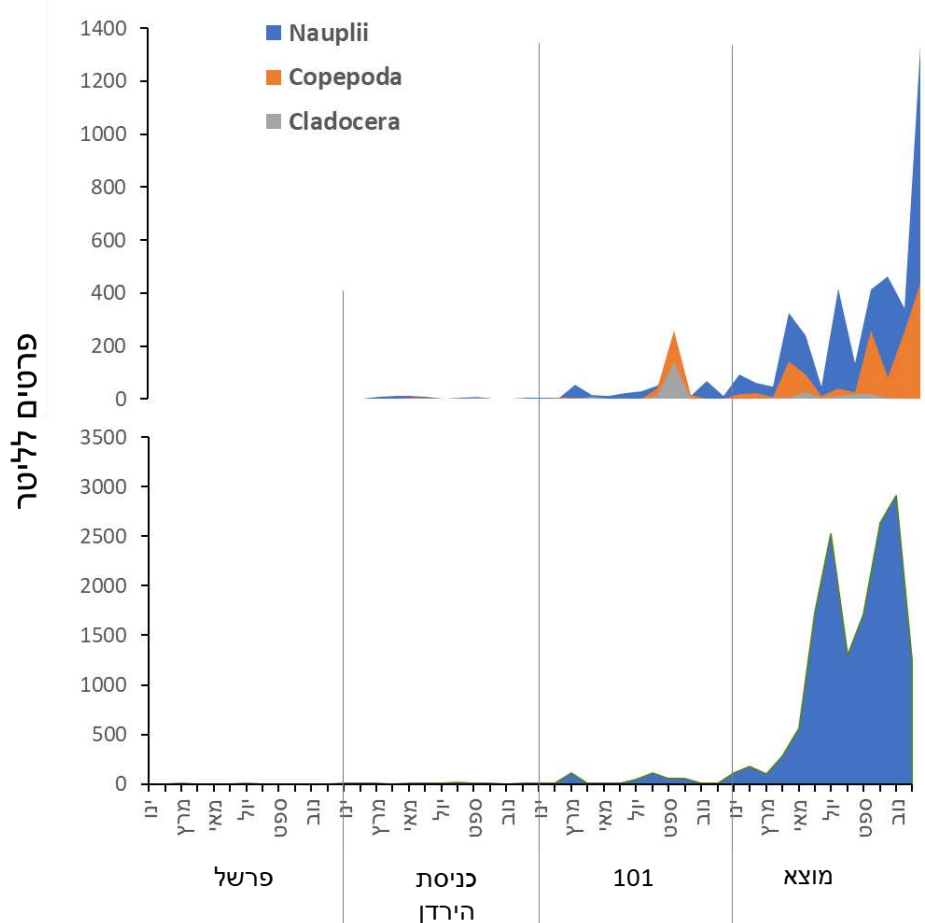
הערכת איכות מי האגמון על פי ביו-אינדיקציה (איור 127) מראה כי רמת הזיהום האורגני לשנת 2023 הייתה בינונית רוב השנה. בתחנת כניסת הירדן נכחו אינדיקטורים לזיהום אורגני בחודשים יולי-ספטמבר שעל פי המדד בתחנת מוצא האגמון נראה כי חל טיהור עצמי של המים במהלך שהותם באגמון.



איור 127: איכות המים בארבע תחנות דיגום באגמון בשנת 2023 על פי נוכחות מינים אינדיקטורים לכל קטגוריה של איכות מים (בין גרוע עד מצויין). מוצגת התרומה היחסית (באחוזים) של סך יחידות פיטופלנקטון למ"ל בכל קטגוריה. עמודה ריקה משמעותה היא שלא נמצאו מינים אינדיקטורים ידועים בדגימה.

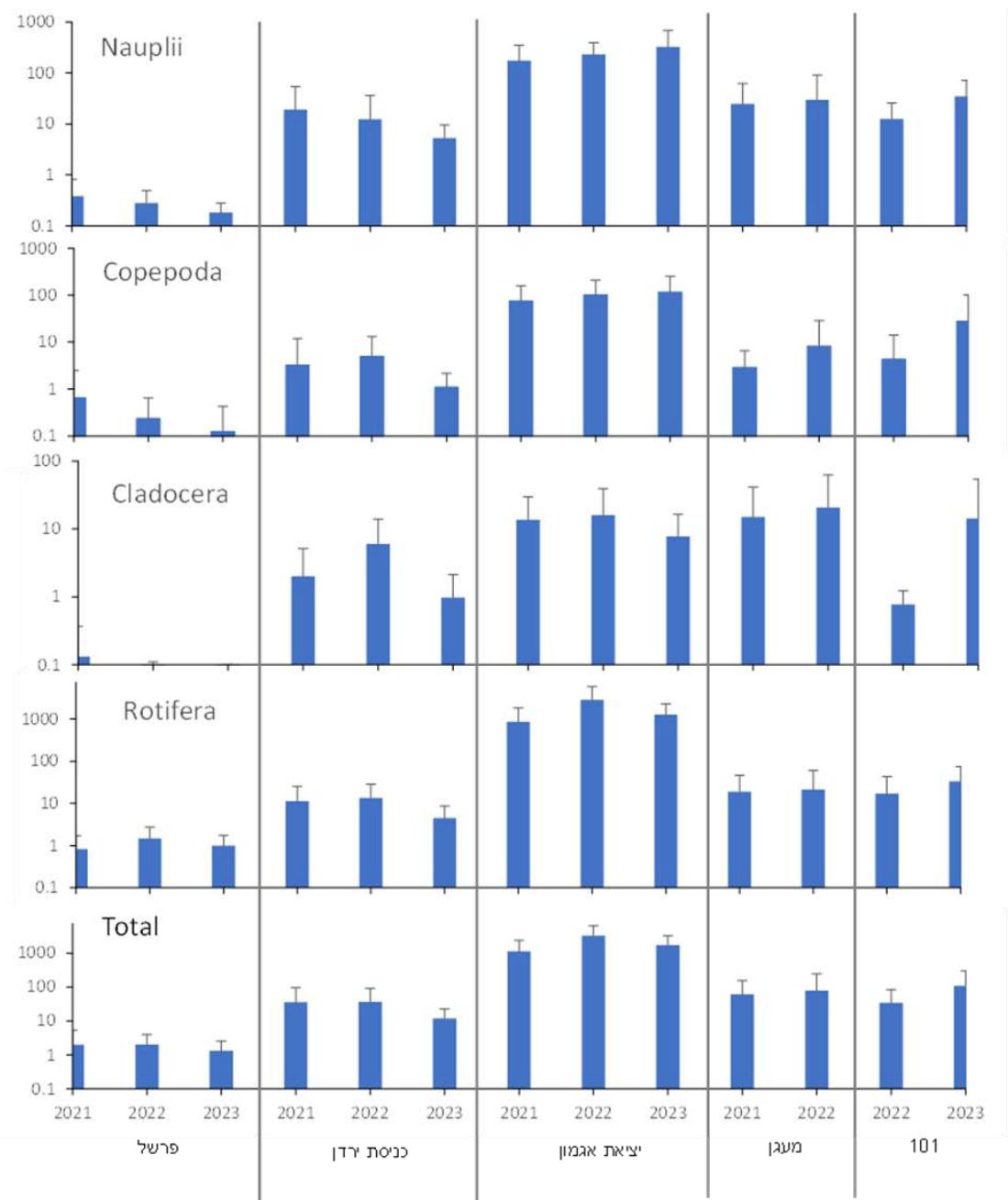
זואופלנקטון:

כמו שנמצא לגבי פיטופלנקטון, גם לגבי זואופלנקטון - באופן בולט, צפיפות הפרטים הגבוהה ביותר נרשמה בתחנת מוצא האגמון (איור 128), בה נצפו ערכים הגבוהים ב-2-3 סדרי גודל מאשר בכל התחנות האחרות. בתחנת פרשל נרשמה צפיפות הפרטים הנמוכה ביותר, עם צפיפות ממוצעת של פחות מ-3 פרטים לליטר. בהשוואה לאלפי פרטים לליטר ביציאה מהאגמון. ההבדל הגדול ביותר היה בריכוזי הגלגליות (Rotifera), שנמצאו בריכוזים של אלפי פרטים לליטר במוצא האגמון לעומת פרטים בודדים עד עשרות פרטים לליטר בתחנות האחרות.



איור 128: זואופלנקטון: צפיפות הפרטים מהקבוצות הטקסונומיות השונות לליטר, בכל תחנה עפ"י מועדי הדיגום ב-2023. הגרף התחתון מתייחס לצפיפות הגלגליות (רוטיפרים).

בממוצע, 70% מסה"כ הפרטים של זואופלנקטון אשר נספרו בשנת 2023 היו גלגליות. צפיפות הגלגליות הגבוהה ביותר נרשמה ב"מוצא האגמון" עם ממוצע של 1,273 פרטים לליטר שהיוו כ- 74% מכלל הזואופלנקטון בתחנה זו. גם בפרשל הגלגליות היו בריכים גבוהים יותר מאשר הקבוצות האחרות, בעוד שב-101 וכניסת הירדן צפיפות הנאופליי הייתה הגבוהה ביותר. ריכוז הדפנאיים בכל התחנות ובכל מועדי הדיגום היה נמוך (איור 128). מתוך השוואה בין תוצאות ניטור הזואופלנקטון במהלך שנת 2023 לשנים 2021-2022 בהן נערך ניטור במתכונת דומה למתכונת של שנת 2023 עולות מספר תובנות (איור 129). ראשית, ההבדלים הבולטים בצפיפויות הזואופלנקטון בין מוצא האגמון לשאר התחנות אינם הבדלים זמניים אלא מצב יציב שנמשך לאורך זמן. ההבדלים בולטים בשתי הקבוצות הנפוצות ביותר- הגלגליות והקופפודים (שטרגליים). מסכום התוצאות החודשיות בתחנות פרשל, כניסה, 101, מעגן, ומוצא האגמון ניתן לראות כי בשנת 2022 צפיפות הזואופלנקטון החודשית הייתה בממוצע $674 (\pm 605)$ פרטים לליטר, ערך גבוה בפקטור של 2.3 ביחס לשנת 2021 וב-46% ביחס לשנת 2023. יחד עם זה ניתן לזהות מגמה מסוימת של ירידה בצפיפות הזואופלנקטון בתחנת כניסת הירדן עם השנים לעומת עליה מתונה בתחנת 101, לפחות בשנת 2023 ביחס לשנת 2022.



