

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

ניטור ומחקרי כנרת

דוח פעילות המעבדה בשנת 2013



www.ocean.org.il

תמונת השער: מבט מבית יגאל אלון, על חוף קיבוץ גינוסר המראה נוף טיפוסי של חופי כנרת בשנת 2013
עם צמחייה חופית מוצפת שיוצרת לגונה מוגנת. צלם: בני סולימני.



ISRAEL OCEANOGRAPHIC & LIMNOLOGICAL RESEARCH LTD. חקר ימים ואגמים לישראל בע"מ
THE YIGAL ALLON KINNERET LIMNOLOGICAL LABORATORY המעבדה לחקר הכנרת ע"ש יגאל אלון
ת.ד. 447 מגדל 14950, ישראל טלפון: 04-6721444; פקס: 04-6724627; E-mail: kil@ocean.org.il

ניטור ומחקרי כנרת דו"ח פעילות המעבדה לשנת 2013

דו"ח חיא"ל T11/2014

יוני 2014

עיקרי הדו"ח

הדו"ח מסכם את פעילות המעבדה לחקר הכנרת ע"ש יגאל אלון, חקר ימים ואגמים לישראל, בשנת 2013. מוצגים בו עיקרי הממצאים של ניטור הכנרת והמסקנות הנובעות מהם והערכה כללית של מצב איכות המים באגם. בהמשכו, הדו"ח מרכז את תוצאות המחקרים הלימנולוגיים שבוצעו במהלך השנה במעבדה ומוקדו בתהליכים העיקריים המתקיימים באגם או באגן ההיקוות שלו ומשפיעים על איכות המים. השילוב של ניטור ומחקר מדעי מאפשרים את השגת היעד העיקרי של הפעילות – פיתוח כלים מדעיים לתמיכה בקבלת החלטות על תפעול הכנרת במערכת אספקת המים הארצית.

תמונה כללית: הכנרת בשנת 2013

כמות הגשמים באגן ההיקוות של הכנרת בשנה ההידרולוגית 2012/13 הייתה מעל הממוצע הרב שנתי. שנה גשומה יחסית זו עקבה שנה גשומה נוספת (2011/12). כתוצאה מכניסות המים המרובות מאגן ההיקוות ירדה מליחות הכנרת מערכים של 285 מ"ג כלוריד לליטר ב-2011 למינימום של 241 מ"ג כלוריד לליטר ב-2013, שהוא הנמוך שנרשם מאז 2007. השנתיים הגשומות הגיעו לאחר רצף של 8 שנים דלות משקעים או ממוצעות מאז 2004, ורצף של 4.5 שנים של מפלסים נמוכים מאד, מתחת ל 212- מ'. מפלס המקסימום של הכנרת במאי 2013, 209.86- מ', היה גבוה ב- 1.5 מ' ממפלס המקסימום של 2012, ב- 2.5 מ' ממפלס המקסימום של 2011 וב- 4.25 מ' ממפלס המינימום של סוף 2010. עליית מפלס נכרת זו גרמה לשינויים משמעותיים באיזור הליטורל, שהשתנה באזורים נרחבים מחולי (במפלסים נמוכים) לאבני (במפלסים גבוהים), וברצועת החוף החשוף, שעובייה הצטמצם משמעותית. שטיפת אגן ההיקוות בחורף 2012/13 הובילה לעומסים גבוהים של נוטריאנטים וכן להסעת חומר אורגני ואי-אורגני רב מאגן ההיקוות לתוך הכנרת. בלטו במיוחד ריכוזים גבוהים של ניטראט וזרחן מומס באפילימניון בחודשים ינואר עד מרץ, כתוצאה מכניסות אלו.

בניגוד לציפיות שלנו, שבשנה גשומה זו כמו בשנים גשומות אחרות תפתח פריחה מאסיבית של פרידיניום – פריחת הפרידיניום האביבית ב-2013 היתה קצרה ובעצמה נמוכה. הסיבות לכך עדיין לא ברורות. הפרמטרים הכימיים בחורף – אביב היו אופייניים לשנים ללא פרידיניום – עכירות נמוכה, זרחן כללי ממוצע, חמצן נמוך מהממוצע, קצבי שיקוע קלציט ממוצעים.

ערבוב מלא התרחש במהלך המחצית השנייה של ינואר 2013 (נתוני הפרופיילר). טמפרטורת המים הנמוכה ביותר שנרשמה בזמן הערבוב היתה 15.7°C באמצע פברואר. המוליכות היתה $1150 \mu\text{Scm}$, $\text{pH}-8.2$ וכל עמודת המים היתה רוויה ביחס לחמצן מומס. בדרך כלל תחילת השיכוב התרמי נצפית במרץ בעוד שבשנת 2013 נידחתה תחילת השיכוב עד לסוף אפריל ושכבת ה-BBL הפכה לחסרת חמצן רק במאי. כתוצאה מאירוע סערה חורפית קיצונית באמצע דצמבר 2013 התרמוקלינה צנחה אל מתחת ל- 35 מ'. הערבוב המלא של חורף 2013/14 התרחש מוקדם יחסית, כבר ב- 24 לדצמבר 2013.

עליית המפלס של חורף 2012/13 גרמה להצפת חלק נוסף מהצמחייה החופית העבותה שהתפתחה בחופי הכנרת החשופים ממים במהלך שנות המפלסים הנמוכים אך לא כוסתה בחורף 2011/12. הצמחייה המוצפת המתפרקת וכן חומר צמחי שנשר מהצמחייה במשך השנים והוצף לראשונה ב-2013 תרמו מזינים נוספים למי הכנרת, בפרט בחודשי האביב. הצמחייה החופית המוצפת סיפקה לדגים וחסרי חוליות מקומות מסתור מטורפים, מקורות מזון מגוונים, אתרי קינון מועדפים לדגה, ואתרי אימון לדגיגים שבקעו. הדגה בכנרת, שדעכה בשנות המפלסים הנמוכים, עם שפל של כל הזמנים בשלל הדייג ב-2008, התברכה בשנה שנייה ברצף עם תנאים שאפשרו רבייה מוצלחת, ונמשך השיפור בשלל דייג, ובפרט של אמנון הגליל, שהחל ב-2012. כמות הלבנונים באגם נמצאה במגמת עלייה זו השנה השלישית, אך לא נרשמה השפעה שלילית על הזואופלנקטון, שנמצא גם הוא במגמת עלייה. תצפיות אלו מעידות על מורכבות מארג המזון ועל כך שאין מקום ליישום של "דילול סרדינים".

עיקר ממצאי הניטור בשנת 2013 מסוכמים להלן בטבלה 1. הרבה מנתוני הניטור מוצגים כיום ב"מרכז מידע כנרת" שבאתר היא"ל www.ocean.org.il, חלקם בזמן אמת וחלקם כנתונים היסטוריים. האתר אינטראקטיבי ומאפשר בחירת הפרמטרים ופרקי הזמן עבורם יוצגו הנתונים. "מרכז מידע כנרת" כולל גם קטלוג אצות כנרת אינטרנטי הזמין בקישור: http://kinneret.ocean.org.il/phyt_cat_listView.aspx

