



חקר ימים ואגמים לישראל
Israel Oceanographic & Limnological Research

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

ניטור ומחקרי כנרת לשנת 2022

דו"ח חיא"ל T12-2023



צילום: איילה לובל-ילס, מבט אל הר האושר, סתיו 2022



ניטור ומחקרי כנרת דו"ח שנתי 2022

המעבדה לחקר הכנרת, חקר ימים ואגמים לישראל

דו"ח חיא"ל T12/2023

בעריכת ד"ר גדעון גל ואיילה לובל - ילס

יולי 2023

עיקרי הדו"ח - תמונה כללית : הכנרת בשנת 2022

שנת 2022, דמתה במובנים רבים לקודמתה. משרעת המפלס במהלך שנת 2022 עמדה על 1.71 מ' בהשוואה ל-1.68 מ' בשנת 2021. הרום המקסימלי בשנת 2022 נרשם בסוף חודש אפריל והגיע ל-209.02, סה"כ 22 ס"מ מהקו האדום העליון. המפלס הגבוה של האגם בשנה החולפת מסמן ארבע שנים של גשמים ממוצעים או גבוהים מהממוצע ותפעול האגם במפלסים גבוהים. נושא המפלסים הנמוכים והשינויים הגדולים במפלסי האגם שחוונו 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 את אופן פיזור המים הנכנסים לכנרת. הרחבנו את הניטור שאנו מבצעים באזור שפך הצלמון על מנת ליצור בסיס מידע ורקע עוד בטרם החלו בהזרמת המים. נעקוב מקרוב אחרי שינויים אפשריים בעקבות הזרמת המים.

לעליה המבורכת במפלס האגם בשנים האחרונות היו מספר השלכות על האגם שאת חלקן ניתן היה לזהות במהלך השנה וחלקן, על בסיס הידוע לנו מהעבר, תיחשפנה בעתיד. העלייה במפלס לוותה בהמשך ירידה בריכוז הכלוריד באגם עד לריכוז מינימום של 248 מג"ל באפילמיניון בחודש אפריל. הצמחייה החופית שהוצפה במהלך חורף 2018/19 נשארה מוצפת, הצמחייה ששרדה עד לחורף 2021/22 מתה. לצמחייה החופית תפקיד חשוב בשמירה על אוכלוסיות הדגים, כגון האמנונים, התורמים רבות למערכת האקולוגית ואשר מנצלים את הצמחייה להגנה מפני טורפים במהלך תקופות ההטלה, דגירה, בקיעה ואימון של הצעירים. עם צמצום צפיפות הצמחייה החופית, חשיבות הצמחייה כאזור מוגן לאמנונים הצעירים באה לידי ביטוי ביתר שאת. יחד עם זאת, הצמחייה מקשה על גישה של נופשים למים, עלולה ליצור מפגעי ריח ויתושים וכן לשחרור של נוטריינטים לאגם עם התפרקותה במים. המעבדה לחקר הכנרת, פעלה יחד עם רשות המים ורשות ניקח כנרת לצמצם, מצד אחד, את הפגיעה בנופשים ובעלי החופים, ומצד שני, לשמור על אזורי צמחייה לטובת אוכלוסיות הדגים באגם.

איכות המים בכנרת מכומתת באמצעות מדד ייחודי ("מדד הקיימות של הכנרת") שפותח במעבדה לחקר הכנרת. ערך המדד של 2022 היה נמוך מערך המדד בשנת 2021 ועמד על ערך של 47 בלבד, ערך נמוך משמעותית מהסף של הערך הקביל (60). סף הערך הקביל מעיד על שמירת המערכת האקולוגית של האגם בתנאים דומים לאלו שנצפו עד לתחילת שנות ה-90. ערכי המדד עבור שנת 2022, ובשנים שקדמו לה, נמצאים מתחת לסף הקביל. בנוסף, ערכי המדד סובלים מחוסר יציבות בולטת, עם דפוס של עליות וירידות משמעותיות מאז אמצע שנות ה-90. גם בשנה החולפת הסיבה העיקרית לערך המדד הנמוך היה הריכוז הגבוה של כחוליות במים במופע החורפי וכן במופע קיצי-סתווי והעדר פריחת הפרידיניום בחורף-אביב.

בשנים האחרונות המעבדה לחקר הכנרת, עם תמיכה 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 נחל 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. הנתונים הנאספים בתחנות אלו, בדומה לנתוני תחנה A מוצגים כיום ב"מרכז מידע כנרת" שבאתר חיא"ל www.ocean.org.il (או בלינק ישיר: <http://kinneret.ocean.org.il/Default.aspx>). חלק מהנתונים מוצגים בזמן אמת וחלקם כנתונים היסטוריים. האתר אינטראקטיבי ומאפשר את בחירת הפרמטרים ופרקי הזמן עבורם יוצגו הנתונים. נכון לכתיבת שורות אלה, האתר עובר שדרוג ושינויים ולכן ייתכנו הפסקות בפעילותו.

טבלה 1: עיקר ממצאי הניטור לשנת 2022.

משתנה	הממצאים
מפלס	משרעת המפלס במהלך שנת 2022 עמדה על 1.71 מ' בדומה לשנת 2021 (1.68 מ') לעומת 2.65 מ' בשנת 2020. בשנה ההידרולוגית 2021/22 נרשמה עליית מפלס של 1.29 מ' בלבד. הרום המקסימלי בשנת 2022 נרשם בסוף חודש אפריל והגיע ל-209.02, סה"כ 22 ס"מ מהקו האדום העליון.
מדד הקיימות של הכנרת	ערך המדד הכולל לשנת 2022 היה 47 - ערך מעט נמוך המערך שנרשם בשנת 2021. ומאוד נמוך ביחס לערך הרצוי של 60. בינואר-יוני הערך הכולל היה נמוך ביותר (41) בעיקר לאור היעדר פריחה של פרידיניום ונוכחות של מיקרוציסטים במים. בחצי השני של השנה, ערך המדד הכולל היה גבוה יותר (53) אבל נמוך מהערך הקביל בעיקר לאור פריחה של כחוליות קיציות וערכי חנקן זרחן כללי נמוכים.
טמפ' המים	שנת 2022 התאפיינה בטמפרטורת אויר החמות מהממוצע במידה ניכרת בשעות הצהריים, במיוחד בחודשים אפריל, יוני, אוגוסט ודצמבר. מרץ היה קר בצורה ניכרת לאורך כל שעות היום ביחס לממוצע ה-10 שנתי. מאפיינים אלה תורגמו לטמפרטורת מים של השכבה העליונה (10 מטר) שהייתה קרה מהממוצע ה-10 שנתי בחודשים מרץ ואפריל וחמה יותר בחודשים מאי-אוקטובר. השיכוב התרמי במהלך 2022 נמשך כ- 285 יום, בהשוואה לממוצע רב שנתי של 50 השנים האחרונות העומד על 293 ± 18 יום בממוצע.
כלוריד	ערכי כלוריד השנה בכנרת נמוכים מהשנה הקודמת וכן מטווח העשור הקודם המכיל בתוכו רצף שנות בצורת ועל כן ערך כלוריד ממוצע גבוה. ערכי המינימום של כלוריד באגם היו באפילמניון באפריל (כ- 248 מגכ"ל). השנה הקלנדרית הסתיימה בערכי כלוריד של 259 ו- 263 מגכ"ל בהיפולימניון ובאפילמניון בהתאמה.
זרחן	ערכי זרחן כללי, זרחן מומס וזרחן מוגיב בשתי השכבות בשנת 2022 היו דומים לערכי השנה הקודמת והממוצע הרב שנתי אך הראו מגמה קופצנית יותר לאורך השנה. בנוסף וכמו בפרמטרים נוספים- התחלת הצטברות זרחן מומס בהיפולימניון באוגוסט מייצגת איחור של חודשיים בתהליך זה השנה.

משתנה	הממצאים
חמצן	באפילימניון שיאי החמצן בחורף -אביב 2022 היו מעט נמוכים יחסית לממוצע הרב שנתי אך דומים למגמה של השנה הקודמת. בהיפולימניון, מגמת התפתחות החמצן דומה לממוצע הרב שנתי - עם ערכי שיא גבוהים בהרבה מהשנה הקודמת. בנוסף, בולט איחור של כחודש ביחס לשנים קודמות בדעיכה של ערכי החמצן לערכי מינימום.
חנקן	באפילימניון, ערכי חנקן כללי ואורגני וכן הצורנים האנאורגניים: אמוניום, ניטריט וניטראט היו דומים לערכי הממוצע הרב שנתי. בהיפולימניון לעומת זאת, בולט איחור של כחודש בפאזה ההתפתחות של צורנים אלו, למשל דעיכת הניטראט, השיאים של הניטריט ותחילת הצטברות של אמוניום.
קיבוע חנקן	קיבוע החנקן ב- 2022 התפרס על פני עונה קצרה והיה נמוך מהרגיל. שני שיאים עונתיים של קצבי קיבוע נמדדו, האחד בסוף אוגוסט, בזמן שיא פריחת הכחולית אפניזומנון, והשני בסוף ספטמבר, בזמן שיא פריחת הכחולית צילינדרוספרצופסיס. בסך הכל קובעו באגם כ- 13 טון חנקן אטמוספרי במהלך פריחת הכחוליות הקייציות של 2022.
ייצור שניוני חידקי	הפעילות החידקית ההטרוטרופית השנתית שנמדדה בשנת 2022 באזור הפוטי הייתה נמוכה מזו שנמדדה ב- 2021. ערכי שיא שנתיים נרשמו בחודש אוגוסט בזמן פריחת הכחוליות מקבעות החנקן. נפסקה המגמה של פעילות חידקית גבוהה שאפיינה את השנים האחרונות.
מאזני פחמן, חנקן וזרחן	שטפי פחמן חנקן וזרחן לאגם ב- 2022 גבוהים ביחס לשנה הקודמת שהייתה יחסית חריגה (שטפים נמוכים) ביחס לשנתיים הקודמות (2019, 2020). עבור פחמן ערכי היצרנות הראשונית ירדו השנה והיחס יצרנות ראשונית עלה מעט ביחס לשנה הקודמת. שנת 2022 גם אופיינה בערכי קבורה של זרחן, חנקן ופחמן לסדימנט בקרקעית האגם, גבוהים מעט ביחס לשנה הקודמת.
פיטופלנקטון	בשנת 2022 שוב לא התפתחה פריחת פרידיניום. מאז 1996 היו 19 שנים ללא פריחת פרידיניום ורק 8 שנים עם פריחה. בהעדר פרידיניום הביומסה האצתית במים הייתה נמוכה לאורך כל השנה עם שיא קטן עקב פריחת צורניות בפברואר. כחוליות וירוקיות תרמו את עיקר הביומסה הקייצית.
כחוליות רעילות ורעלנים	במהלך שנת 2022 נרשמה בכנרת נוכחות מצומצמת של מיקרואיסטיס בחודשי החורף-אביב. בתקופה זו נמצאו רעלני מיקרואיסטיס במים במספר נמוך של בדיקות. הריכוזים בביומסה הכללית היו גבוהים ועלו בסוף חודש מרץ עד 840 מיקרוגרם לקילוגרם כפי שנמדדו בחוף המעבדה. בחודשי הקיץ-סתיו נצפתה עליה בריכוזי הרעלן צילינדרוספרמופסין שמקורו במיקרואצה אפניזומנון. ריכוז הציאנוטוקסין הנ"ל הגיע ל 1.62 מיקרוגרם לליטר בסוף חודש אוקטובר 22 כפי שנמדד בתחנה A.

משתנה	הממצאים
זואופלנקטון	נרשמה ירידה של כ-3% בצפיפות הכוללת של הזואופלנקטון במהלך 2022 ביחס לשנת 2021 שבה נרשמה עליה של 16% ביחס לשנת 2020. בדומה לשנת 2021, גם בשנת 2022 נרשמו ערכי צפיפות גבוהים של קופפודים וקלדוצירה בחודשים אפריל-מאי. ערכים אלו היו גבוהים בהרבה מהערכים הרב-שנתיים. בהמשך למגמה של השנים האחרונות חלה עליה משמעותית ביחס שבין קופפודים מהסוג מזוציקלופס לסוג תרמוציקלופס. עליה זאת משקפת ירידה בלחץ הטריפה של הדגים. זאת התמונה שעולה גם מהסקר האקוסטי של הדגים.
דגים	צפיפויות הדגים מכל קבוצות הגודל בכל העונות היו בסדר גודל קרוב לתחומים הנמוכים שנצפו בשנים 2011-2021. בשנת 2022 הצפיפות הממוצעת של דגים הגדולים מ-60dB - הייתה 1.1 פרטים / מ"ר. הצפיפויות של קבוצות גודלי הביניים והגדולים (מעל 50dB -) היו הנמוכות ביותר במרץ ובדצמבר, כאשר רוב הדגים בהן (בעיקר <i>M. terraesanctae</i>) התרכזו באזורים הרדודים למטרות רביה. באביב ובחורף צפיפויות הדגים הגדולות ביותר נמצאו בקרבת החופים הצפוניים והמערביים. במאי הריכוזים הגדולים ביותר ניצפו באזורים המזרחיים. בקיץ (אוגוסט) הדגים התרכזו בחלקו הצפוני של האגם.
דיג ודגה	ברבעון השלישי של שנת 2022, נצפתה ירידה משמעותית במספר הסירות הנסקרות ובהתאמה ירידה בשלל האמנונים והקיפוניים. ההסבר לירידה אינו ברור ועלול לנבוע מגורמים הקשורים לאופי הסקירה כמו למשל שינוי מקום פריקת השלל, זמן ההגעה למעגן וכד'. בשלל דיג ההקפה נצפתה ירידה כללית, אשר הייתה משמעותית ביותר בשלל הקיפוניים עם ממוצע חודשי של 307 ק"ג קיפונים לחודש לעומת 1168 ק"ג ממוצע חודשי בשנת 2021. בנוסף, השנה נעשה שימוש במדדי גידול סטטיסטיים על מנת להעריך את גודל האוכלוסייה של <i>אמנון הגליל</i> בכנרת. תוך שימוש בפרטים בטווח גדלים רחב שנאספו משלל הדיג של ספינת ההקפה, אנו אומדים את ביומסת אוכלוסיית אמנוני הגליל בכ-600 טון.
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 של אלפי עד עשרות אלפי פרטים למ"ר בעומקים 2.5 ו-5 מ'. ניתן למצוא מינים טבעיים כמעט רק במים הרדודים ובריכוזים 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.

משתנה	הממצאים
חומרי הדברה	הריכוזים של חומרי ההדברה נמוכים ביותר באגם וכולם מתחת ל- 1 ppb ועל כן לא היוו מקור לדאגה. השנה בעקבות פרוייקט ניטור חומר חלקיקי באגם במימון קרן המחקר BMBF-MOST נמצא כי חומרי הדברה ומזהמים נוספים נאגרים בסדימנט האגם בריכוזים גבוהים יחסית.
אינדיקטורים לזיהום	רמות חיידקי צואה גבוהים מהרגיל נמדדו בתחנות שונות בצפון האגם בחודשים פברואר עד אפריל, ובדרום האגם בחודש מרץ. בדיקות MST לזיהוי מקורות הזיהום מצביעות על זיהום ביוכימי המגיע לאגם דרך הירדן וממקורות נוספים.
קצבי שיקוע	ב-2022 קצבי הסדימנטציה הממוצעים בתחנות A, F, K, ו-M היו 2.7, 11.9, 9.1 ו-21.7 גרם חומר יבש/מ"ר/יום, בהתאמה. קצבי הסדימנטציה בתחנות F ו-K היו מעט גבוהים מהממוצעים הרב-שנתיים שלהם. קצבי הסדימנטציה בתחנה A היו מעט נמוכים מהממוצע. בניגוד לכך, בתחנה M קצבי הסדימנטציה היו גבוהים פי 1.7 מהערכים הממוצעים הרב-שנתיים. הדבר עשוי להיות קשור ליצירת אזור רדוד נרחב שבו צמחיה יבשתית הוצפה, וחלקיקים, המורחפים בקלות, עשויים היו להצטבר בו לאחר עליית מפלס האגם לגבולו העליון.
הנביעה בברבוטים	במהלך 2022 עלתה המוליכות החשמלית (קרי מליחות) בברבוטים מ- $4,350 \text{ cm/uS}$ בינואר ל- $4,990 \text{ cm/uS}$ בסוף מרץ ולאחר מכן ועד סוף דצמבר המליחות ירדה בהדרגה ל- $4,460 \text{ cm/uS}$. במקביל, השתנה ריכוז הכלוריד המדוד בטווח שבין $1,204$ מג"ל ועד $1,434$ מג"ל עם מקסימום בסוף מרץ ולאחר מכן ירידה מתונה עד $1,212$ מג"ל. מאידך ריכוז הניטרט השתנה בין 0.22 מג"ל במאי ועד למקסימום של 0.72 מג"ל בחודש נובמבר. מהירות הזרימה בצינור הברבוטים בציר Z בין ינואר לסוף אוגוסט התאפיינה במספר פיקים שנעו בין ערכים הקרובים לאפס ועד ל- 7.5 ס"מ/שניה. מתחילת ספטמבר ועד סוף השנה הערכים היו במגמת ירידה מ- 2.5 ס"מ/שניה ועד ל- 1 ס"מ/שניה. הטמפרטורה בבסיס צינור הברבוטים במהלך 2022 נעה סביב 25°C . 7°C עם פיק של 25.8°C בתחילת אפריל.

תוכן עניינים

1	הקדמה: שילוב פעולות הניטור והמחקר במעבדה לחקר הכנרת
2	ניטור הכנרת
2.1	מבוא
2.2	מדד הקיימות של הכנרת
2.3	מאזני חנקן, זרחן ופחמן בכנרת
2.4	מפלס האגם
2.5	מטאורולוגיה ופיזיקה של האגם
2.6	קצבי סדימנטציה
2.7	ממצאי הניטור הכימי
2.8	ניטור מתכות כבדות בכנרת
2.9	שטפי זרחן באבק
2.10	קיבוע חנקן
2.11	פחמן אורגני ואנאורגני מומס וחלקיקי
2.12	בחינת נוכחות חומרי הדברה במי האגם ובדגה
2.13	מדידת פרמטרים בצינור הברבוסים
2.14	כלורופיל וייצור ראשוני
2.15	ייצור שניוני חיידקי
2.16	ניטור חיידקים ממקור צואתי
2.17	ניטור פיטופלנקטון
2.18	רעלני כחוליות
2.19	ניטור ציליאטים בכנרת
2.20	ניטור זואופלנקטון
2.21	אוכלוסיות הדגים – סקרים הידרואקוסטיים
2.22	ניטור דיג ודגה בכנרת
2.23	חלזונות וצדפות בליטורל
2.24	איכות מי הכנרת באמצעות צילומי לוויין המשולבים במערכת SISCAL
2.25	מערכת מידע גיאוגרפית באתר באתר האינטרנט GIS ONLINE
2.26	מאגר מידע כנרת
3	מחקרי כנרת
3.1	אוסף התרבויות הלאומי של אצות ישראל
3.2	ברקוד גנטי של ביוטת הכנרת
3.3	פיתוח, כיוול ויישום מודל ביוגיאוכימי תלת מימדי לכנרת

115.....	3.4	ניטור ומידול הזרמת מים דרך נחל צלמון
121.....	3.5	מערכת ICT לזיהוי תגובת עמידות אקולוגית במערכות מים מתוקים
	3.6	גנים פונקציונאליים ודינמיקת תהליכי חמצון-חיזור בכמוקלינה הפלאגית
125.....		של אגם הכנרת
133.....	3.7	השפעת שינויי אקלים על האקולוגיה של הכנרת
139.....	3.8	יערות אשלים מוצפים – בית גידול חדש בכנרת
146.....	3.9	ניטור מעיין סומית הגליל (הסרטן העיוור)

4 מחקרי אגן ההיקוות של הכנרת וגופי מים אחרים

150.....	4.1	ניטור ירדן דרומי
155.....	4.2	ניטור מעיינות בגולן
160.....	4.3	ניטור פיטופלנקטון, זואופלנקטון ודגים באגמון החולה
171.....	4.4	פרויקט שיקום הדיפלה: פיטופלנקטון ופרמטרים נלווים
	4.5	שימוש במודלים אקולוגיים לבחינת השפעות קידוחי הגז על מארג המזון במרחב הכלכלי הישראלי
178.....		
	4.6	פיתוח מודל אקולוגי במסגרת פרויקט תכנית אב לשמורות טבע במים הכלכליים של ישראל בים התיכון
184.....		
	4.7	פיתוח שיטות ניהול מערכת עיבור דיג בר קיימא ומערכות אקולוגיות ימיות בריאות (ECOSCOPE)
190.....		

5 נספחים

195.....	5.1	סטודנטים לתארים מתקדמים בהנחיית חוקרי המעבדה לחקר הכנרת
196.....	5.2	פרסומי צוות המעבדה בספרות הבינלאומית המבוקרת ב- 2022/23
201.....	5.3	דו"חות המעבדה 2022
203.....	5.4	ייעוץ לממשלה וחברות במערכות של עיתונים מדעיים
205.....	5.5	ביקורים במעבדה בשנת 2022

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 מרכיביה של המערכת האקולוגית הקיימת באגם. לדוגמה, נוטריינטים וגורמי גידול או עיכוב שנכנסים מאגן ההיקוות משפיעים על התפתחות האצות והחיידקים. 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, חיידקים, זואופלנקטון (ודגים שאינם מוצגים). התהליכים הקושרים בין המרכיבים האלו מסומנים בחיצים.

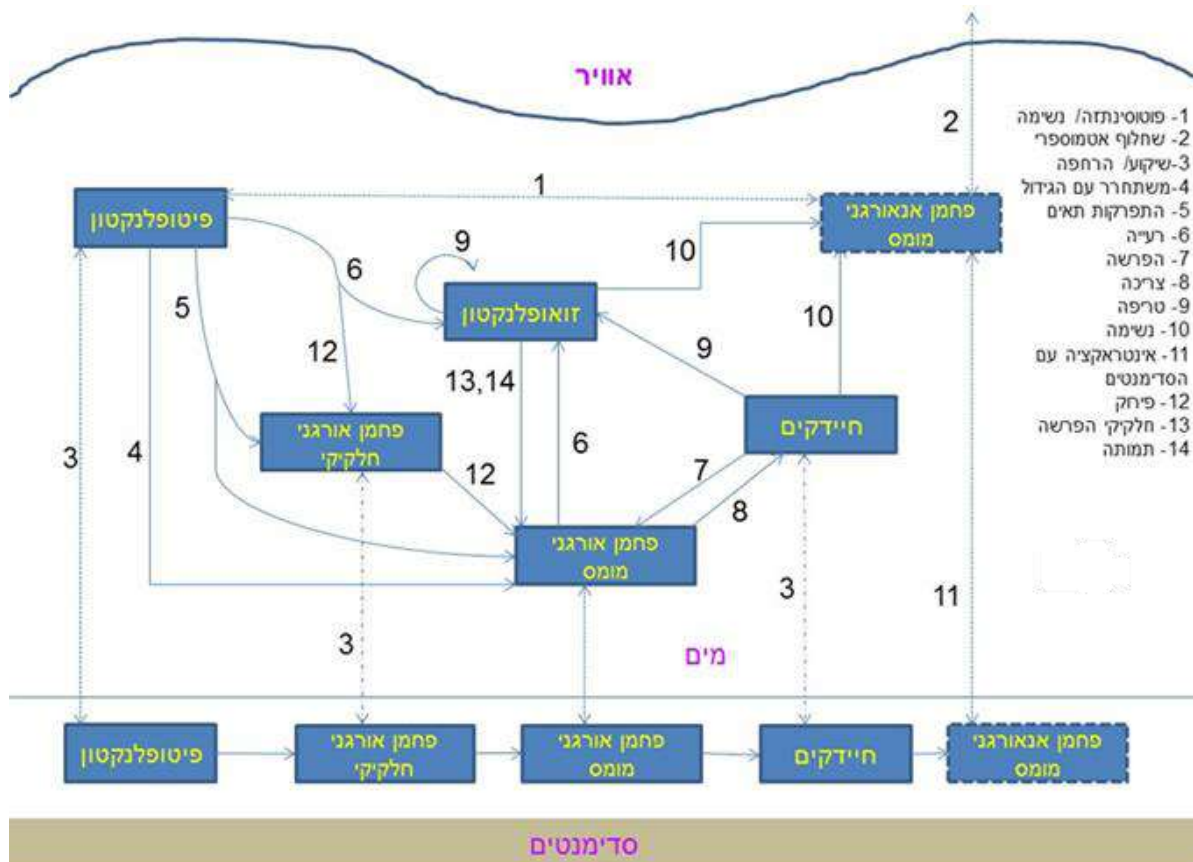
עבודות הניטור והמחקרים המתבצעים במעבדה לחקר הכנרת מיועדים בין השאר גם לשפר את המודלים הכמותיים ולהבהיר מה הם החלקים הקריטיים במערך מורכב זה. בעזרת המודלים ניתן להגיע להבנה מפורטת יותר של מידת ההשפעה של הגורמים השונים על רמת האיטרופיקציה, על איכות המים ועל מצב המערכת האקולוגית.

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 ביותר מ-10 פורומים ממשלתיים ומקצועיים, ישראליים ובינלאומיים. בנוסף, החוקרים היו פעילים כעורכים ב-15 כתבי עת מקצועיים בינלאומיים, פרסמו 23 מאמרים בכתבי עת מדעיים, הגישו 18 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 2022 סה"כ 15 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 בכ-20 מחקרים ובמימון בהיקף של מעל 3,000,000 ₪ (לא כולל את תכנית ניטור הכנרת ועלויות כח אדם). הפעילות הניטורית

ממומנת בעיקרה ע"י רשות המים ומשרד האנרגיה וכוללת את תכנית הניטור השוטף של הכנרת, על כל מרכיביה.

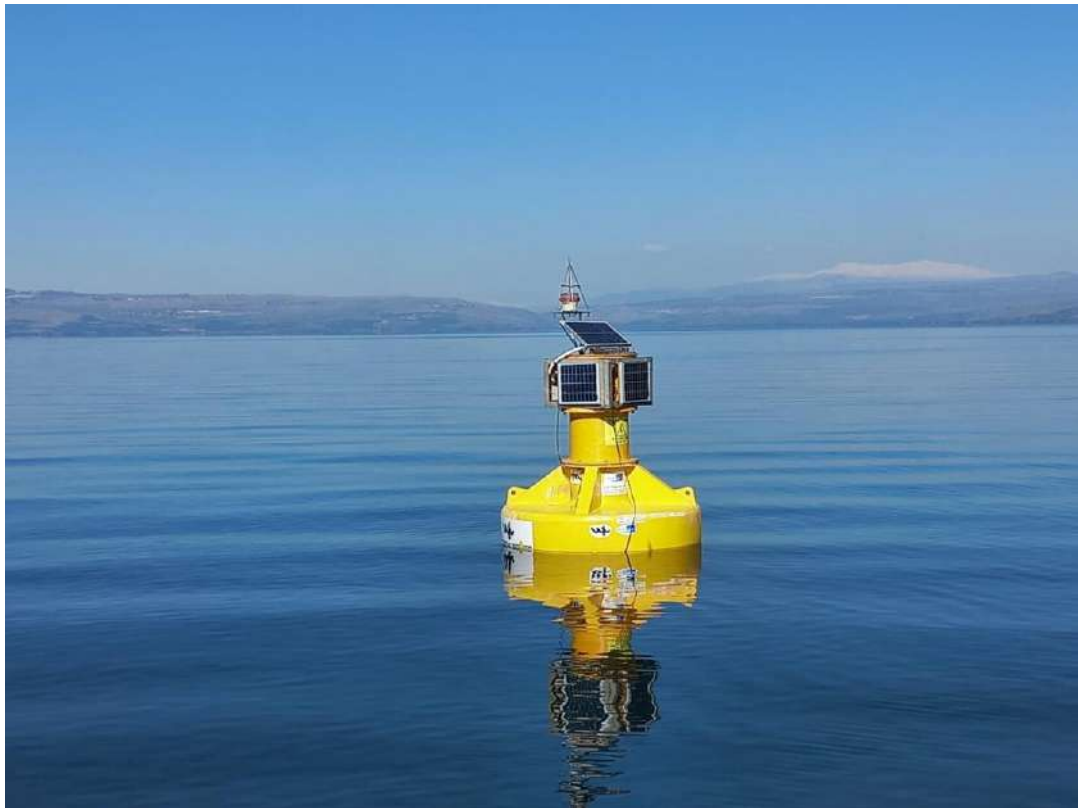
ברצוני להודות בהזדמנות זאת לאיילה לובל-ילס, מזכירת המעבדה, אשר סייעה רבות בעריכת הדוח.



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

2 ניטור הכנרת

2.1 מבוא



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

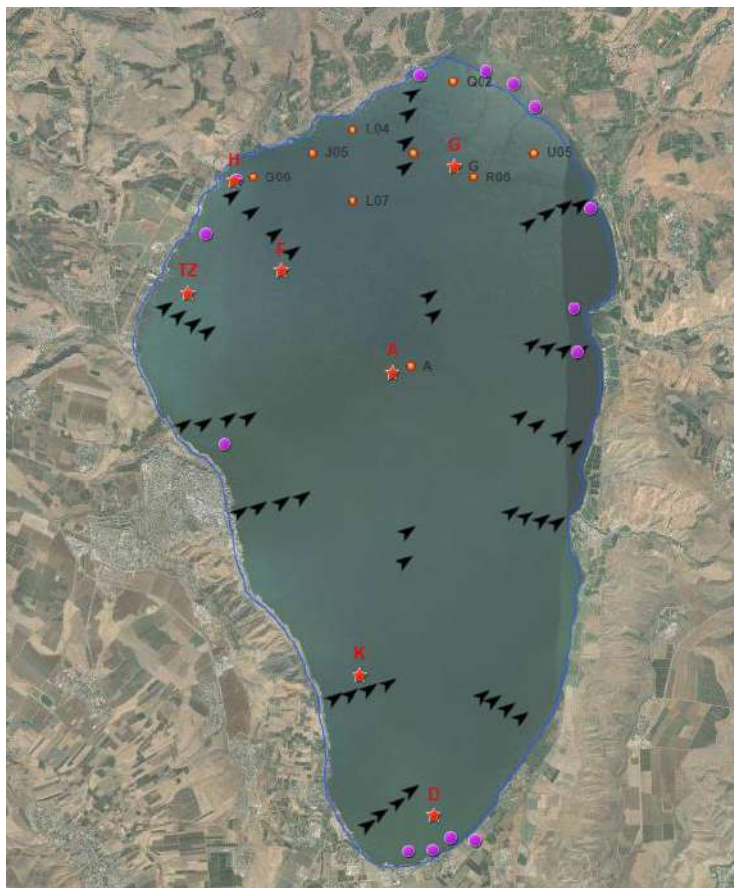
במימון
רשות
המים

צוות המעבדה לחקר הכנרת, חיא"ל

- נתוני הניטור שנאספו בכנרת במשך יותר מ- 50 שנה מהווים בסיס נתונים ומידע ייחודי באופיו, הן בשל רמת דיוק המדידות והן בשל רציפותן, המשמש לקבלת החלטות תפעוליות ומדיניות סביבתית.
- תכנית הניטור של הכנרת הורחבה במהלך שנת 2022 לכלול תחנה רציפה נוספת מול שפך נחל צלמון על מנת ליצור נתוני רקע לפני תחילת הזרמת מי מערכת דרך הצלמון לכנרת.
- ניטור הדיג והדגה בכנרת הורחב לכלול ניתוח כמותי של מצב אוכלוסיית אמנונים באגם.
- ניטור אדפטיבי של אוכלוסיות הכחוליות מופעל במסגרת ניטור "קשת צפונית".
- ניטור קשת צפונית מתבצע עם סימנים ראשוניים של התפתחות פריחת כחוליות עד דעיכת הפריחה, ומתבצע במקביל למעבר לוויין מעל הכנרת.

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, תכנית הניטור השנתית, אשר התפתחה במהלך שנות הניטור, מבוססת על דיגום במספר תחנות בכנרת בעומקים שונים, ובדיקת מספר רב של משתנים פיזיקליים, כימיים וביולוגיים. תכנית הניטור הורחבה בשנה האחרונה לכלול גם ניטור דיג ודגה אשר משלים את תמונת מארג המזון בכנרת. הניטור, על כל מרכיביו, מאפשר כימות השטפים של החומרים השונים, ביטוי של איכות מי האגם, קביעת מגמות של שינויים באיכות המים ובמערכת האקולוגית ואיתור מגמות של זיהום המערכת.

יעדי תכנית הניטור קובעים במידה רבה את תדירות הדיגום, את מספר תחנות הדיגום ומיקומן בגוף המים ואת המשתנים הנבדקים. יתר על כן, אופי גוף המים, עומקו, משטר הזרמים שבו והטופוגרפיה של קרקעית האגם (בתימטריה) מכתיבים את מספר הדגימות 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 תכנית העבודה השנתית של המעבדה לחקר הכנרת. תחנה A, הנמצאת בנקודה העמוקה ביותר באגם, נדגמת בתדירות של אחת לשבוע ובה נבדק מספר רב של משתנים כמפורט בטבלה 2. בנוסף, נדגמים בעזרת הפרופיילר מספר משתנים מכל מטר בעמודת המים 4-6 פעמים ביממה. בתחנות הדיגום הנוספות G, D, ו-K, הממוקמות לאורך ציר צפון-דרום, נבדק מספר משתנים מצומצם יותר. במהלך שנת 2020 נוספה תחנת דיגום אוטומטית ורציפה בתחנה G. בימים אלו התחנה מתחדשת ותכלול 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 מחל צלמון. מטרת התחנה במיקום זה היא 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.



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

נתוני הניטור שנאספו בכנרת במשך יותר מ-50 שנה מהווים בסיס נתונים ומידע ייחודי באופיו, הן בשל רמת דיוק המדידות והן בשל רציפותן, המשמש לקבלת החלטות תפעוליות ומדיניות סביבתית. יעדי הניטור ואופיו נשקלים אל מול יכולת הביצוע (תשתיות ותקציב) מחד, ומטרות וסוגיות שעולות לסדר היום, מאידך. השמירה על תכנית 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, הייתה צעד הכרחי. צעדים חיוניים נוספים כוללים הרחבה של אמצעי הדיגום המרחביים כגון ה-FluoroProbe שהחל לפעול במהלך שנת 2018 ותוספת של תחנות רציפות כפי שמתרחש ב-3 השנים 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.

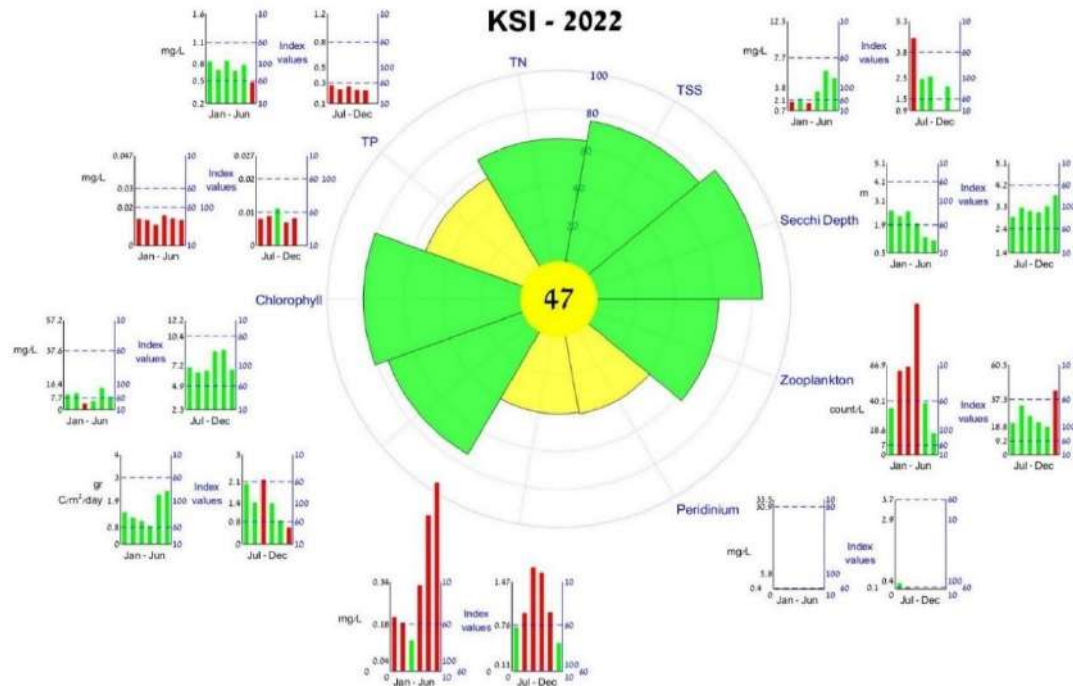
תודתנו נתונה לחברת מקורות, לשירות ההידרולוגי ולשירות המטאורולוגי על העברת נתוני הניטור הנוספים הנאספים על ידם בכנרת ובאגן ההיקוות, וכן על שיתוף הפעולה לאורך השנים. צוות היגוי ניטור כנרת, בראשותם של פרופ' אורי שמיר מהטכניון ופיראס תלחמי מרשות המים, מלווה לאורך שנים את תכנית הניטור ותורם לשיפורה ולהכוונת 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, G	כל 10 דקות
לחות יחסית	גינוסר, A, G	כל 10 דקות
טמפרטורת פני המים	A, G	כל 10 דקות
רוח (כיוון ומהירות)	גינוסר, A, G	כל 10 דקות
קרינה קצרת גל	גינוסר, A, G	כל 10 דקות
קרינה ארוכת גל	גינוסר, A, G	כל 10 דקות
לחץ ברומטרי	A	כל 10 דקות
קרינת אור, PAR	גג המעבדה	רציף (ממוצע שעות)
פיסיקה		
פרופיל טמפרטורה במים	A, D, G, H, K*, TZ*	אחת לשבוע
טמפרטורה במים שרשראות טרמיסטורים	A, F, D	כל 10 דקות
עומק סקי	A, D, G, H, K*, TZ*	אחת לשבוע
פרופיל חדירות האור	A	אחת לשבועיים
קצבי סדימנטציה	A, F, K, M	אחת לשבוע עד שבועיים
כימיה		
אלקליניות	A, D, G, H, K, TZ	אחת לשבועיים
כלוריד	A, D, G, H, K*, TZ*	אחת לשבוע
מוליכות חשמלית	A, D, G, H, K*, TZ*	אחת לשבוע
סידן	A, D, G, H, K, TZ	אחת לשבועיים
סולפיד	A, D, H, K	אחת לשבועיים
חנקן (קילדל) מסיס	A, D*, G, H*, K*, TZ*	אחת לשבוע
חנקן (קילדל) כללי	A, D, G, H, K*, TZ*	אחת לשבוע
אמוניה	A, D, G, H, K*, TZ*	אחת לשבוע
ניטריט	A, D, G, H, K*, TZ*	אחת לשבוע
ניטרט	A, D, G, H, K*, TZ*	אחת לשבוע
חמצן	A	אחת לשבוע
	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
כלורופיל	A	אחת לשבועיים
יצרנות ראשונית	A	אחת לשבועיים

סוג הבדיקה	תחנות דיגום	תדירות הדיגום
זואופלנקטון	A	אחת לשבועיים
ריסניות (מיקרו-זואופלנקטון)	A	אחת לחודש
דגים (אקוסטיקה)	10 חתכים באגם כולו	עונתי
דיג ודגה (במימון משרד החקלאות)	ניטור דגי שלל ודיגום עם ספינת דיג	אחת למספר שבועות
חידקים ממקור צואתי	14 תחנות במים רדודים	אחת לחודש
יצרנות חידקית	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
<u>ניטור סינופטי</u>		
פיזור מרחבי של טמפ', כלורופיל ועכירות - SISCAL	סינופטי באגם כולו	אחת ל-16 ימים

2.2 מדד הקיימות של הכנרת



במימון
רשות
המים

גדעון גל, נעם שחר

- בשנה האחרונה הערך השנתי של מדד הקיימות היה דומה לזו של שנת 2021.
- שלושה משתנים עיקריים היו בבסיס ערכי המדד הנמוכים בשנת 2021: הכחוליות, והפרידניום והזרחן הכללי.

רקע ומטרות

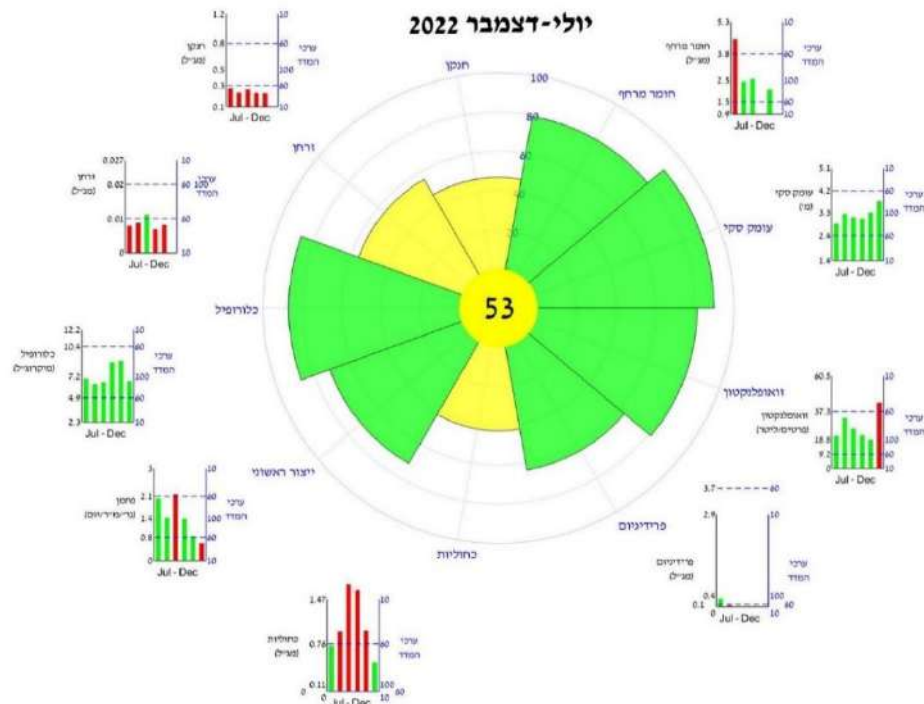
איכות המים בכנרת מכומתת באמצעות מדד ייחודי שפותח במעבדה לחקר הכנרת. המדד המקורי פותח בסוף שנות ה-90, ובמהלך שנת 2014 עבר שינויים עפ"י בקשת רשות המים. בדו"ח השנתי של 2014 דווח על שינויים אלה. על מנת להבדיל בין המדדים, שונה שם המדד המעודכן, והוא נקרא עתה מדד הקיימות של הכנרת - Kinneret Sustainability Index (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 כקביל. ערכים אלו נקבעו על בסיס טווח הערכים במהלך תקופת הייחוס (למידע נוסף ראה Gal and Zohary 2017¹). בנוסף לערך מדרג המחושב עבור כל אחד מהמשתנים, מחושב ערך כולל של המדד.

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.

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 שיסייעו בהחזרת המערכת האקולוגית למצב הרצוי.

תוצאות ודיון

ערך המדד הכולל לשנת 2022 היה 47, ערך הנמוך במקצת מזה שנרשם בשנת 2021 (49) ודומה לערכים שנרשמו בשנים האחרונות (איור 3). למעשה בין השנים 2016-2019 ערכי המדד הכולל לא השתנו באופן מהותי משנה לשנה ונעו בין 45-50 שהם ערכים נמוכים ביותר. יחד עם זאת, בשנת 2020 נרשמה עליה בערך המדד לערך של 55 שהיה אחד מהערכים הגבוהים ביותר שנרשמו בעשור האחרון. למעשה מאז שנת 2000 רק ב-4 מקרים נרשם ערך מדד גבוה מערך של 55 (2002, 2007, 2015, 2020). בנוסף, מאז שנת 2000 נרשמו ערכי מדד גבוהים מערך של 50 בפחות מ-50% מהשנים. המשמעות היא שבשני העשורים האחרונים המערכת האקולוגית של הכנרת נמצאת מרחק רב מהמערכת האקולוגית שאנו שואפים לשמר לאורך זמן. בבחינה מעמיקה יותר של ערכי המדד לשנת 2022 יש לשים לב להבדלים בין שתי התקופות החצי-שנתיות ולגורמים שהשפיעו לרעה על ערכי המדד (איור 4). בתקופה שבין ינואר ליוני הערך הכולל היה נמוך מאוד ועמד על ערך של 41 בלבד בעקבות ערכי מדד נמוכים ביותר של פרידניום וכחוליות (19, 38, בהתאמה). ערכים אלו נבעו מהיעדר פרידניום באביב ומופע של מיקרוציסטיס בעיקר מהמין *M. flos aquae* במהלך חודשי האביב. נרשמו גם ערכים נמוכים של הזואופלנקטון (בגלל צפיפויות גבוהות מהרגיל באביב- ראה פרק מס' 2.20 ניטור זואופלנקטון) והזרחן הכללי (בגלל ערכים נמוכים בחלק מהתקופה). ערכי המדד של שאר הפרמטרים היו גבוהים ואף הגיעו לערכי מדרג של 80.



איור 4: מדד הקיימות של הכנרת (Kinneret Sustainability Index) לשנת 2022. 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 2017

בחצי השני של השנה, ערך המדד הכולל היה גבוה יותר (53) בזכות ערכים גבוהים של רוב המשתנים למעט הכחוליות, והחנקן והזרחן הכללי שהציגו ערכי מדד חצי שנתיים של 42, 47 ו-56, בהתאמה. משתנים אלו גררו את ערך המדד המשוקלל לערך נמוך מ-60. הערך הנמוך של הכחוליות נובע מריכוזים גבוהים שלהם במים במהלך הפריחה הקיצית, בעיקר בחודשים ספטמבר-אוקטובר. במקרה של החנקן והזרחן, נרשמו ריכוזים נמוכים מהמצופה בכל החודשים למעט חודש ספטמבר במקרה של הזרחן. בשני המקרים לא נתקבלו ערכים עבור חודש דצמבר. במבט 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.

2.3 מאזני חנקן, זרחן ופחמן בכנרת



מחקר
במימון
רשות
המים

ירון בארי-שליון, ורנר אקרט, שירה ניניו

- שטפי פחמן חנקן וזרחן לאגם ב- 2022 היו גבוהים ביחס לשנה הקודמת ודומים לשנים 2019-2020.
- עבור פחמן, ערכי ה-GPP ירדו השנה והיחס GPP/CR עלה במעט ביחס לשנת 2021.
- שנת 2022 גם אופיינה בערכי קבורה של זרחן, חנקן ופחמן לסדימנט בקרקעית האגם, גבוהים במקצת מהשנה הקודמת.

מטרת המחקר

הערכת מאזנים שנתיים של פחמן, זרחן וחנקן בכנרת.

רקע

מאזני חנקן, זרחן ופחמן חושבו השנה בכדי 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 והאינונטרים 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 וכן מהערכה של דניטריפיקציה במאזן החנקן בהתבסס על ערכי מקסימום של ניטראט בהיפולמיניון בתחילת השיכוב התרמי.

מאזן הפחמן האורגני (OC) בכנרת עבור 2022 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, 30.3 טון, מתבסס על ערכי מקסימום של זרחן כללי בהיפולמיניון וערך של כ- 72.7 טון עבור הקבורה לסדימנט (סדימנטציה נטו) משלים את המאזן הכללי. על כן, ערכים אלו מובילים לערכי סדימנטציה של כ- 103 טון בשנה. ערכי הסדימנטציה (כללי ונטו) השנה גבוהים מעט מהשנה הקודמת 2021 ודומים יותר לשנת 2020. לעומת זאת, המיחזור הפנימי השנה נמוך הן משנת 2021 והן מ- 2020.

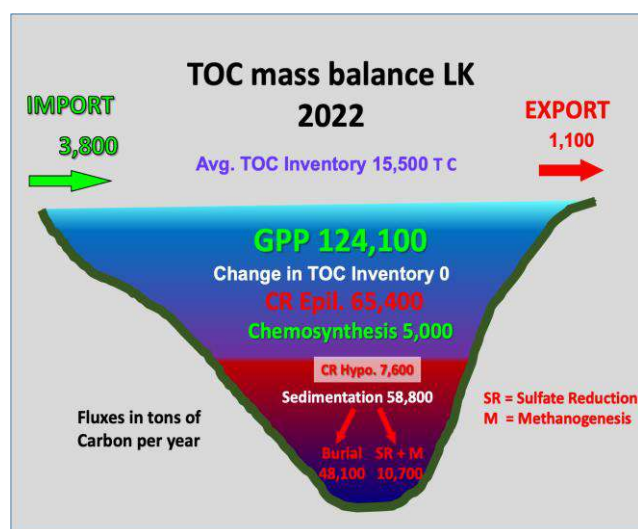
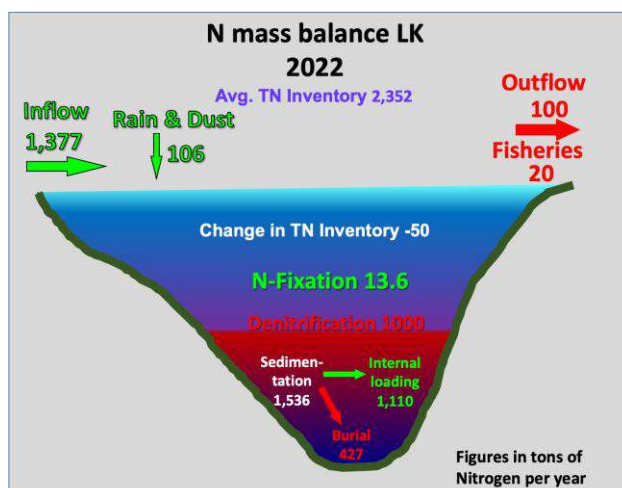
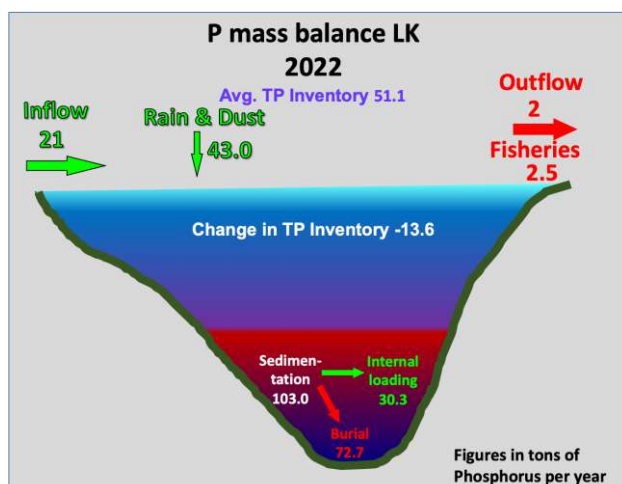
מאזן החנקן

חישוב מאזן החנקן מורכב יותר. כמות החנקן שעובר דניטריפיקציה בתהליכים חיידקיים וחוזר לאטמוספירה מחושב ל- 1000 טון בהתבסס על ערכי מקסימום של ניטראט בהיפולמיניון בתחילת השיכוב התרמי. המיחזור הפנימי בכנרת, 1110 טון, מבוסס על ערכי מקסימום של אמוניה בהיפולמיניון. הקבורה המוערכת בכ- 427 טון סוגרת את המאזן. ערכים אלו מובילים לערכי סדימנטציה בסך של כ- 1536 טון בשנה. בהשוואה לשנים קודמות, שנת 2022 מראה ערכי מיחזור פנימי נמוכות קצת יותר מהשנתיים הקודמות 2020-2021. ערכי הסדימנטציה דומים לאלו של 2019 וערכי קבורה דומים לשנים 2018-2020 וגבוהים משמעותית מאלו של השנה הקודמת 2021.

מאזן הפחמן

בניגוד למחזורי החנקן והזרחן באגם, מאזן הפחמן מושפע באופן ניכר מיצרנות אוטיגנית. הערכה של יצרנות ראשונית ברוטו (GPP) ב- 2021 הינה 124,100 טון פחמן הדומה מאד לממוצעים של השנים 2001-2011. ביחס למספר זה, הכניסות והיציאות לאגם (3,800 ו- 1,100 טון פחמן, בהתאמה) הינן זניחות. תהליכי קיבוע פחמן אחרים (כמוסינטזה ובקטריות פוטוטרופיות 5000 טון פחמן) גם הם הרבה פחות חשובים. כמו בשנים קודמות עיקר המסה של ה-GPP נצרכת בתוך האזור הפוטי בנשימה קהילתית אם כי השנה היחס GPP/CR ירד מעט ביחס לשנה הקודמת. בהיפולמיניון, הידלדלות בחמצן מומס וניטראט תואמת מינרליזציה של 7,600 טון פחמן אורגני בהתבסס על ריכוזים במים בתחילת השיכוב התרמי באגם. הצטברות של סולפיד בהיפולמיניון 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 2020-2021. מכיוון ששני התהליכים מתחילים באזור הסדימנט, הם מייצגים חלק משטף שקיעת הפחמן האורגני החלקיקי.

ההערכה הכוללת שלנו עבור שטף השקיעה – 58,800 טון פחמן. מאזן הפחמן שלנו נסגר ע"י ייחוס שארית של 48,100 טון פחמן אורגני לקבורה בסדימנט תוך התחשבות באי שינוי באינווסטר באגם בשנה זו.



איור 5: מאזני חנקן, זרחן ופחמן בכנרת עבור שנת 2022. בכחול שטפים פנימה ובאדום שטפים החוצה מהאגם. השטפים הינם בטונות לשנה

2.4 מפלס האגם



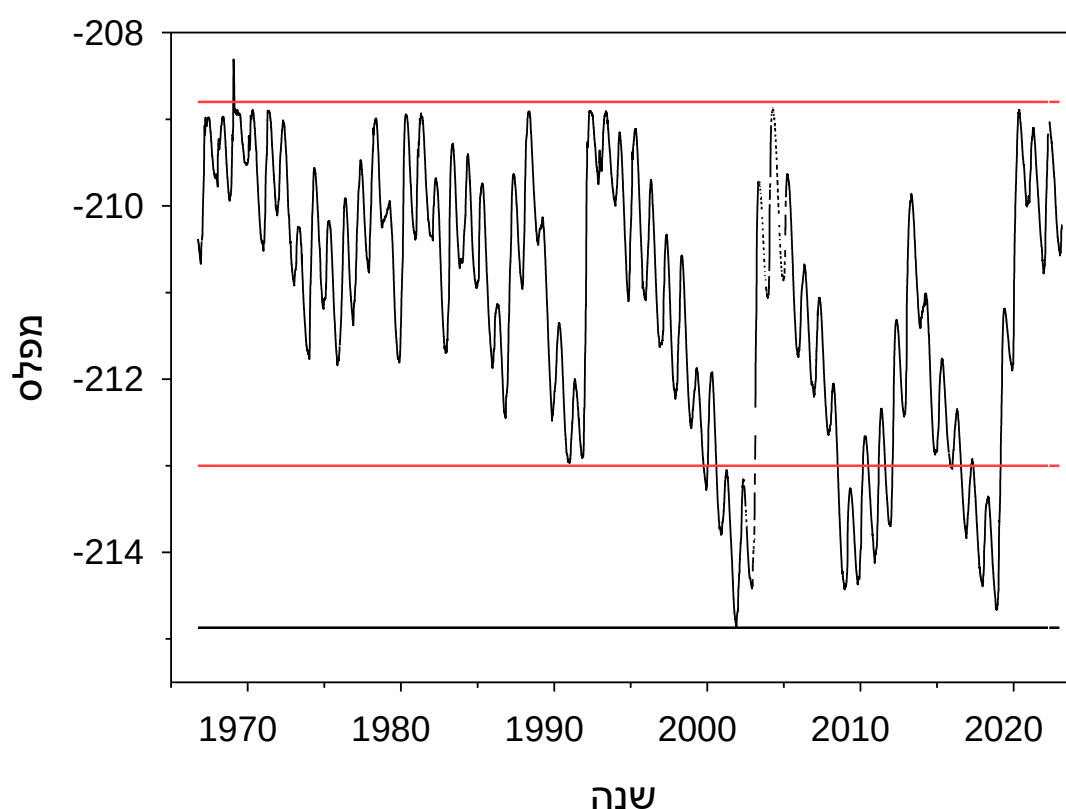
נחל צלמון 8.1.2020 צילום: גדעון גל

גדעון גל

- **משרעת המפלס במהלך שנת 2022 עמד על 1.71 מ' בדומה למשרעת של 1.68 בשנת 2021 לעומת 2.65 מ' בשנת 2020 ותנודה של 1.2 מ' בשנה ההידרולוגית 2020/21.**
- **הרום המקסימלי בשנת 2022 הגיע ל-209.02, סה"כ 22 ס"מ מהקו האדום העליון.**

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) חווינו את שנת הבצורות הראשונה מתוך רצף של חמש שנים. כך העדר הגשמים בחורף 2013/14 החזיר את הכנרת לכיוון הקו האדום התחתון. עליית המפלס החורפית ב-2014 הייתה זעומה, 40 ס"מ בלבד, ובאפריל המפלס הגיע לערך מרבי של 211.01- מ'.

ארבע שנות בצורת נוספות שהסתיימו בחורף 2018/19 הביאו לירידה מתמשכת של מפלס האגם כמעט עד כדי השפל ההיסטורי שנרשם בנובמבר ודצמבר 2001. ואכן, ב-18.11.2018 ושוב ב-3.12.2018 נרשם מפלס של -214.65, רק מעט מעל השפל של -214.87 שנרשם בסוף שנת 2001. ירידת המפלס במהלך חמש שנות הבצורת הייתה מתונה יותר מהירידה הצפויה בעקבות ההחלטה לצמצם למינימום את השאיבה למוביל הארצי. חורף 2018/19 וגם חורף 2019/20 היו מהחורפים הגשומים שנרשמו באגן ההיקוות של הכנרת ובעקבותיהם הייתה עליית מפלס משמעותית. המפלס הגבוה ביותר, -208.89 תועד ב-15.5.2020 ובכך נרשמה סה"כ עליית מפלס של 5.77 מ' בתקופה של 18 חודשים שמתוכם 2.65 מ' במהלך שנת 2020 (חורף 2019/2020). למרות העלייה המצטברת הגדולה במפלס במהלך 2019 (חורף 2018/2019), העלייה היממתית המקסימלית הייתה 0.11 מ' לעומת עליה יממתית מקסימלית של 0.23 מ' במהלך שנת 2020. החורפים של השנים 2020/21 ו-2021/22 המשיכו את השנים הגשומות שהחלו בחורף של 2018/19 ונרשמו 4 שנים של רמת משקעים השווה לממוצע ההיסטורי או גבוהה יותר, רצף חריג ביותר. לעומת זאת, בחורף האחרון רמת המשקעים הייתה דומה לממוצע הרב-שנתי. בעקבות רצף השנים הגשומות, ולמרות השאיבות מהאגם, מפלס האגם קרוב זו השנה השלישית לרום המקסימלי. ב-10.5.2020 נרשם רום מפלס של -208.9 מטר מעל לפני הים, שנה מאוחר יותר, במהלך אפריל 2021 נרשם רום מקסימלי של -209.1 מטר מעל לפני הים ובסוף חודש אפריל, 2022, המפלס עמד על רום של -209.015 מטר מעל לפני הים. במהלך שנת 2022 משרעת תנודות המפלס היה 1.71 מ' בטווח שבין -210.73 ל- -209.02 מטר מעל לפני הים, ועם עליית מפלס של 1.29 מ' בלבד בשנה ההידרולוגית 2021/22. כצפוי, חורף 2022/23 היה חורף עם רמת משקעים נמוכה מהממוצע הרב-שנתי עם מעט מעל 80% מהממוצע. בנוסף, עליית המפלס בחורף 2022/23 הייתה איטית במיוחד עם עליה של 30 ס"מ בלבד עד לתחילת מרץ 2023.



איור 6: מפלס הכנרת, מה-1.10.1966 ועד 1.3.2023. מוצגים "הקווים האדומים", העליון (-208.80 מ') והתחתון (-213 מ'), וכן הקו השחור (-214.87 מ'), המינימום של כל הזמנים שנרשם בכנרת בנוב' 2001. הנתונים באדיבות השירות ההידרולוגי, רשות המים.

2.5 מטאורולוגיה ופיזיקה של האגם



במימון
רשות
המים

שקד שטיין

- במהלך 2022 תוקנה מערכת החשמל בתחנה A ובעקבות זאת חזרה לתפקוד. לעומת זאת, תחנה G הפסיקה לעבוד לקראת סוף 2022.
- טמפרטורת האוויר בחודש מרץ הייתה נמוכה מהרגיל ובדצמבר חמה מהרגיל.
- בהשוואה לממוצע הרב שנתי, טמפרטורת המים הייתה קרה יותר במרץ וחמה יותר בספטמבר ודצמבר.

מטרת המחקר

מטרת הניטור הפיסיקלי היא להבין ולבחון את ההשפעות והמגמות של המטאורולוגיה המקומית על התנאים הפיסיקליים באגם ולהבחין בשינויים קצרי וארוכי טווח. הניטור הפיסיקלי הינו הבסיס להבנת התהליכים האקולוגיים המתרחשים באגם.

רקע

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

- משנת 1996, תחנת טבחה (החל משנת 2007 ממוקמת על המזח בקיבוץ גינוסר).
- משנת 2003, על האקו-ראפט בתחנה A (מופעלת בשיתוף עם השירות המטאורולוגי).
- משנת 2020, תחנה מטאורולוגית בצפון האגם (תחנה-G הקרובה לשפך של הירדן).
- משנת 2021, תחנה מטאורולוגית במזרח האגם (מעגן של קיבוץ עין גב).

ניטור מרחבי של טמפרטורת עמודת המים – ישנן שלוש שרשראות טרמיסטורים הממוקמות במרחב האגם

(תחנות A, D, F) למפה של תחנות הניטור ראה:

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

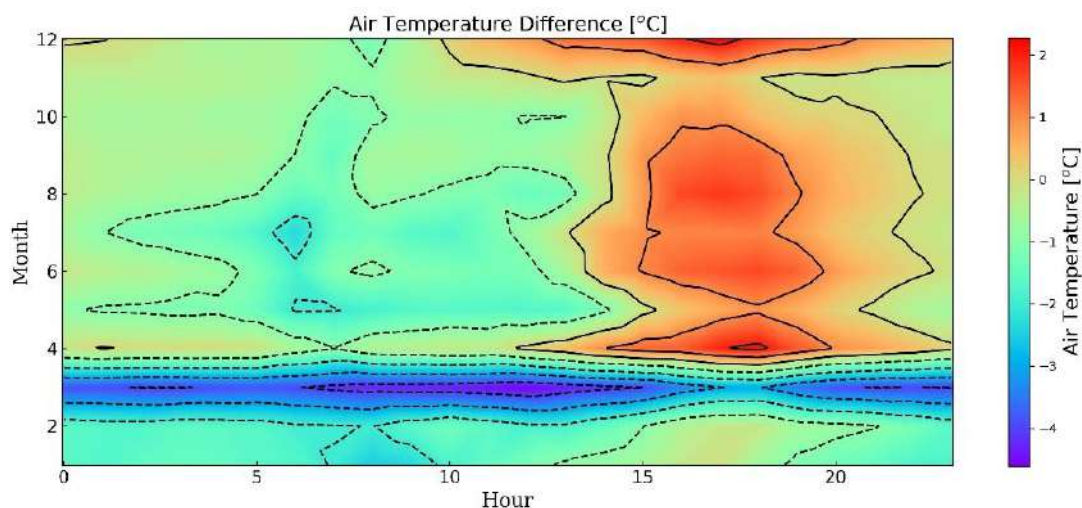
במהלך שנת 2022 מערכת החשמל בתחנה A קרסה, כך שקיים חוסר במידע מתחנה זו עד חודש אוגוסט, בו אספקת החשמל חזרה לפעולה. בנוסף, לקראת סוף שנת 2022 (אוקטובר), תחנה G הפסיקה לפעול והיא תוחלף ע"י מצוף עם מכשור מתקדם במהלך 2023.

תוצאות ודיון

סיכום המדידות המטאורולוגיות לשנת 2022 מיוצג ע"י ממוצע שעתי (ייצוג התנודה היומית) ע"פ חודשי השנה (ייצוג התנודה העונתית). הפרמטרים שסיכום המדידה השנתי שלהם יוצג הם: 1. טמפרטורת אויר (רום 3 מטר מעל פני האגם); 2. טמפרטורת המים (כ-20 ס"מ עליונים); 3. קרינה קצרת גל; 4. קרינה ארוכת גל; 5. לחות יחסית; 6. מהירות הרוח. ממוצע המדידות לשנת 2022 הושווה לסיכום הרב שנתי לשנים 2021-2012. ההשוואה נעשתה ע"י חישוב ההפרש בין ממוצע שעתי לחודש משנת 2022 לעומת ממוצע דומה עבור כל העשור הקודם, ושרטוט מפת הפרשים בין שני הממוצעים. להלן סיכום הממצאים:

טמפרטורת האוויר

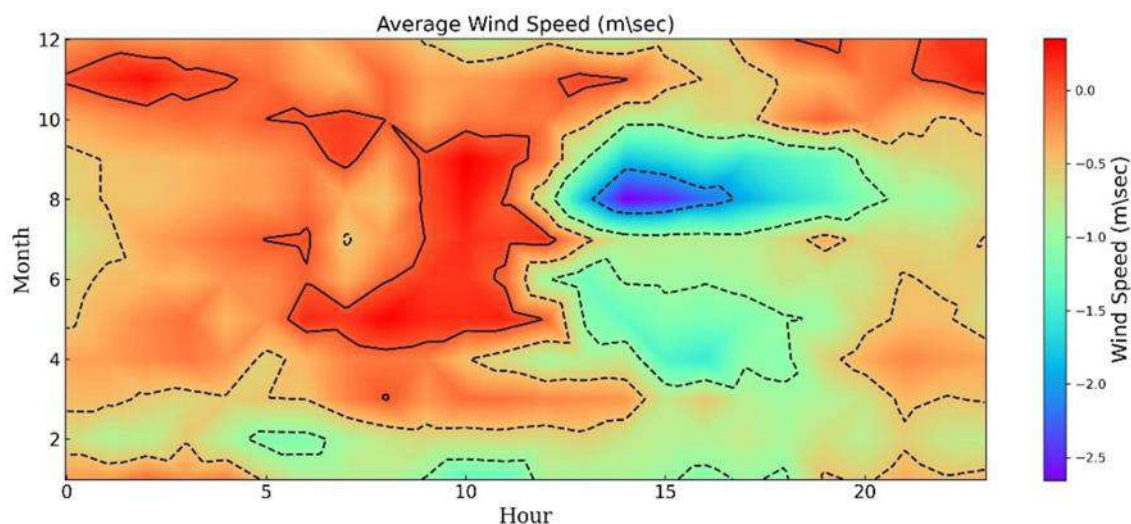
שנת 2022 התאפיינה בשעות צהריים חמות מהממוצע, במיוחד בחודשים אפריל, יוני, אוגוסט ודצמבר, ובשעות בוקר מוקדמות קרות מהממוצע ה-10 שנתי (איור 7). מרץ היה קר בצורה יוצאת דופן מהממוצע לאורך כל שעות היום. אפריל לאחריו היה חם מהממוצע כמעט לאורך כל היום זה בהיפוך מוחלט מהחודש לפניו. מאי, יוני ויולי היו קרובים לממוצע אך מעט חמים. אוגוסט היה מעט חם מהממוצע עם גל חום בסופו. ספטמבר היה חם מהממוצע ללא גלי חום. אוקטובר היה קרוב לממוצע בשעות היום וקר בשעות הלילה. נובמבר היה קרוב לממוצע ודצמבר היה חם מהממוצע.



איור 7: ההפרש בין ממוצע שעתי לחודש בשנת 2022 לעומת ממוצע דומה עבור השנים 2012-2021.

מהירות רוח

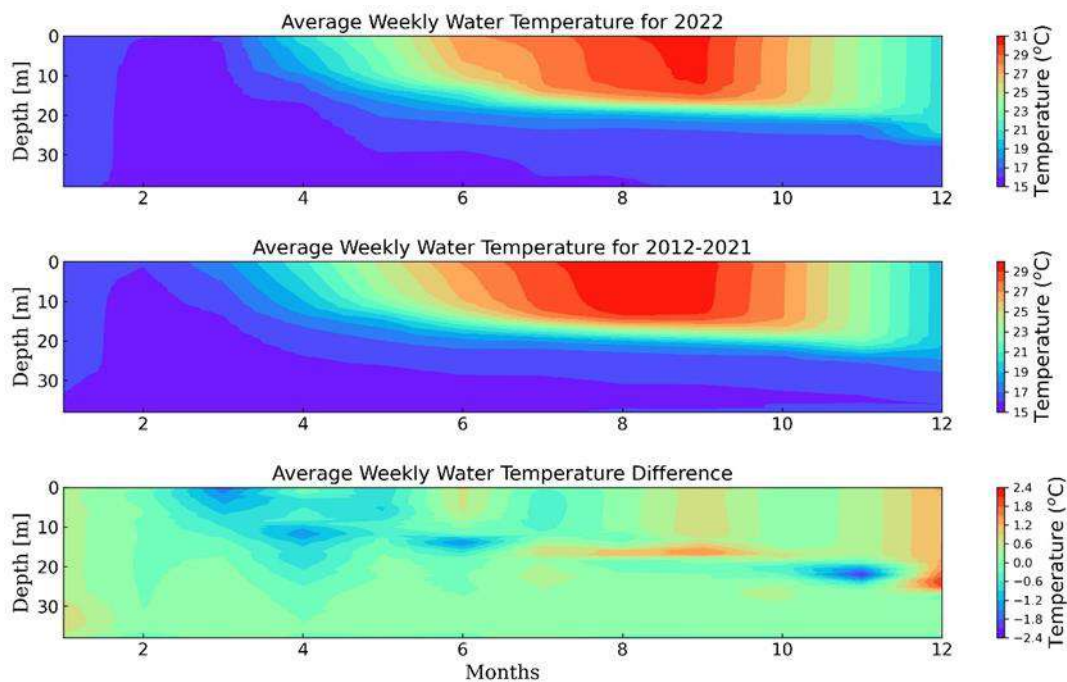
ההפרש בין הממוצע השנתי של ממוצעי מהירות הרוח לבין הממוצע הרב שנתי (איור 8) מראה שבירוב חודשי השנה מהירות הרוח הייתה נמוכה מהממוצע, למעט חודשי הקיץ בשעות הבוקר שם הרוח הייתה גבוהה מעט מהממוצע. ניתן לראות כי באוגוסט וספטמבר מהירות הרוח הייתה נמוכה משמעותית בין השעות 12:00-16:00.



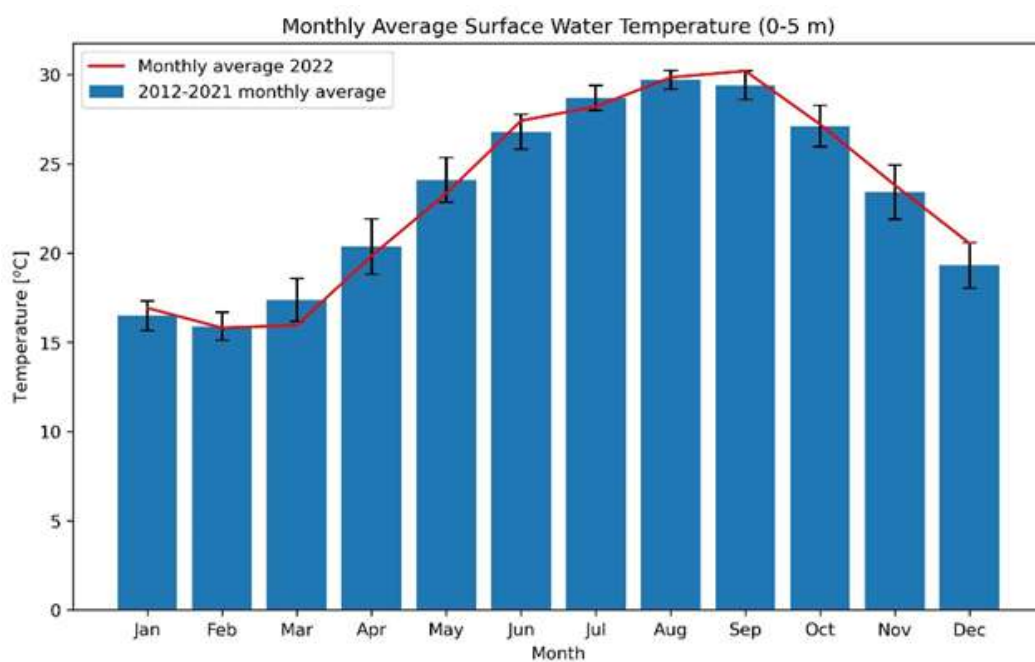
איור 8: ההפרש בין ממוצע שנתי של מהירות רוח (ms^{-1}) לחודש משנת 2022 לעומת ממוצע דומה עבור השנים 2012-2021.

סיכום שנתי של טמפרטורת האגם

פרופיל טמפרטורת גוף המים נבנה על בסיס מדידות שבועיות, באמצעות CTD במספר תחנות דיגום וברזולוציה אנכית של 0.1 מטר. באופן כללי, הפרופיל של טמפרטורת המים היה קרוב לממוצע הרב שנתי (איור 9). ההפרש השלילי במרץ נובע בעיקר מטמפרטורות האוויר הקרה. טמפרטורת המים בחודש ספטמבר הייתה חמה מהממוצע הרב שנתי. ניתן לראות את הביטוי לכך גם בעמודת המים העליונה (איור 10). בדיקת משך השיכוב התרמי במהלך 2022 העלתה כי הוא נמשך כ- 285 יום, בהשוואה לממוצע רב שנתי העומד על 293 ± 18 יום בממוצע רב שנתי של 50 השנים האחרונות.



איור 9: פרופיל טמפרטורה של עמודת המים במרכז האגם, למעלה- פרופיל טמפרטורה לשנת 2022, אמצע- ממוצע לשנים 2012-2021, ולמטה הפרש טמפרטורות בין שנת 2022 ל-10 שנים קודמות.



איור 10: טמפרטורה חודשית ממוצעת של עמודת המים העליונה (0-5 מ') לשנת 2022 ול-10 השנים הקודמות.

2.6 קצבי סדימנטציה



**במימון
רשות
המים**

איליה אוסטרובסקי וניר 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

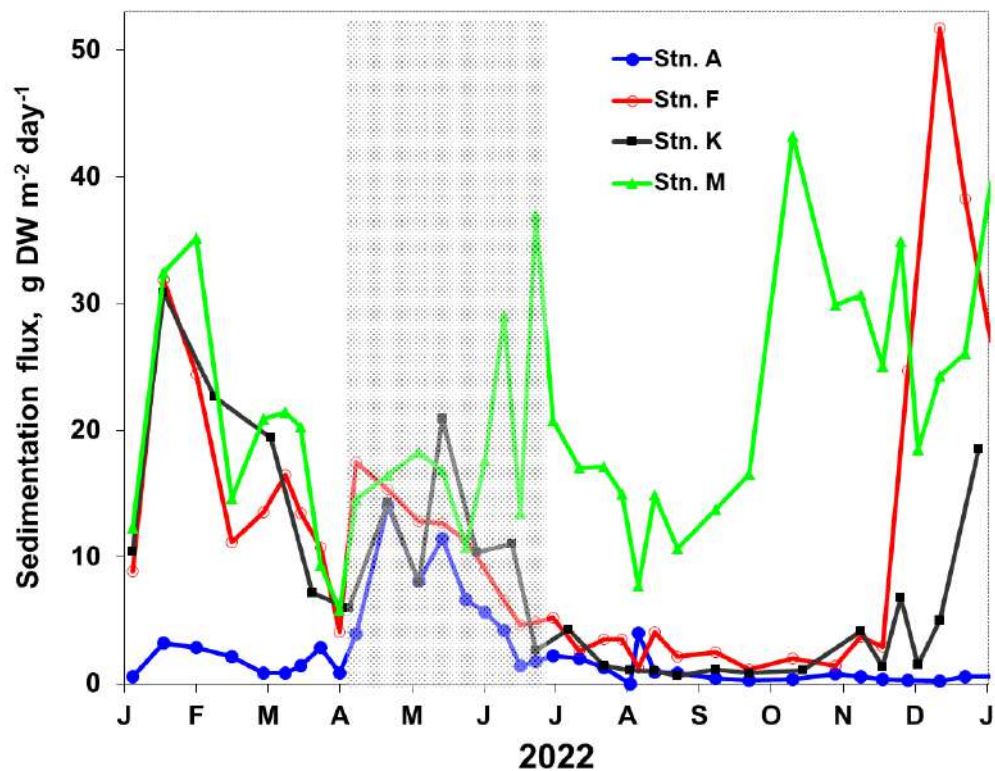
סדימנטציה הינה תהליך חשוב להסרת חומר חלקיקי מעמודת המים ואחד הגורמים העיקריים התורמים ליציבות מערכות אקולוגיות מימיות. קצבי הסדימנטציה הגולמיים בכנרת מנוטרים באופן קבוע החל משנת 1999 באמצעות מלכודות סדימנטים, והראו שונות עיתית ומרחבית משמעותית. תנודות מפלס גדולות באגם בשנים האחרונות השפיעו על תהליכי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

קצבי סדימנטציה נבדקו ב- 4 תחנות באגם: A, F, M, ו-K. המלכודות הסטנדרטיות מורכבות מ- 4 (8 בתחנה A) צינורות בעלי קוטר של 5 ס"מ ואורך - 50 ס"מ. בתחנה A מוקמה המלכודת התחתונה 3 מ' מעל הקרקעית ובתחנה F מוקמה המלכודת התחתונה 2 מ' מעל הקרקעית, בעוד שבתחנות M ו-K המלכודות מוקמו 1.5 מ' מעל הקרקעית. חומר שוקע נאסף אחת לשבוע עד שבועיים. דוגמאות (בדופליקטים) של סדימנט מצטבר סוננו על גבי פילטר GF/F. תכולת חומר יבש נקבעה על ידי שקילת הדוגמאות לאחר חימום ב- 80°C למשך 4 ש'. קצבי הסדימנטציה השנתיים בתחנות השונות חושבו כממוצעים משוקללים של תאריכי הדיגום השונים. בנוסף, החומר שנאסף בתחנה A סורכז, יובש בהקפאה ונשמר עבור אנליזות עתידיות של ריכוזי נוטריינטים בחלקיקים.

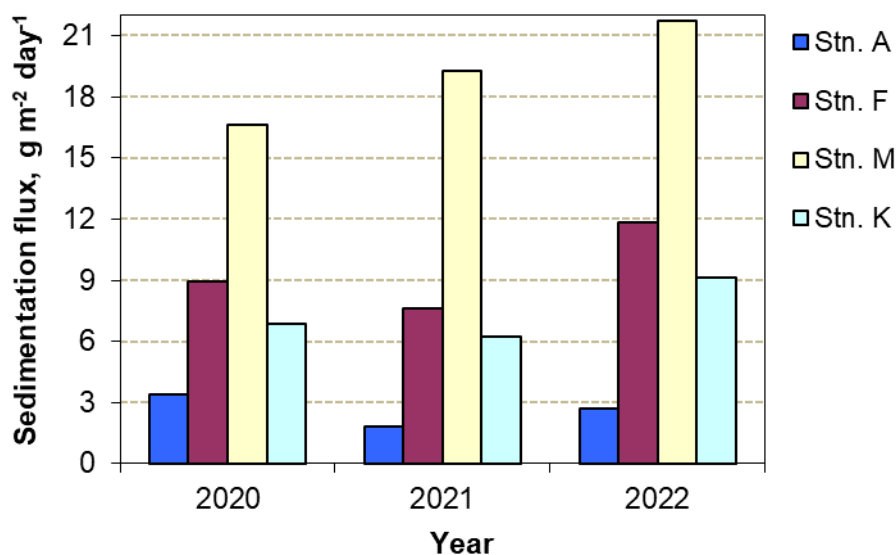
תוצאות ודיון

הדינמיקה של קצבי הסדימנטציה בכנרת בשנת 2022 מוצגת באיור 11. בתחנה העמוקה - A - קצבי הסדימנטציה היו נמוכים בשיעור ניכר ביחס לאלה שנמדדו בשאר התחנות. בתחנה זו, קצבי הסדימנטציה הגבוהים ביותר התרחשו בין מחצית אפריל לבין מחצית מאי (יותר מ-10 ג'"/מ"ר/יום), במהלך תקופת שיקוע הקלציט. דגמים עונתיים דומים של קצבי סדימנטציה נצפו בתחנות התת-ליטורליות - F ו-K בינואר (יותר מ-30 ג'"/מ"ר/יום) ובדצמבר (עד 19 ג'"/מ"ר/יום בתחנה K ועד 52 ג'"/מ"ר/יום בתחנה F), בעוד שבקיץ ובתחילת הסתיו הם היו פחותים מ-5 ג'"/מ"ר/יום. שיאי הסדימנטציה בנובמבר - דצמבר בתחנות אלה נגרמו עקב תהליכי רה-סוספנסיה, שמקורם בפעילות הגלים הפנימיים בתרמוקלינה, כאשר היא מגיעה לעומקים בהם ממוקמות המלכודות. שיאי הסדימנטציה של החורף - אביב בתחנה הליטורלית - M - ובתחנות התת-ליטורליות - F ו-K - נגרמו על ידי: 1. רה-סוספנסיה של סדימנטים במהלך תקופת הערבוב (mixing period), ו-2. יבוא של חלקיקים אלוכטוניים מאגן ההיקוות. במהלך תקופת שיקוע הקלציט המאסיבי (מאפריל ועד מחצית יוני), נצפו רק עליות מתונות בקצבי הסדימנטציה בתחנות F ו-K. ערכים אלה נמוכים מאלה שנצפו ב-2020 (דו"ח חיא"ל מס' T8-2021 - דו"ח שנתי לשנת 2020). בתחנה M הרדודה שיאי קצבי הסדימנטציה (35 - 43 ג'"/מ"ר/יום) נמדדו בחורף - אביב (ראה דיון קודם) ביוני ובין אוקטובר לדצמבר.

ב-2022 קצבי הסדימנטציה הממוצעים בתחנות A, F, M ו-K היו 2.7, 11.9, 9.1 ו-21.7 גרם חומר יבש/מ"ר/יום, בהתאמה (איור 12). בשנים 1999-2021 קצבי הסדימנטציה הממוצעים בתחנות A, F ו-M היו 0.2 ± 3.1 , 0.5 ± 9.3 ו- 1.1 ± 12.8 גרם חומר יבש/מ"ר/יום, בהתאמה. בשנים 1999-2021 קצבי הסדימנטציה הממוצעים בתחנה K היו 0.6 ± 7.3 גרם חומר יבש/מ"ר/יום. בשנת 2022 קצבי הסדימנטציה בתחנות F ו-K היו מעט גבוהים מהממוצעים הרב-שנתיים שלהם. באותו הזמן קצבי הסדימנטציה בתחנה A היו מעט נמוכים מהממוצע. בניגוד לכך בתחנה M קצבי הסדימנטציה היו גבוהים פי 1.7 מהערכים הממוצעים הרב-שנתיים. הדבר עשוי להיות קשור ליצירת אזור רדוד נרחב שבו צמחיה יבשתית הוצפה, וחלקיקים, המורחפים בקלות, עשויים היו להצטבר בו לאחר עליית מפלס האגם לגבולו העליון.



איור 11: דינמיקה עונתית של קצבי הסדימנטציה בתחנות השונות ב-2022. תקופת השקעת CaCO_3 מתחילת אפריל עד אמצע יוני 2022.



איור 12: קצבי סדימנטציה ממוצעים במיקומים השונים ב-2020 - 2022.

2.7 ממצאי הניטור הכימי



ספינת החרמונה. צילום: עוז צברי דר

מחקר
במימון
רשות
המים

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

- באפילימניון התפתחות מאוחרת באביב של שיאי חמצן מומס, עכירות, ומוצקים מרחפים וירידה בולטת של ריכוזי אלקליניות ביחס לשנים קודמות. מייצג כנראה איחור בשיא בפעילות הביולוגית האביבית.
- איחור זה אינו מוסבר באיחור בהגעת עומסי נוטריינטים שכן תבנית התפתחותם מקבילים בזמן לשנים עברו.
- בהיפולימניון איחור בהתפתחות צורונים שונים בחצי השני של השנה חריף יותר מאשר באביב באפילימניון.

מטרת המחקר

ניטור שוטף של הגיאוכימיה של האגם.

רקע

כמו בשנים קודמות, מוצגים נתוני הניטור הכימי משכבת האפילימניון וההיפולימניון בתחנה A בשנת 2022 בהשוואה לממוצעים רב שנתיים (עשר שנים: 2011-2020) וכן לשנה הקודמת, 2021 (איור 13).

תוצאות ודיון

להלן סיכום הממצאים לשנת 2022 (ראה איור 13). נתוני חודש דצמבר הינם נתונים חלקיים ולא בדוקים עקב עיכובים בהעברת נתונים ממעבדות חברת מקורות.

אלקליניות וסידן:

התפתחות ערכי האלקליניות והסידן בשכבת האפילימניון בחצי הראשון של 2022 ובעיקר הירידה החריפה בערכים אלו באביב מיוחסת בדרך כלל לשקיעת קלציט בעקבות פעילות ביולוגית באביב. בשנת 2022 הירידה הייתה ארוכה יותר מהשנה הקודמת, 2021, ודומה בהיקפה לממוצע הרב שנתי. מגמת ההתפתחות של אלקליניות וסידן בשכבת ההיפולימניון דמתה באופן כללי למגמה הרב שנתית ולערכי השנה הקודמת.

כלוריד:

ערכי הכלוריד באפילימניון ובהיפולימניון היו נמוכים מהממוצע הרב שנתי ומייצגים שנה סבירה מבחינת משקעים. 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 באפריל (כ- 248 מג"ל). השנה הקלנדרית הסתיימה בערכי כלוריד של 259 מג"ל בהיפולימניון ו- 263 מג"ל באפילימניון.

חמצן:

ערכי החמצן בשנת 2022 השנה באפילימניון מעט נמוכים מהממוצע הרב שנתי אך דומים לשנה הקודמת בחורף – אביב. כמו כן, התבנית בתקופה זו ב- 2022 מכילה עליות וירידות שאינן קורלטיביות עם פרמטרים אחרים. תבנית זו נשארת לא מוסברת.

בנוסף, דעיכת ערכי החמצן מאוחרת יחסית והיא מגיעה לערכי רקע של כ- 8 מג"ל רק ביולי כחודש מאוחר לשנים קודמות. מיולי והלאה התבנית באפילימניון דומה לממוצע הרב שנתי. מגמת התפתחות החמצן בשכבת ההיפולימניון דומה לממוצע הרב שנתי מבחינת ההיקף וגובה ערכי החמצן- עם ערכי מקסימום גבוהים בהרבה מהשנה הקודמת. יחד עם זאת בולטים האיחור הן בעליה והן בדעיכה של ערכי החמצן בכחודש ביחס לשנים קודמות.