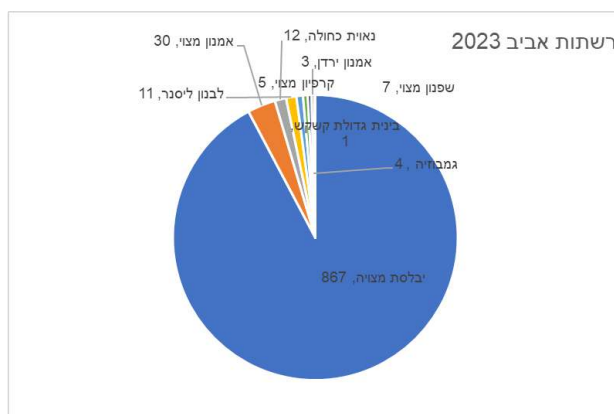
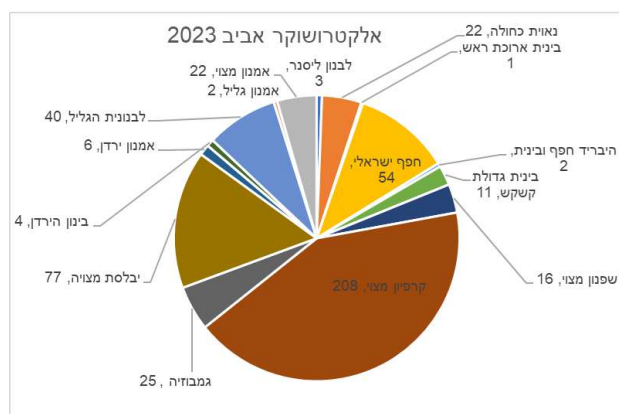
איור 129: צפיפות ארבע קבוצות הזואופלנקטון והסכום הכללי (ממוצע שנתי וסטית תקן) בשנים 2021-2023 בתחנות השונות. יש לשים לב כי הסקאלה בציר האנכי הינה לוגריתמית ושונה בין הקבוצות.

דגים:

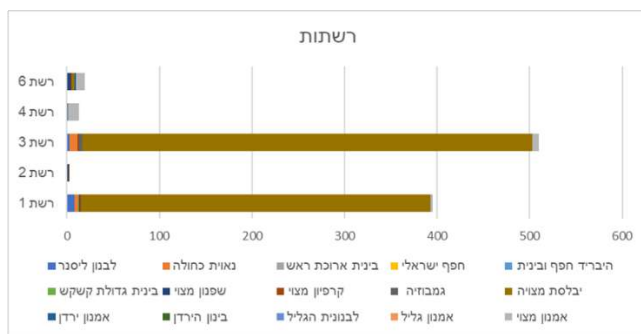
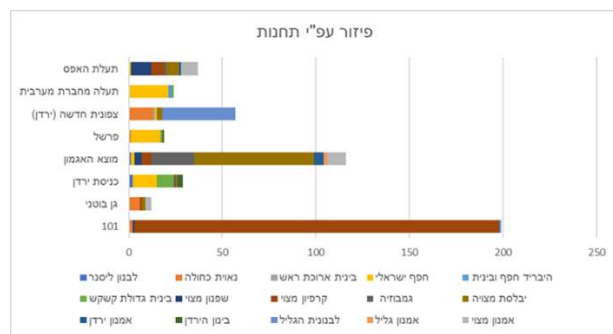
במהלך הסקר באביב 2023 נתפסו 1,433 דגים מ- 15 מינים. שמונה מינים שייכים למשפחת הקרפיוניים: קרפיון מצוי, בינית גדולת קשקש, בינית ארוכת ראש, חפף ישראלי, לבנון ליסנר, לבנונית הגליל, יבלסת מצויה. שלושה מינים שייכים למשפחת האמנוניים: אמנון מצוי, אמנון גליל ואמנון ירדן. ארבעת המינים הנותרים שייכים כל אחד למשפחה אחרת: משפחת הנאווייתיים יוצגה ע"י נאוויית כחולה, משפחת הבינוניים ע"י בינון הירדן, משפחת השפמנוניים ע"י שפמנון מצוי ומשפחת הגמבחיים ע"י הגמבחיה. מין אחד ממשפחת הקרפיונאים – עגלסת הנחלים שנמצא בעבר באגמון לא נמצא בדיגום השנה כמו בשנה

הקודמת, ואמנון הירדן שנוסף אשתקד לרשימת המינים באגמון בדיגום הסתיו נכח גם השנה בדיגום האביב (איור 130).

כשני שלישי מהדגים שנתפסו, 944 פרטים, היו מהמין יבלסת מצויה, מתוכם 867 פרטים נתפסו ברשתות הנורדיות 1,3. גם הקרפיון המצוי נתפס בכמויות משמעותיות, 213 פרטים, כאשר 97% מהם נדגמו בעזרת אלקטרושוקר בתעלה 101 (איור 131), לעומת 11 פרטים בלבד של מין זה שנתפסו בדיגום אביב 2022. השונות במספר הפרטים של המינים השונים שנלכדו ברשתות היתה גבוהה, עם ממוצע של 32.9 פרטים למין וטווח של 1-208 פרטים למין. המגוון הביולוגי הגבוה ביותר נמצא בתחנת מוצא האגמון (9 מינים), והנמוך ביותר נמצא ברשתות נורדיות 2,4 עם שני מינים בכל רשת (איור 131).



איור 130: חלוקת מיני הדגים שנדגמו בשיטת הרשתות (מימין) והאלקטרושוקר (משמאל) באביב 2023 לפי מספר פרטים.



איור 131: התפלגות המינים ומספר הפרטים שנתפסו (ציר איקס) ברשתות (מימין) ובאלקטרושוקר (משמאל) בתחנות השונות.

המלצות

- במידת האפשר, יש להוסיף תחנת דיגום לפיטופלנקטון ולזואופלנקטון במרכז האגם (דיגום מרחפן או מקיאק). באירועים יוצאי דופן, כמו אירוע פריחת העיניניות בכניסת הירדן ביוני, יש לקחת דוגמאות נוספות ממקום הפריחה. לתחנת המוצא מתנקזים המים מגוף המים כולו והיא המייצגת הטובה ביותר את הרכב הפלנקטון באזורים הפתוחים של גוף המים.

- 
- מומלץ להמשיך את ניטור הדגים בעזרת מכשיר הדייג החשמלי והרשתות הנורדיות כדי להמשיך ולייצר מסד נתונים ארוך טווח ככלי למעקב אחר שינויים בחברת הדגים באגמון ובסביבתו.
 - אתר כניסת הירדן והתעלות הצפוניות ממשיכים להוות נקודה חמה אקולוגית מבחינת חברת הדגים באגמון: כמו ב-2022, גם ב-2023 נתפסו בכניסת הירדן המספר הגדול ביותר של מינים שונים והמספר הגדול ביותר של פרטים של המין הנדיר, *בינון הידדן*. יש להמשיך ולשמר בתי גידול אלו לדגים, על ידי מניעת כניסת תשטיפי חקלאות, מניעת התייבשות, וניהול צמחיית הגדות. יש להמשיך גם את המעקב אחר האתרים בהם מתוכננת בניה של סולמות דגים כדי להעריך את תרומתם למגוון הביולוגי.

4.5 מידול ניהול מערכות מיטבי להידרולוגיה של אגן ההיקוות של הכנרת

במימון משרד המדע

אלעד בן צור, ירון בארי-שלוין, גדעון גל,

חיים גבירצמן (האונ' העברית)



דיגום במשועי זוויתן. צילום: עוז צברי דר, 27.05.24

- בשנה הראשונה נאספו נתונים הידרולוגיים ואקלימיים מכלל האזור ואורגנו כקלט למודלי הזרימה העילית ומי התהום.
- מודל SWAT כויל בהצלחה לגבי אגן הירדן ועוד עבודה דרושה בכיוול לגבי תתי אגנים קטנים יותר.
- מודל קונסטפטואלי - גיאולוגי - הידרולוגי של אקוויפר החרמון היווה בסיס להרצות מוצלחות של מודל MODFLOW במצב יציב ודינמי.

מטרת המחקר

מהות המחקר הינה בניית מודל הידרולוגי משולב לפני השטח ומתן קרקע ויישום של המודל המשולב לאגן ההיקוות של הכנרת. שילוב שני סוגי מודלים לזרימה עילית ולמי תהום, כיוול ואימות של המודל המשולב הם השלבים הראשונים המובילים לבחינת תרחישים. התרחישים שייבחנו יכללו את בחינת התגובה ההידרולוגית של אגן ההיקוות למגוון שינויים בלחצים אקלימיים (שינויי אקלים) ולחצים אנטרופגניים אחרים.