טבלה 1: עיקר ממצאי הניטור משנת 2013

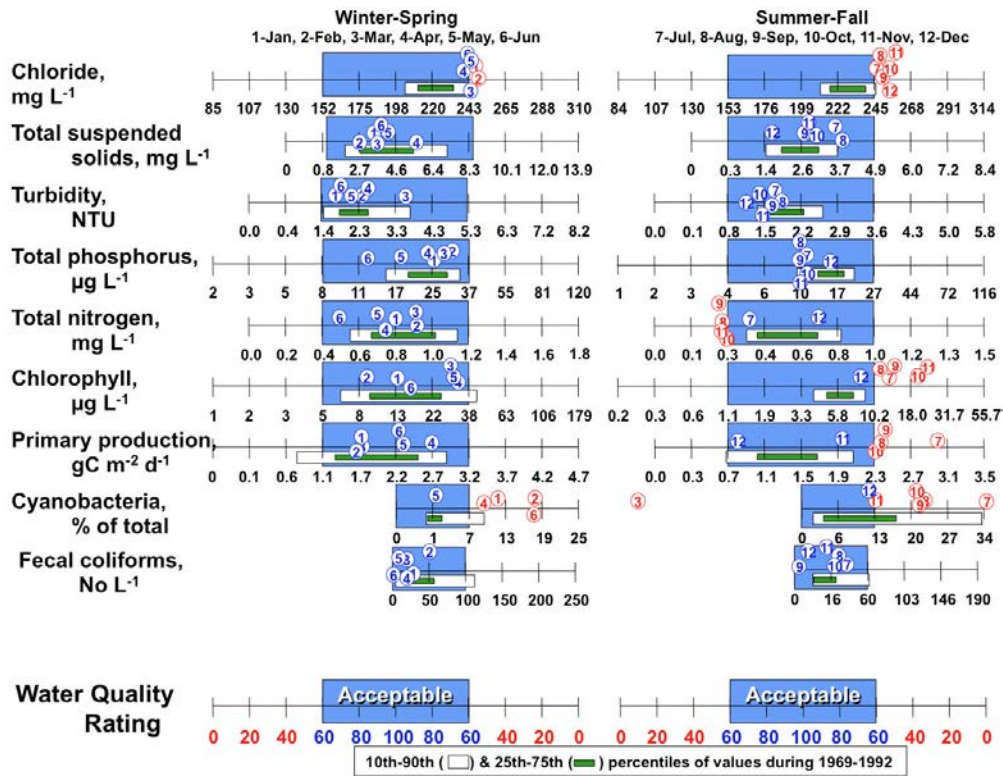
פרמטר	ממצאים בשנת 2013
מפלס	שנת 2013 היתה שנה שנייה ברצף של עליית מפלס משמעותית. מפלס הכנרת עלה במהלך חורף 2012/13 ב- 2.57 מ', מרום מינימלי של -212.43 מ' בנובמבר 2012, לרום שיא של -209.86 מ' במאי 2013. ביחס למפלס השיא של 2012, -211.32 מ', זו היתה עליה נטו של 1.46 מ'. במהלך הקיץ והסתיו המפלס ירד שוב לרום מינימלי של -211.40 מ', כ- 1 מ' גבוה יותר ממפלס המינימום של השנה הקודמת.
משקעים	בסיכום עונתי ל- 2012-2013 נמדדו כ- 481 מ"מ גשם על פני האגם (כ- 80 מ"מ"ק). כמות זו מהווה בקירוב כ- 117% מכמות הגשמים הרב-שנתית הממוצעת על פני הכנרת. פריסת הגשמים על פני עונת 2012-2013 התאפיינה בחודשים נובמבר 2012 עד ינואר 2013 עם כמויות גשם גדולות יחסית, ופברואר-מרץ שחונים למדי.
טמפ' המים ושיכוב	שנת 2013 התאפיינה בשכוב תרמי סטנדרטי וניכר כי: 1. טמפרטורת המים באפילימניון הייתה בשנה זו מעט נמוכה (0.5 מעלות) מהממוצע ב- 12 השנים האחרונות; 2. השיכוב היה בקירוב בעומק דומה לממוצע השנים האחרונות. השכוב התרמי במהלך 2013 נמשך כ- 273 יום, בהשוואה לממוצע רב שנתי (15 השנים האחרונות) העומד על כ- 290 ± 30 יום.
חומר מרחף	ריכוז החומר המרחף הממוצע היה כ-2 מג' חומר יבש לליטר, נמוך במעט רב השנה מהממוצע הרב שנתי של העשור האחרון ונמוך בהרבה מהריכוזים שנמדדו ב-2012.
כלוריד	מליחות האגם היתה הנמוכה ביותר שנרשמה בכנרת מאז 2007: בינואר 2013 כ- 247 מג"ל כלוריד, עם ירידה בחורף, עד למינימום של 241 מג"ל כלוריד במאי, הודות לזרימות מאגן ההיקוות בשנה גשומה זו.
עכירות	לאורך כל השנה העכירות באפילימניון היתה נמוכה מהממוצע הרב שנתי של העשור האחרון. בהיפולימניון ערכי 2013 היו דומים לממוצע הרב שנתי.
זרחן מומס מגיב	זרחן מומס מגיב היה ברמות נמוכות מהממוצע הרב שנתי באפילימניון, לאורך רב חודשי השיכוב. שיא גבוה מהממוצע הרב שנתי נרשם בינואר, כנראה בהקשר לספיקה גבוהה של הירדן באותו חודש.
זרחן כללי	ריכוזים נמוכים מעט מהממוצע הרב שנתי ב-אפילימניון לאורך רב חודשי השיכוב.
חנקן	הדגם העונתי הטיפוסי של אמון ושל ניטרט הקדים בשנת 2013. תהליך הניטריפיקציה בינואר גרם לשיא של ניטריט. ריכוזי ניטראט מינואר ועד מרץ היו גבוהים מאד, אולי כתלות בספיקות ירדן גבוהות אשר התרכזו השנה מוקדם יחסית, בינואר פברואר. עד יולי ערכים אלו יורדו לערכי הממוצע הרב שנתי. ריכוזי החנקן האורגני החלקיקי היו נמוכים רב השנה למעט באביב.
פיטופלנקטון	2013 היתה שנה נוספת ללא פריחת פרידיניום. ביומסת האצות, ריכוזי הכלורופיל והייצור הראשוני היו כולם נמוכים מהממוצע הרב שנתי בחצי הראשון של השנה, בגלל העדר פריחת פרידיניום, וגבוהים בהרבה מהממוצע בחצי השני של השנה, בגלל פריחה לא שגרתית מאוגוסט עד נובמבר של אצות ירוקיות (<i>Cosmarium sp.</i>), עם תוספת של כחוליות מקבעות חנקן.

זואופלנקטון	נמשכת תנודתיות גדולה בצפיפות השנתית הממוצעת של הזואופלנקטון. ב-2013 נמשכה מגמת עליה בצפיפות הפרטים, וזאת למרות הגידול המתמשך באוכלוסיית הלבנונים בכנרת.
דגים	חל גידול משמעותי במספר הדגים במים הפלאגיים באגם (בעיקר לבנונים) במהלך 3 השנים האחרונות, מ-100 מליון ביוני-יולי 2011 ל-240 מליון ב-2012 ול-320 מליון ב-2013. העלייה מיוחסת לרצועה הרחבה של ליטורל עם צמחייה מוצפת ששמה אתר קינון, מסתור ומקור מזון לדגים המתרבים ולדגיגים.
חומרי הדברה	ניתן היה להבחין בנוכחות כמעט קבועה של חומר הדברת החרקים Endosulfan- α , וכן נוכחות תדירה של DDD, תוצר פירוק של DDT שגם הוא משמש להדברת חרקים. זאת למרות השימוש בחומרים אלו הופסק זה מכבר במדינות רבות בעולם והוגבל גם בישראל. Endosulfan- α שימש גם השנה לדייג לא חוקי באמצעות הרעלות מכוונת, בעיקר בתקופת הפסח.
רעלני כחוליות	עקב נוכחות אצת המיקרוציסטיס, בחורף נמצאו במי כנרת מיקרוציסטינים בריכוז מרבי של כ-1 מיקרוגרם לליטר. לאורך כל הקיץ והסתו ריכוזי רעלני הכחוליות היו מתחת לסף זיהוי.
אינדוקטורים לזיהום צואתי	באתרי השאיבה ובמקום כניסת הנחלים לירדן מספרי האינדוקטורים לזיהום צואתי היו נמוכים. מספרי חיידקים גבוהים נרשמו רק באירועי הגשמים הראשונים לשנה ההידרולוגית, ששטפו את אגן ההיקוות כבר בנובמבר-דצמבר 2012.
קצבי שיקוע	קצבי סדימנטציה בתחנה K שבדרום האגם היו דומים לאלו שבתחנות הליטורליות, F-10M, וגבוהים מאלו שבתחנה A. באופן בולט, לא נמדדו ערכי שיקוע סדימנט גבוהים במיוחד בתחנה K כפי שהיה מצופה מחישוב קצבי השיקוע שנעשה על סמך סקר המולטי-ביס ב-2008.
הנביעה בברבוטים	שפיעת המים בנביעת הברבוטים מושפעת מעונת השנה והיא גדולה יותר בחורף. לא זוהו מגמות ארוכות טווח בשפיעת המים, אבל חלה ירידה מתמשכת בטמפרטורת המים, מ-28 מעלות צלסיוס בסוף 2007 ל-26 מעלות בסוף 2013. עד סוף 2011 ירידת הטמפר' לוותה בירידת מליחות, אך ירידת המליחות נפסקה ב-2011. ב-2013 המליחות עמדה על 10000 מג' כלוריד לליטר.
בסיס הנתונים	הרבה מנתוני הניטור מוצגים בצורה גרפית בזמן כמעט אמיתי ב"מרכז מידע כנרת", בקישור http://kinneret.ocean.org.il/Default.aspx

איכות המים

איכות המים בכנרת מכומתת באמצעות "אינדקס איכות המים", המתבסס על ערכים מדודים של תשעה פרמטרים שונים והיכן ערכים אלו נופלים ביחס לתחום הערכים הנחשב קביל. לפי אינדקס זה, איכות המים בכנרת בשנת 2013 היתה טובה יותר מאשר בשנת 2012. עם זאת, גם ב-2013 נרשמו לא מעט חריגות מערכים קבילים (איור 1). באופן בולט, איכות המים בחודשי החורף – אביב של שנת 2013 היתה טובה יותר מאשר בחודשי הקיץ-סתיו: בחורף-אביב היו חריגות מערכים קבילים רק בשניים מתוך 9 הפרמטרים של איכות המים, אך בחודשי הקיץ-סתו נרשמו חריגות ב-5 פרמטרים (איור 1). הפרמטר העיקרי שתרם להפחתה באיכות המים ב-2013 היה אחוז הכחוליות, שחרג מהערכים הקבילים בעשרה מחודשי השנה. יש לסייג את המוצג באיור 1 בכך שערכי אחוז הכחוליות אינם סופיים (מבוססים על ספירות מיקרוסקופיות של חלק מהדוגמאות) ויעודכנו במהלך 2014 עם השלמת הספירות המיקרוסקופיות. הערכים של ריכוזי הכלוריד הראו מגמת שיפור (התקרבו לתחום הקביל) לעומת הערכים שנרשמו בשנים 2012 ו-2011 וזאת בגלל כניסות המים הגדולות לכנרת, אך ב-8 חודשים עדיין נפלו מחוץ לתחום הקביל. גם ערכי הכלורופיל והייצור הראשוני בחודשי הקיץ-סתו של 2013 חרגו מהקביל, בגלל פריחה לא שגרתית אך גם לא מזיקה של אצות ירוקיות (ראו פרק 1.5 פיטופלנקטון). לאחר 15 שנות שימוש באינדקס איכות מים זה, ב-2013 התחלנו ברביזה של האינדקס (ראו פרק 2.4), תהליך שנמשך ב-2014.