ערך הגבה (pH):

ערכי ההגבה בשתי השכבות במהלך שנת 2022 תאמו את הערכים והמגמות הרב שנתיות ברב השנה למעט חריגה לערכים גבוהים יחסית במרץ בהיפולימניון. שיא זה תואם את השיא המאוחר בחמצן בשכבה זו.

זרחן:

ערכי זרחן כללי, זרחן מומס וזרחן מומס מגיב באפילימניון של שנת 2022 היו דומים לערכים של הממוצע הרב שנתי וכן לערכי השנה הקודמת אך מאופיינים בעליות-ירידות גדולות יותר ביחס ל- 2021. בהיפולימניון, בולט האיחור של כחודש בתחילת העליה בערכי זרחן והשיפוע בחודשים אוגוסט עד אוקטובר תלול יותר. יחד עם זאת מאוחר יותר מאוקטובר והלאה המגמה מתמתנת בהרבה כך שערכי סוף השנה דומים לאלו של 2021 ובמרכז טווח הממוצע הרב שנתי.

חנקן:

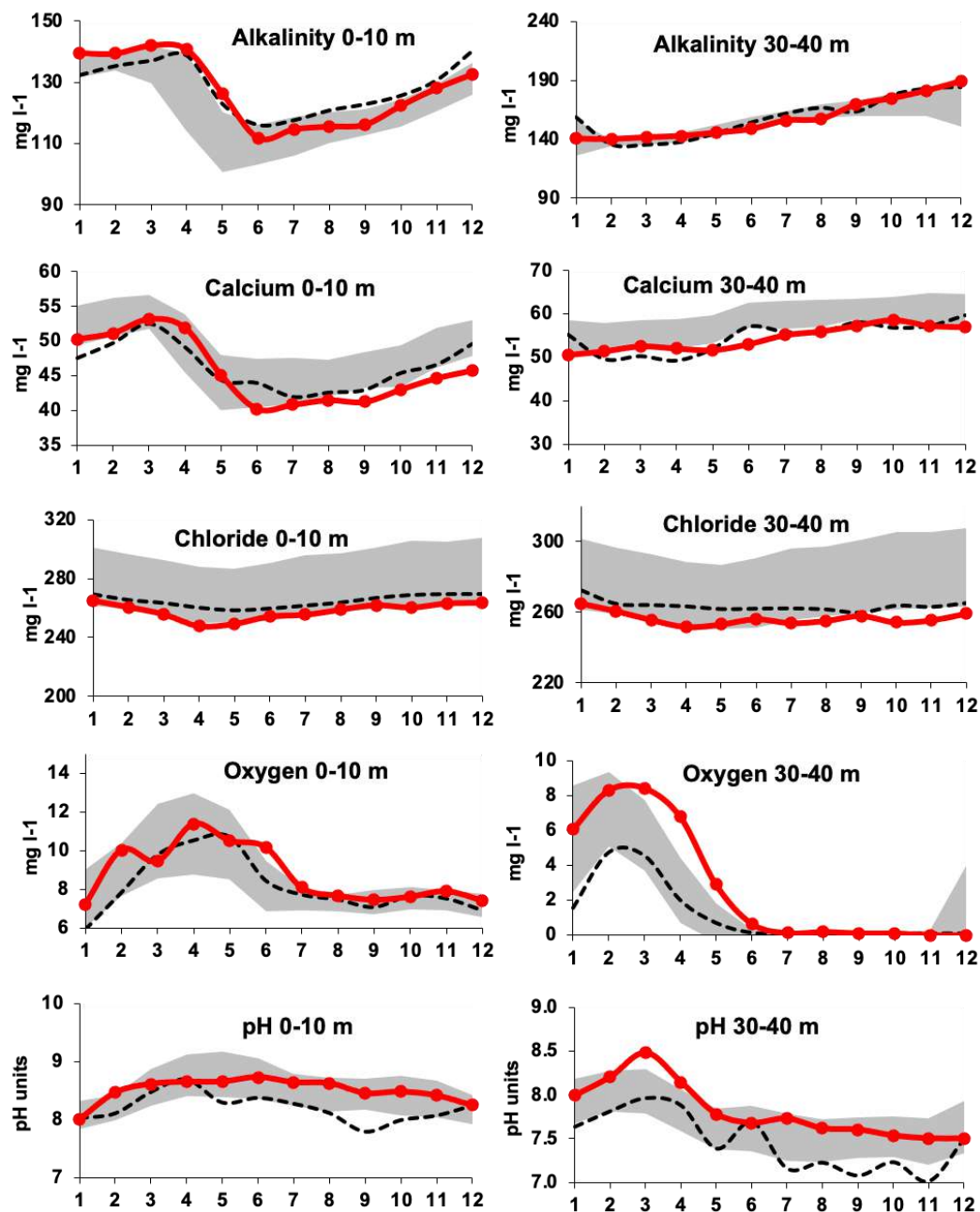
ערכי חנקן כללי ואורגני באפילימניון ובהיפולימניון היו דומים לערכי הממוצע הרב שנתי אך מגמת ההתפתחות בשתי השכבות בחצי הראשון של השנה קופצנית ביחס לתקופה המקבילה ב- 2021. אמוניום, ניטריט וניטראט באפילימניון מראים מגמות דומות לשנה הקודמת ולממוצע הרב שנתי. בהיפולימניון לעומת זאת, בולט איחור של כחודש בפאזה ההתפתחות של צורונים אלו, למשל דעיכת הניטראט, השיאים של הניטריט ותחילת הצטברות של אמוניום.

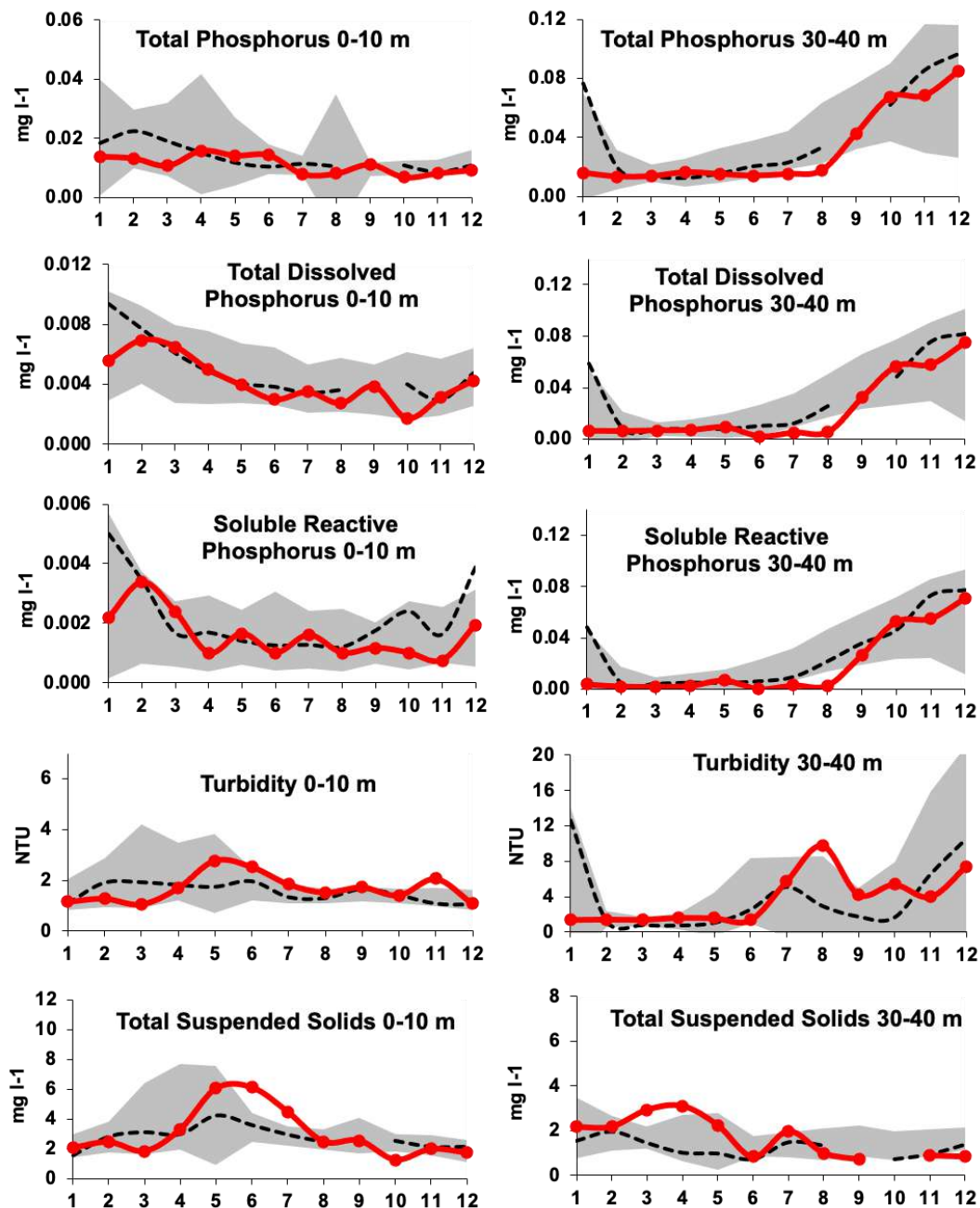
עכירות ומוצקים מרחפים:

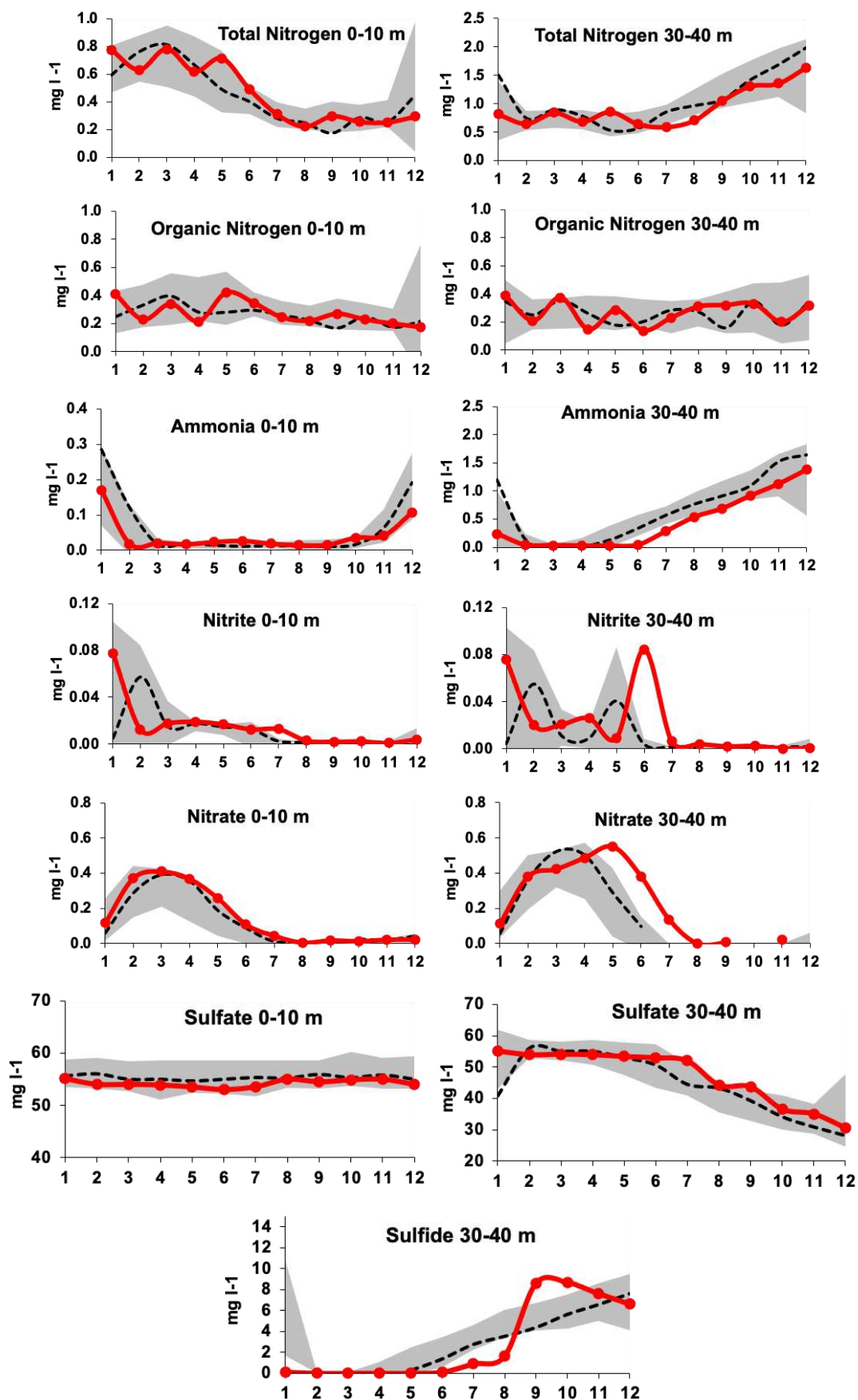
ערכי עכירות וסך המוצקים המרחפים ב- 2022 בשתי השכבות מראים מגמות הדומות לשנים הקודמות אולם הן באפילימניון והן בהיפולימניון בולט האיחור בהתפתחות של שיאים מקומיים בזמן ביחס לשנים קודמות. כך למשל באפילימניון שיא בעכירות ובמוצקים מרחפים מאחר בכחודש עד חודשיים ביחס לממוצע הרב שנתי. שיאים אלו גבוהים גם בצורה משמעותית ביחס לאלו של השנה הקודמת, 2021. השוואת תזמון שיאי החמצן המומס, עכירות ומוצקים מרחפים וכן הצניחה בערכי האלקליניות באפילימניון מעידה כנראה על איחור בפעילות הביולוגית בכחודש השנה זאת למרות שתזמון שיאי הנוטריינטים בשכבה זו (ניטראט, אמוניום, זרחן מומס ריאקטיבי) אינו מאחר ביחס לשנים קודמות. בהיפולימניון יש קורלציה טובה יותר בין האיחור בהתפתחות צורונים כגון חמצן מומס (דעיכה) ואמוניום זרחן מומס (עליה).

גופרית:

סולפאט באפילימניון של 2022 הציג יציבות לאורך השנה סביב ערכים של כ- 55 מ"ל, בדומה לממוצע הרב שנתי. הירידה בסולפאט בהיפולימניון מיולי, באיחור של כחודשיים ביחס לשנים קודמות, לוותה במקביל בעליה של ערכי הסולפיד בצורה משמעותית רק מאוגוסט. תקופה זו מייצגת חזור סולפאט בתנאים אנארוביים בחלק התחתון של האגם. מגמת ההצטברות של סולפיד מאוגוסט עד ספטמבר הייתה תלולה בהרבה מהממוצע הרב שנתי ומהשנה הקודמת ולוותה לאחר מכן מאוקטובר בדעיכה עד סוף השנה לערך סופי בדצמבר הדומה למרכז טווח הממוצע הרב שנתי.







איור 13: ממוצעים חודשיים של ריכוזי הפרמטרים השונים בכנרת בשנת 2022 (קו אדום) בהשוואה לשנה הקודמת (2021, 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).

2.8 ניטור מתכות כבדות בכנרת



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

מחקר
במימון
רשות
המים

ירון בארי-שליון, 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 מעט גדול יותר מאשר בשנים קודמות.
- חריגות מעטות בערכי אלומיניום- Al הינן רק בפאזה החלקיקית בשפכי הירדן והמשושים.
- כמו בשנה קודמת, התגלו ריכוזי מתכות רעילות במי החללים של גלעיני סדימנט רדודים (10-30 ס"מ) גבוהים בהרבה ביחס לאלו של מי האגם.
- ריכוזים בעייתיים של ארסן- As מוליבדן- Mo ואבץ- Zn נמצאו במי חללים מגלעיני סדימנטים מתחנה A, אך לא בתחנות אחרות. תופעה זו מעידה על פוטנציאל זיהום מקומי במקרים בהם נחשפים סדימנטים רדודים אלו ומשתחררים מי החללים לאגם.

מטרת המחקר

ניטור שוטף של מתכות קורט באגם ובמוצא הירדן והמשושים.

רקע

הדו"ח הנוכחי מציג את פעולת ניטור מתכות הקורט באגם הכנרת לשנת 2022. 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 לשתייה. פעולת הניטור השנה כללה ארבעה פרופילי עומק במרכז האגם (תחנה A) באפריל, יוני ספטמבר ואוקטובר וכן מספר פרופילים בתחנות שונות במרחב האגם: בדרומו (D) בצפון (G) בין שפך הצלמון לשאיבת טבריה (GY) ובשפך הירדן (J). במקביל לכל סט דיגום - נדגמו מי שפך הירדן (גשר אריק) ושפך המשושים.

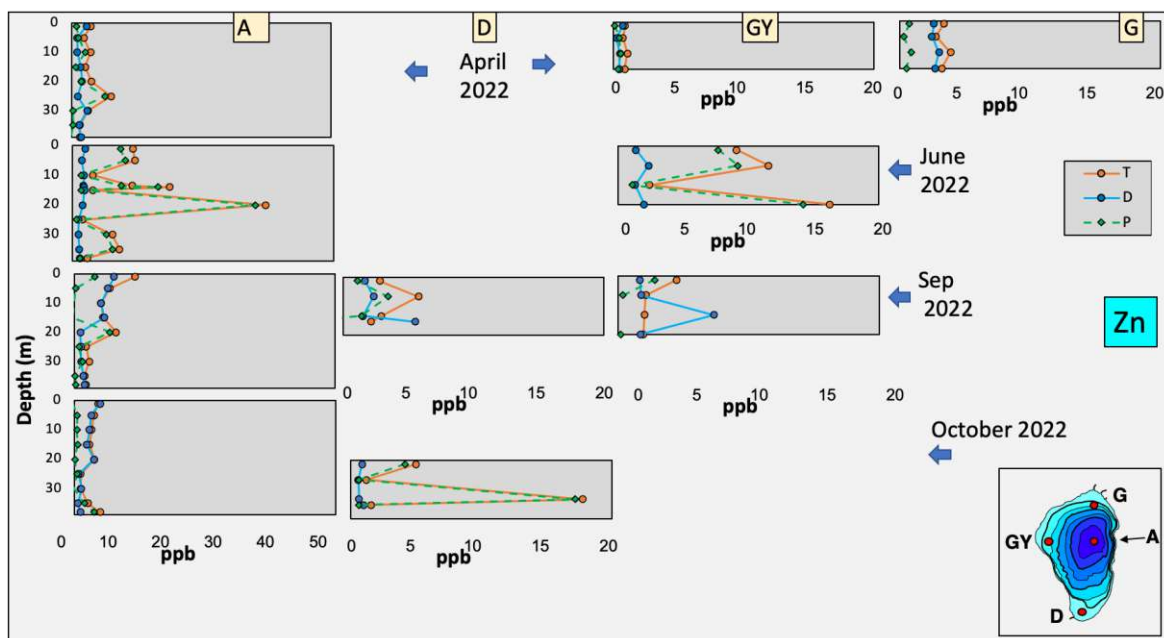
שיטות

דוגמאות מים באגם נאספו באמצעות משאבה פריסטלטי (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), 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 ודיון

בחינת הריכוז של מתכות כבדות בפרופילי מים שונים באגם ובעונות שונות ביחס לתקן מי שתיה מראה כי ברוב המוחלט של דוגמאות המים ריכוז המתכות היה נמוך עד נמוך בהרבה מהתקן. חריגות במספר מקרים מעט גדול יותר ביחס לשנים קודמות התקבלו באבץ-Zn בפאזה המומסת בעיקר בתחנה A ובשפכי הירדן והמשושים (איור 14). 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 2022. איור 14 מראה את ההתפלגות ריכוזי אבץ-Zn בשלושה מימדים: במרחב האגם בתחנות שנמדדו, בעומק, ובזמן עבור מספר תחנות: A במרכז האגם, D בדרום, GY במערב ו-G בצפון הכנרת. באפריל ריכוזי האבץ-

Zn היו נמוכים (פחות מכ- 4 ppb) והומוגניים לאורך פרופיל העומק (למעט עליה מסוימת סביב 25 מ'). פרופילי ספטמבר ואוקטובר מראים מעט העשרה ובעיקר העשרה באפילימניון, אולם בעיקר בולטת עליה הדרגתית כלפי פני השטח. תופעה זו דומה לשנה הקודמת ומראה כנראה על תרומה ממרכיב אטמוספרי בתקופה של הקיץ המאוחר - סתיו. קשה להסביר תרומה אטמוספרית כזו בתקופה זו שכן מידע אחר הקשור בניטור ומחקר של אבק שוקע בסביבת האגם בשנים האחרונות מצביע דווקא על תרומה עיקרית מוקדם יותר בשנה.



איור 14: פרופילי אבץ Zn, בעונות השונות ובתחנות השונות באגם מאפריל ועד אוקטובר 2022. ריכוז כללי: קו ועגולים כתומים, ריכוז מומס: קו ועיגולים כחולים, ריכוז חלקיקי (מחושב): קו מקווקו וריבועים ירוקים.

פרופילי יוני 2022 בעיקר בתחנה A במרכז האגם מראים ריכזי אבץ-Zn גבוהים משמעותית ביחס לחודשים האחרים וכן ביחס לפרופילי שנים קודמות. שיאי הריכזים הינו סביב התרמוקלינה בעומק 15-20 מ'. גם בתחנה GY במערב האגם יש עליה בריכזים בעיקר בעומק ובשתי התחנות עליית הריכזים מתבטאת בפאזה החלקיקית. ניתן אולי ליחס את עליית הריכזים הזו לערבול והרחפה מסיבית של סדימנטים בשולי האגם באירוע הסופה כחודש לפני כן, במאי 2022, ועל כן נוכחות של אבץ-Zn ספוח לחלקיקים מרחפים תקופה מסוימת בליטוראל ובמתלימניון לאחר הסופה. ריכזי מתכות נבחנו בגלעיני סדימנטים מתחנות שונות אשר נפרסו לפרוסות בעובי כ-2 ס"מ, כך שהנתונים מייצגים חולוציית עומק גבוהה יחסית בגלעינים. הנתונים כוללים ריכזים של הפאזה המומסת במי חללים של אותה פרוסה. ההשוואות הבאות מבוססות על ריכזים ממוצעים עבור כלל הגלעין (טבלה 3).

טבלה 3: ריכוזי ארסן-As, מוליבדן-Mo, ו- אבץ-Zn בגלעין סדימנט תחנה A

	As	Mo	Zn
st.A 0-2 cm	7	38	1.2
st.A 2-4 cm	13	57	0.0
st.A 4-6 cm	13	51	0.0
st.A 6-8 cm	18	86	1.5
st.A 8-10 cm	17	88	0.9
st.A 10-12 cm	13	50	1.1
st.A 12-14 cm	8	45	0.9
st.A 14-16 cm	5	46	1.1
st.A 16-18 cm	4	21	2.0
st.A 18-20 cm	3	19	2.3
st.A 20-22 cm	2	15	6.3
st.A 22-24 cm	2	9	5.7
st.A 24-26 cm	2	6	3.9
st.A 26-28 cm	2	7	2.7
st.A 28-30 cm	2	7	5.3

הערה:

תקן מי שתיה עבור ארסן-As, מוליבדן-Mo, ו- אבץ-Zn הינו 10, 70 ו-5 ppb בהתאמה. ריכוזים גבוהים מהתקן מודגשים.

למרות שבמי הכנרת רב היסודות הנמדדים בניטור נמוכים בסדר גודל או יותר מערך תקן מי שתיה, הריכוזים במי החללים גבוהים יותר והשנה בגלעין תחנה A הריכוז של היסודות אבץ-Zn, מוליבדן-Mo, וארסן-As במי החללים מגיע באחוז ניכר (20% ו-13% ו-33% בהתאמה) מהעומקים לערכים מעל תקן מי שתיה. החריגות בארסן-As ובמוליבדן-Mo מרוכזות בחלק הרדוד של הגלעין (עד 10-12 ס"מ) ואילו החריגות באבץ-Zn מרוכזות דווקא בחלק העמוק יותר של הגלעין (20-30 ס"מ). כלל החריגות ביסודות אלו הינן בטווח של מספר אחוזים עד 80% מעל ערך התקן. מודגש כי בגלעיני תחנות D ו- GY לא נמצאו חריגות כאלו השנה.

למרות שהחריגה מעל ערך תקן מי שתיה מוגבלת במי החללים, יש לציין כי הריכוזים במי החללים עבור טווח נרחב של יסודות הרלוונטיים לאיכות מים (בהקשר של תקן מי שתיה), גבוהים בצורה משמעותית מהריכוז במי האגם. תיאור זה נכון עבור גלעיני שלושת התחנות אך בולט בצורה משמעותית יותר בתחנה A. כך למשל לאורך כל עומק גלעין (100% מהדוגמאות) ערכי היסודות הבאים גבוהים ממי כנרת: ארסן-As (ערך מי האגם ~10% מתקן מי שתיה): פי 3 עד 27 (חציון=8). בריום-Ba (ערך מי האגם ~6% מתקן מי שתיה): פי 3 עד 4. מוליבדן-Mo (ערך מי האגם ~2% מתקן מי שתיה): פי 6 עד 78 (חציון=34). ועבור אבץ-Zn (ערך מי האגם ~78% מתקן מי שתיה): השליש התחתון של הגלעין מאופיין בריכוזים עד פי 1.6 ממי האגם.

דוגמאות לריכוזים גבוהים אלו במי החללים של הגלעינים הרדודים (10-30 ס"מ) מעידות על פוטנציאל זיהום מי האגם במצבים בהם נחשפים סדימנטים רדודים בעיקר בהקשר של שחרור מי החללים וערבובם במי האגם.

2.9 שטפי זרחן באבק



מחקר
במימון
רשות
המים

ירון בארי-שליון, אדית ליבוביץ, ניר קורן

- שטפי זרחן זמין באבק בטבחה (המעבדה לחקר הכנרת) 36.3 טון/שנה ובתחנת כינר 49.5 טון שנה.
- ממוצע לכנרת-43 טון/שנה, גבוה ביחס לממוצע הרב שנתי.
- תחנת כינר מראה שונות עונתית ורב שנתית גבוהה יותר ביחס לטבחה.
- אירוע שיא של שטף זרחן נרשם בשתי התחנות ממאי עד אמצע יולי.

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 השמינית בה קיימות שתי תחנות ניטור זרחן באבק סביב הכנרת.

שיטות

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

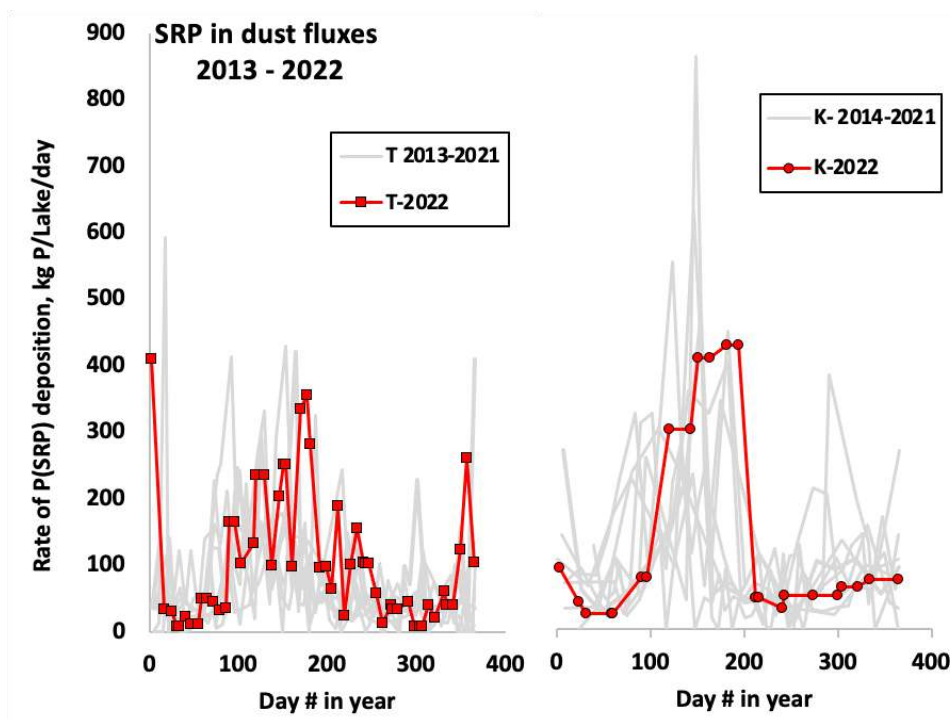
תוצאות ודיון

בתחנת טבחה ניתן להבחין בשתי תקופות עיקריות של שטפי זרחן באבק בשנת 2022 (איורים 15 ו-16): אביב מאוחר עד תחילת קיץ עם שטפים גדולים יחסית וקיץ-סתיו-חורף עם שטפים נמוכים יותר. שיא השטפים השנה נמצא בשתי התחנות: טבחה וכינר בתחילת הקיץ בדומה לשנתיים הקודמות ומעט מאוחר ביחס לשיא השטפים בשנים קודמות. כמו בשנים קודמות, תקופת שיא זו מאופיינת לא רק בשטפים גדולים יחסית אלא גם בתנודתיות רבה והיא נעה בין ערכים של כ- 50 עד כמה מאות ק"ג זרחן מומס זמין לאגם ליום.

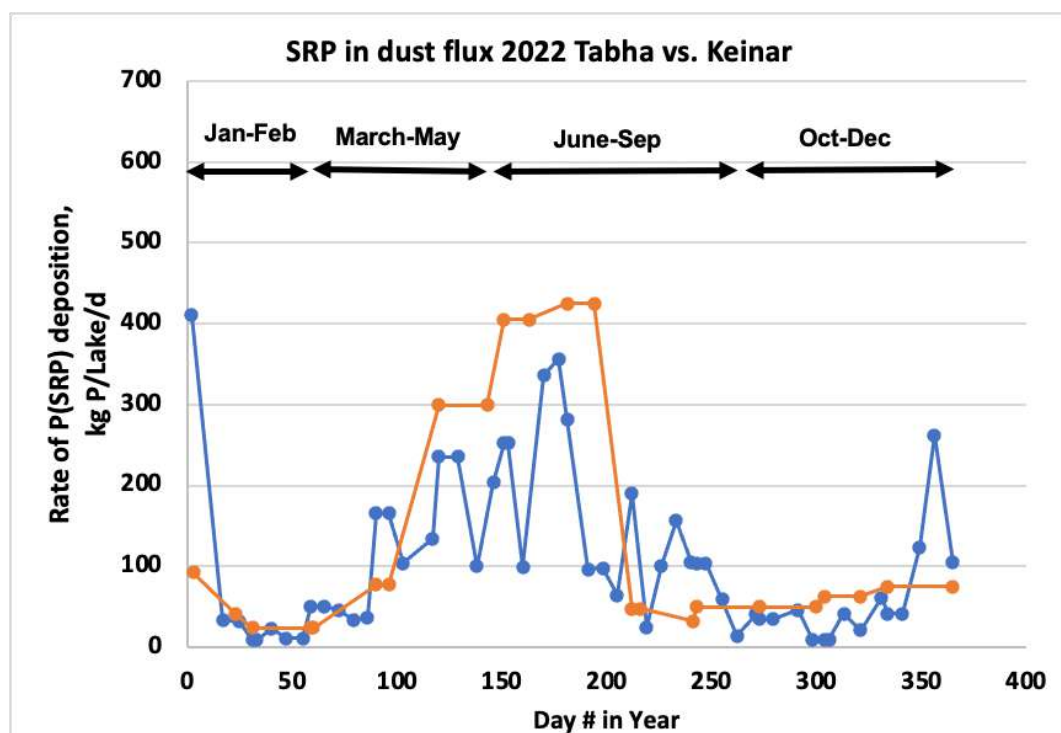
השוואה בין שנת 2022 לשנים הקודמות (איור 15) מראה כי למרות השינויים בגודל השטפים בתקופת האביב ומיקום שיא השטפים ביחס לרוב השנים לפני 2020 הרי שמגמת החלוקה העיקרית נשארת וכך גם גודל השטפים בקיץ, כאשר בתחנת טבחה ניתן לראות מגמה ברורה של דעיכה עד התייצבות לערכי קיץ של כ- 10-50 ק"ג זרחן ליום. יחד עם זאת בתחילת שנת 2022 ובסופה ישנה עליה מקומית בשטפי הזרחן- כפי שהופיע במספר שנים בודדות בעבר (2016, 2018, 2021).

תחנת כינר מאופיינת השנה כמו ברב השנים הקודמות בשטפים שנתיים גבוהים מטבחה. שיא השטפים בכינר השנה התרכז סביב מאי עד אמצע יולי עם שטפים יחסית אחידים של כ- 400-430 ק"ג/יום. בתקופה המקבילה אירועי שיא נמוכים יותר נרשמים בטבחה.

סך השטף השנתי ל- 2022 ממדידות בתחנת בטבחה היה כ- 36.3 טון, כ- 125% ביחס לממוצע עבור השנים 2013-2021. בכינר השטף השנתי השנה היה כ- 49.5 טון, כ- 120% ביחס ל- לממוצע עבור השנים 2014-2021. ממוצע בין שתי התחנות נותן ערך של 43.0 טון /שנה זרחן מאבק לכנרת כ- 120% ביחס לממוצע הרב שנתי.



איור 15: השוואת שטפי זרחן מומס עבור השנים 2013-2022 בתחנות טבחה (גג המעבדה לחקר הכנרת) והשנים 2014-2022 בתחנת כינר.



איור 16: שטפי זרחן מומס בכנרת כפי שנמדדו בתחנות טבחה (גג המעבדה לחקר הכנרת): קו כחול, וכינר: קו אדום-חום בשנת 2022.

2.10 קיבוע חנקן



במימון
רשות
המים

שירה ניניו, חמי רושנסקי, עכסה לופו, זהר פריימן

- קיבוע החנקן ב- 2022 התפרס על פני עונה קצרה והיה נמוך מהרגיל.
- נרשמו שני שיאים בקצבי הקיבוע, הראשון בסוף אוגוסט בזמן שיא פריחת הכחולית אפניזומנון, והשני בסוף ספטמבר, בזמן שיא פריחת הכחולית צילינדרוספרמופסיס.
- בסך הכל קובעו באגם כ- 13 טון חנקן אטמוספרי במהלך פריחת הכחוליות הקייציות של 2022.

רקע

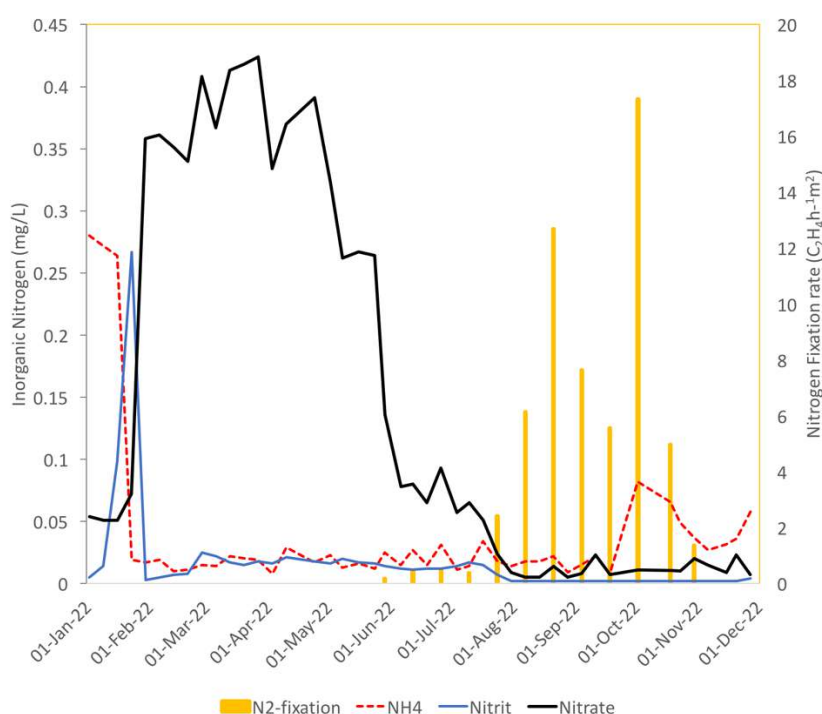
מאזן החנקן באגם מושפע ממספר תהליכים התורמים לכניסה ויציאה של חנקן מהמערכת האקולוגית של הכנרת. אחד מתהליכים אלו הינו תהליך ביולוגי של קיבוע חנקן אטמוספרי המתרחש בחודשי הקיץ, זמן בו ניתן לצפות בפריחות של ציאנובקטריה מקבעות חנקן כמו אפניזומנון וצילינדרוספרמופסיס המתרכזות באזור הפוטי. ללא מדידה אמינה של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

שיטות

בדיקת פוטנציאל קיבוע החנקן במי הכנרת 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 שקיבוע החנקן העונתי בכנרת תלוי באנרגיית אור, עולה עם הזמן, מעוכב על ידי אמוניה ומתרחש רק באור.

תוצאות ודיון

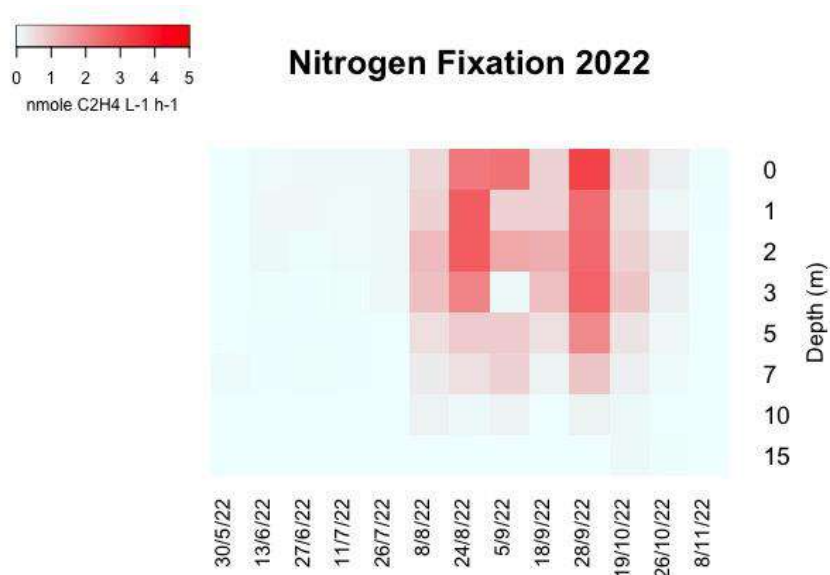
קיימת תלות בין הפריחות של הציאנובקטריה מקבעות חנקן באגם לבין ההרכב הכימי של עמודת המים. עונת הקיבוע מתחילה באופן טיפוסי בחודש יוני כאשר אוגר הניטראט באגם מגיע לערכים נמוכים מאוד כתוצאה מתהליכי דניטריפיקציה המתרחשים בחורף ובאביב. הקיבוע מפסיק כאשר מגיע לאפילימניון חנקן מקובע מאגן ההיקוות או משכבת ההיפולימניון. גם בשנת 2022 נצפתה תלות זו אולם בשל אוגר חנקן גבוה באגם התחילה עונת הקיבוע מאוחר יחסית, בדומה למה שהתרחש גם ב- 2021, רק בסוף חודש יולי 2022 ירד ריכוז הניטראט לערכים נמוכים מספיק המעודדים פעילות קיבוע משמעותית ולפני כן נרשמו קצבים נמוכים של קיבוע (איור 17). עונת הקיבוע התאפיינה בשני שיאים, הראשון בסוף חודש אוגוסט והשני בסוף ספטמבר (איורים 17, 18). שיאים אלה תואמים את שיא פריחת הכחולית *אפניזומנון* בחודש אוגוסט עם ריכוז פילמנטים של 780 סיבים למ"ל, ושיא פריחת הכחולית *צילינדרוספרמופסיס* שנמדד בתחילת אוקטובר עם 3,500 סיבים למ"ל. בסוף חודש נובמבר הסתיימה עונת הקיבוע (איור 17).



איור 17: קצב קיבוע חנקן לעומדת מים וריכוזי חנקן אי-אורגני מסיס ב-1 מ' (מיליגרם לליטר) ב-2022.

ערכי קיבוע החנקן בשנת 2022 היו נמוכים יחסית למוצע 3 השנים שקדמו להן 2019-2021 (טבלה 4) ויתכן כי ניתן לקשור את התופעה לאוגר החנקן הגבוה באגם אשר נצפה בשנים האחרונות. ריכוזי הניטראט מגיעים

לערכים גבוהים יותר והירידה בריכוז הניטראט אורכת תקופה ארוכה יותר, מה שגורם לעיכוב של תחילת עונת הקיבוע ומביא לקיצורה של העונה. סה"כ קיבוע החנקן לשנת 2022 הסתכם ב- 13 טון לאגם, בהשוואה ל- 39 טון ב- 2021, ו- 32 טון בשנת 2020 (טבלה 4). ניתוח של פיזור פעילות הקיבוע מלמד שבשנת 2022 בזמן שיאי הקיבוע נמדדו קצבים גבוהים לאורך עמודת המים עד לעומק 3-5 מ' (איור 18).

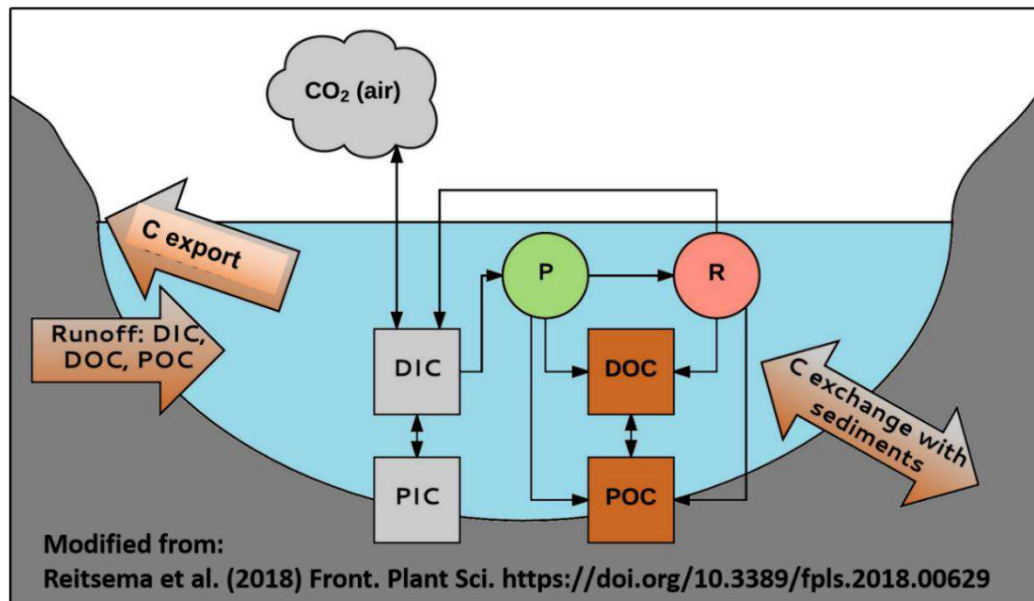


איור 18: מפת חום המייצגת את הפיזור האנכי של קצבי קיבוע החנקן בעמודת המים מ- 1-15 מ' בשנת 2022. הגוון מייצג את קצב הקיבוע שנמדד ביחידות $\text{nmole}^1\text{-h}^{-1}\text{-L}^{-1}\text{-H}_2\text{C}_4$ על פי הסרגל שמשמאל.

טבלה 4: קיבוע חנקן בכנרת בשנים 2007-2022

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

2.11 פחמן אורגני ואנאורגני מומס וחלקיקי



במימון
רשות
המים

ורנר אקרט, בני סולימני

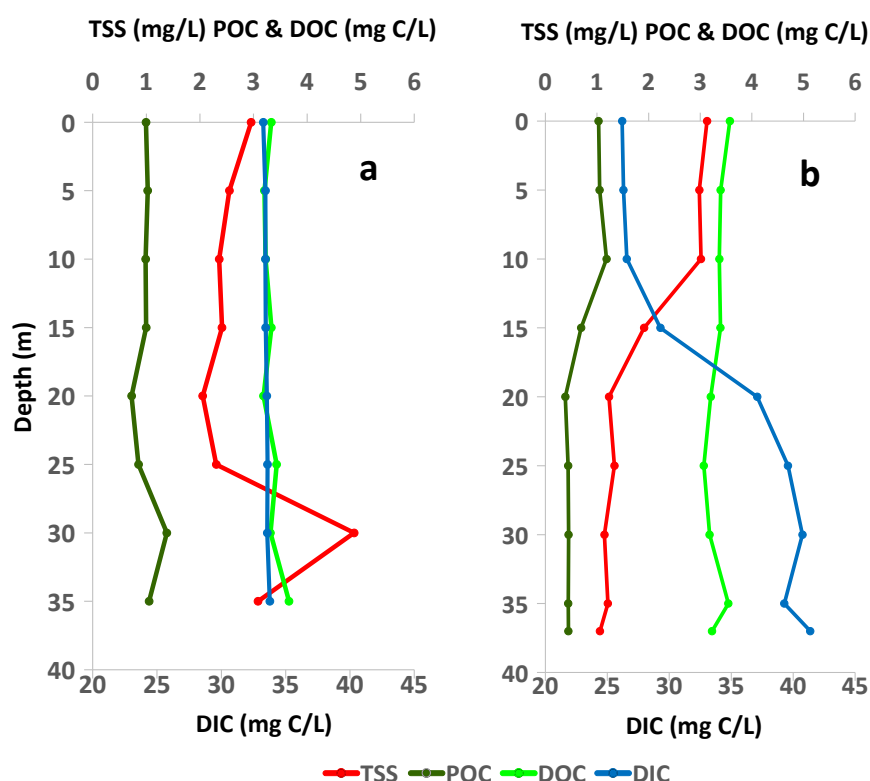
- ב- 2022 ריכוזי הפחמן האורגני המומס (DOC) הראו את השונות הנמוכה ביותר שנרשמה מתחילת המדידות.
- בהעדר פריחות של פיטופלנקטון, עליה בערכי החומר המרחף קשורה כנראה לאירועי סערה קיצוניים.

שיטות

במסגרת הניטור מדדנו את ריכוזי הפחמן המומס בעמודת המים של הכנרת ב-8 עומקים, פעם בשבועיים, וזאת במקביל למדידה של החומר החלקיקי באותם העומקים. הדיגום בוצע במקום העמוק באגם, בתחנת הדיגום השגרית (תחנה A). החומר החלקיקי נאסף ע"ג פילטר סיבי זכוכית (GF/F), בעל קוטר נקב ממוצע של 0.7 מיקרון ואילו התסנין של דוגמאות אלה שימש לקביעת ריכוז הפחמן האורגני (DOC) והאנאורגני המומס במים (DIC). המדידה בוצעה באמצעות מכשיר של חברת SHIMADZU, המודד את ערכי הפחמן ע"י חייון אינפרא אדום. השתמשנו בפילטרים שקולים ושרופים מראש על מנת לקבוע את סך כמות המוצקים המרחפים (TSS) לאחר ייבוש ב-110 °C למשך הלילה, ולשם קביעת תכולת החומר האורגני על פי השינוי במשקל לאחר 4 שעות שריפה ב-540 °C. כמות הפחמן האורגני החלקיקי (POC) חושבה על פי מחצית מסך החומר השרוף.

במהלך 2022 הממוצעים החודשיים של ריכוזי ה-DOC בעמודת המים של הכנרת היו 3.26 ± 0.13 מג"ל פחמן, 0.05 מג"ל פחות מאשר ב-2021, ו-0.12 מג"ל פחות מהממוצע של העשור האחרון שעומד על 3.38 מג"ל פחמן. כמו בשנים קודמות, גם השנה ערכי ה-DOC היו די קבועים לאורך עמודת המים, והראו את השונות הנמוכה ביותר מאז תחילת המדידות, כפי שניתן לראות מהממוצעים החודשיים שנמדדו במרץ ואוגוסט (איור 19a ו b). מסיבה כלשהי, נראה כי השיכוב התרמי והשינויים הכימיים שחלו בעקבותיו בעמודת המים השפיעו רק במקצת על ריכוזי ה-DOC.

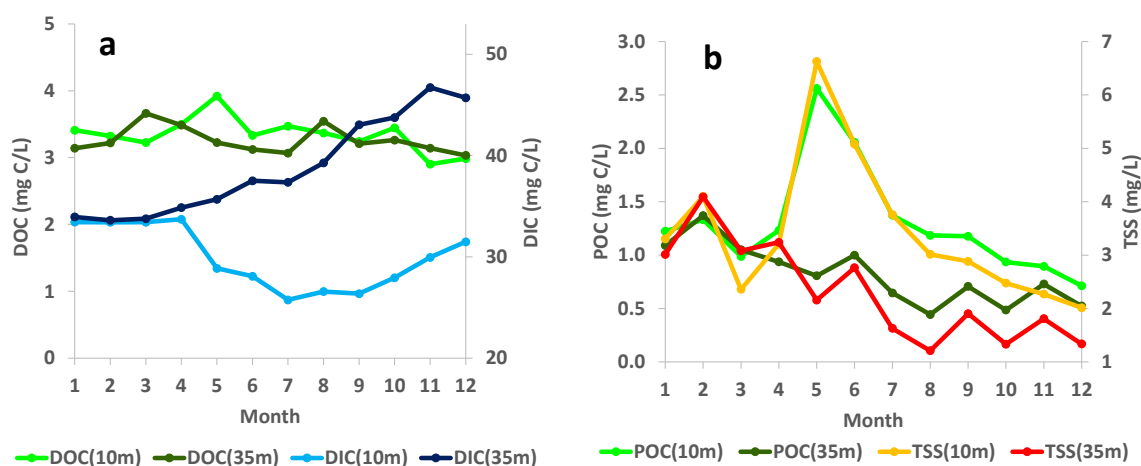
המצב שונה עבור ריכוזי ה-DIC בעמודת המים אשר הראו הבדלים אופייניים בין האביב לסתיו עם ריכוזים הולכים ועולים בהיפולימניון בתקופת השיכוב מ-33 עד 40 מג"ל פחמן, כל אלה לוו בירידה בריכוזי ה-DIC באפילימניון מ-33 ל-25 מג"ל פחמן. ירידה זאת יכולה להיות מוסברת על ידי שקיעה של פחמן אנאורגני חלקיקי שנוצר באביב, להיפולימניון. בהיפולימניון הוא מתמוסס באופן חלקי בשל ערכי pH נמוכים יותר. כמו ב-2021, כך גם ב-2022 לא התפתחו פריחות פיטופלנקטון משמעותיות, מה שמשתקף גם בערכי POC נמוכים (קרוב ל-1 מג"ל פחמן) במהלך כל השנה, שהיוו 36.4% מה-TSS.



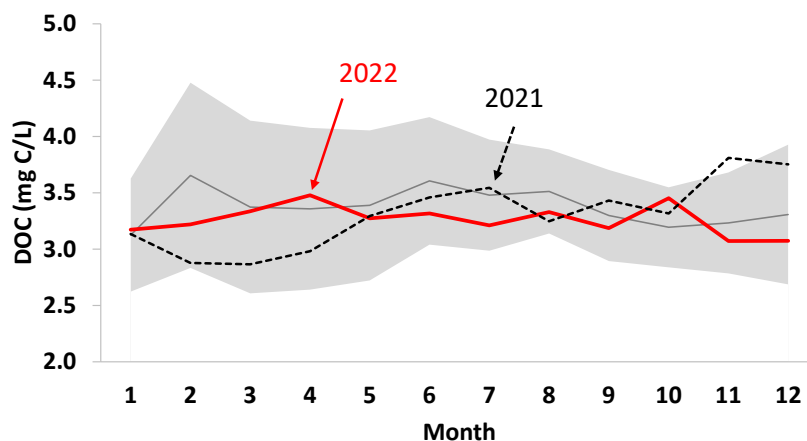
איור 19: ממוצעים חודשיים של DOC, POC, TSS, ו-DIC בעמודת המים של הכנרת שנמדדו: a. במרץ 2022. b. באוגוסט 2022.

ניתן לראות את ההומוגניות של ערכי ה-DOC בעמודת המים גם מהשינויים העיתיים של הממוצעים החודשיים באפילימניון ובהיפולימניון המיוצגים על ידי הנתונים מעומק 10 מטר ו-35 מטר בהתאמה (איור 20a). שתי סדרות הנתונים כמעט זהות. עד אוקטובר שתי המגמות של ערכי ה-DOC היו זהות ונעו בין 3 ל-3.5 מג"ל פחמן. אחרי אפריל, ריכוזי ה-DIC הראו את ההבדלים העונתיים הטיפוסיים כתלות בעומק, כאשר הריכוזים האפילימנטליים נעו בין 27 ל-33 מג"ל פחמן וההיפולימנטליים עלו בהדרגה עד 48 מג"ל בסוף תקופת השיכוב.

ריכוזי ה- TSS וה- POC הגיעו לשיא במאי ועמדו על 6.6 ו- 2.6 מג"ל בהתאמה, ולאחר מכן חלה ירידה בערכים בתקופת הקיץ והסתיו עד ל- 2 ו- 0.7 מג"ל (איור 20b). בהעדר פריחה אביבית של פוטופלנקטון, השיא בחודש מאי נגרם כנראה בשל עליה בחומר המרחף כתוצאה משיטפונות מאוחרים ואירועי סערה קיצוניים. בעומק של 35 מטר ריכוז החומר החלקיקי הראה מגמת ירידה החל מפברואר, מ- 3 ל- 1.3 מג"ל במקרה של TSS ומ- 1 ל- 0.5 מג"ל במקרה של POC. בהשוואה למגמות הרב שנתיות, שנת 2022 הייתה דומה לממוצע השנתי של DOC שעמד על 3.3 מג"ל פחמן לעומת 3.4 בממוצע הרב שנתי. הדבר המעניין ביותר היו ההבדלים הנמוכים בערכי ה- DOC שעמדו על 0.1 מג"ל פחמן בהשוואה ל- 0.5 מג"ל פחמן בעשור האחרון (איור 21). באופן כללי, תוצאות אלו מחזקות את העובדה ששנת 2022 הייתה השנה עם הריכוזים הנמוכים ביותר של כלורופיל a אשר נמדדו ב- 50 השנים האחרונות באזור הפוטי של הכנרת.



איור 20: שינוי עיתי בממוצעים חודשיים של : פחמן מומס אורגני ואנאורגני (a) ופחמן חלקיקי וחומר מרחף (b) במהלך 2022 בעומקים 10 ו- 35 מטר.



איור 21: ממוצעים חודשיים של ריכוזי פחמן אורגני מומס בעמודות המים של תחנה A שבמרכז האגם ב- 2022 בהשוואה ל- 2021 ולטווח הערכים בעשור האחרון.

2.12 בחינת נוכחות חומרי הדברה במי האגם ובדגה



**במימון
רשות המים**

פג אסטרון, אדית ליבוביץ'

- גם בשנה זו ריכוז חומרי הדברה באגם היה נמוך יחסית.

מטרת המחקר

ניטור אגם הכנרת לבדיקת נוכחות של חומרי הדברה.

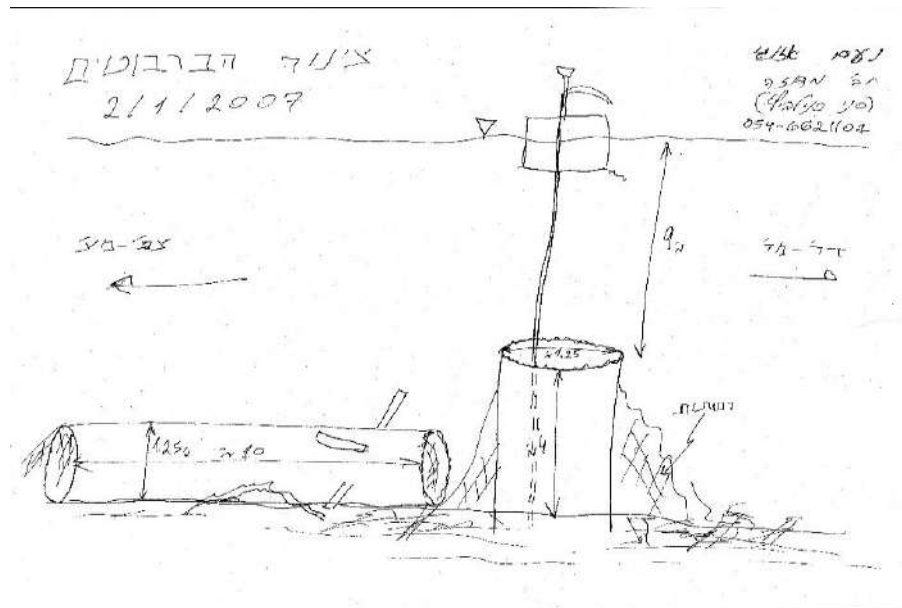
רקע

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

תוצאות ודיון

בדומה לשנים שעברו, אכן נמצאו חומרי הדברה במי האגם אך בריכוזים נמוכים ($<1\text{ppb}$). לעומתם, ריכוזי חומרים ממשפחת ה-DDT קיימים ברקמות הדגים בריכוזים של $1-10\text{ppb}$ באופן קבוע. חומרים אלו אסורים לשימוש ואינם בשימוש ככל הנראה מזה מספר עשורים. אולם, יכולת השרידות שלהם בסביבה הינה גדולה. ניתן להעריך כי חומרים אלו נספחו בעבר לחומר חלקיקי, ומשם הם זולגים לאגם הכנרת כל השנה בריכוזים נמוכים ביותר אך מצטברים ברקמות הדגים לריכוזים אלו. סברה זו הונחה בשנים עברו כולל בשנה שעברה. כיום, בעקבות מחקר אותו אנו מבצעים בסדימנטים שנדגמו בחודשים אוגוסט ופועם נוספת בנובמבר 2022, ניתן לבשר כי אכן הריכוזים של בין 1ppb ל- 6ppb DDE נדגמו בצפון האגם. היקף הפיזור אינו ידוע וגם לא בוצעו ניתוחי עומק בסדימנטים. במחקר הנ"ל (במימון קרן MOST-BMBF) נדגם חומר חלקיקי וכן שכבת סדימנט עליונה ודגים, בנקודות שונות באגם. בדומה לדגים המרכזים DDE ישן ככל הנראה הקיים במי האגם, מציגה גם שכבת הסדימנט חומר שעבר ככל הנראה ע"י מי האגם. בשונה מדגי האגם, חומרים הספוחים לסדימנט יכולים לעבור ממקום למקום ע"י תהליכי הרחפה והסעת סדימנט, בנוסף יש לציין כי הכמויות הצבורות בסדימנט יכולות להיות גדולות בסדרי גודל רבים מהכמויות המוסעות ע"י דגה. היות והשימוש הנוכחי (ב-50 השנה האחרונות) בחומרים אסורים כגון DDE הינו אפסי אם קיים, יש להניח שחומר רב ימצא בשכבות סדימנט עמוקות יותר. לפי שעה איננו יודעים האם קיימת זליגה של DDE משכבות סדימנט עמוקות יותר לשכבה העליונה של הסדימנט אותה אנו דוגמים או הרחפה וערבוב עמודות הסדימנט, בכל מקרה ניתן להניח כי קיימת זליגה מסוימת של המזהם הנ"ל למי האגם ואו לחומר חלקיקי.

2.13 מדידת פרמטרים בצינור הברבוטים



במימון
רשות
המים

גדעון טיבור, שקד שטיין, תמי זילברמן (מכון גיאולוגי), אדית
לייבוז'ץ, עמי נשרי

- בין סוף ינואר ועד סוף מרץ, עלו ריכוזי הכלורידים בצינור הברבוטים מ-1,204 ל-1,434 מג"ל ולאחר מכן חלה ירידה מתונה עד 1,212 מג"ל בסוף נובמבר.
- המגמות ארוכות הטווח בריכוז הכלוריד בברבוטים מצביעות על ירידה.
- ע"פ הנחת העבודה שלנו ירידה בכלוריד בצינור הברבוטים קשורה לירידה הבו-זמנית של מפלסי מי התהום הקנומן-טורוניים כתוצאה של תוספת קידוחי מי תהום.
- בצינור הברבוטים קיימת מגמה עונתית במליחות. לאחר גשמי החורף ומילוי מאגרי מי התהום המליחות עולה. זאת בניגוד ל"התנהגות" המעיינות היבשתיים הסמוכים, באזור טבחה, שם בחורף המליחות יורדת. מגמה עונתית זו בברבוטים תואמת את מודל הלחץ ההידראולי.
- קיימת שונות גדולה בזמן במהירות הזרימה בצינור הברבוטים הן בסקלות שעתיות והן בטווחי זמן של שבועות. המהירות היומית הממוצעת נעה בין 0.5 ס"מ/שניה ועד 4.5 ס"מ/שניה.

מטרות הניטור

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

רקע

לאחר בניית הכיפה המנקזת מעל הנביעה התת-ימית בפוליה A בשנת 2019 נשאר רק צינור הברבוטים 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 היה לצפות שלברבוטים חשיבות בתרומת מלח ואי לכך יש עניין במדידות פרמטרים שונים בנביעה זו.

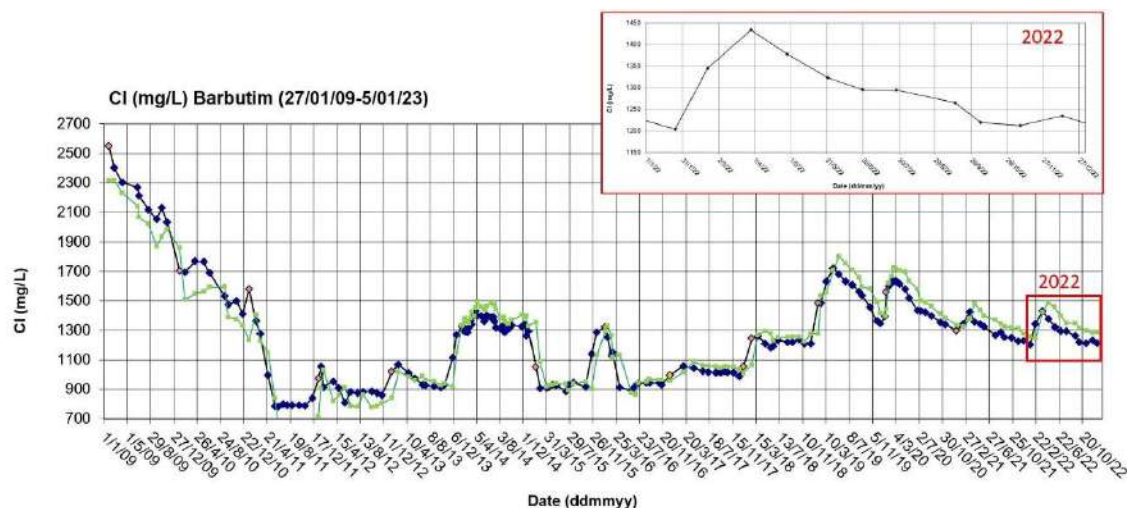
ניטור נביעת הברבוטים ע"י המעבדה לחקר הכנרת, חיא"ל, החלה בדצמבר 2007 וכוללת מגוון של פרמטרים אשר נדגמים מצינור הברבוטים בצורה רציפה פעם בשעה (מהירות זרימה, טמפרטורה, מוליכות חשמלית) ואנליזת מעבדה של דגימות מים הנלקחות פעם בחודש מבסיס הצינור (מוליכות חשמלית, כלורידים וניטרט).

תוצאות

מגמות השנה האחרונה: בין סוף ינואר ועד סוף מרץ 2022 עלו ריכוזי הכלורידים בצינור הברבוטים מ-1,204 ל-1,434 מג"ל ולאחר מכן חלה ירידה מתונה עד 1,212 מג"ל בסוף נובמבר שלוותה בעליה ל-1,234 מג"ל באמצע דצמבר ולאחר מכן ירידה עד 1,214 מג"ל בתחילת ינואר 2023 (איור 22). המוליכות החשמלית מצויה במתאם גבוה ($R^2=0.98$) עם ריכוז הכלוריד והיא עוקבת אחרי המגמה שהתקבלה בכלוריד (איור 23 וגרף ירוק באיור 22). החל מספטמבר 2021 נעשית מדידה רציפה (כל שעה) ואוטומטית של המוליכות החשמלית באמצעות סנסור ה-Manta (איור 23). ריכוזי הניטראט ב-2022 השתנו בצורת "משור" בין 0.72 מג"ל ועד 0.25 מג"ל. תופעה זו חזרת על עצמה ממאי 2014 שמאז ערכי הניטראט לא עולים מעל 0.83 מג"ל (איור 24). לא נמצא מתאם בין ריכוזי הניטראט לריכוזי הכלוריד ו/או המוליכות החשמלית. מהירות הזרימה השעתית הממוצעת ל-24 שעות במהלך 2022 מאופיינת בשתי תקופות: הראשונה מינואר ועד סוף יולי בה הזרימות במעלה הצינור הם יחסית גבוהות ומשתנות עד 7.5 ס"מ/שנייה בחודש מאי, והשנייה מאוגוסט עד תחילת ינואר 2023, בה הזרימה יחסית קבועה ונמוכה סביב 1-2 ס"מ/שנייה (איור 24).

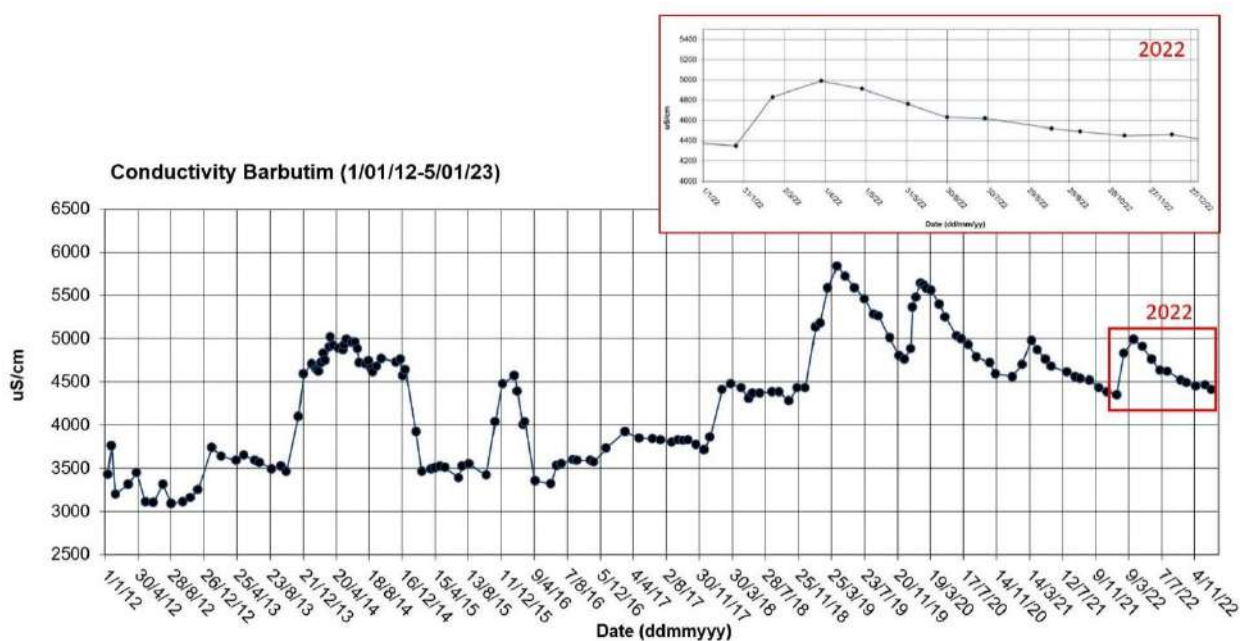
דיון

הנחת הבסיס של ניטור צינור הברבוטים הינה שריכוז המליחות אשר נמדד בנביעה משקף את היחס שבין תרומת הספיקה של המרכיב המלוח לתרומת המרכיבים המתוקים. יוצא מכך 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 22) 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 תוצאות שנת 2022 סותרות הנחה זו ואי לכך מרכיב הקצה המלוח של הברבוטים כנראה "מתוק" בהרבה מכך.



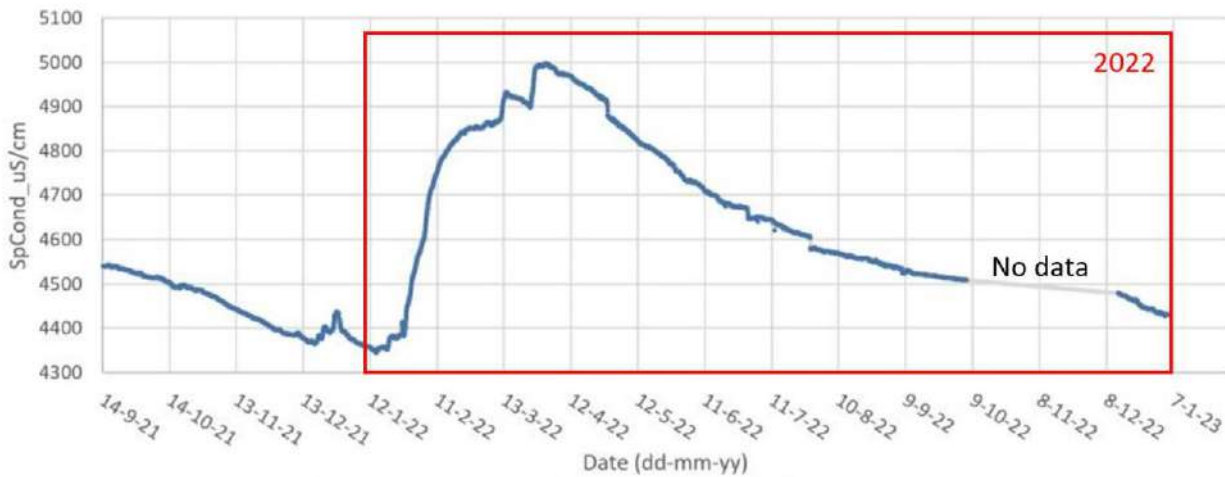
איור 22: ריכוז כלוריד בברבוטים בין השנים 2009-2023 (במג"ל). הגרף בכחול מייצג את נתוני אנליזות המים החודשיים והגרף הירוק הוא חישוב ריכוז כלורידים מתוך נתוני המוליכות החשמלית. האיור העליון היא הגדלה של שנת 2022.

א.

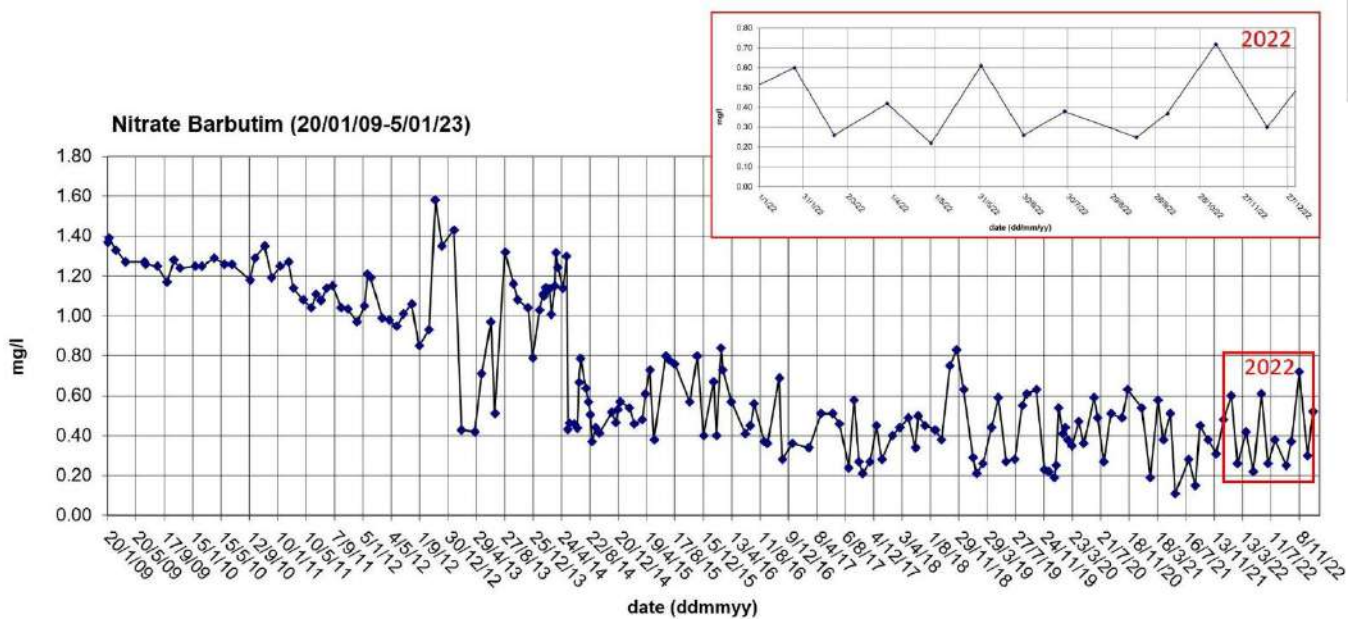


ב.

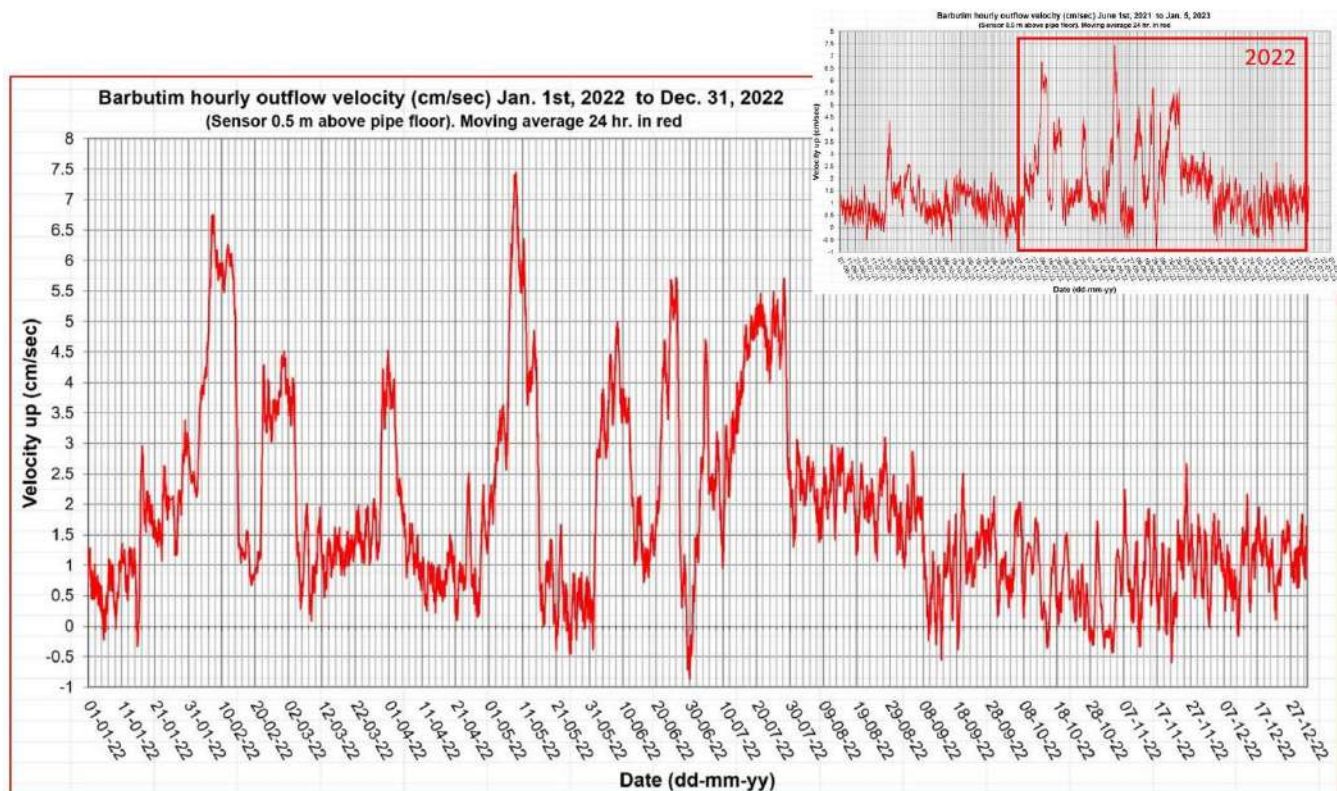
Barbutim Hose_hourly Conductivity 14/09/21-05/01/23



איור 23: א. המוליכות החשמלית בברבוטים 2012-2023 (במיקרו-סימנס לס"מ) כפי שנמדדה מאנליזות דיגום המים החודשית. האיור העליון הוא הגדלה של המוליכות בשנת 2022 ו-**ב.** המוליכות החשמלית בברבוטים ספטמבר 2021 עד תחילת ינואר 2023 כפי שנמדדה ברציפות (תדירות של שעה) באמצעות סנסור ה-Manta. הפוליון האדום מייצג את הנתונים בשנת 2022.



איור 24: ריכוז הניטרט בברבוטים 2019-2023 (במיליגרם חנקן לליטר). באיור העליון מוצגת הגדלה של ריכוז הניטרט ב-2022



איור 25: מהירות שעתית בציר Z ("ספיקת מים") שנמדדה בבסיס צינור הברבוטים. הגרף האדום מייצג ממוצע רץ של 24 שעות. האיור העליון מציג את הממוצע הרץ מיוני 2021 ועד ינואר 2023.

2.14 כלורופיל וייצור ראשוני



תמונת מיקרוסקופ של האצה פרידיניום

במימון
רשות
המים

ורנר אקרט, דוד קמינגס

- פריחת האביב בשנת 2022 התאחרה לחודש מאי .
- ריכוז כלורופיל A בשנת 2022 הוא הנמוך בעשור האחרון.
- עומק סקי עמד במתאם טוב עם יצרנות ראשונית שהייתה פחות או יותר ממוצעת.

מטרת המחקר

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

רקע

ריכוז הכלורופיל וקצב היצרנות הראשונית באגם הינם מדדים בסיסיים חשובים ביותר למעקב אחר התהליכים המתרחשים בו. פרמטרים אלה 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) או 1971 (ייצור ראשוני). בשנות השבעים והשמונים שני פרמטרים אלו התנהגו לפי דגם שנתי טיפוסי שכלל שיא אביבי (אפריל-מאי)

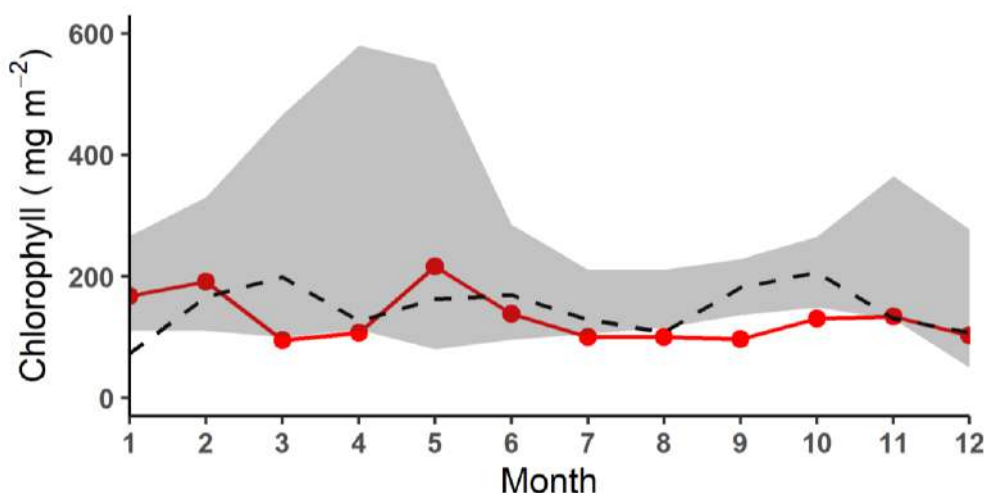
בזמן פריחת הפרדיניום, בעוד שבמחצית השנה השנייה נרשמו בדרך כלל ערכים נמוכים. דגם זה השתנה עם העלמות פריחת הפרדיניום, במהלך שנות ה-90, ובעשור האחרון עקומת הפרודוקטיביות השתטחה בעוד שעקומת הביומסה מראה שיא סתווי בנוסף לשיא האביבי.

שיטות

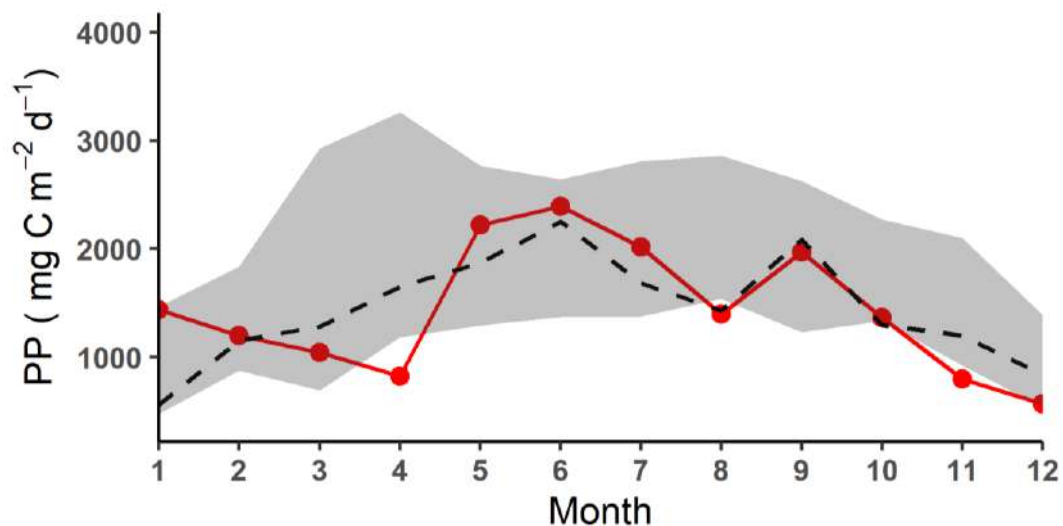
מים למדידת ריכוזי כלורופיל וייצור ראשוני נדגמים אחת לשבועיים בתחנה A, בעומקים 0, 1, 2, 3, 5, 7, 10 ו-15 מ'. כלורופיל נמדד בשיטת Holm-Hansen et al 1965 לאחר מיצוי באצטון 90% לכ-18 שעות. ייצור ראשוני נמדד בשיטת הפחמן המסומן רדיואקטיבית לפי Steeman-Nielsen 1952 לאחר אינקובציה של 2-3 שעות in-situ בעומקי הדיגום.

תוצאות ודיון

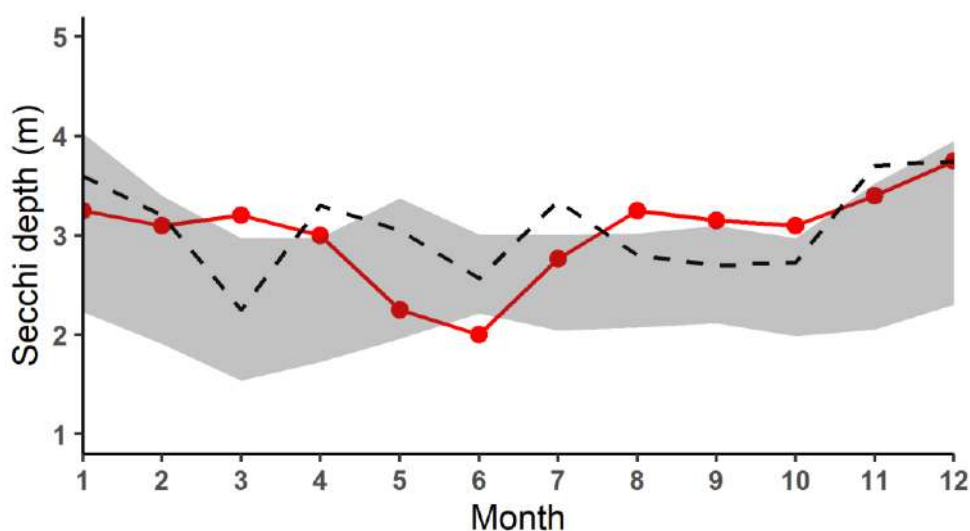
למרות ריכוז הכלורופיל הנמוך בחודש מאי (איור 26), קצב היצרנות הראשונית הממוצע דווקא היה גבוה מהממוצע הרב שנתי עם קצב ממוצע של כ-2200 מיליגרם פחמן למטר רבוע ליום ($2220 \text{ mg C/m}^2/\text{d}$), איור 27). במהלך חודש אפריל, אשר ידוע כחודש בעל היצרנות הראשונית הגבוהה ביותר, הערך אשר נמדד בפועל היה נמוך ועמד על כ- $820 \text{ mg C/m}^2/\text{d}$ בהשוואה לממוצע הרב שנתי ($\sim 2000 \text{ mg C/m}^2/\text{d}$, איור 27). עומק הסקי לאורך מרבית שנת 2022 היה גדול יותר מסטיית התקן הרב שנתית, כפי שניתן לצפות לאור ערכי הכלורופיל הנמוכים בשנה זו (איור 28). רק בחודשים מאי ויוני שקיפות המים ירדה – כנראה בגלל פריחת הפיטופלנקטון המאוחרת אשר ארעה בתקופה זו (איורים 27 ו-28). עם זאת, ובאופן מפתיע, המתאם בין עומק הסקי לבין ריכוז הכלורופיל לא היה גבוה ($r^2 = 0.17$) בעוד שהמתאם בין עומק הסקי לבין היצרנות הראשונית היה גבוה ($r^2 = 0.70$).



איור 26: המהלך השנתי של הממוצעים החודשיים של ריכוזי כלורופיל בשנת-2022 (קו אדום) בהשוואה לשנת 2021 (קו שחור מקוקו) ולסטיות התקן סביב הממוצע לעשור 2011-2020 (ענן אפור). הערכים מוצגים ליחידת שטח, לאחר אינטגרציה לאורך 15 המטרים העליונים של עמדת המים.



איור 27: המהלך השנתי של הממוצעים החודשיים של קצב היצרנות הראשונית ב-2022 (קו אדום) בהשוואה ל-2021 (קו שחור מקוקו) ולסטיות התקן סביב הממוצע לעשור 2011-2020 (ענן אפור). הערכים מוצגים ליחידת שטח, לאחר אינטגרציה לאורך 15 המטרים העליונים של עמודת המים.



איור 28: המהלך השנתי של הממוצעים החודשיים של עומק הסקי בתחנה A ב-2022 (קו אדום) בהשוואה ל-2021 (קו שחור מקוקו) ולסטיות התקן סביב הממוצע לעשור 2011 - 2020 (ענן אפור).

2.15 ייצור שניוני חיידקי



במימון
רשות
המים

חמי רושנסקי, שירה ניניו

- הפעילות החיידקית ההטרורופית השנתית שנמדדה בשנת 2022 באזור הפוטי הייתה נמוכה מזו שנמדדה בשנת 2021.
- ערך השיא השנתי התקבל בחודש אוגוסט בזמן פריחת הכחוליות מקבעות החנקן.
- נפסקה המגמה של פעילות חיידקית גבוהה שאפיינה את השנים האחרונות.