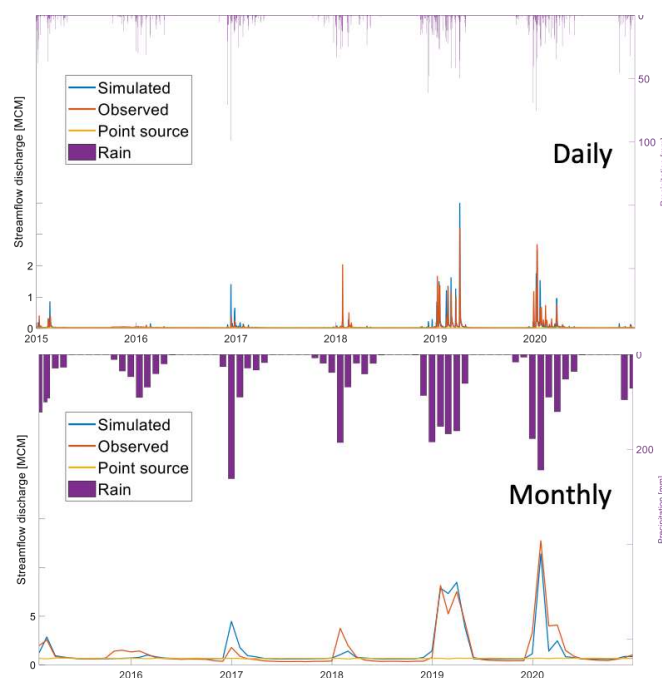
רקע

המחקר הנוכחי עוסק בבניה, כיוול והפעלה של מודל הידרולוגי משולב: זרימת פני שטח ומי תהום עבור אגן ההיקוות של הכנרת. המודלים כוללים את מודל SWAT לזרימת פני שטח, ושני מודלים אפשריים לעבודה

בתת קרקע, קרי עבור מידול מערכות מי התהום: MODFLOW ו-GWflow. הרצת תרחישי לחצים אקלימיים ואנתרופוגניים במודל המשולב יאפשר הבנה טובה יותר כיצד לחצים אלו משפיעים על המשטר ההידרולוגי של האגן. זוהי השנה הראשונה של הפרויקט.

תוצרי השנה הראשונה

השנה הראשונה של המחקר התמקדה באיסוף נתונים ממגוון מקורות וארגונו בפורמטים מתאימים למודלים. בשנה זו אספנו מידע הידרולוגי, בעיקר מהשירות ההידרולוגי הישראלי (רשות המים), כולל שפיעות של מעיינות, ספיקות בנחלים ומפלס בקידוחי תצפית. מידע נוסף לגבי מי תהום נאסף ממאמרים ודו"חות שונים כולל מלבנון וסוריה. מידע אקלימי נאסף והוערך מתחנות השירות ההידרולוגי באזור אגן ההיקוות של הכנרת וכן הוערכו מספר מודלים להערכת חוסרים במידע, אינטרפולציה בין תחנות ואקסטרפולציה בעיקר לאזור החרמון בו אין תחנות מטאורולוגיות עם מידע אמין לגבי משקעים. כמו כן, הערכת מודלים אקלימיים אלו תאפשר בחירת מודלים מתאימים אשר יאפשרו תחזית לעתיד ושינוי מגמות האקלים (בעיקר משקעים) כחלק מתרחישי אקלים שונים. לאחר איסוף וארגון הנתונים ביצענו כיוולים ותיקוף של מודל SWAT לזרימת פני שטח – בהצלחה טובה עבור תת אגן הירדן וכזו הדורשת שיפור עבור תתי אגנים קטנים יותר. איור 132 מציג את תוצאות המודל עבור השנים 2015-2020 ברזולוציות זמן שונות עבור אגן המשושים בהשוואה למדידות של השירות ההידרולוגי בתחנת המוצא של הנחל.

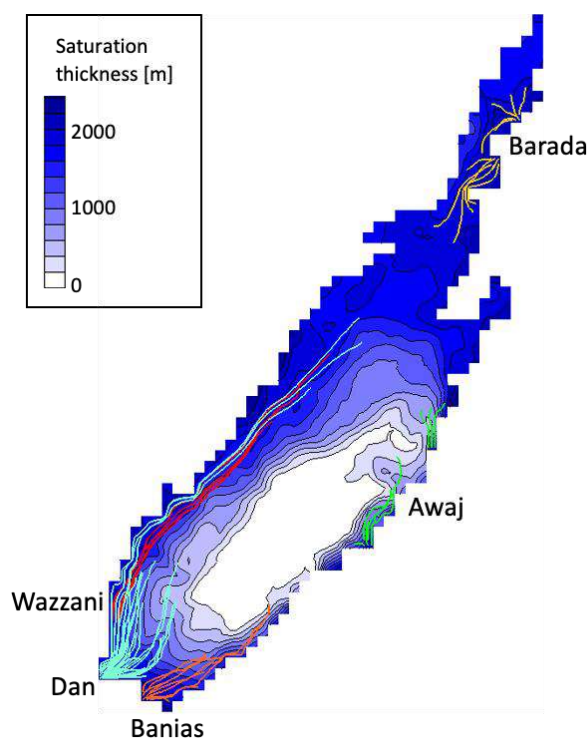


איור 132: תוצרי כיוול של מודל SWAT עבור אגן המשושים לשנים 2015-2020 ברזולוציות זמן שונות (יומי בפאנל העליון וחדשי בפאנל התחתון). תוצאות המודל מוצגות מול מדידות אמת.

עבור אקוויפר החרמון נבנה מודל הידרו-גיאולוגי קונספטואלי וכן שריג עבור מודלי מי תהום: MODFLOW ו-GWflow. מודלים אלו הורצו במצב יציב ומודל MODFLOW וגם במצב דינמי (transient) בהצלחה מרובה (איור 133). שני המודלים, הקונספטואלי והנומרי, משמשים להבנת קווי הזרימה בתוך האקוויפר וחלוקתו לשני חלקים המזינים שתי קבוצות של מעיינות. הרצות במצב יציב ובמצב דינאמי הראו התאמה

יפה לספיקת המעיינות בעיקר הבניאס והדן כאשר עבור כל אחד מהמעיינות יש מרווח זמן אופייני בין זמן החידור לספיקת המעיין.

הרצה של מודל MODFLOW במצב דינמי עבור אקוויפר החרמון לא רק מדמה את המציאות בספיקת המעיינות בצורה טובה יותר, אלא גם מהווה בסיס להערכה כיצד מגיבה המערכת ההידרולוגית לשינוי אקלים.



איור 133: מפת עומק סטורציה של אקוויפר החרמון עם קווי זרימה לכיוון המעיינות העיקריים. מספר הקווים פרופורציונלי לספיקה הממוצעת של המעיין.

4.6 הערכת ההשפעה של משטרי אקלים קיצוניים על עומסי נוטריינטים

במימון המשרד להגנת הסביבה

ירון בארי-שלוין, גדעון גל

- בשנה הראשונה נאספו ונערכו נתוני ניטור הידרולוגיים וגיאוכימיים של עשרות שנות ניטור אגן ההיקוות של הכנרת כבסיס לבחינת הפלט של המודל האגני SWAT.
- נתוני גיאוכימיה עברו הערכת חוסרים וכן של רזולוציית מדידה לאורך השנים.
- נמדדו נוטריינטים במספר נחלים באגן ההיקוות בתקופת הקיץ בשיתוף פרויקט מחקר העכברת והם משמשים גם כרפרנס למחקר הנוכחי המתמקד בתקופת השיטפונות.
- במדידות, עיקר החנקן הכללי הינו חנקן כללי מומס בצורת ניטראט; זרחן מומס ריאקטיבי מהווה את מירב הזרחן המומס, אשר מהווה שני שליש מהזרחן הכללי.



דיגום נחל יהודייה תחתון. צילום: עוז צברי דר
27.05.24

מטרת המחקר

1. אפיון היחס בין משטרי אקלים קיצוניים לבין עומסי נוטריינטים בנחלי אגן ההיקוות של הכנרת תוך דגש על מטרות המשנה הבאות:
 - א. התמקדות בשני תרחישים: (1) חורפים יבשים (2) שיטפונות קיצוניים.
 - ב. בחינת ההתפלגות במרחב הנחלים של עומסי נוטריינטים בתרחישים אלו.

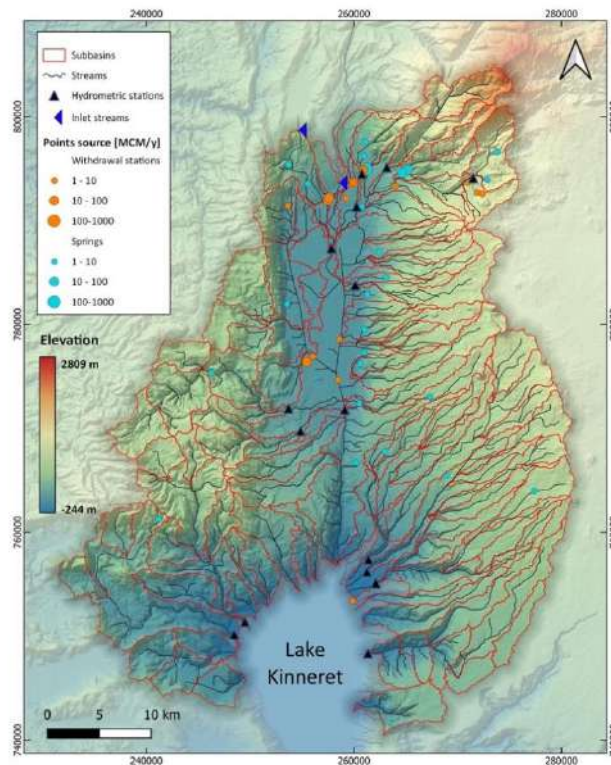
ג. בחינת התפלגות צורונים שונים של חנקן זרחן והיחס ביניהם בתרחישים אלו ובמרחב.
2. הערכת ההשפעה של השינויים בעומסי הנוטריינטים, כתוצאה ממשטרי אקלים קיצוניים, על שירותי המערכת האקולוגית של הכנרת.

רקע

המחקר הנוכחי מתמקד בשינויים הצפויים בעומסים ובהרכב של הנוטריינטים בנחלי אגן ההיקוות של הכנרת בהקשר למשטרי אקלים קיצוניים, ובהשפעה של שינויים אלו על שירותי המערכת של האגם. המחקר משלב תצפיות מנתוני ניטור שונים באגן ההיקוות של הכנרת בשילוב עם מדידות נוספות משלימות והפעלת מודל אגני ומודלים אגמיים למערכת אגן -אגם הכנרת.