Water Quality in Lake Kinneret: 2013



אירור 1: תיאור גרפי של איכות המים בכנרת ב-2013 עבור 9 פרמטרים, בחודשי החורף-אביב (משמאל) והקיץ-סתיו (מימין). הערכים הם ממוצעים חודשיים של ערכים שנמדדו אחת לשבוע או שבועיים בין 0-10 מ' ב-5 תחנות (פרמטרים כימיים) או בתחנה A (פרמטרים של פיטופלנקטון); קולי פקלי נמדדו ב-14 תחנות חופיות. הערכים הממוצעים מצויינים כעייגולים שבתוכם מספר החודש. ערכים קבילים בכחול, ערכים שאינם קבילים באדום. הצגת ה-WQI (המברייט ושות' 2002) מאפשרת זיהוי מהיר של פרמטרים החורגים מגבולותיהם המותרים (בתוך המסגרת הכחולה) לפי המוצג בסכמה. המלבן האופקי הלבן ובתוכו המלבן האופקי הירוק מבטאים את תחומי הערכים שנפלו בין האחוזון ה-10 עד ה-90 (מלבן לבן) או 25-75 (מלבן ירוק) בתקופת היציבות של הכנרת, 1969 – 1992, שלפיהם נקבעו תחומי הערכים הקבילים.

בערכי האינדקס המשוקלל "CWQI" חל שיפור ב-2013 לעומת 2012 ו-2011, הממוצע השנתי קיבל השנה את הערך 60 (מתוך 100) שהוא ערך הגבול בין קביל ללא קביל, לעומת ערכים נמוכים מ-60 שנרשמו בכל השנים האחרונות מאז 2007. אנו קושרים את השיפור באינדקס למפלסים הגבוהים באגם, לשיקום בתי הגידול הליטורליים, להתאוששות הדגה, ולשיפור התנאים האקולוגיים באגם.

במשך כל שנת 2013 באתרי השאיבה, במקום כניסת הנחלים לירדן ובחופי רחצה מספרי האינדיקטורים לזיהום צואתי היו נמוכים, רוב הזיהום החיידקי נשטף עם הגשמים הראשונים שחלו כבר בסוף 2012. רעלני כחוליות מקבוצת המיקרוציסטינים נמצאו במים בריכוז של כ-1 מיקרוגרם לליטר בסוף ינואר, ובריכוזים גבוהים יותר בצופת (עד 900 מיקרוגרם רעלן לג' משקל יבש). בקייץ ריכוזי הרעלנים במים היו מתחת לסף הזיהוי. כמו בדר"כ בשנים עברו, ריכוזי כל חומרי ההדברה שנמצאו במי כנרת במסגרת הניטור השגרתי היו נמוכים מריכוזי סף מקובלים עבור מי שתיה. עם זאת, באופן שיטתי נמצאו במים בריכוזים נמוכים שאריות של אנדסולפאן-אלפא (שמשמש בחקלאות להדברת חרקים), DDE, (תוצר פירוק של DDT) ולפרקים גם טרבוטרין (להדברת עשבים). בדגים נמצאו באופן שגרתי ריכוזים גבוהים יותר של חומרי ההדברה, בגלל ריכוז שלהם ברקמות הגוף. באירוע של הרעלה מכוונת נמצאו ריכוזים גבוהים מאד של חומרי ההדברה בדגים.

תובנות חדשות על המערכת האקולוגית בכנרת

מארג המזון: אנו מבינים כיום שמארג המזון של הכנרת מורכב הרבה יותר מהגרסה הפשטנית של שתי שרשראות מזון (שרשרת הפרדייניום ושרשרת הננופלנקטון) שהייתה מקובלת בשנות ה-70. הבנתנו העכשיות של מארג המזון (פרק 1.12) מציגה מספר נקודות מרכזיות: (1) 6 קטגוריות שונות של ייצורים בתחתית המארג, הכוללות ייצורים ראשוניים וחיידיקים הטרוטרופיים, כולן של ייצורים אוסוטרופיים - כאלו שלוקחים את חמרי הדשן להם הם זקוקים ישירות מהמים. (2) עיקר הפעילות במארג המזון מתרכזת במעגל המיקרוביאלי שבמרכזו המיקרו-זואופלנקטון. מעגל זה פעיל בסדר גודל יותר מאשר המעגלים שעוברים דרך המאקרו-זואופלנקטון בהעברת חמרי דשן במעלה מארג המזון ובמינרליזיה שלהם והחזרתם ל"דיסק הנוטריאנטים" שבבסיס המארג. (3) בכנרת משולשים טרופיים מורכבים של שני טרופים שניזונים מאותו טרף אך בו זמנית אחד משני הטרופים ניזון גם מהטרופ השני. דוגמא לכך הם הזואופלנקטון הצמחוני (הטרף), הזואופלנקטון הטרופ (ניזון מהזואופלנקטון הצמחוני) והלבנון (ניזון מהזואופלנקטון הצמחוני והטרף גם יחד). משולשים טרופיים אלו גורמים לכך שקשה לחזות תוצאה של מניפולציה על אחד המרכיבים, כמו למשל דייג מסובסד של הלבנון, או "דילול סרדינים" כפי שזה נקרא בעבר. (4) סביר שלטרופי-על (ציפורים, דגים טרופים, דייגים) תפקיד חשוב מזה שנחקר עד כה, יש מקום לחקור מקומה של קבוצה זו במארג המזון. (5) לאחרונה החל במעבדה מחקר של המסלול המיקוטי, בו פטריות מקבוצת הכיטרידים משתתפות במיחזור נוטרינטים ומספקות מזון לזואופלנקטון.

מוגושיה: האצה החוטית הירוקית *מוגושיה* שהופיעה לראשונה בכנרת ב-1998, התבססה והיא יוצרת מדי פעם פריחות. מכיון שסוג זה פלש לאחרונה גם לאגמים גדולים באירופה, חשוב להבין מה הגורמים שמעודדים התפתחותו ומה תפקידו באגם. באמצעות סדרת נסיונות מעבדה על תרבויות של האצה *מוגושיה* (פרק 3.3), נמצא שאצה זו יכולה לגדול בטווח רחב של עוצמות אור וטמפרטורה, ולקלוט ולגדול על חנקן כניטראט (בניגוד לירוקיות אחרות כמו *הסצנדסמוס* שגדלות על אמון). נראה שלמוגושיה יתרון בתקופת האביב, כשהאגם עשיר בניטראט כתוצאה מתהליכי הניטריפיקציה, ומניטראט הבא עם מי השטפונות מאגן ההקוות. בעונה זו היא מתחרה ב*פרדייניום*. המוגושיה היא מין אופורטוניסטי שמנצל הזדמנויות של תנאי סביבה מתאימים ליצירת פריחות. מכיון שלא ידועה רעילות של מין זה, אי אפשר להצביע על בעיה לאיכות המים עקב הפריחות שלה.

אבק כמקור עיקרי לזרחן בקייץ (אך לא חנקן): אבק מהווה מקור עיקרי של זרחן זמין לביטה בכנרת, בעיקר בעונת הקייץ בה הנחלים מזרימים לכנרת כחצי טון זרחן לחודש, שחלק ניכר ממנו לא זמין, בעוד שהאבק מביא איתו כמות גדולה פי שלוש של זרחן, 1.5 טון זרחן לחודש, שרובו זמין (פרק 1.15). מעניין שאותו אבק כמעט ולא מכיל חנקן ולא מהווה מקור משמעותי לנוטריאנט זה. לפיכך, האבק תורם לפריחות הקייציות של אצות כחוליות מקבעות חנקן, שזמינות הזרחן מגבילה את עצמת פריחתן.