רקע

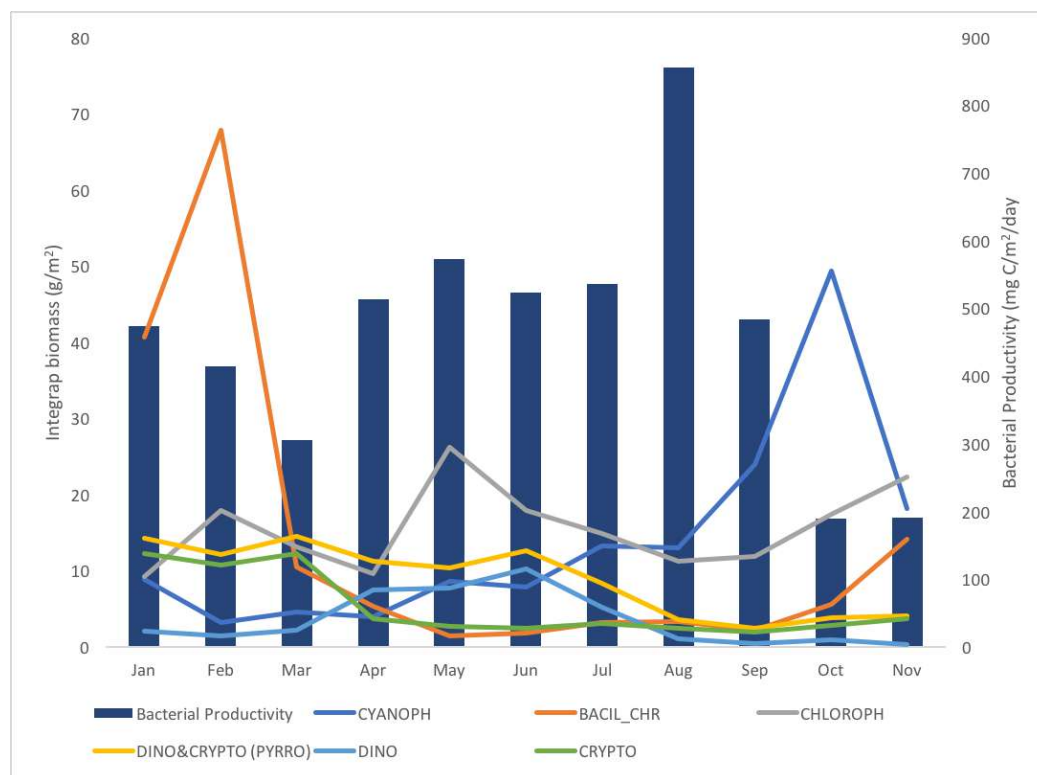
חיידקים הטרורופיים הם מרכיב חשוב במארג המזון, עם תפקיד מרכזי בפירוק חומר אורגני ומחזור נוטריינטים. החיידקים מגיבים מהר לשינויים באגם כולל פריחות של אצות או עליה אחרת בביומסה. התחקות אחר פעילות חיידקית מאפשרת קבלת תמונה של פיזור תהליך הפירוק של חומר אורגני באגם בזמן. מעקב שגרתי אחר פרמטר זה חשוב בכדי 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 ייצור שניוני של חיידקים (ב-6 עומקים בתחנה A) החל ב-2001 ונמשך ב-2022 בתדירות של פעם בחודש, למעט חודש דצמבר.

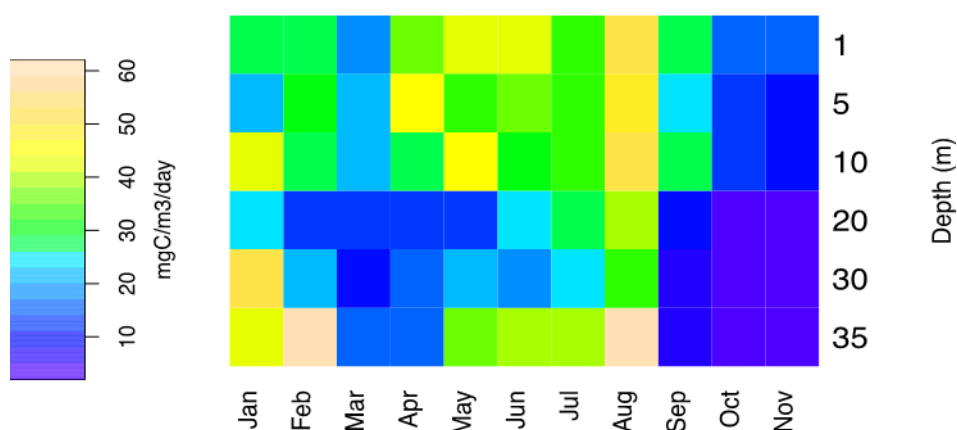
תוצאות ודיון

הייצור החיידקי הכולל שנמדד בשנת 2022 היה נמוך במקצת מזה שנמדד בשנת 2021. באזור הפוטי נמדדו ערכי שיא שנתיים של מעל 800 מ"ג פחמן למ"ר ליום בחודש אוגוסט (איור 29). הנתונים מצביעים על פעילות של חיידקים הטרוטרופים באזור הפוטי לאורך רוב השנה, ללא תלות בפריחה של אצה מסוימת. בחודשי השנה אוקטובר ונובמבר נמדדה פעילות חיידקית נמוכה במיוחד מסיבות לא ידועות (איור 29).

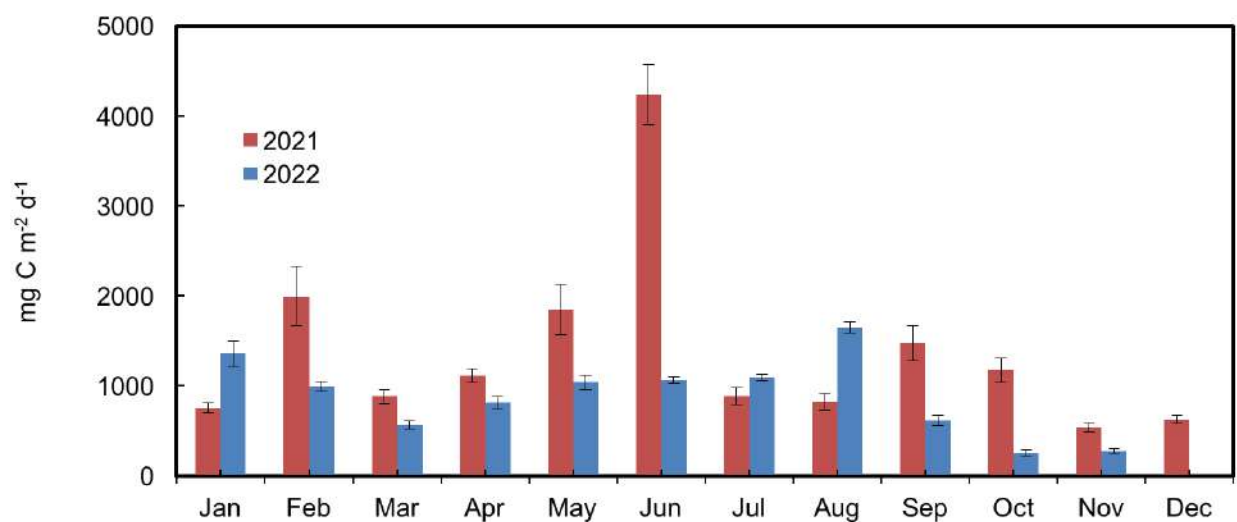


איור 29: ביומסה של פיטופלנקטון וייצור חיידקי (מג' פחמן/מ"ר/יום) בעמדות המים האפילימנטית ב- 2022 הערכים מייצגים אינטגרציה של ערכים שנמדדו לאורך עמדות המים בעומקים 1-15 מטר.

ניתוח הפיזור האנכי של הפעילות החיידקית מראה פעילות חיידקית גבוהה לאורך רוב עמדות המים בחודש אוגוסט, כולל שיא בעומק של 35 מ'. פעילות זו משקפת ככל הנראה תהליכי פירוק ביומסה שוקעת של פריחות כחוליות מקבעות חנקן, בשילוב עם תהליכי דניטריפיקציה הטיפוסיים לעונה זו באגם (איור 30).



איור 30: מפת חום המייצגת את הפיזור האנכי של היצרנות החיידקית בעמדות המים מ- 1-35 מ' בשנת 2022. הגוון מייצג את קצב היצרנות שנמדד ביחידות מג' פחמן/מ"ר/יום, על פי הסרגל שמשמאל.



איור 31: היצרנות החיידקית (מג' פחמן למ"ר ליום) בעמודת המים מ-1-35 מ' בשנים 2021-2022.

סך כל הייצור החיידקי שנמדד בשנת 2022 היה נמוך מזה שנמדד בשנת 2021 (איור 31) וקרוב יותר לפעילות הנמוכה יחסית שנמדדה באגם בשנים 2013-2015.

2.16 ניטור חיידקים ממקור צואתי



דיגום מים לבדיקת חיידקים אינדיקטורים לזיהום. צלם: עוז צברי.

במימון
רשות
המים

עכסה לופו, שירה ניניו

- בחודשים פברואר, מרץ ואפריל 2022 נרשמו תוצאות גבוהות מהרגיל בתחנות דיגום שונות בצפון הכנרת.
- בחודש מרץ 2022 נרשמו תוצאות חריגות בתחנות דיגום שונות בדרום הכנרת.
- בדיקות MST מצביעות על זיהום ביוכימי המגיע לכנרת דרך הירדן וממקורות נוספים.

מטרת הניטור

איתור זיהוי מוקדים וגורמי זיהום ממקור צואתי בכנרת.

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 מ"ל מים. הבדיקות נעשו בשיטת ה- Filter Membrane והחיידקים שנבדקו הינם: קוליפורמים צואתיים (Fecal coliform), אשריכיה קולי תרמופילי (Thermophilic Escherichia coli) ואנטרוקוקי (Enterococci). במידה ומתגלה נוכחות גבוהה של חיידקים ממקור צואתי (מעל 100 מושבות במ"ל), מתבצעת בדיקה מולקולרית מסוג MST (Microbial source tracking) לאיתור מקור הזיהום.

תוצאות ודיון

במשך כל שנת 2022 לא נרשמו תוצאות החורגות מתחום המותר לרחצה באף תחנה. מקרים בהם נרשמו מעל ל- 100 קוליפורמים צואתיים ב- 100 מ"ל בצפון הכנרת הם: שפך הירדן בחודשים פברואר, מרץ ואפריל, חוף אמנון בחודש פברואר, חוף דוגית בחודשים יוני ואוקטובר, שפך הזאכי בחודש פברואר, בתחנת השאיבה טבריה במרץ ובאוקטובר, ובחוף מעגן ומול צינור הטיית הירמוק, בחודש מרץ (טבלה 5).

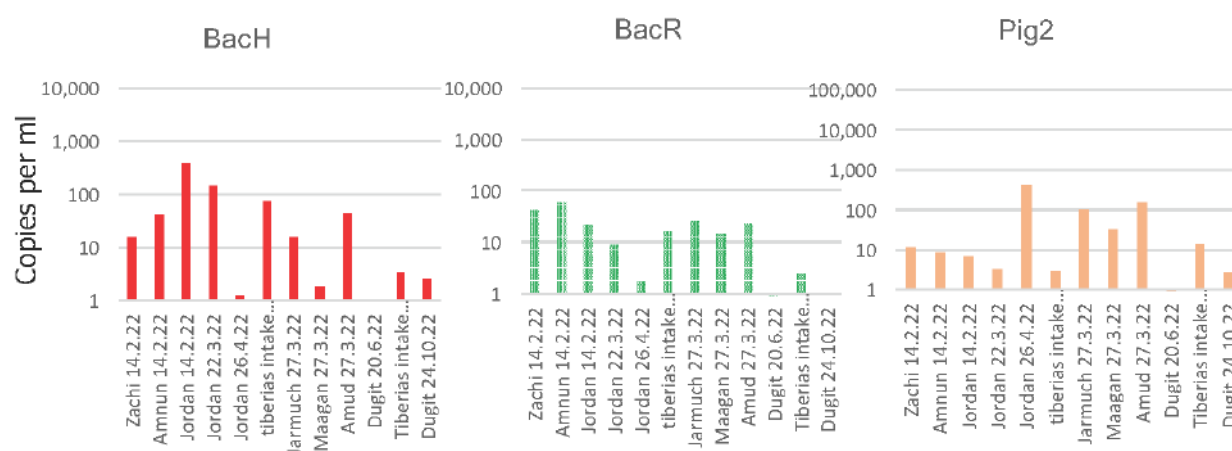
טבלה 5: ריכוז חיידקים אינדיקטורים בדוגמאות עם יותר מ 100 חיידקי צואה למ"ל

תחנה	תאריך	FC	<i>E. coli</i>	<i>Enterococci</i>
זאכי	14.2.22	126	66	60
אמנון	14.2.22	106	56	52
ירדן	14.2.22	380	108	110
ירדן	22.3.23	242	60	101
ירדן	26.4.23	153	45	55
ש. טבריה	27.3.23	225	74	24
ירמוק	27.3.23	324	52	40
מעגן	27.3.23	99	30	100
עמוד	27.3.23	248	96	60
דוגית	20.6.23	159	43	28
ש. טבריה	23.10.23	103	98	5
דוגית	24.10.23	101	8	18

MST

במקרים בהם נמצאו מעל 100 מושבות ב- 100 מ"ל מאחד מסוגי החיידקים הופק DNA מהדוגמה ובוצעה בדיקת MST לבירור מקור הזיהום הצואתי – אדם, בקר או חזיר. תוצאות ה- MST, במספר עותקים במ"ל, מוצגות באיור 32. התוצאות מראות כי הדוגמה שנלקחה מול שפך הירדן בחודש פברואר הייתה עשירה בחיידקים שמקורם באדם (BacH), הזיהום נמשך גם בחודש מרץ אולם בחודש אפריל נעלם כמעט כליל. נוכחות סמן זה מעידה על כניסה של ביוב לאגם דרך הירדן, וקיים צורך להבין כיצד מגיע ביוב לערוץ הנחל.

אתרים נוספים גם הראו חותם של זיהום ממקור ביו, כולל אתר השאיבה של טבריה בחודשים מרץ ואוקטובר. זיהום ממקור בקר (BacR) הופיע במספר אתרים, אולם לא בריכוז גבוה. זיהום ממקור חזיר (Pig2) היה נמוך יחסית לסמן רגיש זה, למעט הזיהום שנמדד בסוף אפריל מול שפך הירדן (איור 32).



איור 32: MST עבור דוגמאות בהן נמצאו מעל 100 חיידקים צואתיים ב- 100 מ"ל. התוצאות מובאות ביחידות של מספר העתקי סמן במ"ל.

2.17 ניטור פיטופלנקטון



בתמונה: צופת של האצה הירוקית *Botryococcus brawnii* בחוף שיטים, 16.8.2023. צילם: ש. אונגר.

במימון
רשות
המים

תמר זהרי, אלה אלסטר

- בשנת 2022 שוב לא התפתחה פריחת פרידיניום. מאז 1996 היו 19 שנים ללא פריחת פרידיניום ורק 8 שנים עם פריחה.
- הביומסה האצתית במים הייתה נמוכה לאורך כל השנה וללא שיא אביבי.
- באוגוסט דווח על צופת של הירוקית בוטריוקוקוס בחופים שונים (ראו תמונה בכותרת הפרק). האצה לא רעילה והצופת נעלמה תוך ימים ספורים.

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, או האצות המיקרוסקופיות המורחפות במים, הן היצרניות הראשוניות העיקריות במערכות אקווטיות והבסיס למארג המזון כולו. בכנרת יש לפיטופלנקטון השפעה על איכות המים, והוא גם מהווה אינדיקטור לאיכות המים במספר אופנים: ריכוזים גבוהים של פיטופלנקטון הם אינדיקציה לריכוזים גבוהים של חומרי דשן במים ותנאים שמיטיבים עם פריחת אצות. מספר מינים של ציאנובקטריה מייצרים רעלנים

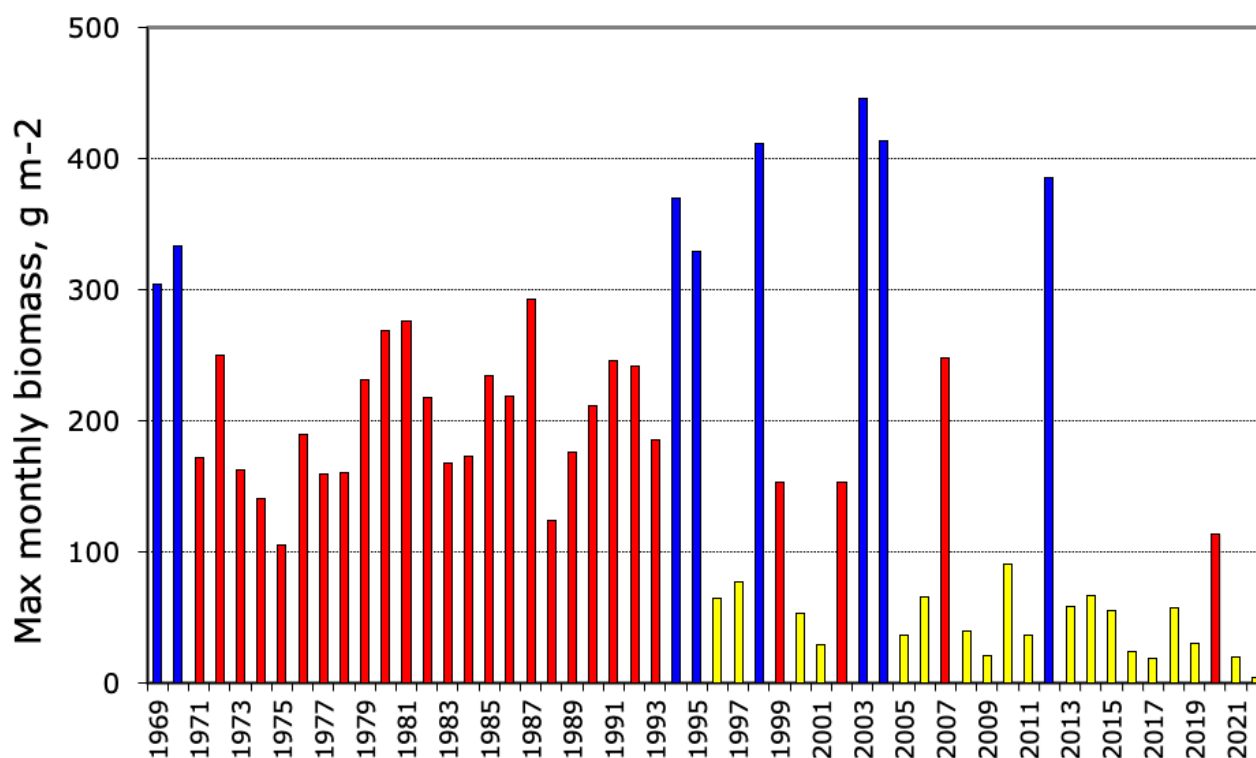
שפוגעים באיכות המים לשתייה ובאפשרות להשתמש בכנרת לקייט ונופש. מינים אחרים הם מינים רצויים, כמו הדינופלגלטים עתירי חומצות השומן שמשמשים מזון מועדף לדגים, וכמו אצות הקריפטופיטה, רוב הירוקיות וחלק מהצורניות, אשר משמשים מזון מועדף לזואופלנקטון. המעקב רב השנים אחר הפיטופלנקטון בכנרת נמצא בבסיס ההבנה של תפקודה כמערכת אקולוגית.

בעבר, הפיטופלנקטון של הכנרת התאפיין בפריחה אביבית של *פרידיניום גטונזה*, פריחה שהכתיבה את הדינמיקה העונתית של מארג המזון כולו. מאז אמצע שנות התשעים של המאה הקודמת, פרידיניום פורחת רק בשנים גשומות במיוחד, ולא ובכולן. בשנים ללא פרידיניום הכנרת מתנהלת אחרת. אין מין אחר שתפס את מקום הפרידיניום ואין דגם חדש שחזר על עצמו, כל שנה עומדת בפני עצמה.

תוצאות ודיון

2022 - שנה נוספת ללא פריחת פרידיניום

בשנת 2022 שוב לא התפתחה פריחת פרידיניום אביבית (איור 33). עד אמצע שנות ה-90 פרידיניום פרח כל שנה באביב בעצמה בינונית, מלבד השנתיים השטפוניות 1969 ו-1970 והשנתיים השטפוניות 1994 ו-1995, בהן עוצמת פריחת הפרידיניום הייתה גבוהה במיוחד (ממוצע חודשי מירבי מעל 300 ג' למ²). אולם, מאז 1996 נצפו 19 שנים ללא פריחה, כולל 2022, ורק 8 שנים עם פריחה (4 שנים של פריחה בינונית, 4 שנים של פריחה מאסיבית, איור 33).



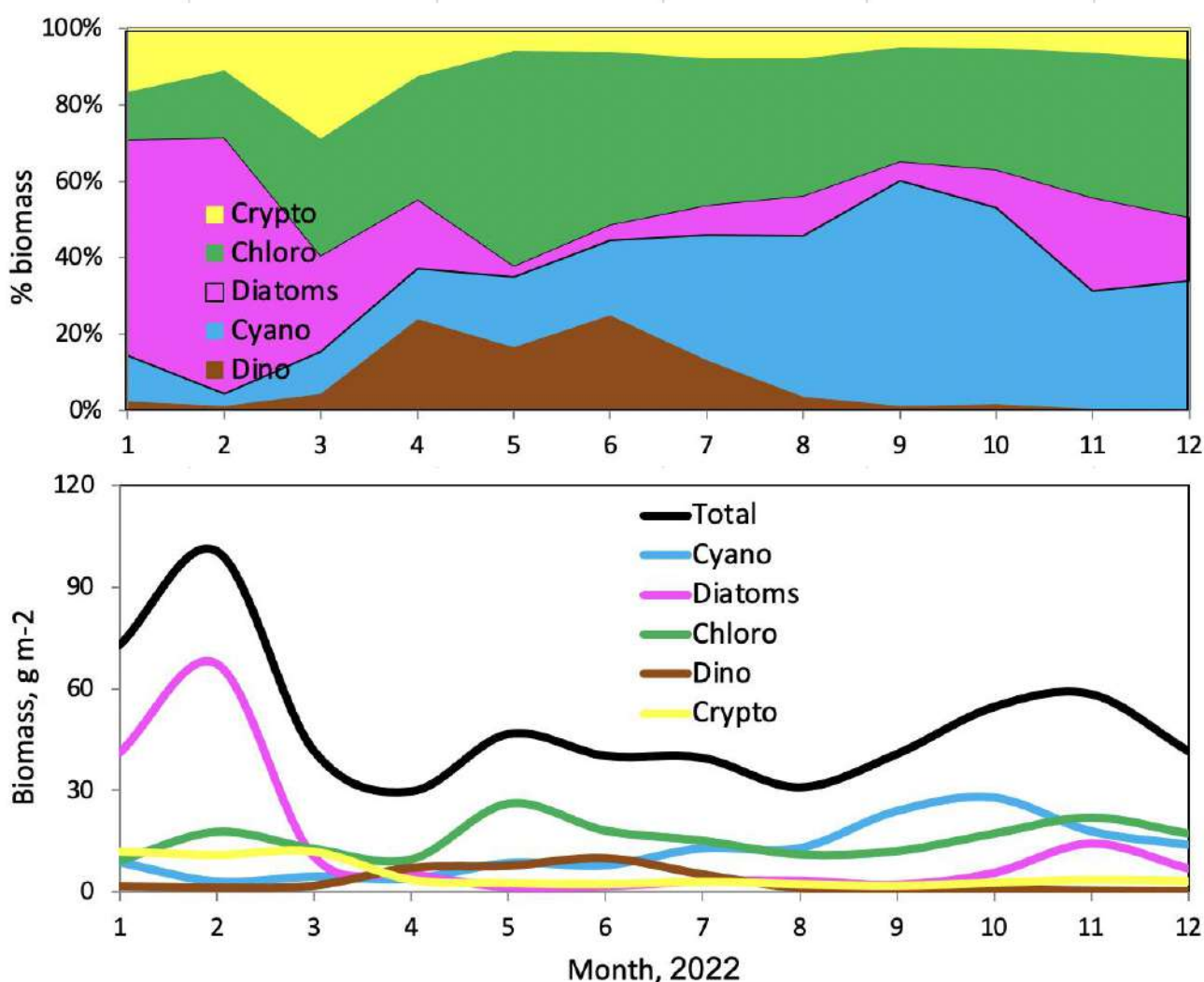
איור 33: עוצמת פריחת הפרידיניום בין השנים 1969-2022. עוצמת הפריחה מבוטאת כממוצע חודשי של ביומסת המין *פרידיניום גטונזה* בחודש בו הביומסה שלו הגיעה לשיאה השנתי. בהתאם לעוצמת הפריחה האביבית השנים חולקו לשלוש קטגוריות: שנים ללא פריחה (צהוב, שנים בהן שיא הביומסה החודשית הממוצעת לא עלה על 100 ג' למ²), שנים עם פריחה בינונית (אדום, ביומסה בין 100-300 ג' למ²) ופריחה מאסיבית במיוחד (כחול, ביומסה מעל 300 ג' למ²).

מאז הקמת אגמון החולה ב-1994 (וצמצום כמות המים ששוטפת את עמק החולה ומגיעה לכנרת) ועד לפני כעשור יכולנו להצביע על דגם שחזר על עצמו בו פרידיניום פורחת בכנרת רק בשנים ברוכות בגשמים, שנים בהן עמק החולה נשטף. בשנים שיטפוניות אלה מגיעים לכנרת חומרים אורגניים ואנאורגניים (כמו סלניום) שנשטפים מאדמות הכבול, מה שלפני הקמת האגמון קרה כל שנה אך מאז הקמתו לא קורה בשנים שחונות.

אך בעשור האחרון - היו גם שנים גשומות שבהן פרידיניום לא פרח. למשל חורף 2018/19 היה גשום מאד, אך ללא פריחה. חורף 2019/20 היה חורף גשום שני ברצף - עם פריחה. חורף 2020/21 היה קרוב לממוצע הרב שנתי וללא פריחה. הסבר אפשרי (בינתיים בגדר השערה) הוא שהחילזון הפולש אשר התפשט בכנרת ב-2010/11 ומאז נפוץ מאוד מסלק חלק משמעותי מתאי הקיימא של הפרידיניום בקרקעית האגם ובכך מצמצם את האינוקולום. פירוט נוסף בפרק החלזונות.

תרומה יחסית של קבוצות הפיטופלנקטון השונות

בהעדר פריחת פרידיניום, תרומת הדינופלגטים לסך הביומסה האצתית ב-2022 הייתה נמוכה ($<20\%$), איור 34 למעלה). הקבוצות שתרמו את עיקר הביומסה ב-2022 היו צורניות וכריפטופיטה בחורף, ירוקיות כל יתר השנה (ממרץ עד דצמבר) וציאנובקטריה (מיולי עד דצמבר).



איור 34: ממוצעים חודשיים של ביומסת הפיטופלנקטון ושל ביומסת הקבוצות הטקסונומיות העיקריות בכנרת, 2022. למעלה: תרומה יחסית של כל אחת מהקבוצות. למטה: ערכים מוחלטים (גר' למ"ר) של ביומסה עבור כל קבוצה ושל הסה"כ.

סך הביומסה והביומסה של הקבוצות העיקריות

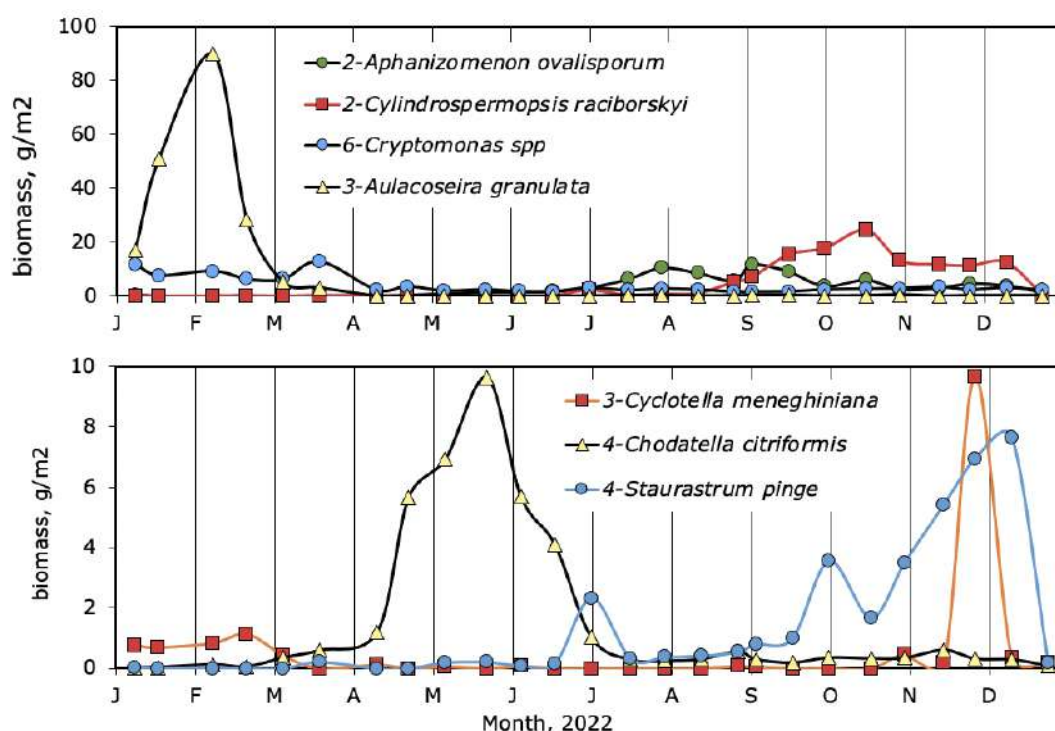
הממוצע השנתי של ביומסת הפיטופלנקטון ב-2022 היה 50 ג' למ"ר, ערך דומה לערך הממוצע משנת 2021 (47 ג' למ"ר) אשר מהווה רק 64% מהממוצע הרב-שנתי של 78 ג' למ"ר. לאורך כל השנה, סך הביומסה לא עלה אף פעם מעל 100 ג' למ"ר (איור 34 למטה). שני הממוצעים החצי שנתיים, ינואר עד יולי עד דצמבר היו 55 ו-44 ג' למ"ר, בהתאמה. השיא היחיד שנרשם השנה היה

דו"ח ניטור ומחקרי כנרת 2022, המעבדה לחקר הכנרת, חי"ל

בפברואר (100 ג' למ²), עקב פריחה קצרה של הצורנית אאולקוסירה (איור 35). דגם "שטוח" כזה לא היה קיים בשנות ה-70, 80, 90 של המאה הקודמת, בהן נרשם כל שנה שיא ביומסה אביבי משמעותי. אך בשנים ללא פריחת פרידיניום של שנות האלפיים דגם שנתי שטוח נעשה יותר ויותר שגרתי.

הרכב המינים ודינמיקה עונתית

שנת 2022 נפתחה, כמו רוב השנים בכנרת, בתרומה משמעותית של צורניות, בעיקר *Aulacoseira granulata* שהגיעה לשיא ביומסה בפברואר (איור 35) ושל קריפטופיטה (כריפטומונס, רודומונס). ממרץ ועד דצמבר לירוקיות הייתה תרומה עיקרית לסה"כ (31-57% מסך הביומסה), עם דומיננטיות של המין *Chodatella citrifomis* במאי ושל *Staurastrum pingue* מאוקטובר עד דצמבר (איור 35). במהלך הקיץ, מינים רבים של ירוקיות תרמו כל אחת את חלקה לסך הביומסה של קבוצה זו, ללא מין מסוים דומיננטי. כחוליות חוטיות הופיעו כמו כל שנה בקיץ: אפניזומנון באוגוסט, צילינדרוספרמופסיס, באוקטובר.



איור 35: המהלך השנתי של ביומסת המינים שתרמו את עיקר הביומסה לסה"כ בשנת 2022. קווים אנכיים מציינים תחילת חודש.

תופעות ייחודיות:

באוגוסט 2022 הגיעו דיווחים על פריחה לא מזוהה בחופים. בדיקת מיקרוסקופ העלתה שזוהי פריחה של הירוקית *Botryococcus braunii* (ראו תמונה בראשית הפרק). לאצה מושבתית זו כושר ציפה עקב נוכחות בועיות שמן זהובות וכשהערבוב האנכי חלש (למשל בחמסין) המושבות צפות ומצטברות בחופים שאליהם נושבת הרוח. בגלל בועיות השומן אלו האצה משמשת בתעשייה כמקור חלופי לדלק פוסילי. האצה מייצרת גם פיגמנט בטא-קרוטן שנותן לו את הגוון הארגמני שבתמונה. הפריחה לא רעילה והיא נעלמה תוך מספר ימים. הפעם האחרונה בה נצפתה פריחה של מין זה הייתה בתחילת ינואר 2000, כשבמשך מספר ימים הכנרת כולה הייתה מכוסה בפילמנט דק מחהב של האצה.

2.18 רעלני כחוליות



במימון
רשות
המים

פלאג אסטרחן, דיתי ויינר-מוציני

- בשנת 2022, זוהו מיקרוציסטינים במי הכנרת בחודשי ינואר-מרץ.
- הריכוזים במים היו נמוכים מ- 0.1 מיקרוגרם לליטר (מק"ג לליטר). עם זאת, אנליזת הביומאסה הנצפית באגם באותם חודשים, הראתה ריכוז מיקרוציסטינים מירבי של מעל 800 מק"ג לגרם חומר יבש.
- צילינדרוספרמופסין נמדד בכנרת בדוגמאות מים בין החודשים יוני- דצמבר 2022.
- בין החודשים אוגוסט-נובמבר חצתה הרמה את הריכוז 0.7 מק"ג לליטר כאשר רמת רעלן מרבית של 1.6 מק"ג לליטר נצפתה בחודש אוקטובר 2022.

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 $20\mu\text{m}$. לאחר מיצוי וריכוז, הדגימות נלקחות לאנליזה איכותית וכמותית לרעלנים משתי קבוצות: מיקרוציסטינים (MC) שמקורם במיקרוציסטיס וצילינדרוספרמופסין (CYN) שמקורו במיקרואצה בשם אפניזומנון.

המדידות מבוצעות בשיטות HPLC ו-LC/MS. התוצאות מוצגות כריכוז הרעלן ליחידת נפח מים $\mu\text{g/L}$ או ppb בדוגמאות מים, או כריכוז הרעלן בביומסה (ליחידת משקל יבש) בריכוזי $\mu\text{g/g}$. 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*. באביב 2022, בחודשים פברואר- אפריל נספרו מספר מושבות מועט יחסית (עד 100 מושבות למיליליטר) של מין זה, בדומה לשנה שעברה (ראה איור 36). כמות רעלני המיקרואיסטיס במי תחנה A הייתה נמוכה ביותר (ראה טבלה 6) ונמדדה הודות לשימוש ב LCMS.

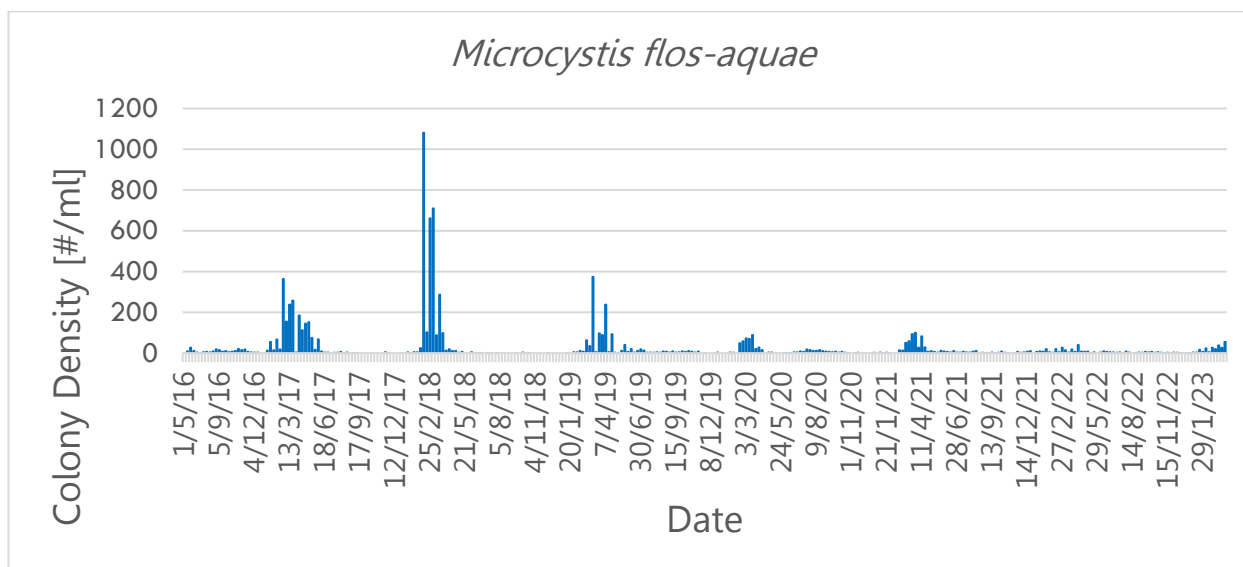
טבלה 6: ריכוזי רעלנים (מיקרואיסטינים וצילינדרוספרמופסין) בדגימות בהם נמצאו רעלנים בתחנה A - שנת 2022 (תוצאות חיוביות בלבד מוצגות).

תאריך	תחנה	עומק (מטר)	סוג הרעלן	ריכוז רעלנים במים ($\mu\text{g/L}$)	ריכוז רעלנים בביומסה ($\mu\text{g/g}$)
02.01.2022	A	1	Cylindrospermopsin	0.83	
			Microcystins		
09.02.2022	Maabada	0	*YR		51.86
09.02.2022	Maabada	0	*LR		58.09
09.02.2022	Maabada	0	*RR		10.88
20.02.2022	Maabada	0	YR		60
20.02.2022	Maabada	0	LR		121
20.02.2022	Maabada	0	RR		12
30-Mar-22	Maabada	0	YR		14
30-Mar-22	Maabada	0	LR		840
30-Mar-22	Maabada	0	RR		6.3
			Cylindrospermopsin		
07.06.2022	A	1	Cylindrospermopsin	0.24	
03.07.2022	A	1	Cylindrospermopsin	0.25	
03.07.2022	A	1	Cylindrospermopsin	0.17	
07.08.2022	A	1	Cylindrospermopsin	0.65	
28.08.2022	A	1	Cylindrospermopsin	0.93	
04.09.2022	A	1	Cylindrospermopsin	1	
03.10.2022	A	1	Cylindrospermopsin	1.42	
23.10.2022	A	1	Cylindrospermopsin	1.62	
30.10.2022	A	1	Cylindrospermopsin	1.37	
27.11.2022	A	1	Cylindrospermopsin	0.51	
11.12.2022	A	1	Cylindrospermopsin	0	

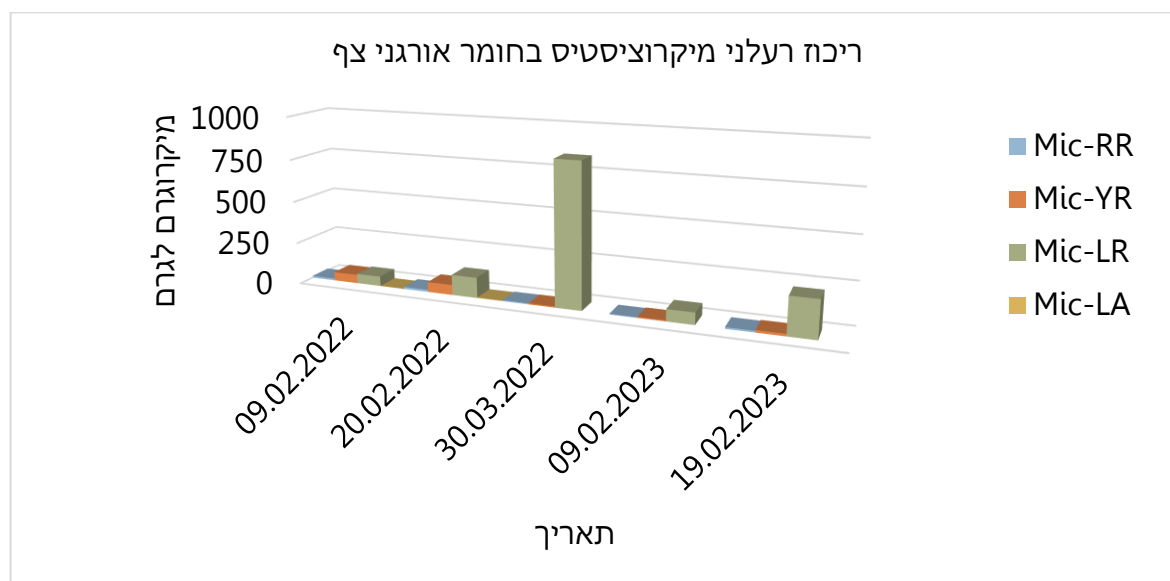
* שמות רעלני מיקרואיסטינים מצויינים בקצרה LR - MC, CYN וכ"ו.

כפי שניתן לראות בטבלה 6, גם ביומסת המיקרואיסטיס באגם לא הגיעה השנה לריכוזים גבוהים בהשוואה לשנים שעברו.

הרעלן הדומיננטי מבין רעלני המיקרואיסטיס אשר אובחנו היה Mic-LR בדומה לשנים שעברו. בין החודשים ינואר - מרץ בשנת 2022 נצפתה כמות מרשימה של 800 מיקרואיסטיס לגרם חומר יבש צף באגם. כמות הרעלן המצטבר בביומסה מייצג את יכולת ייצור הטוקסינים הקיימת באוכלוסייה כולה וככלל הינה מקור רעיל באגם. ניתן לציין כי בעוד כמות של עד 1 מיקרואיסטיס לליטר הינה רמה שאינה מחייבת טיפול במי שתיה, הרי שרמה של מאות מיקרואיסטיס המרוכזים בגרמים בודדים של ביומסה (בחומר צף) מהווים מקור סכנה למתרחצים המעטים בחודשי האביב. באיור 37 ניתן לראות כי קיימים סוגי רעלנים שונים בביומסה כאשר הסוג השולט בשנת 2022 הוא מיקרואיסטיס LR (MC-LR). רעלן זה ידוע גם כבעל הרעילות המרבית מבין סוגי הרעלנים המוצגים.

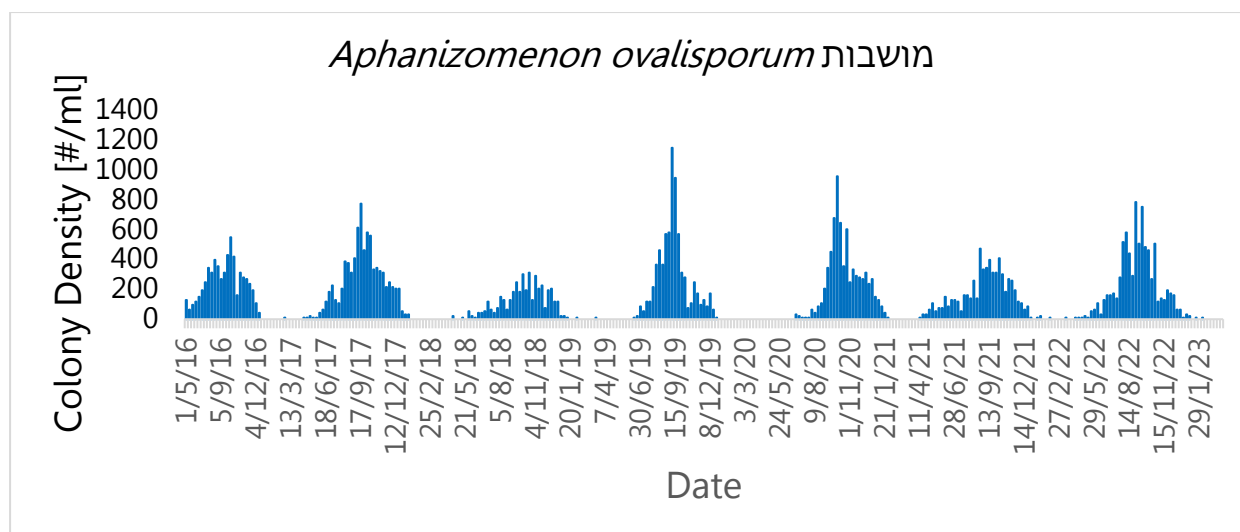


איור 36: ספירת מושבות *Microcystis flos-aqua* בעומק 1 מטר בתחנה A, החל משנת 2016 ועד פברואר 2023.

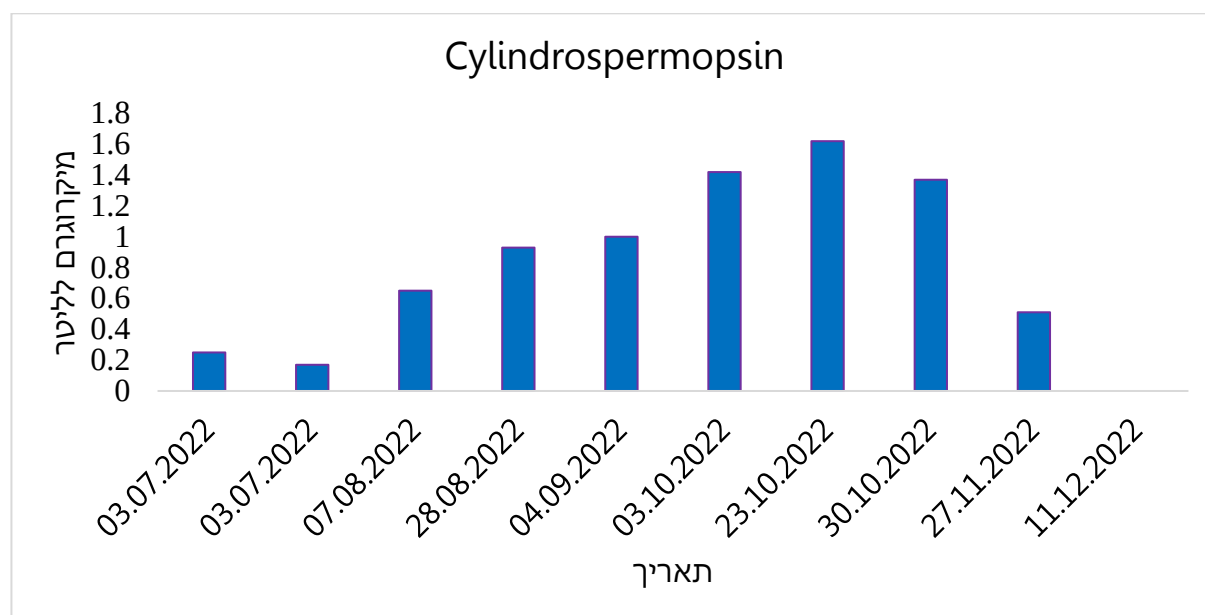


איור 37: ריכוז מיקרואיסטינים (רעלני מיקרואיסטיס) בביומסה מסוננת (מיקרואיסטיס לגרם חומר יבש) בחודשי האביב - 2022-2023.

אוכלוסיית ה- *Aphanizomenon ovalisporum* החלה מתפתחת השנה מתחילת הקיץ (מאי) והגיעה לריכחים מקסימליים בספטמבר, אשר דעכו לקראת בוא הסתיו (דצמבר 2022). בהשוואה לשנים קודמות, לא נצפתה עלייה במספר הפילמנטים למיליטר (איור 38).



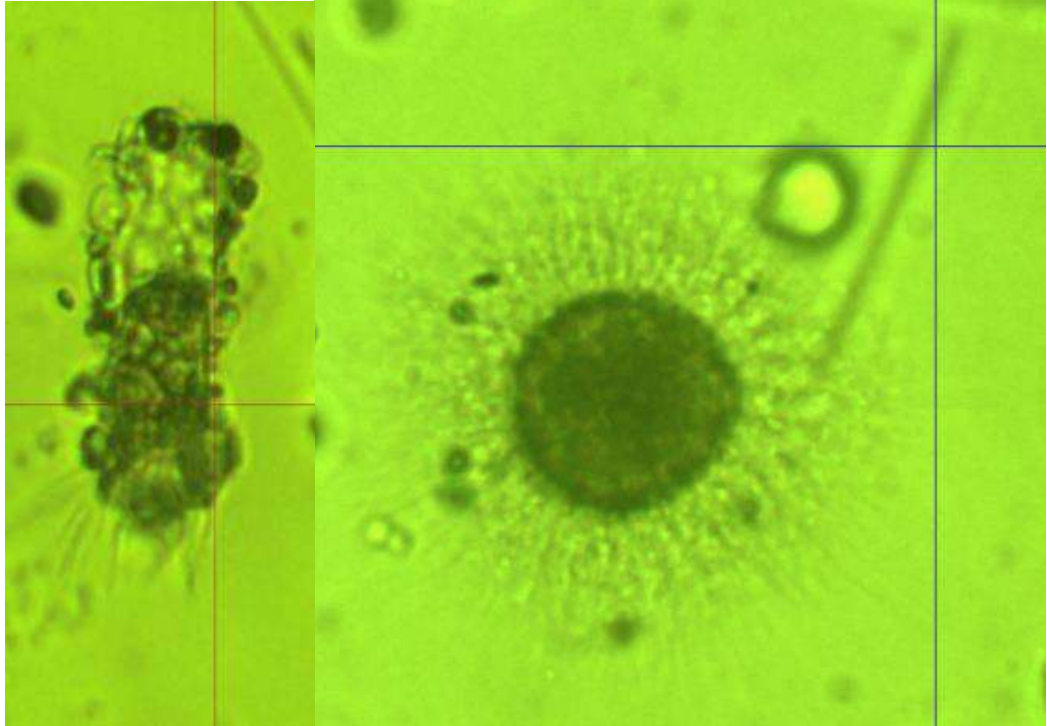
איור 38: ספירת פילמנטים *Aphanizomenon ovalisporum* בעומק 1 מטר בתחנה A בכנרת בין השנים 2016-2022.



איור 39: ריכוז הרעלן צילינדרוספרמופסין במי הכנרת (תחנה A)

מין זה של אפניזומנון מסוגל להפריש רעלן בשם צילינדרוספרמופסין אשר בניגוד לרעלני המיקרוציסטים, 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 בטבלה 6 וכן מרוכזים באיור 39. ניתן לראות כי ריכוז הצילינדרוספרמופסין מגיע לשיא של 1.63 מיקרוגרם לליטר בסוף חודש אוקטובר (בדומה לשנה שעברה). יש 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 בכדי לחסל את נוכחות הרעלן במים.

2.19 ניטור ציליאטים בכנרת



במימון
רשות
המים

חמי רושנסקי

- הצפיפות השנתית הממוצעת בכל עמודת המים בשנת 2022 הייתה גבוהה יחסית לשנת 2021.
- העלייה בצפיפות ב- 2022 נובעת בין היתר מעלייה במספרי הציליאטים מצורת sphere ב- 88, 20 ו 35% באפילימניון, מטהלימניון והיפולימניון, בהתאמה.
- נצפתה גם עלייה משמעותית במספרי ה- *Tintinides* (לדוגמא במים העליונים, האפילימניון מ- 0.9 ל- 5 תאים למ"ל).
- ב- 2022, ערכי הביומסה השנתית היו גבוהים באפילימניון ובתרמוקלינה לעומת 2021.
- ערכי הביומסה במטהלימניון ובהיפולימניון היו דומים לערכים שנמצאו מאז 2019.

מטרת הניטור

ניטור ציליאטים כמרכיב במארג המזון ובלולאה המיקרוביאלית.

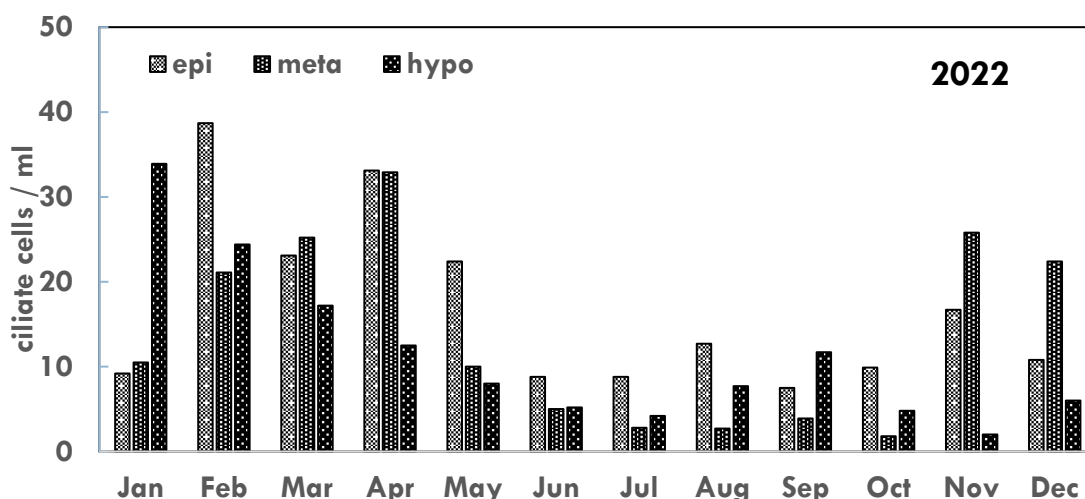
שיטות

ניטור ציליאטים מתקיים משנת 2006 ונערך פעם בחודש בתחנה A, בשלוש שכבות של עמודת המים: האפילימניון (עומק 1 מ'), אזור המטהלימניון (20 מ') והשכבה העמוקה, ההיפולימניון (35 מ'). בזמן השיכוב נלקחת דגימה נוספת מאזור התרמוקלינה. אנו משקיעים דוגמת מים בה החלקיקים רוכזו פי 10 בהשקעה מוקדמת, סופרים ומודדים את הציליאטים ב- 1 מ"ל מהנפח ששקע. הספירה נעשית לפי סוגים

טקסונומיים עבור הסוגים המוכרים לנו כמו *Vorticella*, *Tintinidium*, *Coleps*, ולפי הצורות הגיאומטריות (כדור, גליל, ספרואיד) עבור ציליאטים שאיננו בטוחים בהגדרתם. ביומסת הפחמן חושבה לפי 140 ננוגרם פחמן ל-1 מיקרוגרם משקל רטוב.

תוצאות ודיון

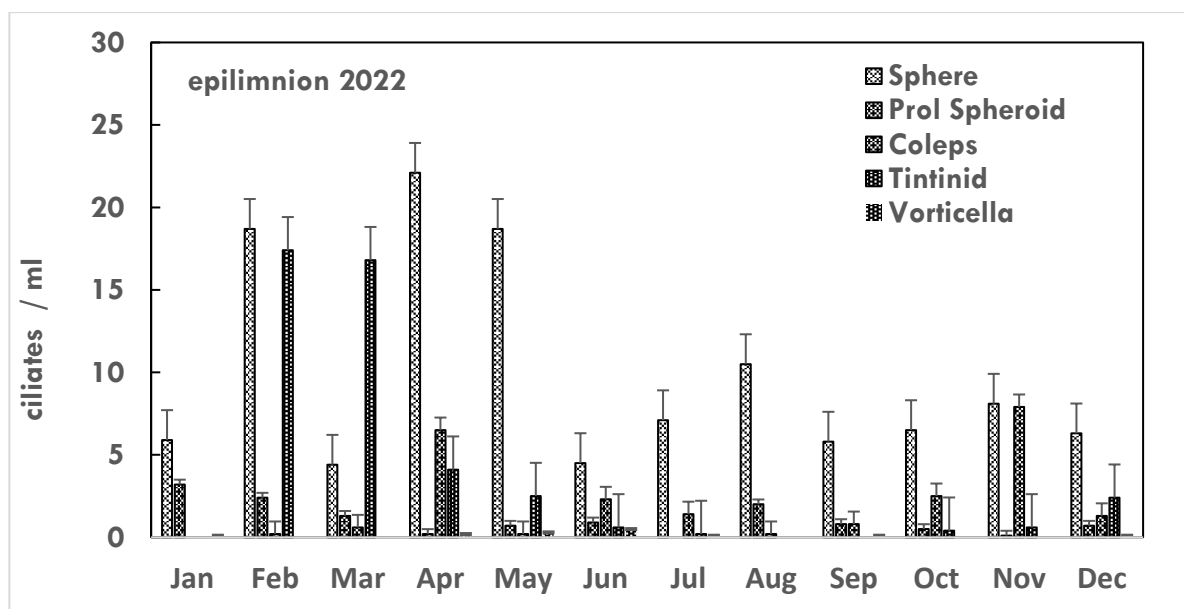
בשנת 2022, צפיפות כלל הציליאטים בכל שכבת המים הייתה גבוהה יחסית בחורף ובתחילת האביב (פברואר – מאי) ובסוף הסתיו בחודשים נובמבר – דצמבר, למעט בנובמבר בהיפולימניון (איור 40). הממוצע השנתי היה כ- 17, 14 ו- 12 תאים למ"ל באפילימניון, מטהלימניון והיפולימניון, בהתאמה.



איור 40: הצפיפות החודשית של הציליאטים (מספר למ"ל) בעומקים המייצגות שכבות שונות במהלך שנת 2022. באפילימניון (epilimnion), מטהלימניון (metalimnion) ובהיפולימניון (hypolimnion).

באפילימניון, הצפיפות הגבוהה יחסית בפברואר נבעה מעלייה במספרי הציליאטים מצורת *sphere* (19 תאים למ"ל), ו- *Tintinides* (17 תאים למ"ל). במרץ, צפיפות ה- *Tintinides* נשארה דומה, אך בגלל ירידה חדה בתאים בצורת *sphere* (4 תאים למ"ל), הייתה ירידה במספר התאים למ"ל. באפריל ובמאי, הציליאטים התאפיינו במספר גבוה של תאי ה- *sphere* (22 ו- 19 תאים למ"ל, בהתאמה) ובאפריל מספר תאי *Coleps* היה יחסית גבוה (6.5 תאים למ"ל). מיוני עד דצמבר, מספרי ה- *sphere* היו נמוכים יחסית אך היוו את רוב אוכלוסיית הציליאטים. בנובמבר, צפיפות הציליאטים עלתה כתוצאה מהעלייה בתאי *Coleps* לצפיפות של 8 תאים למ"ל (איור 41).

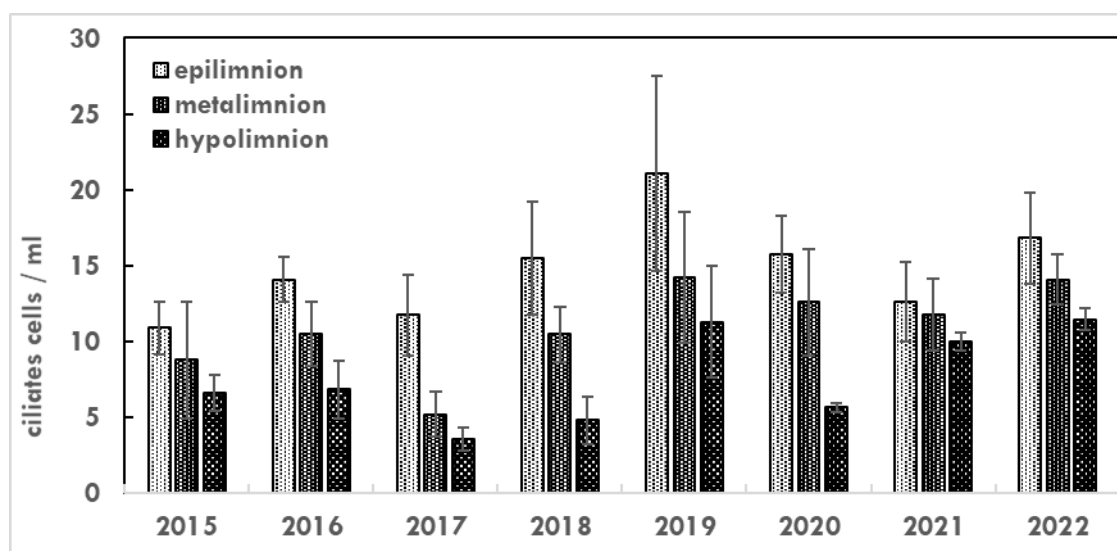
במטהלימניון, כמו באפילימניון, נמצאה צפיפות ציליאטים גבוהה יחסית בפברואר, מרץ ואפריל, עם ציליאטים מצורת *sphere* (11, 7 ו- 10 תאים למ"ל) ו- *Tintinides* (9, 15, 19 תאים למ"ל, בהתאמה). ממאי עד אוקטובר, צפיפות הציליאטים הייתה נמוכה יחסית. בנובמבר ובדצמבר, הצפיפות עלתה והתאפיינה בתאים מצורת *sphere* (10 ו- 13 תאים למ"ל), *Coleps* (14 ו- 5 תאים למ"ל, בהתאמה), מעט *Tintinides* (כ- 1.5 תאים למ"ל), ומעט *Vorticella* (כ- 0.5 תאים למ"ל). בהיפולימניון, הצפיפות הגבוהה בינואר היא תוצאה של מספר גבוה יחסית של תאי *sphere*, *Coleps* ו- *Vorticella* (21, 9 ו- 2 תאים למ"ל, בהתאמה). צפיפות התאים נשארה גבוהה יחסית גם בפברואר ומרץ עם העלייה בתאי *Tintinides* (8, 12 תאים למ"ל, בהתאמה).



איור 41: הצפיפות החודשית של הציליאטים (מספר למ"ל) לפי סוגים טקסונומיים באפילימניון במהלך שנת 2022.

ב- 2022 נצפתה עלייה קלה בצפיפות הציליאטים בכל שכבות המים לעומת 2021 (איור 42). צפיפות הציליאטים באפילימניון ב- 2022 היתה 16.8 לעומת 12.6 תאים למ"ל ב- 2021 ודומה לערכים שנמצאו ב- 2020. במטהלימניון, נספרו 14 תאים למ"ל לעומת כ- 12 תאים למ"ל ב- 2021 וב- 2020, אך הערכים היו דומים לאלו של 2019. הצפיפות בהיפולימניון הייתה גבוהה יותר (12 תאים למ"ל) לעומת 2021 (10 תאים למ"ל).

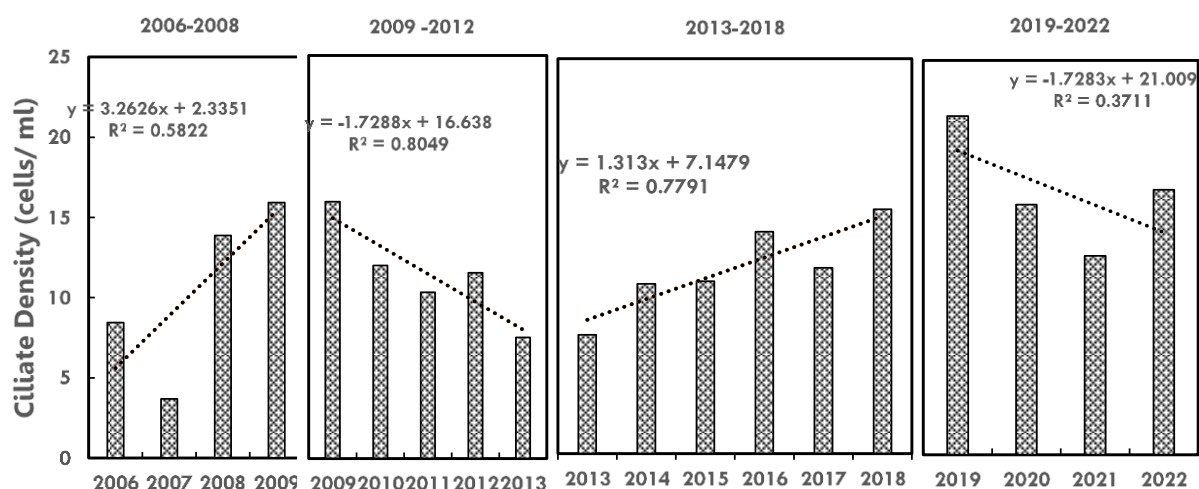
משנת 2015, לא נמצאו הבדלים משמעותיים בצפיפות הציליאטים באפילימניון, מלבד מספרים גבוהים במיוחד ב- 2019 (21 תאים למ"ל). במטהלימניון, הצפיפות הייתה 14 תאים למ"ל ונמשכת מגמת העלייה בצפיפות מאז 2015 שבה נספרו 9 תאים למ"ל (מלבד ירידה חריגה ב- 2017 - 5 תאים למ"ל). בהיפולימניון, נספרו 11.5 תאים למ"ל, בדומה לערכים שנמצאו מאז 2019, למעט הערכים הנמוכים ב- 2020 (5.6 תאים למ"ל). נמשכת מגמת העלייה בצפיפות הציליאטים מאז 2015 (6.6 תאים למ"ל), למעט שנת 2020.



איור 42: הצפיפות הממוצעת של ציליאטים (מספר למ"ל) באפילימניון (1 מטר), מטהלימניון (20 מ') והיפולימניון (35 מ') עבור התקופה 2015-2022. הקווים האנכיים מבטאים את שגיאת התקן.

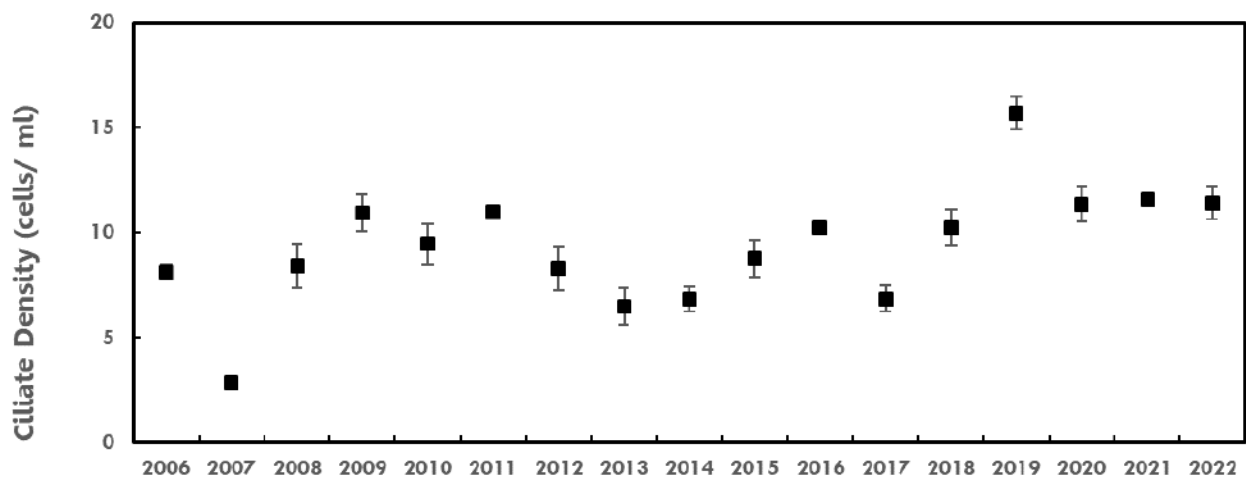
באפילימניון, בין השנים 2006-2021 אנו מוצאים מחזוריות רב-שנתית בצפיפות הציליאטים. משנת 2006 לשנת 2009 נצפתה מגמת עליה (ממוצע של 3.3 תאים למ"ל לשנה). מ- 2009 ל- 2013 אנו מוצאים ירידה

בצפיפות ובין השנים 2013-2019 שוב עליה ומ- 2019 ל- 2021 שוב ירידה, עם הפרשים שנעים בין 1.3 ל- 1.7 תאים למ"ל במגמות השונות. ה- R^2 בין השנים 2006-2009 היה נמוך עקב כך ששנת 2007 היתה חריגה בערכים הנמוכים בכל שכבות המים, ערך זה היה נמוך עבור השנים 2019 – 2022, עקב העלייה בצפיפות הציליטים בשנת 2022 (איור 43).



איור 43: השינוי בצפיפות השנתית הממוצעת באפילימניון בין השנים 2006-2009, 2009-2013, 2013-2019 ובין 2019-2022. הקווים המנוקדים הינם קווי מגמה.

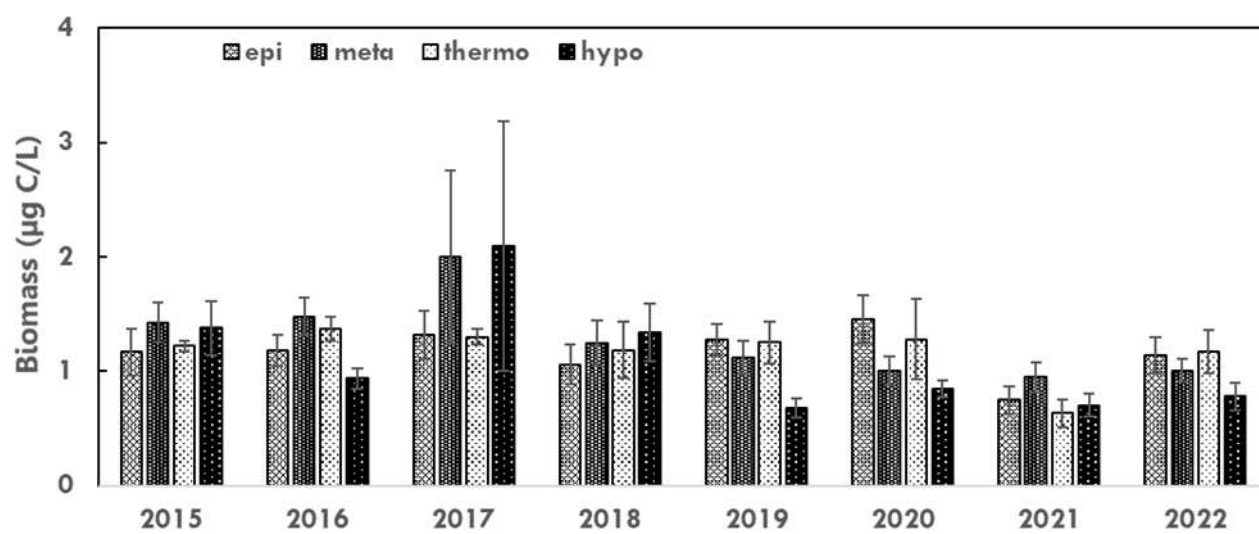
בערכי הצפיפות השנתית הממוצעת בכל עמודת המים נמצא כי בשנת 2022, הצפיפות היתה דומה לזו של 2021 ו- 2020 (איור 44). בשנה הבאה נוכל לדעת אם תהיה מגמה של עלייה או ירידה בצפיפות, או שמא הערכים התייצבו. המשך ניטור הציליטים יאפשר לנו לקבוע האם אכן קיימת מחזוריות רב-שנתית באוכלוסיית הציליטים או שמדובר בחוסר יציבות מתמשכת.



איור 44: ריכוז הציליטים השנתי הממוצע (2006-2022) על בסיס דיגום של שלושת שכבות עמודת המים: האפילימניון, המטלהימניון, וההיפולימניון. מספר הדגימות בשנה נע בין 35-45. הקווים האנכיים מבטאים את שגיאת התקן (בשנים 2007, 2011 ו- 2021 ערכי שגיאת התקן לא נראים בגרף, כיוון שהיו נמוכים (0.2 ומטה)).

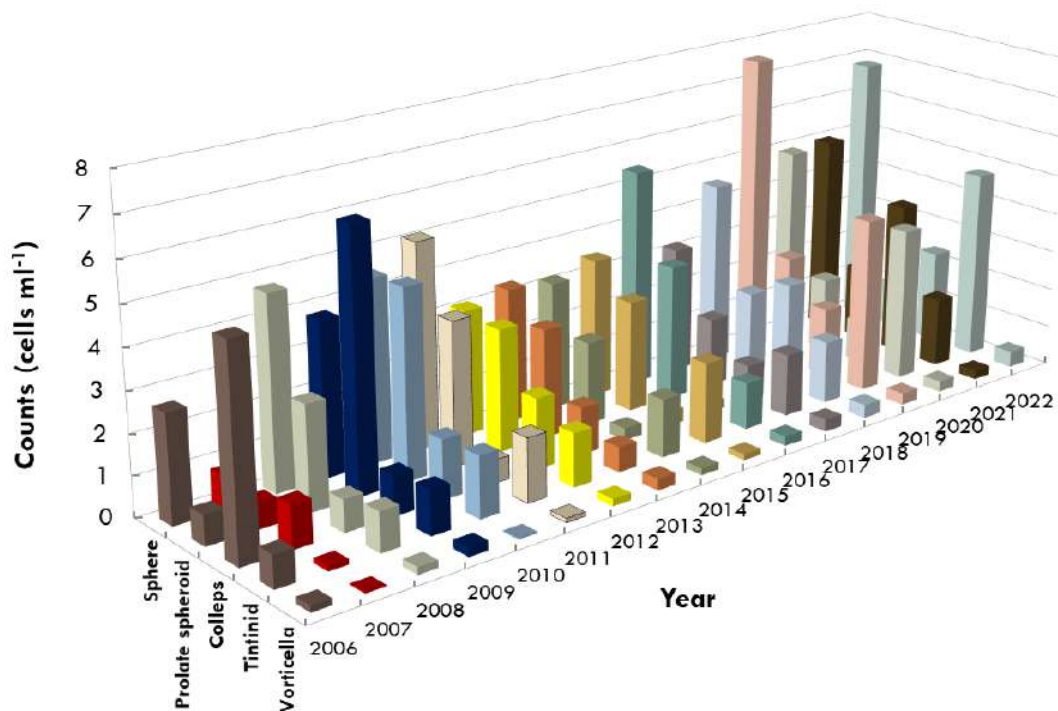
הביומסה השנתית הממוצעת של הציליטים בכל שכבות המים שנבדקו מאז 2015 מובאת באיור 45. בשנת 2022, ערכי הביומסה השנתית היו גבוהים באפילימניון ובתרמוקלינה (1.1 ו- 1.2 $\mu\text{gC/L}$, בהתאמה) לעומת - 2021 (0.7 ו- 0.6 $\mu\text{gC/L}$, בהתאמה), אך היו נמוכים מהערכים בשנת 2020 (1.4 ו- 1.3 $\mu\text{gC/L}$, בהתאמה).

במטהלימניון, ערכי הביומסה ב- 2022 (1 ± 0.1 מיקרוגרם פחמן לליטר) היו דומים לערכים שנמצאו בין 2019-2021 ($1 \pm 0.1 \mu\text{gC/L}$ בממוצע), אך מורגשת ירידה בביומסה מאז 2015, עם ירידה מ- 1.4 ל- 1 מיקרוגרם פחמן לליטר מ- 2015 ל- 2022 במטהלימניון, למעט שנת 2017 שבה נרשמה ביומסה של 2 מיקרוגרם פחמן לליטר). הביומסה הגבוהה יחסית בשנת 2017 נבעה מהערכים הגבוהים במיוחד שנמצאו בחדש מרץ (10.2 מיקרוגרם פחמן לליטר), ולכן שגיאת התקן היתה חריגה (איור 45). בהיפולימניון, ערכי הביומסה בשנת 2022 היו 0.8 ± 0.1 מיקרוגרם פחמן לליטר. לא נמצא שינוי חריג מאז 2019 כשהממוצע לשנים 2019-2021 היה 0.73 ± 0.1 מיקרוגרם פחמן לליטר. הערכים בשנים האחרונות מראים על מגמת ירידה בערכי הביומסה כשהממוצע לשנים 2015 - 2018 עמד על 0.5 ± 1.4 מיקרוגרם פחמן לליטר.



איור 45: ביומסת הציליאטים השנתית הממוצעת (2015-2022) על בסיס דיגום חודשי של שלושת שכבות עמודת המים: האפילימניון, המטהלימניון, וההיפולימניון וכן התרמוקלינה. הקווים האנכיים מבטאים את שגיאת התקן.

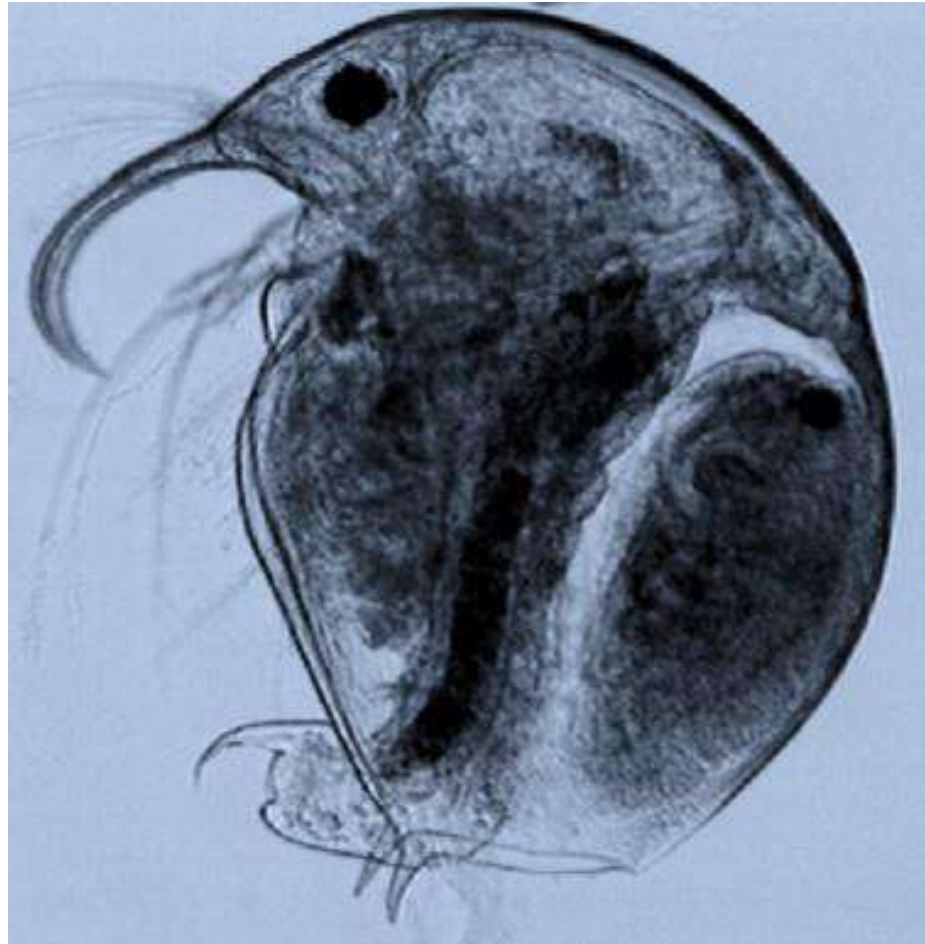
בשנת 2022 מצאנו צפיפות גבוהה יחסית בציליאטים המקוטלגים בקבוצת Sphere, צפיפות של 6.8 תאים למ"ל, לעומת 2021 - 2020 שבהן נרשמו צפיפויות של כ- 5 תאים למ"ל (איור 46). נמצאה גם עלייה משמעותית בצפיפות ה- *Tintinides* (4.8 לעומת 1.7 תאים למ"ל ב- 2021). צפיפות ה- *Coleps* היתה נמוכה יחסית לשנת 2021, עם ערכים של 2.3 לעומת 3.9 תאים למ"ל, בהתאמה. צפיפות ה- *Vorticella* עלתה מעט יחסית (0.4 לעומת 0.2 תאים למ"ל ב- 2021), אך ממשיכה להיות נמוכה באגם מתחילת שנות הניטור.



איור 46: השינויים בצפיפויות השנתיות הממוצעות של קבוצות הציליאיטים השונות בעמודת המים עבור התקופה 2006-2022.

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

2.20 ניטור זואופלנקטון



בתמונה: זואופלנקטון *Bosmina longirostris* var *cornuta* מעדשת המיקרוסקופ

במימון
רשות
המים

גדעון גל, שרון וורולקר

- נרשמה ירידה מתונה בסך 3% בצפיפות הכוללת של הזואופלנקטון במהלך 2022 ביחס לשנת 2021 ועמדה על צפיפות ממוצעת של 382.1 פרטים לליטר.
- בדומה לשנת 2021, גם בשנת 2022 נרשמו ערכי צפיפות גבוהים באופן משמעותי מהממוצע הרב-שנתי בחודשים אפריל-מאי עבור קופפודים.
- נמשכה מגמת 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

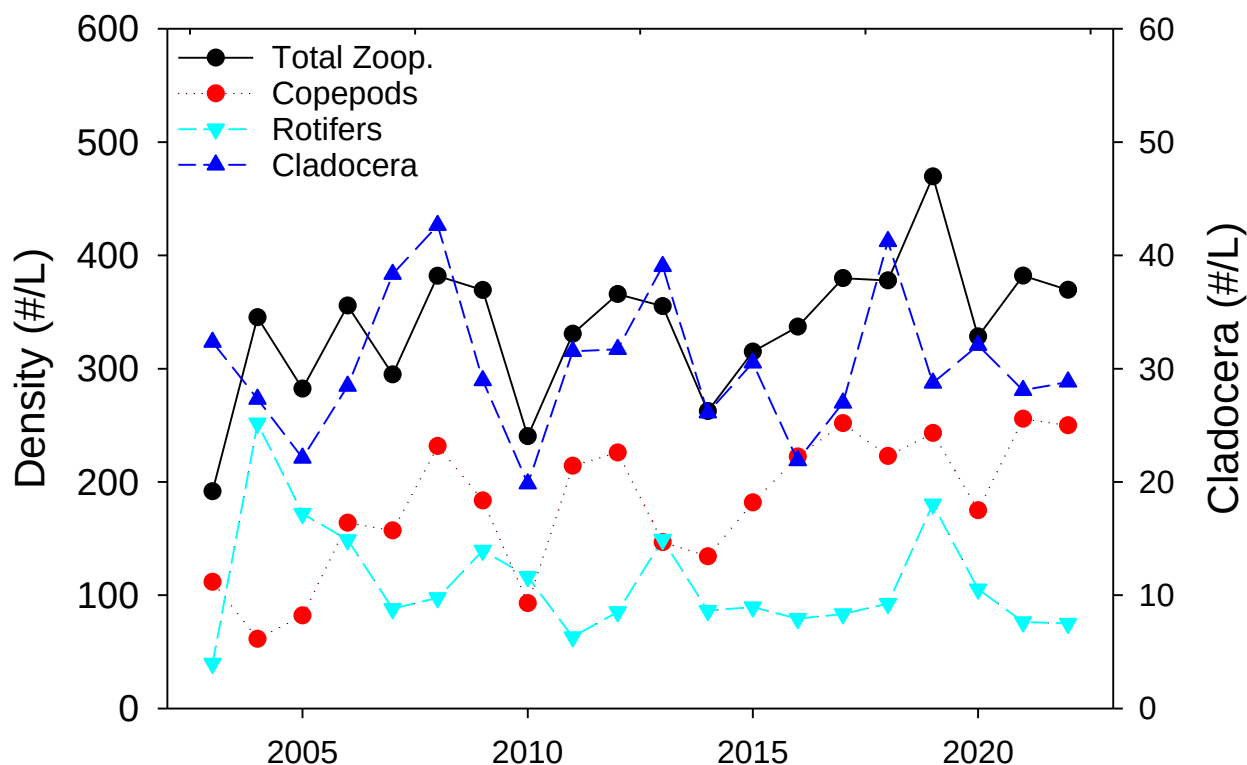
ניטור הזואופלנקטון, אשר החל עם תחילת תכנית הניטור של הכנרת בינואר 1969, עבר מספר שינויים לאורך השנים. השינוי הבולט היה השילוב של דיגום פרופילים בנוסף לדיגום המיקס שנערך מאז 1969. בניגוד לדיגום המיקס, הכולל דוגמא אחת שהיא תערובת של מים ממספר עומקים, ומאפשרת תמונה אינטגרטיבית של עמודת המים, דיגום הפרופיל 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.

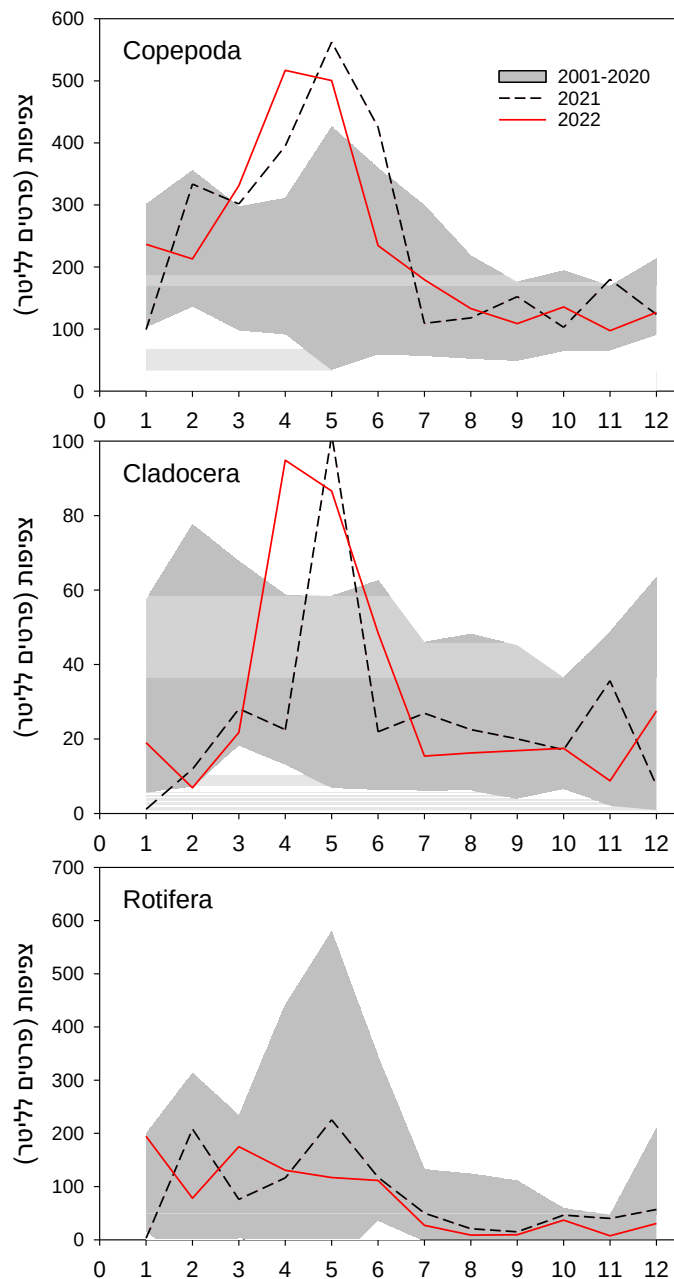
תוצאות ודיון

במעקב אחר השינויים בצפיפות הכוללת של הזואופלנקטון באגם מאז 2003, בעזרת דגימות הפרופילים (איור 47), ניתן לראות שבשנה האחרונה, השינויים בצפיפות הזואופלנקטון באגם היו קטנים בכל 3 הקבוצות הטקסונומיות. בניגוד לשנת 2021, בשנה החולפת הצפיפות הכוללת הממוצעת (סטיית תקן) של סה"כ הזואופלנקטון ירדה באופן מתון, מערך של (279.8) 382.1 פרטים לליטר בשנת 2021 לערך של (185.4) 369.7 פרטים לליטר בממוצע בשנת 2022. משתקפת ירידה של 3% בניגוד לעליה של 16% בצפיפות הכוללת בשנת 2021. השינויים הקטנים היו בכל הקבוצות הטקסונומיות ולא תועדו שינויים בולטים בכל אחת מהקבוצות. הצפיפות השנתית הממוצעת בשנה החולפת דומה בערכה לערכי הצפיפות שנרשמו בשנים 2017-2018 (377.9-379.9 פרטים לליטר).