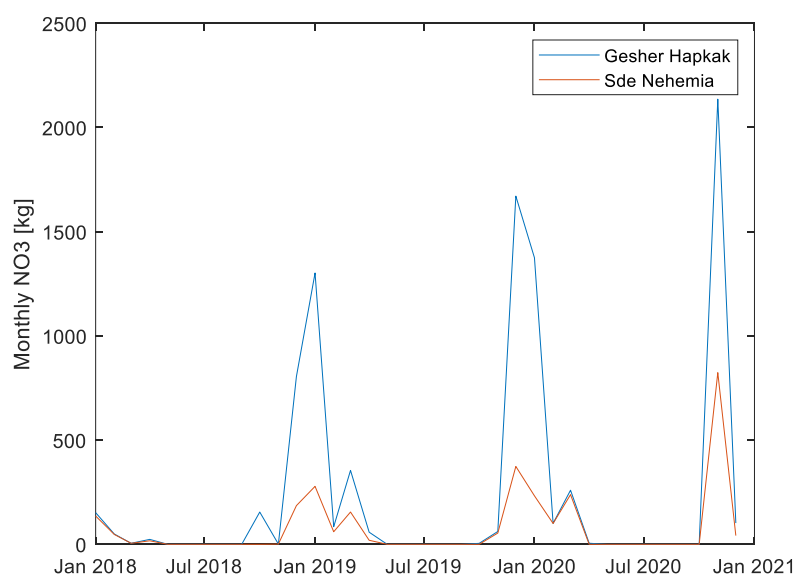
תוצרי השנה הראשונה

השנה הראשונה של המחקר התמקדה באיסוף נתוני ניטור היסטוריים מגופים שונים, בחינתם וארגונם כקלט למודל האגני (SWAT) הנבנה במקביל. התקבל ואורגן סט נתונים הידרולוגיים נרחב מהשירות ההידרולוגי הכולל נתוני ספיקות של מעיינות ושל נחלים בזרימת בסיס וכן בשיטפונות. סט זה אורגן כפלט ישיר למודל SWAT ובוצעו מספר הרצות לצורך כיוול ואימות של המודל כהכנה להפעלת מודול נוטריינטים במודל האגני הזה. איור 134 מציג את אגן ההיקוות של הכנרת במודל SWAT כאשר הוא מחולק לתתי-אגנים המאפשרים לבחון התנהגות נגר עילי בתא שטח קטן יחסית וכיצד הוא משפיע (ביחד עם תאי שטח נוספים) על אגן נחל אחד במערכת אגן הניקוז. איור 135 מציג פלט של הפעלה ראשונית של מודול נוטריינטים עבור הירדן בתחנות גשר הפקק ושדה נחמיה בין השנים 2018-2021. ריכוז הנוטריינטים בנקודות השונות נקבע ע"י מודול הנוטריינטים ב-SWAT לפי הרכב הקרקעות, שימושי הקרקע ואירועי הרטבה (גשם). ניסיון זה לא כלל קלט למודל משטח אגן ההיקוות כגון נקודות מקור (point source) של נוטריינטים עבור הירדן למשל קלט עומסי נוטריינטים מהמעיינות העיקריים (דן, בניאס) ומנחלים עיקריים כגון החצבני והדן. הכנסת מקורות אלו כמו גם עומסי נוטריינטים ממקורות נוספים אל מערכת הירדן ואגנים אחרים באגן ההיקוות של הכנרת יהוו את השלב הבא בהרצת מודול הנוטריינטים בהמשך.



איור 134: אגן ההיקוות של הכנרת מחולק לתת אגנים כחלק מצורת העבודה של מודל SWAT המאפשר לבחון כל יחידת שטח המרכיבה תת אגן בנפרד. מעיינות עיקריים ותחנות שאיבה חשובות באגן מסומנות לפי גודלן במיליון מ"ק שנה (עיגולים כחולים וכתומים בהתאמה). בנוסף מסומנות כניסות של נחלים מלבנון (עיגון וחצבני, משולשים כחולים) וכן תחנות הידרומטריות (משולשים שחורים).

סט נתוני גיאוכימיה של ניטור אגן ההיקוות (ביצוע ע"י חברת מקורות עבור רשות המים) התקבל מרשות המים. סט נתונים זה מייצג ניטור במגוון תחנות באגן ההיקוות מתחילת שנות השבעים ועד היום ברזולוציות זמן שונות - כאשר בד"כ דיגום תחנות נעשה פעם בשבועיים והסט הגיאוכימי כולל נוטריינטים ופרמטרים גיאוכימיים נוספים. איכות סט הנתונים הוערכה באופן כללי (איתור חוסרים בשנים, בתחנות או בסוגי פרמטרים שנמדדו) וכן בהקשר לתזמון מצד אחד ורזולוציית הזמן של הדיגום, בעיקר בהתייחס לאירועי שיטפון בפרט והתקופה הרטובה בכלל בכל שנה, המהווים את מוקד המחקר הנוכחי.



איור 135: מראה פלט ניסיוני -ראשוני של הפעלת מודול נוטריינטים עבור הירדן בתחנות גשר הפקק ושדה נחמיה בין השנים 2018-2021.

דיגום לטובת נוטריינטים בתחנות שונות ביהודיה והמשושים התבצע תוך שיתוף פעולה עם פרויקט מחקר מקביל המתמקד במיפוי ומידול עכברת במשושים. מארג הדיגומים המשותף איפשר דיגום ברזולוציית זמן גבוהה, ואף גבוהה יחסית למה שתוכנן בפרויקט הנוכחי לתקופת האביב-קיץ, המכילה בעיקרה זרימות בסיס. במסגרת שיתוף הפעולה בין הפרויקטים, תוצרי האנליזות הגיאוכימיות, בדגש על נוטריינטים, צפויות לתרום תובנות גם למחקר מיפוי העכברת. עבור מרכז הכובד של הפרויקט הנוכחי, כאשר הדגש הינו התקופה הרטובה, תוכנן מערך דיגום אינטנסיבי לסתיו עם תחילת הגשמים. אולם, הנושא נקטע עם פרוץ המלחמה ולפני תחילת העונה הרטובה - מוקד המחקר. תוצרי הדיגום ברזולוציית הזמן הגבוהה יחסית באביב- קיץ ובתחנות השונות מראה על שונות מעניינת בין התחנות השונות כאשר באופן כללי רב החנקן הכללי הינו חנקן מומס והאחרון מורכב ברובו המוחלט מניטראט ולעומת זאת ריכוז הזרחן המומס מכלל הזרחן נמוך בהרבה, והוא מורכב ברובו על ידי זרחן מומס ריאקטיבי.

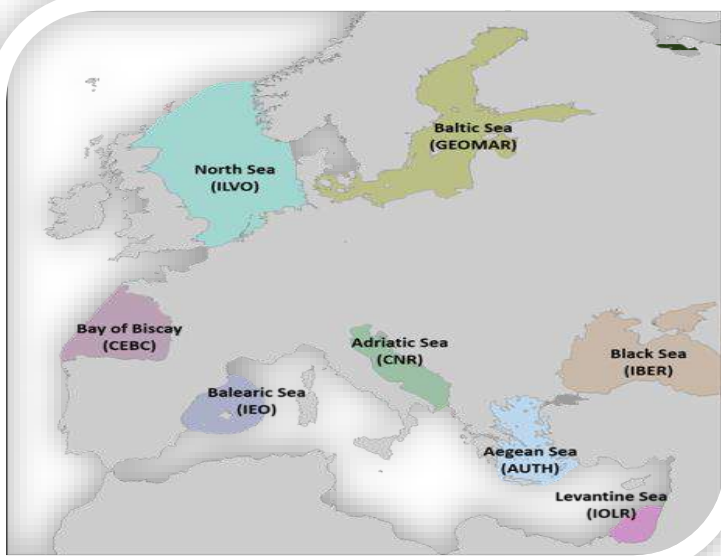
4.7 פיתוח שיטות ניהול מערכתי עבור דיג בר קיימא ומערכות אקולוגיות ימיות בריאות (ECOSCOPE)

במימון האיחוד האירופאי

גדעון גל, איל אופיר, ניר שטרן, יעל אמיתי,

יואב פלד

- במסגרת המחקר נבנים מודלים אקולוגיים בשמונה מרחבים ימיים שונים באירופה, זאת על מנת לגבש המלצות לניהול הדיג.
- באזורנו נבנה מודל אקולוגי של מרחב הים העמוק ומזרח הים התיכון שהאחרון אמור לשמש כבסיס לתוכנית תכנון המרחב הימי (Marine Spatial Planning).
- פיתוחים כמו מודלים המשמשים את הפרויקט מאפשרים בחינה של תהליך קבלת החלטות תחת מספר מימדים של חוסר ודאות (Deep Uncertainty).



מפת אזורי המודלים האקולוגיים עבור ניהול הדיג ובסוגריים הגופים האחראים לפיתוחים.

מטרת המחקר

המטרה הכוללת של פרויקט EcoScope הינה לתכנן ולפתח גישה יעילה, הוליסטית, מבוססת-מערכת אקולוגית לניהול דיג בר קיימא, שתהיה נגישה ושימושית עבור קובעי מדיניות וגופי ייעוץ.

מטרה זו תושג בעיקר באמצעות:

- פלטפורמה הומוגנית שתאגד מערכי נתונים רלוונטיים לדיג בסוג ובפורמט סטנדרטיים משותפים.

- ארגז כלים שישלב כלי/שיטות הערכה זמינים ומודלים של מערכת אקולוגית ותרחישי בדיקה תחת חוסר ודאות.
- תמיכה בתכנון וניהול דיג אקוצנטרי משולב בהתאם לשמירה על כדאיות כלכלית, במסגרת המדיניות וההנחיות של האיחוד האירופי.