השלכות אקולוגיות של מפלסים נמוכים: השפעה משמעותית של שינויי מפלס על מאזן הנוטריאנטים באגם מתבררת ממחקר של עמי נשרי ושותפיו על העברת מזינים מההיפולימניון לאפילימניון (פרק 3.1). כשהאגם משוכב, זרחן מומס מצטבר בשכבה שקרובה לקרקעית האגם באזור העמוק, שכבת ה-benthic boundary layer, בעוד ששכבת ההיפולימניון שמעליה נותרת כמעט ללא זרחן. שכבת ההיפולימניון דלת זרחן זו מהווה מעין מחסום להעברת נוטריאנטים ובפרט זרחן מהמים העמוקים למים הרדודים. שכבת ההיפולימניון זו היא השכבה העיקרית שמצטמקת בעוביה עם ירידת המפלס, ועלולה להעלים לגמרי בירידות מפלס קיצוניות. הכרסום בשכבה חוצצת זו במפלסים נמוכים מעלה הסיכוי לזליגת זרחן מלמטה למעלה, ואולי מסביר את העובדה שבשנים שחונות עם מעט מאד כניסות של חומרי דשן מאגן ההיקוות כמעט ולא נפגע הייצור הראשוני באגם. למעשה בשנים של מפלסים נמוכים מתחזקים תהליכי מיחזור פנימי שמספקים חומרי דשן לאפילימניון גם כאשר המקורות החיצוניים מוגבלים מאד.

הדו"ח מסכם את פעילות המעבדה לחקר הכנרת ע"ש יגאל אלון, חקר ימים ואגמים לישראל, בשנת 2012. מוצגים בו עיקרי הממצאים של ניטור הכנרת והמסקנות הנובעות מהם. בהמשכו, הדו"ח מרכז את תוצאות המחקרים הלימנולוגיים שבוצעו במהלך השנה במעבדה ומוקדו בתהליכים העיקריים המתקיימים באגם או באגן ההיקוות שלו ומשפיעים על איכות המים.

אין להניח כמובן מאליו שהכנרת תוכל לשמש גם בעתיד כמקור אמין למי שתיה והשקיה ולשימושים נוספים כמו דיג וקייט. מתוך ידיעה שאגמים רבים בעולם שונו לחלוטין עקב התערבות האדם, מוטלת עלינו החובה לשמר את הכנרת כמערכת אקולוגית יציבה – כדי להבטיח שימוש בר-קיימא במשאב חיוני זה לנו ולדורות הבאים. מעקב מדעי המבוסס על מערך ניטור נמשך ומגובה במחקר מדעי - מאפשר מעקב צמוד, בחינה ותיעוד של התנהגות האגם, ויכולת ניתוח של תהליכים שונים שחלים במערכת אקולוגית מורכבת זו. המעבדה לחקר הכנרת עוסקת בפיתוח וביישום של כלים מדעיים, לתמיכה בקבלת החלטות על תפעול הכנרת כמרכיב חשוב של מערכת אספקת המים הארצית וניצולה לצרכים נוספים כמו דיג וקייט, תוך שמירה על איכות מימי האגם לטווח ארוך. המעבדה מבצעת את תפקידי הניטור והמחקר בכנרת ברציפות כבר 45 שנים, מאז הקמתה ב-1969.

פוקוס עיקרי בשנת 2013 היה כתיבת ועריכת הספר Lake Kinneret: Ecology and Management שייצא לאור ביוני 2014 בהוצאת ספרניגר. בספר 37 פרקים שעברו סקירה חיצונית, את רובם (אך לא כולם) כתבו חוקרי המעבדה לחקר הכנרת והדבר מתבטא ברשימת הפרסומים של חוקרי המעבדה בסוף הדו"ח. כתיבת הספר חייבה את המחברים והעורכים לסכם את עבודותיהם בנושאים השונים ולמקד את חשיבתם בהבנת תהליכים, בקשרים שבין המרכיבים האקולוגיים, ובגיבוש ועיצוב תמונה כוללת של הכנרת כמערכת אקולוגית. דוגמא לסינתזה כזו בצורת איור המתאר את מארג המזון כפי שאנו מבינים אותו היום מעטר את כריכת הדו"ח.

הדו"ח הנוכחי, כמו דו"חות קודמים, משקף את ההיקף הרחב של הנושאים המעסיקים את צוות המעבדה. שילוב של ניטור ומחקר מדעי הם הדרך בה המעבדה לחקר הכנרת פועלת להשגת יעדיה העיקריים - פיתוח כלים מדעיים לתמיכה בקבלת החלטות על תפעול הכנרת כמערכת אספקת המים הארצית, והמשך פיתוח מרכז ידע לימנולוגי מוביל בעולם. כמו כן, הדו"ח ישמש את קהל הקוראים להרחבת הידע ולגיבוש עמדות במיגוון הגדול של נושאים הכלולים תחת הכותרת הכללית "כנרת".

קריאה מהנה,

ד"ר תמר זהרי

מנהלת המעבדה לחקר הכנרת

תוכן הענינים

11	הקדמה: שילוב פעולות הניטור והמחקר במעבדה לחקר הכנרת	
12	1 ניטור הכנרת	
12	1.1 מבוא	
14	1.2 מפלסים	
15	1.3 מטאורולוגיה ופיזיקה	
21	1.4 ממצאי הניטור הכימי	
27	1.5 פיטופלנקטון	
30	1.6 כלורופיל וייצור ראשוני	
32	1.7 קיבוע חנקן	
33	1.8 חיידקים - ספירת חיידקים כללית וייצור שניוני	
36	1.9 זואופלנקטון	
40	1.10 ציליאטים	
43	1.11 דגים - סקרים הידרואקוסטיים	
45	1.12 מארג המזון במים הפלאגיים	
47	1.13 חלזונות וצדפות	
49	1.14 חומר אורגני ואנאורגני מומס	
51	1.15 סדימנטציה	
52	1.16 זרחן באבק	
53	1.17 אינדיקטורים לזיהום צואתי	
56	1.18 רעלני ציאנובקטריה	
59	1.19 חומרי הדברה	
62	1.20 הערכת שפיעת המלח במעיין הברבוטים	
66	1.21 מערכת נגרת לניטור מרחבי משולב של פרמטרים גיאוכימיים וביולוגיים	
67	1.22 מערכת PhytoPAM במרכז האגם למדידה בזמן אמת של הרכב ופעילות הפיטופלנקטון	
70	1.23 פרופיילר אוטונומי מדגם Autoreel-manta בתחנה A	
71	1.24 ניטור סינופטי באמצעות צילומי לוויין המשולבים במערכת SISCAL	

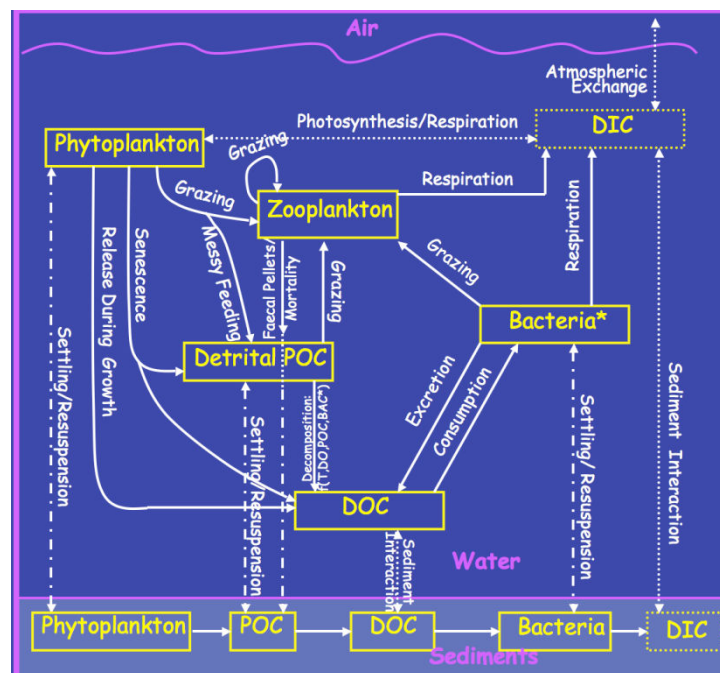
77	מדד כמותי להערכת איכות המים	1.25	
79	מרכז מידע כנרת	1.26	
81	אתר האינטרנט "מרכז מידע כנרת"	1.27	
83	מחקרי הניטור	2	
83	מתכות קורט	2.1	
84	יישום מודל תלת-ממדי לכנרת	2.2	
90	שיפור ניטור הפלנקטון באגם בעזרת מערכת ה-FlowCAM	2.3	
94	שכלול ושיפור מערכת אינדקס איכות המים	2.4	
101	מחקרי כנרת	3	
101	הסעת מזינים משכבת המים התחתונה לעליונה בקיץ	3.1	
104	מנגנוני בקרה גיאוכימיים בתהליכים המגבילים ייצור מתאן באגמים	3.2	
106	האם האצה הירוקית מוגושיה צפויה להחליף את פריחות הפרידיניום?	3.3	
109	תרדמה ונביטה בציאנובקטריה	3.4	
113	האם ניתן לשלוט בפריחות ציאנובקטריה בקיץ על ידי אספקת חנקן מבוקרת?	3.5	
115	פיתוח יכולות DNA ברקוד למיני הפיטופלנקטון בכנרת	3.6	
117	כיטרידים (Chytrid fungi) ופירוק אוכלוסיות הפיטופלנקטון בכנרת	3.7	
120	וירוסים – תפקידם בבקרה על/של תפוצת אוכלוסיות הפיטופלנקטון בכנרת	3.8	
122	העדפות המזון הצמחוניות של הזואופלנקטון	3.9	
126	ממשק הדייג בכנרת- תזונת דגים	3.10	
130	איתור אתרי הטלה של אמנונים ואפיון העדפות קינון בסמוך לצמחייה מוצפת	3.11	
135	פיתוח שיטה לסימון דגיגי אמנון גליל לצורך מדידת הצלחת איכלוסם בכנרת	3.12	
139	סקר דגים באזורי הצמחייה בליטורל	3.13	
142	פיתוח ויישום של מכשיר חדש להערכת ייצור ראשוני	3.14	
145	שימוש במודל אקולוגי-כלכלי לשיפור ממשק הדייג	3.15	
148	חישה מרחוק של פיגמנטים במים פוריים: אגמים, מאגרים ומימי חופים	3.16	
152	מחקרי אגן ההיקוות של הכנרת וגופי מים אחרים	4	
152	ההידרולוגיה של שמורת החולה	4.1	