איור 47: צפיפות שנתית ממוצעת של כלל הזואופלנקטון באגם והחלוקה עפ"י קבוצות טקסונומיות, על פי דיגום הפרופילים, בין השנים 2003-2022. ערכי הצפיפות של קבוצות הקלדוצירה מופיעים בציר האנכי הימני.

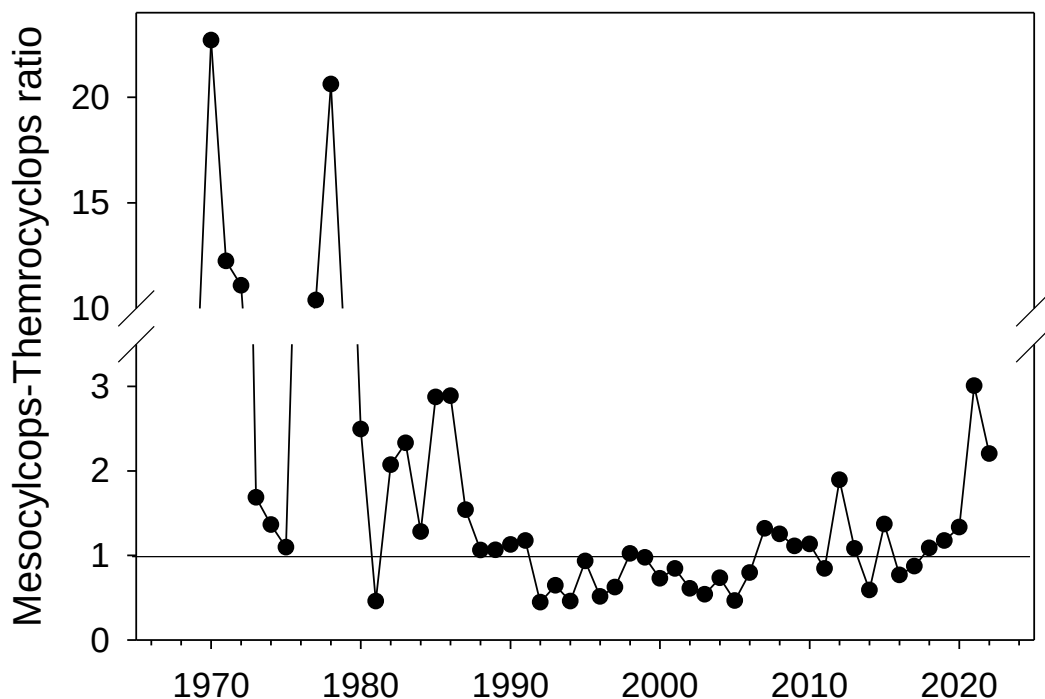
בבחינה של צפיפות הקבוצות הטקסונומיות העיקריות של הזואופלנקטון במהלך שנת 2022, ביחס לשנת 2021 ולממוצע הרב-שנתי בין השנים 2001-2020, ניתן להבחין במספר תופעות בשנה החולפת אשר היו חזרה על התופעות שזוהו בשנת 2021. התופעה החריגה ביותר שנצפתה במהלך השנים 2021 ו-2022 הייתה ערכי הצפיפות הגבוהים של הקופפודים בחודשים אפריל-מאי, אשר חרגו מהנתונים ההיסטוריים בשני העשורים שקדמו לשנת 2022 (איור 48). למרות שחודש מאי הוא החודש שלרוב נצפה בו שיא בערכי הצפיפות של הקופפודים באגם, הרי שבשנה החולפת הערך המקסימלי נרשם בחודש אפריל. ערכי הצפיפות הגבוהים של הקופפודים חפפו (מבחינת החודש) עם ערכי המקסימום של מיני הקלדוצירה. מינים אלו גם הציגו בשנתיים האחרונות ערכים גבוהים משמעותית מהממוצע הרב-שנתי. 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. לעומת ערכי המקסימום שנצפו בחודשי האביב, במהלך שאר השנה, ערכי הצפיפות של הקופפודים והקלדוצירה היו דומים לערכים הרב-שנתיים.



איור 48 : צפיפות חודשית ממוצעת של שלושת הקבוצות הטקסונומיות העיקריות של הזואופלקטון באגם: הקופפודים (איור עליון), הקלדוצירה (איור אמצעי), וההרוטיפרים (איור תחתון) בשנים 2022 (קו אדום), 2021 (קו שחור מקוקו) וביחס לממוצע הרב-שנתי וסטיות התקן (שטח אפור) בתקופה 2001-2020 על פי דיגום המיקסים.

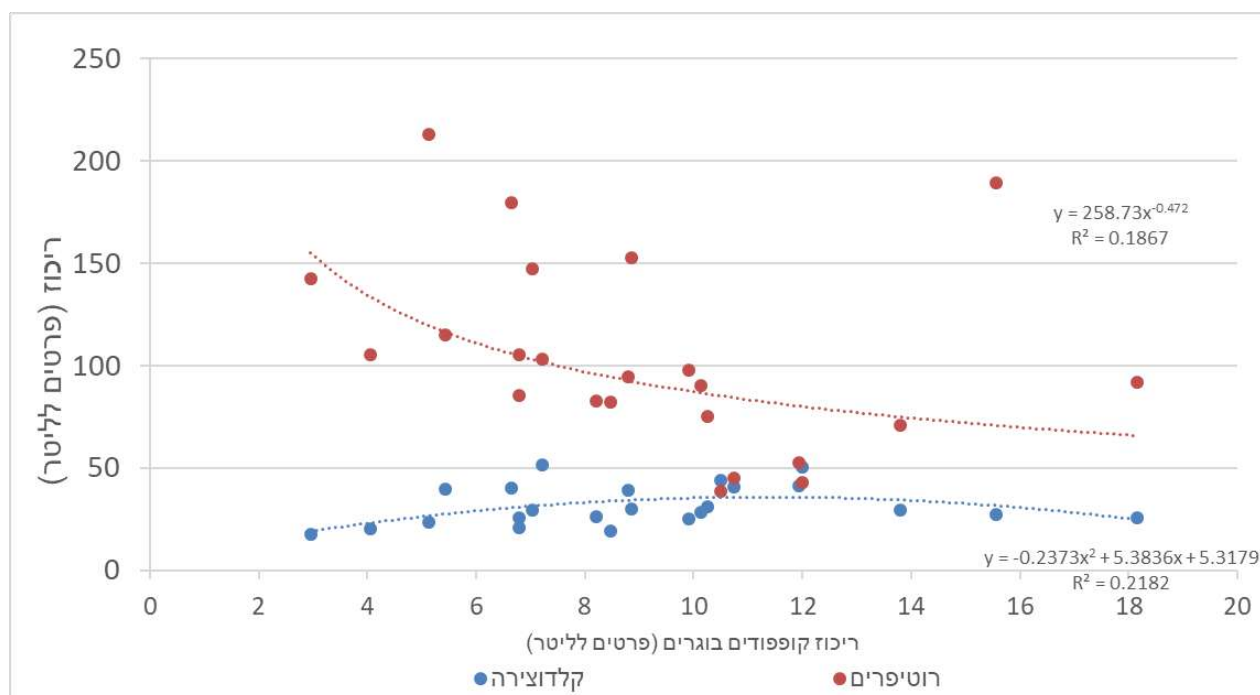
בנוסף לערכי הצפיפות הגבוהים של הקופפודים בשנתיים האחרונות אנו עדים גם למגמת שינוי נוספת באוכלוסייה הזאת. בכנרת קיימים בעיקר שני מינים של קופפודים מהסוג *Mesocyclops* והסוג *Thermocyclops*. למרות ששני מינים אלו בעלי מאפיינים דומים, הם שונים בגודלם כאשר המין *Mesocyclops ogunnus* גדול יותר ומגיע לאורך מעל 800 מיקרון לעומת המין *Thermocyclops dybowskyi* 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 49) עם ערכים גבוהים ביחס מזוציקלופס/ תרמוציקלופס בשנות השבעים והשמונים. למעשה החל משנת 1988 ערך היחס היה סביב לערך 1 או קטן מערך זה כולל גם ערך מינימום בשנת 2005 של 0.46. ערך זה חפף את התקופה מיד לאחר עליית מפלס מהירה וחריגה.

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 ובשנה החולפת ערך של 2.2. מגמות אלו מבטאות ירידה בלחץ הטריפה על המין תרמוציקלופס ותואמות גם את ממצאי הניטור האקוסטי של הדגים (פרק 2.21).



איור 49: היחס שבין ריכוזי שני מיני הקופפודים העיקריים באגם המחושב על בסיס הצפיפות השנתית הממוצעת של שני המינים. הקו הרציף האופקי מייצג יחס של 1.

לשינויים באוכלוסיית הקופפודים באגם השלכות לגבי קבוצות הזואופלנקטון האחרות, הקלדוצירה והרוטיפירים. השלכות אלו נובעות מכך שהשלבים הבוגרים של שני מיני הקופפודים הינם זואופלנקטיבורים, דהיינו טורפי מיני זואופלנקטון אחרים. הם ניזונים בעיקר מקלדוצירה וממספר מיני רוטיפירים. מיחסי גומלין אלו ניתן לצפות לשני תהליכים באגם: (1) גידול באוכלוסיית הקופפודים בעקבות צמיחה באוכלוסיית הנטרפים (קלדוצירה ו/או רוטיפירים). (2) ירידה באוכלוסיית הנטרפים בגלל עליה בגודל אוכלוסיית הקופפודים הבוגרים. עליה בצפיפות הקופפודים יכולה כאמור לנבוע מגידול במקורות המזון ו/או ירידה בלחץ הטריפה עליהם בגלל צמצום באוכלוסיית הדגים הפלנקטיבורים באגם כפי שנראה מהניטור האקוסטי של הדגים באגם (ראו פרק 2.21- אוכלוסיית הדגים- סקרים הידרואקוסטים). בחינה של היחס שבין ריכוזי הקופפודים הרוטיפירים והקלדוצירה מעלה יחס לא לינארי, כפי שניתן לצפות, עם לא מעט שונות ביחס שביניהם (איור 50). לעומת הקלדוצירה המציגה עליה בריכוז עם העליה בריכוז הקופפודים הבוגרים עד לערך מסוים ומשם ישנה דעיכה בצפיפות שלהם, הרי שבמקרה של הרוטיפירים, מגמת הירידה שלהם היא ברורה כבר בריכוזים לא גבוהים של הקופפודים הבוגרים. יתכן והבדלים אלו נובעים מההבדלים הבולטים בצפיפויות של הרוטיפירים לעומת הקלדוצירה.



איור 50: היחס שבין צפיפות הרוטיפירים והקלדוצירה (ציר אנכי) בתחנה A בין השנים 2000-2022 לבין צפיפות הקופפודים הבוגרים (ציר אופקי).

יש להמשיך לעקוב אחר השינויים באוכלוסיות הזואופלנקטון בעיקר לאור השינויים במפלס ובהיקף הצמחייה המוצפת סביב האגם. שינויים אלו ישפיעו על אוכלוסיות הדגים ועקב כך צפויים להשפיע גם על אוכלוסיית הזואופלנקטון בשנים הקרובות.

2.21 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 הינה 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, ההשרדות והדינמיקה באגם. דייג ואכלוס מיני דגים רצויים משנים את אוכלוסיות הדגים וגם רכיבים אחרים של המערכת האקולוגית, ובכך משפיעים על איכות המים. ממשק לקוי ודייג יתר עלולים לגרום נזק למערכות האקולוגיות של האגם. על כן, ממשק אוכלוסיית הדגים הינו כלי חשוב לשמירה על המערכת האקולוגית של האגם ואיכות המים.

מאז שנות ה-80 המאוחרות הוכנסה לשימוש מערכת הידרואקוסטית לניטור דגים על מנת לשפר את הידע לגבי אוכלוסיות הדגים הפלגיים, זאת במטרה לייעל את ממשק הדגה ואת אכלוס הדגים בכנרת.

שיטות

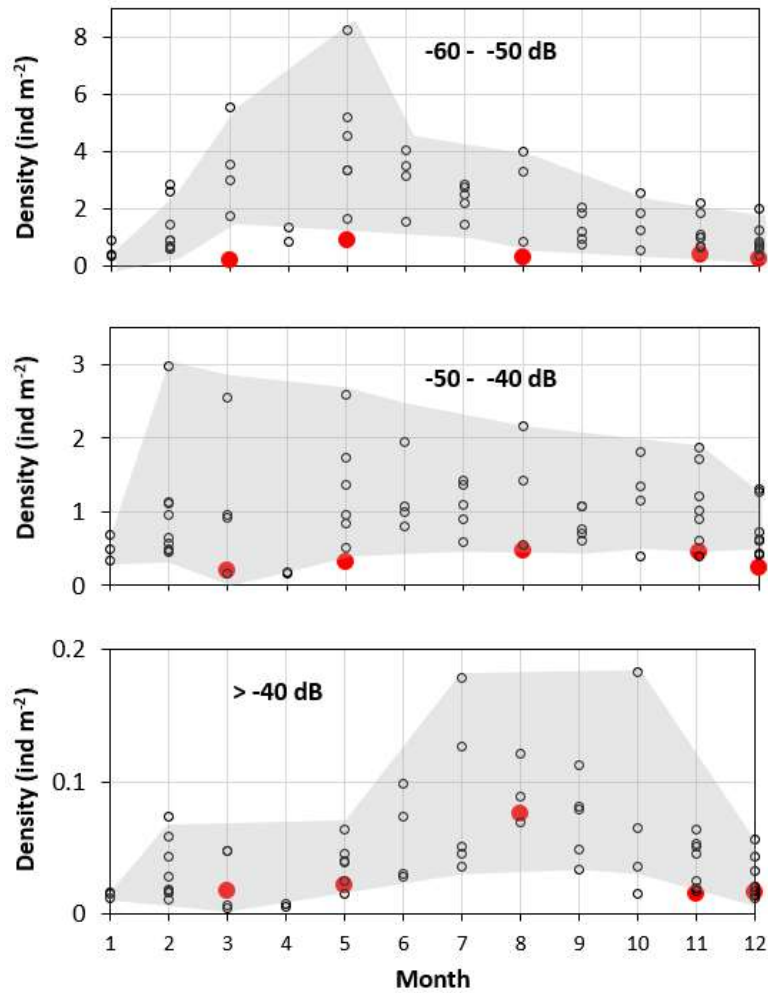
סקרים אקוסטיים, שמטרתם הערכה כמותית של מספרי הדגים וגודלם באגם, בוצעו באקוסאונדר מדעי בעל אלומה מפוצלת 120 kHz, מדגם Simrad EY60. הסקרים בוצעו לאורך 14 חתכים בשעות הלילה, בשעות שבהן הדגים מפוזרים על פני עמודת המים, לעומת שעות היום בהן הם מקובצים בלהקות. לפני כל סקר כויל האקוסאונדר בעזרת כדור סטנדרט.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

תוצאות ודיון

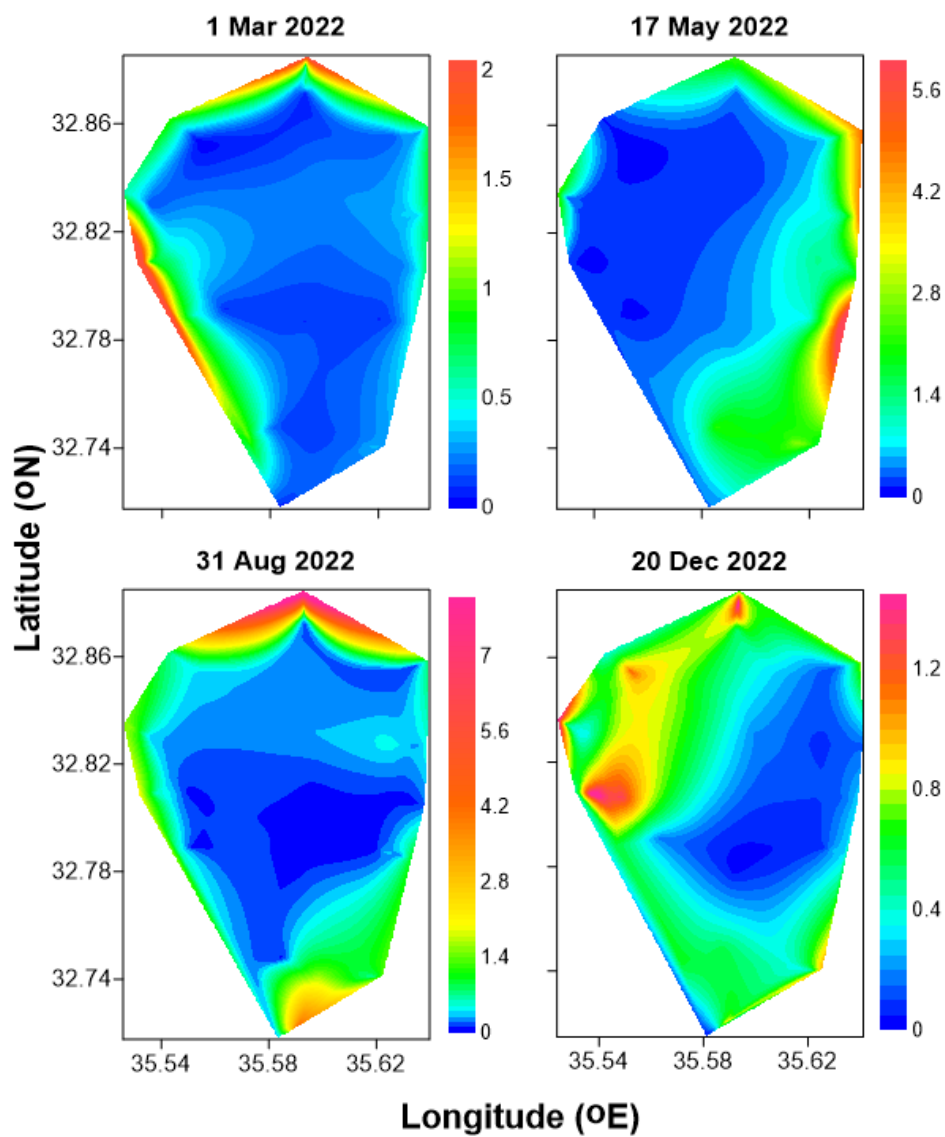
טווח המטרות האקוסטיות חולק לקבוצות: מטרות קטנות עם החזר אקוסטי קטן מ-50dB - משויכות ללרות ולדגים, מטרות בעלות החזר של 40dB - 50dB - הינן ככל הנראה של לבנון בוגרים (*Mirogrex terraesanctae*) ומינים נוספים, ומטרות <40dB משויכות לדגים גדולים, חלקם מינים בעלי ערך מסחרי. הדינמיקה העונתית של הדגים משלוש קבוצות הגודל מוצגת באיור 51. בשנת 2022 צפיפות הדגים הקטנים (50dB - 60dB) נעה בין 0.90 ל-0.22 פרטים/מ"ר בסקרים השונים. הצפיפויות של קבוצות גודלי הביניים והגדולים היו הנמוכות ביותר במרץ ובדצמבר, כאשר רוב הדגים בהן (בעיקר *M. terraesanctae*) התרכזו באזורים הרדודים למטרות רביה. ב-2022 צפיפויות הדגים מכל קבוצות הגודל בכל העונות היו בסדר גודל קרוב לתחומים הנמוכים שנצפו בשנים 2011-2021. הערכים הנמוכים מצביעים על ירידה משמעותית בכל קבוצות הגודל של הדגים (בעיקר לבנון) בשנים האחרונות בהן המפלס היה גבוה יותר באגם הכנרת. בשנת 2022 הצפיפות הממוצעת של דגים הגדולים מ-60dB הייתה 1.1 פרטים / מ"ר. לאחר העלייה המהירה של מפלס מי האגם ב-2019 עלתה הצפיפות השנתית הממוצעת במידה מועטה מ-1.4 ל-2.6 פרטים/מ"ר ב-2020. למרות זאת, לאחר מכן, צפיפות הדגים פחתה בהדרגה עד ל-0.8 פרטים/מ"ר ב-2022. שינויים אלה הינם בניגוד לתצפיות הקודמות שלנו. העלייה הגדולה במפלס המים בחורף – אביב 1992 ו-2003 גרמה לעליה גדולה בכמות הדגים בחודשים העוקבים. התופעה קשורה בהצלחת הרבייה של הלבנון בליטורל האבני. בניגוד לכך, העלייה הגדולה של מפלס המים ב-2019 וב-2020 לא גרמה לגידול משמעותי בצפיפות הדגים בשנים האחרונות. הדבר עשוי להיות קשור בשינויים הגדולים שחלו באזור הליטורל עקב השתלטות הצמחייה המוצבת במים. צפיפות הדגים הגדולה ביותר נצפתה באזורים הפריפריאליים של האגם (איור 52). באביב ובחורף צפיפויות הדגים הגדולות ביותר נמצאו בקרבת החופים הצפוניים והמערביים, שם ה-*M. terraesanctae* מרוכז בדרך כלל במהלך תקופת הרבייה. במאי הריכוזים הגדולים ביותר נצפו באזורים המזרחיים. בקיץ (אוגוסט) הדגים התרכזו בחלקו הצפוני של האגם.

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.



איור 51: דינמיקה עונתית של דגים מקבוצות גודל שונות בשנת 2022 באגם הכנרת. הנקודות האדומות המלאות מייצגות את הערכים ב-2022, הנקודות השחורות הריקות מייצגות את הערכים של 2011 – 2021. השטחים מייצגים את גבול השונות ב-2011 – 2021. הנתונים מצביעים על כך שצפיפות הדגים מקבוצות גודל שונות בשנת 2022 הייתה נמוכה למדי.



איור 52: תפוצה מרחבית של דגים באגם הכנרת ב-2022. צפיפות דגים ניתנת בפרטים למטר מרובע (ind./m²)

2.22 ניטור דיג ודגה בכנרת



במימון אגף
הדיג, משרד
החקלאות

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

- דיג בכנרת מהווה חלק חשוב משירותי המערכת האקולוגית.
- ניטור סדיר של דיג ודגה הינו הכרחי להבנת מצב בריאות המערכת האקולוגית ומהווה בסיס להחלטות ממשק דיג באגם.
- השנה חושבה סטטיסטית אוכלוסיית אמנון הגליל באגם והוערכה בכ-600 טון.

מטרת המחקר

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

- הערכת מאמץ הדיג באגם ע"י סקירה של מספר סירות הדיג הפעילות והערכת השלל הנסחר.
- חישוב מדדי הגידול של אמנון הגליל במצבה הנוכחי של הכנרת ע"י דיגום סדיר ומעקב אחר התפלגויות גדלי וגילאי הדגים באוכלוסייה.
- הערכת גודל אוכלוסיות הדגים ע"י דיגום סדיר ומעקב אחר התפלגויות גדלי וגילאי הדגים באוכלוסייה.

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 אודות מאמץ הדיג, גודל האוכלוסיות המסחריות והרכב השלל בכנרת. זוהי השנה השנייה בה תכנית ניטור הדיג והדגה בכנרת נמצאת תחת אחריות המכון לחקר ימים ואגמים לישראל והיא נועדה להמשיך תכניות ניטור קודמות של אגף הדיג אשר פעלו בעבר באופן סדיר, יחד עם תוספת של פרמטרים חדשים. מטרת העל של תכנית ניטור זו אם כך הינן ניטור שלל הדיג של המינים המסחריים והערכת גודל אוכלוסיית הדגים המסחריים באגם.

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

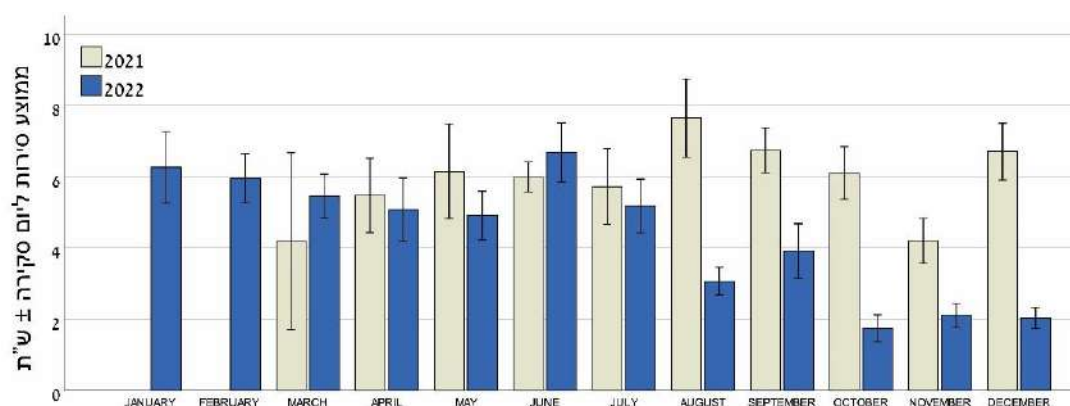
בשנת 2022 דווחו נתוני הפריקה של שלל הדיג בכנרת ע"י סוקר בתדירות של 24.9 ± 1.5 ביקורים לחודש. במהלך כל ביקור במעגנה נספרו כלי השיט הפעילים באותה יממה ותועד הרכב המינים והכמויות של כל מין בשלל הפריקה. בנוסף לפעילותו של הסוקר פעילות הדיג נוטרה באופן ישיר ע"י צוות של המעבדה לחקר הכנרת אחת לשבוע במעגן הדיג בטבריה בחודשים ינואר – אוקטובר.

בנוסף, במהלך 2022 בוצעו ארבעה דיגומים ע"ג ספינת ההקפה של קיבוץ עין גב על מנת להשיג נתוני אורך, משקל, וגיל בדגש על *אמנון הגליל Sarotherodon galilaeus*, המין המסחרי והרווחי ביותר מבין דגי הכנרת.

תוצאות ודיון

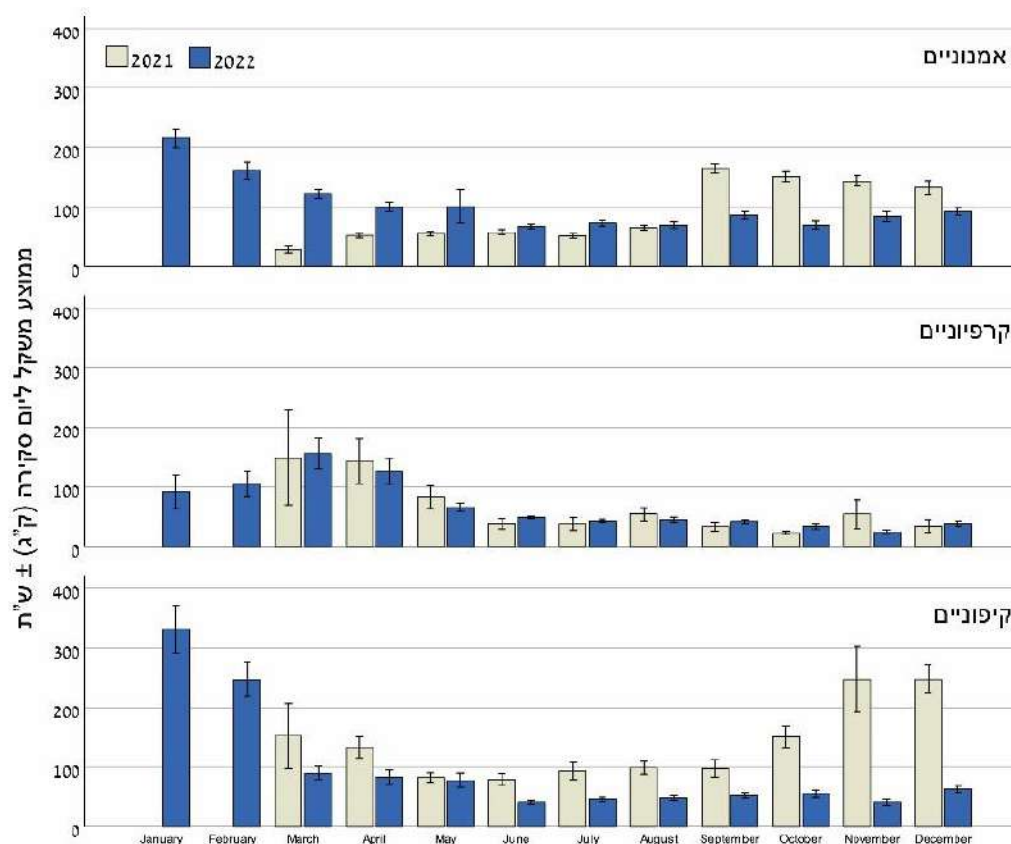
1. סקירת שלל הדיג

שלל הדיג באגם לשנת 2022 תועד ב-299 ימי סקר במעגנות. בהשוואה לנתוני הסקרים של 2021, נצפתה ירידה מובהקת של מספר הסירות הנסקרות בשנת 2022 בחמישה החודשים האחרונים של השנה (אוגוסט עד דצמבר) (איור 53). יש לציין, כי ירידה זו אינה מהווה בהכרח ירידה במאמץ הדיג בכנרת, אלא עלולה לנבוע מגורמים הקשורים לאופי הסקירה כמו למשל שינוי מקום פריקת השלל, זמן ההגעה למעגן ועוד. בהתאמה לירידה במספר הסירות הנסקרות, נצפתה גם ירידה בשלל הדיג של רשתות העמידה במינים ממשפחות האמנוניים והקיפונים, אך לא בשלל הקרפיוניים (איור 54). באמנוניים למשל, השלל הכללי של חודשים ספטמבר עד דצמבר 2021 נע בין 13.8 ל-16.2 טון אל מול 2.4 עד 6.4 טון בחודשים המקבילים בשנת 2022.

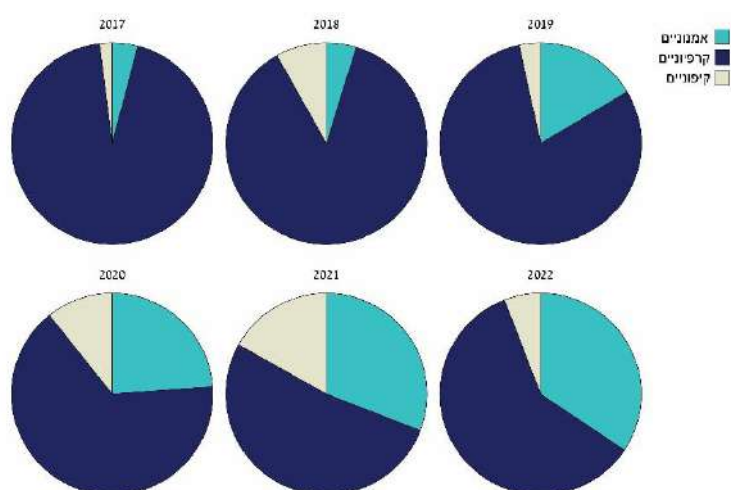


איור 53: ממוצע הסירות שנסקרו ביום לאורך שתי שנות הניטור 2021-2022

בבחינת נתוני השלל של סירת רשת ההקפה של קיבוץ עין גב לאורך כל שנות המידע הזמין נצפתה המשך הירידה של דיג הקרפיונים ובפרט *לבנון הכנרת* אשר חווה ירידה בביקוש בשוק, ומכאן שהדיג עבר להתמקד בדיג אמנונים וקיפונים (איור 55).



איור 54: ממוצע משקל ליום סקירה של שלושת משפחות הדגים לאורך שנות הניטור 2021-2022

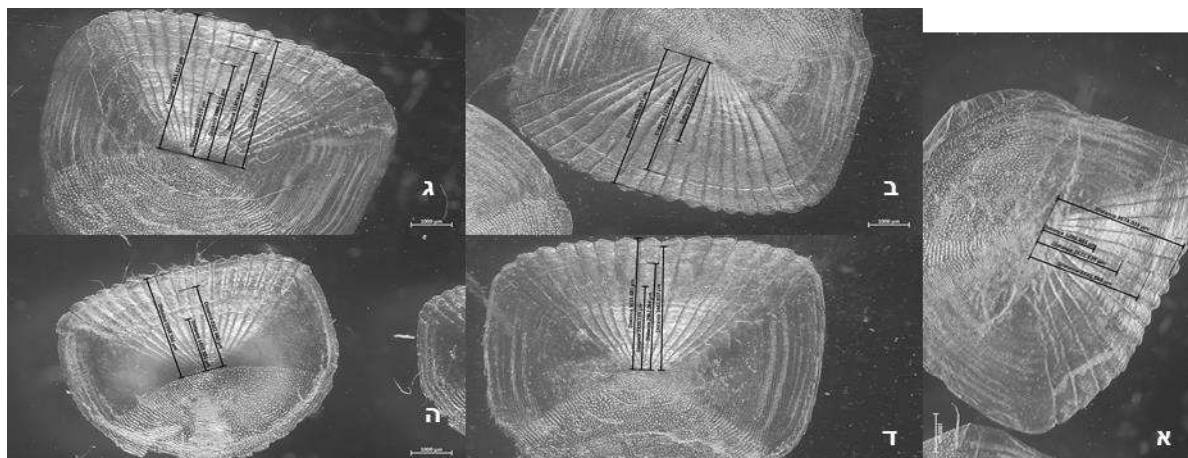


איור 55: הרכב השלל של דיג רשת ההקפה בקיבוץ עין גב לפי משפחות ושנות המעקב

2. ניטור דגה (מיקוד באמנון הגליל, חישוב מדדי גידול והערכת גודל אוכלוסייה מגויסת)

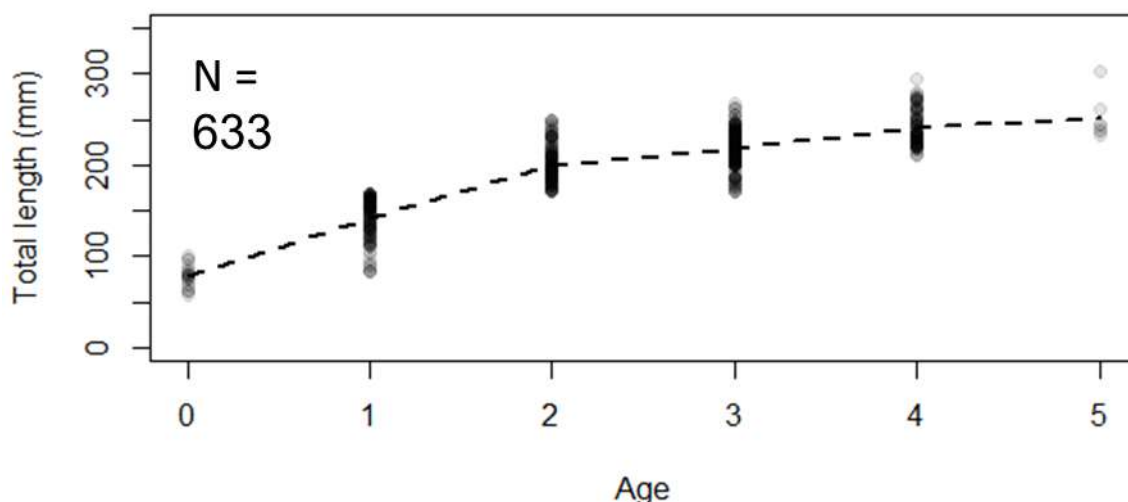
ארבעה דיגומים ע"ג ספינת דיג ההקפה של קיבוץ עין גב התבצעו במהלך 2022 בהם נמדדו 231 פרטים של *אמנון גליל*. לצורך חישוב מדדי גידול וגודל אוכלוסייה צירפנו לפרטים אלה גם דיגי *אמנון גליל* אשר נדגמו ע"ג ספינת ההקפה גם ב-2021 וכך הגענו לסה"כ של 633 פרטים.

קביעת גיל הדגים - הערכת גיל הדגים התבצעה על ידי ספירת טבעות הגידול השנתיות המצויות בקשקשים (איור 56), והתבססה על תת-דגימה של 165 פרטים מגדלים שונים. כדי לאמת את שיטת קביעת הגיל השתמשנו בפרטי אמנון גליל אשר גילם ידוע והתקבלו מתחנת המחקר של אגף הדייג בגינוסר.



איור 56: קשקשי אמנון גליל מגילאים שונים וסימון טבעות הגידול השנתיות עליהם. א-פרט בן 3 שנים, ב-פרט בן שנתיים, ג-פרט בן 4 שנים, ד-פרט בן 3 שנים, ה-פרט נוסף בן שנתיים.

בתוצאות ניתן לראות כי מרבית הפרטים אשר נדגמו בסירת ההקפה הם מגילאי שנתיים עד ארבע שנים וכי פרטים בני שנה אחת וחמש שנים קיימים בדגימה אך בשיעור נמוך בהרבה (איור 57).
חישוב מדדי הגידול - מעקב אחר גידול באורך הכללי של הדגים מול הגיל שלהם (איור 57) מאפשר חישוב של מדד הגידול K ושל האורך המקסימאלי הממוצע L_∞ ע"י שימוש בתהליך סלקציית מודלים א-ליניאריים. תוצאות המדדים שחושבו הם: $K = 0.5$ ו- $L_\infty = 265\text{mm}$.



איור 57: התפלגות גילאי הפרטים שנדגמו בסירת ההקפה לעומת אורך כללי במילימטרים. צבע העיגולים מציינ את מספר הפרטים - ככל שהעיגול כהה יותר כך ישנם יותר פרטים מאותו גיל ואורך כללי.

שיעור תמותה טבעית - לאחר שחושבו K ו- L_∞ ניתן היה לחשב את שיעור התמותה הטבעית (M). תמותה טבעית זו מכילה את כל התמותה שלא קשורה לדייג והיא מחושבת על פי נוסחה שפותחה בסקירה של 175 אוכלוסיות דגים ברחבי העולם (Pauly 1980).

הנוסחה היא כדלקמן:

$$M = -e^{-0.0152+0.654K-0.279\ln L\infty+0.463\ln T}$$

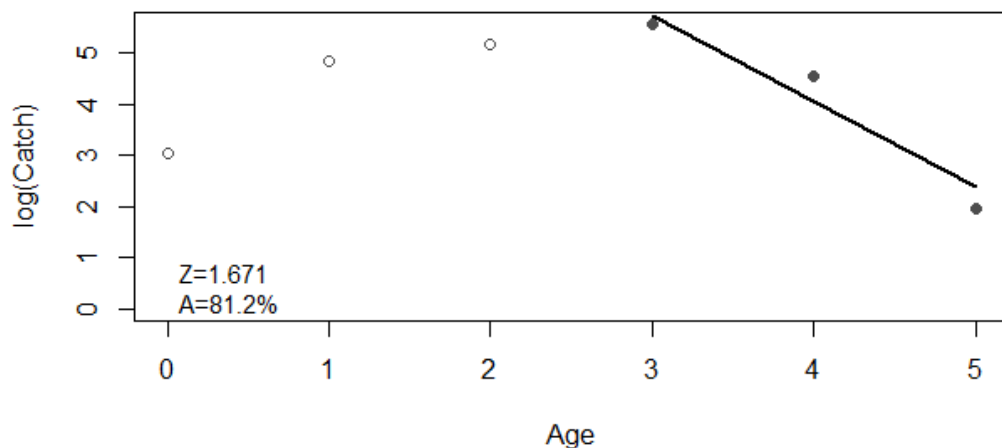
כאשר M זו תמותה טבעית, K זהו קבוע הגידול, $L\infty$ זהו האורך המקסימאלי הממוצע ו- T זוהי הטמפרטורה הממוצעת לאורך השנה. שימוש בנוסחה הנ"ל מראה כי $M = 1.07$.

שיעור תמותה כוללת – תמותה כוללת מכילה את כלל מרכיבי התמותה שמשפיעים על אוכלוסייה מסוימת.

חישבנו את התמותה הכוללת באוכלוסיית אמנון הגליל בכנרת כפונקציה של דעיכת השנתונים בדגימות רשת ההקפה (איור 58). עריכת רגרסיה משוקללת של מספר הפרטים בדגימה על גבי גיל הניבה תוצאה של תמותה כוללת $Z = 1.671$. יש לשים לב שאנו מתייחסים אך ורק לגילאי שלוש שנים ומעלה כאוכלוסייה המגויסת מפני שאלה הגילאים המגויסים כפי שניתן לראות באיור 58. שנתונים 1 ו-2 מופיעים בכמויות קטנות ומספרם במגמת עלייה ולכן הם נחשבים כלא מגויסים. לשם המרה של Z , שהוא נתון של תמותה רגעית, לתמותה שנתית A יש לבצע

$$A = 1 - e^{-Z}$$

כאשר A הוא תמותה כוללת שנתית, e הוא בסיס הלוגריתמים הטבעי ו- Z הוא תמותה כוללת רגעית. מכאן עולה כי התמותה הכוללת השנתית היא 81.2% (כלומר זהו אחוז הפרטים שמתים מכל שנתון במהלך שנה אחת).



איור 58: התפלגות מספר הפרטים של אמנון הגליל (בטרנספורמציה לוגריתמית) שנדגמו ברשת הקפה בשנים 2021 ו-2022 על גיל בשנים. הקו השחור והכדורים השחורים מציינים את האוכלוסייה המגויסת. Z מציין את התמותה הכוללת ו- A מציין את אחוז הפרטים מתוך שנתון מסוים אשר מתים במהלך שנה אחת.

שיעור תמותת דייג – תמותת דייג היא תמותה הנגרמת רק מפעילות דייג. ניתן לחשבה על פי הנוסחה:

$$Z = F + M$$

כאשר M זוהי התמותה הטבעית, Z זוהי התמותה הכוללת ו- F זוהי התמותה כתוצאה מדייג. מכאן שתמותה כתוצאה מדייג $F = 0.603$.

הערכת גודל האוכלוסייה המגויסת – את גודלה של האוכלוסייה המגויסת ניתן לחשב על פי הנוסחה הבאה

$$P = C \frac{F}{Z} (1 - e^{-Z})$$

כאשר P מייצג את גודל האוכלוסייה ביחידות המתאימות לשלל הדייג (טונות), C מייצג את שלל הדייג במהלך השנה, F מייצג את התמותה כתוצאה מדייג ו- Z מייצג את התמותה הכללית. על פי משוואה זו גודל האוכלוסייה המגויסת של אמנון הגליל בכנרת ב-2022 הינה כ-600 טון. השוואת מדדי הגידול וגודל

האוכלוסייה של *אמנון הגליל* בכנרת כפי שחושבו השנה לאותם הערכים שחושבו בעבר מראה כי גודל האוכלוסייה נותר יציב אך הדגים גדלים לאט יותר ומגיעים לאורך סופי ממוצע קטן יותר (טבלה 7).

טבלה 7: מדדי הגידול וגודל האוכלוסייה של *אמנון הגליל*

מקור	L_{∞} (cm)	K	גודל אוכלוסייה (טון)
Ben Tuvia 1960	31	0.465	
El Bloloch 1961	30.5	0.53	
Landau 1979	28.9	0.67	כ-700
KLL 2022	26.5	0.5	כ-600

דיון

ההבדלים המשמעותיים במספר הסירות הנסקרות וכנראה כתוצאה מכך גם הירידה בשלל האמנונים והקיפונים מעידים על צורך ממשי בשיטת ניטור ומעקב מסודרת אשר לא מסתמכת על סוקרים חיצוניים. במהלך פגישת וועדת אכלוס של הכנרת בתאריך ה-02.02.23 הועלה שוב הצורך לייסוד בית אריזה וחדרי קירור, אשר יהוו במקביל מעין פלטפורמה דרכה יהיה ניתן לנטר ביעילות את השלל ומאמץ הדיג באגם. הירידה בקצב הגידול ובאורך הסופי הממוצע של *אמנון הגליל* בכנרת יכולים לנבוע ממגוון רחב של גורמים החל משינוי בהרכב האצות שבאגם מהם הוא ניזון ועד שינוי בטמפרטורה הממוצעת וכדי לענות על שאלות אלה נדרשת עבודה מחקרית ממוקדת ונרחבת. דבר נוסף המקשה על הסקת מסקנות חד משמעיות הוא פיזור רחב מדי של נתונים אלה לאורך הזמן (החישוב האחרון בוצע בסוף שנות השבעים). הבעיה האחרונה ממחישה את חשיבותו של בסיס נתונים עקבי וארוך טווח אשר יכול לסייע בשאלות כגון אלה. המשך איסוף נתונים לגבי מדדי הגידול וגודל האוכלוסייה של *אמנון הגליל* בכנרת יכול להמשיך ולהתבצע באותה שיטה לאורך השנים כאשר הנתונים ייאספו כל העת ויעודכנו בצורה של ממוצע מתגלגל לאורך תקופות של חמש שנים. נתון נוסף שעשוי להיות בעל חשיבות לניהול ממשק הדיג בכנרת הוא חישוב פוטנציאל הרבייה של אוכלוסיית *אמנון הגליל* בכנרת. בכדי להגיע לנתון זה יש לבדוק את הפוריות (Fecundity) של נקבות *אמנון הגליל*. עבודה זו יכולה להתבצע כחלק מניטור סדיר של ספירת הביצים בשחלות של נקבות מגדלים שונים לאורך השנה. בתחילת 2023 כבר נלקחו מספר שחלות לשימור בהקפאה בדיוק למטרה זו ואנו מתכוונים לנסות ולחשב פוטנציאל רבייה כבר בשנת הניטור הקרובה.

המלצות

- שיפור איסוף נתוני השלל ע"י הוספת סוקרים.
- המשך בניית מסד נתונים ארוך טווח של מדדי גידול וגודל אוכלוסייה של *אמנון הגליל*.
- חישוב פוטנציאל הרבייה של אוכלוסיית *אמנון הגליל* בכנרת.

2.23 חלזונות וצדפות בליטורל



בתמונה: חלזונות בכנרת. צילום: תמר זהרי

במימון
רשות
המים

תמר זהרי, בני סולימני, דוד קמינגס, ניר קורן

- אוכלוסיות הליטורל הטבעיות של הכנרת מותאמות לשינויי מפלס בטווח הטבעי של כ-1.5 מ'. אוכלוסיות אלו לא מותאמות לשינויי מפלס בטווח של 6 מ' כאשר במפלסים הנמוכים נעלמים מרצועת הליטורל התשתית האבנית, הכיסוי הצמחי ולגונות הבטיחה.
- שינויי המפלס הגדולים הובילו להתמעטות קיצונית של החלזונות הטבעיים לכנרת והופעת והשתלטות מין פולש. מאז 2011 ועד היום החילזון הפולש, *Thiara scabra*, מהווה מעל 95% מסך החלזונות באגם, בריכוזים של אלפי עד עשרות אלפי פרטים למ"ר.
- המינים הטבעיים לכנרת נמצאים בריכוזים נמוכים ב-2-3 סדרי גודל מהריכוזים של החלזון הפולש.
- גם צדפות הכנרת (3 מינים) סובלות משינויי המפלס הקיצוניים ונמצאות בסכנת הכחדה. מהסוג *Potomida* מצאנו בכל הדגימות השנה רק 8 פרטים.

מטרת המחקר

מעקב אחר אוכלוסיות החלזונות והצדפות בכנרת.

רקע

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

שיטות

ניטור הרכיכות (= מולוסקה, חלזונות וצדפות) מתבצע פעמיים בשנה, בתקופת מפלס המינימום (נוב'-דצמ') ושוב בתקופת מפלס המקסימום (אפריל-מאי), בחמישה אתרים (חוקוק, גינוסר, חמי טבריה, גופרה, שיטים). 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 הוספנו דיגום בנקודה רביעית ועמוקה יותר, בה הקרקעית ב-12 מ', בשנים 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 גדל.

תוצאות ודיון

חלזונות:

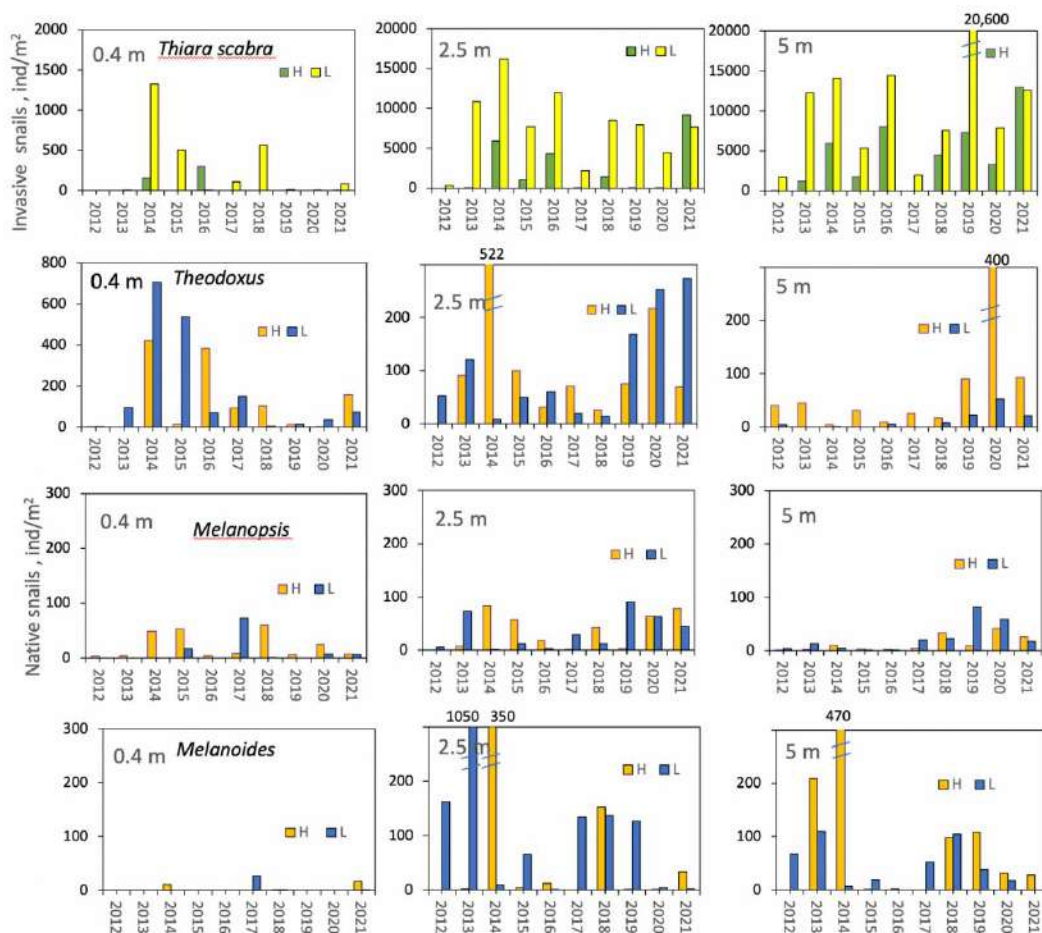
חורף 2021/22 היה חורף עם כמות משקעים קרובה לממוצע, שהחל במפלס קרוב למירבי. במהלך השנה שינויי המפלס היו קטנים יחסית והשנה הסתיימה בכנרת גבוהה. בדיווח זה נשווה את השינויים לאורך זמן (בין השנים 2012-2022) בריכחי החלזונות והצדפות (מינים עיקריים) באביב, בעת מפלס המקסימום השנתי, לסתיו, במפלס המינימום השנתי, עבור כל אחד משלושת עומקי הדיגום (איורים 59,60). באופן עקבי, ריכחי הטיארה בעומקים 2.5 ו-5 מ' גבוהים ב-2-3 סדרי גודל מאשר הריכחים של המינים הטבעיים (איור 59). בסתיו (מפלס מינימום שנתי) כל שנה ריכחי הטיארה בסביבות 10,000 פרטים למ"ר. בעומק 0.4 מ' ריכחי הטיארה נמוכים יותר מאשר במים העמוקים יותר (לרוב מעל 1000 פרטים למ"ר), וריכחי הטיאודוקסוס (סהרונית) דומים לריכחי הטיארה (איור 59).

לרוב ריכזי הטיארה היו גבוהים יותר במפלס נמוך מאשר במפלס גבוה, תופעה שחזרה על עצמה בשלושת עומקי הדיגום. אולם, בשנים 2021 ו-2022, כשמפלסי הכנרת היו גבוהים - ריכזי 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. לגבי המינים הטבעיים בכנרת, אי אפשר להצביע על הבדל בריכזים בין הסתיו לאביב שחזר על עצמו. המגדלית (*Melanoïdes*) כמעט ונעלמה לחלוטין מאזור המים הרדודים. בדיגומים הלא-שגרתיים בדצמבר 2022 בנקודות דיגום עמוקות יותר, 12 מ', מצאנו ריכזים של טיארה, הדומים לאלו שבנקודות הדיגום של 2.5 ו-5 מ': אלפי פרטים למ², ובתחנת גינוסר בעומק 12 מ' מצאנו גם ריכז גבוה מהרגיל של פרטים של מגדלית: 600 למ"ר, שזה הריכז הגבוה ביותר של מין זה שנרשם מתחילת הדיגום ב-2012. מעניין גם שכ-90% מהפרטים היו קטנים, כלומר לאחר רבייה. גם סהרונות נמצאה ב-12 מ' בריכזים גבוהים יחסית. ב-2022 לא מצאנו אפילו פרט אחד של המינים הטבעיים הזעירים, ביטיניה זעירה, וקרינית הירדן. מאידך גם לא מצאנו אפילו פרט אחד מהמין הפולש פירגופורוס אשר נצפה לראשונה ב-2018, ורק שני פרטים של המין הפולש הנוסף, טרביה.

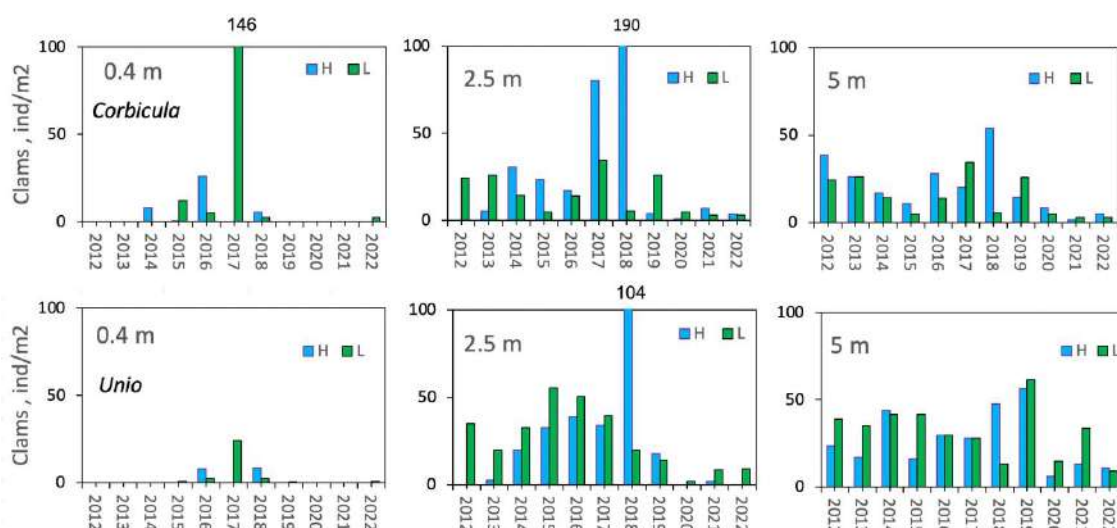
ידוע מעמק המעיינות שהטיארה מביאה עמה טפילים שגורמים למחלות בדגים, ובפרט את הטפיל *Centrocestus* (טרמטודה) שפוגע באמנונים. הטפיל גורם לנזקים כבדים לגידול הדגים המסחרי בעמק המעיינות (חנוך גלסנר, רמה פאלק, מידע אישי). נושא זה לא נחקר בכנרת ומצריך בדיקה. השערה נוספת שמצריכה בדיקה: בריכזים העצומים של החלזונות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

צדפות:

בכנרת שלושה מיני צדפות הטבעיות לאזור: *Unio terminalis*, *Corbicula fluminalis*, *Potomida littoralis*. או בעברית: אוניו = צדפת נחלים כנרתית, קורביקולה = סלסילה חומה, פוטומידה = צדפת אגמים כנרתית. מתוכן השתיים הראשונות היו נפוצות מאד בעבר. מאז 2012 ממוצע ריכזי הצדפות נמוך, לרוב בין אפס עד עשרות בודדות של פרטים למ"ר (איור 60). לא ניכרים הבדלים עקביים בין הריכזים במפלס גבוה לנמוך. 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 וב-2022 נמצאו 8 פרטים, 5 בגינוסר (0.4 מ') ו-3 בגופרה ב-12 מ'. האוניו והפוטומידה הם מינים בסכנת הכחדה עולמית, ושינויי המפלס בכנרת בטווח גדול בהרבה מהטבעי תורמים להכחדתם.

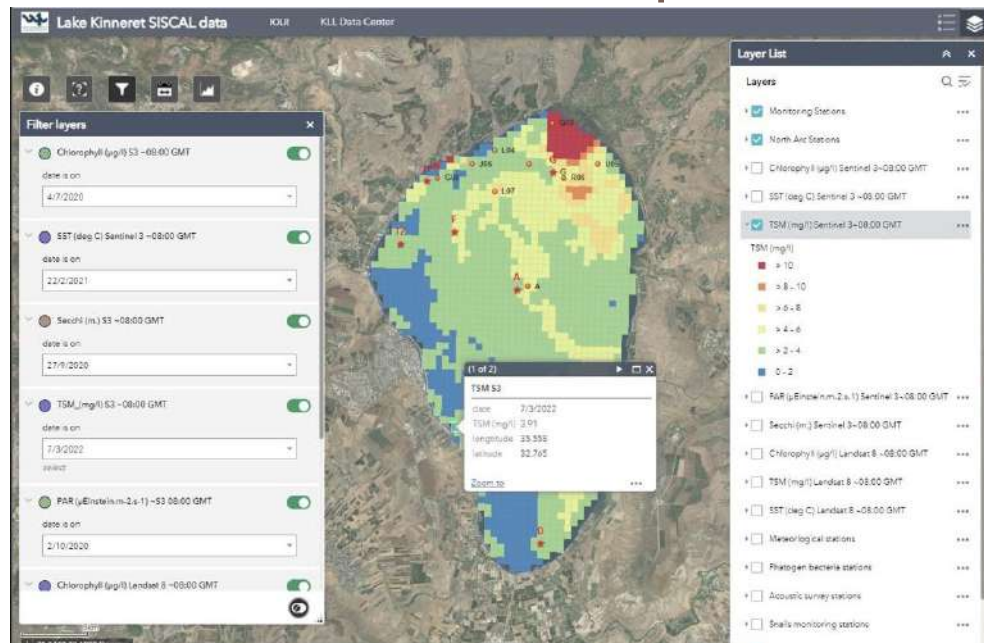


איור 59: סדרת זמן של ריכחי החלזונות בקרקעית (ממוצעים של 5 אתרים) בשלושת עומקי הדיגום, 0.4, 2.5 ו- 5 מ', עבור 4 מיני החלזונות הגדולים, במפלס השנתי המרבי באביב (H) ובמפלס השנתי המזערי בסתיו (L) כל שנה. למעלה, בצבעי צהוב וירוק ובסקלת ציר Y של 0-20,000 - המין הפולש, טיארה סקברה. בהמשך, בצבעי כחול וכתום ובסקלת ציר Y של 0-300 - שלושת המינים הטבעיים לכנרת למעט סקלת 0-800 עבור תיאודוקסוס, 0.4 מ'.



איור 60: סדרת זמן של ריכחי צדפות בקרקעית הכנרת (ממוצעים של 5 אתרים) בשלושת עומקי הדיגום, 0.4, 2.5 ו- 5 מ', עבור 2 מיני צדפות (קורביקולה - למעלה, אוניו - למטה), במפלס השנתי המרבי באביב (H, עמודות כחולות) ובמפלס השנתי המזערי בסתיו (L, עמודות ירוקות) כל שנה.

2.24 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 (31.4°) וחודש ינואר היה הקר ביותר (16.9°).
- השוואה של ה-SST לממוצע הרב שנתי (2019-2021) מראה שלמעט חודשים יוני, אוגוסט ודצמבר טמפרטורת פני השטח הממוצעת הייתה ב-2022 קרה יותר.
- הממוצע החודשי של ריכוזי הכלורופיל (Chl-a) בכל האגם מראה שהריכוז הממוצע הגבוה ביותר (5.6mg/L) היה בחודש נובמבר והנמוך ביותר (3.7mg/L) בחודש יולי.
- השוואה של Chl-a לממוצע הרב שנתי (2020-2021) מצביעה על כך שלמעט חודש מרץ, ריכוזי הכלורופיל החודשי של כל האגם ב-2022 היו גבוהים מהממוצע הרב שנתי.
- הממוצע החודשי של עומק הסקי (Secchi) בכל האגם השתנה מ-1 מטר בחודש פברואר ועד 2.5 מטר בחודש יולי.
- הממוצע החודשי של ריכוזי חומר מרחף (TSM) בכל האגם מראה שהריכוז הממוצע הגבוה ביותר (4.9mg/L) היה בחודש מאי והנמוך ביותר (3mg/L) בחודש מרץ.
- למעט חודשים אפריל-מאי, ריכוזי החומר המרחף הממוצע ב-2022 היה נמוך מהממוצע הרב שנתי (2020-2021).

מטרת המחקר

1. בניית בסיס מידע סינופטי רב-שנתי של כל האגם; 2. אספקה שוטפת של אומדני טמפרטורת פני המים, ריכוזי חומר מרחף, עומק סקי, קרינה זמינה לפוטוסינתזה וריכוזי כלורופיל מהאגם כולו כנתוני בסיס לניתוח אירועים חריגים (פריחות, זיהומים, ירידת המפלס) וכנתונים לכיול המודלים הלימנולוגיים של הכנרת; 3. הפצת המידע הנאסף לרשויות ולציבור באמצעות אתר האינטרנט של מרכז מידע כנרת ואתר רשות המים.

רקע

השימוש בלוויינים למיפוי איכות המים בכנרת נעשה באמצעות מערכת SISCAL (Satellite Information System on Coastal Area and Lakes) שפותחה במסגרת מחקר של התוכנית האירופאית החמישית (2002-2005) וכיום מוטמעת ע"י חברת Informus והמכון לחקר ימים ואגמים. הניטור כיום מתבסס על צילומי לוויין יומיים של Sentinel-3 עם רזולוציה של 300X300 מטר ו-VIIRS עם רזולוציה מרחבית של 750X750 מטר ועל לוויין ה-Landsat 8 ו-Landsat 9 עם רזולוציה של 30x30 מטר ו-15 מטר בערוץ הפאנכרומטי (530-676 nm) שחולף מעל הכנרת פעם ב-16 יום. הנתונים הנאספים קרוב לפני המים ע"י המעבדה לחקר הכנרת בתחנות הניטור הקבועות והנתונים הנאספים בצורה רציפה ע"י ה-profiler בתחנה A, תחנה D ובתחנה G משמשים להמשך כיול ובדיקה של האלגוריתמים השונים.

שיטות

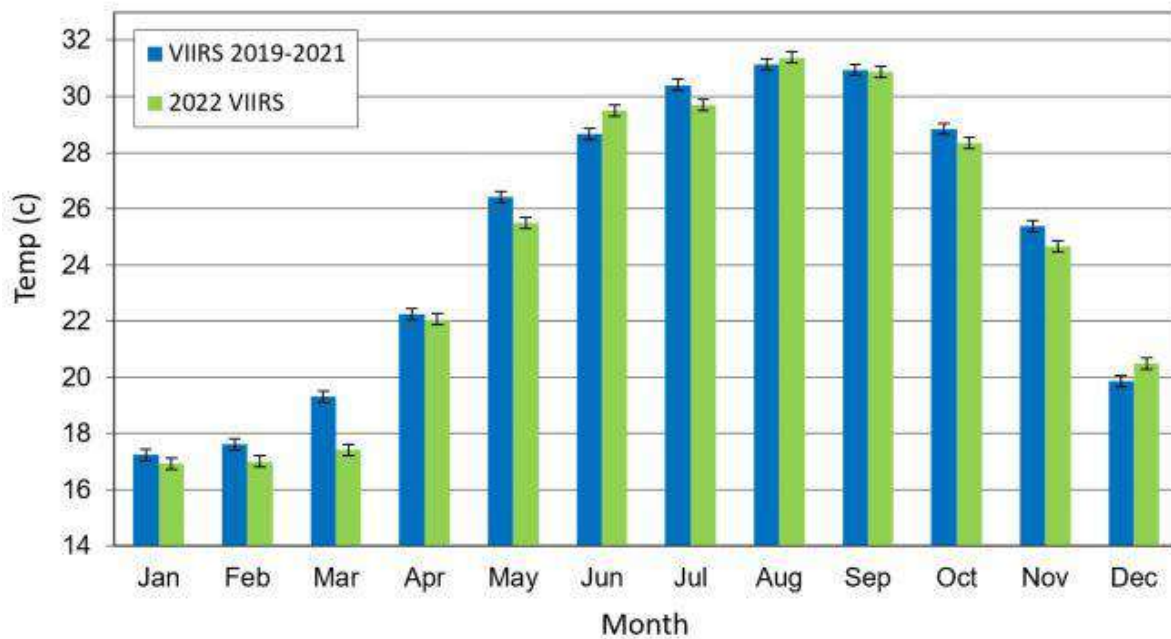
- הורדת צילומי הלוויין קרוב ל"זמן אמת", הפעלת אלגוריתמים מתאמים ויצירת מפות של טמפרטורת פני המים (SST), ריכוזי כלורופיל (Chl a), ריכוזי חומר מרחף (TSM), עומק סקי (Secchi depth) ושטף האנרגיה מהשמש באורכי גל 400-700 ננומטר הפנוי לפוטוסינתזה (PAR).
- בדיקה וכיול אלגוריתמים קיימים מול נתוני אמת שנדגמים קרוב לפני השטח (עד חצי עומק סקי) בתחנות הניטור ע"י המעבדה לחקר הכנרת בשעה GMT 8:00~. השנה נעשה שימוש רחב בנתוני תחנה G ו-D המשדרות קרוב לזמן אמת.
- אנליזה יומית על בסיס נתוני Sentinel-3 וסינופטי של האגם המתבססת גם על נתוני לוויין ה-VIIRS.
- הפצת המידע הנאסף לרשויות ולציבור באמצעות אפליקציית WEB-GIS באתר האינטרנט של מרכז מידע כנרת ואתר רשות המים (ראה תמונה בכותרת הפרק מתאריך 7.03.22).

תוצאות ודיון

אנליזות סינופטיות:

1. הממוצע החודשי של טמפרטורת פני המים (SST) בשנת 2022 חושב על בסיס 272 צילומי לוויין VIIRS ומוצג באיור 61 יחסית לנתוני ממוצע חודשי שחושב בשנים 2019-2021 מלוויין ה-VIIRS ברזולוציה של 750X750 מטר. באיור ניתן לראות שחודש אוגוסט היה החם ביותר גם יחסית לממוצע השנתי עם טמפרטורה ממוצעת של 31.4°C וחודש ינואר היה הקר ביותר עם טמפרטורה ממוצעת של 16.9°C . השוואה לממוצע הרב שנתי מראה שלמעט חודשים יוני, אוגוסט ודצמבר טמפרטורת פני השטח הממוצעת הייתה ב-2022 קרה יותר.

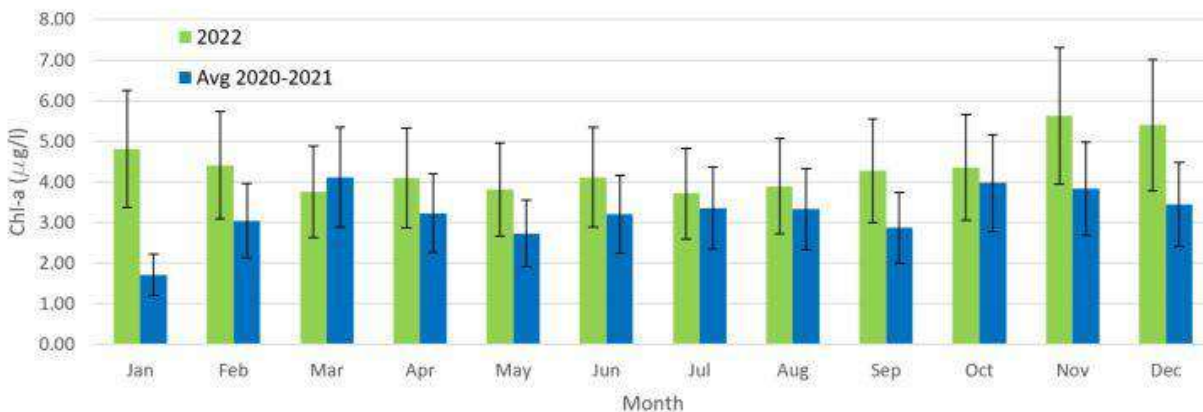
Monthly average SST derived from VIIRS satellite images (2019-2022)



איור 61: התפלגות הממוצע החודשי של טמפרטורת פני השטח (SST) בכול האגם שחושבה מנתוני לוויין VIIRS בהשוואה לנתונים שחושבו בשנים 2019-2021.

2. הממוצע החודשי של ריכחי הכלורופיל (Chl-a) בשנת 2022 חושב מ-256 צילומי לוויין Sentinel-3 ברזולוציה של 300X300 מטר ומוצג באיור 62 יחסית לנתוני ממוצע חודשי מאותו לוויין בשנים 2020-2021. חשוב לציין שתוצאות המיפוי מייצגים את מצב האגם בשעה GMT 08:00 ~ שבה בדרך כלל ריכחי הכלורופיל נמצאים במינימום. נתוני הלוויין מראים שהריכוז האגמי הממוצע הגבוה ביותר (5.6 mg/L) היה בחודש נובמבר והנמוך ביותר (3.7 mg/L) היה בחודש יולי. השוואה לממוצע הרב שנתי מצביעה על כך שלמעט חודש מרץ ריכחי הכלורופיל של כלל האגם ב-2022 היו גבוהים מהממוצע הרב שנתי. חשוב לציין שתהליך בדיקה וכיול האלגוריתם מול נתוני ה-in situ בעיקר של תחנות D, A ו-G נמשך.

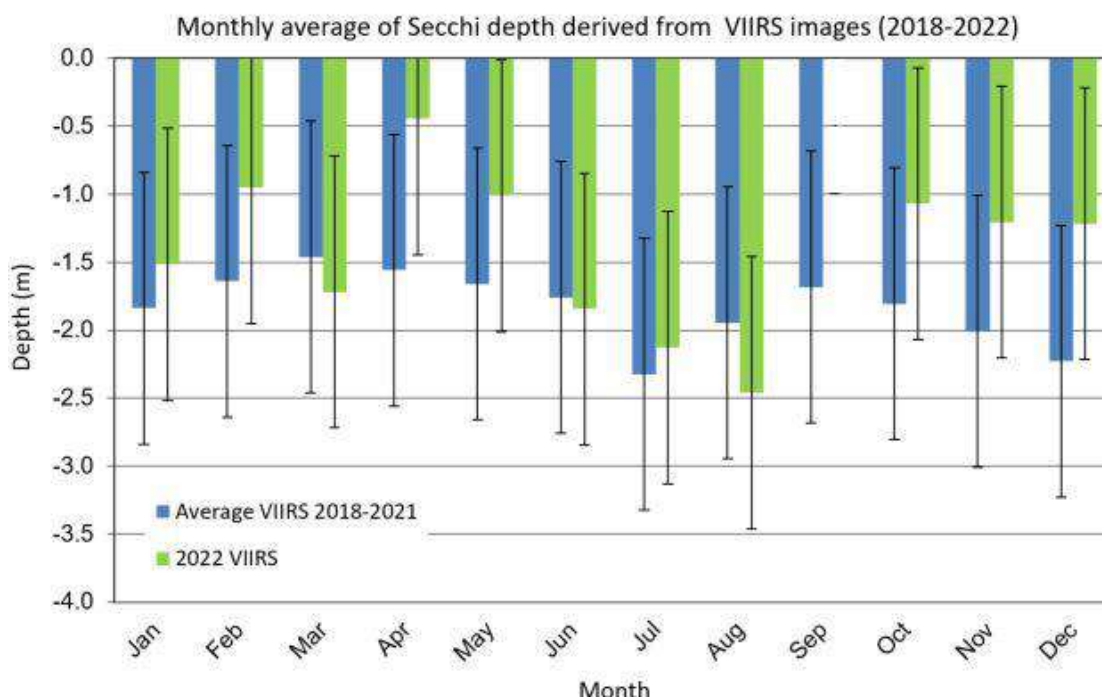
Monthly average Chl-a derived from Sentinel-3 images (2020-2022)



איור 62: ממוצע חודשי לשנת 2022 של ריכחי כלורופיל (Chl-a) האגמי בשעה GMT 8:00 ~ יחסית לממוצע של השנים 2020-2021 המתבססים על אנליזות של צילומי לוויין Sentinel-3 ברזולוציה של 300 מטר.

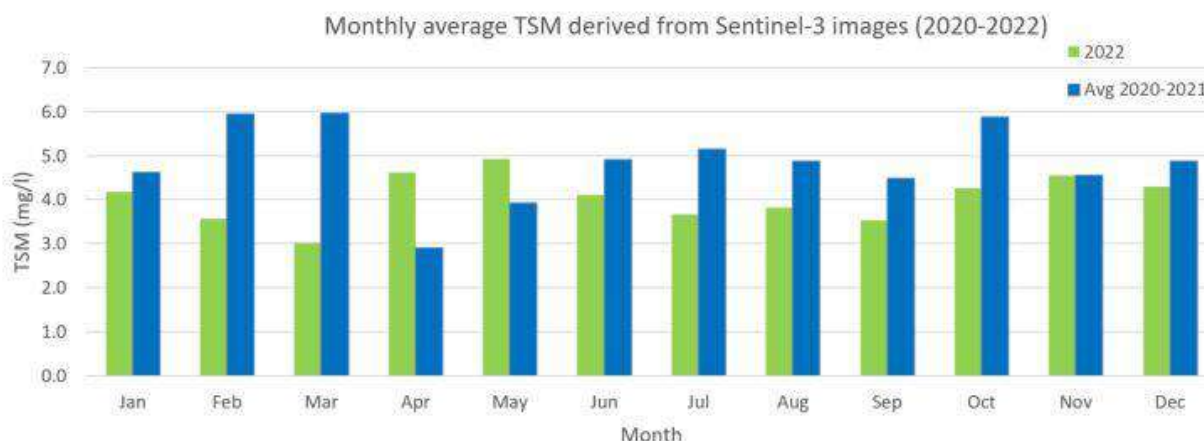
3. הממוצע החודשי של עומק הסקי (Secchi) בשנת 2022 חושב מ-130 צילומי לוויין VIIRS ומוצג יחסית לנתוני ממוצע חודשי שחושבו בשנים 2018-2021 (איור 63). עומק הסקי הנמוך ביותר נמדד בחודש פברואר

1) (מטר) והגבוה ביותר בחודש יולי (2.5 מטר). השוואה לממוצע הרב שנתי מראה ירידה בעומק הסקי (עליה בעכירות) בחודשים מרץ, יוני ואוגוסט. בחודש ספטמבר לא היו מספיק צילומים טובים לחישוב ממוצע.



איור 63: עומק סקי (Secchi) חודשי ממוצע האגמי לשנת 2022 שחושב מנתוני לוויין VIIRS בהשוואה לממוצע הנתונים שחושבו בשנים 2018-2021.

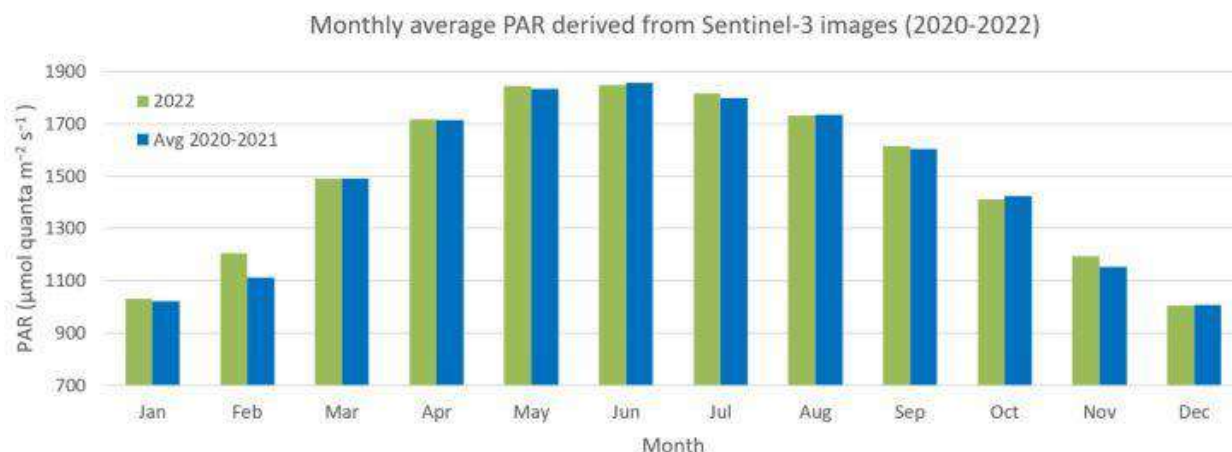
4. הממוצע החודשי של ריכוזי חומר מרחף (TSM) בשנת 2022 חושב מ-256 צילומי לוויין Sentinel-3 ומוצג יחסית לנתוני ממוצע חודשי שחושב בשנים 2020-2021 (איור 64). נתוני הלוויין מראים שהריכוז האגמי הממוצע הגבוה ביותר (4.9 mg/L) היה בחודש מאי והנמוך ביותר (3 mg/L) בחודש מרץ. למעט חודשים אפריל-מאי ריכוזי החומר המרחף הממוצע ב-2022 היה נמוך מזה שחושב בממוצע הרב שנתי.



איור 64: ריכוזי חומר מרחף (TSM) חודשי ממוצע האגמי לשנת 2022 שחושב מנתוני לוויין Sentinel-3 בהשוואה לממוצע הנתונים שחושבו בשנים 2020-2021.

5. הממוצע החודשי של קרינה זמינה לפוטוסינתזה בין אורכי הגל 400-700 ננומטר (PAR-Photosynthetically Available Radiation) בשנת 2022 חושב מ-256 צילומי לוויין Sentinel-3 ומוצג יחסית לנתוני ממוצע חודשי שחושב בשנים 2020-2021 (איור 65). נתוני הלוויין מראים שהריכוז הממוצע האגמי

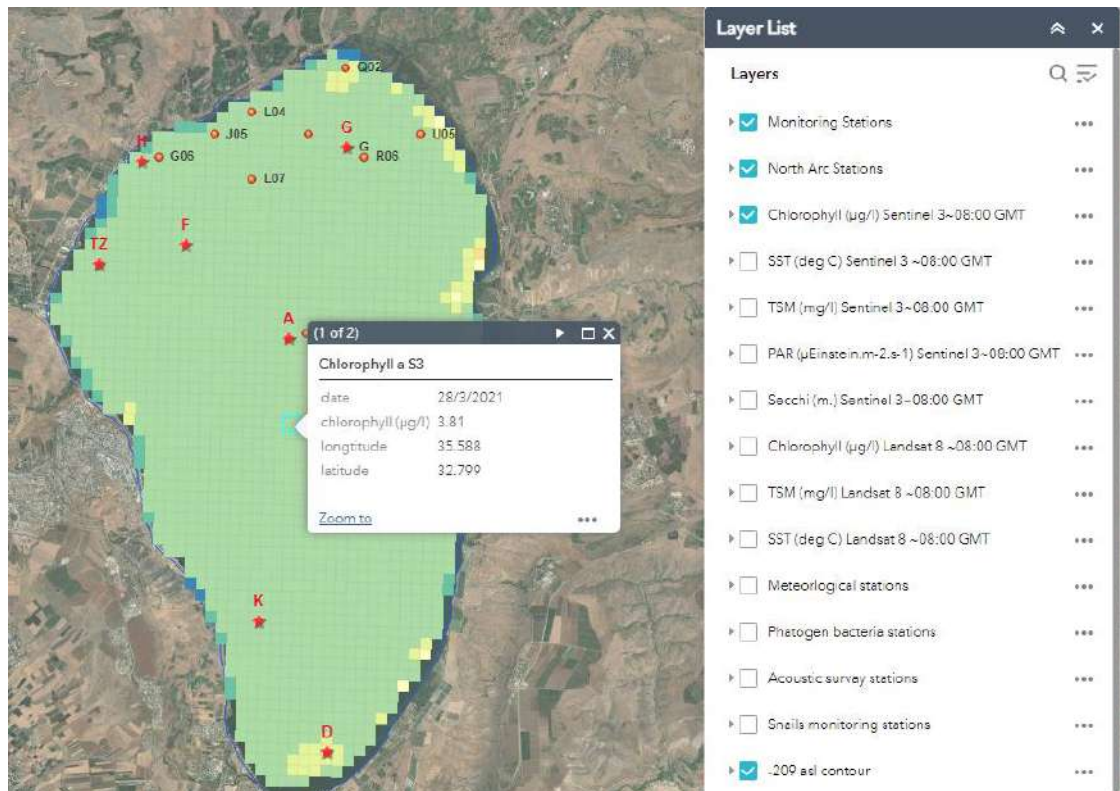
הגבוה ביותר ($1847 \mu\text{mol quanta m}^{-2} \text{s}^{-1}$) היה בחודש יוני והנמוך ביותר ($1004 \mu\text{mol quanta m}^{-2} \text{s}^{-1}$) היה בחודש ינואר. השוואה לנתוני הממוצע הרב-שנתי מראה שבחודשים פברואר, מאי, יולי, ספטמבר ונובמבר ערכי 2022 היו גבוהים יותר ובשאר החודשים הם היו דומים או נמוכים מהממוצע הרב שנתי.



איור 65: ממוצע חודשי של PAR האגמי שחושב מנתוני לוויין Sentinel-3 יחסית לממוצע הרב שנתי 2020-2021.

6. אנליזות של Chl-a, TSM, SST מלוויין Landsat 8 ו-Landsat 9 נעשות כל 16 יום (מותנה בעננות). בשנת 2022 עובדו 15 צילומי Landsat 8 ו-18 צילומי Landsat 9. בגלל עננות ואובדן, בדרך כלל מכל לוויין ניתן לקבל בממוצע צילום אחד בחודש ולכן לא נעשו חישובי ממוצעים. הרזולוציה של הלוויין (30 מטר) מאפשרת לנו להבין את ההטרוגניות הרבה של הפרמטרים השונים במרחב. צילומי לוויין ה-Landsat 8 וה-Landsat 9 וכן הצילומים היומיים של לוויין Sentinel-3 משולבים באפליקציה של מעבדת הכנרת שפתוחה לחוקרים ולציבור הרחב.

2.25 מערכת מידע גיאוגרפית באתר האינטרנט - GIS ONLINE



במימון
רשות
המים

מיקי שליכטר

- נתונים מרחביים מתכנית הניטור של הכנרת מוטמעים למערכת מידע גיאוגרפי
- המערכת מאפשרת תצוגה של המידע הגיאוגרפי במפות אינטראקטיביות באתר האינטרנט של המעבדה ויצירת כלים לצפייה, הורדה ועיבוד של הנתונים.

מטרות

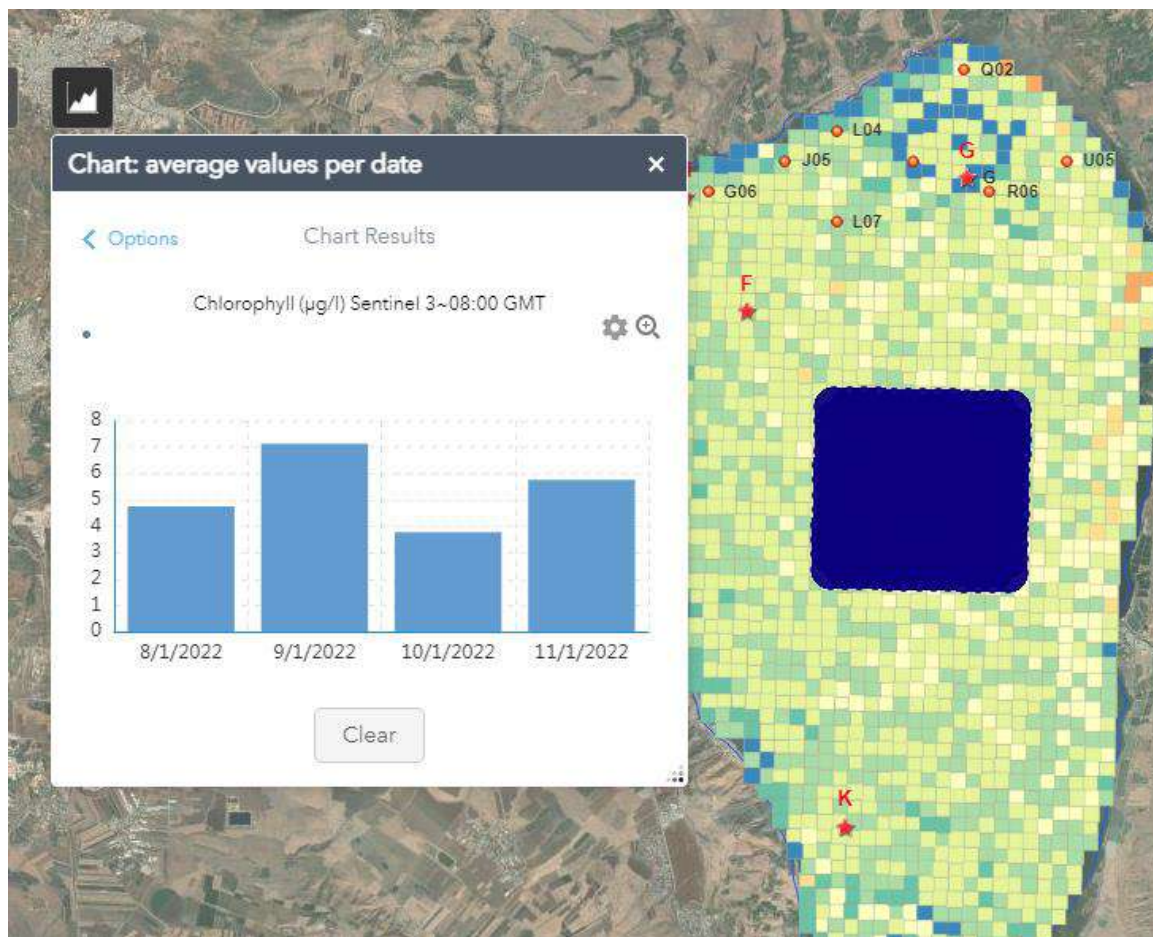
- להציג לציבור את המידע הגיאוגרפי באתר האינטרנט של המעבדה.
- לפתח כלים למשתמש לבחירת המידע המוצג ולעיבוד המידע.
- לאפשר למשתמש להוריד את המידע המבוקש.