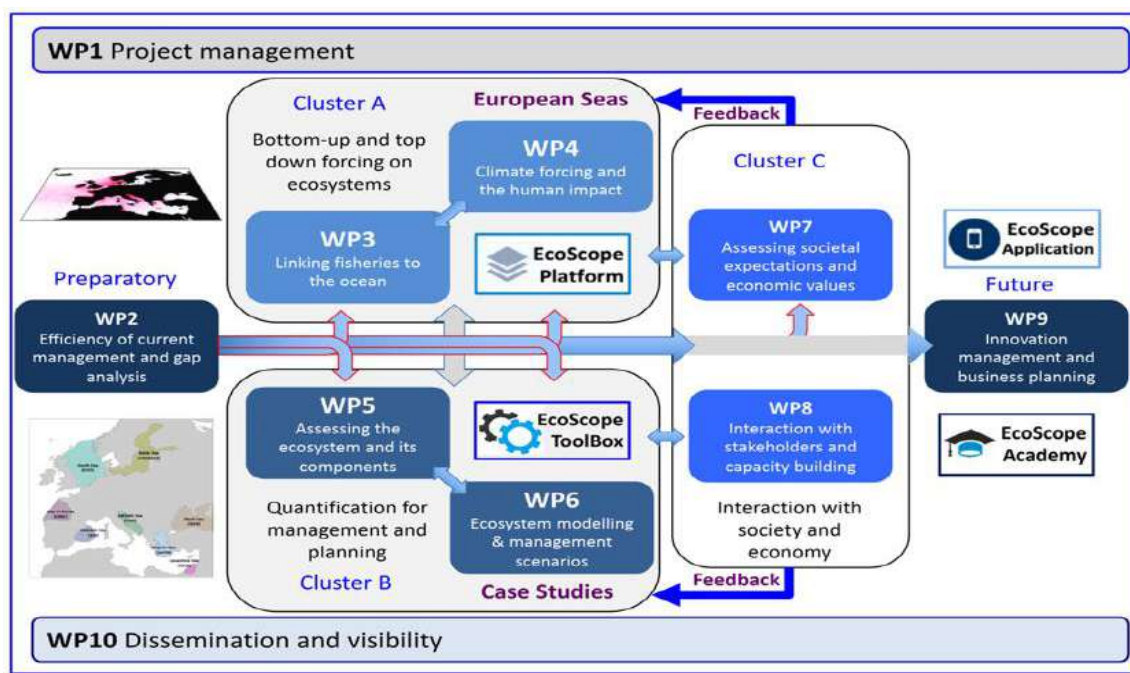
רקע

ניהול הדיג בכלל ובתוך כך במרחבי האיחוד האירופאי הינו משימה מאתגרת. הביומסה של חלק מהמינים המופיעים בשלל הדיג יורדת וכתוצאה מכך שלל הדיג הכולל יורד. מעבר לכך, עלייה בטמפרטורת מי הים ולחצים אחרים, הנגרמים על ידי אדם, משפיעים אף הם על הסביבה הימית ועל שלל הדיג. אזורי הדיג השונים במרחב האיחוד האירופאי הם בדרך כלל משותפים למספר מדינות וקיימת השפעה בין ההחלטות המתקבלות ומה שנעשה באזור השליטה של מדינה מסוימת על מה שמתרחש בשטח של מדינות שכנות ובמרחבים משותפים. על רקע זה, קיים צורך בפיתוח של כלים הלוקחים בחשבון את כלל רכיבי המערכת האקולוגית כמו גם השפעות טבעיות והשפעות האדם על המערכת. בעשורים האחרונים חלה התפתחות מתמדת בפיתוח ושיפור היכולות של המודלים האקולוגיים כך שאלו יוכלו לספק מענה לצרכים אלו. במסגרת הפרויקט הנ"ל ישנם שמונה אזורים ימיים שונים במרחב האיחוד האירופאי, בהם מפותחים מודלים אשר משמשים כבסיס לבחינת תרחישים בהקשר של ניהול הדיג. הידע והכלים המפותחים במחקר יוכלו אף לשמש בניהול הדיג באזורים אחרים ובמצבים שונים.

שיטת ניהול הפרויקט:

הפרויקט מורכב מעשר חבילות עבודה אשר מקיימות בניהם קשרי גומלין (איור 136). כל חבילה כוללת על תחום פונקציונאלי ומאגדת מגוון מומחים המסייעים לעמידה ביעדי חבילת העבודה. להלן החלוקה:

1. מנהלה וניהול הפרויקט.
2. זיהוי והבנת פערי המידע והידע הקיימים בנושא דיג ודגה בכלל אזורי המחקר.
3. איסוף מידע על דיג (נמלים, סוגי הדיג, מידת המאמץ וכו').
4. איסוף מידע אוקיאנוגרפי והנגשתו למפתחי המודלים.
5. פיתוח כלים להערכת מצב המערכת האקולוגית.
6. פיתוח מודלים אקולוגיים לכלל מרחבי המחקר (בהובלה של חקר ימים ואגמים לישראל).
7. פיתוח כלים לניתוח כלכלי וסוציאלי של מקרי המחקר.
8. ממשק עם מקבלי החלטות רלוונטיים באיחוד האירופאי.
9. יצירת תכנית עסקית להמשך פיתוח המחקר.
10. יצירת כלים להנגשת התוצאות למקבלי החלטות.



איור 136: אופן התפתחות העבודה והעברת התוצרים בין קבוצות העבודה השונות.

מתוך כלל חבילות העבודה, היא"ל מובילה את חבילה מספר 6 אשר אחראית על התחומים הבאים:

1. פיתוח של מודלים אקולוגים מסוג EWE ברמות שונות (מודל מאזני, מודל דינמי בזמן ומודל מרחבי) לכלל מרחבי המחקר ובחינה של תרחישי שינוי אקלים ומדיניות דיג בעזרתם. בניית המודלים מתבצעת על ידי קבוצות מומחים מכל אזור רלוונטי, אשר אחראים לאיסוף המידע ובניית המודל. במהלך התהליך ראשי חבילה 6 מלווים ומסייעים לכל קבוצה הן באופן פרטני והן בסדנאות עבודה קונקרטיות למידול שתפקידם לשפר את הידע הקיים ולסייע להם להשלים את משימתם. בתוך כך קבוצת המחקר של היא"ל בונה את מודל מרחב המים הטריטוריאליים והכלכליים של ישראל ומפתחת את המודל של כלל מזרח הים התיכון הנשען על מודל קיים שהוכן על ידי חוקרת מהאיחוד האירופאי (Dr. Piroddi) זאת על מנת שישמש כבסיס אקולוגי לתוכנת תכנון המרחב הימי.

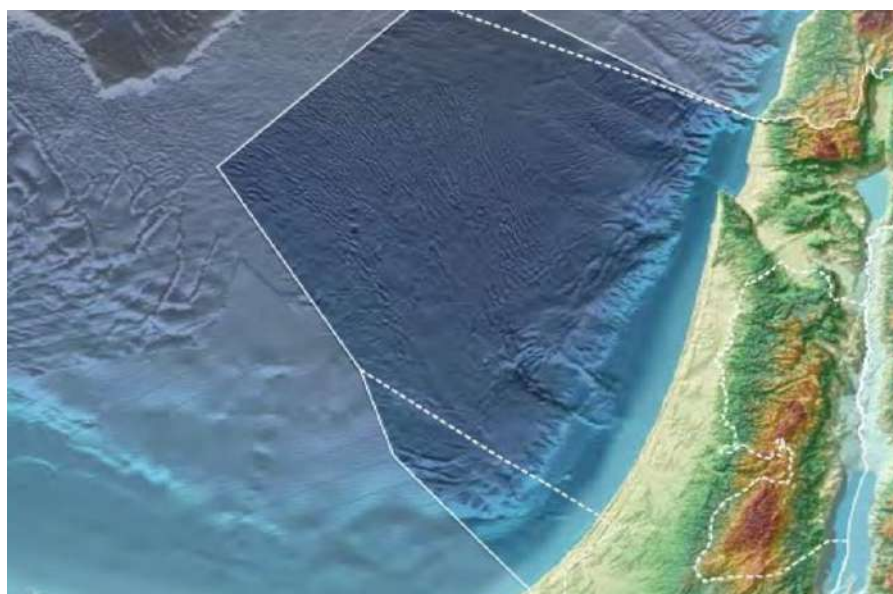
פיתוח כלים לאמידת חוסר וודאות וחוסר וודאות עמוק – כלים חדשניים המפותחים ע"י חוקרים מהולנד ביחד עם צוות המחקר מחיא"ל, שתפקידם הוא להצביע על מידת רגישות התוצאות לחוסר הודאות הקיים במודלים ובתרחישים העתידיים ולנסות לזהות את הגורמים המשפיעים ברמות שונות על התוצאות. במהלך 2023 נערך ניסיון לניתוח אי ודאות המכיל 'מערכת להרצה מרובה של מודל EwE תחת תנאים משתנים'. לצורך כך, נעשה שימוש בתוכנת פייתון ליצירת מנגנון הרצת מודלים של EwE בעזרת מספר רב של סדרות זמן. סדרות הזמן נוסו על מודל הים התיכון הישראלי, בעזרת וריאציות של מאמץ דיג ומדיניות שלל לוואי. במסגרת הניסיון נבדקו אופי התאמת מבנה הקבצים לפייתון ועיבוד התוצאות לניתוחי המשך. תוצרי התהליך ישמשו לבניית מודלים לחיזוי תחת תנאי חוסר ודאות בהמשך הפרויקט ובכל אזורי המחקר.

2. הוספה של רכיב ניהול מדיניות דיג לתוכנה קיימת המאפשרת תכנון מרחב ימי ושימוש ביכולת זו במודל הים הצפוני ובמודל חדש של מזרח הים התיכון. השימוש בכלים אלו יאפשרו הנגשת תוצאות

המודלים למקבלי החלטות והתחשבות בגורמים נוספים המחייבים תכנון (תעבורה ימית, אנרגיה, תשתיות וכו'). עבור רכיב זה נבנו במהלך שנת 2023 שני מודלים עבור מרחב מזרח הים התיכון. הראשון הוא מודל רחב וגדול הנשען על מודל קודם שהוכן במימון האיחוד האירופאי ולתוכו הוספנו מספר קבוצות של מינים פולשים שהגיעו ומתבססים באזורינו. כיוון שהרצה של מודל זה לוקחת זמן הוא ישמש למתן מוצרים שלא מחייבים תוצאות מיידיות. המודל הנוסף שנבנה עבור מרחב מזרח ים תיכון הוא מודל בעל רזולוציה נמוכה יותר עם ייצוג של ציי הדיג לכל המדינות במרחב המודל. מודל זה ישמש כשכבה האקולוגית בתוך הרצת ה-MSP כחלק מסדנאות של מקבלי ההחלטות.