156.....	הפיטופלנקטון באגמון בשנה הידרולוגית 2012 - 2013	4.2
158.....	שימוש בקרומי קרקע ביולוגיים כאמצעי לייצוב פני שטח וכסוי אתרי פסולת	4.3
160.....	חלקיקים אקסופולימרים שקופים (TEP): מרכיב חשוב בשטף החומר האורגני	4.4
162.....	נספחים	5
162.....	סטודנטים לתארים מתקדמים בהנחיית חוקרי המעבדה לחקר הכנרת - 2013	5.1
163.....	מחקרי המעבדה	5.2
164.....	פרסומי המעבדה בספרות הבינלאומית המבוקרת ב- 2013/14	5.3
169.....	דו"חות המעבדה בשנת 2013	5.4

הקדמה: שילוב פעולות הניטור והמחקר במעבדה לחקר הכנרת

שילוב של ניטור ומחקר מדעי הם הדרך בה המעבדה לחקר הכנרת פועלת להשגת יעדיה העיקריים- פיתוח כלים מדעיים לתמיכה בקבלת החלטות על תפעול הכנרת במערכת אספקת המים הארצית, והמשך פיתוח מרכז ידע לימנולוגי מוביל בעולם.

המעבדה לחקר הכנרת פועלת להבנת מכלול התהליכים הפיסיקליים, הכימיים והביולוגיים המשפיעים על רמת האיטרופיקציה ועל איכות המים בכנרת. באופן ישיר, הפרמטרים שקובעים את מצב האיטרופיקציה באגם הם ריכוז והרכב המזינים באגם, החומר האורגני המומס במים, כמות וסוגי האצות, והקשרים ביניהם - כפי שמתבטאים במחזורי הפחמן, הזרחן והחנקן באגם. באיור 2 מוצג באופן סכמתי מחזור הפחמן בכנרת, כפי שהוא מיוצג במודל האקולוגי CAEDYM שהותאם לכנרת. סכמות מקבילות ודומות באופן עקרוני, המתארות את מחזור הזרחן והחנקן – לא מוצגות כאן. במודל, המבוסס על הכרתנו את המערכת האקולוגית של האגם, הגורמים המאלצים משפיעים באופן ישיר על מרכיבים של המערכת האקולוגית במים. לדוגמה, עוצמת הקרינה, טמפרטורות ורוחות משפיעים על הזרימה ועל עוצמת הערבול של המים, וכתוצאה מכך משפיעים על התפתחות האצות (ייצור ראשוני) ופיזורם במרחב. כמו כן, נוטריאנטים וגורמי גידול, או עיכוב, שנכנסים מאגן ההיקוות משפיעים על התפתחות של האצות והחידקים. באיור 2 מוצגים המרכיבים העיקריים של המערכת האביוטית: נוטריאנטים (בסכמה זו רק DIC), חומר אורגני מומס, חומר אנאורגני חלקיקי, ורכיבי המערכת הביוטית: אצות, חידקים, זואופלנקטון. התהליכים שקושרים בין המרכיבים האלה מסומנים בחצים.



איור 2: תיאור סכימתי של מחזור הפחמן בכנרת, על מרכיביו הביוטיים והאביוטיים העיקריים והקשרים ביניהם, כפי שהוא מתואר על ידי משוואות במודל כנרת CAEDYM.

עבודות הניטור והמחקרים המתבצעים במעבדה לחקר הכנרת מיועדים בין השאר גם להבהיר את החלקים הקריטיים במערך מסובך זה, ולשפר את המודלים הכמותיים. בעזרת המודלים ניתן להגיע להבנה מפורטת יותר של מידת ההשפעה של הגורמים השונים על רמת האיטרופיקציה ועל איכות מים.

1 ניטור הכנרת

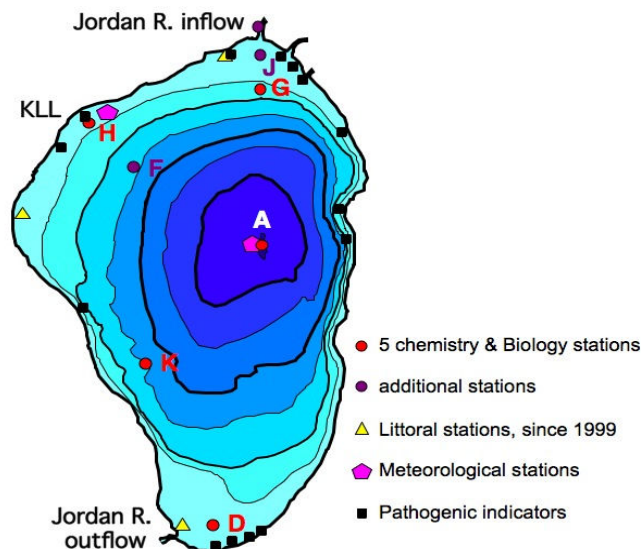
במימון רשות המים

1.1 מבוא

תכנית ניטור הכנרת ממומנת במלואה על ידי רשות המים. תודתנו נתונה לחב' מקורות, לשרות ההידרולוגי, לשרות המטאורולוגי ולאגף הדיג על העברת נתוני ניטור שנאספים על ידם ושיתוף פעולה. יחידת אגן ההיקוות של מקורות מבצעת את האלניזות הכימיות על דגימות המים מניטור הכנרת. צוות היגוי ניטור כנרת בראשותם של פרופ' אורי שמיר מהטכניון ושל דורון מרקל מרשות המים מלווה לאורך שנים את תכנית הניטור ותורם לשיפורה ולהכוונת דרכי פעולתה.

מערך הניטור בכנרת פועל כבר מעל 4 עשורים, במטרה לעקוב אחר איכות מי הכנרת, לעמוד על שינויים באיכות המים וללמוד על התהליכים המשפיעים והקובעים את איכותם. צוות המעבדה לחקר הכנרת אחראי לניטור האגם בעוד יחידת אגן ההיקוות של חברת "מקורות" פועלת לכימות התרומות המגיעות אליו מאגן הניקוז. תוכנית הניטור השנתית במתכונתה הנוכחית, אשר התפתחה במהלך שנות הניטור, מבוססת על דיגום במספר נקודות (תחנות) בכנרת בעומקים שונים, ובדיקת מספר רב של משתנים פיסיקליים, כימיים וביולוגיים, אשר ניתוח נכון שלהם משקף את איכות מי האגם ומאפשר קביעת מגמות שינוי באיכות המים ואיתור מגמות של זיהום המערכת.

יעדי תוכנית הניטור קובעים במידה רבה את תדירות הדיגום, את מספר תחנות הדיגום ומיקומן בגוף המים ואת המשתנים הנבדקים. יתר על כן, אופי גוף המים, עומקו, משטר הזרמים שבו והטופוגרפיה של קרקעית האגם (בתימטריה), מנתיבים את מספר הדגימות שנאספות מעומק עמודת המים בכל תחנת דיגום ואת סוג הבדיקות שנערך בכל אחת מהדגימות. באיור 3 מוצג המיקום של תחנות הניטור העיקריות, על-פי תוכנית העבודה השנתית של המעבדה השנתית לחקר הכנרת. תחנה A, הנמצאת במרכז האגם, נדגמת בתדירות של אחת לשבוע ובה נבדק מספר רב של משתנים, כמפורט בטבלה 2. בתחנות דיגום נוספות, D, G, ו-K, הממוקמות לאורך ציר צפון-דרום, נבדק מספר משתנים מצומצם יותר. בתחנה H הקרובה לראש היניקה למוביל הארצי נבדקים חלק מהפרמטרים. תחנות מטאורולוגיות ממוקמות במרכז האגם בתחנה A ועל החוף בגינוסר.



איור 3: מפה בטימטרית של הכנרת ותחנות הדיגום של תכנית ניטור כנרת.

נתוני הניטור שנאספו בכנרת במשך יותר מ-44 שנות ניטור מהווים בסיס נתונים ייחודי באופיו, הן בשל דיוק המדידות והן בשל רציפותן. יעדי הניטור ואופיו נשקלים אל מול יכולת הביצוע (תשתיות ותקציב), לעיתים יש צורך לצמצם בתדירות הניטור או במספר תחנות הדיגום.