תיאור המערכת

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

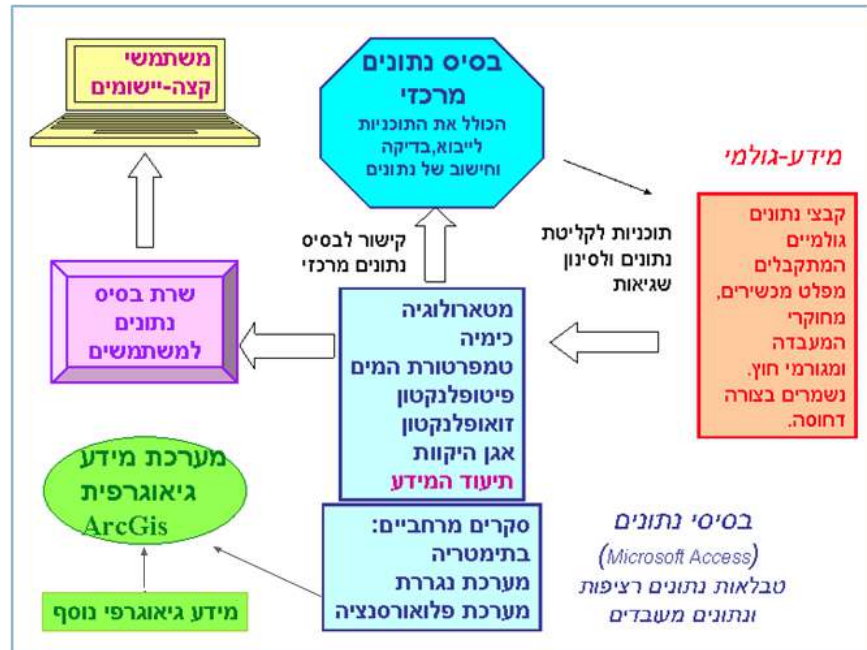
שכבות המידע המוצגות הן:

- בתימטריה של האגם: קונטורים ברזולוציה של 1 מטר.
 - תחנות הניטור: תחנות המסווגות לפי תחומי הניטור השונים-מטאורולוגיה, ניטור חידקים, סקרי דגים, ניטור חלזונות ועוד.
 - תצוגת פיענוח צילומי לוויין בקירוב לזמן אמת.
- תצלומי הלוויין המוצגים במערכת הנם 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 6-1-2020, חומר מרחף TSM החל מתאריך 4-7-2020, עומק סקי החל מתאריך 27-9-2020, טמפרטורת פני המים SST החל מתאריך 22-2-2021, קרינת PAR החל מתאריך 2-10-2020.
- הפרמטרים המוצגים של הלוויין Landsat 8 ו-Landsat 9 הינם:
- כלורופיל a החל מתאריך 12-11-2020, חומר מרחף TSM החל מתאריך 12-11-2020, טמפרטורת פני המים SST החל מתאריך 15-1-2021.
- הכלים שפותחו במערכת הממ"ג מאפשרים:
- תצוגת שכבות המידע והמקרא, בחירת הפרמטר והתאריך לצפייה. תצוגת טבלת הנתונים לתאריך נבחר או לטווח תאריכים, חישובי סטטיסטיקה על הנתונים בטבלה, תצוגת גרף של ממוצע יומי לטווח תאריכים ולאזור נבחר במפה (איור 66), ייצוא הנתונים לקובץ טקסט.
- בשנת 2022 נוספו למערכת 1052 תצלומים מהלוויין Sentinel-3 שכללו 225 תצלומים של כל אחד מהפרמטרים: כלורופיל a, TSM, PAR, SST ; 129 של עומק סקי.
- בשנת 2022 נוספו למערכת 86 תצלומים מהלוויינים Landsat 8 ו-Landsat 9 שכללו 28 תצלומים של כל אחד מהפרמטרים: כלורופיל a, TSM ; 30 תצלומים של SST.



איור 66: ממוצעים יומיים של נתוני כלורופיל בריבוע נבחר סביב תחנה A בתחילת ינואר 2022.

2.26 מאגר מידע כנרת



במימון
רשות
המים

מיקי שליכטר, יורי לצ'נסקי, אופיר טל

- מאגר מידע כנרת כולל את ארכיון הנתונים ההיסטורי של הכנרת, ומערכת תוכנה ייעודית אשר נבנתה לצורך זה.
- המידע מוגש בחלקו לציבור, בגרפים, באמצעות אתר האינטרנט של חיא"ל במרכז מידע כנרת: <http://kinneret.ocean.org.il/Default.aspx>
- בימים אלה המערכת עוברת שינוי יסודי מבחינת תשתיות החישוב ואופן עיבוד הנתונים לתשתיות ענן ושימוש בטכנולוגיות עדכניות.

מטרת מאגר המידע

מטרות מאגר המידע של הכנרת הן:

- 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 וכוללים בו נתונים מתחומי המטאורולוגיה, פסיקה, כימיה וביולוגיה של האגם (טבלה 8). 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 מרכיביה השונים של המערכת האקולוגית של האגם, ומשמש בסיס לבניית מודלים לחיזוי ולהבנת תהליכים מורכבים המתרחשים בכנרת בפרקי זמן קצרים וארוכים.

במהלך שנת 2022, החל תהליך עיבוד מחדש של הנתונים לטובת תכנון ובנייה של מאגר המידע ומערכת האיסוף על בסיס טכנולוגיות מתקדמות ומחשוב ענן. תהליך זה, אשר יכול פרסום מאמר חדש בנושא יסתיים במהלך 2023.

טבלה 8: תכולת מאגר מידע כנרת

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

סיכום העבודה בשנת 2022

ניהול שוטף של מאגר הנתונים:

1. קליטת הנתונים השונים המתוארים בטבלה 8 לבסיס הנתונים.

2. בקרה ותחזוקה של מערכות קליטת נתונים אוטומטית: נתוני 5 תחנות מטאורולוגיות מאזור הכנרת, נתוני הפרופילים ממערכת הדוגם האנכי בתחנה A, נתוני דיגום רציף בתחנות G,D,A ונתוני טמפרטורה משרשראות התרמיסטורים.
3. עיבוד הנתונים.
4. העברת חיתוכי נתונים על פי בקשת החוקרים.
5. העברה רבעונית של בסיס הנתונים המעודכן לרשות המים.
6. העברת נתונים לגורמי חוץ כגון: המשרד לאיכות הסביבה, הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, חוקרים וסטודנטים במסדות המחקר בארץ ובחו"ל.
7. גיבויים תקופתיים של מאגר הנתונים.

תחזוקה של היישום כנרת

- תחזוקת יישום הנגשת הנתונים הנוכחי, המשמש את כלל החוקרים לגישה לבסיס הנתונים, עיבוד הנתונים ותצוגה גרפית.
- תכנון ובניה של מאגר הנתונים בטכנולוגיות עדכניות:
1. תוכנה תשתית ענן לשם אוטומציה של קליטת הנתונים באמצעות ממשק משתמש אינטרנטי (לדוגמא, נתונים הנאספים על ידי הספנים).
 2. תוכנה תשתית ענן לשם הנגשת נתוני מאגר המידע לציבור ולחוקרים. המערכת תכלול אפשרות לביצוע פעולות והנגשת הנתונים לחוקרים המורשים לכך.
 3. כלל הנתונים המצויים במאגר הנתונים אוחדו ועובדו.
 4. החלה הקמה של מערכת אוטומטית להרצה של מודלים קצרי טווח, ושילוב התוצאות במאגר המידע (מודלים אופרטיביים).

3 מחקרי כנרת

3.1 אוסף התרביות הלאומי של אצות ישראל



מחקר
במימון
חיא"ל

רות נ. קפלן לוי, אלה אלסטר, עכסה לופו

- אוסף התרביות הלאומי עומד כיום על 149 זנים שונים של מיקרו-אצות
- רוב התרביות משתייכות ל- 3 מערכות: ירוקיות המהוות 39% מהאוסף, 32% כחוליות ו- 18% נאווניתיות.
- בשנת 2022 הגדלנו את האוסף ב- 22 תרביות.

מטרות INCCA

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

רקע

פעילות אנטרופוגנית גוברת יחד עם שינויי האקלים, משפיעים על אוכלוסיות המינים בסביבות האקוויטיות בכלל ועל המיקרו-אורגניזמים בפרט. מיקרו-אצות משמשות כבסיס במארג המזון האקוטי והמגוון שלהן משתנה עם השינויים החלים במערכת אקולוגית זו.

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

INCCA ממוקם במעבדה לחקר הכנרת, חקר ימים ואגמים לישראל (חיא"ל), לחופה של הכנרת. אוסף התרבויות החל את דרכו בשנות ה-70 למאה הקודמת, בעיקר למטרות מחקר. החל משנת 2012 נוספו לאוסף מינים רבים כחלק מפרויקט יצירת ברקוד גנטי למיקרו-אצות של הכנרת. מטרתנו היא לזהות, לתעד, לבדד ולשמר את המגוון הביולוגי של אצות וציאנובקטריה של ישראל.

תוצאות דיון

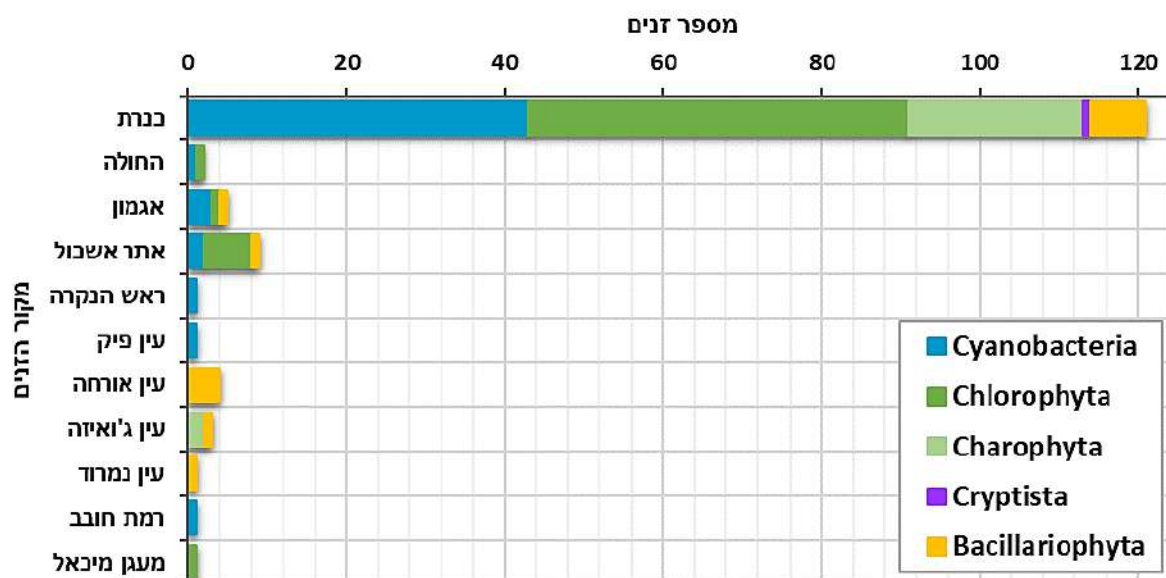
אוסף התרבויות INCCA הורחב השנה ב- 22 תרבויות חדשות שבודדו ובו בזמן אבדו 3 זנים. האוסף בדצמבר 2022 מונה 149 זנים של אורגניזמים פוטוסינתטיים (טבלה 9). האוסף כולל נציגים מחמש מערכות, אולם רוב הזנים שייכים לירוקיות המהוות 39% מהאוסף, 32% הם ציאנובקטריה ו- 18% נאוויטיות. מתוך 149 התרבויות 54 זוהו לרמת המין, כולל 27 ירוקיות, 17 כחוליות, 9 נאוויטיות וצורנית אחת. כמו כן, המידע הגנטי עבור תרבויות שונות באוסף הוגדל השנה וכולל רצפי DNA מתוך 21 זנים של ציאנובקטריה, 12 ירוקיות ו- 10 נאוויטיות.

טבלה 9 : מספר זני מיקרו-אצות המוחזקים ב-INCCA ממוינים לפי מערכה, מחלקה וסדרה.

Phylum	Class	Order	No. of strains (12/2022)	Total
Cyanobacteria כחוליות	Cyanophyceae	Chroococcales	13	48
		Synechococcales	7	
		Oscillatoriales	15	
		Geitlerinemales	1	
		Nostocales	12	
Chlorophyta ירוקיות	Unknown		5	58
	Chlorophyceae	Chaetophorales	1	
		Chlamydomonadales	6	
		Sphaeropleales	31	
	Trebouxiophyceae	Chlorellales	13	
		Trebouxiiales	1	
Charophyta נאוויטיות	Zygnematophyceae	Ulotrichales	1	
		Desmidiiales	12	27
		Zygnematales	15	
Cryptista	Cryptophyceae	Pyrenomonadales	1	1
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Bacillariales	8	15

Phylum	Class	Order	No. of strains (12/2022)	Total
צורניות		Fragilariales	1	
		Mastogloiales	4	
	Coscinodiscophyceae	Melosirales	2	
Total strains			149	149

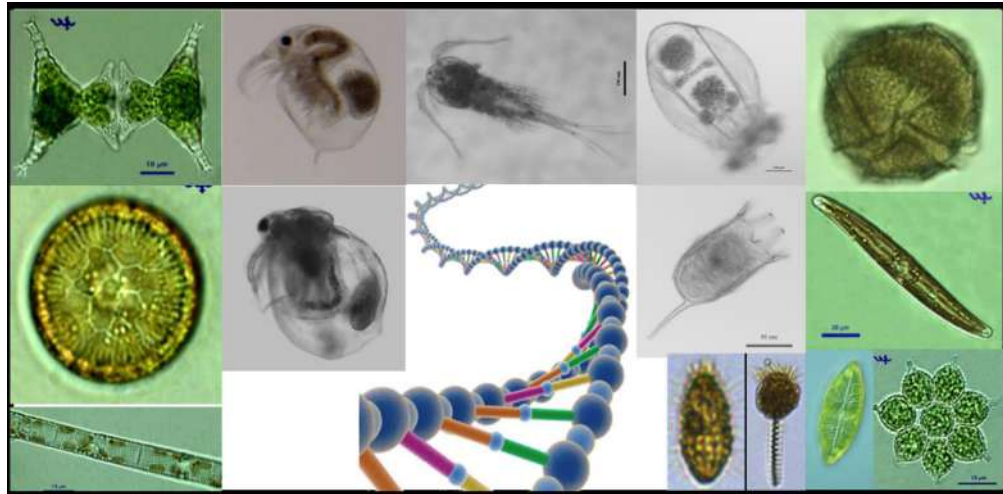
מספר התרבויות החד-אצתיות הגדול ביותר שבודדו השנה היה ממערכת הצורניות. מערכה זו גדלה מ- 8 תרבויות ב- 2021 ל- 15 תרבויות בשנת 2022. אחריה, קבוצת הירוקיות אליה נוספו 8 זנים, הנאווניתיות עם תוספת של 4 זנים ולבסוף הכחוליות עם 3 זנים חדשים בלבד (טבלה 9). בשנה שעברה הרחבנו את מקורות המים מהם בידדנו זנים, כאשר הרוב (81%) מקורם מאגם הכנרת, ו- 19% הנותרים בודדו ממקורות מים שונים שבצפון ישראל (איור 67). ניתן להבחין כי רוב הזנים שבודדו מהמעיינות בגולן משתייכים למערכת הצורניות (Bacillariophyta).



איור 67: מספר זני המיקרו-אצות ב- INCCA שבודדו ממקורות שונים בישראל, לפי מערכות.

מטרת INCCA הינה לזהות ולשמר את מגוון המיקרו-אצות של ישראל ולהוות משאב חומר חי וידע לבעלי עניין שונים. בשנת 2022 הגדלנו את קהל הלקוחות וסיפקנו שירותי טקסונומיה ותרבויות חיות למוסדות שונים, כגון חוקרים מאוניברסיטת בן-גוריון, הטכניון, מכללה אקדמית תל-חי, מכון שמיר, המרכז למחקר ופיתוח אזורי אגודת הגליל ואוניברסיטת בר-אילן.

3.2 ברקוד גנטי של ביוטת הכנרת



מחקר
במימון
חיא"ל

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

- ברקוד גנטי, המשלב טקסונומיה קלאסית ומולקולארית של קבוצת הסרטניים בזואופלנקטון של הכנרת הובילה להכרה שישנם לפחות 5 מינים נוספים בעמודת המים אשר אינם נספרים בניטור.
- השנה הוספנו לבסיס הנתונים רצפים של 12 מיני פיטופלנקטון.
- כיום מוגדרים 266 מיני מיקרואורגניזמים בכנרת, מתוכם ל- 47 מינים קיים ברקוד גנטי.

מטרת המחקר

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

רקע

היכולת לזהות ולקרוא לאורגניזם בשם הוא נדבך חשוב להבנת מגוון המינים הקיימים במערכות אקולוגיות שונות. בעבר זיהוי המינים נעשה על פי צורתם החיצונית (מורפולוגיה), אך כיום הזיהוי מתבצע גם על ידי רצף קצר של DNA מהאורגניזם עצמו, כלומר "ברקוד גנטי". בפרויקט זה אנו יוצרים בסיס נתונים, אשר עומד כלבנת ידע ראשונה, עליה ניתן יהיה לשפר ולהרחיב את פעילות הניטור במקביל למגוון רחב של מחקרים, תוך מניעת טעויות עתידיות וזיהוי מהיר ומדויק של המיקרואורגניזמים בכנרת.

תוצאות ודיון

יצירת בסיס נתונים וברקוד למיקרואורגניזמים הינו תהליך מתמשך הכרוך בכמה שלבים מאתגרים: (1) יכולת בידוד של המין, אם זה לתרבית או למבחנה, יכולה להוות אתגר רציני בעיקר כאשר מדובר במינים קטנים במיוחד; (2) זיהוי מורפולוגי מדויק, שלא תמיד מתאפשר מסיבות שונות; (3) הפקת DNA

בצורה יעילה, ללא חומרים מעכבים, אשר תאפשר הגברת הגנים בשלב הבא; 4) הגברת מקטעי ה-DNA מהמינים והקבוצות הטקסונומיות השונות שהיא תלויה רצף חומצות הגרעין באותו המין. כלומר, לכל קבוצת מינים יש לכייל את המערכת כך שנוכל לקבל את רצף הברקוד הנדרש. מידע מולקולארי על המינים השונים מאפשר לנו לעדכן, לאמת או לשנות את שמות המינים במאגר המידע של המעבדה לחקר הכנרת וברשימת הניטור.

בשנת 2022 הצלחנו לבצע ברקוד גנטי ל- 12 מינים נוספים (טבלה 10), כאשר רובם שייכים למערכת הציאנובקטריה. אחד המינים שבדדו מהכנרת הוגדר מיקרוסקופית כ- *Schizothrix* sp. (לשיטות ראה דו"ח חיא"ל מס' T8-2021 משנת 2020). רצפי מקטע *16S rRNA* של מין זה קיימים בבסיס הנתונים הבינלאומי, אולם אין מידע על רצף ה- *rbcL* שלו. כאשר משווים את הרצפים שהתקבלו מתבדיל זה בעזרת BLASTN, המידע הכי קרוב המתקבל הינו רצף מהגנום של *Leptolyngbya boryana* NIES-2135 עם 87% זהות בלבד. שני סוגים אלה, *Leptolyngbya* ו- *Schizothrix*, שייכים לאותה הסדרה ה- *Leptolyngbyales*. אולם, כאשר משווים את רצף ה- *16S rRNA-ITS* ישנה זהות בין מין זה למינים מסדרת ה- *Oculatellales* עם זהות של 94% ל- *Oculatella mojaviensis* CMT-3BRIN-NPC84. מקרה זה מראה כי מאותו ה-DNA ניתן לקבל רצפים שעל פי בסיס הנתונים משתייכים לשתי סדרות שונות. מתוך ידיעה שהתבדיל הוא חד-אצתי, לא נותר אלא לפקפק בהגדרה הטקסונומית של הרצף שהופקד. זוהי דוגמה קלאסית המחזקת את הצורך בברקוד הכולל הגדרה מורפולוגית ומולקולארית גם יחד ולא הסתמכות על DNA בלבד. במערכת הנאווניתיות הצלחנו השנה לרצף את מקטע ה- *rbcL* מהמין שעד היום נספר כ- *Staurastrum manfeldtii* small, והוא נמצא זהה ב- 98% לרצף של *Staurastrum leptocladum* M998, אך על מנת לקבוע סופית ולעדכן את שם המין יש צורך לרצף גם את ה- *18S rRNA-ITS*.

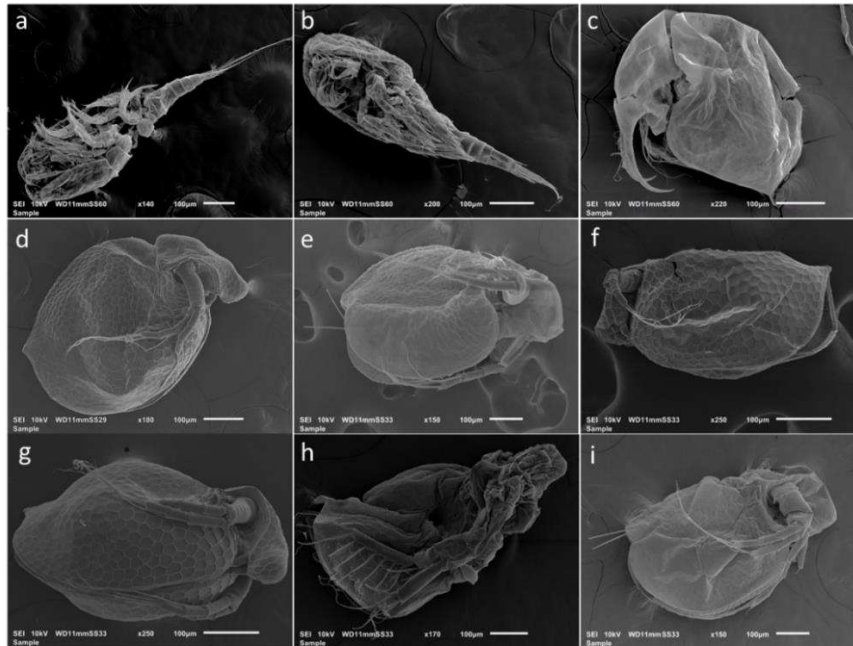
טבלה 10 : מצב הברקוד הגנטי של ביוטת הכנרת, נכון ל- 12/2022. תיאור משמאל לימין - העמודה הראשונה מתארת את ממלכות המיקרו-אורגניזמים הקיימים בכנרת. בעמודה השנייה רשומה החלוקה למערכות. בעמודה השלישית מוצג מספר המינים שזוהו בכנרת מכל מערכה עד היום. עמודה רביעית מציינת את מספר המינים שמהם הפקנו ברקוד גנטי.

מס. מינים שיש להם ברקוד DNA	מספר המינים בכנרת	שם עברי למערכה	Phylum מערכה	Kingdom ממלכה
21	40	כחוליות	Cyanobacteria	Eubacteria
-	20	צורניות	Bacillariophyta	Chromista
-	5		Cryptista	
-	1	פרימנסיות	Haptophyta	
-	16	דינופלג'לטים	Miozoa (Dinophyta)	
-	37	ריסניות	Ciliophora	
3	17	נאווניתיות	Charophyta	Plantae
20	90	ירוקיות	Chlorophyta	
-	6	עינניות	Euglenozoa	Protozoa
10	14	פרוקי רגליים	Arthropoda	Animalia
1	20	גלגליות	Rotifera	
55	266			Total

ב- 2021 סיימנו לרצף את תשעת ה- Crustaceae שנספרים באופן רציף בניטור. מהרצפים שהתקבלו נמצא כי עלינו לעדכן את שמותיהם של 3 מינים, להגדיר מחדש 3 מינים קיימים ולהוסיף מין של Cladocera נוסף-

Diaphanosoma sp. על מנת לבצע את המשימה יש צורך במומחה בטקסונומיה של Arthropoda

המשתייכים לסדרת ה- Copepoda וה- Cladocera.



איור 68: צילומי מיקרוסקופ אלקטרוני סורק (SEM) של מיני סרטניים בפלנקטון של הכנרת

(a) *Mesocyclops* sp.; (b) *Thermocyclops* sp.; (c) *Bosmina* sp.; (d) *Ceriodaphnia* sp.1; (e) *Ceriodaphnia* sp.2; (f) *Ceriodaphnia rigaudi*; (g) *Ceriodaphnia* sp.1; (h) *Diaphanosoma* sp.; (i) *Moina micrura*.

זיהוי טקסונומי של קבוצות אלו דורש מיומנות רבה, וכולל צילומים במיקרוסקופ אלקטרוני סורק, בו ניתן

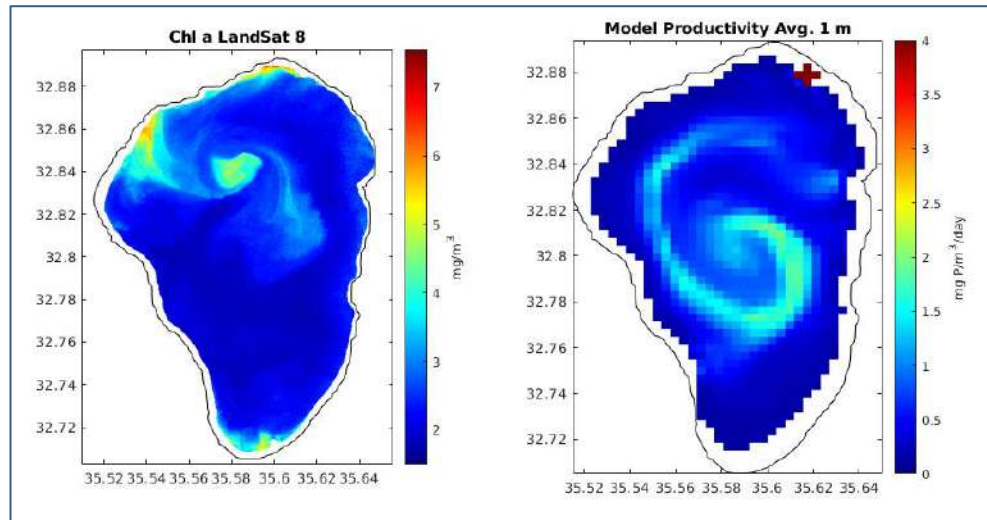
להבחין באורך של כל פרק ובמבנים ייחודיים לכל מין (איור 68).

תוצאות העבודה הטקסונומית הקלאסית מסוכמות בטבלה 11, זו התבצעה בעזרתו האדיבה של Prof. Manuel Elías-Gutiérrez. כפי הנראה, מינים רבים של סרטניים בפלנקטון של הכנרת הינם אנדמיים, ולכן יש צורך לעבור תהליך שלם עם כל מין עד להגדרה הסופית, הכולל גם השוואות למינים דומים הקיימים במקומות אחרים. בקצרה ניתן לומר שתהליך הברקוד, הכולל רצף DNA והגדרה מיקרוסקופית הוסיפו 5 מינים חדשים לרשימת הזואופלנקטון ממערכת הסרטניים הנספרים בניטור.

טבלה 11 : הגדרת מיני תת-מערכת ה- Crustacea בפלנקטון של הכנרת על פי רצפי *coi*. משמאל לימין – שם תת-מחלקה אליה משתייכים המינים, מיני הזואופלנקטון כפי שהוגדרו עד היום (Gal et al., 2014), עדכון שם המין בהתאם לרצפי ה-DNA, ועדכון שמות המינים על פי הטקסונומיה הקלאסית.

Subclass	Species counted identity (2021)	Species identity (DNA)	Species identity by Taxonomy
Copepods	<i>Mesocyclops ogunnus</i>	<i>Mesocyclops</i> sp.	<i>Mesocyclops</i> sp.
	<i>Thermocyclops dybowskii</i>	<i>Thermocyclops dybowskii</i>	<i>Thermocyclops</i> sp.
	-	-	<i>Eucyclops</i> sp.
Cladocera	<i>Daphnia magna</i>	<i>Daphnia magna</i>	<i>Daphnia magna</i>
	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	<i>Diaphanosoma</i> sp.	<i>Diaphanosoma</i> sp. 1, 2 & 3
	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Bosmina</i> sp. 1	<i>Bosmina meridionalis</i> ?
	<i>Bosmina longirostris</i> var <i>cornuta</i>	<i>Bosmina</i> sp. 1	
	<i>Ceriodaphnia reticulata</i>	<i>Ceriodaphnia pulchella</i>	<i>Ceriodaphnia</i> sp 1
	<i>Ceriodaphnia rigaudi</i>	<i>Ceriodaphnia cornuta</i>	<i>Ceriodaphnia</i> sp 2 & 3
	<i>Chydorus sphaericus</i>	<i>Chydorus sphaericus</i>	n/a
	<i>Moina rectirostris</i>	<i>Moina micrura</i>	<i>Moina micrura</i>

3.3 פיתוח, כיול ויישום מודל ביוגיאוכימי תלת מימדי לכנרת



תמונת לוויין של כלורופיל a בפני השטח (משמאל) ויצרנות ראשונית במטר הראשון במודל (מימין) ב10 לינואר 2019.

**מחקר
במימון
רשות
המים**

יעל אמיתי

- מודל ביוגיאוכימי מרחבי מכויל לכנרת הינו כלי חזק המאפשר בחינת סוגיות אקולוגיות בכנרת.
- המודל מצליח לדמות את ההתפלגות של מומסים כימיים שונים בעמודת המים - בממוצע שנתי אך בין חודשים שונים בשנה ישנם הבדלים ביצרנות הראשונית.

מטרת המחקר

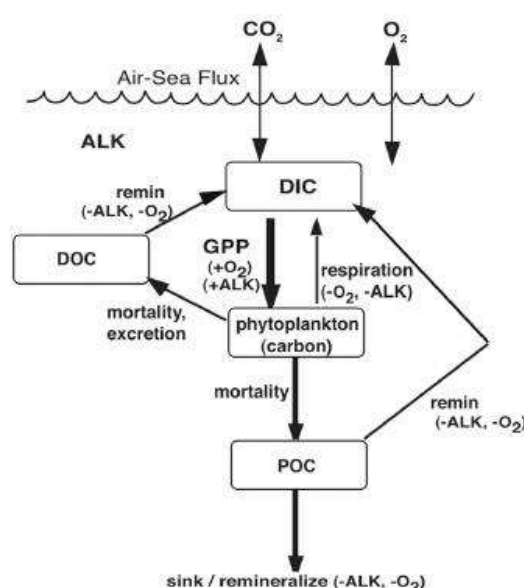
מטרת המחקר הינה לפתח, לכייל וליישם מודל פיזיקלי-ביוגיאוכימי תלת מימדי של הכנרת לצורך הבנה וניתוח תהליכים ותופעות אקולוגיות בעלות שונות מרחבית מהותית באגם. באמצעות מודל פיזיקלי-ביוגיאוכימי מרחבי תלת מימדי ניתן יהיה:

- להדמות פיזור מזהמים, מרחפים, ונוטריינטים המגיעים מפתחי נחלים.
 - להדמות ולהבין תהליכים אקולוגיים כמו אלו הקובעים את השונות המרחבית של פריחות כחוליות.
 - לזהות שינויים במערכת האקולוגית, הקשורים לשינויי אקלים הצפויים.
- כלומר, מודל מרחבי מכויל יאפשר בחינה של טווח רחב של תרחישים החל מבחינת השלכות של משטרי הזרמה ושאיבה שונים אל ומהכנרת וכלה בזיהוי מקורם ותפוצתם של זיהומים ביוכימיים.

רקע

מודל הידרודינמי תלת מימדי (MITgcm) פועל בשנים האחרונות בכנרת לבחינת תרחישי הזרמה מהצלמון, לבחינת אירועי קיצון וחזוי שינויי אקלים. עבור פרויקט זה הוצמד למודל הפיזיקלי מודול כימי-ביולוגי פשוט

(DIC- Dissolved Inorganic Carbon) שמדמה את מחזור החמצן, הפחמן, והזרחן בכנרת על פי הדיאגרמה באיור 69.



איור 69: סכמה פשטנית של המערכת האקולוגית של הכנרת על פי מודל ה-DIC. מחזורי החמצן, הפחמן והזרחן מתוארים בכליות. המודל מחשב יצרנות ראשונית בהתאם לאור הזמין וטמפרטורת המים. מקורות ומבלעים של כל סמן במערכת מתוארים בדיאגרמה.

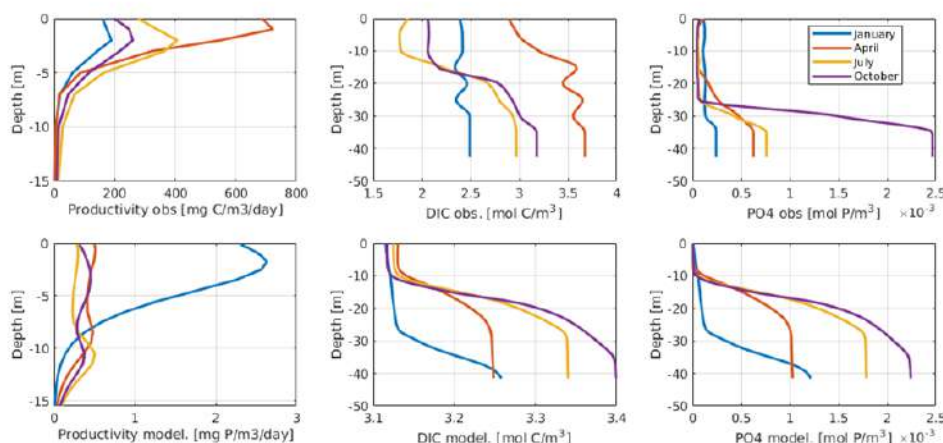
המודל הביוגיאוכימי, המבוסס על המודל הפיזיקלי, הינו ברזולוציה של 400 מטר במרחב ועד מטר בעומדת המים, כאשר המטרים הרדודים הינם ברזולוציה גבוהה יותר בכדי לדמות את היצרנות הראשונית שמתרחשת בקרבת פני השטח. בנוסף, תחלופת גזים עם האטמוספירה הינה חשובה למחזור החמצן והפחמן ולכן רזולוציה גבוהה באזור הממשק בין הכנרת לאוויר מעליה הינה בעלת משמעות. בפרויקט זה ניתנו למודל תנאי התחלה של פחמן אי-אורגני מומס (DIC), אלקליניות (ALK), פוספט (PO_4), זרחן אורגני מומס (DOP), וחמצן מומס (O_2) בעומדת המים על פי נתונים שנמדדו פעם בשבוע במהלך 2019 במסגרת תכנית הניטור של המעבדה לחקר הכנרת. תנאי השפה של המודל הכימי-ביולוגי בפני השטח כוללים סיליקה שמקורה באבק, פחמן דו חמצני באטמוספירה שמעל הכנרת וחדירות אור. תנאי שפה נוספים כוללים את כל המומסים המתוארים באיור 69 במי הירדן כפי שנמדדו על ידי 'מקורות'. במידה והיו חסרים נתונים מהירדן התבצעה אינטרפולציה לנתונים הקיימים. כיוון שמרכיבי המערכת האקולוגית תלויים בכניסות מנחלי אגן הניקוז ישנה חשיבות גבוהה למידולם בצורה מספיק מפורטת. במודל המתואר בדו"ח זה הירדן הוא היחיד המסיע חומרים אל תוך הכנרת כיוון שהוא הגדול בנחלי אגן הניקוז ופעיל במהלך כל השנה. בהמשך העבודה נחלים נוספים יוספו למודל כמקורות חיצוניים לנוטריינטים ומומסים.

תוצאות ודיון

הכיל הראשוני נעשה על ידי השוואה של מרכיבי המערכת הביולוגית בעומדת המים בין המודל לבין תצפיות מהניטור השבועי. באיור 70 ניתן לראות השוואה בין ההתפלגות האנכית של פחמן אי-אורגני מומס, יצרנות ראשונית ופוספט בתחנה A במהלך שנת 2019. הסקאלה של המדדים שונה כפי שניתן לראות בהבדלים בערכים בין השורה העליונה לתחתונה באיור 70, אך ההתאמה בצורת הפרופיל האנכי טובה. למשל, ניתן לראות שהמודל מייצג נכונה את התפלגות היצרנות הראשונית עם העומק וכולל את מקסימום הכלורופיל בעומק (Deep Chlorophyll Maximum) בעומק של 2 מטר לערך אבל אינו מראה אותו בעיתוי הנכון.

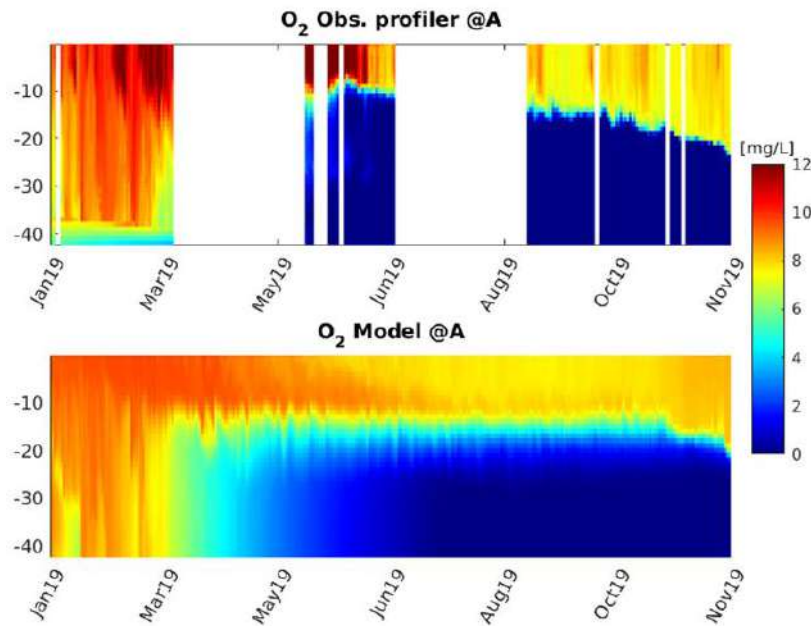
דו"ח ניטור ומחקרי כנרת 2022, המעבדה לחקר הכנרת, חיא"ל

מהתצפיות זהו מקסימום שמופיע באפריל, ואילו במודל הוא מופיע בינואר. כמו כן, פירוק חומר אורגני בעומק נראה על ידי עליית כמות הפחמן האי אורגני והפוספט ככל שמעמיקים יחד עם ירידה בריכוז החמצן (הנראית באיור 71) בהתאמה. העלייה בריכוז הפוספט עם העומק היא הכי משמעותית באוקטובר, לאחר קיץ עם שיכוב חזק, והינה תואמת בין המודל לתצפיות.



איור 70: פרופילים בארבעה חודשים שונים משנת 2019 של זרחן אורגני (ימין), פחמן אי אורגני (אמצע) ופרודקטיביות (שמאל). השוואה בין תצפיות (שורה עליונה) ותוצאות המודל (שורה תחתונה). יש לשים לב שהיחידות של הפרודקטיביות הממדדה והמחושבת אינן זהות בשל השוני בשיטת החישוב והמדדה.

בשלב השני של וידוא המודל, נבדק פרופיל משתנה של חמצן מומס לאורך כל שנת 2019 במודל וכפי שנמדד על ידי מנטה מולטיפרוב הדוגם את כל עמודת המים באופן אוטומטי מספר פעמים ביממה ומוצב בתחנה A על האקורפט. זהו וידוא של מדד אשר נבדק בחלוציה גבוהה ונותן אישוש נוסף להתנהגות המודל. באיור 71 ניתן לראות שכאשר עמודת המים מעורבת לגמרי, ריכוז גבוה של חמצן מומס מגיע לשכבה התחתונה ועד הקרקעית. כיוון שהערבוב המוחלט הוא תופעה של חודשי החורף, טמפרטורת המים קרה ולכן מסיסות החמצן האטמוספרי גבוהה יותר. בחודשים אלו (ינואר – מרץ) ניתן לראות שקיימת שכבה קרובה לסדימנט שבה החמצן נמוך יחסית לשאר עמודת המים בשל צריכת חמצן גבוהה. שכבה זו אינה נראית במודל ועל כן נראה שיש צורך להוסיף רכיב של הסדימנט למודל הביולוגי הקיים. בחודשי הקיץ, כאשר עמודת המים משוכבת, ריכוז החמצן בשכבת ההיפולמיניון, אשר מנותקת מהאטמוספירה, יורד בגלל פירוק של חומר אורגני ומתקבלים תנאים אנאוקסיים. זוהי תופעה מוכרת של המערכת האקולוגית ונראה כי המודל מצליח לדמות אותה היטב. ישנו צורך בכיול נוסף למודל כיוון שרמות צריכת החמצן בשכבה התחתונה במודל נמוכות מעט מאשר במציאות.

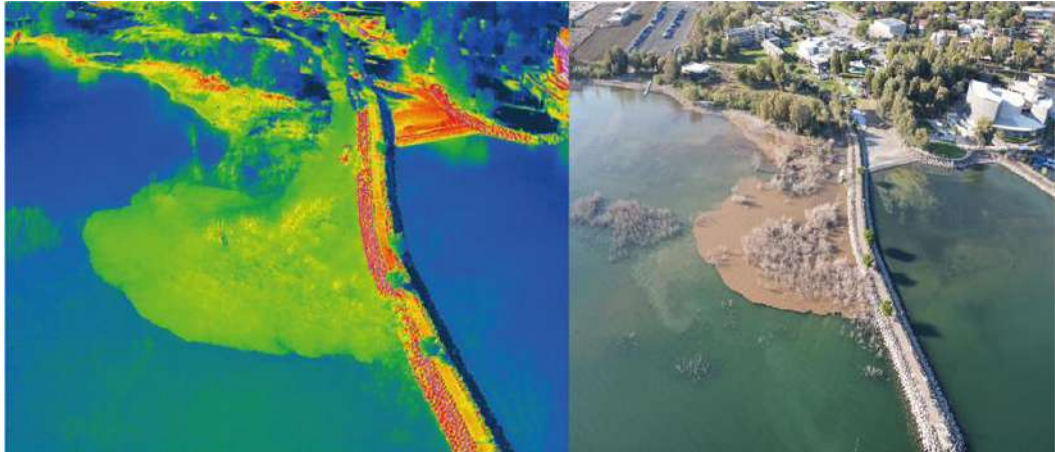


איור 71: בפאנל העליון פרופיל חמצן מומס הנמדד מספר פעמים ביום בתחנה A על ידי מנטה מולטיפרוב (באזור הלבן לא קיימות מדידות בגלל תקלות במכשיר). בפאנל התחתון פרופיל חמצן מומס יממתי שמחושב על ידי המודל.

בהשוואת ה- 10 לינואר 2019 בין המודל ללוויין (איור בראשית הפרק) ניתן לראות פיזור דומה של כלורופיל a בפני השטח מהמודל וקצב היצרנות הראשונית בין פני השטח לעומק של מטר אחד, שהמודל מחשב. גם הלוויין וגם המודל מראים קצב גבוה של יצרנות ראשונית (כלורופיל a בלוויין כמדד ליצרנות ראשונית וחשוב יצרנות ראשונית בערכי זרחן מהמודל) במרכז האגם כתוצאה מהסירקולציה. במודל המערבל נראה מעט יותר דרומי מאשר בתצפית הלוויין אך נראה על פי הפיזור, שבשניהם קיים מערבול ציקלוני בפני השטח אשר מסיע עמו פריחה ומרכז אותה הרחק מהליטורל. נראה כי הכניסה של הירדן בחודש ינואר מביאה עמה ריכוז גבוה של נוטריינטים וכיוון שמי הירדן לא קרים משמעותית ממי הכנרת, הם נכנסים לפני השטח ונוצרת תבנית מרחבית של פריחה בפני השטח שאינה רק חופית (כפי שניתן לראות מתמונות לוויין בחודשים אחרים בהם אין שונות מרחבית גדולה).

לסיכום, בממוצע שנתי המודל הביוגיאוכימי מדמה את ההתפלגות של מומסים שונים בעומדות המים אך בין חודשים שונים בשנה ישנם הבדלים בפרמטרים שונים. נדרש המשך כיוול ליצרנות הראשונית כיוון שהמודל מדמה פריחה בעיתוי שאינו תואם את התצפיות. תצפיות הלוויין תואמות את מדד היצרנות הראשונית אשר נדגם במעבדה והפיזור המרחבי של יצרנות ראשונית מהמודל מראה גם הוא התאמה מסוימת בהינתן תמונות לוויין. המשך כיוול נדרש אל מול תמונות לוויין בשנים אחרות, בהתאם למידת כיסוי עננים וכו'. בהמשך העבודה מודל ביולוגי עם ייצוג של מספר סוגי פיטופלנקטון וזואופלנקטון יוצמד למודל הפיזיקלי וכך מעבר של חומרים בין הרמות הטורפיות יוכנס למודל הפיזיקלי.

3.4 ניטור ומידול הזרמת מים דרך נחל צלמון



צילום רחפן של שפך נחל צלמון במצלמת אור רגיל ובמצלמה טרמית ביום ההזרמה השני

**מחקר
במימון
חיא"ל**

יעל אמיתי, שקד שטיין, ניר קורן, עוז צברי-דר, מוטי דיאמנט, יעל בנימיני, אדית ליבוביץ, יורי לצ'ינסקי

- ניסוי הכלים של הזרמת מי צלמון אפשר בחינה וניטור בשני ימי הזרמה עוקבים.
- בימי ההזרמה הגיעו מים בעלי תכונות שונות מאוד ממי הכנרת וניתן היה לעקוב אחריהם בזמן ובמרחב.
- המים זרמו צפונה בניגוד לצפי של זרימה דרומה אשר יותר שכיחה לאורך החופים המערביים.

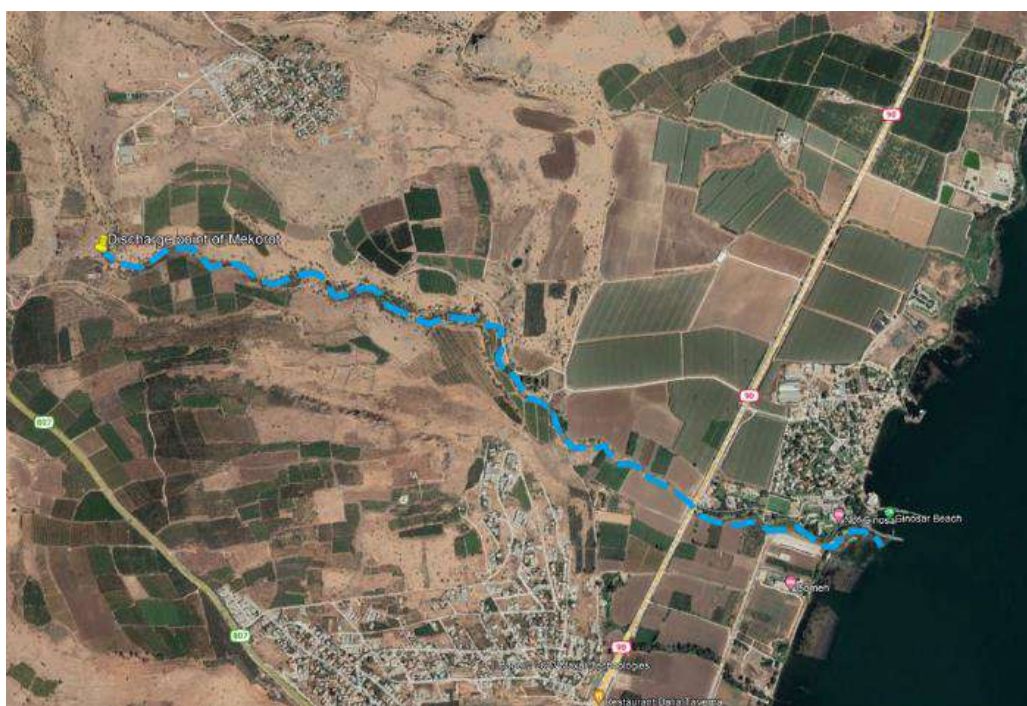
מטרת המחקר

ניסוי ההזרמה שהתבצע בנחל צלמון בסוף שנת 2022 היווה הזדמנות ללמוד הן על המצב ההידרו-אקולוגי של הנחל והן על המיחול וההתפשטות של מים בעלי תכונות שונות ממי הכנרת, בכנרת. מטרת המחקר הייתה לאסוף מידע רב ככל הניתן על מנת להבין את השפעת הפיכת נחל צלמון לנחל איתן כאשר יזרמו דרכו כ-120 מלמ"ק בשנה בעתיד. חלק מהמחקר עסק בכמות מי ההזרמה אשר חלחלו למי התהום, מה היה קצב החלחול והשתנותו בזמן, האם היו אזורים בהם מי הנחל חילחלו וחזרו חזרה אל הנחל בנביעות במורד הזרימה, ואם כן, האם וכיצד שינו את תכונותיהם. אך השאלות העיקריות הן: איך המערכת האקולוגית של הנחל ושל הכנרת תשתנה עקב הפיכת נחל צלמון לנחל איתן? האם ניתן לכמת את הזיהום הסביבתי, אשר יוסע עם הנחל אל תוך הכנרת? כיצד מי הנחל ימהלו באגם ומה תהיה השפעתם המרחבית?

רקע

משבר המים החמור של העשור הקודם, שינויי האקלים וגידול האוכלוסייה, יחד עם הצורך לשמר את מי האגור של אגם הכנרת כנכס אסטרטגי לאומי הובילו להחלטה להוביל מים מותפלים מחופי הים התיכון אל הכנרת אשר התקבלה ברשות המים.

בשנת 2021 תוכנן מערך הזרמה חדש ממאגר אשכול עד נחל צלמון אשר יזרים "מי מערכת" של מקורות אל הכנרת. הזרמה קבועה (או משתנה בזמן) אך נשלטת ע"י חברת מקורות, תספק בטחון ושליטה במידה מסוימת על מפלס הכנרת (נתון קריטי למצב האקולוגי באגם), לאספקת המים באזור, ולהזרמה לממלכת ירדן (אשר אספקת המים אליה צפויה לעלות משמעותית בשנים הקרובות). לאחר השלמת התשתיות התפעוליות, תוכננה הזרמת ניסיון ע"י חברת מקורות ורשות המים לבדיקת תקינות המערכת ומוכנותה להזרמה ארוכת טווח. הזרמת הניסיון התקיימה ב-26.12.2022 וב-27.12.2022. ביום הראשון (26.12), החרמו 3,000 מטר קו"ב לשעה (מק"ש) למשך 3 שעות, ולאחר שעה של הפסקת ההזרמה, הופעלה ההזרמה שוב על 4,500 מק"ש למשך 3 שעות נוספות. ביום ההזרמה השני (27.12) המערכת הופעלה עם הזרמה של 6,000 מק"ש למשך 3 שעות ולאחר מכן הופסקה. המים זרמו בנחל מנקודת ההזרמה עד השפך לכנרת בתחום קיבוץ גינוסר לאורך כ-4 ק"מ (איור 72).



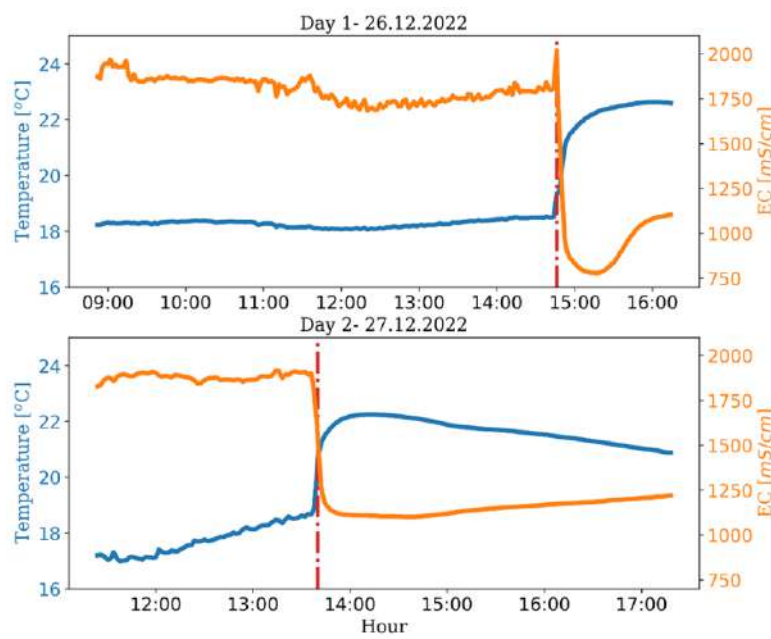
איור 72: מפת תוואי נחל צלמון אל תוך הכנרת, בקו כחול מקווקו, בו יחרמו מי המערכת מצינור שמגיע ממאגר אשכול.

שני מערכי ניטור ודיגום הוקמו: מערך אחד במעלה הנחל, ומערך שני בשפך נחל צלמון אל הכנרת. בנחל, נמדדה הספיקה בחמש תחנות שונות במורד הזרימה וחתכי נחל נמדדו על מנת לחשב את מהירות הזרימה בכל נקודה. כמו כן, נאספו דגימות מים בשלוש נקודות לאורך הנחל בשלושת קצבי ההזרמה. בנוסף, הותקן מכשיר מולטיפרוב בשפך הצלמון לכנרת (על הגשר של מלון נוף גינוסר) על מנת לנטר באופן רציף את הטמפרטורה, המוליכות החשמלית (EC), החמצן המומס במים (DO) ו-pH של המים הנכנסים לכנרת. באגם, הוצבו 15 חיישני טמפרטורה אשר מדדו בתדירות של 2 דקות. במהלך ניסוי ההזרמה בקצבים שונים, פעלו שתי סירות מחקר של המעבדה לחקר הכנרת אשר דגמו פרופילי עומק עם מכשיר מולטיפרוב ב-10 תחנות בשפך הצלמון ומסביבו. צוות הים מדד טמפרטורה, DO, EC, ו-pH עם העומק בתחנות קבועות מראש. כל דגימת מים שנלקחה מהנחל ומהאגם הובאה אל המעבדה למען אנליזות כמות חומרים מרחפים (TSS), ריכוז נוטריינטים (חנקות וזרחות), וריכוז קוליפורמים צואתיים.

המכשור הרב שהצבנו באגם נועד לנסות ולהבין את אופי ערבוב מי הנחל בכנרת על מנת לספק תשתית למחקר על תכונות עירוב מי נחל בהזרמה רציפה ועל אזור ההשפעה של מי הנחל באגם.

תוצאות ודיון

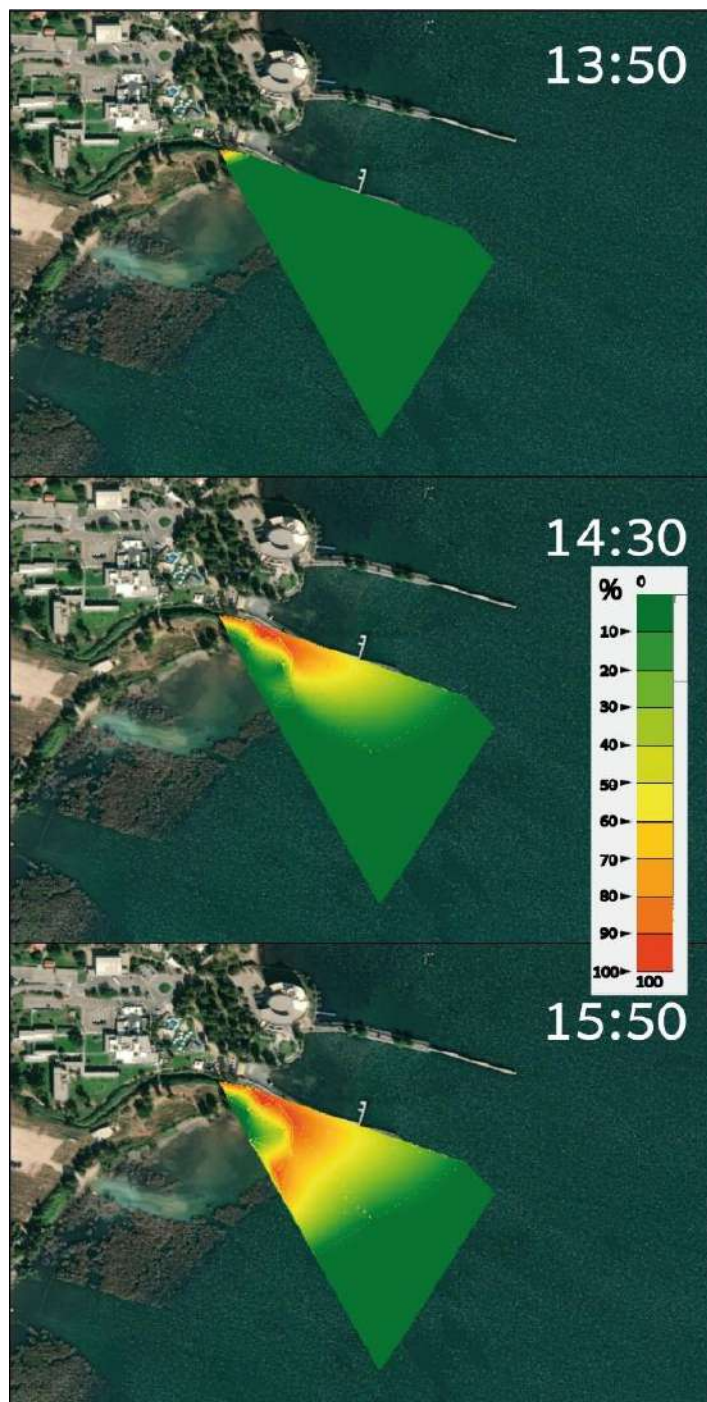
התוצאות של מכשיר המולטיפרוב מדגם Manta אשר הותקן בגשר של מלון נוף גינוסר מראות את הגעת מי ההזרמה לראשונה אל הגשר (איור 73- קו מקווקו אדום). ביום ההזרמה הראשון, ההזרמה הראשונית בספיקה של 3,000 מ"ש לא הגיעה אל הכנרת וחלחלה אל הקרקע בדרך. כלומר-9,000 קוב חלחלו אל מי התהום והרוו את הקרקע של תחתית הנחל. בהזרמה השנייה שהתחילה כשעה לאחר סוף ההזרמה הראשונה המים הגיעו אל השפך לאחר 2:35 שעות, כלומר - מתחילת ההזרמה הראשונה, לקח למים קצת מעל 6:30 שעות להגיע אל הכנרת. זמן זה צפוי להתקצר ברגע שתהיה הזרמה רציפה שכן הזרמה מסוג זה תעלה את מפלס מי התהום המקומי עד למצב יציב. מדידת ספיקה רציפה של המים ביציאה מצינור חברת מקורות ובמורד הזרימה לפני השפך לכנרת ילמד אותנו על קצב החדירה של מי הנחל אל מי התהום והשינוי בקצב זה עד הגעה למצב יציב.



איור 73: טמפרטורה ומוליכות חשמלית של המים מתחת לגשר במלון נוף גינוסר בשני ימי ההזרמה. הקווים האדומים האנכיים מבטאים את חזית הכניסה של מי ההזרמה אל מתחת לגשר. הנתונים המופיעים לפני כניסת מי ההזרמה הם מי כנרת שחדרו אל תוואי נחל צלמון מפאת הטופוגרפיה הנמוכה של קרקעית הנחל באזור זה.

הנתונים מראים כי מי ההזרמה פחות מלוחים, וחמים יותר ממי הכנרת בשני ימי ההזרמה בכ-4 מעלות צלזיוס (איור 73). המים שהוזרמו ע"י חברת מקורות היו מי כנרת מסוננים מתחנת אשכול ולכן אין סיבה שהמליחות של המים תהיה שונה ממי הכנרת. מי הכנרת באזור ההזרמה מלוחים יותר ממי הזרמה עצמם כיוון שהם נמצאים בתוך אגן סגור למחצה (תוואי נחל צלמון). תחלופת המים שם לא גדולה והאידיוי הרב גורם לעלייה במליחות מי הכנרת. הטמפרטורה לעומת זאת, משתנה מהר יותר כתלות בתנאי הסביבה כגון טמפרטורת האוויר, עוצמת הרוח, קרינת השמש ארוכת הגל וקצרת הגל והלחות היחסית באוויר. מי ההזרמה החמים נכנסו אל הכנרת הקרה יחסית ועל כן היו פחות צפופים ממי הכנרת והתפזרו בפני השטח כך שיכולנו לעקוב אחרי ההתפזרות המרחבית שלהם. בכל סנסור טמפרטורה ראינו עלייה של טמפרטורת המים ולאחר מכן המשך עליה או ירידה של הטמפרטורה חזרה לטמפרטורת מי האגם.

כך, עם עיבוד הנתונים של כל הסנסורים במרחב, יכולנו לחשב דרך אינטרפולציה ליניארית את אחוז ערבוב של מי הנחל במי הכנרת ולחשב את ההשתרעות המרחבית של הפלומה באגם עם הזמן (איור 74). אולם, גישה זו אינה מדויקת מכיוון שהטמפרטורה של מרכיבי הקצה משתנה בזמן ולכן השגיאה עלולה להיות גדולה. מכאן, נסיק שערכי הערבוב המתקבלים הם בשגיאה יחסית גדולה אך למרות זאת, ניתן לקבל תחושה של קצב הערבוב וההשתרעות המרחבית באגם, דהיינו, אזור ההשפעה של הנחל. אזור השפעה זה יכול להשתנות במרחב ובזמן עקב זרמי הכנרת וגם עקב הבדלי הצפיפויות בין מי הכנרת ובין מי הנחל. בקיץ התופעה צפויה להיות שונה כאשר מי הכנרת יהיו חמים ביחס למי המערכת ולכן המים ישקעו מיד וצפויים לזרום קרוב לקרקעית הכנרת. בנוסף, ביום ההזרמה השני ראינו שהפלומה נעה צפונה. זרמים לכיוון צפון באזור זה אינם אופייניים למשטר הרוחות המערביות השלט בחודשי הקיץ. באופן טבעי, זרמי הכנרת באזור זה של האגם נעים לכיוון דרום בשל שיווי משקל גיאוסטרופי בין הסעת המים מהרוחות המערביות האופייניות לאזור וכוח קוריוליס. מודל הידרודינמי תלת ממדי של זרמי הכנרת, באילוף נתוני מטאורולוגיה אשר נקלטו מהתחנה המטאורולוגית שלנו בגינוסר, יחד עם הנתונים הפיסיים של האגם מראה שזרם המים באזור גינוסר באותו יום אכן היה צפוי להיות צפוני. פיתוח יכולת של הרצת מודל מסוג זה, אשר מראה את כיווני הזרימה ברזולוציה מאוד גבוהה בפתחת הנחל יתרום רבות להבנת דינמיקת הערבוב של מי הנחל באגם בעתיד.



איור 74: פלומת המים הנכנסים אל הכנרת ביום ההזרמה השני המחושב ע"י סנסורי הטמפרטורה במרחב יחד עם מדידות שנעשו מהסירות. הצבעים מבטאים את אחוז הערבוב של מי הנחל באגם ע"פ המקרא הנמצא בתוך האיור.

הנחל הביא עמו חומרים מרחפים שונים אשר העכירו את המים יחד עם חומרים מומסים אחרים. ריכוז ה- TSS (total suspended solids) באגם לפני ההזרמה היה בין 2-7 מיליגרם לליטר (מג"ל). תוך כדי ההזרמות, הריכוזים באגם נעו בין 2-7 מג"ל בתחנות דיגום הרחוקות, ל- 60-530 מג"ל בתחנות הקרובות לשפך. ריכוז החנקות הכללי (TN) באגם לפני ההזרמה נע בין 0.4-0.7 מג"ל ובזמן ההזרמות, ריכוזי החנקות הכללי נע בין 0.4-0.7 מג"ל בתחנות הרחוקות מהשפך, ובין 1-7.5 מג"ל בתחנות הקרובות לשפך. אותה מגמה נראתה גם עם ריכוז הזרחנים הכולל (TP). לפני ההזרמה הריכוז נע בין 0.011-0.018 מג"ל ובזמן ההזרמה, ריכוז הזרחנים הכללי נע בין 0.011-0.018 מג"ל בתחנות הרחוקות מהשפך, ובין 0.05-0.87 מג"ל בתחנות הקרובות יותר אל השפך. ריכוז הקוליפורמים הצואתיים לפני ההזרמה עמד בין 600-2800 יחידות ל-100 מ"ל ותוך כדי

ההזרמה הריכוזים נעו בין 10,000 ל-260,000 יחידות ל-100 מ"ל. מכך ניתן להסיק כי הריכוז הגבוה של הזרחות, החנקות והחיידקים הגיע מהזרימה בנחל. למרות שמי המקור (מי מקורות) הם בעלי ריכוזים נמוכים של חנקות, זרחות וחיידקים, מי הנחל היו עם ריכוזים גבוהים ממי המקור שהתפזרו בכנרת כתלות באופי פיזור הפלומה. הזיהום שהגיע בימי הזרמה אלו הוא תוצאה של מוקדי זיהום שהצטברו לאורך השנה בתוואי הנחל בתקופה היבשה מאז השיטפון האחרון ונשטפו בהגעה הראשונית של מי מקורות. לסיכום, על מנת להבין את התפשטות מי הנחל בכנרת צריך להקים מערך ניטור מתקדם עם מספר סנסורים גבוה יותר אשר מודד פרמטרים שונים. כך, בזמן הזרמת האמת, נוכל לנטר את אזור ההשפעה של מי המערכת המזרמים אל הכנרת ולראות את השתנות אזור ההשפעה בזמן ובמרחב. מערך כזה יאפשר יכולות אנליטיות גבוהות על מנת להבין תהליכים פיסיקליים, כימיים וביולוגיים אשר מתרחשים באגם כתוצאה מההזרמה דרך נחל צלמון.

3.5 מערכת ICT לזיהוי תגובת עמידות אקולוגית במערכות מים מתוקים



מחקר
במימון
משרד
המדע

איליה אוסטרובסקי, אסף סוקניק, אורנה שוויצר נתן, בשיתוף
עם פרופ' קומאגי מ' (Japan Ritsumeikan University)

- סירת ניטור אוטונומית זעירה נבנתה והופעלה בכנרת במתכונת ניסויית מוגבלת. על בסיס הניסיון פותח מודל שלב ב' שייבדק במהלך פריחות באגם.
- הפיזור המרחבי של אוכלוסיות המיקרוציסטים באגם אופיין, ונמצאה אחידות מרחבית בהרכב המינים (גנוטיפים). עם זאת, נמצא שוני בהרכב האוכלוסייה של מושבות מיקרוציסטים אל מול מושבות קטנות או תאים בודדים.
- במהלך אירוע פריחה של מיקרוציסטים בכנרת, מבנה קהילת החיידקים ההטרופיים הושפע בעיקר מגורמים סביבתיים כגון טמפרטורה ו / או פרמטרים פיסיקוכימיים.

מטרת המחקר

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

רקע

ניטור אוכלוסיות פיטופלנקטון בגופי מים מתוקים באמצעות הטמעת נתונים הנאספים בגישות שונות מאפשר כימות אירועים חריגים של פריחת אצות וציאנובקטריה (CyanoHAB) ועשוי לתרום לביסוס מערך

חיזוי לקבלת החלטות להפעלת אמצעי מניעה ושליטה בפריחה. חישה מרחוק, המבוססת על אמצעים אופטיים המותקנים על לוויינים ואוספים מידע ספקטרלי המנותח בעזרת מגוון אלגוריתמים ביו-אופטיים אשר פותחו להערכת הריכוז של כלורופיל a בגופי מים. בדוח קודם דיווחנו על פיתוח גישה חדשנית, הנסמכת על מידע היפרספקטרלי מלוויינים לכימות, פיגמנט מסוג פיקוציאנין (PC) הנפוץ בציאנובקטריה, וכלורופיל (Chl) שהוא פיגמנט אוניברסלי לפיטופלנקטון. פותח אלגוריתם לחישוב התפוצה של ציאנובקטריה ואצות אחרות על בסיס הפיגמנטים שלהם ויושם למרחב הכנרת במהלך אירוע פריחה של ציאנובקטריה ובמועדים בהם לא הייתה פריחה.

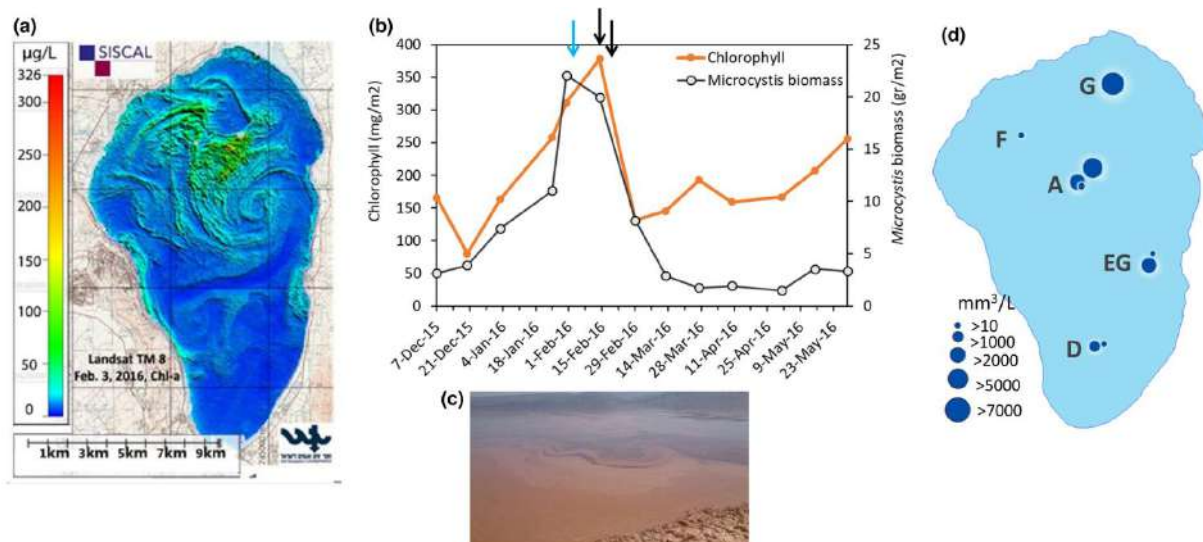
במקביל וכדי לענות על צרכי ניטור בסקאלות זמן קצרות שבין מועדי הביקור של לוויין באזור, מקודמת גישה המבוססת על איסוף מידע מסירה זעירה עם יכולת שיט אוטונומי, מבוקר מחשב, עליה מותקנים אמצעי ניטור כחישן טמפרטורה, אמצעים אופטיים לזיהוי וכימות פיגמנטים של אצות וציאנובקטריה ומערכת הידרואקוסטית לזיהוי פיזור חלקיקים (כולל פיטופלנקטון) בעמודת המים. בשנת 2022 נבנתה ביפן, ע"י הצוות של פרופ' קומאגי, סירת ניטור אוטונומית זעירה (SASV), שתוכננה לניטור נוכחות אצות וציאנובקטריה בפני המים ונועדה לעקוב אחר השונות המרחבית שלהם בכנרת, באמצעות חישניים אופטיים המודדים כלורופיל ופיגמנטים ייחודיים של ציאנובקטריה – פיקוציאנין, פיקואריתרין. סירת ה-SASV הגיעה למעבדה לחקר הכנרת עם הצוות מיפן שהרכיב אותה ובחן את פעולתה באגם. הניסויים הראו כי גרסת SASV הנוכחית לא התאימה לתנאי ההפעלה בכנרת עקב בעיות תקשורת WiFi. לפיכך הוחלט על תכנון ובניה של מודל מתקדם שלא יתבסס על תקשורת WiFi אלא על תכנון מסלול השייט של ה-SASV מראש, בהתאם לאזור הדיגום. הגרסה החדשה נבנתה ביפן ונשלחה לישראל ותיבחן במעבדה לחקר הכנרת לניטור הפיזור המרחבי של פריחת מיקרוציסטיס באגם.

הפיזור המרחבי של אוכלוסיות הפיטופלנקטון במהלך פריחה של ציאנובקטריה מהסוג מיקרוציסטיס הוא הטרוגני באופיו, כאשר באזורים שונים ריכוז מושבות המיקרוציסטיס שונה, ובאזורים מסוימים ריכוזם גבוה במיוחד והם יוצרים מופע של צופת על פני המים. אוכלוסיות של חיידקים הטרוטרופים מלוות את אוכלוסיות הפיטופלנקטון בגופי מים ומגיבות לפיזור המרחבי שלהם. בעבודה המדווחת בוצע מעקב אחר מבנה ותפוצה של אוכלוסיות הפיטופלנקטון והבקטריופלנקטון בכנרת תוך יישום שיטות מולקולריות לזיהוי וכימות הרכב האוכלוסייה והגורמים הסביבתיים המשפיעים עליה.

תוצאות ודיון

פריחה של ציאנובקטריה מהסוג מיקרוציסטיס בכנרת מאופיינת בהטרוגניות מרחבית גבוהה, אשר עשויה להניע שינויים במבנה הקהילה המיקרוביאלית. במאמץ משולב עקבנו אחר הפיזור המרחבי (אופקי ואנכי) של המיקרוציסטיס במועד הפריחה בכנרת, תוך התרכזות גם בהרכב הקהילה המיקרוביאלית ההטרוטרופית. דגמנו את שכבת המים העליונה (עומקים של 0, 1 ו-5 מ') בחמישה מוקדים במרחב האגם באזורים המייצגים את צפון, דרום, מזרח, מערב ומרכז האגם, בשני תאריכים סמוכים במהלך פריחה חורפית כאשר הביומסה של מיקרוציסטיס הייתה גבוהה (איור 75).

במהלך הפריחה החורפית, הפיזור המרחבי של ביומסת המיקרוציסטיס הייתה הטרוגנית מבחינה מרחבית אבל הרכב האוכלוסייה היה הומוגני למדי, ונשלט על ידי גנוטיפ יחיד (מבוסס רצף ITS). עם זאת, מבנה האוכלוסייה של מיקרוציסטיס הראה שונות עבור אוכלוסייה של מושבות גדולות (PA - פרטים בגודל מעל 5 מיקרון) ופרטים חד תאיים או מושבות קטנות (FL - מתחת ל 5 מיקרון) (איור 76a), כאשר דגימות PA הראו עושר ומגוון גבוהים יותר של האוכלוסייה המיקרוביאלית בהשוואה לדגימות של FL.



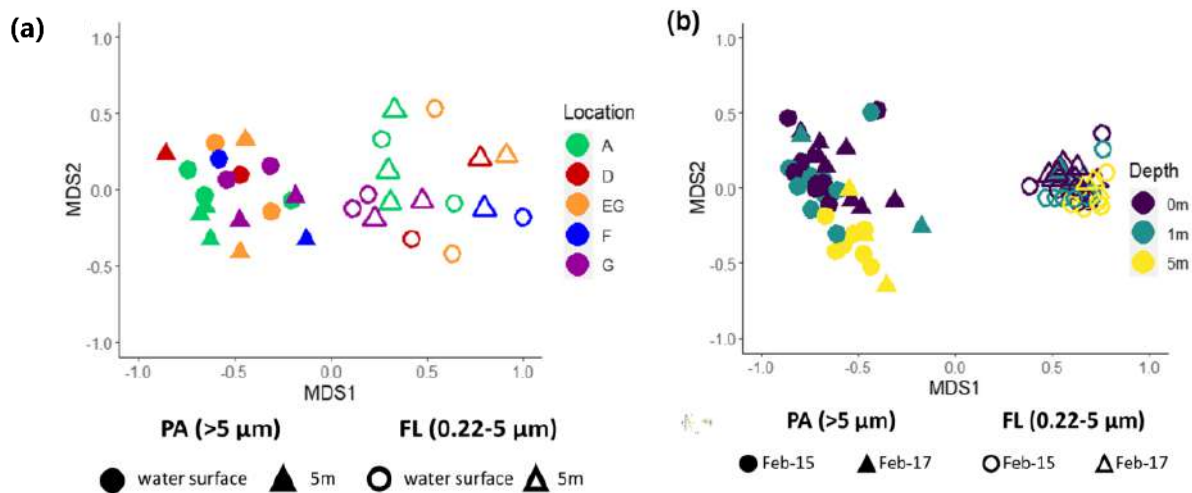
איור 75: פריחת מיקרוציסטיס בכנרת במהלך פברואר 2016. (a) מפת ריכוז כלורופיל המבוססת על תמונה מלוויין Landsat TM8 (באדיבות ג. טיבור). (b) ביומסה של מיקרוציסטיס (גרם משקל רטוב/מ"ר) וריכוז כלורופיל (mg/m^2), שנמדדו במרכז האגם תחנה A (הנתונים ממרכז הנתונים של אגם הכנרת) באדיבות ת. זהרי. החץ הכחול מציג את תאריך תמונת הלוויין בפנל a, החצים השחורים מראים את תאריכי הדיגום (c) צילום פריחה צפה של מיקרוציסטיס (d) מיקום אתרי הדיגום במסגרת המחקר המייצגים צפון (G) דרום (D) מזרח (EG) מערב (F) ומרכז האגם (A). גודל העיגולים מציג את הריכוז הנפחי של מושבות המיקרוציסטיס.

הרכב קהילת החיידקים ההטרורופיים שהוערכה באמצעות ריצוף הגן ל-16S rRNA הראה שונות מרחבית גדולה בין עומקי הדיגום, אתרי הדיגום ומועד הדיגום. נמצא הבדל גדול בהרכב הקהילה המיקרוביאלית הקשורה לחלקיקים הגדולים מ-5 מיקרון (PA) לבין ההרכב של חיידקים חופשיים (FL). קהילת ה-PA התאפיינה במגוון נמוך יחסית, ונשלטה על ידי פרוטאובקטריה, בעוד שקהילת ה-FL הייתה מגוונת יותר באופן משמעותי ונשלטה על ידי סוגים ממשפר קבוצות: פרוטאובקטריה, בקטרואידטים ואקטינובקטריה. השונות בהרכב הקהילה המיקרוביאלית נמצאה בקורלציה משמעותית עם מיקום גיאוגרפי ועומק הדיגום. עם זאת, לא נמצא קשר ברור בין צפיפות הביומסה של המיקרוציסטיס (נפח ביולוגי של תאים) לבין המבנה של הקהילות המיקרוביאליות (חיידקים הטרורופיים).

תוצאות המחקר שפורסמו לאחרונה ב-*Freshwater Biology** מצביעות על כך שבמהלך אירוע פריחה של מיקרוציסטיס בכנרת, מבנה קהילת החיידקים ההטרורופיים איננו קשור ישירות לצפיפות האוכלוסייה של מיקרוציסטיס, אלא מושפעים יותר מגורמים סביבתיים אחרים כגון טמפרטורה ו/או פרמטרים פיסיכוכימיים.

תוצאות מחקר זה מדגישות את החשיבות של מידע מרחבי על פריחה של ציאנובקטריה בכנרת ועל האוכלוסיות המיקרוביליות המלוות את הפריחה בשלביה השונים.

* Schweitzer-Natan O., Ofek-Lalzar M, Sher D, Sukenik A. 2023. The microbial community spatially varies during a Microcystis bloom event in Lake Kinneret. *Freshwater Biology*. 68:349-363. <https://doi.org/10.1111/fwb.14030>



איור 76: אפיון הרכב אוכלוסיית מיקרואורגניזמים ואוכלוסיות של חיידקים הטרוטרופיים במהלך אירוע של פריחת מיקרואורגניזמים בכנרת. (a) ניתוח NMDS של הרכב אוכלוסיות מיקרואורגניזמים מבוסס ריצוף אמפליקון של ה-ITS. (b) ניתוח NMDS של הרכב אוכלוסיות החיידקים ההטרוטרופיים מבוסס ריצוף אמפליקון של 16S rRNA.

3.6 גנים פונקציונאליים ודינמיקת תהליכי חמצון-חיזור בכמוקלינה הפלאגית של אגם הכנרת



בתמונה: מערכת דיגום והכמוקלינה הפלאגית. צילום: ורנר אקרט.

מחקר
במימון
ISF

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

- בסתיו, הכמוקלינה בכנרת מאופיינת בגרדיינטים חדים של ניטראט, ניטריט, מתאן ואמוניום.
- במהלך המעבר מתנאים אוקסיים לתנאים אנוקסיים, פוטנציאל החמצון-חיזור נותר גבוה בנוכחות ניטראט.
- כימות רמות הביטוי של הגנים *mcrA* ו- *pmoA*, הראה כי ריכוזי המתאן אשר נמדדו ברזולוציה גבוהה של 10 ס"מ, באים לידי ביטוי בפעילות המיקרוביאלית.
- נמשכת העבודה על כיול וכימות ביטוי הגנים הפונקציונאליים בדוגמאות.

מטרת המחקר

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

מטרות המחקר הספציפיות הן:

- ניטור במרחב ובזמן של התפתחות הכמוקלינה הפלאגית בכנרת.

- אפיון וכימות גנים פונקציונאליים עיקריים של האוכלוסיות המיקרוביאליות בכמוקלינה הפלאגית של הכנרת.
- אפיון וכימות גנים פונקציונאליים עיקריים של האוכלוסיה המיקרוביאלית (in vitro), בניסוי mesocosm, תחת תנאי חמצון חוזר מבוקרים ומעבר בניהם.

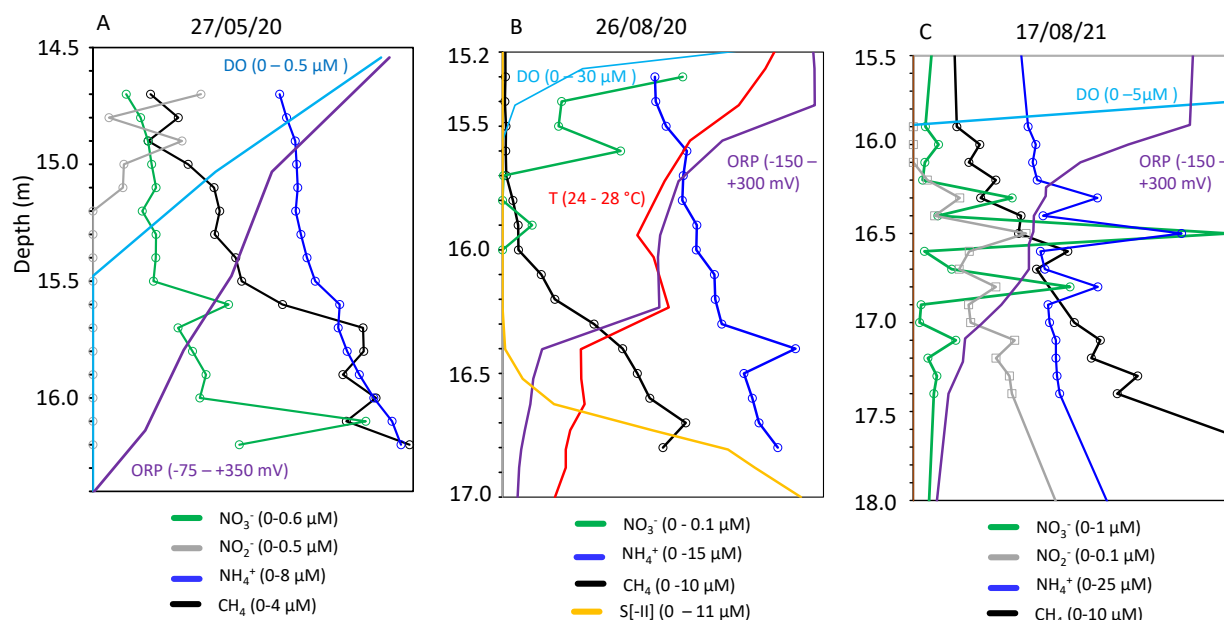
רקע

הכמוקלינה הפלאגית באגמים משוכבים תרמית, אשר מתווה את הגבול בין שכבות מים אוקסיות לאנוקסיות, מאופיינת בגרדיינטים כימיים חדים. התחרות אחר מקורות אנרגיה זמינות וכן אחר מקבלי אלקטרונים מתאימים, מובילה להיווצרות של שיכוב האוכלוסיות המיקרוביאליות ו/או של קבוצות חיידקים פונקציונאליות, בתוך אזור/שכבה צרה ומצומצמת. עם זאת, רצף האירועים והתהליכים הרגולטוריים אשר קובעים האם וכיצד מתרחשים שינויים בתנאים ההידרו-כימיים, אשר יכולים להוביל לתגובות תאיות, אינן מובנות. בכדי לבחון את ההתפתחות במרחב ובזמן של הכמוקלינה הפלאגית בכנרת, המחקר מכוון לבחון את יחסי הגומלין בין פעילות מיקרוביאלית ובין שינויים בתהליכי חמצון-חיזור. מטרתנו היא לזהות ולאפיין את הפעילות המטבולית של האוכלוסיות המיקרוביאליות המורכבות, לאורך המעבר מתנאים אוקסיים לאנוקסיים ולבחון את ההשפעה של המעבר בין תנאים אלו, על חיידקים ארופיליים. כל זאת כפונקציה של ריכוז מקבלי / מוסרי אלקטרונים וכן חדירת אור את עמודת המים. ההיפותזה שלנו היא כי שינויים בתנאי החמצון-חיזור בכמוקלינה הפלאגית, מקושרים לקבוצות גנים פונקציונאליים ספציפיים.

שיטות

- בכדי לבחון את ההיפותזה, עשינו שימוש בשילוב של ניטור in situ וכן דיגום ברזולוציה גבוהה, אשר תוזמנו ותואמו בהתאם לשיכוב הכימי של עמודת המים בכנרת:
- השיכוב הכימי של עמודת המים נוטר באופן רציף (במחזורים של 5-6 שעות), על ידי דוגם פרופיל אוטונומי רציף, אשר הופעל מה - Ecoraft. בנוסף, השתמשנו במהלך הדיגומים במולטי-פרוב, המצויד בסנסורים לעומק, סולפיד, פוטנציאל חמצון-חיזור (ORP), Temperature, ערך הגבה (pH) וחמצן מומס (DO).
 - בכדי לדגום את הכמוקלינה הפלאגית ברזולוציה גבוהה, השתמשנו ב - syringe sampler, אשר הכיל 16 מזרקים הדוגמים את עמודת המים במקביל, במרווחים/רזולוציה של 10 ס"מ. פתיחה וסגירה חוזרות ונשנות של המזרקים, באמצעות לחץ פנאומטי, בשילוב שסתומים חד כיווניים, אפשרה מילוי של שקיות הדיגום ב - 400 מ"ל מים. עומק הדיגום המדויק נקבע ע"י multiprobe, אשר חובר למעטפת ה - syringe sampler.
 - מכל שקית דיגום נלקחו 300 מ"ל לאנליזה מולקולארית של קבוצות גנים פונקציונאליים עיקריות. סינון מידי של המים בוצע בשטח (פילטרים 0.2µm), באמצעות מערכת סינון מותאמת, שכללה 16 משפכי סינון. 100 מ"ל נוספים מהדיגמה נלקחו למעבדה לקביעת ריכוזי מתאן (methane) מומס, באמצעות headspace analysis וכן עבור יונים עיקריים, באמצעות flow injection analysis.
 - DNA ו RNA מוצו מכל הפילטרים. לאחר בדיקת איכות ושלמות ה - RNA וביצוע Reverse Transcription ל - cDNA, נקבעו רמות הביטוי עבור מגוון גנים, באמצעות qPCR.