תוצאות ודיון

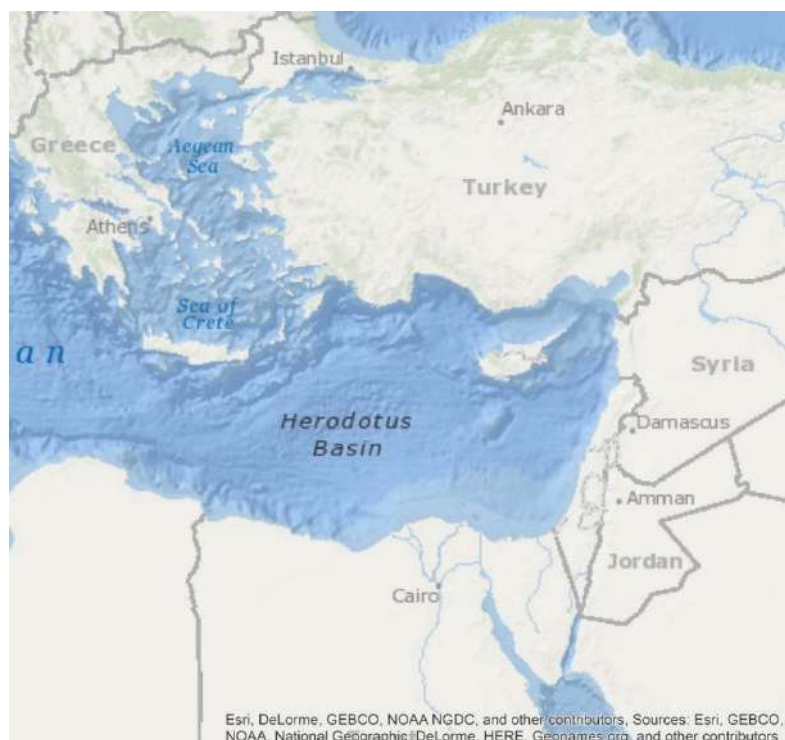
1. פיתוח מודל אקולוגי עבור המים הטריטוריאליים והכלכליים של מדינת ישראל: המודל פותח על בסיס מודל אקולוגי של מרחב מדף היבשת (Corrales et al., 2018; Corrales, 2019; Corrales et al., 2017; Ofir et al., 2023) והורחב לאזורי המדרון והבטיאל (איור 137). במהלך הרחבת המודל, בוצע עדכון של המינים המרכיבים את הקבוצות השונות כך שאלו יבטאו המשך הגעת המינים הפולשים למרחב ויותאמו לאזורי הגידול של המינים השונים. בתוך כך פותח מודל מרחבי המכיל נתוני עומק ושכבות משתנות של טמפרטורה ויצרנות ראשונית. תוצאות הפיזור המרחבי של הקבוצות במודל שופרו ואומתו בעזרת מומחים בתחום ובהתאמה לכך הוכנו מפות של פיזור מרחבי של הקבוצות במודל. במהלך שנת 2023 פיתחנו את הרכיב הדינאמי בזמן של המודל (Ecosim). לטובת הפיתוח ביצענו שימוש בנתוני הניטור הלאומי במרחב המדף ובים עמוק ובנתוני שלל הדיג הנאספים על ידי אגף הדיג/משרד החקלאות. הנתונים נותחו ועובדו כך שיתאימו למבנה המודל ובהמשך ומעבר לפרויקט ניתן יהיה להשתמש בממשק בין קבצי התוצאות של הניטור למודל לצורך קבלת של תמונת מצב אקולוגית הנשענת על מפות פיזור, אינדקסורים וכו'.



איור 137: מרחב מודל ים עמוק בישראל

2. הרחבה של מודל מזרח הים התיכון:

המודל האקולוגי של מזרח הים התיכון (איור 138) נועד לשמש כבסיס אקולוגי עבור תוכנת תכנון המרחב הימי שמופעלת על הקבוצה של ה-MSP אשר מטרתה לספק כלים לתכנון הפעילות האנושית במרחבים ימים (Steenbeek et al., 2020). למעשה, המודל נבנה על ידי האיחוד האירופאי. במסגרת מחקר כולל נבנה מודל אקולוגי של כלל הים התיכון עם חלוקה לשלוש (מערב, מרכז ומזרח) (Piroddi et al., 2022). הוספנו למודל המקורי מספר קבוצות המייצגות מינים פולשים אשר הגיעו לאזורנו מים סוף. המודל מכיל מידע על 1222 מינים אשר מאוגדות ב- 75 קבוצות פונקציונאליות. מתוכם 235 מינים מאזור הים האגאי, 319 מינים מאזור מרחב המים הכלכליים בישראל ו- 21 מינים פולשים מייצגים. לאחר בניית המודל המאזני אשר מתאר את הקשרים המתקיימים בין הקבוצות השונות במודל נבנה מודל דינאמי בזמן אשר לתוכו הוספו נתונים של שינויים עיתיים בשלל הדיג, מאמץ הדיג וביומסה של חלק מהקבוצות. על בסיס מודל זה אנו מתחילים לבנות מודל מרחבי אשר יכיל נתונים מרחביים ומשתנים בזמן של טמפרטורה, יצרנות ראשונית ועוד לצד שכבות קבועות כמו זו של תשתיות, עומקים וכו'. בנוסף, על בסיס המודל הרחב בנינו מודל אקולוגי בעל רזולוציה נמוכה יותר שישמש כבסיס אקולוגי עבור תוכנת ה-MSP בה ישולבו רכיבים של ניהול מרחבי של האזור הימי (תעבורה, אנרגיה, תשתיות) ורכיב חדש של ניהול הדיג. מודל זה יאפשר הרצה באופן מהיר כך שניתן יהיה להשתמש במודל עבור סדנאות בהן משולבים מקבלי החלטות ויש צורך בהצגת תוצאות באופן מהיר.



איור 138: שטח מודל מזרח הים התיכון והמדינות בהן הוא גובל.

Corrales, X., 2019. Ecosystem modelling in the Eastern Mediterranean Sea: the cumulative impact of alien species, fishing and climate change on the Israeli marine ecosystem.

Corrales, X., Coll, M., Ofir, E., Heymans, J.J., Steenbeek, J., Goren, M., Edelist, D., Gal, G., 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.

Corrales, X., Katsanevakis, S., Coll, M., Heymans, J.J., Piroddi, C., Ofir, E., Gal, G., 2019. Advances and challenges in modelling the impacts of invasive alien species on aquatic ecosystems. Biological Invasions.

Corrales, X., Ofir, E., Coll, M., Goren, M., Edelist, D., Heymans, J., Gal, G., 2017. Modeling the role and impact of alien species and fisheries on the Israeli marine continental shelf ecosystem. Journal of Marine Systems 170, 88-102.

Ofir, E., Xavier, X.R., Coll, M., Heymans, J.J., Goren, M., Steenbeek, J.G., Amitai, Y., Shachar, N., Gal, G., 2023. Evaluation of fisheries management policies in the alien species-rich Eastern Mediterranean under climate change.

Piroddi, C., Coll, M., Macias, D., Steenbeek, J., Garcia-Gorriz, E., Mannini, A., Vilas, D., Christensen, V., 2022. Modelling the Mediterranean Sea ecosystem at high spatial resolution to inform the ecosystem-based management in the region. Scientific Reports 12, 19680.

Steenbeek, J., Romagnoni, G., Bentley, J.W., Serpetti, N., Heymans, J., Gonçalves, M., Santos, C.P., Warmelink, H., Mayer, I., Keijser, X., 2020. Combining ecosystem modeling with serious gaming in support of transboundary maritime spatial planning. Ecology and Society 25, 1-24

5 נספחים

5.1 סטודנטים לתארים מתקדמים בהנחיית חוקרי

המעבדה לחקר הכנרת 2023

שם	תואר	אוניברסיטה	נושא	מנחה בחי"ל	מנחה באוני'
1	א' רם	דוקטורט	אוני' בר אילן	א' סוקניק	ד' אילח
2	א' בן צור	דוקטורט	האוני' העברית	י' בארי- שליון ג' גל	ח' גבירצמן
3	א' להב	מוסמך	אוני' חיפה	ג' גל	ר' בוקמן
4	י' לצ'ינסקי	דוקטורט	אוני' חיפה	ג' גל	י' להן
5	ש' רגב	דוקטורט	טכניון	ג' גל	י' כרמל
6	י' פלד	פוסט- דוקטורט		ג' גל	
7	ד' שבלינג	פוסט- דוקטורט		ג' גל	

8	א' מליסרי	פוסט- דוקטורט		ג' גל	Ecocentric management for sustainable fisheries and healthy marine ecosystems
9	ע' ברגמן	פוסט- דוקטורט	חיא"ל	ו' אקרט	הדינמיקה של תהליכי חימצון/חיזור בכמוקלינה של אגם הכנרת - ניתוח כימי-גנטי
10	ח' ויגדוביץ'	דוקטורט	אוני' בן-גוריון	ו' אקרט	מנגנוני חיזור ברזל באזור מתאנוגנה בסדימנטים
11	ע' וייסמן	מוסמך	אוני' בן-גוריון	ו' אקרט	יחסי חנקן ברזל ומתאן בסדמינטים אקוטים
12	י' בלאושטיין	מוסמך	אוני' חיפה	ע' לירן	Elucidating the mode of action of the herbicide Metamitron in microalgae
13	נ' פרסמן טל	דוקטורט	אוני' חיפה	פ' אסטרסון ת' גיא-חיים	השפעות זיהום נפט גולמי וגז- קונדנסט על ביואקומולציה במארג המזון בים התיכון הישראלי
14	מ' פוגויבה	פוסט דוקטורט	אוני' חיפה	פ' אסטרסון	הסעת מיקרו מזהמים וחומר חלקיקי סופח באגם הכנרת ואגן ההיקוות