דיגום בתדירות נמוכה מקטין את מידת האמינות של תוצאות המדידה, כמשקפות את הערכים הממוצעים באגם, ואת התהליכים המתרחשים בגוף המים. יתר על כן, דיגום במרווחי זמן גדולים, לא מאפשר הבחנה בזמן-אמת בשינויים באיכות המים ומקטין את אמינות מערכת הניטור, ככלי המספק נתונים הכרחיים לטיפול האגם לצרכי משק המים. משתנים רבים, ובמיוחד הרכיבים הביולוגיים של המערכת האקולוגית (פיטופלנקטון, זואופלנקטון ודגים), מפוזרים על פני שטח האגם בכתמים ובתבנית בלתי סדורה. לפיכך, צמצום מספר תחנות הדיגום פוגע ביכולת מערכת הניטור לשקף נכונה את מצב איכות המים הכוללת בכל שטח האגם. דיגום בתחנה אחת, כמו תחנה A, הנמצאת במרכז האגם, לא תמיד ישקף נכונה את איכות המים באזורים אחרים של האגם, ובפרט לא מייצג את האזורים החופיים.

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. (* תחנה K - אחת לשבועיים - בים גדול).

סוג הבדיקה	תחנות דיגום	תדירות הדיגום
מטאורולוגיה		
טמפרטורת האוויר	גינוסר, A	כל 10 דקות
לחות יחסית	גינוסר, A	כל 10 דקות
טמפרטורת פני המים	A	כל 10 דקות
רוח (כיוון ומהירות)	גינוסר, A	כל 10 דקות
קרינה קצרת גל	גינוסר, A	כל 10 דקות
קרינה ארוכת גל	גינוסר, A	כל 10 דקות
לחץ ברומטרי	A	כל 10 דקות
קרינת אור PAR	גג המעבדה	רציף (ממוצע שעות)
פיסיקה		
פרופיל טמפרטורה במים	A, D, G, H, K	אחת לשבוע
פרופיל טמפרטורה במים - LDS	A	כל 10 דקות
עומק סקי	A, D, G, H, K	אחת לשבוע
פרופיל חדירות האור	A	אחת לשבועיים
קצבי סדימנטציה	K, F, M, A	אחת לשבועיים
כימיה		
אלקליניות	A, D, G, H, K	אחת לשבועיים
כלוריד	A, D, G, H, K*	אחת לשבוע
מוליכות חשמלית	A, D, G, H, K*	אחת לשבוע
סידן	A, D, G, H, K	אחת לשבועיים
פחמן דו-חמצני	A, D, G, H, K	אחת לשבועיים
פחמן אורגאני	A	אחת לשבועיים
סולפיד	A, D, H, K	אחת לשבועיים
חנקן (קילדל) מיס	A	אחת לשבוע
	D, G, H	אחת לשבועיים

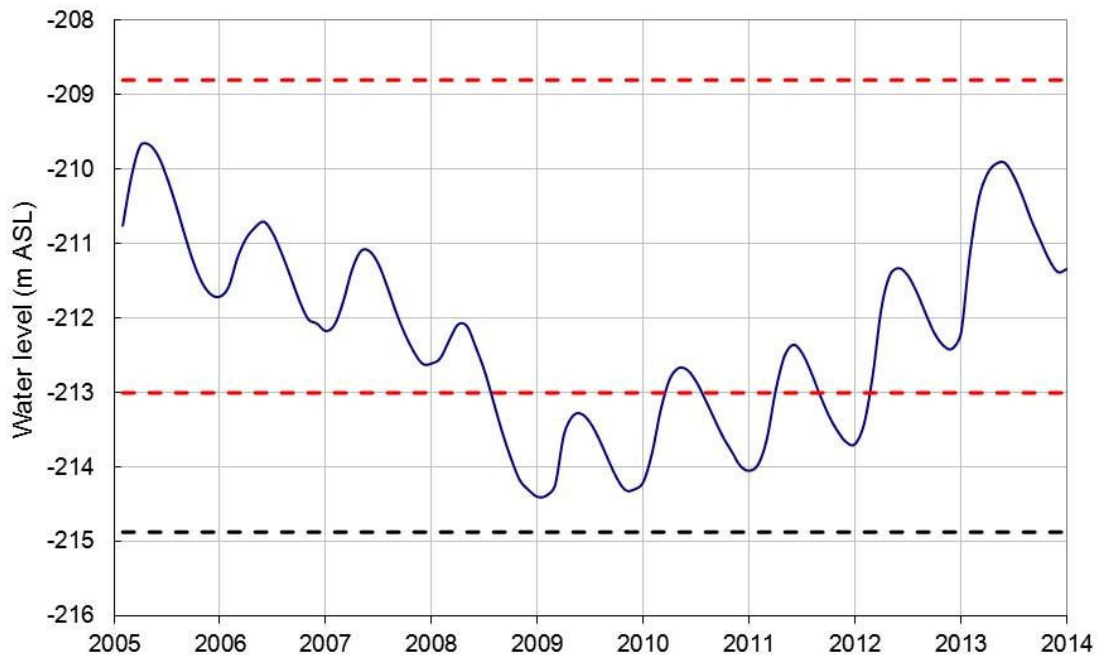
אחת לשבוע	A, D, G, H, K*	חנקן (קילדל) כללי
אחת לשבוע	A, D, G, H, K*	אמוניה
אחת לשבוע	A, D, G, H, K*	ניטריט
אחת לשבוע	A, D, G, H, K*	ניטרט
אחת לשבוע	A	חמצן
אחת לשבועיים	D, G, H, K	
אחת לשבוע	A, D, G, H, K*	pH
אחת לשבוע	A	זרחן כללי מומס
אחת לשבועיים	D, G, H	
אחת לשבוע	A	אורטופוספאט
אחת לשבועיים	G, D, H	
אחת לשבוע	A, D, G, H, K*	זרחן כללי
אחת לשבועיים	A	סליקה
אחת לשבועיים	A, D, G, H, K	גופרה (סולפאט)
אחת לשבועיים	A, D, G, H	מוצקים מרחפים TSS
אחת לשבוע	*A, D, G, H, K	עכירות
אחת לשבועיים	A, D, H, J, גשר אריק	חמרי הדברה
אחת לחודש	A	רעלני כחוליות
ביולוגיה		
אחת לשבועיים	A	פיטופלנקטון
אחת לשבועיים	A	כלורופיל
אחת לשבועיים	A	יצרנות ראשונית (פוריות)
אחת לשבועיים	A, D, G, H, K	זואופלנקטון
אחת לחודש	A	ריסניות (מיקרו-זואופלנקטון)
אחת לחודש-חודשיים	10 חתכים באגם כולו	דגים
אחת לחודש	14 תחנות דיגום	חיידקים ממקור צואתי
אחת לחודש	A	חיידקים-ספירה כללית
אחת לחודש	A	יצרנות חיידקית
אחת לחודש	A	נשימה קהילתית
אחת לחודש בזמן פריחות	A	קיבוע חנקן
ניטור סינופטי		
אחת לחודש/חודשיים	חתכים באגם כולו	מערכת נגדרת – טמפ', מוליכות, עכירות, כלורופיל
אחת ל-3 עד 10 ימים	סינופטי באגם כולו	פיזור מרחבי של טמפ', כלורופיל ועכירות – SISCAL

1.2 מפלסים

תמר זהרי

נתוני המפלס נאספים על ידי השרות ההידרולוגי של רשות המים ולא על ידי המעבדה לחקר הכנרת. אך למידע זה חשיבות בהתייחסות הכוללת למצב האגם ולשינויים הנצפים בו במהלך השנה ולאורך השנים.

רבים מהפרקים השונים בדו"ח מתייחסים לנתונים אלו, ולכן הם מוצגים כאן (באדיבות השירות ההידרולוגי). אחרי רצף של שנים של מפלסים נמוכים, רוב הזמן מתחת לקו האדום התחתון, בשנים 2012-2013 חלה עליה משמעותית במפלס הכנרת, שהגיע לשיא של -209.86 מ' בתחילת מאי 2013 (איור 4). העליה המשמעותית חלה במהלך שני חורפים עוקבים, חורף 2011/12 (עם עליית מפלס נטו, מעבר למפלס המירבי של השנה הקודמת, של כ-1 מ') וחורף 2012/13, עם עלייה של כ-1.5 מ' נוספים. במהלך קייץ-סתיו 2013 ירד ל -211.40 בנובמבר 2013. עלית המפלס של שני החורפים הללו החזירו את הכנרת למצב הרצוי של שהייה בין קוים אדומים לאורך כל השנה.



איור 4: מפלסי הכנרת, ינואר 2005 עד דצמבר 2013. מוצגים "הקוים האדומים", העליון (-208.80 מ') והתחתון (-213 מ') וכן הקו השחור (-214.87 מ'), המינימום של כל הזמנים שנשרשם בכנרת, שמתחתיו אין לרדת. הנתונים באדיבות השירות ההידרולוגי, רשות המים.