התכנית המדעית לשנת 2022 התרכזה באנליזות ה-RNA מהפילטרים השונים, אשר נאספו במהלך 17 הפלגות בין השנים 2021-2022. DNA ו-RNA מוצו סימולטנית מכלל הפילטרים (281 בסה"כ). מאלו, 266 הכילו ריכוזים מספקים של חומצות גרעין, לביצוע העבודה המולקולארית. איכות וכמות ה-RNA נבדקו באמצעות Tape-station bioanalyzer ונמצאו מספקים להמשך העבודה. בהסתמך על דפוסי השכוב הכימי, נבחרו שלושה פרופילים (איור 77). בתאריך ה- 27 למאי 2020, נצפתה אוקסיקלינה בעומק של 15.5 מטר. גרדיינטים של ניטריט, ניטראט, אמוניום ומתאן עבור פרופיל זה מוצגים באיור 77A.



איור 77: הצגת פרופילים כימיים אשר נדגמו ע"י דוגם פרופיל אוטונומי רציף, לצורך המשך העבודה המולקולארית. (A) 27 למאי 2020 (פרופיל II). (B) 26 לאוגוסט 2020 (פרופיל VIII). (C) 17 לאוגוסט 2021 (פרופיל XV).

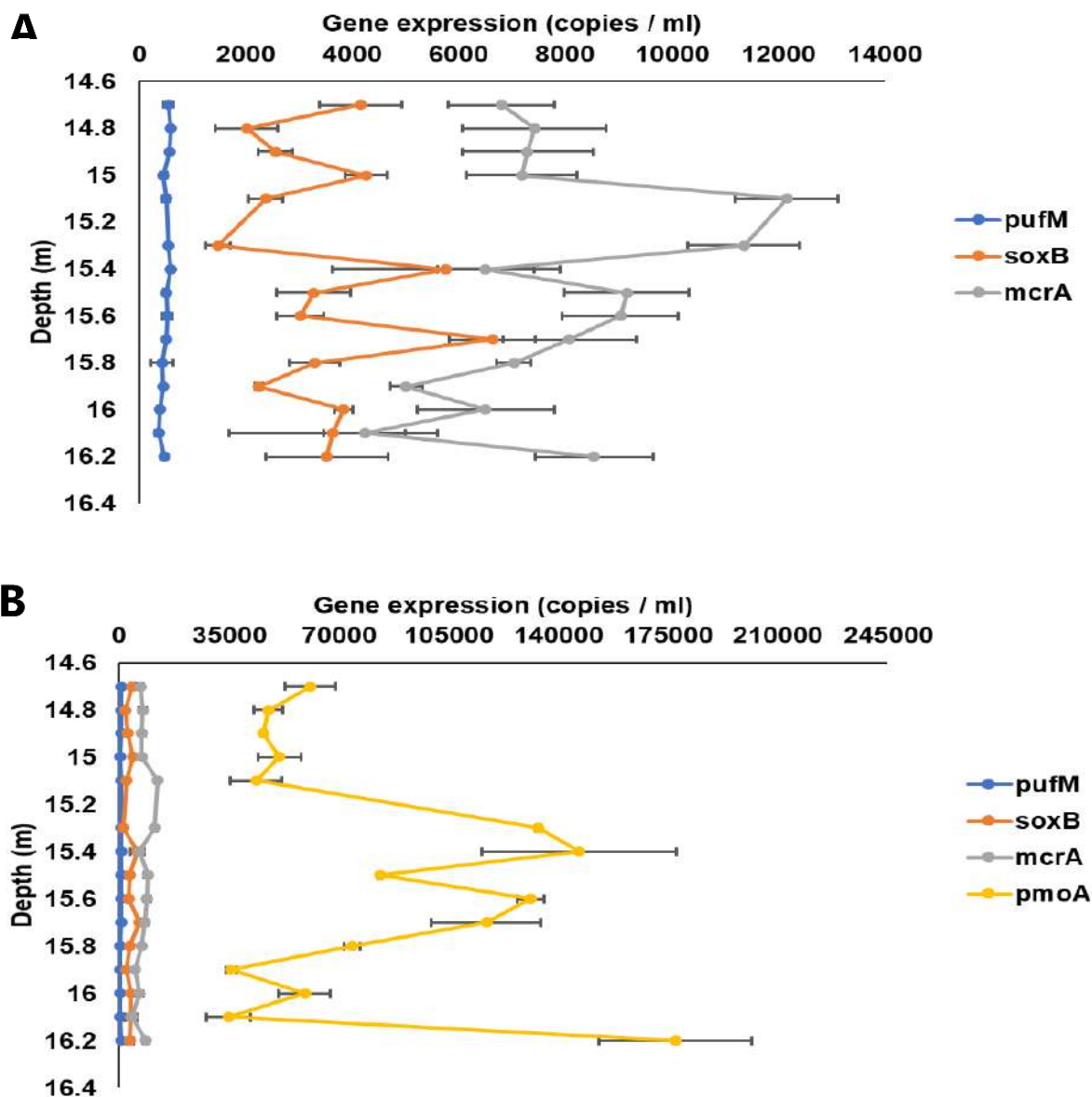
ניתוח גרדיינטים אלו, בשילוב עם היעדרות סולפיד עשוי להעיד על תהליכים של דה-ניטריפיקציה, ניטריפיקציה, אנמוקס וחמיצון מתאן. הפרופיל אשר נדגם ב- 26 לאוגוסט 2020 (איור 77B) מעניין, היות והוא מראה שני שלבי ORP (פוטנציאל חמצון-חיזור), הראשון מ- 300 ל- 150 mV בעומק 15.5 מטרים בחפיפה לאוקסיקלינה ושני מ- 150 ל- 140 mV בעומק 16.3 מטרים. מתחת לעומק זה, מתחילה הצטברות סולפיד. בין שני שלבים אלו, מתקיימת סביבה ללא נוכחות של חמצן וסולפיד, עם שני שיאים (peaks) קטנים של ניטראט. בנוסף, בהתבסס על גרדיינט המתאן, נראה כי ישנו חמצון של מתאן. היעדרו של סולפיד, ישירות מתחת לאוקסיקלינה, עשוי להעיד על anaerobic phototrophic sulfide oxidation. בפרופיל השלישי, אשר נדגם ב- 17 לאוגוסט 2021 (איור 77C) האוקסיקלינה והכמוקלינה חופפות בעומק 15.9 מטרים. בפרופיל זה מופיעים שלושה שיאים (peaks) מסתוריים של ניטראט בין 16.2 ל- 16.9 מטרים. אנו מצפים כי העבודה המולקולארית תעזור להבין תופעות בלתי מוסברות אלו. במהלך עבודת השדה, לא נבדקו רמות הסולפאט, היות והן אינן מהוות גורם מגביל במערכת. על אף שציפינו לראות חמצון סולפיד, רמות הביטוי של הגן הפונקציונאלי soxB (complex thiosulfate-oxidizing Sox enzyme), האחראי על פעולה זו, היו מאוד נמוכות. עם זאת, גופרית מתקיימת במצבי חמצון רבים וקיימים מגוון אורגניזמים רחב, היכולים לנצל אנזימים שונים לקצירת אנרגיה ממקור זה. לכן לא מפתיע כי אוכלוסיות החיידקים המסוגלות לחמצן גופרית הינן מגוונות גם כן (Luo et al., 2018). הודגם כי בקרב אוכלוסיות אלו קיימים גנים נוספים המעורבים בתהליך זה, בניהם dsrB ו-aprA (Luo et al., 2018;).

Müller et al., 2015) ולכן שני גנים אלו נכללים ברשימת הגנים אשר אנו מתכננים לבדוק את רמות הביטוי שלהם.

היות ורוב הדוגמאות שנאספו בשלוש הפרופילים מתאפיינות ברמות חמצן מאוד נמוכות, רצינו לבחון האם ישנן אוכלוסיות חיידקים המעורבות בפוטוסינטזה אנ-אוקסיגנית. הגנים *pufM* (anoxygenic photosynthetic reaction center, m subunit) ו- *bchY* (Chlorophyllide a reductase subunit Y), מעורבים בתהליך זה ומאפיינים קבוצות חיידקים שונות (Yutin2005; Yutin2009). לכן רצינו לבחון את רמות הביטוי שלהם. בניגוד להשערתנו, הגן *pufM* הופיע בכל הפרופילים ברמות ביטוי נמוכות בלבד. בשלב הבא נבדוק את רמות הביטוי של הגן *bchY*.

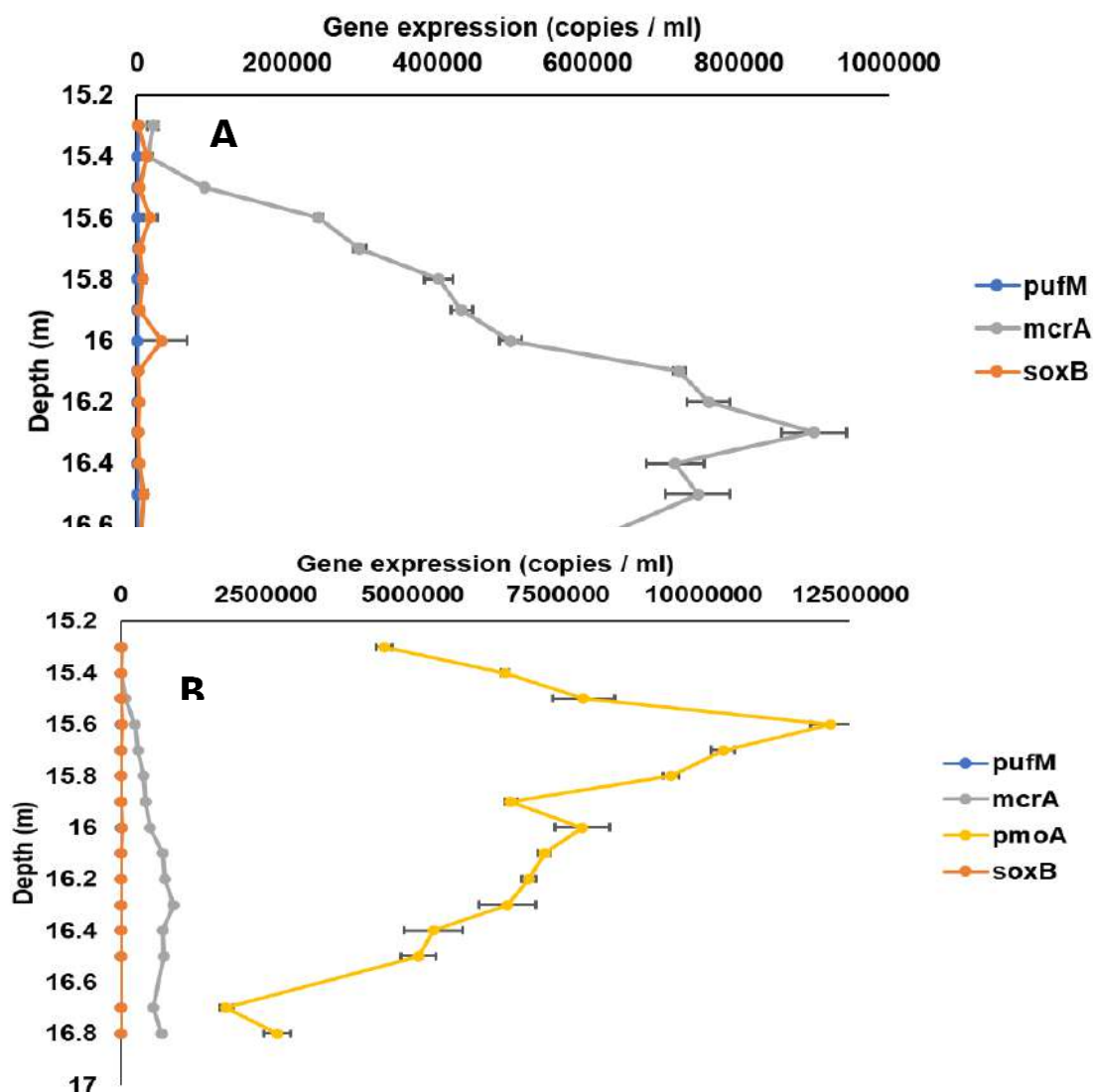
הגן *mcrA* (methyl co-enzyme A reductase) מעורב בייצור מתאן (מתנוגזה) על ידי ארכאה מתנוגניים בתנאים אנארוביים (Juottonen et al., 2006). לעומתו, הגן *pmoA* (particulate methane monooxygenase subunit) מעורב בחימצון מתאן ונמצא בארכאה מתאנוטרופים (Luesken et al., 2011). היות וגרדיינטים של מתאן נמצאו בכל שלוש הפרופילים שנבדקו ובשל התנאים האנארוביים שאפיינו את הדוגמאות, התמקדנו בשני גנים אלו.

פרופיל II (27 למאי 2020), אופיין בריכוזי מתאן נמוכים בין $0.72 \mu\text{g}$ ל- $3.95 \mu\text{g}$ (איור 77A). בהתאמה, רמות הביטוי של הגן *mcrA* וכן של הגן *pmoA* היו יחסית נמוכות גם כן; בהשוואה לשני הפרופילים הנוספים שנבדקו (איור 78A). רמות ביטוי הגיעו לשיא (peak) סביב עומקים של 15.1-15.3 מטרים, עם זאת רמות המתאן בעומקים אלו היו יחסית נמוכים. הסבר אפשרי לכך הוא שדפוסי ביטוי של שני הגנים היו דומים לכל אורך הפרופיל ולכן יתכן ורמות המתאן היו נמוכות בשל תהליכי חמצון מוגברות, כפי שבא לידי ביטוי ברמות גבוהות יותר של הגן *pmoA* (איור 78B).



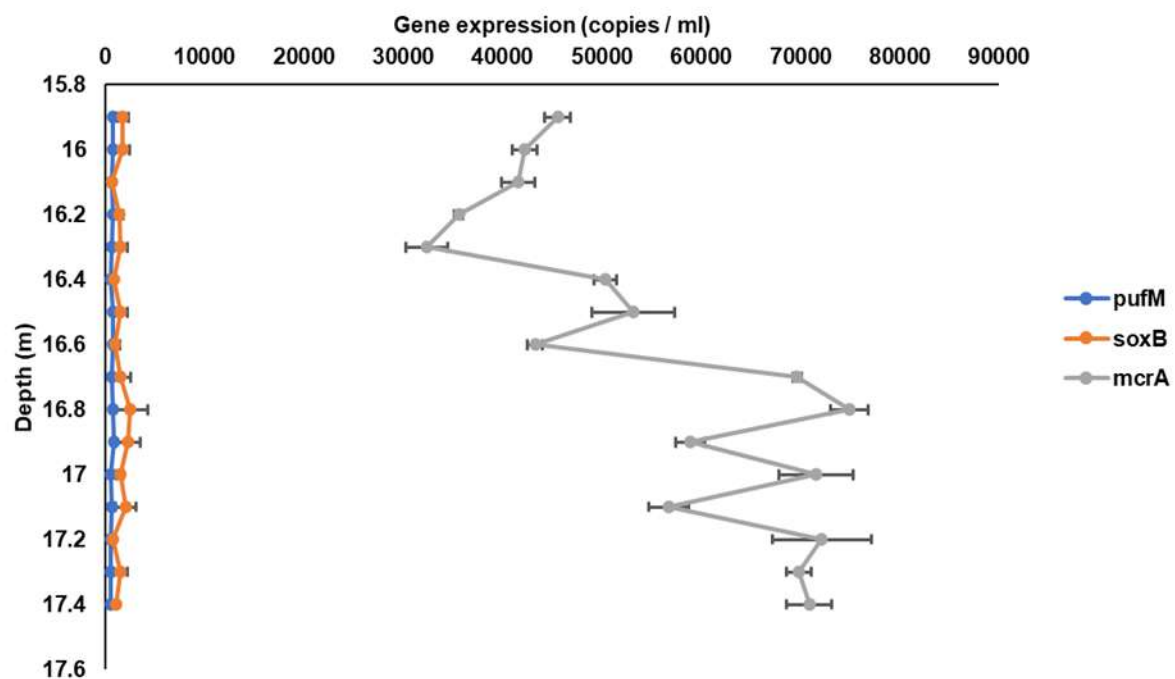
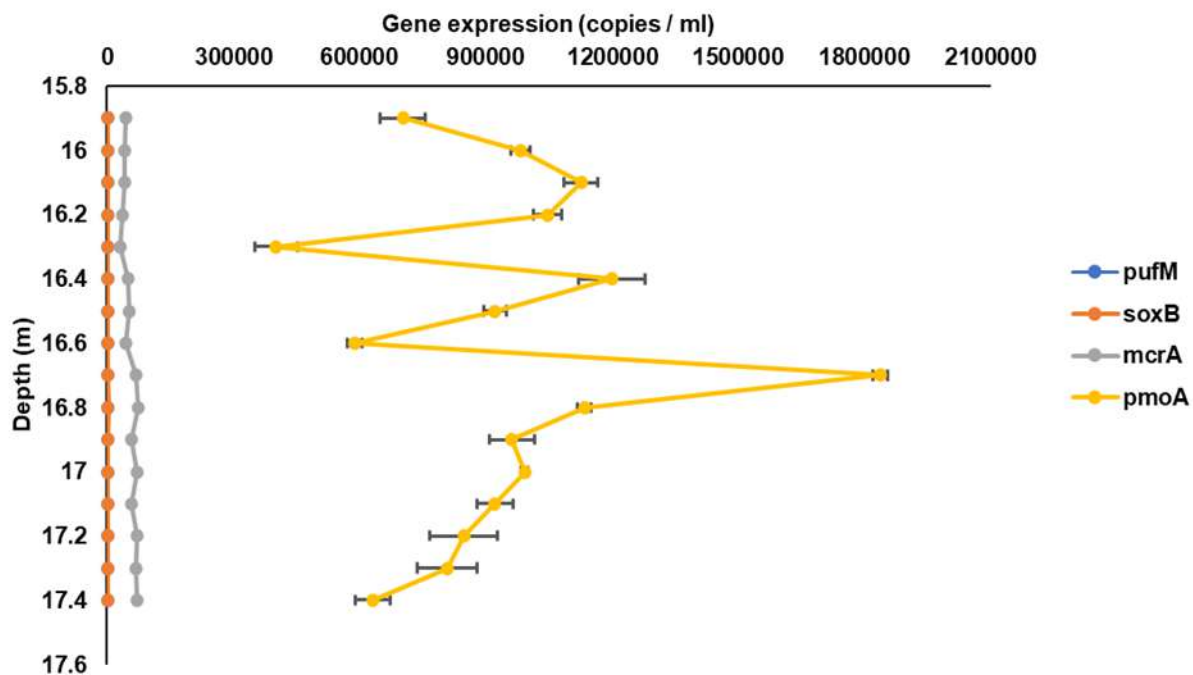
איור 78: רמות ביטוי הגנים (A) *pufM*, *mcrA* ו-*soxB* (B) בתוספת הגן *pmoA*, עבור פרופיל II (28 למאי 2020). רמות הביטוי מבטאות את מספר העותקים של הגן ב- 1 ml.

בעומקים 15.3-16 מטרים, בפרופיל VIII (26 באוגוסט 2020), רמות המתאן היו יחסית נמוכות ($0.07-0.49 \mu\text{M}$), איור 77B). עלייה חדה בריכוזים נצפתה בין העומקים 16-16.7 מטרים ($1.21-5.7 \mu\text{M}$). דפוס ביטוי דומה הודגם עבור הגן *mcrA* (איור 79A) והפוך עבור הגן *pmoA* (איור 79B). הריכוז הנמוך של מתאן בין העומקים 15.3-16.5 מטרים יכול להיות מוסבר ברמות הביטוי הגבוהות יחסית של *pmoA*. יתכן ומעבר לעומקים אלו, הירידה ברמות *pmoA* והעליה ברמות *mcrA* באות לידי ביטוי בעליה בריכוזי המתאן.



איור 79: רמות ביטוי הגנים (A) *pufM*, *mcrA* ו-*soxB* (B) בתוספת הגן *pmoA*, עבור פרופיל VIII (26 לאוגוסט 2020). רמות הביטוי מבטאות את מספר העותקים של הגן ב- 1 ml.

בפרופיל XV (17 לאוגוסט 2021), ריכוזי המתאן היו גבוהים יותר בהשוואה לשני הפרופילים הקודמים. עם העלייה בעומק, נצפתה עלייה עקבית בריכוזי המתאן מ- $1.35 \mu\text{M}$ ל- $7 \mu\text{M}$ (איור 77C). עלייה דומה נצפתה ברמות הביטוי של *mcrA* עד לעומק של 16.8 מטרים (איור 80A). עם זאת, רמות הביטוי של *mcrA* היו נמוכות יותר בהשוואה לפרופיל VIII ולכן אינן יכולות לבדן להסביר את העלייה בריכוזי המתאן. ניתן להסביר סתירה זו ברמות הביטוי הנמוכות יחסית, שניצפו עבור הגן *pmoA* (איור 80B).



איור 80: רמות ביטוי הגנים (A) pufM, mcrA, ו-soxB (B) בתוספת הגן pmoA, עבור פרופיל XV (17 לאוגוסט 2021). רמות הביטוי מבטאות את מספר העותקים של הגן ב- 1 ml.

בעבודה זו אנו מראים, על ידי שימוש בגנים הפונקציונאליים *mcrA* ו- *pmoA*, כי שינויים בריכוזי המתאן, ברזולוציה גבוהה של 10 ס"מ, משתקפים בתפקוד המיקרוביאלי. ניתוח השינויים ברמות הביטוי של שני גנים אלו, יכול להסביר את השינויים הריכוזי המתאן בפרופילים שנבדקו. במטרה לנתח את הרכב ומבנה האוכלוסייה המיקרוביאלית הקשורה לתפקוד זה, אנו מתכננים בשלב הבא לבצע *amplicon-based sequencing*, המכוון לגנים הפונקציונאליים *mcrA* ו- *pmoA*. לבסוף, אנו מתכננים להרחיב את ההתבוננות לתהליכים וגנים נוספים ולביצוע אנליזה דומה לדד-ניטריפיקציה (*napA* ו- *nirS*, *nirK*, *norB*, *narG*), ניטריפיקציה (*Bacterial and Archaeal amoA*) חמצון גופרית (*dsrB*) ו- *aprA*, *ANAMMOX* (*hzsA* ו- *hzsB*) ופוטוסינטזה אנ-אוקסיגנית (*bchY*).

ספרות

- Luo, J., Tan, X., Liu, K., & Lin, W (2018) Survey of sulfur-oxidizing bacterial community in the Pearl River water using *soxB*, *sqr*, and *dsrA* as molecular biomarkers. *3 Biotech*, 8(1), 1-12.
- Müller, A. L., Kjeldsen, K. U., Rattei, T., Pester, M., & Loy, A (2015) Phylogenetic and environmental diversity of DsrAB-type dissimilatory (bi) sulfite reductases. *The ISME journal*, 9(5), 1152-1165.
- Yutin, N., Suzuki, M. T., & Béja, O (2005) Novel primers reveal wider diversity among marine aerobic anoxygenic phototrophs. *Applied and environmental microbiology*, 71(12), 8958-8962.
- Yutin, N., Suzuki, M. T., Rosenberg, M., Rotem, D., Madigan, M. T., Süling, J., ... & Béja, O (2009) BchY-based degenerate primers target all types of anoxygenic photosynthetic bacteria in a single PCR. *Applied and environmental microbiology*, 75(23), 7556-7559.
- Juottonen, H., Galand, P. E., & Yrjälä, K (2006) Detection of methanogenic Archaea in peat: comparison of PCR primers targeting the *mcrA* gene. *Research in Microbiology*, 157(10), 914-921.
- Luesken, F. A., Zhu, B., van Alen, T. A., Butler, M. K., Diaz, M. R., Song, B.,... & Ettwig, K. F. (2011) *pmoA* primers for detection of anaerobic

3.7 השפעת שינויי אקלים על האקולוגיה של הכנרת



צילום: גיל פיטוסי

מחקר
במימון
משרד
המדע

שחר רגב, גדעון גל, בשיתוף יוחאי כרמל (הטכניון) ודירק שלבינג (אוניברסיטת שטוטגארט)

- זהו מחקר מקיף ראשון הבוחן את השפעת שינויי אקלים על האקולוגיה של הכנרת.
- המחקר בוחן, באמצעות סימולציות של חבר מודלים ומימושים רבים לתרחישי התחממות אקלים, את השפעת התרחישים על האקולוגיה של הכנרת.
- התחממות צפויה לגרום לירידה בחמצן המומס ולגרום לשינויים בתהליכים הביוגיאוכימיים הצפויים להיטיב עם שתי קבוצות הציאנובקטריה ולהמשך פגיעה בדינופלגלטים.

מטרת המחקר

בחינת השפעת שינויי אקלים על האקולוגיה של הכנרת, זיהוי האלמנטים של המערכת האקולוגית, הרגישים לשינויי אקלים לצורך ביצוע פעולות לשיפור, שימור וניהול של שירותי המערכת של הכנרת. כמו כן, יבחן החוסן להפרעות חולפות של גלי חום חרימות שיטפונות וללחצים מתמשכים של עליית טמפרטורה ובצורות. בנוסף לכך, יבחן האם קיימת נקודת מפנה שמעבר לה תשתנה המערכת האקולוגית של הכנרת.

שינויי אקלים צפויים להיות חריפים במיוחד במזרח התיכון – ירידה בכמות המשקעים, עליה בטמפרטורות ועליה בתדירות ועצמת גלי חום ואירועי גשם חריגים. השינויים צפויים להשפיע על הדינמיקה של המערכת האקולוגית בכנרת על-ידי שינוי כמות ואיכות המים ובכך לגרום לאיבוד מאפיינים אקולוגיים של האגם ולפגוע בשירותי המערכת שלו. טמפרטורות גבוהות יגרמו לעליית טמפרטורת המים תוך השפעה ישירה על החי והצומח השונים וכן על עומק ותקופת השיכוב אשר יגרמו לשינוי בזמינות הנוטריינטים. ישנה אי-ודאות לגבי מידת ההשפעה ואופן ההשפעה של חלק מהתהליכים מכיוון שהמערכת האקולוגית מורכבת וקשה לחזוי. להבנת התהליכים יש חשיבות רבה לניהול האגם הן בהיבט שינוי אקלים והן בשאלות אחרות.

מודלים מאפשרים לבצע ניסויים וירטואליים על-ידי הצבת תנאי שפה עתידיים ויצירת תחזיות שיכולות לסייע בניהול מערכות אקוויטיות לאור שינויי האקלים. אלא שמערכות אקולוגיות של אגמים מכילות אינספור תהליכים וכתוצאה מכך חזוי השפעת שינויי אקלים טומן בחובו מגוון אי-ודאויות. אי-ודאות אחת קשורה לשינוי האקלים עצמו. לא רק שתרחיש שינוי אקלים אינו ודאי אלא שהביטוי שלו בחלוציה עיתית ומרחבית הנדרשת למודלים של אגמים מכילה אי-ודאות גדולה. מקור נוסף של אי-ודאות נובע מהמודלים. בשל אופיים המורכב של מערכות אקולוגיות של אגמים, במיוחד התהליכים הביו-גיאוכימיים, לא ניתן לתאר תהליכים אלה במלואם במשוואות המודל, ולכן נעשות הפשטות, וזה מקור מרכזי לאי-דיוק ואי-ודאות במודל. בכדי לטפל באי-ודאות שנובעת ממודלים אקלימיים וגם לפתור את הפער שבין פלט של מודלים אקלימיים לקלט הנדרש על-ידי מודלים של אגמים, ניתן להשתמש במחולל מזג אוויר (weather generator). מחולל מזג אוויר הינה תוכנת מחשב המייצרת סדרות זמן סינטטיות הדומות לתנאים מטאורולוגיים מציאותיים. סדרות זמן מטאורולוגיות אלו נקראות להלן מימושים של תרחיש אקלים. מודל האגם מופעל תוך שימוש בכל אחד מהמימושים הללו כתנאי שפה, ומייצר תחזיות רבות המאפשרות להעריך את אי-הודאות הנובעת משונות מזג האוויר.

יישום מספר מודלים שפותחו באופן עצמאי על אותו אגם, כלומר גישת חֶבֶר מודלים (Ensemble modelling), יכולה להפחית חלק מאי-הודאות המובנית בתחזיות מודל בודדות על ידי העברת הממוצע והטווח של התחזיות. שימוש בחֶבֶר מודלים משפר את התחזית, נותן הבנה טובה יותר של אי-הודאות המובנית במודלים ומאפשר השוואה של תהליכים אקולוגיים המודגמים בצורה שונה.

זהו המחקר המקיף הראשון של השפעת שינויי האקלים על המערכת האקולוגית של אגם הכנרת ומהווה מחקר המשך למחקר ראשוני בנושא (Gal et al. 2020). המחקר הנוכחי מתמודד באופן ייחודי עם אי-ודאות תחזיות המודל על ידי שילוב חֶבֶר מודלים ושימוש במימושים רבים של תרחישי שינוי אקלים ובכך מגביר את אמינות התחזיות.

שיטות

תרחישי האקלים יושמו על חֶבֶר של שני מודלים הידרודינמיים-ביוגיאוכימיים חד-מימדיים שכוילו לכנרת: DYRESM-CAEDYM כויל לפני קרוב לעשרים שנה ו- GOTM-WET כויל במסגרת מחקר זה ועבר וולידציה נרחבת (Regev et al. 2023). המבנה הביזיטי בשני המודלים כולל חמש קבוצות של פוטופלנקטון ושלוש קבוצות זואופלנקטון. תנאים מטאורולוגיים נוצרו על ידי מחולל מזג אוויר (WeatherCop) המתואר בקצרה בהמשך. נתונים מטאורולוגיים כללו סדרות זמן שעתיות של טמפרטורת אוויר, מהירות רוח, לחות, לחץ ברומטרי, קרינת גלים קצרים ומשקעים יומיים. משקעים שנוצרו על ידי WeatherCop בתחנות המטאורולוגיות כנען, כפר-בלום ומרום גולן, תורגמו לזרימות בירדן על-ידי מודל הידראולי. המודל ההידראולי פותח על בסיס מודל HYMKE (Rimmer and Salinger 2006) והותאם לקלט משקעים משלוש תחנות מטאורולוגיות וליצירה של ספיקת הירדן. המודל כויל באמצעות נתונים יומיים מתחנות הידרומטריות הממוקמות במורד נהר הירדן

בין אוקטובר 1989 לפברואר 2021. מדדי התאמת המודל היו $R^2=0.8$ ו- $KGE=0.89$ לכל התקופה. הזרימה הכוללת לאורך כל 30 השנים הייתה עם טעות של 0.7%. תנאי השפה של המודלים כללו זרימות יומיות וחומרי הזנה מהנחלים שנגזרו מהמודל ההידראולי. שאיבות מהכנרת חושבו מתוך הנחה שמפלס האגם ינוהל בתרחישים עתידיים בטווח מצומצם יחסית.

תוצאות המודלים ניתנות לפי עומק בצעדי זמן יומיים. הניתוח של טמפרטורת המים, חמצן, זרחן, אמוניום וניטראט צומצמו לערכי אפילימניון (מעל 11 מטר) והיפולימניון (מתחת ל-21 מטר) ממוצעים. חושבו מאפייני השיכוב זמן שהות. ביומסה של פיטופלנקטון חואופלנקטון מחושבת כמשקל יבש באפילימניון. הניתוח כלל גם יצרנות ראשונית, נשימה קהילתית, קיבוע חנקן ודה-ניטריפיקציה וכן חישוב של מדד הקיימות של הכנרת, KSI, (Gal and Zohary 2017) ביחס לתרחיש ללא שינוי.

מחולל מזג האוויר WeatherCop משתמש בכלים סטטיסטיים ומתמטיים שונים כגון אוטורגרסיה, התפלגויות תאורתיות, סדרות פורייה והערכת צפיפות גרעין (Kernel density) על-מנת ליצור סדרות זמן שעתיות של תנאים מטאורולוגיים (Schlabing et al. 2014). שלושה תרחישי אקלים הוכנו באמצעות WeatherCop (טבלה 12). תרחיש ללא שינוי מבוסס על נתונים מטאורולוגיים שעתיים המשתרעים בין השנים 1990 עד 2020 מארבע תחנות באגן הכנרת, שהתקבלו מהשירות המטאורולוגי ו- ERA5 reanalysis. שני תרחישי עליית טמפרטורה הדרגתית מבוססים על התרחיש ללא-שינוי תוך אילוף עלית טמפרטורה הדרגתית. הטמפרטורה משפיעה על משתנים מטאורולוגיים אחרים לפי הקשרים שנמצאו על-ידי WetherCop. לכל תרחיש נוצרו אלף מימושים. המימושים משתרעים על פני 50 שנה, החל מה-1 באוקטובר 2019 (תחילת השנה ההידרולוגית). שני המודלים הופעלו החל מה-1 בפברואר 2020, כאשר עמודת המים מעורבת, כך שההרצה הכוללת של המודלים הייתה למשך 49 שנים.

טבלה 12: תרחישי שינוי האקלים.

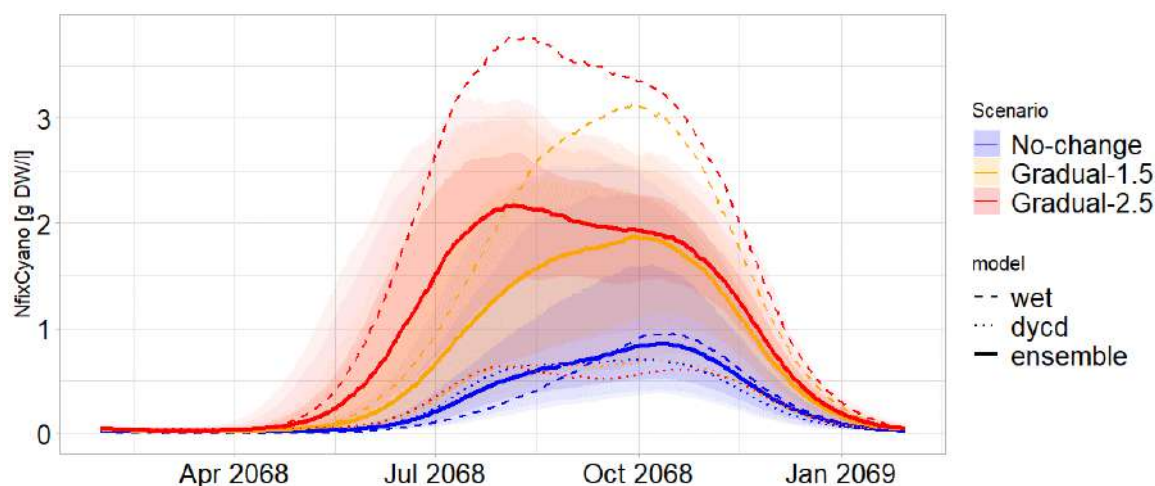
תרחיש	תיאור
No-change	תרחיש ללא שינוי ביחס לתקופה 1990-2020
G1.5	עליית טמפרטורה הדרגתית של 1.5 מעלות על-פני 50 שנה. שקול לתחזית RCP2.6
G2.5	עליית טמפרטורה הדרגתית של 2.5 מעלות על-פני 50 שנה. שקול לתחזית RCP8.5

תוצאות

מהפקת התרחישים על-ידי WeatherCop עולה שעם עליית הטמפרטורה צפויה ירידה במשקעים ובהתאם לכך ירידה בזרימות הידרן ובכמות הנוטריינטים המובלים אל הכנרת, למשל ירידה של 26% בזרחן כללי ושל 16% בחנקן כללי בשנה האחרונה של ההרצה בתרחיש 1.5G. עד סוף תקופת הריצה, טמפרטורת האפילימניון עלתה ב- 1°C ו- 1.9°C ב- G1.5 ו- G2.5, בהתאמה, וטמפרטורת ההיפולימניון מטפסת קצת יותר ב- 1.1°C ו- 2.1°C בסוף תקופת הריצה. המודלים העריכו כי האגם יהיה משוכב 300 ימים בשנה בתרחיש ללא שינוי ומתארך רק ב-3.5 ימים עד סוף תקופת הריצה ב-G2.5 אך הסיכויים לשנה ללא ערבוב עולים מ-0.7% ל-1.4%. עומק התרמוקלינה הממוצע יורד בחצי מטר ב-G2.5 עד סוף תקופת הריצה. מבחינת הגיאוכימיה, ריכוז החמצן המסיס יורד ככל שעולה הטמפרטורה ומשך תקופת האנוקסיה בהיפולימניון מתארך. משך האנוקסיה גורם להצטברות גדולה יותר של זרחן בהיפולימניון שמגיע לאפילימניון לאחר ההיפוך.

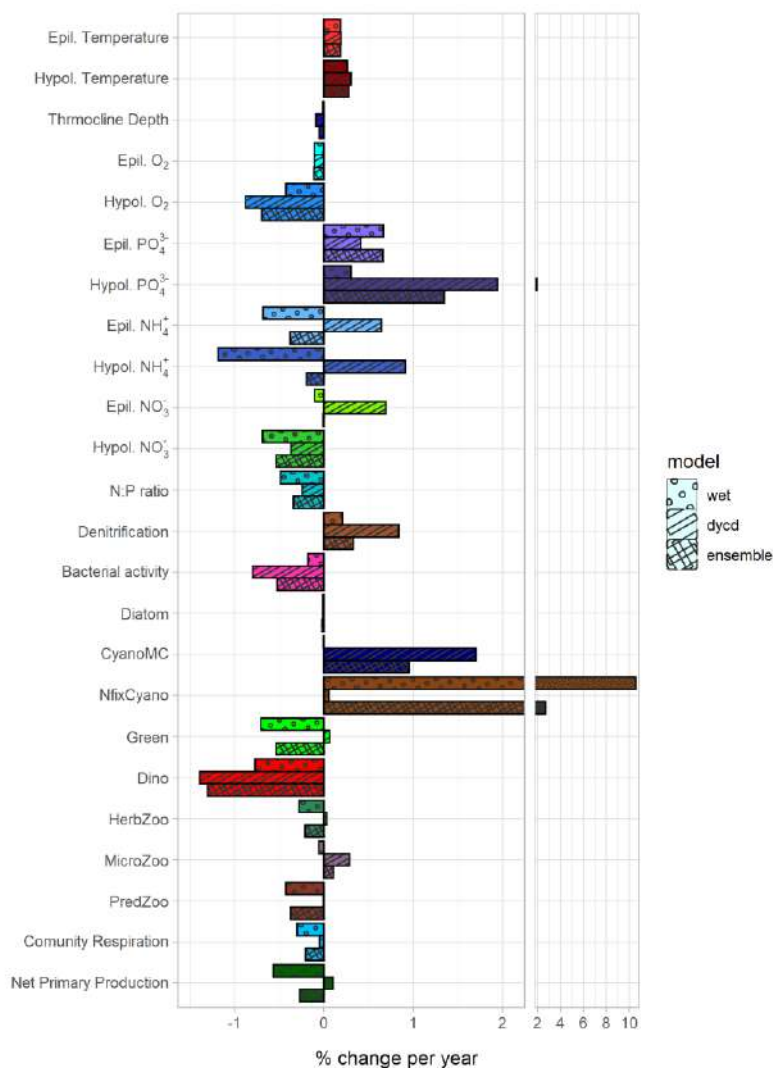
כל המגמות הללו נתמכו על-ידי שני המודלים. לגבי אמוניום וניטראט נמצאה אי הסכמה בין המודלים. אמנם שני המודלים מראים את אותו דפוס עונתי אך מודל WET מראה כי ריכוזי אמוניום וניטראט קטנים עם עליית הטמפרטורה בעוד DYCD מראה מגמה הפוכה. המגמה במודל WET מהירה יותר ולכן חבר המודלים מראה

ירידה בריכוז. משך הזמן בו יש ריכוז נמוך של אמוניום באפילימניון מתארך ב- 20 ו- 41 יום ב- G1.5 ו- G2.5 בהתאמה. על-פי שני המודלים יחס N:P צפוי לרדת אך הדפוס העונתי שונה בין המודלים. השפעת ההתחממות על הרכב קבוצות המינים בולט במיוחד בקבוצות הציאנובקטריה. פריחות הקיץ של ציאנובקטריה מקבעת חנקן צפויות להכפיל את הביומסה שלהם ב- 2068 על-פי תרחיש G2.5, להקדים ולהאריך את עונת הפריחה (איור 81).

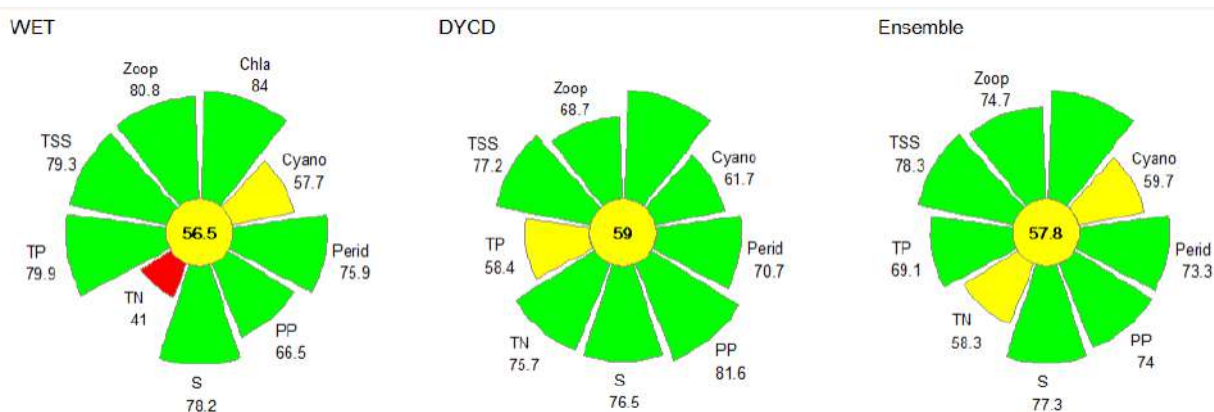


איור 81: תחזית לביומסה של ציאנובקטריה מקבעת חנקן בשנה האחרונה של הרצת המודל. הצללים ברקע מציינים 50%, 80% ו- 90% מהשונות של חבר המודלים עקב 1000 המימושים השונים. פריחת ציאנובקטריה צפויה לגדול ולהמשך על-פני זמן רב יותר.

גם פריחות המיקרואיסיטים צפויות להתגבר. פריחות הדינופלגלטים צפויות להיחלש. אי ההסכמה בין המודלים ביחס לחנקן מובילה להבדלים בחיזוי בקבוצת הירוקיות ובהתאמה לכך הבדל ביצרנות הראשונית ובקבוצות הזאופלנקטון השונות – בכל אלו השינויים מעליית הטמפרטורה צפויים להיות קטנים יחסית. אחוז השינוי בתרחיש G2.5 ביחס לתרחיש ללא שינוי חושב עבור כלל המשתנים ומוצג באיור 82.



איור 82: אחוז שינוי לשנה בתרחיש G2.5 ביחס לתרחיש ללא שינוי. בנוסף לעוצמת השינוי ניתן להבחין בקלות באיזה משתנים יש הסכמה בין המודלים. שימו לב לסקאלה השונה עבור ציאנובקטריה מקבעת חנקן.



איור 83: מדד הקיימות של הכנרת (KSI) בשנה האחרונה של הרצת המודל בתרחיש G2.5. דירוג < 60 בצבע ירוק, 60 ≤ דירוג < 50 - צהוב ודירוג > 50 בצבע אדום.

שינוי האקלים צפוי לגרום לעליית טמפרטורת המים ושינויים קלים בתכונות השיכוב. ירידה בחמצן הרווי צפויה בעיקר בהיפולימניון דבר שיגרום לשינויים בתהליכים הביוגיאוכימיים ובעקבותיהם שינויים בהרכב הקבוצות הביוטיות. עליית הטמפרטורה וירידה ביחס N:P צפויים להיטיב עם שתי קבוצות הציאנובקטריה – מקבעות החנקן בקיץ והמיקרוציסטיס בחורף.

ההבדלים בין המודלים מתבטאים בחיזוי האמוניום. מחזור החנקן הוא מורכב והמודלים מפשטים אותו במידה רבה ולכן לא מדויקים וגורמים גם להבדל בין המודלים. כתוצאה מאי ההסכמה בחיזוי ריכוז האמוניום, אי הסכמות קיימות גם בחיזוי הניטראט באפילימניון, מגמות בקבוצת הירוקיות שרגישות לזמינות החנקן והאזופלנקטון הצמחוני שניזון בעיקר מהירוקיות. מומלץ לבצע מחקר המשך בנושא השפעת הטמפרטורה על ריכוזי האמוניום כדי להבהיר איזו מגמה בעלת סבירות גבוהה יותר להתרחש.

הרצת המודלים על אלף מימושים אפשרה להבחין במגמות הרב שנתיות שלעיתים לא ניתן להבחין בהם עקב השונות הרבה בין השנים, אפשרה לבדוק תכונות שנתיות בוודאות הרבה יותר גבוהה (במקום 49 נתונים – 49,000 נתונים). למשל אפשרה להעריך מה הסיכוי לשנים ללא ערבוב. שימוש בחבר מודלים נותן ודאות רבה יותר במגמות המודל במשתנים בהם הייתה הסכמה בין המודלים וממקד את אי הודאות במשתנים עליהם יש אי-הסכמה בין המודלים. בדיקה מקדימה של חבר המודלים אל מול תצפיות בשנים 1997-2020 הראתה שחבר המודלים נותן בדרך-כלל תוצאה טובה יותר מאשר כל מודל בנפרד, ובפרט בחיזוי האמוניום, דבר שמחזק את הודאות בתוצאות חבר המודלים.

השינויים הצפויים במשקעים ורוחות נגזרו מתוך קשרים סטטיסטיים בתצפיות הקיימות בין טמפרטורה לבין שאר המשתנים. יתכן ושינוי האקלים לא ישמר את הקשרים האלו ולכן יש בהנחה הזו מקור לאי-ודאות נוספת. החיסרון המרכזי בהרצת אלף תרחישים של 50 שנה על שני מודלים הוא זמן החישוב הנדרש. השימוש במודלים חד-מימדיים מאפשר זאת אך שימוש במודלים תלת-מימדיים ידרשו משאבי חישוב חזקים בשני סדרי גודל.

ספרות

- Gal G, Zohary T (2017) Development and application of a sustainability index for a lake ecosystem. *Hydrobiologia* 800:207–223. doi: 10.1007/s10750-017-3269-1
- Gal, G., et al. (2020). "Ensemble Modeling of the Impact of Climate Warming and Increased Frequency of Extreme Climatic Events on the Thermal Characteristics of a Sub-Tropical Lake." *Water* 12(7): 1982.
- Regev S, Carmel Y, Gal G (2023) Using High Level Validation to Increase Lake Ecosystem Model Reliability. *Enviromental Model Softw* 162:105637. doi: 10.2139/ssrn.4135644
- Rimmer A, Salinger Y (2006) Modelling precipitation-streamflow processes in karst basin: The case of the Jordan River sources, Israel. *J Hydrol* 331:524–542. doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.06.003
- Schlabing D, Frassl MA, Eder MM, et al (2014) Use of a weather generator for simulating climate change effects on ecosystems: A case study on Lake Constance. *Environ Model Softw* 61:326–338. doi: 10.1016/j.envsoft.2014.06.028

3.8 יערות אשלים מוצפים – בית גידול חדש בכנרת



בתמונה: ה"אגמית" בדיגום ביער האשלים שמול המעבדה לחקר הכנרת, אפריל 2020

**מחקר
במימון
רשות
המים**

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

- לבית הגידול בינות אשלים מוצפים באופן רציף דינמיקה טיפוסית של שלושה שלבים על ציר הזמן: שלב א' – תנאי קיצון של היפוקסיה עד אנאוקסיה, למשכי זמן שמשותנים ממקום למקום, כתלות בצפיפות העצים ובמיקומם יחסית לרוח, בית הגידול לא מתאים לדגים בגלל המחסור בחמצן. שלב זה מתאפיין בפלורה ופאונה שונים מהמוכר בכנרת. שלב ב' – דעיכת תנאי הקיצון תוך התדלדלות היער ומעבר לתנאים פסיקליים וכימיים כמו בחופים ללא אשלים ושלב ג' המתאפיין בשלדי עצים מזדקרים מהמים.
- בשלבים ב' ו- ג', בהם נמצאו רוב חופי הכנרת (מלבד הבטיחה) רוב הזמן, בית הגידול מנוצל על ידי דגים, למחייה, קינון ואימון דגים.
- אנו ממליצים שבכל חלקת חוף סביב הכנרת יוגדרו/ו מקטעים לשימור טבעי שממנו/מהם יסולקו מדי שנה נבטי אשלים בכדי לאפשר התבססות צמחייה רכה.

מטרות המחקר

- (1) ללמוד, לאפיין ולהבין את בית הגידול החדש שנוצר בינות אשלים מוצפים, כמרכיב במערכת האקולוגית של הכנרת. (2) להמליץ על ממשק מיטבי של אשלים ברצועת תנודות המפלס.

עקב נידח הולך וגובר של מפלסי הכנרת התפתח בעשורים האחרונים בשולי הכנרת בית גידול אקוטי שלא היה קיים בה בעבר: אזורי חוף חשוף נרחבים התכסו ביערות אשלים, שהוצפו כשהמפלס עלה ונעשו חלק מאזור הליטורל באגם. התפתחות יערות האשלים החלה באזור הבטיחה בתקופת מפלס המינימום של 2001, והתפשטה מאוחר יותר (החל מתחילת עד אמצע עשור ה-2010) ביתר חופי הכנרת. מחקרים קודמים הראו שאשלים מוצפים בצפיפות נמוכה או בינונית משמשים את הדגה באגם, וחשובים להצלחת הרבייה. לגבי סביבת אשלים בצפיפות גבוהה - היו חסרים נתונים. במקביל, האשלים מסתירים את נוף האגם, יוצרים בעיות נגישות, ומקשים על תפעול חופים תיירותיים. רשות המים מקבלת בקשות ממפעלי חופים ומתושבי סובב כנרת לאשר סילוק של סבך הצמחייה מקו החוף שלהם.

מכיוון שיערות אשלים מוצפים מהווים בית גידול חדש בכנרת, מעט ידוע על בית גידול זה. המחקר הנוכחי בא לצמצם פערי ידע על ידי אפיון בית הגידול של יער אשלים מוצף (איסוף נתונים פסיקליים, כימיים וביולוגיים), ולענות על שאלות ממשקיות הקשורות ליער זה. בשנת המחקר הראשונה, 2020, התחלנו בדיגום חודשי מסירה בשני אתרי יערות אשלים מוצפים, (מול המעבדה לחקר הכנרת ובבטיחה) ובאתר ביקורת ללא אשלים, ובביצוע אנליזות במעבדה. ב-2021 המשכנו בדיגום החודשי, הוספנו שני סקרים של יערות אשלים סביב הכנרת כולה (14 אתרים בכל סקר), וביצענו השוואה של תכולת הזרחן בסדימנטים באזורים עם/בלי אשלים. את שנת המחקר השלישית והאחרונה הקדשנו למידול ולאניטגרציה של הידע והניסיון אשר הצטברו במהלך המחקר. נדגיש שמחקר זה עוסק רק ביערות שהוצפו, ולא ביערות הקיימים מחוץ למים. מכיוון שבשנים 2020-2022 מפלס הכנרת היה גבוה (מעל 210.8 - מ') באופן רציף, הייתה לנו הזדמנות לעקוב אחר יערות מוצפים לאורך 3 שנים מלאות.

תוצאות ודיון

אחרי רצף של 5 שנים שחונות, בנובמבר 2018 מפלס הכנרת ירד למינימום של 214.65 - מ', מפלס שלא נרשם כמותו מאז 2001. חורף 2018/19 היה חורף גשום ועד מאי 2019 מפלס הכנרת עלה ב- 3.4 מ', למקסימום של 211.22 - מ'. בחורף זה הוצפו לראשונה חלקים נרחבים מיערות האשלים שהתפתחו ברצועת תנודות המפלס בשנים השחונות, אבל לא אלו שברום גבוה יותר. חורף 2019/20 היה חורף גשום שני ברצף ובמהלכו מפלס הכנרת המשיך לטפס והגיע למקסימום של 208.92 - מ', קרוב לקו האדום העליון. בחורף זה ובאביב שבעקבותיו הוצפו גם האשלים שלא הוצפו שנה קודם לכן. במהלך שלושת שנות המחקר, 2020-2022, מפלס הכנרת נשאר כל הזמן מעל 210.85 - מ' כך שהאשלים שהוצפו לראשונה ב-2019 או 2020 - נשארו מוצפים באופן רציף 3-4 שנים.

יערות אשלים ברצועת תנודות המפלס

אשלים נובטים מזרעים ומתפתחים בחופים חשופים כשהמפלס יורד והקרקע לחה, דהיינו הם לא נובטים/מתפתחים בתוך המים. הנבטים מתפתחים אם הם לא מוצפים בשנתם הראשונה (הצפה ממיתה אותם). תוך 3-4 שנים של גידול מחוץ למים הם גדלים לעצים ומתפתחים ליער צפוף וסבוך. אם וכאשר המפלס עולה ומציף את האשלים, נוצרת בינות העצים סביבה מימית ייחודית, שבה התמקד פרויקט זה. אשלים צעירים מתים תוך שנה עד שנתיים מתחילת הצפתם, כתלות בחלק היחסי של הנוף שלהם שנמצא מתחת למים: להערכתנו, עצים שכ- 80%-90% מהנוף שלהם מתחת לפני המים - מתים (האחוז המדויק לא ידוע לנו). אשלים בוגרים, שאחוז מספיק גדול מהנוף שלהם מזדקר מעל פני המים - שורדים הצפה ממושכת

יותר, של 3-4 שנים. אחרי 3-4 שנים של הצפה רצופה, גם אשלים בוגרים מתים, ונשארים להזדקק מעל המים כשלדים.

בהדרגה ולאורך שנים הגזעים והענפים המתים יקרוסו אל מתחת לפני המים, ויתפרקו בקצב שעדיין אין לנו נתונים לגביו. רבים ממיני הצומח האחרים שמתפתחים בחופים חשופים, נרקבים ו/או נעקרים ומתים תוך ימים או שבועות עד חודשים של הצפה. זה כולל את כל הצמחייה ה"רכה" - כל החד שנתיים והשיחים הנמוכים כמו אגמון וגומא, קנה, וחלק מהעצים. קנה, שמתפתח לסבך צפוף בשנים רצופות של מפלסים נמוכים, נעקר כתוצאה מגלים של סערות החורף ומת תוך 6-12 חודשים של הצפה. שיטה כחלחלה מתה בשנה ראשונה להצפה וושינגטוניה בשנה השנייה. יוצאת דופן היא הפרקינסוניה, ששורדת יותר מארבע שנים של הצפה.

יערות האשלים הצפופים ברצועת תנודות המפלס של הכנרת הם תופעה שהתפתחותה ועצמתה תלויות בעיקר במפלס הכנרת ומשך הזמן מתחילת החשיפה של רצועת החוף. ככל שזמן חשיפת הקרקעית מחוץ למים מתארך (עקב רצף שנים במפלסים נמוכים) היער גדל ומתעבה. גורמים משפיעים נוספים הם שיפוע הקרקעית וטיב התשתית (אבנים, חול), אך בהם לא התמקדנו. מנתוני לוויין מצאנו שבסתיו 2018, כשמפלס הכנרת הגיע למינימום של שני עשורים, יערות אשלים וקנה כיסו ביחד 6.9 ק"מ², שהיו 76% (!) מהשטח הכולל של רצועת תנודות המפלס, בין 208.80 - ל-214.65 מ'. באביב 2023 לאחר תמותת האשלים, שטח רצועת החוף (מתחת לרום 209- מ') שהיה מכוסה ביערות אשלים חיים הצטמצם לקרוב לאפס. אם כי במקומות רבים שלדי האשלים המתים המשיכו להזדקק מעל פני המים. מכיוון שתמותת אשלים מוצפים תלויה במשך ההצפה, אשלים שהתפתחו ברום נמוך יותר (למשל 213- מ'), יוצפו לפני וימותו לפני אלו שהתפתחו ברום גבוה יותר (למשל 211- מ'), ואלו שמעל רום 208.8- מ' לא יוצפו כלל ולכן גם לא ימותו. זה מאפשר לעקוב אחר "חזית האשלים", או הקו הדמיוני שמעבר לו, לכיוון המים הפתוחים אין אשלים חיים. תזוזת חזית האשלים כפונקציה של המפלס והזמן תועדה בבטיחה באמצעות חישה מרחוק. למדנו שחזית זו זזה עם המפלס, בהיסט של כשנתיים: כשהמפלס יורד, חזית האשלים מתקדמת לכיוון הים הפתוח, כשהמפלס עולה, חזית האשלים נסוגה לכיוון היבשה, תמיד בפיגור של כשנתיים יחסית לתזוזת המפלס. באזור הבטיחה האשלים גדלו לגובה 5-6 מ' לאורך תקופת חשיפה (שכללה הצפות קצרות-מועד) של כ-20 שנה. ברוב חופי הכנרת האחרים בהם התפתחו יערות אשלים, הם התפתחו רק בעשור האחרון ולא הגיעו לצפיפות, גודל עץ, ושטחי כיסוי גבוהים כמו בבטיחה. רק באזור אחד (מול קיבוץ האון) מצאנו יער סבוך כמעט כמו בבטיחה.

הסביבה האקוויטית בינות אשלים מוצפים

בינות עצי אשלים מוצפים מתקיים בית גידול אקוויטי ייחודי שבעבר לא היה קיים בכנרת. בתנאים של הצפה רצופה ומתמשכת, כפי שהתרחש בתקופת המחקר, הייתה לבית גידול זה דינמיקה טיפוסית לאורך ציר הזמן, שמתוארת בהמשך כשלושה שלבים. נדגיש כבר עכשיו שבתנאים של הצפה מקוטעת תתקיים דינמיקה אחרת. השלבים המאפיינים את בית הגידול בינות אשלים בהצפה רציפה הם:

שלב א': תנאי קיצון כתוצאה מפעילות אינטנסיבית של פירוק חומר אורגני, היפוקסיה. שלב ב': דעיכה הדרגתית של תנאי הקיצון וחזרה לתנאים דומים לתנאים בחופים ללא אשלים, עד לתמותת האשלים לאחר 3-4 שנים של הצפה רציפה. שלב ג': שלדי העצים מזדקרים מהמים.

שלב א': תנאי קיצון עם היפוקסיה

שלב א' מתקיים רק ביערות עם צפיפות אשלים גבוהה. הוא מתחיל מיד עם ההצפה הראשונית ונמשך עד להשלמת פירוק החומר האורגני הפריק (labile) ותחלופת מים עם המים הפתוחים. משך הזמן ששלב זה

נמשך, משעות בודדות ועד יותר משנה, משתנה מאתר לאתר סביב הכנרת, כתלות בעובי רצועת החוף המכוסה באשלים, צפיפות העצים, ומיקום היער ביחס לרוחות העיקריות. שלב זה מתאפיין גם בתמותה והעלמות של כל הצמחייה ה"רכה" ותחילת העלמות הקנה. בשלב זה ובאופן זמני בית הגידול הינו בעל מאפיינים של בית גידול ביצתי, ומתפתחים בו מינים שלא נמצאים במקומות אחרים באגם. עם ההצפה הראשונית, באזור המים הרדודים, מתחיל פירוק מיקרוביאלי של החומר האורגני החלקיקי שהצטבר בינות העצים במשך התקופה שהמקום היה מחוץ למים. להלן מקורות החומר האורגני:

(1) הצמחייה שלא עמידה להצפה ומתה (צמחייה "רכה" וקנה). (2) חומר אורגני שהצטבר על הקרקע, בעיקר נשורת מהאשלים: עלווה, פרחים, אבקנים וענפים. (3) חומר אורגני שנסחף לכנרת מאגן ההיקוות והצטבר לאורך החופים. פירוק החומר האורגני צורך חמצן. באזורים בהם צפיפות האשלים המוצפים גבוהה תחלופת המים עם המים הפתוחים של הכנרת זעומה ולכן מתפתחים תנאי היפוקסיה עד אנאוקסיה. משך שלב תנאי ההיפוקסיה משתנה ממקום למקום, כתלות בקצב תחלופת המים בין אזור העצים לים הפתוח וקצב השיחלוף של חמצן מומס עם האטמוספירה. קצבים אלו תלויים בצפיפות העצים ובמיקום היער ביחס למשטר הרוחות והסערות בכנרת. פירוק החומר האורגני מיד לאחר הצפה ראשונית קורה גם באזורים ללא אשלים, או עם צפיפות נמוכה בלבד של אשלים. אולם, באזורים אלו נמשכת תחלופת מים עם המים הפתוחים ולא מתפתחים תנאי היפוקסיה, או שמתפתחים תנאי היפוקסיה (במקומות מוגנים) למשכי זמן קצרים (שעות עד ימים) בלבד. בחופים כאלו בעצם לא מתקיים כלל שלב א' או שהוא קצר ביותר, ואפשר לומר שמרגע הצפתם הם בשלב ב'.

בנוסף לעושר בחומר אורגני חלקיקי ומחסור חלקי או מלא בחמצן מומס במים, סביבת האשלים הצפופים מיד לאחר ההצפה הראשונית היא גם מוצלת (עוצמות אור נמוכות), עם תחלופת מים זעומה, עם ריכוזים גבוהים של נוטריאנטים וחומר אורגני מומס שהם תוצרי פירוק החומר האורגני החלקיקי. בגלל תנאים ייחודיים אלו, שקרובים לתנאים של בית גידול ביצתי, שלב א' מתאפיין באוכלוסיות פיטופלנקטון חזואפלנקטון עם הרכב מינים שונה מזה שבמרכז האגם, כולל מינים שלא נמצאו אף פעם בכנרת בעבר. ככל ששלב א' נמשך זמן רב יותר (כתלות בתחלופת המים) כך גם אוכלוסיות הפלנקטון היו שונות יותר מאלו שמוכרות לנו מהכנרת. בבטיחה, השוני בהרכב המינים היה בולט יותר מאשר בתחנות דיגום אחרות.

יער האשלים בבטיחה היה צפוף מאוד וכיסה רצועת חוף רחבה. בגלל מיקומו בצפון האגם וצפיפות העצים הגבוהה שבו, הרוחות המערביות והמזרחיות חלפו מעליו ולכן תחלופת המים עם האגם הייתה מזערית. בינות העצים בבטיחה מצאנו ממאי 2020 (תחילת מדידות) עד אוקטובר 2020 תנאי היפוקסיה קיצוניים (ריכוז חמצן בכל עמודת המים מתחת ל- 2-3 מ"ג לליטר עד אנאוקסיה), תנאים שאינם מתאימים לקיום דגים ולקינן שלהם. תנאים דלי חמצן נרשמו שם שוב בסתיו 2021. סביר שמצב זה החל בתנאים אף יותר קיצוניים מיד לאחר ההצפה הראשונית באביב 2019, אך אין בידינו נתונים על כך.

לעומת זאת, ברוב האזורים האחרים של הכנרת, היער היה יותר צעיר ופחות צפוף מאשר בבטיחה, יותר חשוף לערבוב על ידי רוחות מזרחיות (שרקיות) ומערביות, ועם משטר חמצן נח יותר לדגים. בחלק מאזורים אלו, עם צפיפות עצים דלילה ומיקום חשוף לרוחות - שלב א' של המחסור בחמצן לא התקיים כלל. באזורים מעט יותר מוגנים מרוחות (אבל עדין חשופים לרוחות יותר מאשר בבטיחה) שלב המחסור בחמצן היה לרוב קצר בהרבה מאשר בבטיחה, ונמשך שבועות בודדים. בסקר מקדים לפני תחילת המחקר שערכנו ביוני 2019, כ-3 חודשים מההצפה הראשונית, תיעדנו שיכוב בעמודת המים הרדודה (עשרות ס"מ) שבין העצים המוצפים מול המעבדה לחקר הכנרת, עם אנאוקסיה קרוב לקרקעית, אבל מים מחומצנים עם דגים בפני השטח. ב-2020 ו-2021 כבר לא נמצא שיכוב כזה, ומשטר החמצן בינות העצים באתר הדיגום 'KLL' שמול המעבדה

לחקר הכנרת היה דומה לזה שבאתר ביקורת ללא אשלים במרחק של כקילומטר צפונה, עם חמצן ברוויה. במהלך סופות שרקייה צפינו ותיעדנו גלים שחצו את יער האשלים הצפוף שמול המעבדה והתנפצו על קו החוף, תוך כדי החלפת כל המים שבינות האשלים. כלומר, באזורים של יערות צעירים יותר ודלילים יותר מאשר בבטיחה, ושחשופים יותר לרוחות המזרחיות והמערביות, שלב א' קצר בהרבה, או שלא היה קיים בכלל. ואכן, שלב א' נמשך בבטיחה עד נוב' 2021 אבל ביתר חלקי האגם הוא היה קצר בהרבה, והסתיים תוך ימים עד שבועות לאחר ההצפה של אביב 2020. באזורי אשלים בצפיפות דלילה כלל לא התפתחו תנאי אנאוקסיה ובאופן רציף שררו שם תנאי שלב ב'. התנאים באביב בינות האשלים הצפופים, של עושר בחומר אורגני חלקיקי ומומס, עוצמות אור נמוכות, ומים רדודים כמעט ללא תחלופה - עודדו נביטת ציסטות של פרידיניום והתפתחות כתמים של פרידיניום בצפיפות תאים גבוהה בהרבה מזו שבמים הפתוחים של האגם.

שלב ב': דעיכה הדרגתית של תנאי הקיצון וחזרה לתנאים כמו בחופים ללא אשלים

שלב ב' מתחיל עם סיום פירוק רוב החומר האורגני החלקיקי שהצטבר במקום והעלמות מצב ההיפוקסיה הקיצונית והמתמשכת שאפיין את שלב א'. בשלב זה ההצללה עדיין גבוהה, ותחלופת המים מוגבלת, אם כי יש תחלופה מלאה בזמן רוחות חזקות (שרקיות במערב האגם, רוחות מערביות במזרחו). כמו כן, בשלב זה תנאי תת-רוויה לחמצן עשויים לשוב ולהתפתח באופן זמני אבל לזמן מוגבל. כמו כן, מסתיימים תהליכי התמותה והפירוק של סבך הקנה אשר נותר משלב א' ומתים מיני עצים אחרים שלא שורדים הצפה מתמשכת כמו שיטה מכחילה וושינגטוניה. בהמשך, האשלים עצמם מתדלדלים, ותחלופת המים עם מי הכנרת גדלה. במקביל, ההצללה פוחתת עם הזמן, וריכוזי הנוטריאנטים והחומר האורגני חוזרים לרמות אופייניות לכנרת. שלב ב' נמשך עד לתמותה מלאה של האשלים. בחופים רבים סביב הכנרת, בהם צפיפות האשלים דלילה עד בינונית - לא מתקיים כלל שלב א' או שהוא זניח בזמן, ועם ההצפה הראשונית הם מיד נכנסים לשלב ב'.

שלב ג': אשלים מתים לאחר 3-4 שנים של הצפה רציפה

במאי 2023, אחרי 4 שנים של הצפה רצופה, האשלים המוצפים סביב הכנרת כולה היו מתים, למעט פה ושם פרטים בודדים ממש בקרבת החוף ששרדו ולבלבו בעלווה ירוקה. אנו מעריכים ששלב זה יכול להמשך שנים רבות, כל עוד מפלס הכנרת נשמר גבוה, אבל אין בידנו נתונים על כך.

יערות האשלים המוצפים כמרכיב במערכת האקולוגית של הכנרת

יערות האשלים המוצפים ממלאים תפקידים שונים במערכת האקולוגית, בהתאם לשלב בו הם נמצאים.

אצת הפרידיניום:

התנאים של שלב א' (עושר בחומר אורגני מומס וחלקיקי, עצמת אור נמוכה, תחלופת מים זעומה) מתאימים במיוחד להתפתחות אצת הפרידיניום ולהיווצרות כתמים צפופים שלה. לתופעה זו חשיבות גדולה בעידן בו אצת הפרידיניום כמעט ולא פורחת בכנרת, מה שמאפשר התגברות הפריחות של כחוליות עם פוטנציאל לרעילות. לאחרונה הועלתה השערה שאחת הסיבות להתמעטות הפרידיניום בכנרת היא מגבלה של אינוקולום: גופי הקיימא של פרידיניום שנמצאים כל הקיץ בסדימנט כנראה נאכלים על ידי החילזון הפולש טיאה סקאברה שהתפשט בכנרת בשנים 2009-2010. החילזון נמצא בריכוזים של עשרות אלפי פרטים למ"ר בחופים החוליים של הכנרת. אולם, התנאים בקרקעית בינות האשלים לא מתאימים לגידולו והוא לא נמצא שם. כתמי הפרידיניום שבינות האשלים המוצפים עשויים לשמש אינוקולום משמעותי לאגם כולו. השערה זו מצריכה בדיקה מחקרית.

בשלב א', התנאים השונים מהתנאים ביתר הכנרת גורמים להתפתחות אוכלוסיות פלנקטון שונות מאלו שמוכרות לנו בכנרת. סביר שגם אוכלוסיות הבנתוס שונות, אבל אין בידינו תיעוד שלהן. הצמחייה מקטינה את עוצמת תנועת המים, לכן תחלופת המים נמוכה. מתקבל בית גידול זמני ביצתי, ששונה מיתר הכנרת, ומתפתחים בו מינים שלא נמצאים במקומות אחרים באגם.

בית גידול לדגים:

בעבר כבר הראינו (Cumplings et al. 2017, Zohary & Gasith 2014) שדגי הכנרת ובעיקר שלושת מיני האמנונים הגדולים, משתמשים בצמחייה מוצפת כבית גידול, מקור למזון מגוון (בצורת אצות פלנקטון ופריפיתון, פרוטוזואה וחסרי חוליות שמשתמשים בצמחים כמצע לגידול), מסתור מטורפים ומדייגים, ומקום לקינון ולאימון דגים. האשלים המוצפים בכנרת משמשים בית גידול כזה - אבל רק כאשר הם בשלב ב' או ג'. יערות מוצפים בשלב א', בהם המים חסרי- או דלי-חמצן, לא מתאימים למחיית דגים. לפיכך יערות האשלים הצפופים בבטחה, שם שלב א' נמשך בוודאות מעל שנה אבל כנראה מעל שנתיים (אין בידינו נתוני ריכוז חמצן מההצפה הראשונית ב-2019), לא היו מאוכלסים בדגים ולא מצאנו שם קיני אמנונים. אך ברוב חופי הכנרת האחרים, בהם שלב א' היה קצר מאד או שבכלל לא התרחש, הדגים השתמשו באינטנסיביות בבית הגידול של האשלים המוצפים. לפיכך ברור כשהבטחה בשלב א' ולא זמינה לקינון דגים - יתר חופי הכנרת מספקים את אתרי הקינון ואימון הדגים.

חשיבות האשלים המוצפים כבית גידול לדגים גדלה ככל שמתמשכת ההצפה הרצופה. חשיבות זו עולה בשנה השנייה להצפה, כאשר כל יתר הצמחים, כולל הקנה, כבר מתו ונעלמו, וכאשר התנאים ביונות האשלים שונתרו נוחים (בשלב ב').

הסדימנט ברצועת תנודות המפלס

ריכוזי זרחן כללי חלקיקי (TPP) בגלעיני סדימנט היו די דומים בכל התחנות שנבדקו, כאלו עם וכאלו בלי אשלים, בשולי האגם ובמרכזו. הריכוזים נעו בין 0.7-1.2 מ"ג זרחן לג' משקל יבש. אחוז הזרחן שקשור לקרבונט (Ca-PP), שהוא זרחן שאיננו זמין לביוטה, היה גבוה יותר באזורי הליטורל עם ובלי אשלים (92%-74%) מאשר במרכז האגם (46%). במרכז האגם נמצאה נוכחות גבוהה יותר של הפרקציות האחרות של הזרחן החלקיקי הכללי, שכולן זמינות (יותר או פחות) לביוטה. סיבה אפשרית לכך היא שבאזור המים הרדודים הצמחייה החופית שהתפתחה במפלסים נמוכים שאבה מהסדימנט חלק ניכר מהזרחן הזמין, מה שלא קרה במים העמוקים. למרות שחלק גדול מהזרחן הזמין בסדימנט סולק, הכמות המוחלטת של זרחן מומס שנמצא בסדימנט באזור הליטורל, עם ובלי אשלים, עדיין גבוהה: מהשוואת כמות הזרחן הזמין (20% מהזרחן הכללי) ב-1 מ³ סדימנט יבש מרצועת התנודות לכמות ב-1 מ³ מים עולה שבסדימנט הריכוז גבוה ב-4 סדרי גודל מאשר במים. יש לכך השלכות לגבי ניהול החופים.

המלצות לניהול עתידי של יערות אשלים בחופי הכנרת

כללי: יערות אשלים מוצפים שנמצאים בשלב ב' מספקים לאמנונים סביבה מוגנת לתקופת ההטלה והאימון וקיים איזון עדין בין השטח הזמין לרבייה לבין גודל אוכלוסיית הדגים. תנופת הפיתוח סביב האגם בשנים האחרונות פוגעת בשטחי הצמחייה המוצפת המתאימים לרביית האמנונים. לחופים "סטריילים", ללא כל צמחייה, אין תועלת למערכת האקולוגית וחשוב להגביל אותם רק למקומות שבהם הכרחי שלא תהיה שום צמחייה (חופי רחצה מוכרזים, מדרונות להורדת סירות, שבילי גישה לים להולכי רגל). עם זאת, יש לשאוף לכך שברוב החופים תתפתח צמחייה "רכה" במקום אשלים, (כלומר, ליישם את מדיניות רט"ג בשמורת

הבטיחה (לרוב החופים). לשם כך יש לסלק נבטי אשלים עוד לפני שהם מתפתחים לעצים ומשתלטים על סביבתם. אנו ממשיכים להמליץ לשמר מקבצי אשלים בוגרים בודדים שימשו לצל.

1. כלל ה-40%: המלצתנו שלכל חלקת חוף סביב הכנרת יוגדר מקטע (או כמה מקטעים) לשימור טבעי. בקטעים אלו נמליץ לנקות מדי שנה נבטי אשלים כדי לאפשר התבססות צמחייה רכה. מקטעים אלו צריכים להוות לפחות 40% משטח החלקה, ואנו ממליצים למקם אותם בגבולות החלקה, 20% משטח החלקה בכל אחד משני צדדיה, כך שיתחברו ל-20% נוספים מחלקת החוף הצמודה. פירוט גדול יותר של המלצה זו נכלול בדו"ח הסופי לרשות המים.
2. טיפול בנבטים: כדי למנוע התפתחות יערות אשלים, אפשר לטפל בנבטי אשלים באחת משתי דרכים, כוללות בגודל השטח המיועד לטיפול. ברצועות חוף ארוכות כמו בבטיחה, ניתן לסלק את הנבטים ע"י פעולת כיסוח מכני באמצעים קלים (טרקטור קל עם מכסחת או חרמש) באחד או שני המועדים הבאים מדי שנה: בסתיו (אוקטובר) – כיסוח לפני עליית המפלס בחורף יגרום לתמותת העצים הגדומים שיוצפו באביב (מרץ) – כיסוח נוסף באביב יצמצם התפתחות הצומח שלא הוצף. במידה והמפלסים גבוהים בסוף החורף, ייתכן שלא יידרש כיסוח אביבי. לעומת זאת, במידה ועליית המפלס בחורף נמוכה (בשנים שחונות) ולא המיתה את הצמחים שכוסחו בסתיו, חיוני מאוד לבצע כיסוח באביב העוקב. מניסיון רט"ג בבטיחה, חזרה על הכיסוח מדי שנה צפויה להביא להיעלמות עצי האשל באזורים שנחשפו עם הזמן, מאחר ואזורים חשופים לאורך זמן אינם לחים ואינם מתאימים לנביטה.
- ברצועות חוף קצרות, ברוחב של עשרות עד מאות מטרים (כמו ברוב חופי הכנרת), הדרך הזולה והיעילה ביותר היא עקירה ידנית של הנבטים מיד לאחר שנבטו, בין ינואר לאפריל כל שנה. בשלב זה העקירה הידנית קלה, מהירה ולכן זולה, הפגיעה בתשתית מזערית, והטיפול הוא נקודתי: מסלקים רק נבטי אשלים, מאפשרים לצומח רך להתפתח. ביום עבודה אחד ניתן לכסות שטחים נרחבים ונחסכת העלות של השכרת טרקטור. הפעולה היא אחת לשנה, אין צורך לחזור ולבצע מספר פעמים בשנה אם כי כדאי לחזור כעבור זמן קצר ולעקור נבטים שנותרו בטעות בשטח. אין להשתמש בכלים כבדים.
3. עיצוב עצים בוגרים: אנו ממליצים לשמר בכל חלקת חוף כמה מקבצים של עצי אשל בוגרים ולעצבם כך שימשו צל לנופשים (במפלסים נמוכים) ולחלופין כאתר פעילות רבייה לאמנונים (בזמן הצפה).
4. סילוק עצים בוגרים ושלדי אשלים: עצים בוגרים ושלדי אשלים שמיועדים לסילוק - יש לעקור כשהם מחוץ למים, על ידי שליפת העץ כלפי מעלה באמצעות מצבת. יש לעקור כך כל עץ בנפרד. אין לעקור בדחיפה באמצעות טרקטור/דחפור. אם העצים בתוך המים - יש לאשר לעקור רק את העצים שבקרבת קו המים וניתנים לשליפה מרחוק באמצעות מצבת שנמצא מחוץ למים, או על סירה. יש להקפיד על סילוק החומר העקור ולמזער את השימוש בכלים כבדים והפרת תשתיות.
5. עצים ממינים פולשים: לעצים ממינים פולשים תרומה שלילית למערכת האקולוגית ויש לסלקם מחופי הכנרת. אנו ממליצים לעקור אותם במצבת בדומה לעקירת אשלים בוגרים, תוך הקפדה על סילוק החומר העקור ותוך מיזעור השימוש בכלים כבדים והפרת תשתיות.
6. כלים כבדים: יש להמשיך באיסור להפעלת כלים כבדים בתוך המים. אין לסלק צומח "רך", אין לקלטר ו/או לחרוש חופים.

3.9 ניטור מעיין סומית הגליל (הסרטן העיוור)



מבט מחוף המעבדה. פברואר 2023. צילום: עוז צברי דר

מחקר
במימון
רשות
הטבע
והגנים

ירון בארי-שליון, ניר קורן, בני סולמני, אדית ליבוביץ

- התקנת מכשור ומדידות סמי רציפות של חמצן מומס - DO, מוליכות חשמלית - EC, pH ו- טמפרטורה - T באתר החלו בפברואר 2022 אך לוו בתקלות רבות עד ספטמבר 2022.
- השינויים העיקריים אשר זוהו לפני רעידת האדמה של ה- 6/2/2023 התרחשו ב - DO (2.1-2.5 ppm) ו- T (26.80-27.75 °C) כאשר ערכי EC יציבים (7.4 mS/cm) והשינוי ב- pH (6.69-7.47) חשוד כ- drift ולא כשינוי במי הבריכה.
- רעידת האדמה של ה- 6/2/2023 לוותה מיידית בעליה ב- EC עד ל 9.6 mS/cm ו- T עד לכ- 28.5 °C) וירידה משמעותית ב- DO עד מעט מתחת ל- 1 ppm.

מטרת המחקר

מהות ניטור זה הינה לעקוב אחר פרמטרים פיזיקליים וכימיים במעיין. במקביל, ניטור זה מאפשר המשך מעקב אחר אוכלוסיית סומית הגליל (הסרטן העיוור) על ידי פקח של רט"ג. כמו כן, הניטור מאפשר בחינה של השפעת שינויים בפרמטרים אלו על אוכלוסיית סומית הגליל.

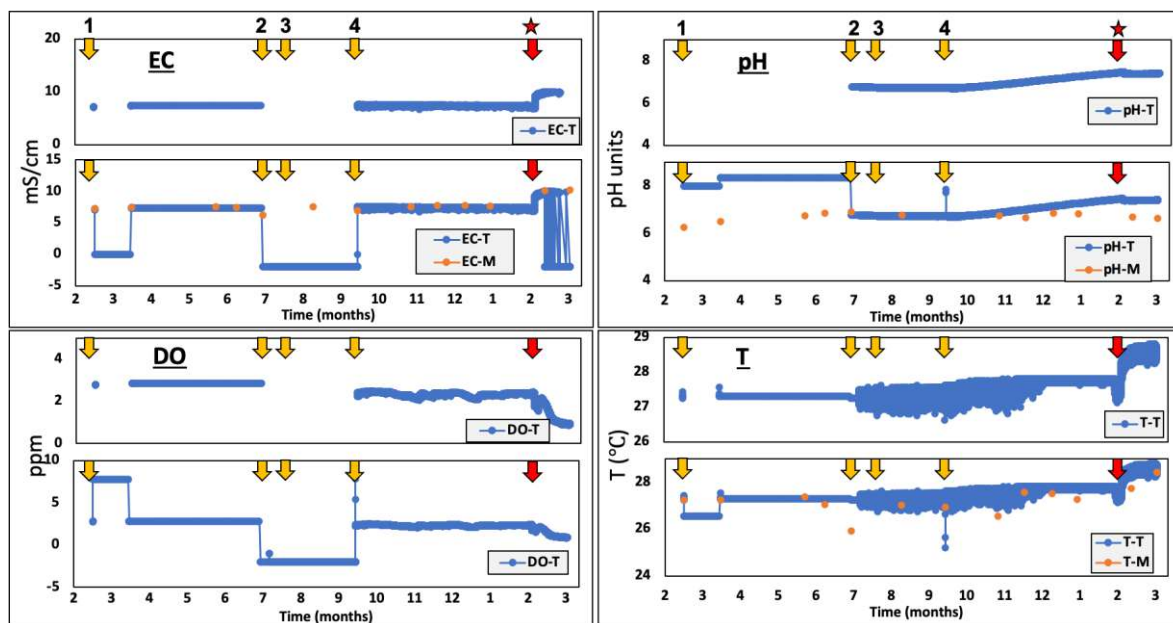
רקע

הסרטן סומית הגליל (*Typhlocaris galilea*) ה"סרטן העיוור", מקבוצת מעשירי הרגליים הוא שריד של אוכלוסייה ימית קדומה. מין זה הינו אנדמי למעיין נור בצפון מערב הכנרת. הסרטן זקוק להרכב מיוחד של מים כגון מליחות, טמפרטורה, ריכוזי החמצן המומס ועוד. הרכב מים ייחודי זה, מגדיר גם את הנישה האקולוגית בה הוא חי. בעבר, בוצעו סקרים באתר בעזרת תצפיות מפני השטח של בריכת הנביעה (ספירת מספר סרטנים) ומדידת מפלסים ואף דיגום חד פעמי בעזרת רובוט בעזרתו צפו לתוך החללים התת-קרקעיים של המעיין. לאחרונה עלה חשש כי שינוי בספיקה ו/או בהרכב המים כתוצר של קידוחי מים בגליל המזרחי ישפיעו על אוכלוסיית סומית הגליל והועלה הצורך ליישם שיטות ניטור מתקדמות לניטור אוכלוסיית סרטנים אלו והנישה האקולוגית שלהם.

תוצאות ודיון

א. עיבוד נתונים

כלל תוצאות הפרמטרים במדידה הקבועה לאורך שנת 2022 ותחילת 2023 מוצג באיור 84 בפאנלים התחתונים עבור כל אחד מארבעת הפרמטרים. במקביל מוצגות מדידות המולטיפורב הידני עבור pH, מוליכות חשמלית - EC וטמפרטורה - T. בפאנלים העליונים, עבור כל פרמטר, מוצג סט מעובד של נתונים לאחר סינון של ערכים מהתקופות בהן היו שגיאות בקריאה.



איור 84: כלל תוצאות המדידה (לאורך השנה) מהרגשים הקבועים של חברת טרייטל (פאנלים תחתונים עבור כל פרמטר) וסט מעובד לאחר סינון ערכים עם מדידה שגויה. בנוסף מוצגים עבור הפרמטרים EC, pH, DO ו-T מדידות במולטיפורב ידני לביקורת (סיומת T: חיישן חברת טרייטל, סיומת M: חיישן של המולטיפורב הידני- מנטה). ארבעת החיצים הכתומים (מספור בראש הפאנלים העליונים של EC ו-pH) מייצגים פאזות שונות בהתקנה, כיול ותיקון. 1: התקנה, 2: אבחנה של תקלות בסנסורים, 3: מעבר להזנת חשמל אחרת, 4: תיקון סנסורים ואנטנה. החץ החמישי האדום (כוכבית בראש הפאנלים העליונים של EC ו-pH) מייצג את רעידת האדמה של ה- 6/2/2023.

כפי שניתן לראות, החודשים הראשונים של המדידות באתר לוו בבעיות שונות. כאמור לעיל, לאורך מספר חודשים מפרואר 2022 ועד תחילת יולי 2022 חלק מהשידורים של המדידות היו רק פעם ביום (ולא כל 5 דקות), וכן היו בעיות במדידות של מוליכות חשמלית- EC וחמצן מומס- DO. בנוסף ניתן לראות כי עד תחילת יולי מדידות ה- pH היו גבוהות מאד (סביב $pH = 8.0-8.4$) וערכים אלו לא תאמו את ערכי המדידות הבודדות שנעשו במולטיפרום ידני בעת הביקורים ($pH = 6.3-6.7$).

בדיקת הסנסורים של חמצן מומס- DO ומוליכות חשמלית- EC ע"י טכנאי חברת טרייטל ב- 6/7/2023 לוותה גם בשינוי בערכי מדידת ה- pH לסביבות $pH = 6.7$. ערך זה נשמר יציב עד הביקור הבא של הטכנאי ב- 19/9/2023 לתיקון/כיול הסנסורים שהוגדרו תקולים. למרות שרגש ה- pH לא הוגדר תקול – כאמור השוואת הערכים לפני ה- 6/7/2023 למדידות המולטיפרום הידני מעידה כנראה כי הן שגויות ובסט המעובד סוננו ערכים אלו החוצה.

למרות שגם רגש הטמפרטורה לא הוגדר תקול – לאחר ביקור הטכנאי של טרייטל ב- 6/7/2023 השתנתה תבנית מדידות הטמפרטורה. לפני תאריך זה המשרעת היומית של המדידות הייתה אחידה שכן לרב שידורים של מדידות אלו היו רק פעם ביום ולאחריה המשרעת היומית מראה שינויים של עד כחצי מעלה ומכאן פיזור/ענן נתונים רחב יותר מתקופה זו והלאה. גם ביקור טכנאי טרייטל ב- 19/9/2023 לתיקון/כיול הסנסורים של חמצן מומס- DO ומוליכות חשמלית- EC לא נראה שינוי בתבנית זו ורק סביב דצמבר 2022 ישנו צמצום במשרעת זו (עד ל- 6/2/2023 ראו בהמשך). למרות שאין אינדיקציה חותכת כי בטווח הזמן של פברואר מרץ 2022 הטמפרטורות הנמוכות שנמדדו היו שגויות הרי שטווח זה של מדידות עבור כלל הפרמטרים נראה חריג מאד ולכן סוננו מהסטים.