5.2 פרסומי המעבדה בספרות הבינלאומית

המבוקרת ב- 2023/2024

- Abucay, L.R., Sorongon-Yap, P., Kesner-Reyes, K., Capuli, E.C., Reyes Jr, R.B., Daskalaki, E., Vega, C.F., Scarcella, G., Coro, G., Ordines, F., Sánchez, P., Dakalov, G., Klayn, S., Celie, L., Scotti, M., Grémillet, D., Lambert, C., **Gal, G.**, Palomares, M.L.D., Dimarchopoulou, D., and A.C. Tsikliras. **2023**. Scientific knowledge gaps on the biology of non-fish marine species across European Seas. *Frontiers in Marine Science*, 10:1198137. <http://doi.10.3389/fmars.2023.1198137>
- Alster A., Kaplan-Levy, RN.,** Barinova SS, and T. **Zohary. 2024**. Analyzing semiquantitative phytoplankton counts. *Hydrobiologia*. 2024;851(4):1079-1090. <https://doi.org/10.1007/s10750-023-05391-4>
- Astrahan, P., Lupu, A., Leibovici, E., and S. Ninio. 2023**. BTEX and PAH contributions to Lake Kinneret water: a seasonal-based study of volatile and semi-volatile anthropogenic pollutants in freshwater sources. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(21): 61145-61159. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26724-9>
- Be'eri-Shlevin, Y.,** Matmon, A., **Rotstein, R.,** Schimmelpfennig, I., Benedetti, L., Geller, Y., Naomi P., Noam G., and T. Aster. **2023**. Denudation of the Golan Heights basaltic terrain using in-situ ³⁶Cl and OSL dating. *Geomorphology*, 430: 108649 <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108649>
- Bergman, O., Be'eri-Shlevin, Y., and S. Ninio. 2023**. Sodium levels and grazing pressure shape natural communities of the intracellular pathogen *Legionella*. *Microbiome* 11, 167 <https://doi.org/10.1186/s40168-023-01611-0>
- Berihu, M., Somera, S.T., Malik, A., Medina, S., Piombo, E., **Tal, O.,** Cohen, M., Ginatt, A., Ofek-Lalzar, M., Faiganbion-Doron, A., Mazzola, M., and S. Freilich. **2023**. A framework for the targeted recruitment of crop-beneficial soil taxa based on network analysis of metagenomics data. *Microbiome*, 11:8. <https://doi.org/10.1186/s40168-022-01438-1>
- Gonda, I., Abu-Abied, M., Adler, C., Milavski, R., **Tal, O.,** Davidovich-Rikanati, R., Faigenboim, A., Kahane-Achinoam, T., Shachter, A., Chaimovitch, D., and N. Dudai. **2023**. Two independent loss-of-function mutations in anthocyanidin synthase homeologous genes are responsible for the all-green phenotype of sweet basil. *Physiologia Plantarum*, 175(1): e13870 <https://doi.org/10.1111/ppl.13870>
- Huang, Y., Chen, X., **Ostrovsky I.** Cyanobacterial Blooms Enhance Nitrogen Removal in Lakes through Carbon/Nitrogen Coupling Metabolism. *ACS ES&T Water*. **2023**;3(10):3244-3252.

- 
- Keramidas, I., Dimarchopoulou, D., **Ofir, E.**, Scotti, M., Tsikliras, A.C., and G. **Gal**. **2023**. Ecotrophic perspective in fisheries management: a review of Ecopath with Ecosim models in European marine ecosystems. *Frontiers in Marine Science*, 10:1182921. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1182921>.
- Kolan, D., Cattan-Tsaushu, E., Enav, H., **Freiman, Z.**, **Malinsky-Rushansky, N.**, **Ninio, S.**, and S. Avrani. **2024**. Tradeoffs between phage resistance and nitrogen fixation drive the evolution of genes essential for cyanobacterial heterocyst functionality. *ISME J.* 2024 Jan 8;18(1). <https://doi.org/10.1101/2023.10.04.560878>
- Lang-Yona, N., **Alster, A.**, **Cummings, D.**, **Freiman, Z.**, **Kaplan-Levy, R.**, **Lupu, A.**, **Malinsky-Rushansky, N.**, **Ninio, S.**, **Sukenik, A.**, **Viner-Mozzini, Y.**, and T. Zohary. **2023**. *Gloeotrichia pisum* in Lake Kinneret: A successful epiphytic cyanobacterium. *Journal of Phycology*, 59(1): 97-110. <https://doi.org/10.1111/jpy.13301>
- Li X, Li L, Huang Y, Wu, H., Sheng, S., Jiang, X., Chen, X., and I. **Ostrovsky**. **2024**. Upstream nitrogen availability determines the *Microcystis* salt tolerance and influences microcystins release in brackish water. *Water Res.* 27;252:121213. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121213>
- Lohmann, R., Vrana, B., Muir D., Smedes, F., Sobotka, J., Zeng, EY., Bao, LJ., Allan, IJ., **Astrahan, P.**, Barra, RO., Bidleman, T., Dykyi, E., Estoppey, N., Fillmann, G., Greenwood, N., Helm, PA, Jantunen, L., Kaserzon, S., Macías, JV., Maruya, KA., Molina, F., Newman, B., Prats, RM., Tsapakis, M., Tysklind, M., van Drooge, BL., Veal, CJ., Wong, CS. **2023**. Passive-Sampler-Derived PCB and OCP Concentrations in the Waters of the World—First Results from the AQUA-GAPS/MONET Network. *Environmental Science Technology*. 57(25):9342-9352. DOI: 10.1021/acs.est.3c01866. Epub 2023 Jun 9. PMID: 37294896.
- O'Brien, D.A., Deb, S., **Gal, G.**, Thackeray, S.J., Dutta, P.S., Matsuzaki, S.I., May, L. and C.F. Clements. **2023**. Early warning signals have limited applicability to empirical lake data. *Nature Communications*. 14: 7942. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43744-8>
- O'Brien, D.A., **Gal, G.**, Thackeray, S.J., Matsuzaki, S.I.S. and C.F. Clements. **2023**. Planktonic functional diversity changes in synchrony with lake ecosystem state. *Global Change Biology*, 29(3), pp.686-701. <http://doi.10.1111/gcb.16485>
- Ofir, E.**, Corrales, X., Coll, M., Jacomina Heymans, J., Goren, M., Steenbeek, J.G, **Amitai, Y.**, **Shachar, N.**, and G. **Gal**. **2023**. Evaluation of fisheries management policies in the alien species-rich Eastern Mediterranean under climate change. *Frontiers in Marine Science*, 10 ,1155480. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1155480>
- Ofir, E.**, Silver, T., Steenbeek, J.G., **Shachar, N.** and G. **Gal**. **2023**. Applying the safe operating space (SOS) approach to sustainable commercial fishing under varying lake levels and littoral zone conditions. *Fisheries*, 48(3):107-120. <https://doi.org/10.1002/fsh.10869>



Ohayon, S., **Homma, H.**, Malamud, S., **Ostrovsky, I.**, Yahe, R., Mehner, T., Kanari, M., Belmaker, J. **2023**. Consistent edge effect patterns revealed using continuous surveys across an Eastern Mediterranean no-take marine protected area. ICES Journal of Marine Science, fsad086 <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsad086>

Regev S., Carmel Y, Schlabin D, Schlabin D., and G. **Gal. 2024**. Climate change impact on sub-tropical lakes ecosystem - Lake Kinneret as a case study. Sci Total Environ. 23:171163 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171163>

Regev, S., Carmel, Y., and **G. Gal. 2023**. Using high level validation to increase lake ecosystem model reliability. Environmental Modelling & Software 162: 105637 <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105637>

Regev, S., Carmel, Y., and **G. Gal. 2024**. Assessing alternative lake management actions for climate change adaptation. Ambio.

Rodriguez-Perez, A., Tsikliras, A.C., **Gal, G.**, Steenbeek, J., Falk-Andersson, J., and S.J.J. Heymans. **2023**. Using ecosystem models to inform ecosystem-based fisheries management in Europe: a review of the policy landscape and related stakeholder needs. Frontiers in Marine Science, 10:1196329. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1196329>

Rubin-Blum M., Harbuzov Z., Cohen R., and P. **Astrahan. 2023**. Anthropogenic and natural disturbances along a river and its estuary alter the diversity of pathogens and antibiotic resistance mechanisms. Science of The Total Environment, 887:164108. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164108>

Stein, S., Shalev, E., Sivan, O., and Y. Yechieli. **2023**. Challenges and approaches for management of seawater intrusion in coastal aquifers. Hydrogeol. J. 31, 19–22. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02575-5>

Stein, S., Dugan, B., Gonzales Zenteno, E., Ticona, J., and A. Minaya. **2024**. Slope stabilization through groundwater management with limited hydrogeological data: a case study from Majes, southern Peru. Environ. Earth Sci. 83, 1–9. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11509-1>

Schweitzer-Natan, O., Ofek-Lalzar, M., Sher, D., and A. **Sukenik. 2023**. The microbial community spatially varies during a Microcystis bloom event in Lake Kinneret. Freshwater Biology, 68(2), 349–363. [http://doi: 10.1111/fwb.14030](http://doi:10.1111/fwb.14030)

Song, L., Jia, Y., Qin, B., Li, R., Carmichael, W. W., Gan, N., ... and **A. Sukenik. 2023**. Harmful Cyanobacterial Blooms: Biological Traits, Mechanisms, Risks, and Control Strategies. Annual Review of Environment and Resources, 48 <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112320-081653>

Tal, O., **Ostrovsky, I.**, and **G. Gal. 2024** . A framework for identifying factors controlling cyanobacterium Microcystis flos-aquae blooms by coupled CCM-ECCM Bayesian networks. Ecology and Evolution. 2024;14(6).