ההשלכות האקולוגיות של עלייה זו על הכנרת היו משמעותיות, וניכרו לעיין במיוחד בחופי האגם. במשך שנות המפלסים התפתחה בחופי הכנרת החשופים צמחייה חופית עבותה, שרובה כוסתה במים במהלך שני החורפים הללו. הצמחייה החופית המוצפת סיפקה מקומות מסתור מטורפים, מקורות מזון מגוונים, אתרי קינון מועדפים לדגה, ואתרי אימון לדגיגים שבקעו. הדגה בכנרת, שדעכה בשנות המפלסים הנמוכים, עם שפל של כל הזמנים בשלל הדייג ב-2008 - התברכה בשנתיים עם תנאים לרבייה מוצלחת, ובעקבות כך עלייה משמעותית בשלל הדייג. אספקטים נוספים של ההשלכות האקולוגיות של עליית המפלס מוצגים בפרקי הדו"ח השונים.

1.3 מטאורולוגיה ופיזיקה

אלון רימר, יורי לצינסקי, מיקי שליכטר

סיכום שנתי של מדידת פרמטרים מטאורולוגיים

כיום עומדות לרשות המעבדה שש תחנות מטאורולוגיות המודדות סימולטנית כל 10 דקות את המשתנים המטאורולוגיים הבאים: גשם, טמפרטורת אוויר, לחות יחסית, מהירות וכיוון רוח, קרינה קצרת גל (305-2800 nm). בגינוסר נמדדת גם קרינה ארוכת גל (5-25 μm); בתחנה A נמדדים גם הלחץ הברומטרי,

טמפרטורת פני המים, קרינה נטו, קרינה ארוכת גל וקרינה קצרת גל מוחזרת מפני המים. בתחנות הקרקעיות נמדדת גם טמפרטורת הקרקע, ובתחנת הרכבל התחתון בחרמון נמדד השלג (מד גשם מחומם) קרינה ארוכת גל, ואלבדומטר. בסיס הנתונים המטאורולוגי של הכנרת כולל כעת נתוני מדידה מטאורולוגית לפי הפירוט הבא:

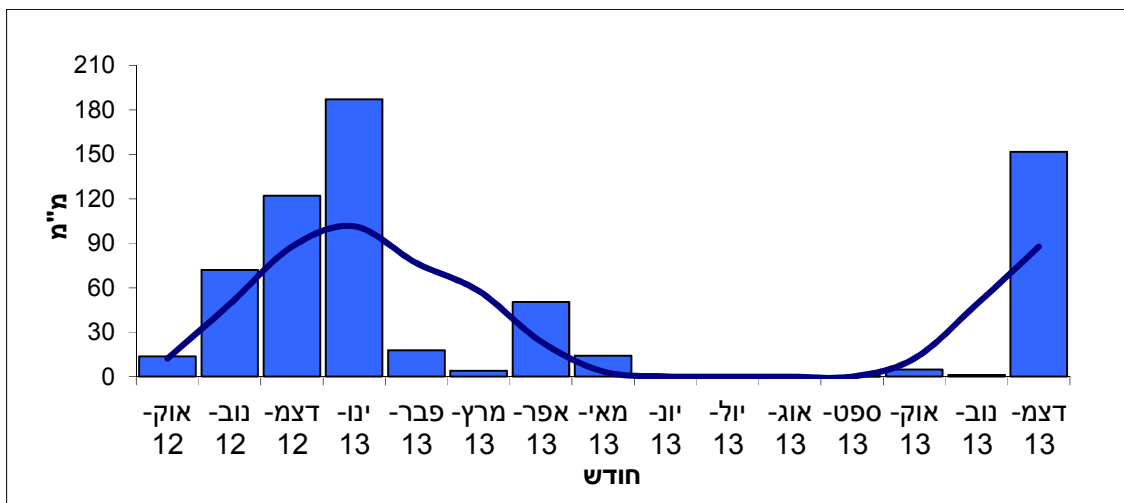
- משנת 1996 תחנת טבחה (כעת גינוסר)
- משנת 1997 תחנות צמח ובית צידה (תחנות השמ"ט)
- משנת 2003 על האקו-ראפט בתחנה A (חלקית תחנת השמ"ט).
- משנת 2006 תחנה מטאורולוגית ליד הרכבל העליון בחרמון.
- משנת 2008 תחנה מטאורולוגית ליד הרכבל התחתון בחרמון.

סיכום המדידות בשנת 2013

סיכום המדידות המטאורולוגיות לשנת 2013 מבוסס על נתוני התחנה המטאורולוגית בתחנה A. התרשימים מייצגים את הממוצע השעתי (ייצוג התנודה הימתית) ע"פ חודשי השנה (ייצוג התנודה העונתית) של הפרמטרים המטאורולוגיים המדוּדִים. הפרמטרים שסיכום המדידה השנתי שלהם יוצג הם: 1. טמפרטורת אויר (רום כ- 3 מ' מעל פני האגם); 2. טמפרטורת פני המים (עומק עד 20 ס"מ); 3. קרינה קצרת גל; 4. קרינה ארוכת גל; 5. לחות יחסית; 6. מהירות הרוח. ממוצע המדידות לשנת 2013 הושווה לסיכום הרב שנתי לשנים 1996-2012. ההשוואה נעשתה ע"י חישוב ההפרש בין ממוצע שעתי לחודש משנת 2013 לעומת ממוצע דומה עבור כל השנים שקדמו לשנה זו, ושרטוט מפת הפרשים בין שני הממוצעים. כאמור, בדו"ח השנה יש לזכור כי הנתונים מתחנה A עשויים להיות מעט שונים באופיים מאלה שנמדדו בשנים 1996-2007 על פני המים (תחנת טבחה עד 2007).

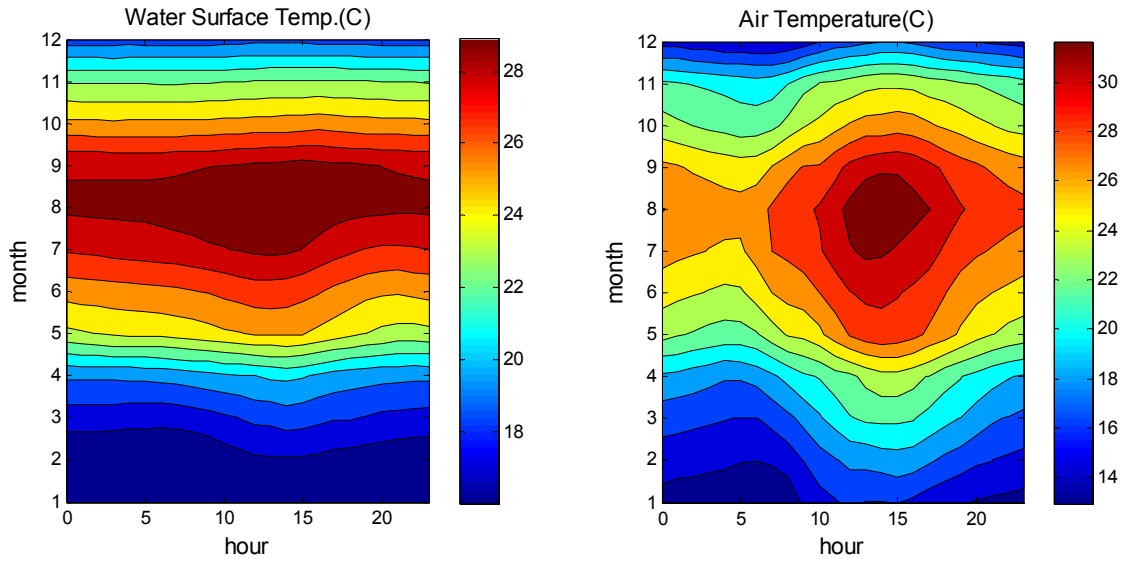
גשם על הכנרת בשנת 2013

נתוני הגשם החודשי מה-1.10.2012 ועד ל-31.12.2013 נלקחו מאתר השרות המטאורולוגי מתחנות באמנון, בית זרע, דגניה א', חוקוק, קבוצת כנרת, ובטיחה (איור 1). בסיכום עונתי לחורף 2012-2013 בלבד מתקבלים כ- 481 מ"מ על פני האגם (כ- 80 מלמ"ק). כמות זו מהווה בקירוב כ- 117% מכמות הגשמים הרב-שנתית הממוצעת על פני הכנרת. פריסת הגשמים על פני עונת 2012-2013 התאפיינה בחודשים נובמבר 2012 עד ינואר 2013 עם כמויות גשם גדולות יחסית, ופברואר-מרץ שחונים למדי. עונת 2013-2014 נפתחה עם מעט גשם, להוציא סופה בודדת בחודש דצמבר 2013. נתייחס להשפעת נתונים אלה על הכנרת בהמשך הדו"ח.