השפעת רעידת האדמה של ה- 6.2.2023 נראית בצורה בכלל הפרמטרים – ומוסברת בשינויים אמיתיים במים. מבין כלל הפרמטרים השינוי ב- pH הינו הקטן ביותר. לאחר הרעידה ישנה התייבבות בערכים של הפרמטרים השונים אולם הסנסור של המוליכות החשמלית- EC מתחיל להראות כמה ימים לאחר הרעידה קפיצות במדידה לערכים שגויים (ערכים שליליים) אשר תדירותן הלכה וגברה, ודו"ח תקלה הועבר לפקח רט"ג האחראי כדי ליזום תיקון של חברת טרייטל.

ב. שינויים בערכים בין אמצע ספטמבר ועד רעידת האדמה של ה- 6/2/2023

בחינת הסטים של הנתונים המעובדים לאחר סינון תקלות (איור 84 פאנלים עליונים) מראה על שינויים בזמן בחמצן מומס- DO במערכת המלווה בשינויים בטמפרטורה- T וב- pH מספטמבר ועד ה- 6/2/2023, יום רעידת האדמה. מחזורי השינוי בחמצן מומס- DO נעים בין מספר ימים ועד חודש והאמפליטודה נעה בין כ- 0.1 ועד 0.5 מ"ג/ליטר (ppm). מחזורים אלו לא מראים קורלציה ל- pH שעולה בצורה רציפה רב התקופה (בעיקר מתחילת אוקטובר). הקורלציה בין השינוי במגמות חמצן מומס- DO לטמפרטורה- T נראה מעט יותר חזק. ניתן לזהות שני תאריכים בהם ישנו שינוי משמעותי בערכי הטמפרטורה- T: (א) עד ה- 14/10/2023 בערך, ישנה עליה מתונה בערכי טמפרטורה מקסימלית לכל יום עד לכ- $27.75^{\circ}C$, (ב) עד סוף נובמבר מנעד הטמפרטורה היומית הינו כ- $0.5-0.7^{\circ}C$ ולאחר מכן הוא מצטמצם מאד. שני שינויים אלו בטמפרטורה מלווים בצניחה חזקה ($ppm < 0.3$) בערכי החמצן המומס- DO. בין נקודות זמן אלה ישנה מגמת עליה בערכי חמצן מומס- DO עם קפיצות בעלות אמפליטודה קטנה בהרבה. לאורך כל התקופה הזו ערכי המוליכות החשמלית- EC יציבים יחסית סביב 7.4 mS/cm .

השינויים בחמצן מומס- DO, טמפרטורה- T מייצגים כנראה פולסים של מים עמוקים בעלי אופי טרמלי וחמצן מומס שונים המגיעים לפני השטח לאזור הסנסורים כל חודש עד חודשיים ומתייצבים מבחינת רווית החמצן לאורך תקופה זו לערך סף מקסימלי עד הפולס הבא. העלייה הקבועה בערכי ה- pH נראית בעייתית

בהקשר להסבר זה אך החשד שהשינוי הקבוע הזה מייצג בעיה אנליטית של סחיפה (drift) כפי שקורה במכשירים רבים ולא שינוי אמיתי במים (יש לשים לב לחוסר ההתאמה בין ערכי הסנסור של טרייטל לתקופה זו מול המדידות הידניות של המולטיפרוב, איור 84). יש להמשיך ולעקוב אחר ערכי ה-pH לאורך זמן וכן בהשוואה למדידות מכשור אחר (מולטיפרוב ידני).

הבעיה העיקרית בניתוח נתונים אלו היא שהסנסורים אינם ממוקמים בנביעה הראשית (או לצורך העניין בצמוד לאף אחת מהנביעות לאורך הקיר) אלא מספר מטרים משם בבריכה לצד חומת הבטון. אזור זה, בו ממוקמים הסנסורים אינו בהכרח מייצג את הנביעה הראשית (או האחרות) אלא עשוי לייצג תערובת משתנה בין מי עין נור למי המעיין המתוק. כאמור לעיל- מדידות ראשוניות שערכנו בשתי הבריכות מראות כי אזורים שונים בכל בריכה מייצגים כנראה תערובות בין שני מרכיבי הקצה האלו (או מספר גדול יותר של מרכיבי קצה). בהקשר לניתוח הנתונים ביחס לידע על אוכלוסיית הסרטן העיוור – הרי שלאורך כל התקופה בה צוות חיא"ל ביקר באתר להתקנות ואחר כך למדידות מולטיפרוב ודיגום מים לאנליזות כימיות נוספות (מעל 15 ביקורים לאורך שנה וחודשיים) לא נצפו פרטי סרטן סומית הגליל ע"י הדוגמים אף כי נעשה מאמץ לאתר פרטים במים. אין לנו מידע לגבי תוצאות התצפיות של פקחי רט"ג בתקופה זו.

ג. שינויים בעקבות רעידת האדמה

רעידת האדמה בטורקיה-סוריה ב 6/2/2023 התבטאה באופן בולט גם במדידות בעין נור. מיד עם הרעידה ניתן לראות עליה משמעותית בטמפרטורה-T לממוצע יומי של כ-28.5 °C עם משרעת יומית של כחצי מעלה ועליה במוליכות החשמלית-EC לערך של כ-9.6mS/cm. במקביל, נצפתה ירידה בערכי חמצן מומס- DO עד לפחות מ-1ppm. השינוי ב-pH הינו הקטן ביותר. כלל שינויים אלו מייצגים ככל הנראה שינויים במערכת ההובלה בעומק של תערובת התמלחת ומי אקוויפר ההר המתוקים כתוצר מקומי של רעידת האדמה במרחק. שינויים בסגנון זה דווחו בעבר עבור המעיינות המלוחים של הכנרת ודיווחים על עליה בעכירות ובמדדי מים נוספים דווחה עבור מספר קידוחי מי שתיה בצפון.

המלצות ביניים לתפעול באתר

- (א) תצפיות לגבי אוכלוסיית הסרטן עצמה: יש לנסות ולהקדיש לכך יותר זמן ו/או ביקור בתדירות גבוהה יותר וכן לבצע עדכונים שוטפים בין צוותי רט"ג וחיא"ל לגבי התצפיות.
- (ב) מיקום הסנסורים: כפי שנאמר בעת ההתקנה- המיקום אינו אידאלי ויש להזיז את הסנסורים לקרבת המעיין הראשי עצמו.
- (ג) יש לבחון מגמות שינוי בכלל הסנסורים לסינון לזיהוי וסינון הפרעות. בפרט, יש לבחון את השינוי בערכי pH לזיהוי drift וקביעת כיוול עונתי לסנסור זה.
- (ד) יש לעקוב אחר התייצבות ערכי הפרמטרים הנמדדים בדגש על חמצן מומס- DO.

4 מחקרי אגן ההיקוות של הכנרת וגופי מים אחרים

4.1 ניטור ירדן דרומי



מחקר
במימון
רשות
המים
וחיא"ל

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

- גיאוכימיה: שיא של ריכוז זרחן מומס בסתיו 2022 בתחנת ביתניה (AL5) ביחס לשאר התחנות. ניטראט הוא צורן החנקן הנפוץ ביותר אשר ריכוזו בתחנת יבניאל גדולה יותר משאר התחנות לאורך רוב השנה.
- אנליזת MST מראה שזיהום ממקור אדם ובקר נכחו בנחל ברמות דומות לאורך השנה, מה שמצביע על ביוב שאינו מטופל כראוי יחד עם ביוב רפתות הזורמים יחד לנחל.
- אצות: בשנת 2022 זהו יותר מיני פיטובנטוס מאשר בשנה הקודמת. מדד איכות המים הנקבע ע"י מינים אינדיקטורים מראה כי איכות המים טובה יותר בנחל בחודשים החמים והיבשים ויורדת בחודשים הקרים והגשומים.

מטרת המחקר

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 (איור 85), התחיל בסוף שנת 2020 וצפוי להתמשך כניטור רב שנתי של האזור. הניטור כולל את התחנות הבאות: (1) AL6: מוצא סכר אלומות, (2) AL5: הירדן לאחר כניסת מט"ש ביתניה, (3) AL4: הירדן לאחר כניסת המוביל המלוח, (4) YA3: הירדן לאחר כניסת נחל 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.

אצות בנתוניות: דיגום לספירות של אצות בנתוניות (פיטובנטוס) התבצע, כך שבכל תחנה נאספו 5 אבנים שהיו מכוסות במי נהר, בעומק של כ-30 ס"מ. במעבדה גורד ביופילם שעל פני כל אבן להסתכלות במיקרוסקופ ולזיהוי האצות על פי הספרות הטקסונומית המקובלת. תדירות ההופעה של כל מין נקבעה לפי סולם התדירות של המוצג בטבלה 13 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).

טבלה 13: סולם תדירות הופעת מינים לפי Korde (1956)

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

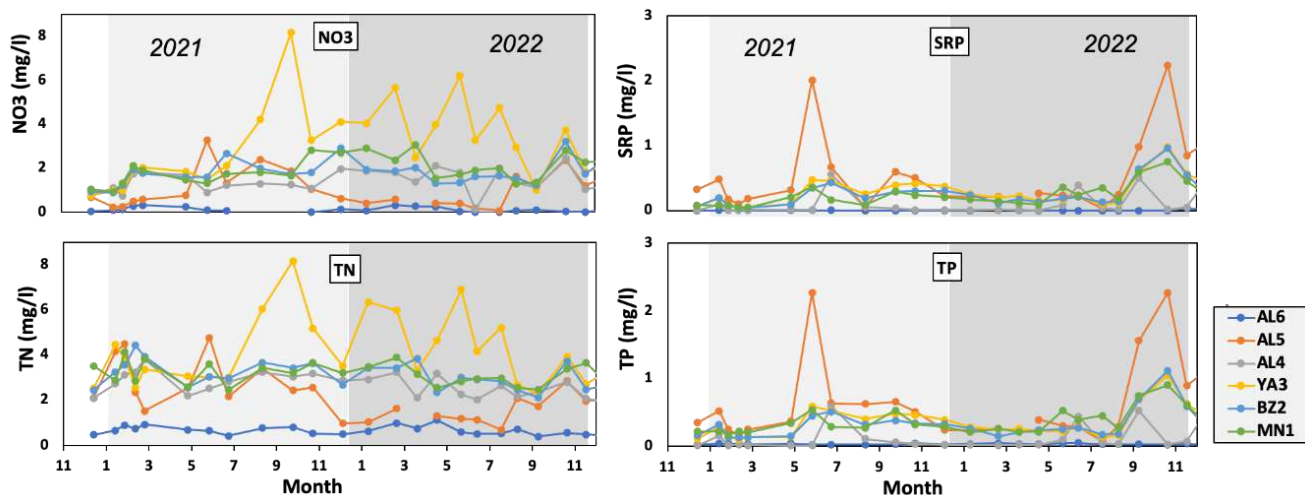


איור 85: אזור הניטור בירדן הדרומי ומיקומי ששת תחנות הניטור

תוצאות ודיון

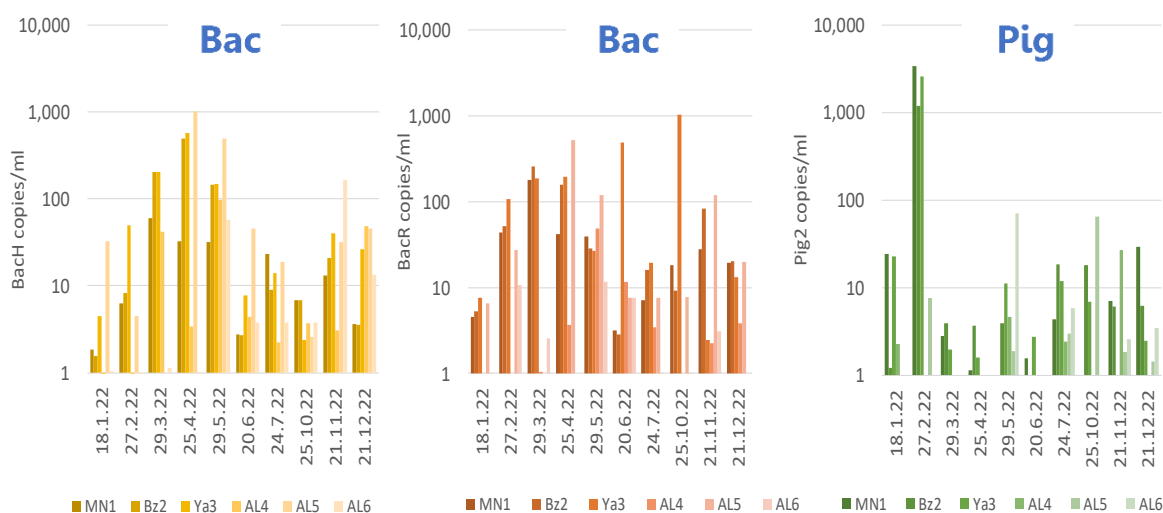
גיאוכימיה: עיקר הזרחן במים בכל התחנות הינו זרחן מומס ומתוכו הפאזה הדומיננטית הינה זרחן מומס ריאקטיבי (איור 85). ניתן לראות כי מי תחנת אלומות שומרים לאורך כל השנה על ריכוזים מאוד נמוכים ביחס לתחנות במורד. שיא מקומי בזמן בריכחי זרחן בשנת 2021 התרחש בעיקר בתחנת שפכי ביתניה (AL5) ביוני ושיא קטן בהרבה באוקטובר- נובמבר. בשנת 2022 מתרחש שיא ארוך יותר בתחנת ביתניה לאורך הסתיו (ספטמבר-נובמבר) וההשפעה על הריכוזים במורד בולטת הרבה יותר. שיאי זרחן אלו כנראה מייצגים קריסות במתקן הטיפול בביתניה.

חנקן כללי במי הירדן הדרומי הינו ברובו מומס והפאזה השולטת הינה ניטראט (איור 86). ניתן לראות בדומה לזרחן כי מי תחנת אלומות שומרים לאורך כל השנה על ריכוזים מאוד נמוכים ביחס לתחנות במורד. גם בזמנים בהם נראים שיאים בזרחן מומס אין ביטוי מקביל של ערכי ניטראט גבוהים. לעומת זאת, הזיהום המגיע מנחל יבנאל (YA3) אשר החל בצורה בולטת באמצע 2021 נמשך לאורך רוב 2022, לפחות עד ספטמבר.



איור 86: ריכוזי זרחן כללי (TP) וזרחן מסיס ריאקטיבי (SRP) -פאנל ימני, וחנקן כללי (TN) וניטראט (NO₃) - פאנל שמאלי עבור תחנות הניטור בירדן הדרומי לאורך 2021 ו-2022.

מיקרוביולוגיה ו-MST: התוצאות של הסמן BacH מצביעות על נוכחות של זיהום ממקור ביוב בנחל לאורך כל תקופת הסקר, עם עליה הדרגתית לאורך התקופה הגשומה וערכים מקסימליים בחודש אפריל. בערכי השיא מגיע הזיהום לערכים הקרובים ל-1000 העתקים למל', שהוא ערך גבוה אך אינו מצביע על מקרה קיצון כגון פריצת ביוב או קריסה של מכון טיהור שפכים. תוצאות מהסמן BacR, מדגימות תבנית זיהום ממקור בקר שדומה בעיקרה לזו של זיהום 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. בתחנות AL5 ו YA3 נרשמו מספר אירועים של זיהום גבוה יחסית ממקור בקר שכלל הנראה נגרמו כתוצאה מרעית בקר בסמוך לנחל. בסך הכל לא נרשמו אירועי קיצון של זיהום ממקור בקר לאורך הסקר. זיהום ממקור חזיר היה נמוך יחסית רוב התקופה, למעט בחודש פברואר אז נרשם זיהום בינוני בשלושת התחנות האחרונות במורד הנחל, ככל הנראה כתוצאה מנוכחות של עדר חזירים באזור.



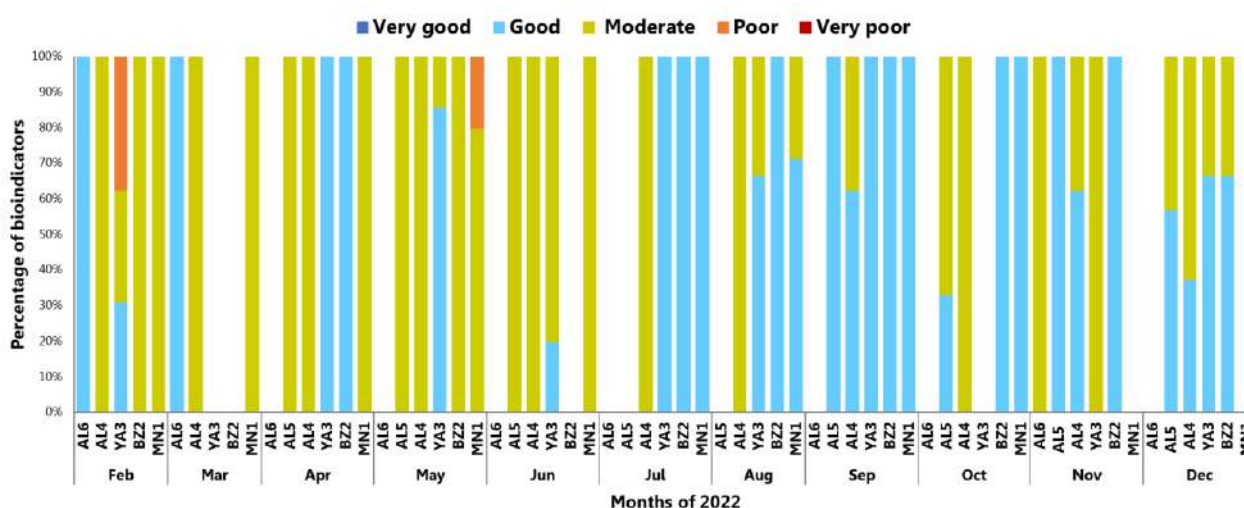
איור 87: כימות מקורות זיהום צואתי לאורך הירדן הדרומי בשיטת Microbial Source Tracking (MST). ריכוזי הסמנים הגנטיים לזיהום ממקור אדם (BacH), בקר (BacR) וחזיר (Pig2) נקבעו בעזרת qPCR כמותי והתוצאות מוצגות כמספר העתקים במל' שהתקבל בכל אחת משש תחנות הניטור לאורך תקופת הסקר. הערך המוצג הוא ממוצע של שלוש חזרות טכניות.

אצות בנתוניות (פיטובנתוס): באירופה נהוג להשתמש באינדקס של צורניות ואצות הנמצאות בבנתוס (פיטובנתוס), לקביעת מדדי איכות המים בנחל, כלומר שימוש במינים אינדיקטורים, לכן התחלנו לעקוב אחרי הפיטובנתוס בירדן הדרומי בשליש האחרון של 2021, בו זוהו 32 מינים. בשנת 2022 זוהו 56 מיני פיטובנתוס לאורך כל הנחל, השייכים לשש מערכות שונות (טבלה 14), כאשר רוב המינים שייכים למערכת הצורניות (45%) והציאנובקטריה (36%).

טבלה 14: מספר המינים שזוהו בירדן הדרומי 2022 לפי מערכות טקסונומיות

Phylum	מערכות בעברית	No. of species
Bacillariophyta	צורניות	25
Chlorophyta	ירוקיות	7
Charophyta	נאוניתיות	1
Euglenozoa	עינניות	1
Cyanobacteria	כחוליות	20
Ochrophyta		2
Total		56

מדד איכות המים הנקבע על פי מינים אינדיקטורים, מתבצע תוך שימוש ב Saprobit index. מדד הספרוביות מציג את יכולת המערכת של גוף המים הנבדק לווסת את עצמו ולפרק חומרים אורגניים. כאשר מבצעים בדיקה זו על הירדן הדרומי אנו מוצאים כי איכות המים טובה יותר בנחל בחודשים החמים ויבשים ויורדת בחודשים הקרים בעונה הגשומה (איור 88). ניתן לראות הבדלים באיכות המים באותו חודש בתחנות השונות, אשר מושפעים כנראה ממקור המים הנכנס לנחל באותה נקודה. מתוך מדד זה ניתן לראות שני אירועים בלתי תלויים שבהם חלה הרעה משמעותית באיכות המים. האחד בכניסה של נחל יבניאל בחודש פברואר, והשני במאי 2022 בתחנת מנחמיה. בסך הכל על פי מדד זה ניתן לראות שיפור באיכות המים בהשוואה ל- 2021 (ראו דו"ח חיא"ל מס' T8-2022 - דו"ח שנתי של המעבדה לשנת 2021).



איור 88: מדד לאיכות המים לאורך הירדן הדרומי בשנת 2022 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.

4.2 ניטור מעיינות בגולן



**מחקר
במימון
חיא"ל**

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

- לאחר שנתיים של ניטור ניתן לאפיין מגמות גיאוכימיות עונתיות אופייניות לכל מעיין וכן את היחס האופייני בין מעיינות לבריכות במורד.
- עבור כל המעיינות חנקן מומס מהווה את הפאזה העיקרית של החנקן ומתוכו ניטראט הוא הצורן הבולט. בזרחן מגמות דומות בהן זרחן מומס ריאקטיבי שולט רב הזמן.
- בולטים אירועים עם שיאי זרחן כללי גבוהים ללא עליה בזרחן מומס.
- בדיקה של רמת הזיהום האורגני בכל מעיין, על פי אוכלוסיית האצות שלו (ביו-אינדיקציה) מראה החמרה ברמת הזיהום במים בחודש אוגוסט ברוב המעיינות, בעיקר בבריכות.

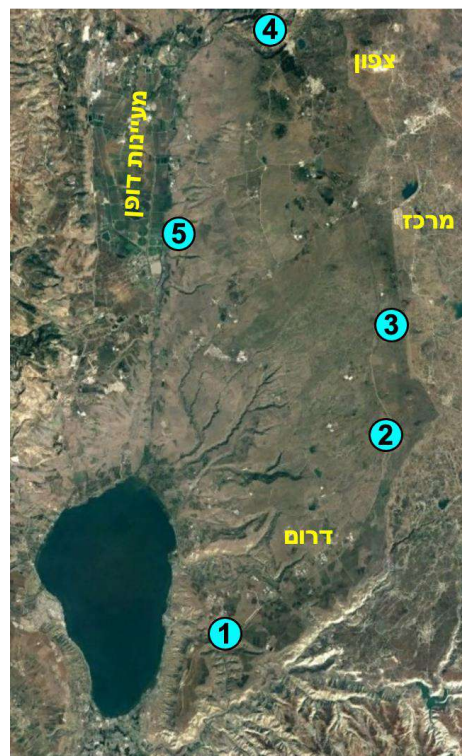
מטרת המחקר

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

רקע

פרויקט הניטור של מעיינות הגולן יצא לדרך בתחילת 2021 והוא פרויקט רב שנתי מתמשך.

הניטור מתמקד כיום ב- 5 מעיינות המייצגים אזורים שונים בגולן: (1) עין פיק, (2) עין ג'וחדר (עין אורחה), (3) עין ג'ואיזה, (4) עין נמרוד, (5) עין דרבשיה (איור 89) והוא צפוי להתרחב בעתיד הקרוב לכלול מעיינות נוספים. בשלוש מהמעיינות: פיק, ג'וחדר וג'ואיזה נדגמים מי המעיין ובמקביל מי בריכה בנויה מספר מטרים עד עשרות מטרים במורד.



איור 89: מפת דיגום מעיינות גולן.

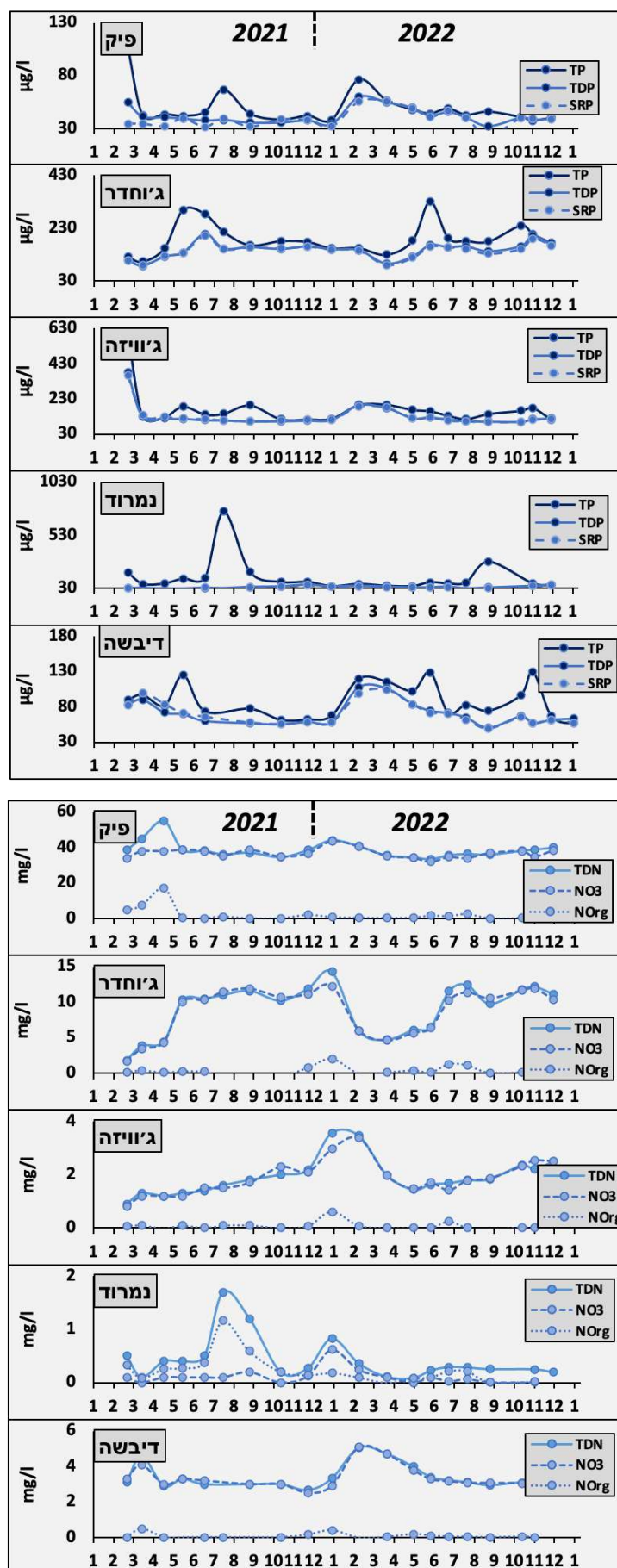
שיטות

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 מס' 4.1 ניטור ירדן דרומי).

תוצאות ודיון

א. גיאוכימיה:

ההרכב הגיאוכימי של סדרת המעיינות והבריכות הנלוות לאורך שנת 2022 שונה בין המעיינות השונים המנוטרים בפרויקט זה. יחד עם זאת, המגמות העיקריות דומות בין המעיינות, וכן היחס בין המעיינות לבריכות. כך למשל בכל המעיינות עיקר החנקן (הכללי) נמצא בפאזה המומסת (חנקן כללי מומס) חו מיוצגת ברובה ע"י ניטראט (פאנלים תחתונים באיור 90). גם בזרחן הפאזה המומסת שולטת רב הזמן ברב המעיינות ובה הזרחן המומס הריאקטיבי בולט' אולם בולטים אירועים בהם יש עליה גדולה בזרחן הכללי ללא עליה במומס (פאנלים עליונים באיור 90).



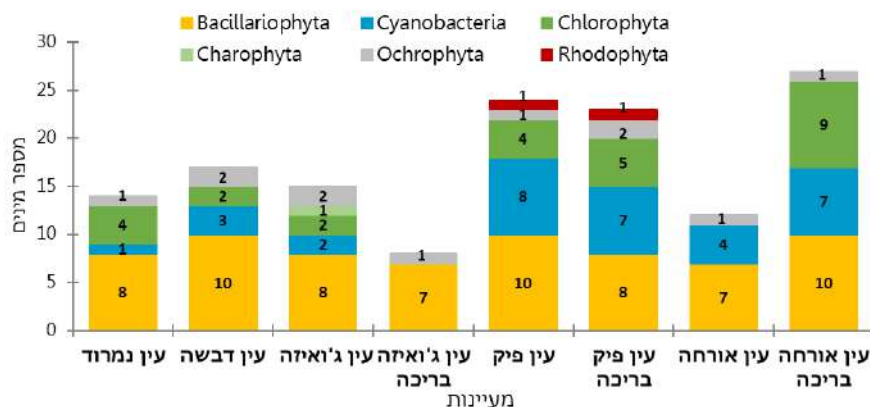
איור 90: גיאוכימיה של מעיינות הניטור. צורוני זרחן בפאנלים העליונים וחנקן בפאנלים התחתונים.

השוואה בין השנים 2022 לשנה הקודמת מראה כי עבור רב המעיינות (איור 90) וכן היחס בין מעיינות לבריכות (לא מוצג כאן), ישנן מגמות עונתיות האופייניות לכל מעין והן חוזרות על עצמן עד כה בצורה בולטת. מבין המעיינות המנוטרים בפרויקט עין פיק בולט עם מוליכות חשמלית גבוהה (עד כ- $1300 \mu\text{S}/\text{cm}$ לעומת כ- $200\text{--}400 \mu\text{S}/\text{cm}$ עבור שאר המעיינות) וכן שינויים בפרמטר זה לאורך 2022 בהיקף משמעותי יותר משנת 2021. עין פיק גם בולט בחנקן גבוה יחסית לשאר המעיינות אך ללא זרחן גבוה במקביל (איור 90).

ב. פיטובנטוס

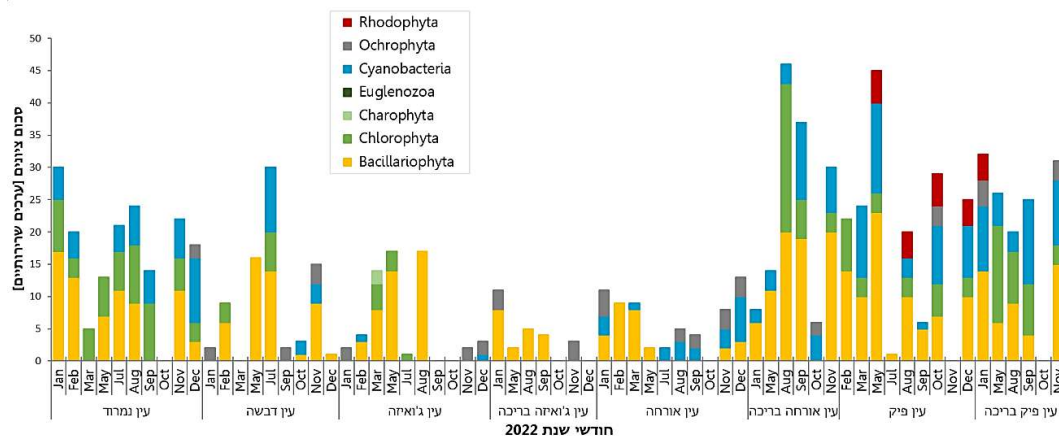
אצות צמודות מצע (פיטובנטוס) משקפת את מצב גוף המים, מאחר והאוכלוסיות מושפעות ומשתנות בהתאם לשינויים המתרחשים בבית הגידול. במהלך 2022 נצפו סה"כ 54 מיני פיטובנטוס (או אצות אפיפיטיות) בחמשת המעיינות יחד, לעומת 55 מינים ב- 2021. עושר המינים הגדול ביותר נצפה בבריכת הקצינים של עין אורחה עם 27 מינים (איור 91). כאשר בוחנים את הנביעה והבריכה יחד, עושר המינים הגדול ביותר נצפה בעין פיק (30 מינים), אחריו עין אורחה (29), בעין ג'ואיזה ועין דבשה נצפו 17 מיני פיטובנטוס בכל אחד ובעין נמרוד 14 מינים בלבד. מינים אלה שייכים ל- 6 מערכות שונות: כחוליות (ציאנובקטריה), ירוקיות (Chlorophyta), נאווניתיות (Charophyta), צורניות (Bacillariophyta), Ochrophyta (למערה זו שייכות אצות זהוביות) ואדומיות (Rhodophyta). כאשר הצורניות מהוות את המערכה העיקרית בחברת הפיטובנטוס של כל המעיינות (איור 91). עם זאת, לכל מעיין יש את חברת הפיטובנטוס האופיינית לו, כנראה כתלות בגורמים אחרים כגון: מליחות, טמפרטורה ורמת זיהום אורגני.

במעיינות בהם קיימת בריכת קצינים הנפרדת מהנביעה ניתן להבחין בהבדלים בהרכב חברת האוכלוסיות בין שני המקומות. בעוד בעין אורחה עושר המינים גדול יותר בבריכה, בעין פיק ועין ג'ואיזה המצב הפוך (איור 91).



איור 91: מספר מיני הפיטובנטוס במעיינות הגולן על פי מערכות.

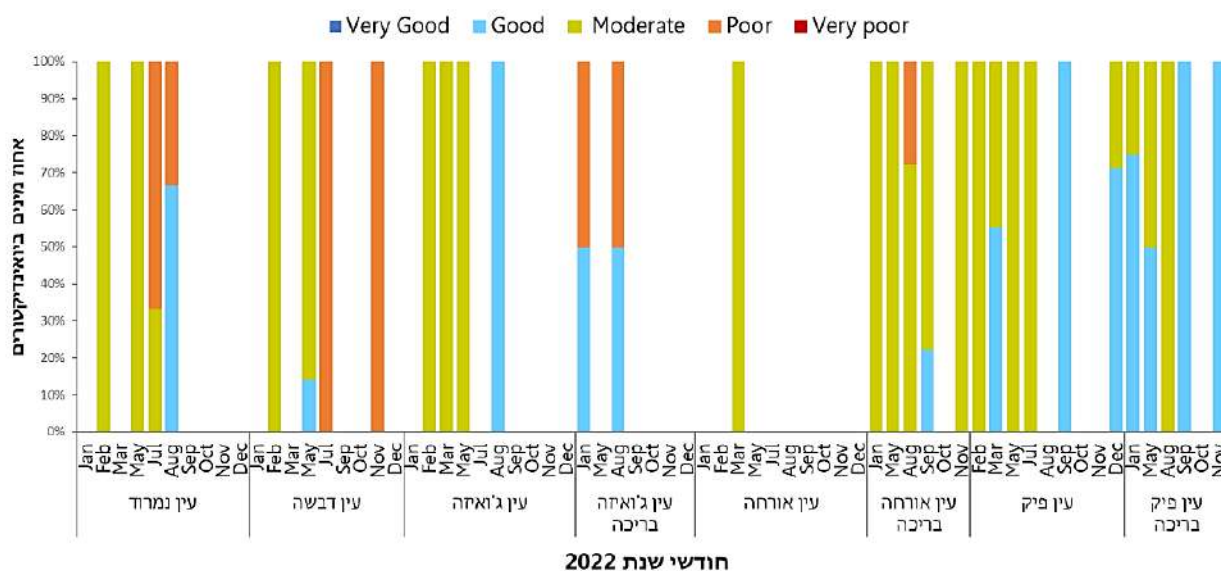
התפוצה היחסית של הפיטובנטוס לאורך שנת 2022 בכל מעיין מוצגת באיור 92. בהסתכלות שנתית על העונתיות של האוכלוסיות, ניתן להבחין שמערכת הצורניות לרוב דומיננטית בכל המעיינות לאורך השנה. יתרה מזאת, כאשר בוחנים כל מעיין בנפרד ניתן להבחין בעונתיות חוזרת בעין נמרוד. למשל בחודש ספטמבר ישנה העלמות של הצורניות ונוכחות של ציאנובקטריה וירוקיות במעיין, תופעה דומה נצפתה בחודש אוגוסט בשנת 2021. בנוסף חודש נובמבר מאופיין בדומיננטיות של ציאנובקטריה חוטית מסוג *Phormidium* במעיין, תופעה שנצפתה ב- 2021 וחזרה על עצמה ב- 2022.



איור 92: עושר מיני פיטובנתוס במעיינות הגולן לאורך שנת 2022.

במרוצת 2022 צפינו בכניסה של מיני פיטובנתוס חדשים למעיינות שונים, כאלו שלא נצפו בשנת 2021. לדוגמא בעין ג'ואיזה הופיעה הנאוויטית *Closterium strigosum* במרץ השנה (איור 92). וגם בעין פיק נצפו שלושה מינים שלא הובחנו ב 2021 ממערכת ה- *Ochrophyta: Botryochlorys sp., Chaetopodia sp., Heterococcus sp.*

מתוך רשימת מיני הפיטובנתוס והתפוצה היחסית שלהם ניתן לחשב את מדד איכות המים עבור המעיינות (איור 93). מדד זה נקבע על פי מינים אינדיקטורים, תוך שימוש ב Saprobit index של כל מין. מדד הספרוביות מציג את יכולת המערכת של גוף המים הנבדק לווסת את עצמו ולפרק חומרים אורגניים. לפי שיטה זו רואים החמרה ברמת זיהום המים בחודש אוגוסט ברוב המעיינות, בעיקר בבריכות. ניתן לשער כי החמרה זו נובעת מהלחץ החזק המופעל על מערכות אלו על ידי פעילות אנושית בחודשי הקיץ.



איור 93: מדד לאיכות המים במעיינות הגולן לשנת 2022 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.

4.3 ניטור פיטופלנקטון, זואופלנקטון ודגים באגמון החולה



מבט לאגמון מתחנת הדיגום במוצא. צילם: דוד קמינגס, יוני 2021.

**מחקר במימון
רשות המים,
קק"ל ואגודת
החקלאים**

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

- מגוון המינים וריכוזי הפרטים של הפיטופלנקטון והזואופלנקטון במוצא האגמון גבוהים בהרבה מאשר בתחנות האחרות. תחנת הפרשל דלה במיוחד בפלנקטון.
- לאחר שנת ניטור בתעלה 101 נמצא שגם תחנה זו דלה בפיטופלנקטון וזואופלנקטון לעומת תחנת המוצא.
- הקבוצות עם מספרי הפרטים הגבוהים ביותר של הפיטופלנקטון היו ירוקיות ועינניות ושל הזואופלנקטון - גלגליות.
- רוב הדגים שנתפסו בסתיו ואביב 2022 היו שייכים ל-3 מתוך 15 מיני דגים שנמצאו באגמון: גמבוזיה, יבלסת מצויה, נאוית כחולה.
- כניסת הירדן והתעלות הצפוניות ממשיכות להוות בית גידול ייחודי לדגים מהמינים היותר נדירים.
- מומלץ להמשיך לדגום פיטופלנקטון וזואופלנקטון רק במוצא האגמון ובמרכז האגם. מומלץ להפסיק לדגום ביתר התחנות אבל להגדיל את תדירות הדיגום לאחת לשבועיים, יחד עם הדיגום לכימיה.
- לגבי דגים, מומלץ להמשיך בדיגום כמו שמתבצע כיום.

מעקב אחר הפיטופלנקטון, זואופלנקטון והדגים באגמון לשם למידה של מורכבות מארג המזון ועל מנת להסיק על תפקוד גוף המים כמערכת אקולוגית.

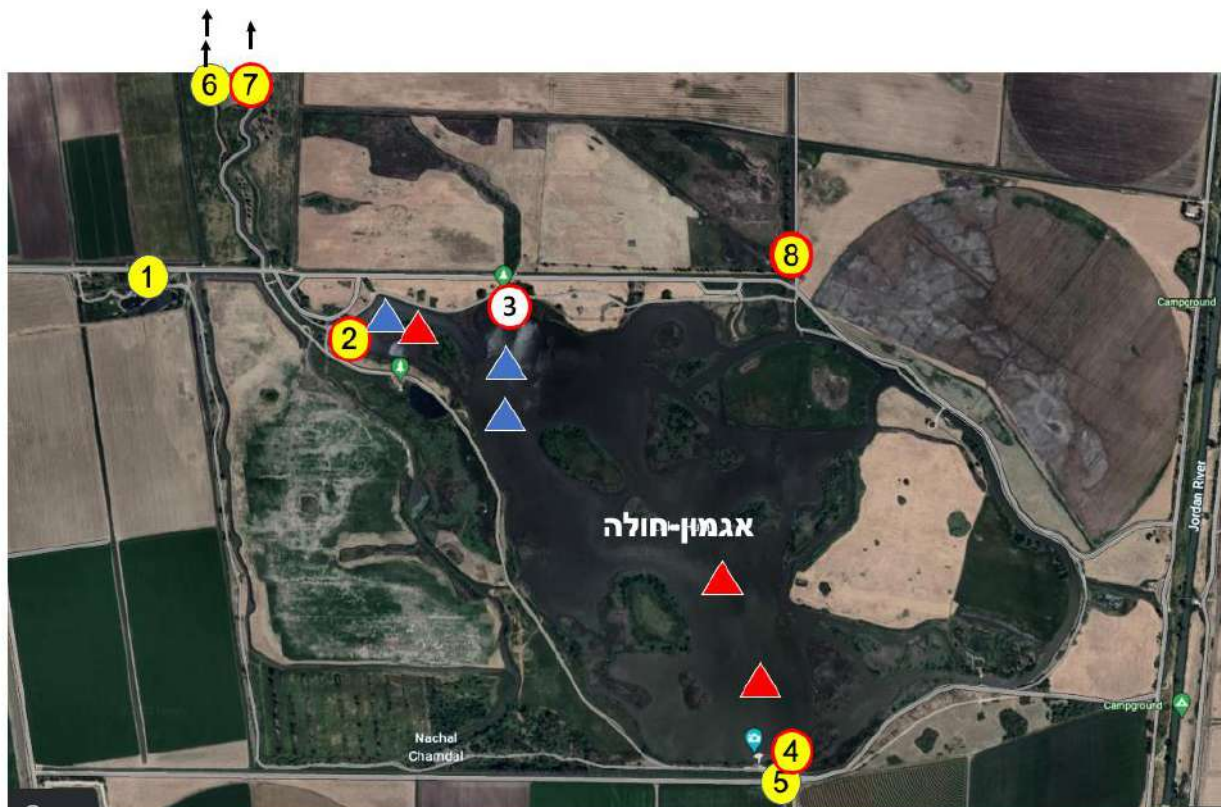
רקע

מערכות אקולוגיות של מים מתוקים הן בין המערכות האקולוגיות המאוימות ביותר בעולם מבחינת זיהומים, הרס בתי גידול, שינויים אקלימיים ועוד. כל אלו משפיעים בצורה משמעותית על המגוון הביולוגי המתקיים בהן. שינויים ואובדן של המגוון הביולוגי 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 שלו משפיעים על המערכת האקולוגית ועל איכות המים. הזואופלנקטון משמש כמקור מזון לדגים, כצרכן ראשוני ושוני 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 שבין צרכן ראשוני ושוני ועד טורף-על. הם ניזונים מאצות וחסרי חוליות בפלנקטון ובבנתוס, וכן מטריפת דגים אחרים. אגמון החולה מהווה מערכת אקוטית ייחודית ואתר תיירותי המושך מאות אלפי מבקרים בשנה. את האגם הקטן ($1.1 \sim \text{ק"מ}^2$) והרדוד (עומק $> 0.5 \text{ מ'}$) הקימו 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. בפרק זה נציג את תוצאות הניטור שבוצע על ידינו ב-2022.

שיטות

הדיגום:

דוגמאות לבדיקת ריכוזי כלורופיל ולזיהוי וספירת פיטופלנקטון וזואופלנקטון נאספו מדי חודש ע"י על ידי דנה קליין ממיג"ל ב-5 תחנות (איור 94, טבלה 15): פרשל, כניסת הירדן המשוחזר לאגמון, מעגן, תעלה 101 (נקודה שהוספה בתחילת 2002 כיוון שהתעלה היא מקור המים העיקרי לאגמון) ומוצא האגמון. החל מספטמבר 2022 דגמנו לכלורופיל ולפיטופלנקטון גם בתחנה שישית, במוצא תעלת 404. לכלורופיל, דוגמאות מים של 25 מ"ל, ב-3 חזרות, סוננו על פילטרים GF/C והוקפאו ב- 20°C , עד להמשך טיפול. לפיטופלנקטון, 100 מ"ל 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 94: מפת האגמון ומיקום תחנות הדיגום. תחנות לפיטופלנקטון, כלורופיל חואופלנקטון - 5 העיגולים שסביבם פס אדום. תחנות לדיגום דגים באלקטרושוקר - עיגולים צהובים. מיקום התחנות הממוספרות ושמותיהן בטקסט: 1. הגן הבוטני. 2. כניסה לאגמון. 3. חוף צפוני/מעגן. 4. מוצא האגמון (בתוך גוף המים). 5. תעלת האפס (בתעלה מחוץ לגוף המים). 6. ירדן צפונית חדשה (מחוץ למפה). 7. פרשל (מחוץ למפה). 8. תעלה 101. משולשים - מיקום פריסת רשתות נורדיות לתפיסת דגים בגוף המים: אדום - בסתיו, כחול - באביב.

טבלה 15: תאריכי הדיגום בשנת 2022 בנקודות הדיגום לפיטופלנקטון, כלורופיל חואופלנקטון.

תחנות ותאריכי דיגום	01/30	02/28	03/29	04/27	05/24	22/06	07/26	08/24	09/21	10/20	11/17	12/14
פרשל לגונה	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
כניסת הירדן	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
מעגן	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
101 גשר דרום	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
מוצא האגמון	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
מוצא 404									X	X	X	X

דגים נדגמו באלקטרושוקר מדגם EL64IIGI תוצרת חברת Hans Grassl GmbH ,גרמניה, פעמיים בשנה, באביב (6-7 לאפריל) ושוב בסתיו (24-25 לאוקטובר) ב-8 התחנות המצוינות באיור 94, וב-4 נוספות, בסביבת תעלה מקשרת (מחוץ למפה). הדגים שנאספו זוהו ונמדדו בשטח והוחזרו למים כאשר מרביתם במצב טוב או שנלקחו בצידניות עם קרח למעבדה לחקר הכנרת להמשך זיהוי ומדידות.

אתרי הדיגום שנבחרו מייצגים את מגוון בתי הגידול באגמון (ביצה, ברכה, נחל טבעי, תעלות). בכל אתר התבצעה עבודה פעילה עם שדה חשמלי למשך 15 דקות המחולקות ל-3 פרקים של 5 דקות כל אחד. דיגום דגים נוסף, באמצעות רשתות נורדיות, בוצע במספר נקודות בגוף המים אך לא בתעלות (איור 94). הדיגום ברשתות משלים את הדיגום במכשיר החשמלי בכך שנתפסים ברשתות דגים מכל מנעד הגדלים כמו גם מינים שבורחים מהזרם החשמלי. בכל דיגום נפרסו שש רשתות למשך 13 שעות בין 17:00 אחה"צ עד ל-6:00 בבוקר למחרת. הדגים שנתפסו הוכנסו לצדיניות עם קרח והובאו למעבדה לחקר הכנרת לזיהוי ומדידות. בכל נקודת דיגום נמדדו גם תנאים אביוטיים (טמפרטורה, pH וחמצן מומס) ע"י מכשיר Eureka Manta2 באביב ומכשיר YSI 556 Multi Probe System בסתיו.

אנליזות

כלורופיל: הפילטרים הקפואים והדוגמאות המשומרות הועברו למעבדה לחקר הכנרת. הפילטרים שימשו למדידה פלואורומטרית של ריכוזי הכלורופיל לאחר מיצוי באצטון 90% (כנהוג בניטור הכנרת). **פיטופלנקטון:** עשרה מ"ל של דוגמאות משומרות בלוגול נבדקו תחת מיקרוסקופ הפוך לאחר 24 שעות השקעה בתאי שיקוע והאצות זוהו לרמת המין או הסוג על פי הספרות הטקסונומית המקובלת. תדירות ההופעה של כל מין נקבעה לפי סולם התדירות של (Korde 1956), כאשר כל מין שנמצא בדוגמא קיבל ציון בין 1 (נדיר) ל-6 (דומיננטי ונפוץ מאד). על סמך ציונים אלו חישובנו בכל דוגמא לכל קבוצה (קבוצה טקסונומית או קטגורית איכות מים שאיחדה מספר מינים) את סך הציונים שלה (Sum of scores=SoS), מדד חצי-כמותי לכמות המיקרואצות בקבוצה. סכום הציונים מכל הקבוצות (Total SoS) שימש כמדד חצי-כמותי לסה"כ הפיטופלנקטון בדוגמא.

זואופלנקטון: חלק יחסי של דוגמת הזואופלנקטון המרוכזת נצבע בצבען Eosin ונלקח לספירה מיקרוסקופית בהגדלה של 50 x (קופפודה וקלדוצרה) או בהגדלה של 100 x או 200 x (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. ריכוזי הזואופלנקטון מדווחים כמספר הפרטים לליטר. **דגים:** הדגים שהובאו למעבדה זוהו לרמת המין, הזויג, נמדדו ונשקלו. מדדי שנון וסימפסון חושבו לדגים בבתי הגידול השונים. מדד שנון נותן משקל זהה לכל המינים שנדגמים ולכן מינים נדירים מקבלים משקל רב יותר. מדד סימפסון נותן משקל רב יותר למינים דומיננטיים ולכן משקלם של מינים אלה גבוה יותר. בחישוב מדדי המגוון תוצאות הרשתות הנורדיות ותחנת מוצא האגמון אוחדו ל"תחנה" אחת הנקראת אגמון ומייצגת את כלל הפרטים שנתפסו בגוף המים המרכזי של האגמון. מדדי שנון וסימפסון מחושבים לפי הנוסחאות:

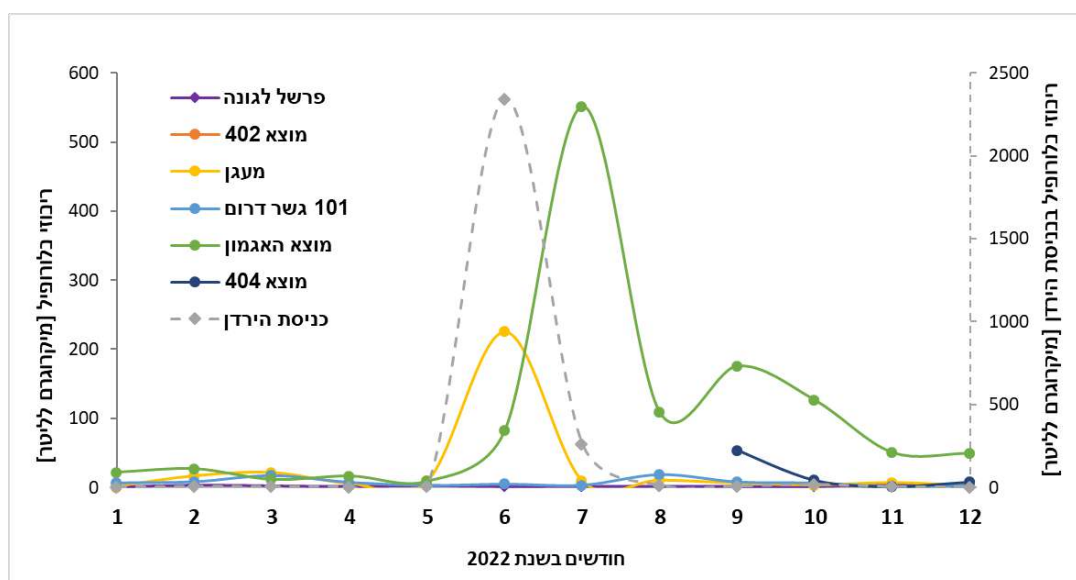
$$Shanon\ index\ (H) = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$$

$$Simpson\ index\ (D) = 1 / \sum_{i=1}^s P_i^2$$

כאשר P_i מסמל את הפרופורציה של פרטים ממין אחד מתוך סה"כ הפרטים ו-S מסמל את מספר המינים הכולל שנדגמו.

תוצאות ודיון

כלורופיל: ריכוז הכלורופיל בדוגמה מהווה אינדיקציה לבימסת האצות במים. באופן בולט ועקבי ריכוז הכלורופיל בתחנת המוצא מהאגמון היו גבוהים מהריכוזים בכל התחנות האחרות, למעט מקרה אחד יוצא דופן ביוני בו ריכוז הכלורופיל בתחנת כניסת הירדן היה המירבי (איור 95) וגם הגבוה ביותר שנרשם בכל השנה ($2,343.65 \mu\text{g/L}$), כתוצאה מפריחת עיניות חריגה (ראו בהמשך). ביוני נרשם גם ריכוז גבוה של כלורופיל בתחנת המעגן ($225 \mu\text{g/L}$) והמוצא ($83 \mu\text{g/L}$). בתחנת המוצא שיא הכלורופיל נרשם ביולי ($551.56 \mu\text{g/L}$) וערכים גבוהים, מעל $100 \mu\text{g/L}$, נמדדו גם בחודשים אוגוסט עד אוקטובר (איור 95).



איור 95: ריכוזי הכלורופיל באגמון בתחנות הדיגום לאורך שנת 2022. בגלל הערך הגבוה שנמדד בכניסת הירדן ביוני 2022 ערכי הכלורופיל בתחנה זו מוצגים על ציר- Y שני.

פיטופלנקטון - הרכב המינים: ב-2022 נצפו 136 מיני פיטופלנקטון בכל תחנות האגמון, שהשתייכו ל 8 מערכות. העיניות והירוקיות (37 מינים בכל קבוצה) עם מגוון מינים גדול ביותר, ואחריהן צורניות (31 מינים), ציאנובקטריה (11 מינים), נאווניתיות (9), (7) Ochrophyta, דינופלגלטים (4) ו Cryptista (3 מינים). במוצא האגמון נרשם עושר המינים הגדול ביותר, עם 101 מינים לעומת 24 מינים בפרשל (טבלה 16). בתעלה 404 נצפו רק 13 מינים, אבל תחנה זו נדגמה רק ב-4 החודשים האחרונים (טבלה 15). במוצא האגמון הקבוצה עם המגוון הגדול ביותר הייתה ירוקיות, בתעלה 101 - עיניות, ובשאר התחנות מספר המינים הגדול היה שייך לצורניות (טבלה 16).

טבלה 16: מספר מיני הפיטופלנקטון, לפי מערכות, שנצפו במהלך 2022 בכל תחנת דיגום של האגמון

Phylum	מערכה	תעלה 404	מוצא האגמון	תעלה 101	מעגן	כניסת הירדן	פרשל
Bacillariophyta	צורניות	5	13	14	21	20	12
Chlorophyta	ירוקיות	3	31	10	11	11	4
Charophyta	נאווניתיות	1	6	2	0	2	0
Euglenozoa	עיניות	1	29	17	17	16	4
Cyanobacteria	כחוליות	1	11	4	2	2	1
Cryptista		2	3	3	3	2	2

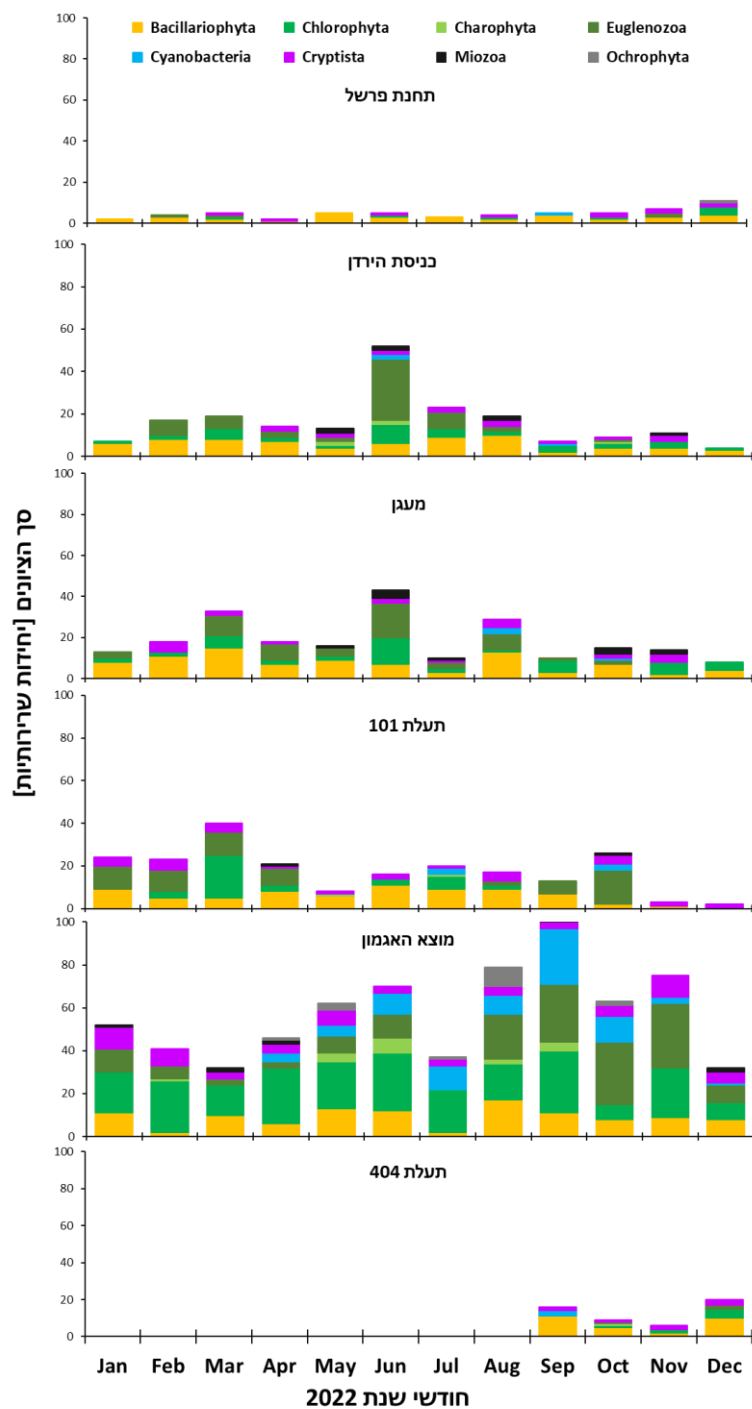
Phylum	מערכה	תעלה 404	מוצא האגמון	תעלה 101	מעגן	כניסת הירדן	פרשל
Miozoa	דינופלג'לטים	0	2	1	1	3	0
Ochrophyta		0	6	0	0	0	1
	סה"כ	13	101	51	55	56	24

בתחנת מוצא האגמון, באופן בולט, נרשמו ערכי סך ציונים (SoS) גבוהים יותר מאשר בכל יתר התחנות, עבור כל הקבוצות הטקסונומיות (איור 96). לכן, לאורך כל השנה ערך ה- total SoS הגבוה ביותר נרשם בתחנה זו (איור 96). במוצא האגמון, במהלך כל השנה אצות ירוקיות היו הקבוצה המגוונת ביותר, ועם הנוכחות הגבוהה ביותר (SoS מירבי), ואחריה קבוצת העיניניות. בקיץ, ציאנובקטריה היו נפוצות מאד ביציאה מאגמון אך היו מעטות או חסרות לגמרי בתחנות האחרות. גם אצות קסאנטופיטה ונאוונתניות נמצאו רק במוצא האגמון (איור 96).

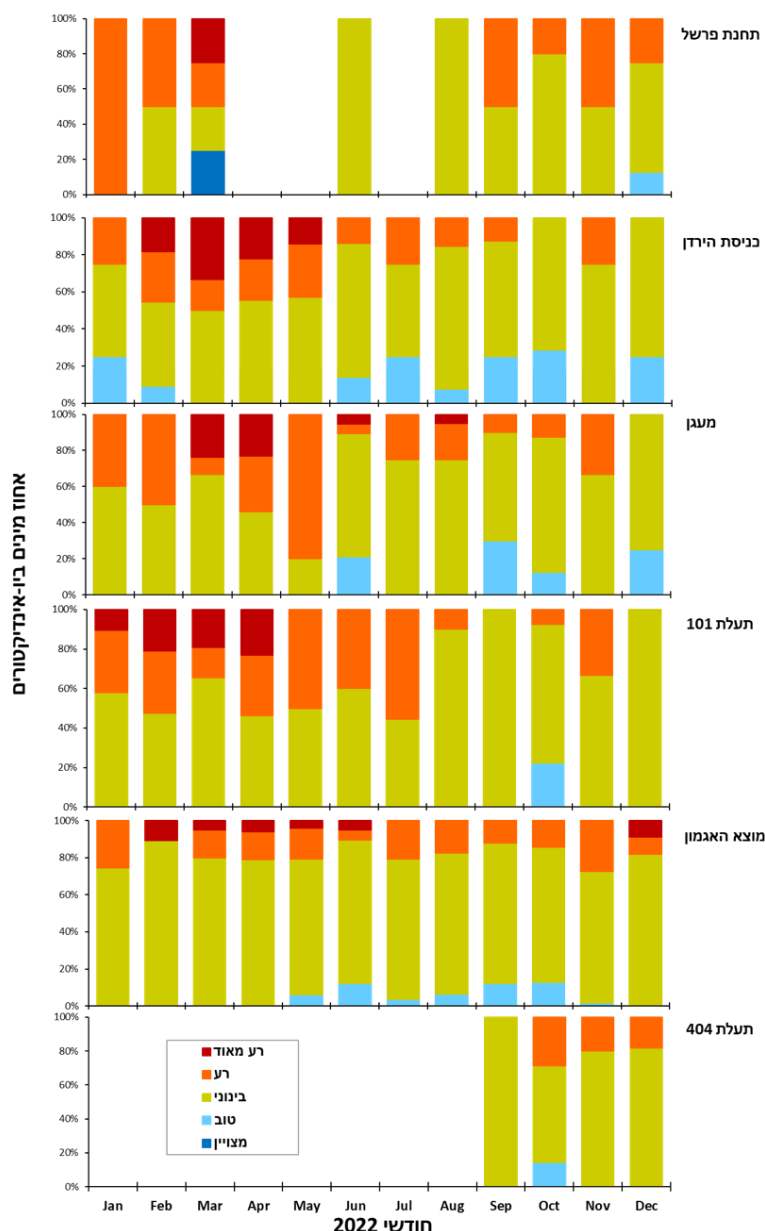
בתחנת פרשל כמעט ולא נמצא פיטופלנקטון. בתעלה 101, אותה התחלנו לדגום לראשונה בינואר 2022, הרכב המינים, והכמות היחסית שלהם היו די דומים למה שנמצא במעגן ובכניסת הירדן (איור 96).

ביוני 2022 נצפתה פריחה מאסיבית במיוחד בכניסת הירדן, וגם בתחנת מעגן, של העינינית *Euglena sanguinea* יחד עם הירוקית *Ankyra sp*. שצבעו את המים באדום. הדבר התבטא בריכוזי כלורופיל גבוהים במיוחד וגם בשיאים בסך הציונים של המדד החצי כמותי (איורים 95, 96). העינינית *Euglena sanguinea* נמצאה כמייצרת רעלנים לאחר דיווח על תמותת דגים לא מוסברת בחוות דגים מסחרית בצפון קרולינה, ארה"ב.

גם מבחינת איכות מים (איור 97), כפי שנקבעה על פי סך הציונים שקיבלו מינים אינדיקטורים לכל קטגוריה של איכות מים, נמצא שאיכות המים הטובה ביותר היא בתחנת המוצא, שם תרומת המינים המעידים על איכות מים "רעה" או "רעה ביותר" נמוכה יחסית לתחנות האחרות, לאורך כל השנה. ריכוזי הכלורופיל הגבוהים יותר ועושר גדול יותר של פיטופלנקטון הנצפה בתחנת המוצא לעומת התחנות האחרות מעיד על תנאים טובים יותר להתפתחות פיטופלנקטון, כמו זמן שהות ארוך יותר, זרימה איטית ואולי גם תנאי תאורה משופרים ו/או ריכוזי נוטריאנטים גבוהים יותר.



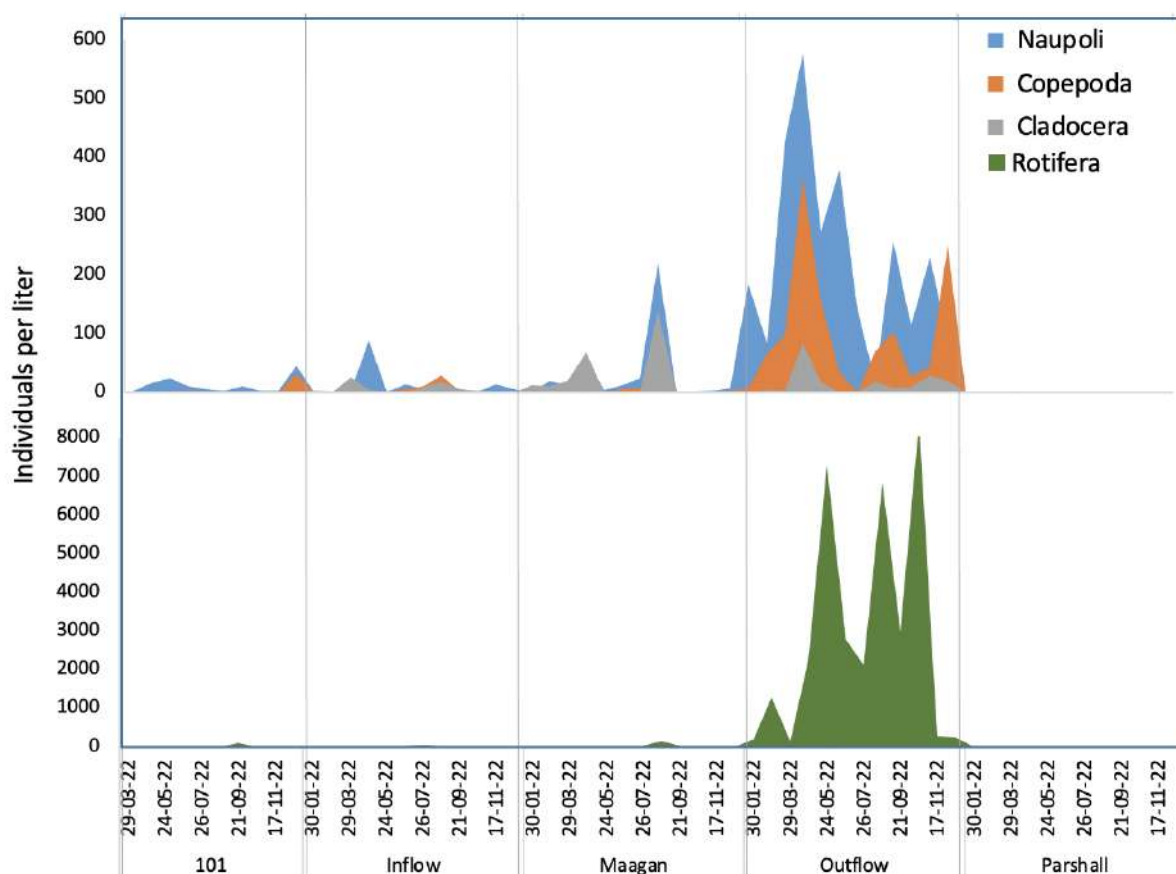
איור 96: הרכב חברות הפיטופלנקטון באגמון, לפי חלוקה למערכות, בנקודות הדיגום השונות, במהלך 2022. מוצגים הרכב המינים וכמות האצות היחסית (על פי המדד החצי כמותי של סך הציונים) בכל תחנה.



איור 97: איכות המים באגמון לשנת 2022 על פי נוכחות מינים אינדקטורים בריכזים לפי מדד החצי כמותי. בתחנת הפרשל בחלק מהדיגומים לא נמצאו מינים אינדקטורים ידועים.

זאופלנקטון:

כפי שנמצא לגבי הפיטופלנקטון, גם לגבי הזאופלנקטון, באופן בולט, צפיפות הפרטים הגבוהה ביותר נרשמה בתחנת מוצא האגמון (איור 98), בה נצפו ב-2-3 סדרי גודל יותר פרטים לליטר 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 מאגמון. ההבדל הגדול ביותר היה בריכוזי הגלגליות (Rotifera) שנמצאו בריכזים של אלפי פרטים לליטר במוצא האגמון לעומת פרטים בודדים עד עשרות פרטים לליטר בתחנות האחרות.



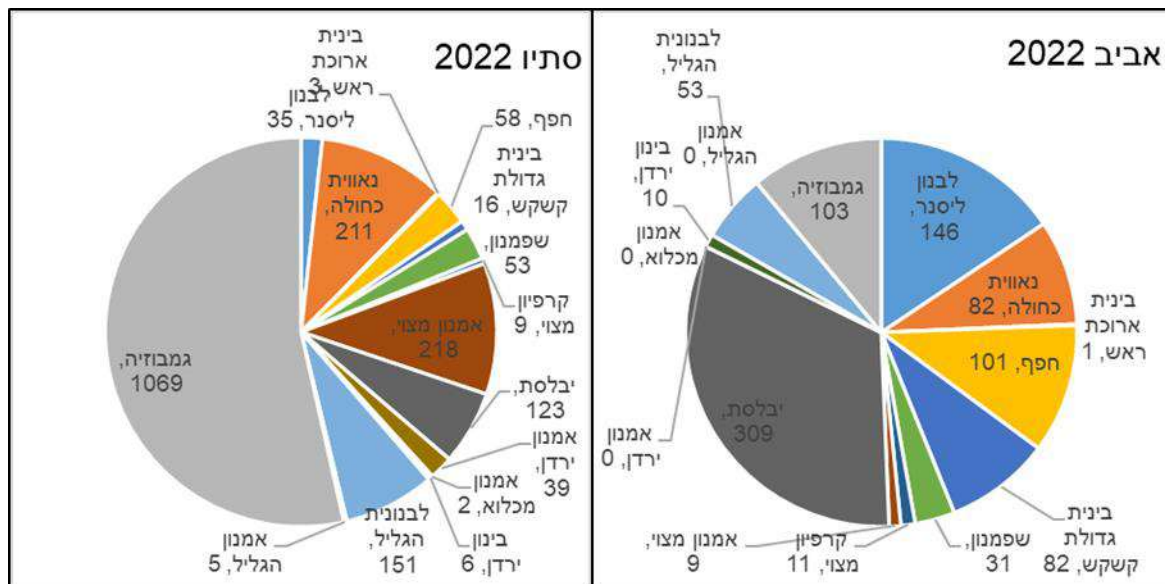
איור 98: זואופלנקטון: צפיפות הפרטים מהקבוצות הטקסונומיות השונות לליטר, בכל תחנה עפ"י מועדי הדיוגום ב-2022.

בממוצע, 86% מסה"כ הפרטים של הזואופלנקטון אשר נספרו בשנת 2022 היו גלגליות. צפיפות הגלגליות הגבוהה ביותר נרשמה במוצא האגמון עם ממוצע של 2,895 פרטים לליטר שהיו כ- 89% מכלל הזואופלנקטון בתחנה זו. גם בתחנות אחרות, מלבד מעגן הגלגליות היו בריכחים גבוהים יותר מאשר הקבוצות האחרות, ואחריהן nauplii, שטרגליים ודפנאיים. הרכב זה נשמר בתחנות פרשל, מוצא האגמון וכניסה 101. תחנת המעגן, הייתה יוצאת דופן בהרכב אוכלוסיית הזואופלנקטון שלה, עם צפיפות מירבית של nauplii, לאחריה גלגליות, דפנאיים ושטרגליים.

דגים:

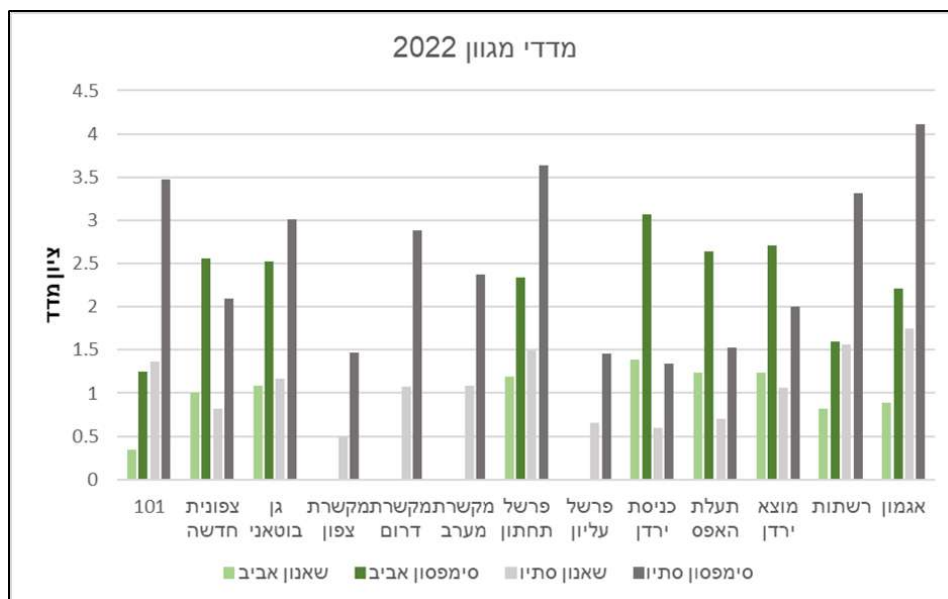
במהלך הסקרים ב-2022 נתפסו 2,936 דגים מ-15 מינים. שמונה מינים ממשפחת הקרפיוניים - קרפיון מצוי, בינית גדולת קשקש, בינית ארוכת ראש, חפף ישראלי, לבנון ליסנר, לבנונית הגליל, יבלסת מצויה. שלושה מינים ממשפחת האמנוניים - אמנון מצוי, אמנון מכלוא, אמנון גליל ואמנון ירדן. ארבעת המשפחות הנותרות מיוצגות ע"י מין אחד - משפחת הנאווייתיים ע"י נאוויית כחולה, משפחת הבינוניים ע"י בינון הירדן, משפחת השפמנוניים ע"י שפמנון מצוי ומשפחת הגבתיים ע"י הגמבזיה. מין אחד ממשפחת הקרפיונאים - עגלסת הנחלים שנמצא בעבר באגמון לא נמצא בדיוגום השנה ואילו מין אחד ממשפחת האמנוניים - אמנון הירדן נוסף השנה לרשימת מיני הדגים של האגמון (איור 99). כשני שלישים מהדגים שנתפסו הם מהמינים גמבזיה, יבלסת מצויה, תאוויית כחולה. מינים נוספים שנתפסו בכמויות משמעותיות הם לבנונית הגליל, אמנון מכלוא, קרפיון מצוי, בינית גדולת קשקש, שפמנון מצוי, חפף ישראלי, ולבנון ליסנר. המינים הנותרים (בינית ארוכת ראש, אמנון גליל, אמנון מכלוא ובינון הירדן) נתפסו בכמויות יחסית קטנות. בדיוגום האביב נתפסו 938 פרטים מ-12 מינים (איור 99). המין הנפוץ ביותר בדיוגום היה יבלסת מצויה אשר ממנו נתפסו 309 פרטים

בשש תחנות. בדיגום הסתיו נתפסו 1998 פרטים מ-15 מינים (איור 99) העלייה הגדולה במספר הפרטים אשר נתפסו בדיגום זה נובעת מכמויות גדולות של פרטים ממספר קטן של מיני דגים. המין הנפוץ ביותר מבחינת מספר הפרטים היה הגמבוזיה ממנה נתפסו בסתיו למעלה מאלף פרטים. האוכלוסיות הגדולות של גמבוזיה תאוית כחולה נמצאו באזורים של צמחיית גדות טבולה (כמו פטל).



איור 99: חלוקת מיני הדגים שנדגמו באגמון ובתעלות הקשורות לו באביב וסתיו 2022 לפי מספר פרטים.

בדיגום האביב, המגוון הביולוגי הגבוה ביותר נמצא בכניסת הירדן והנמוך ביותר בתעלה 101 (איור 100). בסתיו המגוון הביולוגי הגבוה ביותר נמצא בתחנת האגמון המשולבת (כלומר שילוב נתוני הרשתות והמכשיר החשמלי) והנמוך ביותר נמצא בתחנה המקשרת הצפונית. במוצא האגמון, תעלה צפונית חדשה וגן בוטני ציוני המגוון הביולוגי היו דומים בין דיגומי הסתיו והאביב.



איור 100: ציוני מדדי המגוון הביולוגי שאנון וסימפסון לתחנות הדיגום השונות. תחנת "אגמון" המוצגת בצדו הימני של התרשים מהווה שילוב של הפרטים שנתפסו בדיג חשמלי בתחנת מוצא האגמון והפרטים שנתפסו ע"י הרשתות הנורדיות בגוף המים המרכזי של האגמון.

הפיטופלנקטון של האגמון מאופיין בעיקר בעושר של צורניות, ירוקיות, ועיניניות (Euglenozoa), הזואופלנקטון מאופיין בעושר של גלגליות. בתחנת המוצא, מגוון המינים וגם כמות הפרטים של הפיטופלנקטון והזואופלנקטון היו גבוהים משמעותית מכל התחנות האחרות שנדגמו. בתחנת המוצא נמצאו גם מינים וקבוצות טקסונומיות שלא נמצאו בתחנות האחרות, כמו ציאנובקטריה, דינופלגלטים ואוקרופיטה. תוצאות ניטור הפלנקטון בשנתיים האחרונות 2021-2022 מחזקות את המסקנה כי מתבקש לשנות את תכנית הדיגום: לותר על דיגום בתחנות הדלילות בפלנקטון: פרשל, כניסת הירדן, מעגן, תעלה 101, תעלה 404. תחנות אלו נדגמות מהחוף והן מייצגות את עצמן בלבד, לא את כלל גוף המים. לעומת זאת, יש להגדיל את תדירות הדיגום בתחנת המוצא מאחת לחודש לאחת לשבועיים. במידת האפשר יש להוסיף תחנת דיגום במרכז האגם (דיגום מרחפן או מקיאק). לתחנת המוצא מתנקזים המים מגוף המים כולו והיא המייצגת הטובה ביותר את הרכב הפלנקטון באזורים הפתוחים של גוף המים. יש לזכור שפלנקטון הם יצורים מורחפים במים ללא כושר תנועה עצמית, עם זמן דור קצר של ימים בודדים (פיטופלנקטון) או שבועות בודדים (זואופלנקטון). לפיכך השינויים בהם לאורך זמן גדולים בהרבה מאלו שביצורים בעלי זמני דור ארוכים יותר, מה שמצדיק את הגדלת תדירות הדיגום. השיקולים הללו לא תופסים לגבי דגים, שהם בעלי זמן דור ארוך וכושר שחיה עצמאי אשר מאפשר את בחירת מקום המחיה שלהם. מומלץ להמשיך את הניטור בעזרת מכשיר הדיג 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: בדומה ל-2021, גם ב-2022 נתפסו בכניסת הירדן המספר הגדול ביותר של מינים שונים ומספר הגדול ביותר של פרטים של המין הנדיר, *בינון הירדן*. 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 על מנת להעריך את תרומתם למגוון הביולוגי.

4.4 פרויקט שיקום הדיפלה: פיטופלנקטון ופרמטרים נלווים



נופים וטבע מגופי המים בדיפלה. התמונות באדיבות רט"ג

**מחקר
במימון
רשות
הטבע
והגנים**

**תמר זהרי, ירון בארי-שליון, ניר קורן, אלה אלסטר, עוז צברי-דר,
אדית ליבוביץ, דיתי ויינר-מוציני**

- מטרת המחקר הינה תיאור ראשון של אוכלוסיות המיקרואצות ופרמטרים נלווים של איכות מים בגופי המים השונים בדיפלה.
- התנאים בדיפלה הם היפרטרופיים, כפי שמתבטא בריכוזי הנוטריאנטים, ריכוזי הכלורופיל, עומק הסקי הרדוד, צבע המים. תנאים כאלו יימשכו כל עוד מקורות המים בדיפלה ימשיכו להיות עשירים בחומרי דשן.
- בדיפלה שליטים מיני אצות בעלות עמידות למליחות גבוהה ויכולות הטרורופיות, המאפשרות ניצול של הדשנים האורגניים אשר קיימים במים. המין השליט, פרימנזיום פרום, רעיל לדגים.

מטרת המחקר

תיאור ראשון ומקיף של אוכלוסיות המיקרואצות ופרמטרים נלווים של איכות מים בגופי המים השונים בדיפלה, וכיצד הם משתנים במרחב ובין עונות השנה.

רקע

הדיפלה הוא אזור ביצתי סביב שפך נחל דליה לים התיכון (איור 101), מצפון לג'אסר-א-זרקא. בעשרות השנים האחרונות הביצות הוסדרו לברכות דגים של קיבוץ מעגן מיכאל. אולם, נותרו במקום מספר גופי מים בראשות המדינה, המוכרים כדיפלה צפונית, דיפלה מרכזית ודיפלה דרומית - אותם רט"ג מעוניינת לשקם ולהפוך לאתר תיירותי. לפני תחילת השיקום רט"ג נערכה לביצוע סקר מקיף של גופי המים, על הפיסיקה, הכימיה והביולוגיה שלהם.

המיקרואצות הן היצרניות הראשוניות בגופי מים, מארג המזון כולו תלוי בפחמן שהן מקבעות כמקור למזון ולאנרגיה. להרכב המינים שלהן השפעות ישירות ועקיפות על איכות המים ועל תפקוד המערכת האקולוגית. מינים רבים של מיקרואצות משמשים כביו-אינדיקטורים למצב הסביבה המימית בה הם נמצאים. במסגרת פרויקט זה ביצענו סקר ראשוני של מיני המיקרואצות בגופי המים השונים שבדיפלה, ושל פרמטרים סביבתיים המשפיעים על גידול המיקרואצות.



איור 101: מפת בתי הגידול במרחב פרויקט הדיפלה שלחוף הים התיכון, עם ציון 5 נקודות הדיגום לפיטופלנקטון ופרמטרים כימיים (ממוספרים באדום).

שיטות

חמש תחנות דיגום (ממוספרות באדום באיור 101) נדגמו פעמיים, ב-11 ליוני 2022, ושוב ב-2 לנובמבר 2022, בשעות הבוקר. הדיגום בוצע מסירת זודיאק מתנפחת, ממרכז גוף המים. גופי המים שנדגמו היו 3 הדיפליות (צפונית - נק' 8 במפה, מרכזית - 9, דרומית - 11), ברכת דגים מייצגת - 17, וברכה חופית - 5.

בכל תחנה נמדד עומק הקרקעית בנק' הדיגום, עומק סקי, ובאמצעות מולטי-פרוב (מודל: Manta-II; יצרן: Eureka) נמדדו העומק, המוליכות החשמלית, חמצן מומס (DO) ו-pH. בנוסף, נדגמו 3 ל' מים בכד פלסטי מקרבת פני השטח (עומק של 10-20 ס"מ), לאנליזות כימיות וביולוגיות במעבדה. תת-דגימה של 100 מ"ל (לבדיקת פיטופלנקטון) הועברה מיד לבקבוק כהה ושומרה בלוגול. דוגמאות המים הוכנסו לצידנית מקוררת, בה הובלו עם סיום הדיגום למעבדה לחקר הכנרת. האנליזות הכימיות בוצעו בשיטות לפי Standard Methods המשמשות את המעבדה לחקר הכנרת בניטור כנרת לאורך שנים: אמון (NH_3), ניטריט (NO_2), אורתופוספאט (SRP) - באוטואנלייזר Seal analytics. ניטראט (NO_3), זרחן כללי (TP), חנקן כללי (TN), חנקן מומס כללי (TDN) - בשיטת NAS. כלוריד (Cl) - בטיטרציה פוטנציומטרית עם כסף חנקתי. חומר מרחף (TSS) - ייבוש ב-105 מעלות ושקילה. חומר אורגני (OM) - בשיטת LOI (loss on ignition): ייבוש, שקילה, שריפה ב-550 מעלות ושקילה נוספת. כלורופיל - עם ההגעה למעבדה, 10 מ"ל מי דגימה, בדופליקטים, סוננו דרך פילטר GF/C 25 מ"מ והוקפאו. בהמשך, הפילטרים הוכנסו למיצוי באצטון 90% בקירור (4 מעלות) במשך הלילה, ולמחרת נכתשו בכותש רקמות. שרידי הפילטר הכתוש סולקו בצנטריפוגציה, ריכוז הכלורופיל בתסנין הנקי נקראו בפלואורומטר. פיטופלנקטון - דוגמאות משומרות בלוגול (10 מ"ל) נבדקו במיקרוסקופ הפוך לאחר 24 ש' השקעה בתא שיקוע. האצות זוהו לרמת המין או הסוג על פי הספרות הטקסונומית המקובלת. נרשמו מינים שנמצאו במספר גדול (עשרות) שדות ראיה, עד למצב שבו הוספת שדות ראיה לא מוסיפה מינים נוספים לרשימת המינים. תדירות ההופעה של כל מין קיבלה ציון בין 1 (נדיר) עד 6 (נפוץ ביותר) לפי סולם התדירות של Korde (1956).

תוצאות

תיאור כללי של גופי המים

דיגום יולי 2022: חמשת גופי המים שנבדקו היו בעומק של עשרות ס"מ בודדים, למעט ברכת הדגים שעומקה היה 2.2 מ'. בכלם המים היו עכורים, עם צבע מזהב וחדירות אור זעומה, כפי שהתבטא בעומק סקי של 10-20 ס"מ בכל התחנות (טבלה 17). חמשת גופי המים התאפיינו בטמפרטורת מים גבוהה (27-30.6 מעלות), מוליכות חשמלית גבוהה (מעל $6000 \mu\text{S/cm}$) המעידה על מים מליחים, ריכוזי כלוריד גבוהים בהתאמה (טווח: 1800-5000 מג"ל), עומס אורגני גבוה (ראו בהמשך), ו-pH מעל 8. שלושת גופי המים של הדיפלה (צפונית, מרכזית, דרומית) היו דומים יותר זה לזה בפרמטרים אלו מאשר ברכת הדגים והברכה החופית. הדבר התבטא בטמפרטורת המים הנמוכה יותר (27.0 - 28.3 בשלושת הדיפלות), במוליכות החשמלית, בריכוזי הכלורופיל (טבלה 17). גם ריכוזי החמצן המומס (טבלה 17) היו דומים בשלושת הדיפלות (102-125% רוויה) בעוד שבברכת הדגים הריכוז היה נמוך יותר (84.5% רוויה) ובברכה החופית נרשמה על-רוויה בולטת (149%).

דיגום נוב' 2022: עומק עמודת המים בשלושת גופי המים של הדיפלה היה 0.5-0.6 מ', כפול מהעומק בדיגום יולי. גם בדיגום זה המים בכל נקודות הדיגום היו עכורים, עם צבע מזהב וחדירות אור זעומה, כפי שהתבטא בעומק סקי של 20-30 ס"מ בכל התחנות (טבלה 17). טמפרטורת המים נעה בין 22.3-24.2 מעלות, המוליכות החשמלית הייתה גבוהה יותר מאשר ביולי (מעל $10,000 \mu\text{S/cm}$) וכך גם ריכוזי הכלוריד (מעל 3000 מג"ל לליטר). גם בדיגום זה ניכר היה שהתנאים הסביבתיים בשלושת גופי המים של הדיפלה (צפונית, מרכזית, דרומית) היו דומים יותר זה לזה מאשר לברכת הדגים ולברכה החופית. בברכה החופית נרשמה רמת pH חריגה של 7 לעומת ערכים בין 8.4-8.8 ביתר התחנות, הסיבה לכך לא ברורה בפרט שריכוז החמצן היה גבוה (11.1 מ"ג/ל).