Velasquez, X., Morov, AR., **Astrahan, P.**, Tchernov, D., Meron, D., Almeda, R., Rubin-Blum, M., Rahav, E, and Guy-Haim, T. **2024**. Bioconcentration and lethal effects of gas-condensate and crude oil on nearshore copepod assemblages. *Marine Pollution Bulletin*. 203:116402. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2024.116402.

Vigderovich, H., Eckert, W., Elvert, M., Gafni, A., Rubin-Blum, M., Bergman, O., and O. Sivan. **2023**. Aerobic methanotrophy increases the net iron reduction in methanogenic lake sediments. *Frontiers in Microbiology*, 1206414.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1206414>

Weisthal Algor, S., **Sukenik, A.**, & S. Carmeli. **2023**. Hydantoanabaenopeptins from Lake Kinneret Microcystis Bloom, Isolation, and Structure Elucidation of the Possible Intermediates in the Anabaenopeptins Biosynthesis. *Marine Drugs*, 21(7), 401.
<https://doi.org/10.3390/md21070401>

Zemah-Shamir, S., Peled, Y., Shechter, M., Israel, Á., **Ofir, E., and G. Gal.** **2023**. Economic Valuation of Fish Provision, Wastewater Treatment, and Coastal Protection in the Israeli Mediterranean Sea. *Fishes*, 8(5): 236. <https://doi.org/10.3390/fishes8050236>

5.3 דו"חות המעבדה 2023

דו"ח חיא"ל מס'	שם הדו"ח/המעבדה לחקר הכנרת ע"ש יגאל אלון
T1/2023	בארי שליון, י'. 2023. ניטור סומית הגליל, דו"ח ביניים, מוגש לרשות הטבע והגנים.
T2/2023	אופיר, א'. גל, ג'. 2023. תכנון שמירת טבע במים הכלכליים של ישראל. מוגש לחברה להגנת הטבע.
T3/2023	ניניו, ש'. 2023. השפעת המליחות בכנרת על התבססות מיקרואורגניזמים שמקורם באבק אטמוספרי השוקע באגם. דו"ח סופי. מוגש לרשות המים.
T4/2023	בארי-שליון, י'. 2023. ניטור מתכות כבדות בכנרת. דו"ח שנתי, מוגש לרשות המים.
T5/2023	אלסטר, א'. קפלן-לוי, ר.נ. 2023. ניטור פיטופלנקטון באגמון החולה. מוגש למיג"ל.
T6/2023	גל, ג', וורולקר, ש'. 2023. ניטור זואופלנקטון באגמון החולה. מוגש למיג"ל.
T7/2023	קמינגס, ד'. 2023. ניטור דגים באגמון. מוגש למיג"ל.
T8/2023	ניניו, ש'. 2023. ניטור זיהומים ממקור צואתי בנחלי אגן ההיקוות של הכנרת בשיטת MST בשנת 2022. מוגש בשיתוף עם רשות המים.
T9/2023	טל, א', ניניו, ש', זהרי, ת'. 2023. חקר הגורמים הקשורים להתפתחות פריחות של פרידיניום בכנרת בגישה רב תחומית המשלבת בינה מלאכותית, פרוטאומיקה וגנומיקה. דו"ח חצי שנתי, שנת מחקר ראשונה. מוגש לרשות המים.
T10/2023	אוסטרובסקי, א', סוקניק, א'. 2023. מערכת ICT לזיהוי תגובת עמידות אקולוגית במערכות מים מתוקים. דו"ח סופי, מוגש למשרד המדע והטכנולוגיה בשיתוף עם חוקרים מיפן.
T11/2023	קפלן - לוי, ר.נ. 2023. זיהוי גנטי ובדיקת פוטנציאל רעילות של זן ציאנובקטריה. מוגש לפרופ' סמי בוסביא אוניברסיטת בן-גוריון בנגב.
T12/2023	צוות המעבדה לחקר הכנרת. 2023. דו"ח שנתי ניטור ומחקרי כנרת לשנת 2022. מוגש לרשות המים.
T13/2023	זהרי, ת', גל, ג', אופיר, א', דולב, ע', בארי-שליון, י', קמינגס, ד', אקרט, ו', גוק, ע', גזית, א'. 2023. יערות אשלים מוצפים: בית גידול חדש בכנרת. דו"ח סופי, שנה שלישית. מוגש לרשות המים.
T14/2023	קפלן - לוי, ר.נ., אלסטר, א', בן-אור, א', ויינר-מוציני, ד'. 2023. פריחה של ציאנובקטריה בנתית בחופי הכנרת - זיהוי ואפיון פוטנציאל רעילות. מוגש לרשות המים.
T15/2023	סוקניק, א', טיבור, ג', זהרי, ת', אקרט, ו'. 2023. גיבוש מערך ניטור ויכולות תפעול להתמודדות עם מצב משברי של פריחה חריגה של ציאנובקטריה בכנרת. מוגש לרשות המים.
T16/2023	זהרי, ת', גל, ג', בארי-שליון, י', דולב, ע', גזית, א'. 2023. המלצות לניהול עתידי של יערות אשלים בחופי הכנרת. מוגש לרשות המים.

דו"ח חיא"ל מס'	שם הדו"ח/המעבדה לחקר הכנרת ע"ש יגאל אלון
T17/2023	אסטרון, פ'. 2023. פיילוט בחינת המצאות רעלני ציאנובקטריה באמצעות מקלוני בחינה בחופי הכנרת. סיכום ביניים בשיתוף עם איגוד ערים כנרת ורשות המים.
T18/2023	גל, ג'. 2023. השלכות של בצורות ארוכת טווח ושינויי אקלים על המערכת האקולוגית של הכנרת, דו"ח מסכם. מוגש למשרד המדע והטכנולוגיה.
T19/2023	קפלן – לוי, ר.נ., אבני, ד', סגל, נ', שדה, ד', פראדה, מ'. 2023. מרכז ידע אצות: אוסף התרבויות הלאומי של אצות ישראל. מוגש למשרד המדע והטכנולוגיה, התוכנית להקמת מרכזי ידע תשתיתיים.
T20/2023	Gal, G., Ofir, E. et al. 2023. ECOSCOPE, Project Deliverable Report: Report on EwE models for all case study areas. Submitted to the European Union.
T21/2023	אמיתי, י'. 2023. פיתוח, כיוול ויישום מודל ביוגיאוכימי תלת מימדי לכנרת, דו"ח סופי 2023. מוגש לרשות המים.
T22/2023	Islam, T., Steenbeek, J. and G.Gal. 2023. Development of adapted EwE models, extended with uncertainty structures and alternative modules and functions, to perform deep uncertainty simulations. Submitted to the European Union – ECOSCOPE Project.
T23/2023	זהרי, ת'. 2023. פרויקט ניטור ב"אגם הברבורים", דו"ח סופי. מוגש ל"מארג", אוני' תל אביב.
T24/2023	נשרי, ע'., גבריאלי, א'. 2023. גישה אינטגרטיבית לבחינת הקשר שבין אספקת נוטריינטים מהירדן לכנרת. דו"ח מסכם שנה שלישית +. מוגש לרשות המים.

5.4 ייעוץ לממשלה וחברות במערכות 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 2023:

- ✓ מתן ייעוץ לרשות המים בנושא הזרמת מי התפלה לכנרת. השתתפות בניסוי ההזרמה 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.
- ✓ המשך תפעול רשת תחנות מדידה בכנרת, במרכז האגם (תחנה A), בצפון (תחנה G), בדרום (תחנה D) וכן מול שפך נחל צלמון.
- ✓ 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.
- ✓ בשיתוף רשות המים מתבצע ניטור מורחב של מקורות הזיהום באגן ההיקוות בשיטת MST.
- ✓ בעקבות הופעת דלקות עיניים אצל נופשים בכנרת, פיתוח כלים אנליטיים למעקב אחר מינים של הפטרייה הטפילית מיקרוספורידיה באגם, לבקשת משרד הבריאות, רשות המים ואיגוד ערים כנרת

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 (, נ' שטרן חבר, וג' גל משקיף).
- ✓ ועדת אינטרדוקציה של בע"ח ואצות, משרד החקלאות (א' אוסטרובסקי, חבר).

- ✓ צוות היגוי ניהול כנרת ואגן ההיקוות, רשות המים (ג' גל, משקיף).
- ✓ ועדה לניהול ומניעת הרעלות דגים בכנרת, משרד החקלאות (ג' גל, משקיף).
- ✓ נציג הקהילה הלימנולוגית הישראלית בארגון הבין-לאומי SIL (א' אוסטרובסקי).
- ✓ The management committee at the specialist group on Lake and Reservoir Management, International Water Association (א' אוסטרובסקי).

חברות במערכות של עיתונים מדעיים

- ✓ חבר מערכת Advances in Oceanography and Limnology (א' סוקניק).
- ✓ Frontiers in Aquatic Microbiology - Editorial Board (א' סוקניק).
- ✓ Microorganisms MDPI Publishing- Editorial Board (א. סוקניק)
- ✓ Phycology MDPI Publishing- Editorial Board (א. סוקניק)
- ✓ Hydrobiologia – Editorial Board (ג' גל).
- ✓ Water, MDPI Publishing - 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).
- ✓ Inland Waters - Editorial Board (ש' ניניו).
- ✓ Journal of Aquaculture & Marine Biology - Editorial Board (א' אוסטרובסקי).
- ✓ Ecological Informatics - Editorial Board (א' אוסטרובסקי).
- ✓ Energies, MDPI Publishing - Editorial Board (א' אוסטרובסקי).
- ✓ Gases, MDPI Publishing - Editorial Board (א' אוסטרובסקי).
- ✓ Ukrainian Journal of Natural Sciences- Editorial Board (א' אוסטרובסקי).