טבלה 17: תוצאות מדידות במולטי-פרוב (מוליכות, טמפ', חמצן מומס DO - ריכוז ואחוז רוויה, pH), ריכוז כלוריד (מדידה במעבדה), הכלורופיל (ממצי) ועומק הסקי בזמן הדיגום. מספור ומיקום נק' הדיגום - כמצוין באיור 101.

Place	Sampling Point	date	Max depth	Cond.	temp.	pH	DO	DO	Cl-	Chl a	Secchi
		2022	m	µS/cm	°C		mg/L	%	mg/L	µg/L	m
בריכה חופית	5	11 Jul	0.4	15310	30.6	8.6	11.1	149.0	4997	182.5	0.2
דיפלה צפוני	8	11 Jul	0.2	7784	27.0	8.2	9.8	120.8	2304	410.1	0.1
דיפלה מרכזי	9	11 Jul	0.3	10190	27.6	8.2	8.1	102.3	3106	379.6	0.1
דיפלה דרומי	11	11 Jul	0.6	10830	28.3	8.3	9.6	125.2	3276	454.2	0.2
בריכת דגים	17	11 Jul	2.2	6434	30.0	8.6	6.5	84.5	1793	141.4	0.2
בריכה חופית	5	2 Nov	0.4	18100	24.2	7.0	11.0	135.5	5918	114.9	0.3
דיפלה צפוני	8	2 Nov	0.5	10500	22.8	8.6	10.4	121.8	3196	739.3	0.2
דיפלה מרכזי	9	2 Nov	0.5	11300	23.6	8.4	9.0	104.9	3431	584.4	0.3
דיפלה דרומי	11	2 Nov	0.6	11350	22.3	8.7	8.0	92.9	3434	891.5	0.2
בריכת דגים	17	2 Nov	2.0	10030	22.6	8.8	7.5	87.5	3031	487.7	0.2

זרחה וחנקן:

בדיגום יולי, חמשת גופי המים נמצאו עשירים מאד בזרחן כללי וחנקן כללי (טבלה 18): ריכוז הזרחן הכללי, TP, נע בין 520-620 מיקרוגרם לליטר בכל גופי המים למעט ברכת הדגים בה הריכוז היה כפול, מעל 1200 מיקרוגרם לליטר. גם הזרחן הכללי המומס, TDP, היה גבוה במיוחד בברכת הדגים (688 מיקרוגרם לליטר) בעוד שבארבעה גופי המים האחרים הריכוז היה בסדר גודל נמוך יותר, 45-56 מיקרוגרם לליטר (טבלה 18), אם כי גם אלו ריכוזים גבוהים. גם ריכוז החנקן הכללי (TN) היה גבוה מאד ונע בין 2.7-5.7 מיליגרם לליטר. מתוכם בסביבות 1 מ"ג לליטר היה חנקן מומס (TDN) והיתר חנקן חלקיקי. מתוך החנקן המומס, רק חלק מזערי היה אנאורגני (ניטראט + ניטריט + אמון) כלומר רוב החנקן המומס היה אורגני - מה שנותן יתרון רב לאצות מיקסוטרופיות, כמו פרימנזיום, שיכולות לנצל תרכובות אורגניות.

בדיגום נובמבר, ריכוזי החנקן והזרחן היו גבוהים עוד יותר מאשר ביולי. במיוחד ריכוזי הזרחן הכללי המומס (TDP) והאורתופוספאט (SRP) היו כפולים ויותר מאלו שנמדדו ביולי (טבלה 18). גם בנובמבר, כמחצית מהחנקן הכללי (TN) היה מומס (TDN), ומתוך החנקן המומס, הרוב היה אורגני, עם יתרון למינים מיקסוטרופיים (כמו הפרימנזיום) שיכולים לנצל אותו.

טבלה 18: ריכוזי נוטריאנטים, חומר מרחף (TSS), וחומר אורגני (OM) ב-5 תחנות הדיגום, בשני תאריכי הדיגום. יחידות הזרחנים הן במיקרוגרם לליטר בעוד היחידות לכל יתר הפרמטרים במיליגרם לליטר. ריכוזי הניטרט בכל הדיגומים היו מתחת לסף הזיהוי של 0.1 mgN/L, ואינם מוצגים בטבלה.

Place	Sampling Point	date	SRP	TDP	TP	TN	TDN	NH ₄	NO ₂	TSS	OM
		2022	µgP/L	µgP/L	µgP/L	mgN/L	mgN/L	mgN/L	mgN/L	mg/L	mg/L
בריכת חופית	5	11 Jul	11.4	49.2	592.3	5.7	1.8	0.050	0.0006	138.2	88.0
דיפלה צפוני	8	11 Jul	17.4	56.5	526.3	4.7	0.7	0.040	0.0004	249.2	109.8
דיפלה מרכזי	9	11 Jul	9.4	53.2	586.3	2.8	0.8	0.033	0.0005	128.0	77.2
דיפלה דרומי	11	11 Jul	7.2	45.4	619.7	2.7	0.9	0.032	0.0005	179.2	98.7
בריכת דגים	17	11 Jul	611.0	687.8	1231.3	3.0	1.4	0.030	0.0003	70.6	47.2
בריכת חופית	5	02 Nov	8.3	52.5	348.9	2.6	1.6	0.040	0.0005	82.3	55.5
דיפלה צפוני	8	02 Nov	25.3	104.7	805.3	3.0	1.2	0.029	0.0012	211.5	96.8
דיפלה מרכזי	9	02 Nov	30.9	123.4	595.8	2.7	1.2	0.027	0.0012	90.2	61.3
דיפלה דרומי	11	02 Nov	51.1	174.7	644.9	3.2	1.4	0.027	0.0014	88.4	66.0
בריכת דגים	17	02 Nov	18.1	100.9	531.1	2.5	1.2	0.024	0.0010	111.1	69.7

חומר מרחף וחומר אורגני

ריכוזי החומר המרחף היו גבוהים מאוד (70-250 מ"ג לליטר ביולי; 82-211 מ"ג לליטר בנובמבר). גם ריכוזי החומר האורגני היו גבוהים מאוד (47-110 מ"ג לליטר ביולי; 55-97 מ"ג לליטר בנובמבר). חומר אורגני היווה כמחצית עד שני שליש מהחומר המרחף. היתר הוא כנראה חרסיות וחלקיקים דקי גרגר אחרים אשר מורחפים מהקרקעית הקרובה מאד לפני המים, בעיקר על ידי רוח ודגים.

כלורופיל:

ביולי, ריכוזי הכלורופיל שנמדדו בשלושת גופי המים של הדיפלה היו גבוהים מאד, בסביבות ה-400 מיקרוגרם לליטר (טבלה 18). בברכת הדגים ובברכה החופית הם היו פחות גבוהים, 140 ו-180 מיקרוגרם לליטר בהתאמה, אך גם אלו ערכים גבוהים במיוחד. ריכוזי הכלורופיל הגבוהים מעידים על ריכוזים גבוהים וביומסה גבוהה של מיקרואצות במים. צבע המים החזק והשקיפות הנמוכה (עומק סקי של פחות מ-20 ס"מ) הם תוצאה של ריכוזי המיקרואצות הגבוהים. בחודש נובמבר, בשלושת גופי המים של הדיפלה הכלורופיל היה כמעט כפול מאשר בחודש יולי.

פיטופלנקטון:

דיגום יולי 2022: ביולי נרשמו 55 טקסונים של פיטופלנקטון אשר זוהו לרמת המין או הסוג. מתוכם, המספר הגדול ביותר של טקסונים (37) נרשם בתחנה 9 - דיפלה מרכזית בעוד שהמספר הנמוך ביותר (13 טקסונים) נמצא בברכה החופית ובדיפלה הצפונית והדרומית. בתחנה 17 שבברכת הדגים נרשם מספר ביניים של 28 טקסונים. הפיטופלנקטון השתייך ל-7 מערכות, שמהן הירוקיות והאיגלנחואה היו עם מגוון המינים הגדול ביותר (17 ו-18 טקסונים, בהתאמה).

מגוון גדול של מינים מקבוצות אלו אופייני לגופי מים רדודים באזורנו, כמו למשל באגמון-חולה. בנוסף, נמצאו בגופי המים ציאנובקטריה (8 טקסונים), צורניות (7), דינופלגלטים (3), קריפטופיטה (2), haptophyta (1) ועוד מין של אצה שוטונית בלתי מזוהה. הממצא החשוב ביותר לגבי פיטופלנקטון ביולי היה נוכחות בכל חמשת גופי המים של האצה השוטונית פרימנזיום פרוום *Prymnesium parvum* מקבוצת ההפטופיטה (טבלה 19). מין רעיל זה קיבל ציון 6 (מתוך 6) בדיפלה הצפונית והמרכזית - כלומר פרטים רבים שלו הופיעו בכל שדה ראיה שנבחן תחת המיקרוסקופ. זהו הציון הגבוה ביותר שניתן לקבל בסקלת תדירות ההופעה בה השתמשנו. מין רעיל זה הופיע בתדירות גבוהה גם בשלוש התחנות האחרות, בדיפלה הדרומית קיבל ציון 5 ובשתי התחנות הנוספות ציון 3 או 4 (טבלה 19). מין נוסף שהיה נפוץ מאד ביולי בשלושת גופי המים של הדיפלה (ציון 5), אבל לא נראה כלל בשני גופי המים הנוספים, היה הצורנית ציקלוטלה *Cyclotella meneghiniana*. זהו מין לא רעיל שלא פוגע באיכות המים. סביר ששני מינים נפוצים אלו, פרימנזיום וציקלוטלה, תרמו את רוב הכלורופיל שנמדד במים. בגלל העדרה של הציקלוטלה בנק' 5 ו- 17 (טבלה 19) גם ריכוזי הכלורופיל בהן היו באופן משמעותי נמוכים יותר (טבלה 18). ארבעה מיני ציאנובקטריה קיבלו ציון 5, בעיקר בתחנה 5 (ברכה חופית) - אבל אלו היו מינים שאינם רעילים.

טבלה 19: מיני הפיטופלנקטון היותר נפוצים (כלומר קיבלו ציון 5 ומעלה בסולם קורדה (Korde 1956) לפחות באחת התחנות) ב-5 גופי המים בדיפלה ב 22 יולי 2022 ושוב ב-2 לנובמבר 2022. המינים הנפוצים ביותר בגופי המים של הדיפלה (תחנות 8, 9, 11)

Phylum	Species	St. 5	St. 8	St. 9	St. 11	St. 17
22 July 2022						
Bacillariophyta	<i>Cyclotella meneghiniana</i>		5	5	5	
Cyanobacteria	<i>Anabaenopsis circularis</i>	5	2	3		
Cyanobacteria	<i>Aphanocapsa</i> sp.	5		2		
Cyanobacteria	<i>Merismopedia minima</i>					5
Cyanobacteria	<i>Merismopedia mediterranea</i>	5	2			
Haptophyta	<i>Prymnesium parvum</i>	3	5	6	6	4
Miozoa	<i>Gymnodinium</i> sp. (large)	5		4	3	
2 November						
Bacillariophyta	<i>Nitzschia acicularis</i>	4	4	5	6	4
Bacillariophyta	<i>Nitzschia longissima</i>	6			3	
Chlorophyta	<i>Tetraselmis</i> sp.	6				
Cryptophyta	<i>Cryptomonas</i> sp.	5	3	3	2	
Cyanophyta	<i>Aphanocapsa</i> sp.	6				
Haptophyta	<i>Prymnesium parvum</i>	4	4	5	4	
Miozoa	<i>Glenodinium</i> sp.				5	5
Miozoa	<i>Gymnodinium</i> sp. (medium)	3		4	5	

דיגום נובמבר 2022: בנובמבר נרשמו רק 19 טקסונים של פייטופלנקטון שזוהו לרמת המין או הסוג והשתייכו לאותן 7 מערכות שנרשמו ביולי. בכל אחד משלושת גופי המים של הדיפלה נרשמו בין 7-9 מינים. האצה השוטונית הרעילה פרימנזיום פרום נמצאה שוב כנפוצה מאד (ציון 4 או 5) בכל התחנות מלבד תחנה 5 (ברכה חופית). שני מיני צורניות *Cyclotella meneghiniana* ו- *Nitzschia acicularis* ועוד שני מינים של דינופלגלטים (*Gymnodinium*, *Glenodinium*) היו נפוצים מאד גם הם, גם למינים אלו יכולות מיקסוטרופיות. ציאנובקטריה לא נמצאו כלל בשלושת תחנות הדיפלה בנובמבר.

סיכום

1. התנאים בדיפלה הם היפרטרופיים, כפי שמתבטא בריכוזי הנוטריאנטים, ריכוזי הכלורופיל, עומק הסקי הרדוד, צבע המים. תנאים כאלו יימשכו כל עוד מקורות המים בדיפלה ימשיכו להיות עשירים בחומרי דשן. מים שמקורם מברכות הדגים הצמודות (המועברים מדי פעם לדיפלה) הם מקור עשיר כזה, כמו שראינו למשל בדיגום נובמבר תחנה 17 (ברכת דגים) שריכוזי הזרחן המומס שבה היו גבוהים בסדר גודל מאלו שבשלושת גופי הדיפלה.
2. התנאים בדיפלה (מים רדודים ולכן זמינות אור גבוהה, עומס אורגני גבוה, עושר בזרחן מומס), הם כאלו המעודדים מינים מיקסוטרופיים, כלומר בעלי יכולת להשתמש בחומרים אורגניים כמקורות מזון חלופיים לנוטריאנטים אנאורגניים. ואכן, רוב מיני הפייטופלנקטון שבדיפלה הם מיקסוטרופיים, כולל הפרימנזיום, הצורניות, הדינופלגלטים, הכריפטופיטים, האיגלנופיטים. רוב המינים האלו (מלבד הצורניות) הם גם בעלי יכולת שחיה באמצעות שוטונים, מה שמאפשר להם לנוע במים לכיוון האור.
3. תנאי המליחות הגבוהה (brackish water) גם הם מכתיבים מי המינים שיופיעו בדיפלה.
4. הפרימנזיום הוא מין מיקסוטרופי, שיכול לבצע פוטוסינתזה אבל יכול גם להיזון הטרוטרופית תוך ניצול תרכובות אורגניות מומסות במים ו/או בליעת חלקיקים אורגניים. בנוסף, הוא מותאם לתנאים של מליחות גבוהה. ואכן, הפרימנזיום מצוייה בריכוזים עצומים, היא המין השליט בשלושת גופי המים השונים של הדיפלה. היא נמצאה בריכוזים גבוהים בדוגמאות מים בסיוור מקדים באפריל 2022, ושוב בדיגומים ביולי ובנובמבר. זו אצה שמייצרת רעלנים קוטלי דגים וחסרי חוליות אחרים ומהווה איום חמור על ענף גידול הדגים של קיבוץ מעגן מיכאל.

המלצות

1. במידת האפשר, לנתק את גופי המים של הדיפלה מברכות הדגים. לא לאפשר תחלופת מים ביניהם.
2. לברר מה המקורות לריכוזי הזרחן והחנקן הגבוהים שבדיפלה ובמידת האפשר לצמצם הכנסת מים ממקורות אלו.

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



צילום: Julie Dermansky מתוך: Corbis/ Getty

מחקר
במימון
משרד
האנרגיה

אלה להב, גדעון גל, איל אופיר, פלג אסטרון

- מודלים אקולוגיים של ים תיכון הורחבו לכלול עקומות תגובה של מינים ימיים לרמות שונות של מזהמים שמקורם מאירוע שפך של דלקים פוסילים.
- המידע שנאסף מסקר ספרות תורגם לעקומות רגישות אשר קודדו למודלים המעודכנים.
- בסך הכל נבחנו 15 תרחישים של אירועי דליפה שונים בהיקפם מבחינת ריכוז המזהם, משך הדליפה והאזור הגיאוגרפי שבו התרחש הדליפה.
- אירוע זיהום של 10bbl לחודש זוהה כערך סף להשפעה על רוב המינים שנכללו במודל.

רקע

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

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

מטרת המחקר

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

שיטות

המודל המשמש אותנו במחקר זה נשען על מודלים קיימים אשר פותחו באמצעות תוכנת ה-Ecopath with Ecosim (Corrales et al. 2017, Corrales et al. 2018). המודלים מספקים תמונת מצב סטטית ודינמית מבחינת הביומסה של מרכיבי המערכת האקולוגית, והאינטראקציה בתוכה מיוצגת על ידי קבוצות מינים שונות. הקבוצות מכילות מינים אשר זהים בנישה האקולוגית ובמיוחד במקורות המזון שלהם ונקראות 'קבוצות פונקציונליות'. הן מכילות בתוכן מינים מקומיים ופולשים החל מחד-תאים ועד טורפי-על כגון כרישים. במחקר זה המודל מכיל 42 קבוצות פונקציונליות של מינים המצויים במרחב הכלכלי הישראלי. עבור קבוצות אלו (או רובם הגדול) קבענו עקומת תגובה ורגישות אשר נקבעו על בסיס התגובות הביולוגיות של המינים השונים למזהמים השונים. עקומות אלה התבססו על סקירת ספרות מקיפה של מחקרים בספרות הבינלאומית אשר כללה התייחסות למספר נושאים:

1. עקומת התגובה של מינים ימיים לחומרים מזהמים שמקורם בדלקים פוסילים, אשר נאספו מאזורים בהם היו אירועי זיהום (אלסקה ומפרץ מקסיקו), במטרה להתאים את עקומות התגובה למינים דומים המצויים בים התיכון.
2. מודלים זהים שנבנו באקוספייס או בתוכנות דומות שאמדו תרחישים של זיהום דלקים פוסילים ומקורות אחרים של זיהום במערכת האקולוגית הימית.

3. רמת הרעילות של המזהמים השונים המעורבים בתהליכי החיפוש, ההפקה והשינוע של דלקים פוסילים זהים לחומרים הכימיים שאנו מצפים למצוא בתרחישי הזיהום, כגון חומרים ארומטיים (PAHs, MAHs).

לאחר שלב זה, הגדרנו את עקומות התגובה של הקבוצות הפונקציונאליות למזהמים השונים והעקומות הוצבו במודל האקוספייס. בנוסף, הגדרנו את ריכוזי הרעילות המינימליים של המזהמים השונים למינים ובתי גידול שונים, על ידי הצבת הריכוזים המינימליים של המזהמים אשר נמצאו כגורמים לתגובות (בעיקר תמותה) במינים השונים. ההגדרות נעשו בהתאם למידע על מדדי הרעילות שנאספו ובהתאם לריכוזים שאנו מצפים למדוד בתרחישים שנבחנו.

בשנה החולפת בחנו את ההשלכות של מגוון תרחישי זיהום. התרחישים אשר נבדקו בעזרת המודל וכללו תרחישים כלליים ולא ספציפיים מכיוון שמספר אפשרויות הזיהום (מיקום, מועד, נפח ומשך) הם כמעט אינסופיים. בעזרת הרצת המודל בחנו את תגובת המערכת האקולוגית למספר רמות של חומרת התרחיש ובאזורים ימיים שונים (טבלה 20). חומרת התרחיש נקבעת על פי נפח החומר המזהם, משך הזיהום ושטח הזיהום. את מגוון עוצמות הזיהום בחנו בשלושה אזורים שונים לאורך המים הטריטוריאליים - בצפון, במרכז ובדרום על מנת לבחון רגישות של האזורים השונים לאירועי זיהום. בנוסף, כללנו בתרחישים רמות זיהום שונות בעומדת המים לעומת הסדימנט וכן הבדלנו במשך הזיהום בין המים לסדימנט מכיוון שהזיהום בסדימנטים נשאר לאורך זמן ארוך בהרבה מאשר הזיהום בפני המים או בעומדת המים.

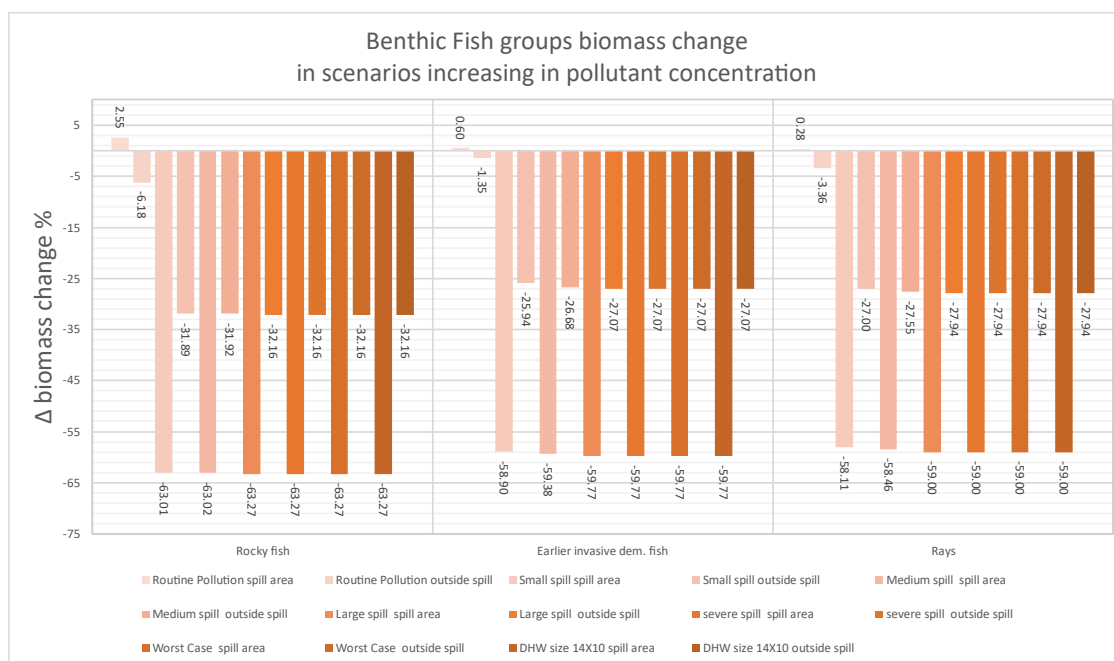
טבלה 20: רשימת התרחישים אשר ייבחנו במסגרת הפרויקט. מגוון התרחישים כוללים טווח רחב של דרגות חומרה וכן אירועים אקוטיים וכרוניים.

מס"ד	תרחיש	אזור גיאוגרפי	שטח (ק"מ)	שטח זיהום היקפי (ק"מ)	משך-פני המים (חודשים)	משך-סדימנט (שנים)	נפח-פני המים (חביות)	נפח-סדימנט (חביות)	נפח בהיקף-פני המים; בסדימנט (חביות)
1	קל	מרכז	10X14	2	1	2	500	500	50
2	בינוני	מרכז	10X14	2	1	5	500	500	50
3	גדול, קצר	מרכז	10X14	2	1	2	500	500	50
4	גדול	מרכז	10X14	10	1	5	500	500	50
5	גדול	צפון	10X14	10	1	5	500	500	50
6	גדול	דרום	10X14	10	1	5	500	500	50
7	קיצוני	מרכז	10X14	2	3	7	5000	5000	500
8	החמור ביותר	מרכז	10X14	2	3	7	5000	5000	500
9	DHW	מרכז	10X14	2	3	7	5000	5000	500
10	DHW	צפון	10X14	10	3	7	5000	5000	500
11	DHW	דרום	10X14	10	3	7	5000	5000	500
12	DHW	מרכז	50x50	10	3	7	5000	5000	500
13	כרוני	מרכז	3x5	2	10 שנים	10	100,000	100,000	10,000
14	כרוני	צפון	3x5	2	10 שנים	10	100,000	100,000	10,000
15	כרוני	דרום	3x5	2	10 שנים	10	100,000	100,000	10,000

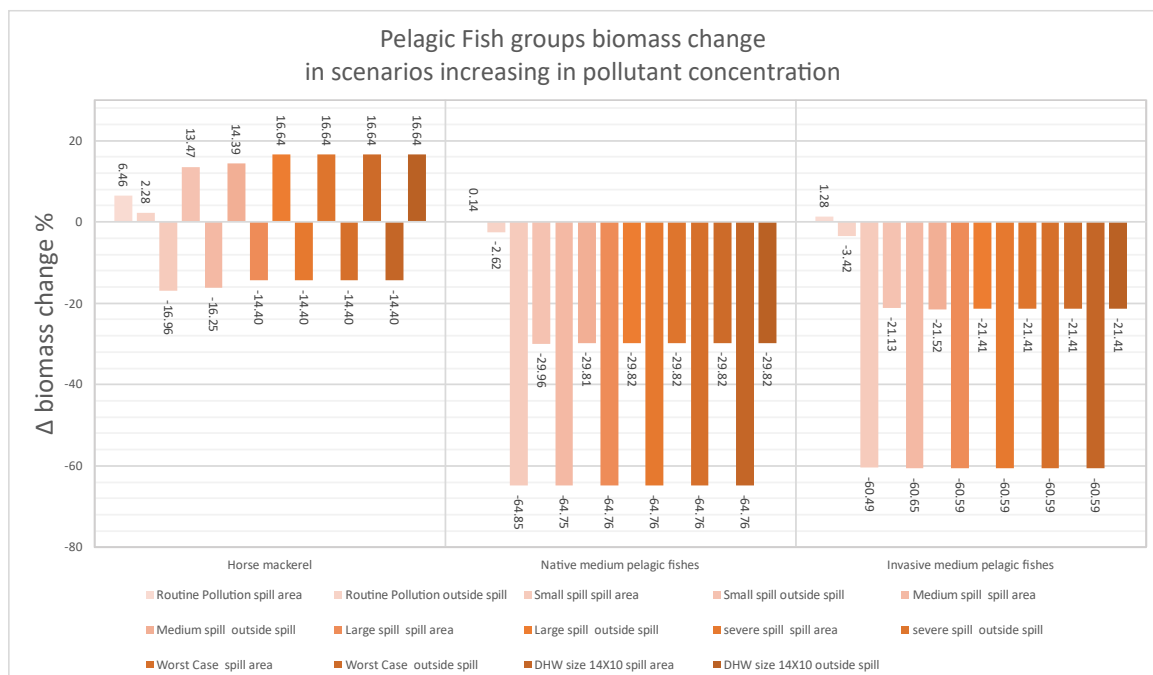
תוצאות ודיון

תוצאות המודל מראות כי ברוב הקבוצות הפונקציונאליות, ריכוז הסף של הזיהום גורם לירידה בביומסה, דהיינו, קצב הזיהום הנמוך ביותר שנצפה כבעל ההשפעה היה 10bbl לחודש (איור 102). בכל התרחישים החורגים מקצב זה, נראתה ירידה משמעותית בביומסה של למעלה מ-50% באזור הדליפה ברוב קבוצות האורגניזמים שנבדקו. כאשר בוחנים את תגובות האורגניזמים באזור שמחוץ לאזורי הדליפה, נצפית ירידה

בביומסה של למעלה מ-10% עבור רוב קבוצות האורגניזמים, בנוסף לירידה בביומסה של למעלה מ-20% עבור רוב קבוצות הדגים. בהשוואה בין קבוצות דגים פלגיים ובנתונים, למרות ההנחה שקבוצות דגים פלגיות יושפעו פחות, שכן יש סיכוי גבוה יותר שינדדו מהאזור המזוהם, נמצא כי שתי הקבוצות הראו תגובה זהה לריכוזי הזיהום השונים (איורים 102,103). קבוצת הדגים הפלאגיים היחידה שהראתה שינוי חיובי בביומסה דרך נדידה אל מחוץ לאזור הדליפה הייתה הטרכון (Horse Mackerel).

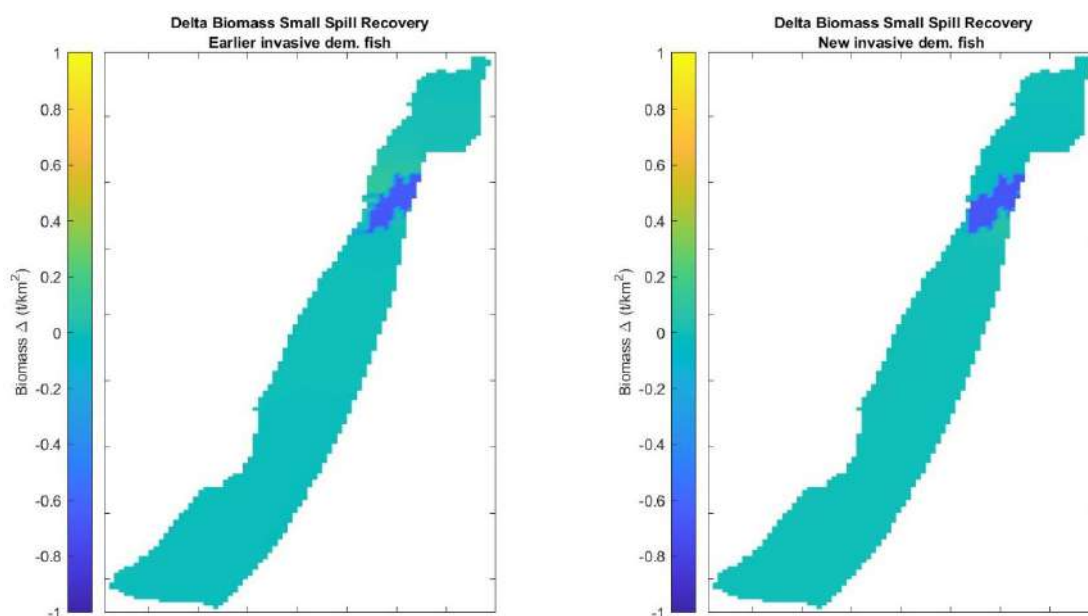


איור 102: אחוז השינוי בביומסה של קבוצות הדגים הבנתוניות בתרחישים עם עליה בריכוז המזהם, באזור הדליפה ומחוצה לו.

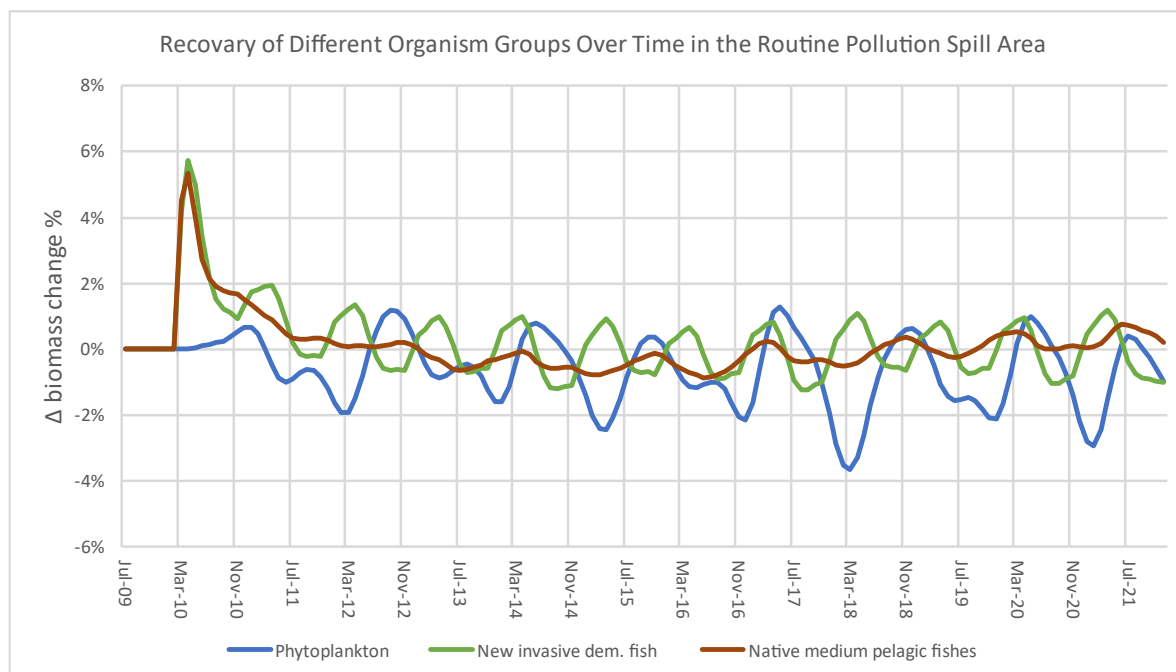


איור 103: אחוז השינויים בביומסה של קבוצות דגים פלגיות במודל בתרחישים עם ריכוזים עולים של המזהם, באזור הזיהום ומחוץ לאזור הזיהום.

בבחינה של תוצאות התרחישים לא זוהתה התאוששות של רוב קבוצות המינים. מגמה זאת נצפתה בכל התרחישים שבהם קצבי הזיהום והיקפי הזיהום היו מעל 10bbl לחודש. במקרים אלו, רוב הקבוצות הראו ירידה בביומסה בתחילת הדליפות במרץ 2012 ונשארו כך לאורך כל תקופת התרחיש (איור 104,105). במהלך השנה הקרובה, והאחרונה של הפרויקט, נסיים את ניתוח התרחישים וכימות ההשפעה של אירועי זיהום שונים, בהיקפם ובמיקומם המרחבי, על המערכת האקולוגית הימית של מדף היבשת.



איור 104: מפות של ההפרש היחסי בביומסה של קבוצות הדגים הבנתיים- קבוצת המינים הפולשים הוותיקים (משמאל) וקבוצת המינים הפולשים החדשים יותר (מימין) בתרחיש הדליפה קטנה, המכילה 50bbl בחודש. המפות מציגות את ההתאוששות של הקבוצה המחושבת כהפרש הביומסה הממוצעת (ביומסה בתרחיש דליפה-ביומסה של תרחיש ללא דליפה/ביומסה של תרחיש ללא דליפה) של כל קבוצה, בחודשים שלאחר סיום הדליפה (מרץ 2014 עד דצמבר 2021).



איור 105: אחוז השינוי בביומסה של קבוצות אורגניזמים שונות בתרחיש זיהום כרוני המכיל 10bbl לחודש, באזור הדליפה. הציר האופקי מייצג את פרק הזמן של תרחיש הדליפה שהחל במרץ 2010 והסתיים במרץ 2020.

ספרות

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

4.6 פיתוח מודל אקולוגי במסגרת פרויקט תכנית אב לשמורות טבע במים הכלכליים של ישראל בים התיכון



מחקר
במימון
החברה
להגנת
הטבע

איל אופיר, גדעון גל

- מודל קיים של המערכת האקולוגית של מרחב המים הכלכליים של ישראל עודכן והורחב.
- נבנה מודל אקולוגי חדש הכולל את אזור מדף היבשת, המדרון והים העמוק.
- בעזרת המודל בוצעה סימולציה של המצב האקולוגי של המים הכלכליים לשנת 2022.
- תמונת המצב שימשה בסיס לבחינה של תרחישים שונים כגון: שינוי אקלימי ותרחישי שימור שונים.

עדכון והרחבת מודל אקולוגי קיים של מרחב ים תיכון הישראלי (מים טריטוריאליים ושטח המים הכלכליים) לצורך בחינת תרחישי שינוי אקלים ותרחישי שימור.

רקע

מזרח הים התיכון הינו אזור בעל מערכת אקולוגית ייחודית במאפייניה ובלחצים בהם היא נתונה. האזור הינו בעל יצרנות ראשונית מהנמוכות בעולם, יחד עם רמות מאוד גבוהות של טמפרטורה ומליחות. האזור נחשב עני במיוחד במגוון מיני הדגים ובביומסה של דגים. אוכלוסיות הדגים והמערכת האקולוגית בכללותה נתונים מזה מספר שנים ללחצים אנתרופוגניים הולכים וגדלים הנגרמים ממכלול סיבות. אלו כוללות, בין השאר, חדירה של מינים פולשים דרך תעלת סואץ (הגירה לִסְפֶּסְפִּיָּאנִית), שינויי אקלים המשפיעים על טמפרטורת המים, דיג מסחרי וספורטיבי מעל ליכולת הנשיאה של המערכת האקולוגית, פיתוח חופי מואץ, פיתוח תשתיות כמו מתקני התפלה, נמלים ועוד. בעשור האחרון לחצים אלו אף גברו לאחר מציאת מאגרי גז ניכרים מול חופי ישראל, הצורך בביצוע קידוחים ובניית תשתית הולכה. השילוב של הגורמים והתהליכים השונים הביא לקריסה של הדיג המסחרי, העלמות של מיני דגים וחסרי חוליות ושינויים במערכת האקולוגית. חלק מהתופעות הנצפות במימי חופי ישראל אינן ייחודיות לארצנו ונצפו לאורך חופיהם של מדינות נוספות בים התיכון.

בעולם קיים מגוון של כלים המאפשרים ניתוח והבנה של התהליכים הגורמים לנזקים אשר תועדו בשנים האחרונות. אולם, אחד הקשיים העיקריים בהתמודדות עם האתגרים העומדים בפני מנהלי מערכות אקולוגיות אלו הינו הצורך בבחירה בכלים מתאימים ובממשק הנכון. כל זאת לא רק לצורך טיפול והתמודדות עם הנזקים, אלא גם לצורך בחינת חלופות להמשך אספקת שרותי המערכת האקולוגיים הנדרשים תוך התחשבות בשינויי אקלים ושינויים נוספים (כמו מינים פולשים) המתרחשים במערכות האקולוגיות.

על מנת לספק מענה ארוך טווח ובר קיימא למגוון הבעיות, יש צורך בפתרונות מערכתיים הלוקחים בחשבון את כלל המערכת האקולוגית תוך התחשבות בצרכים של בעלי העניין ושרותי המערכת המסופקים ע"י אותה מערכת. ניתוח ומתן מענה מערכתי שכזה ניתן לעשות אך ורק בעזרת מסגרת של מודל מתאים המאפשר איגום של כלל הידע למערכת אחת שבה ניתן יהיה לבצע אינטגרציה של המידע ובחינת השפעתם של צעדי ממשק על כלל המערכת האקולוגית. ואכן, השימוש במודלים אקולוגיים כלל מערכתיים הפך לאחד מכלי הממשק העיקריים המשמשים כיום מנהלי מערכות אקולוגיות, אקוויטיות וימיות, ומקבלי ההחלטות.

מודלים מהסוג Ecopath with Ecosim (EwE) משמשים מזה כשלושים שנה בניתוח המערכות האקולוגיות בסביבות ימיות מגוונות. עד כה, ובעיקר בשנים האחרונות, פותחו כ-40 מודלים של מערכות אקולוגיות שונות בים התיכון (בעיקר במערב).

במסגרת המחקר הנוכחי פיתחנו מודלים עבור מרחב המים הכלכליים של מדינת ישראל (החל מקו החוף ועד לסוף שטח המים הכלכליים) זאת תוך שימוש בתוכנות EwE המאפשרות פיתוח מודל מאזני ומודל מרחבי.

שיטות

המודל המאזני:

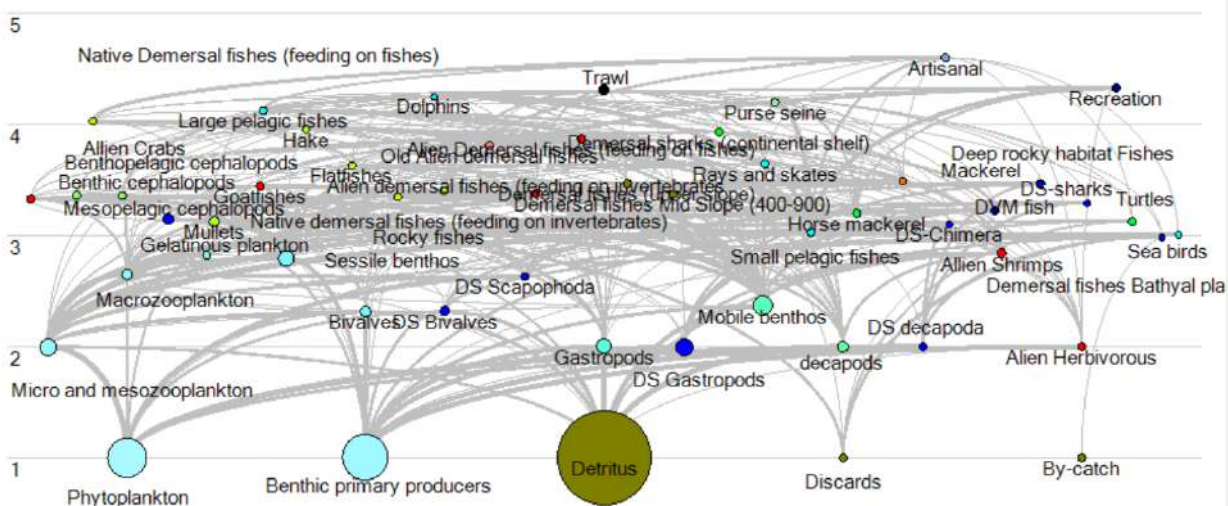
כבסיס למודל זה, בוצע שימוש במודל שהוכן עבור אזור מדף היבשת במסגרת מחקרים קודמים ובמסגרת נבנה מודל מאזני, מודל דינאמי בזמן ומודל מרחבי (Corrales, 2019; Corrales et al., 2018; Corrales et al., 2017). עם זאת, בשל השוני המרחבי והצורך בהוספה של מינים נוספים המצויים במדרון היבשת ובים עמוק, כמו גם הוספה של מינים פולשים אשר הגיעו לאזורנו במהלך השנים האחרונות, שונה מבנה המודל כך שיתן מענה ליכולת לעקוב אחר מינים פולשים המצויים בעיקר במדף היבשת ולמינים של ים עמוק.

קביעת המינים שיהיו חלק מהמודל החדש, כמו גם חלוקתם לקבוצות פונקציונליות (איור 106), בוצעה תוך התייעצות עם ד"ר הדס לובינסקי קניפל וד"ר ניר שטרן תוך התחשבות בשיטת החלוקה שבוצעה במודלים המכילים אזורים רחבים יותר (וכוללים את האזור שלנו), כמו מודל ים תיכון ומודל מזרח הים התיכון. זאת על מנת לאפשר בעתיד השוואה בין האזור שלנו לאזורים אחרים. איסוף הנתונים לטובת בניית המודל המאזני בוצע תוך שימוש במידע שנאסף במסגרת מחקרים קודמים ובעזרת מאגרי מידע בתחום (כמו: FishBase).

Phytoplankton	DS Gastropods	Goatfishes	Demersal fishes (upper slope)	DVM fish
Benthic primary producers	Mobile benthos	Hake	Demersal fishes Mid Slope (400-900)	DS-sharks
Micro and mesozooplankton	decapods	Flatfishes	Demersal fishes Bathyal planes >1000m	Deep rocky habitat Fishes
Macrozooplankton	DS decapoda	Rocky fishes	Demersal sharks (continental shelf)	Turtles
Gelatinous plankton	Allien Shrimps	Native demersal fishes (feeding on invertebrates)	Rays and skates	Sea birds
Sessile benthos	Allien Crabs	Native Demersal fishes (feeding on fishes)	Small pelagic fishes	Dolphins
Bivalves	Benthic cephalopods	Alien Herbivorous	Horse mackerel	Detritus
DS Bivalves	Benthopelagic cephalopods	Old Alien demersal fishes (feeding on invertebrates)	Mackerel	Discards
DS Scapophoda	Mesopelagic cephalopods	Alien demersal fishes (feeding on invertebrates)	Large pelagic fishes	By-catch
Gastropods	Mullets	Alien Demersal fishes (feeding on fishes)	DS-Chimera	

איור 106: רשימת הקבוצות הפונקציונליות שנכללו במודל כאשר בכלול סומנו קבוצות ים עמוק ובירוק קבוצות הנמצאות במדרון.

לאחר בניית המודל המאזני וכיולו ניתן היה לבחון קשרים המתרחשים בתוך המערכת האקולוגית (איור 107) כמו גם ללמוד על רמתה הטרופית של כל אחת מהקבוצות ומידת השפעתה על שאר הקבוצות במערכת.



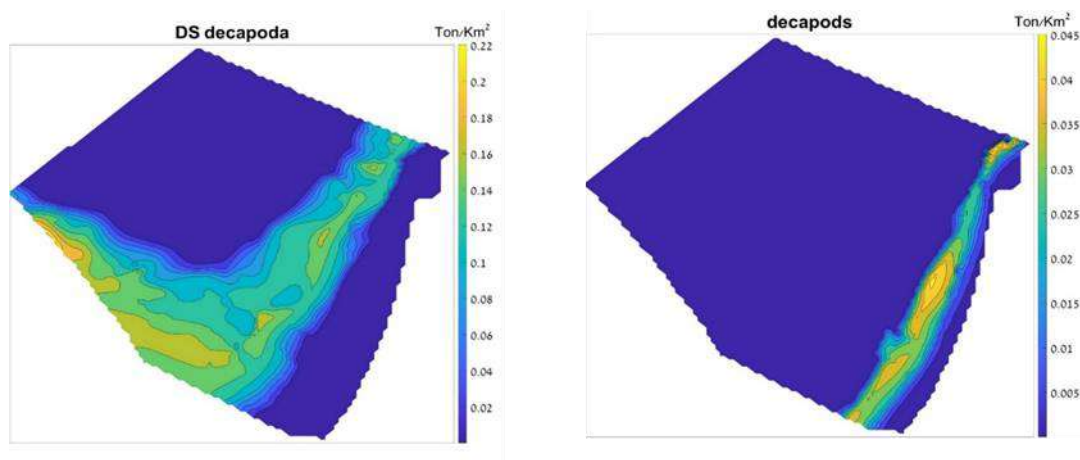
איור 107: מארג המזון במודל. העיגולים מייצגים את הקבוצות השונות במודל והקווים האפורים את הקשרים המתקיימים בין הקבוצות. סקאלת המספרים בצד שמאל מראה את הרמה הטרופית של הקבוצות השונות.

לאחר בניית המודל המאזני נבנה המודל המרחבי. המודל נבנה כך שישקף את תמונת המצב האקולוגית נכון לשנת 2022 ובבסיסו החנו מפות העומקים, שלוש שכבות של מפות טמפרטורה (מפני המים

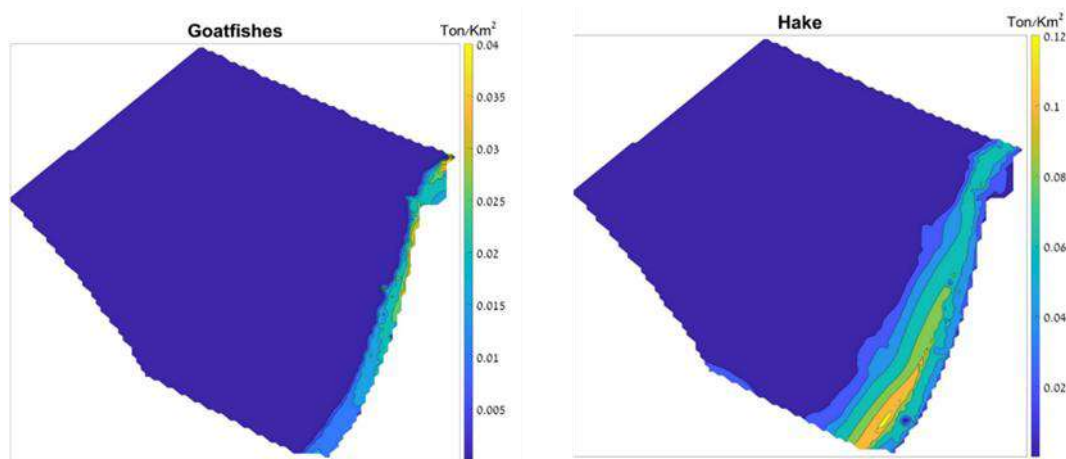
ועד עומק של 150 מטר, מעומק של 150 מטרים ועד לקרקעית וטמפרטורה של הקרקעית) כמו כן, מפות של יצרנות ראשונית כממוצע מפני המים ועד לעומק של 150 מטרים. לצורך קביעת הפיזור המרחבי של הקבוצות במרחב יש צורך בפונקציות אשר מגדירות את ההעדפות של הקבוצות השונות, את טווחי העומק והטמפרטורה. המידע עבור בניית הפונקציות נלקח מאתר AquaMap (Kaschner et al., 2016) עבור כלל המינים הקיימים במודל. לאחר הורדת המידע בוצע ממוצע משוקלל כך שמינים ששכיחותם במערכת גדולה יקבלו משקל גדול יותר בממוצע הקבוצתי. שכיחות המינים במערכת נקבעה על סמך חוות דעת של מומחים. לאחר בניית המודל הופקו מפות פיזור של הקבוצות בשנת 2022. אלו נבחנו על ידי המומחים ובהתאם להערותיהם בוצעו שינויים במודל כך שהפיזור יתאים לתמונת המערכת האקולוגית שהם מכירים.

תוצאות

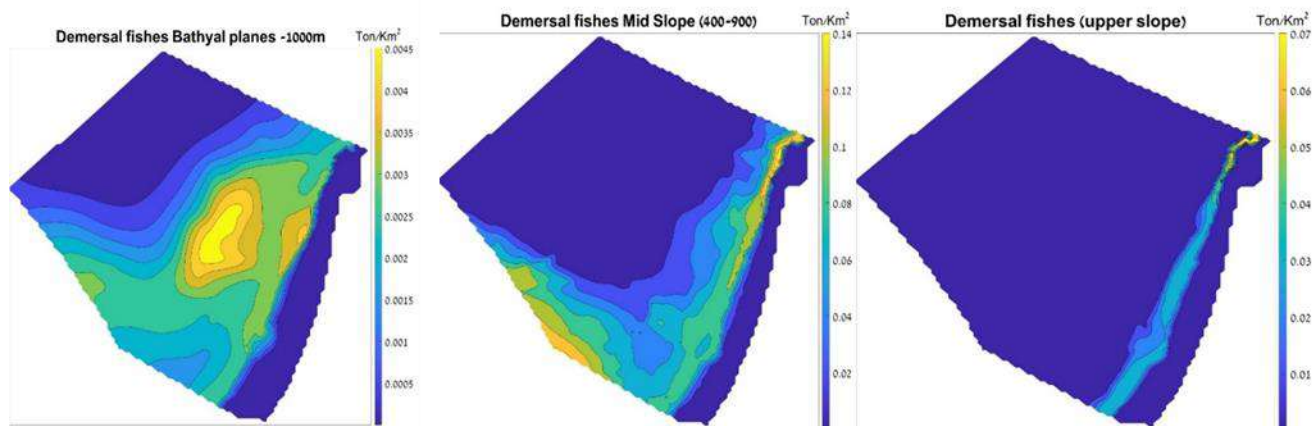
להלן מספר דוגמאות (איורים 108-111) של פיזור קבוצות במרחב המודל (מקו החוף ועד לסוף המים הכלכליים) כממוצע של שנת 2022:



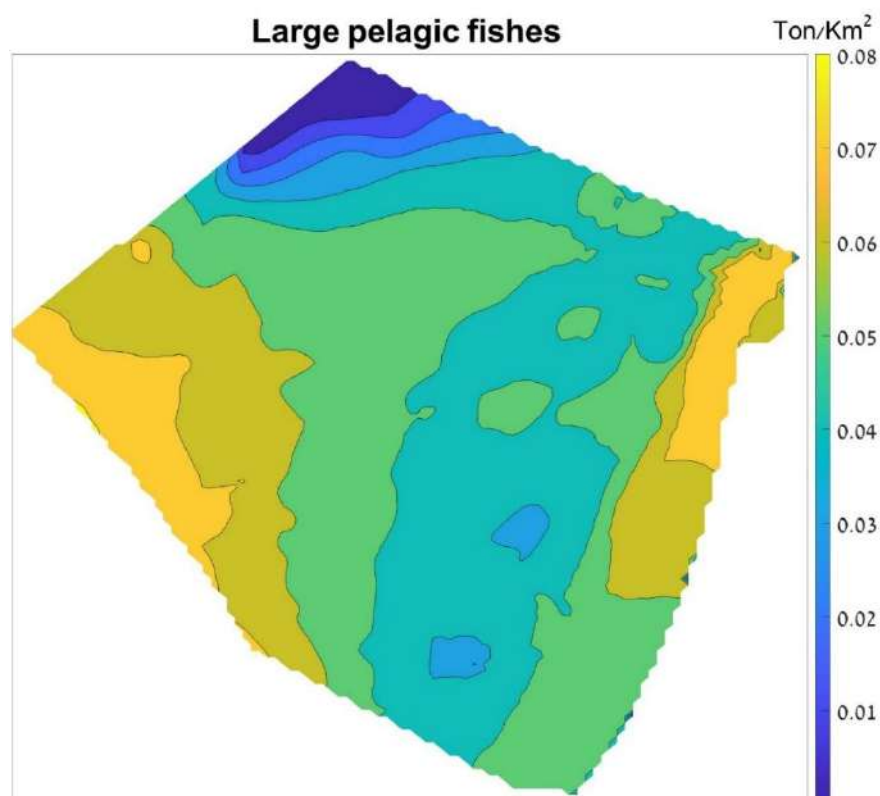
איור 108: מפות פיזור של דקפודים. מימין מיני דקפודים של מדף היבשת והמדרון ומשמאל מיני דקפודים של ים עמוק. סרגל הצבעים מייצג את הבימוסה בערכים של טון לקמ"ר.



איור 109: מפות פיזור של דגים. מימין דג מקומי בקלה (Hake) ומשמאל מינים מולייתיים פולשים (Goatfishes). סרגל הצבעים מייצג את הבימוסה בערכים של טון לקמ"ר.



איור 110: פיזור של מיני דגים. מימין מינים השייכים לחלקו העליון של המדרון. במרכז מפת הפיזור של מיני דגים השייכים לחלקו האמצעי והתחתון של המדרון ומשמאל מיני דגים שמאפיינים את הים העמוק. סרגל הצבעים מייצג את הביומסה בערכים של טון לקמ"ר.



איור 111: מפת הפיזור של מינים פלאגיים גדולים (שמכילה מינים כמו *Seriola dumerili*, *Thunnus thynnus*). סרגל הצבעים מייצג את הביומסה בערכים של טון לקמ"ר.

סיכום

בניית המודל המרחבי תוך הגדרה מחודשת של הקבוצות מאפשרת הפקת מפות של הפיזור המרחבי לקבוצות השונות במודל. המפות בפרק זה מייצגות ממוצעים של שנת 2022 ונשענות על מפות המופקות במודל בצעדי זמן חודשיים. יצירת המפות מאפשרת הפקה של תמונת מצב אקולוגית המאפשרת בחינת תהליכים המתרחשים במערכת האקולוגית כמו למשל אופן התבססות המינים הפולשים או השפעת טמפרטורת הפיזור של המינים המקומיים ועוד.

אימות המפות על ידי המומחים וחוות דעתם כי הפיזור המרחבי תואם את הידע הקיים אשר ברשותם, יאפשרו בהמשך ביצוע הערכה כמותית של תוצאות המודל למול נתוני סקרים, וזאת על מנת לבחון את רגישות תוצאות המודל למול הנתונים, כמו גם בחינה של תרחישים שונים הן של שינוי אקלימי צפוי והן של מדיניות ניהול המרחב הימי.

ספרות

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., 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.

Kaschner, A., Kesner-Reyes, K., Garilao, C., Rius-Barile, J., Rees, T., Froese, R., 2016. Predicted range maps for aquatic species. World Wide Web Electron. Publ. Wwvaquamapsorg. Version, 2008.

4.7 פיתוח שיטות ניהול מערכת עיבור דיג בר קיימא ומערכות אקולוגיות ימיות בריאות (ECOSCOPE)



מפת אזורי המודלים האקולוגיים עיבור ניהול הדיג ובסוגריים הגופים האחראים לפיתוחים

מחקר
במימון
האיחוד
האירופאי

גדעון גל, איל אופיר, ניר שטרן, יעל אמיתי, יואב פלד, אנג'ו מליסרי

- פרויקט אירופאי רחב מימדים המורכב מקבוצות עבודה שונות. לצוות חיא"ל תפקיד מרכזי בפרויקט זה.
- 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).

מטרת המחקר

המטרה הכוללת של פרויקט EcoScope הינה לתכנן ולפתח גישה יעילה, הוליסטית, מבוססת-מערכת אקולוגית לניהול דיג בר קיימא, שניתן להשתמש בה בקלות על ידי קובעי מדיניות וגופי ייעוץ. מטרה זאת 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 אי ודאות.
- תמיכה בתכנון וניהול דיג אקוצנטרי משולב בהתאם לשמירה על כדאיות כלכלית, במסגרת המדיניות וההנחיות של האיחוד האירופי.

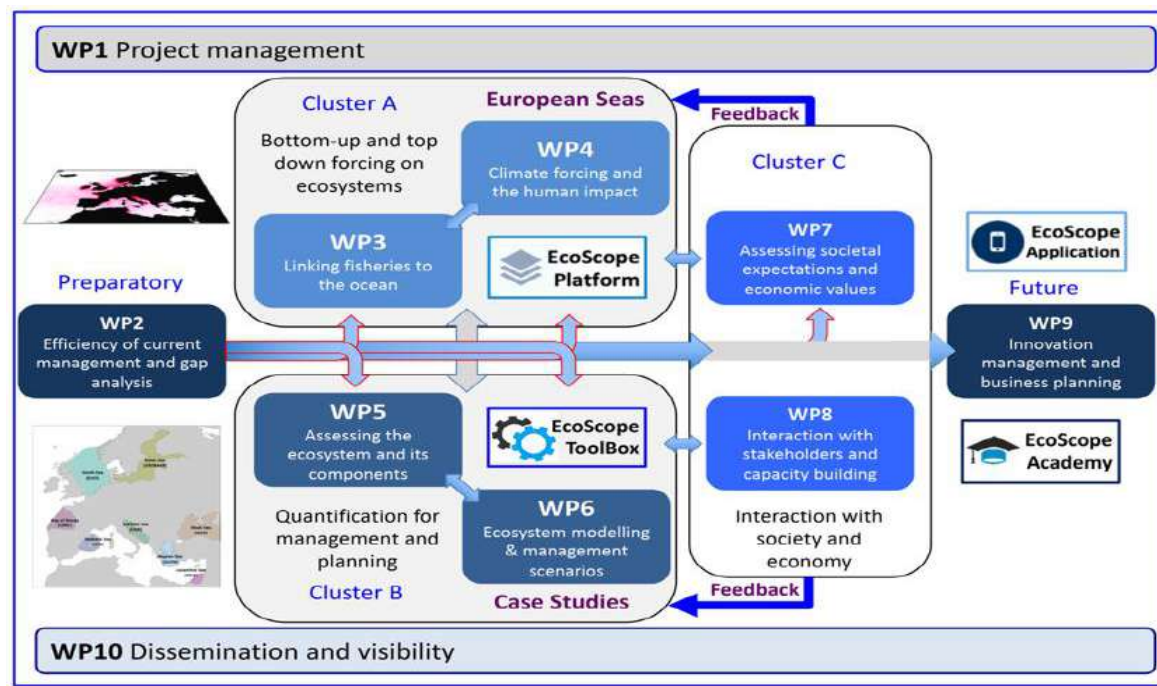
רקע

ניהול הדיג בכלל ובתוך כך במרחבי האיחוד האירופאי **הינו** משימה מאתגרת. הביומסה של חלק מהמינים המופיעים בשלל הדיג יורדת וכתוצאה מכך דיג השלל 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 אזורי ימיים שונים במרחב האיחוד האירופאי, בהם יפותחו מודלים אשר ישמשו כבסיס לבחינת תרחישים בהקשר של ניהול הדיג. הידע והכלים שיפותחו במחקר יוכלו אף לשמש בניהול הדיג באזורים אחרים ובמצבים שונים.

שיטת ניהול הפרויקט

הפרויקט מורכב מעשר קבוצות עבודה אשר מקיימות בניהם קשרי גומלין (איור 112). כל קבוצה אחראית על תחום פונקציונאלי ומכילה בתוכה מגוון מומחים המסייעים לעבודת הקבוצה. הקבוצות הן:

1. קבוצת המנהלה 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



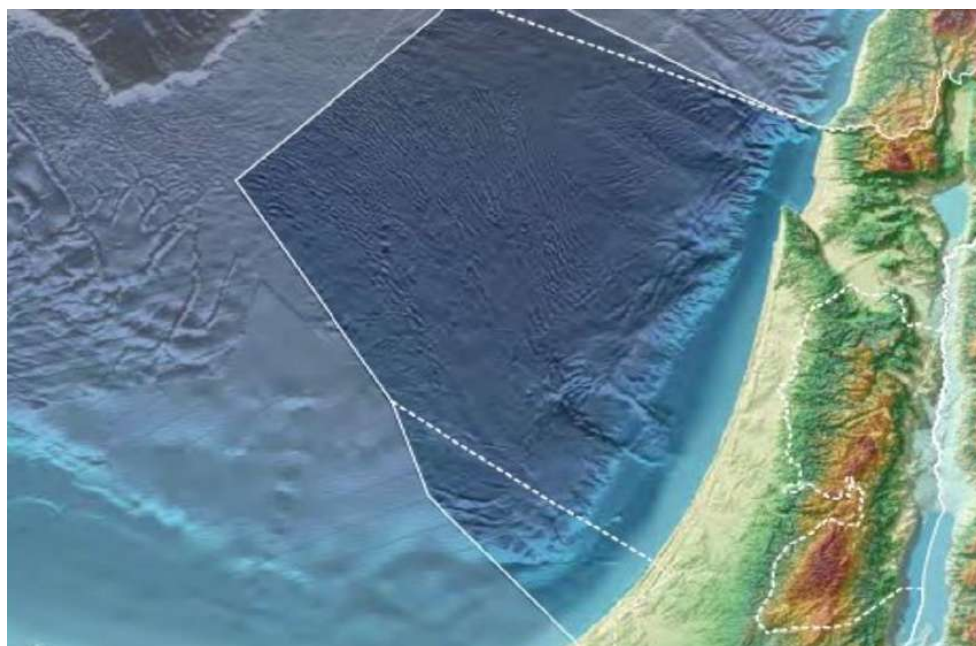
איור 112: אופן התפתחות העבודה והעברת התוצרים בין קבוצות העבודה השונות.

- מתוך כלל קבוצות העבודה, חיא"ל מובילה את קבוצה מספר 6 אשר אחראית על התחומים הבאים:
1. פיתוח של מודלים אקולוגיים מסוג EWE ברמות שונות (מודל מאזני, מודל דינאמי בזמן ומודל מרחבי) לכלל תשעת 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 קבוצה 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 חיא"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.
 2. פיתוח כלים לאמידת חוסר וודאות וחוסר וודאות עמוק – כלים חדשניים המפותחים ע"י חוקרים מהולנד שתפקידם הוא להצביע על מידת רגישות התוצאות לחוסר הודאות הקיים במודלים ובתרחישים העתידיים ולנסות לזהות את הגורמים המשפיעים ברמות שונות על התוצאות. הכלים שמפותחים על ידי קבוצה זו יהיו בשימוש בכל אזורי המחקר.
 3. 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 מחייבים תכנון (תעבורה ימית, אנרגיה, תשתיות וכו').

תוצאות ודיון

1. פיתוח מודל אקולוגי עבור המים הטריטוריאליים והכלכליים של מדינת ישראל:
 המודל פותח על בסיס מודל אקולוגי של מרחב מדף היבשת (Corrales, 2019; Corrales et al., 2018;) (Corrales et al., 2019; Corrales et al., 2017; Ofir et al., In Review). 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

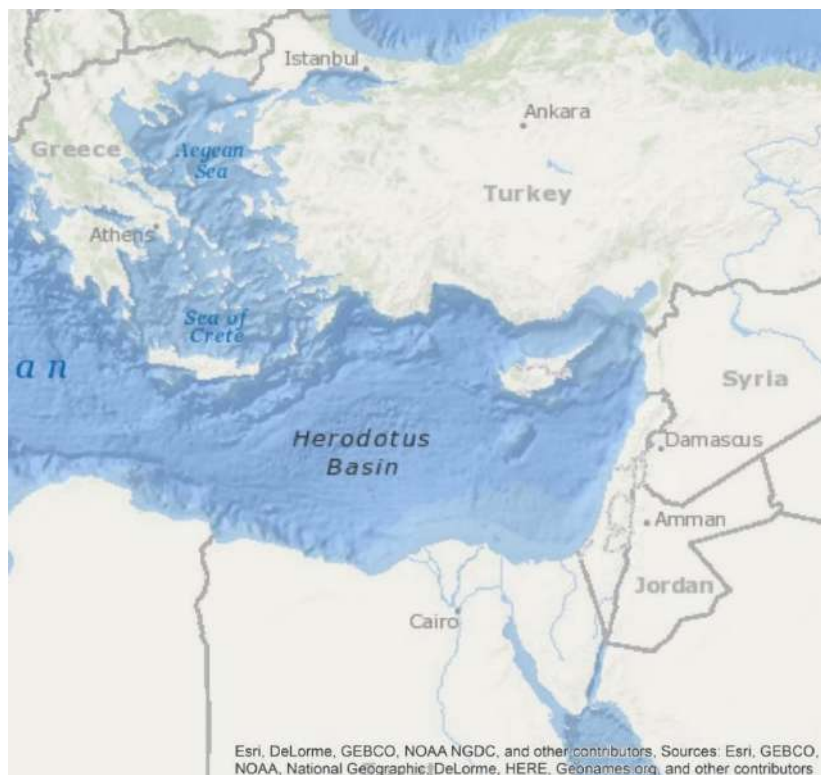
שופרו ואומתו בעזרת מומחים בתחום ובהתאמה לכך הוכנו מפות של פיזור מרחבי של הקבוצות במודל (להרחבה ראו פרק קודם, מס' 4.6).



איור 113: מרחב מודל ים עמוק בישראל

2. הרחבה של מודל מזרח הים התיכון:

המודל האקולוגי של מזרח הים התיכון (איור 114) 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 כמוז של תשתיות, עומקים וכו'. המודל המרחבי ישמש כבסיס אקולוגי עבור תוכנת ה-MSP בה ישולבו רכיבים של ניהול מרחבי של האזור הימי (תעבורה, אנרגיה, תשתיות) ורכיב חדש של ניהול הדיג.



איור 114: שטח מודל מזרח הים התיכון והמדינות בהן הוא גובל
ספרות

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., In Review. 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

שם	תואר	אוניברסיטה	נושא	מנחה בחיא"ל	מנחה באוני'
1	א' בן צור	דוקטורט	האוניברסיטה העברית	י' בארי-ג' גל	ח' גבירצמן
2	א' להב	מוסמך	אוניברסיטת חיפה	ג' גל	ר' בוקמן
3	ג' ביטון	מוסמך	אוני' חיפה	ג' גל	ש' צמח-שמיר
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	
9	ע' ברגמן	פוסט-דוקטורט	חיא"ל	ו' אקרט	
10	ח' ויגדוביץ'	דוקטורט	אוני' בן-גוריון	ו' אקרט	א' סיון
11	ע' וייסמן	מוסמך	אוניב' בן-גוריון	ו' אקרט	א' סיון
12	א' שוויצר	דוקטורט	אוני' חיפה	א' סוקניק	ד' צ'רנוב ד' שר
13	א' בן-חור	מוסמך	אוני' תל אביב	א' סוקניק	א' גזית
14	ע' רחנשטיין	מוסמך	תל-חי	א' סוקניק	ג' ריטבו
15	מ' שבת-סימון	שבתון	חיא"ל INNCA	ר.נ' קפלן-לוי	

5.2 פרסומי צוות המעבדה בספרות הבינלאומית המבוקרת ב- 2022/23

Al-Ashhab A, Marmen S, **Schweitzer-Natan O**, Bolotin E, Patil H, **Viner-Mozzini D**, Aharonovich D, Hersberg R, Minz D, Carmeli S, Cytryn E. **Sukenik A** & Sher D. **2023**. Freshwater microbial metagenomes sampled across different water body characteristics, space and time in Israel. Scientific data. 2022 Oct 26;9(1):652. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01749-w>

Astrahan, P., A. Lupu, E. Leibovici, 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:1-15. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26724-9>

Be'eri-Shlevin, Y., M. Bueno, E. Tessier, A. Romero-Rama, **A. Sukenik, T. Zohary**, and D. Amouroux. **2022**. Biogeochemistry of selenium compounds in the water column of warm monomictic Lake Kinneret. Biogeochemistry 157:291-311.

Berihu, M., Somera, T. S., Malik, A., Medina, S., Piombo, E., **Tal, O.**, ... & Freilich, S. **2023**. A framework for the targeted recruitment of crop-beneficial soil taxa based on network analysis of metagenomics data. Microbiome, 11(1), 8. <https://doi.org/10.1186/s40168-022-01438-1>

Chang, C. W., T. Miki, H. Ye, S. Souissi, R. Adrian, O. Anneville, H. Agasild, S. Ban, Y. **Be'eri-Shlevin**, Y. R. Chiang, H. Feuchtmayr, **G. Gal**, S. Ichise, M. Kagami, M. Kumagai, X. Liu, S. S. Matsuzaki, M. M. Manca, P. Noges, R. Piscia, M. Rogora, F. K. Shiah, S. J. Thackeray, C. E. Widdicombe, J. T. Wu, **T. Zohary**, and C. H. Hsieh. **2022**. Causal networks of phytoplankton diversity and biomass are modulated by environmental context. Nat Commun 13:1140. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28761-3>

Dev P.J., Sukenik A., Mishra D.R., **Ostrovsky I.** **2022**. Cyanobacterial pigment concentrations in inland waters: Novel semi-analytical algorithms for multi- and hyperspectral remote sensing data. Science of The Total Environment 805, 150423 10.1016/j.scitotenv.2021.150423

- Gilboa, Y., Friedler, E., Talhami, F., and **G. Gal. 2022.** A novel approach for accurate quantification of lake residence time - Lake Kinneret as a case study. *Water Research X*, 16, 100149
- Golub, M., W. Thiery, R. Marcé, D. Pierson, I. Vanderkelen, D. Mercado, R. I. Woolway, L. Grant, E. Jennings, J. Schewe, F. Zhao, K. Frieler, M. Mengel, V. Y. Bogomolov, D. Bouffard, R.-M. Couture, A. V. Debolskiy, B. Droppers, **G. Gal**, M. Guo, A. B. G. Janssen, G. Kirillin, R. Ladwig, M. Magee, T. Moore, M. Perroud, S. Piccolroaz, L. Raaman Vinnaa, M. Schmid, T. Shatwell, V. M. Stepanenko, Z. Tan, H. Yao, R. Adrian, M. Allan, O. Anneville, L. Arvola, K. Atkins, L. Boegman, C. Carey, K. Christianson, E. de Eyto, C. DeGasperi, M. Grechushnikova, J. Hejzlar, K. Joehnk, I. D. Jones, A. Laas, E. B. Mackay, I. Mammarella, H. Markensten, C. McBride, D. Özkundakci, M. Potes, K. Rinke, D. Robertson, J. Rusak, R. Salgado, L. van den Linden, P. Verburg, D. Wain, N. K. Ward, S. Wollrab, and G. Zdrovennova. **2022.** A framework for ensemble modelling of climate change impacts on lakes worldwide: the ISIMIP Lake Sector. *Geoscientific Model Development* 15:4597-4623. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-4597-2022>
- Gonda, I., Abu-Abied, M., Adler, C., Milavsky, R., **Tal, O.**, Davidovich-Rikanati, R., ... & Dudai, N. **2022.** Two independent loss-of-function mutations in anthocyanidin synthase homeologous genes make sweet basil all green. *bioRxiv*, 2022-05. <https://doi.org/10.1101/2022.05.16.492104>
- Gonda, I., Abu-Abied, M., Adler, C., Milavski, R., **Tal, O.**, Davidovich-Rikanati, R., ... & Dudai, N. **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>
- Gonda, I., Milavski, R., Adler, C., Abu-Abied, M., **Tal, O.**, Faigenboim, A., ... & Dudai, N. **2022.** Genome-based high-resolution mapping of fusarium wilt resistance in sweet basil. *Plant Science*, 321, 111316. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2022.111316>
- Harel-Beja, R., Ophir, R., Sherman, A., Eshed, R., Rozen, A., Trainin, T., **Tal, O.**, & Holland, D. **2022.** The Pomegranate Deciduous Trait Is Genetically Controlled by a PgPolyQ-MADS Gene. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.870207>

- Johnson, E. T., Kim, H. S., Tian, M., Dudaï, N., **Tal, O.**, & Gonda, I. **2022**. Dual transcriptional analysis of *Ocimum basilicum* and *Peronospora belbahrii* in susceptible interactions. Plant Gene, 29, 100350. <https://doi.org/10.1016/j.plgene.2021.100350>
- Katsnelson, B., Uzhanskii, E. Lunkov, A., **Ostrovsky, I.** **2022**. Characterization of the gassy sediment layer in shallow water using an acoustical method: Lake Kinneret as a case study. Limnology and Oceanography: Methods 20, 581–593.
<https://doi.org/10.1002/lom3.10506>
- Keramidas, I., Dimarchopoulou, D., **Ofir, E.**, Scotti, M., Tsikliras, A.C., and **G. Gal.** **In press**. Ecotrophic perspective in fisheries management: A review of Ecopath with Ecosim models in European marine ecosystems. Frontiers in Marine Science.
- La Fuente, S., Jennings, E., **Gal, G.**, Kirillin, G., Shatwell, T., Ladwig, R., Moore, T., Couture, R. Côté, M., Råman Vinnå, C., and R.I. Woolway. **2022**. Multi-model projections of future evaporation in a sub-tropical lake. Journal of Hydrology, 615: 128729.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128729>
- Lang-Yona, N., **A. Alster, D. Cummings, Z. Freiman, R. Kaplan-Levy, A. Lupu, N. Malinsky-Rushansky, S. Ninio, A. Sukenik, and Y. Viner-Mozzini.** **2022**. *Gloeotrichia pismus* in Lake Kinneret: A successful epiphytic cyanobacterium. Journal of Phycology 59:97-110.
<https://doi.org/10.1111/jpy.13301>
- Marin, C., O. K. Kumova, and **S. Ninio.** **2022**. Characterization of a Novel Regulator of Biofilm Formation in the Pathogen *Legionella pneumophila*. Biomolecules 12(2), 225;
<https://doi.org/10.3390/biom12020225>
- Michael-Bitton, G., **Gal, G.**, Corrales, X., **Ofir, E.**, Shechter, M., and S. Zemah-Shamir. **2022**. Economic aspects of fish stock accounting as a renewable marine natural capital: The Eastern Mediterranean continental shelf ecosystem as a case study. Ecological Economics, 200, 107539.
- Obertegger U, Flaim G, Corradini S, Cerasino L and **Zohary T.** **2022**. Multi-annual comparisons of summer and under-ice phytoplankton communities of a mountain lake. Hydrobiologia. 849: 4613–4635 <https://doi.org/10.1007/s10750-022-04952-3>.

- O'Brien, D. A., **Gal, G.**, Thackeray, S.J., Matsuzaki, S.S., Blanchard, J., and C.F. Clements. **2023**. Planktonic functional diversity changes in synchrony with lake ecosystem state. *Global Change Biology*, 29:686-701. <https://doi.org/10.1111/gcb.16485>
- Ofir, E.**, T. Silver, J. G. Steenbeek, **N. Shachar, and G. Gal. 2023**. Applying the Safe Operating Space (SOS) approach to sustainable commercial fishing under varying lake levels and littoral zone conditions. *Fisheries*. <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>
- Parparov, A., and G. Gal. 2022**. The effects of changes in diversity on phytoplankton community metabolism. *Inland Waters* 12, 499-509. <https://doi.org/10.1080/20442041.2022.2040406>
- Pershin, S. M., B. G. Katsnelson, M. Y. Grishin, V. N. Lednev, V. A. Zavozin, and **I. Ostrovsky. 2022**. Laser Remote Sensing of Lake Kinneret by Compact Fluorescence LiDAR. *Sensors* 22:7307. <https://doi.org/10.3390/s22197307>
- Recknagel, F., H.-D. Park, **A. Sukenik, and T. Zohary. 2022**. Dissolved organic nitrogen, dinoflagellates and cyanobacteria in two eutrophic lakes: Analysis by inferential modelling. *Harmful Algae* 114:102229. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2022.102229>
- Regev, S.**, Y. Carmel, **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>
- Rivers, N., H. J. Truter, M. Strand, S. Jay, M. Portman, A. T. Lombard, D. Amir, A. Boyd, R. L. Brown, H. C. Cawthra, N. Faure Beaulieu, K. Findlay, **G. Gal**, Y. Grossmark, M. J. Perschke, T. Pillay, O. Pyrgies, M. Ramakulukusha, K. P. Smit, V. Stockdale, J. Stockill, I. Schwartz, T. Treibitz, O. A. Vargas-Fonseca, and E. A. Vermeulen. **2022**. *Ocean & Coastal Management* 220. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106069>

- Rubin Blum, M., Z. Harbuzova, R. Cohen, and **P. Astrahan. 2023.** Anthropogenic and Natural Disturbances Along a River and its Estuary Alter the Diversity of Pathogens and Antibiotic Resistance Mechanisms. Available at SSRN 4399310.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164108>
- Schweitzer-Natan O**, Ofek-Lalzar M, Sher D, **Sukenik A. 2023.** The microbial community spatially varies during a Microcystis bloom event in Lake Kinneret. *Freshwater Biology*. 68:349-363.
<https://doi.org/10.1111/fwb.14030>
- Shapiro, J. A.**, Spanier, E., and **G. Gal. 2022.** Ecosystem changes drive modifications to fish diets and trophic interactions in Lake Kinneret, Israel. *Hydrobiologia*: 849L:4741–4757.
- Stein, S.**, E. Shalev, O. Sivan, and Y. Yechieli. **2022.** Challenges and approaches for management of seawater intrusion in coastal aquifers. *Hydrogeology Journal*. 31:19-22.
<https://doi.org/10.1007/s10040-022-02575-5>
- Vigderovich, H., W. Eckert**, M. Elul, M. Rubin-Blum, M. Elvert, and O. Sivan. **2022.** Long-term incubations provide insight into the mechanisms of anaerobic oxidation of methane in methanogenic lake sediments. *Biogeosciences*, 19, 2313-2331. <https://doi.org/10.5194/bg-19-2313-2022>.
- Zemah-Shamir, Z., S. Zemah-Shamir, A. Scheinin, D. Tchernov, T. Lazebnik, and **G. Gal. 2022.** A Systematic Review of the Behavioural Changes and Physiological Adjustments of Elasmobranchs and Teleost's to Ocean Acidification with a Focus on Sharks. *Fishes* 7: 56;
<https://doi.org/10.3390/fishes7020056>.
- Zemah-Shamir, S., Peled, Y., Shechter, M., Israel, A., **Ofir, E.**, and **G. Gal. 2023.** Economic valuation of fish provision, wastewater treatment and coastal protection in the Israeli Mediterranean Sea. *Fishes* 8: 236.
<https://doi.org/10.3390/fishes8050236>

5.3 דו"חות המעבדה 2022

שם הדו"ח/המעבדה לחקר הכנרת ע"ש יגאל אלון	דו"ח חיא"ל מס'
קפלן - לוי, ר.נ. 2022. בדיקת פוטנציאל רעילות לשלושה מינים של ציאנובקטריה. מוגש לפרופ' סמי בוסיבא-אוניב' בן גוריון.	T1/2022
סוקניק, א. 2022. פרויקט שיתוף פעולה ישראל – סין. דו"ח סופי. במימון משרד המדע.	T2/2022
אסטרון, פ'., ויינר-מוציני, ד'. 2022. מבחן סטריפים לאומדן מהיר של ריכוז מהיר של הרעלן צילינדרוספרמופסין במי חופי הכנרת. דו"ח מסכם. מוגש לרשות המים.	T3/2022
קפלן - לוי, ר.נ. 2022. בדיקת פוטנציאל רעילות למין אחד של ציאנובקטריה. מוגש לפרופ' סמי בוסיבא-אוניב' בן גוריון.	T4/2022
בארי-שליון, י'. שרעבי, ג'. 2021. ניטור מתכות כבדות. דו"ח שנתי 2021. מוגש לרשות המים.	T5/2022
זהרי, ת'., גל, ג'., בארי - שליון, י'., אקרט, ו'., קמינגס, ד'., אופיר, א'., בכר, ד'., גזית, א'. דולב, ע'. 2022. יערות אשלים מוצפים בכנרת, דו"ח שנתי לשנת מחקר שניה. מוגש לרשות המים.	T6/2022
ניניו, ש'. 2022. תכנית ניטור זיהום ממקור צואה בנחל המשושים ונחל אלעל. דו"ח מסכם. מוגש לרשות המים.	T7/2022
צוות המעבדה לחקר הכנרת. 2022. דו"ח שנתי ניטור ומחקרי כנרת. מוגש לרשות המים.	T8/2022
נשרי, ע'. גבריאלי, א'. 2022. גישה אינטגרטיבית לבחינת הקשר בין הירדן לכנרת. דו"ח ביניים. מוגש לרשות המים.	T9/2022
פרפרוב, א'., גל, ג'. 2022. עיצוב מדיניות המים למטרות של ניהול בר קיימא של מערכות אקולוגיות חברתיות.	T10/2022
ניניו, ש'. 2022. ניטור זיהומים ממקור צואתי בנחל המשושים ונחל אלעל בשיטת MST בשנת 2021. דו"ח מסכם - מוגש יחד עם רשות המים.	T11/2022
אמיתי, י'., סוקניק, א'., גל, ג'. 2022. בחינת השפעות אפשריות של הזרמת מי התפלה או מי מערכת ארצית על איכות מי הכנרת והמערכת האקולוגית. דו"ח סופי.	T12/2022
זהרי, ת'. ושות' 2022. ניטור פוטנציאל נזק ופרמטרים נילווים בדיפלה. מוגש לרשות הטבע והגנים.	T13/2022
זהרי, ת'., גל, ג'., בארי - שליון, י'., אקרט, ו'., קמינגס, ד'., אופיר, א'., בכר, ד'., גזית, א'. דולב, ע'. 2022. יערות אשלים מוצפים בכנרת, דו"ח חצי שנתי לשנת מחקר שלישית. מוגש לרשות המים.	T14/2022
אמיתי, י'. 2022. פיתוח, כיול ויישום מודל ביוגיאוכימי תלת מימדי לכנרת. מוגש לרשות המים.	T15/2022

שם הדו"ח/המעבדה לחקר הכנרת ע"ש יגאל אלון	דו"ח חיא"ל מס'
אקרט, ו', ניניו, ש', סולימני, ב', ברגמן, ע'. 2022. הדינמיקה של תהליכי חימצון/חיזור בכמוקלינה של אגם הכנרת ניתוח כימי גנטי. דו"ח סופי. מוגש לקרן הלאומית למדע.	T16/2022
זהרי, ת', בארי-שליון, י', קורן, נ', אלסטר, א', צברי-דר, ע', לייבוביץ, א', ויינר-מוציני, י'. 2022. ניטור פיטופלנקטון ופרמטרים נלווים בדיפלה, דו"ח מסכם, מוגש לרשות הטבע והגנים.	T17/2022
אסטרון, פ'. 2022. חומרים נדיפים (VOCs), חתימה כימית מרחבית יעילה לעליית אוכלוסיות ציאנובקטריה ופיטופלנקטון ספציפיות באגם הכנרת, מצב פיזיולוגי והרכב המינים. דוח שנתי שנה שלישית. מוגש לרשות המים.	T18/2022

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 2022:

✓ 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 תחנות מדידה רציפות בצפון (תחנה G) ובדרום (תחנה D) לצורך מעקב אחרי התפתחות פריחות של ציאנובקטריה באגם.

✓ ייעוץ לרשות המים בנושא רעלני ציאנובקטריה בכנרת, שכלל פיתוח ויישום פרוטוקול דיווח מדורג לרשות המים, וכן דיגום ואנליזות ייעודיות במקרה של פריחה בכנרת.

✓ 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 (ת' זהרי, חברה, נ' שטרן וג' גל משקיפים).

✓ ועדת אינטרדוקציה של בע"ח ואצות, משרד החקלאות (א' אוסטרובסקי, חבר).

✓ צוות היגוי ניטור כנרת ואגן ההיקוות, רשות המים (ג' גל, משקיף).

✓ ועדה לניטור 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, Internation 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).

5.5 ביקורים במעבדה בשנת 2022

שם הארגון	תאריך הביקור	מספר המשתתפים	סוג הפעילות
סמינר הקיבוצים - סטודנטים לתואר שני בחינוך סביבתי	08.02.22	20	הרצאה על ניטור ומחקר בכנרת, סיור במעבדה ובמעגן
משרד הבריאות – עיריית הן חזר הוברמן	01.03.22	2	פגישה עם החוקרים, ביקור במעבדות
המשרד להגנת הסביבה - השרה תמר זנדברג ועובדי המשרד	01.03.22	5	הרצאה על פעילות המעבדה, דיון וסיור חלקי במעבדות
החוג למדעי הסביבה האוניברסיטה העברית- סטודנטים בקורס מים וסביבה בראשות פרופ' סיימון עמנואל	09.05.22	20	הרצאה על פעילות המעבדה, סיור במזח והדגמה של ציוד הדיגום.
המכללה האקדמית תל חי- סטודנטים בקורס "אקוטוקסיקולוגיה בסביבה המימית" בראשות פרופ' אסף סוקניק	18.05.22	3	הרצאה על פעילות המעבדה
המכללה האקדמית תל חי- סטודנטים בקורס "מיקרו אצות ואיכות מים" בראשות ד"ר תמר זהרי ופרופ' אסף סוקניק	26.05.22	12	הסברים והדגמות במעבדות
הטכניון- מכון טכנולוגי לישראל- סטודנטים במסגרת הקורס 'מערכות אקולוגיות'	23.06.22	30	הרצאה על פעילות המעבדה + סיור , הדגמות והסברים במעבדות
לשכת המדענית הראשית המשרד להגנת הסביבה - נגה קורנפלד שור יחד עם אלון זס"ק מנכ"ל חיא"ל	19.07.22	2	הרצאה על פעילות המעבדה + סיור במעבדות
משלחת מחו"ל מטעם משרד החוץ, מש"ב - משרד לשיתוף בינלאומי	24.07.22	27	הרצאה על פעילות המעבדה
מכללת הרצוג - סטודנטים לגיאוגרפיה, קורס משאבי מים של מדינת ישראל	31.07.22	20	הרצאה על פעילות המעבדה
ארגון אקופיס - השתלמות מורות/ים לביולוגיה ומדעי הסביבה	22.08.22	18	הרצאה על פעילות המעבדה
המעבדה השטה – השתלמות מדריכים	20.09.22	14	הרצאה על פעילות המעבדה + הפלגה + הדגמות והסברים בשטח ובמעבדות
צוות משפטי - ועדת הפנים והגנת הסביבה של הכנסת	21.09.22	7	הרצאה על פעילות המעבדה וסיור
הסניגוריה הציבורית - מחוז צפון – עובדי הסניגוריה	26.12.22	18	הרצאה על פעילות המעבדה