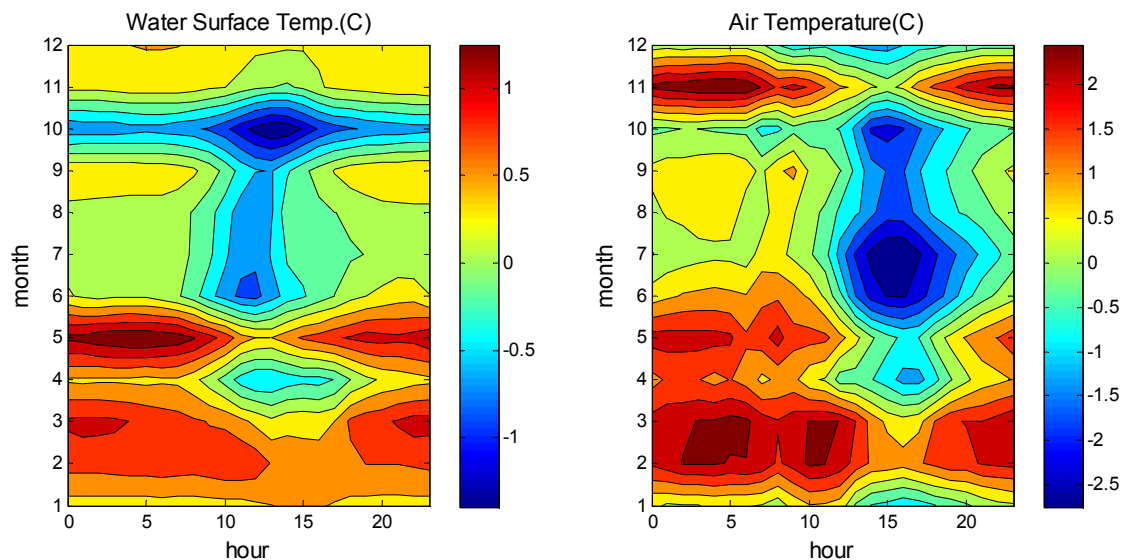


איור 5: גשם חודשי ממוצע מ-6 תחנות מסביב לכנרת, החל מחודש אוקטובר 2011 ועד דצמבר 2012 (עמודות), בהשוואה לגשם חודשי ממוצע על הכנרת קו (רציף).

החודשים דצמבר ינואר ופברואר הם בדרך כלל הקרים ביותר בשנה, וחודש אוגוסט הוא החם ביותר. בולטת התנודה היומית של טמפרטורת האוויר (איור 6 ימין), לעומת התנודה היומית המוגבלת של טמפרטורת פני המים (איור 6 שמאל). טמפרטורת האוויר הממוצעת של החודשים פברואר-מרץ ומאי 2013 הייתה בד"כ גבוהה בכ- 0.5 עד 1.5 מעלות מהטמפרטורה החודשית הממוצעת הרב שנתית (איור 7 ימין). ממצאים דומים ניתן לראות בטמפרטורת פני המים (איור 7 שמאל). יש לייחס זאת לכך שחודשים אלה היו שחונים מאד יחסית. הטמפרטורות בחודשי הקיץ יוני – ספטמבר 2013 היו ממוצעים למדי. חודש אוקטובר 2013 היה קר יחסית בכ- 1 מעלה יחסית לעבר.



איור 6: סיכום שנתי של ממוצעים שעתיים וחודשיים של טמפרטורת האוויר (C) ברום של כ- 3 מ' מעל פני האגם (ימין), וטמפרטורת פני המים (שמאל).

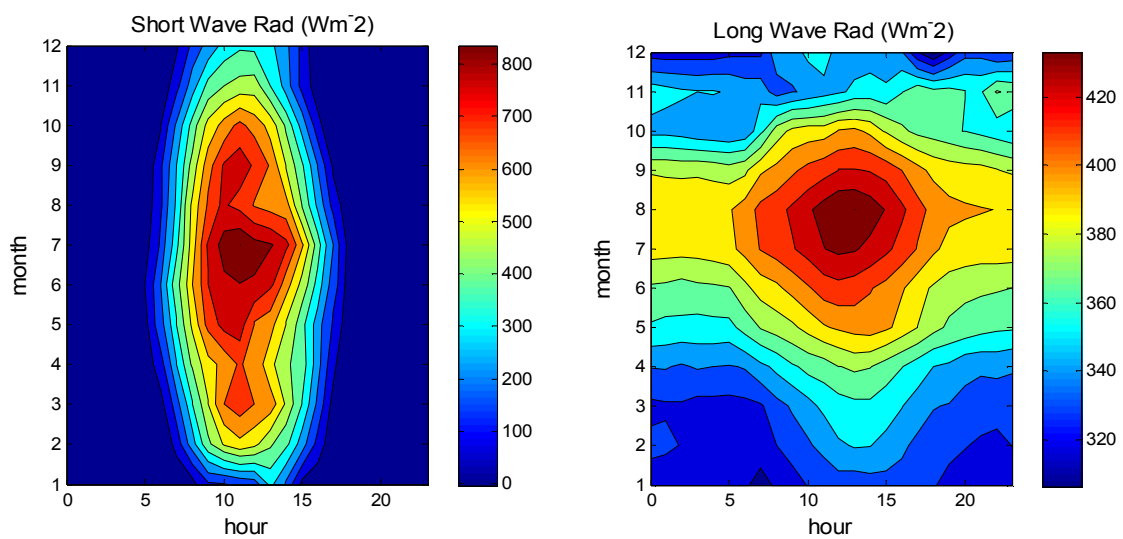


איור 7: ההפרש בין ממוצע שנתי לחודש משנת 2013 לעומת ממוצע דומה עבור השנים 1996-2012 מימין; טמפ. אויר (C); משמאל: טמפ. פני מים (C).

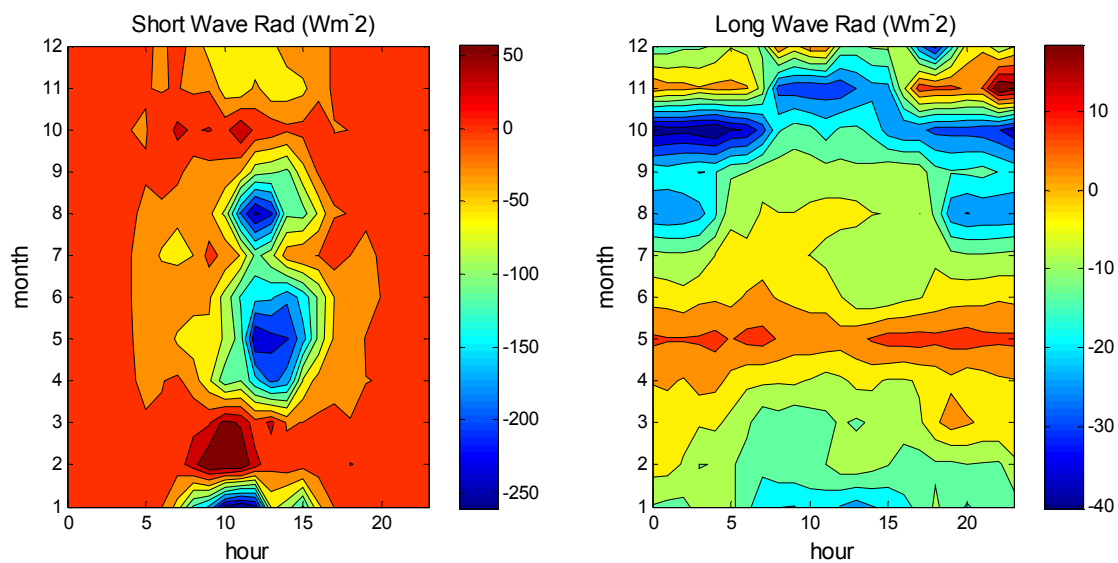
קרינה קצרה וארוכת גל

מדידות קרינה קצרת גל (305-2800 nm) מראות באופן קבוע על ערך מקסימאלי יומי בשעות הצהריים (לפי שעון חורף). בסקלה העונתית הקרינה המקסימאלית חלה בחודשים יוני ויולי. נתוני הקרינה ארוכת הגל מראים שיא בקרינה בצהריים של חודש אוגוסט (איור 8 ו-9). תחום הקרינה קצרת הגל הוא בין 0 (לילה) לכ- 850 Wm^{-2} בשעות היום. תחום הקרינה ארוכת הגל בין 320 ל- 450 Wm^{-2} בקירוב.

ההפרש של מדידות הקרינה קצרת הגל הממוצעת במהלך השנה מוצג באיור 9, ומעיד בדרך כלל על סטיות אקראיות מן הממוצע הרב שנתי. יש אפשרות (שלא נבדקה) כי מקורן של הסטיות השליליות של ממוצע הקרינה קצרת הגל בשעות הצהריים הוא בהבדלים בין מדידות בתחנה A השנה, למדידות שנעשו בתחנות טבחה וגינסור עד שנת 2011. הסטיות החיוביות (מאי 2013) והשליליות (אוקטובר 2013) בקרינה ארוכת גל הן עדות נוספת לטמפרטורה הגבוהה והנמוכה יחסית, בהתאמה, ששררה בחודשים אלה.



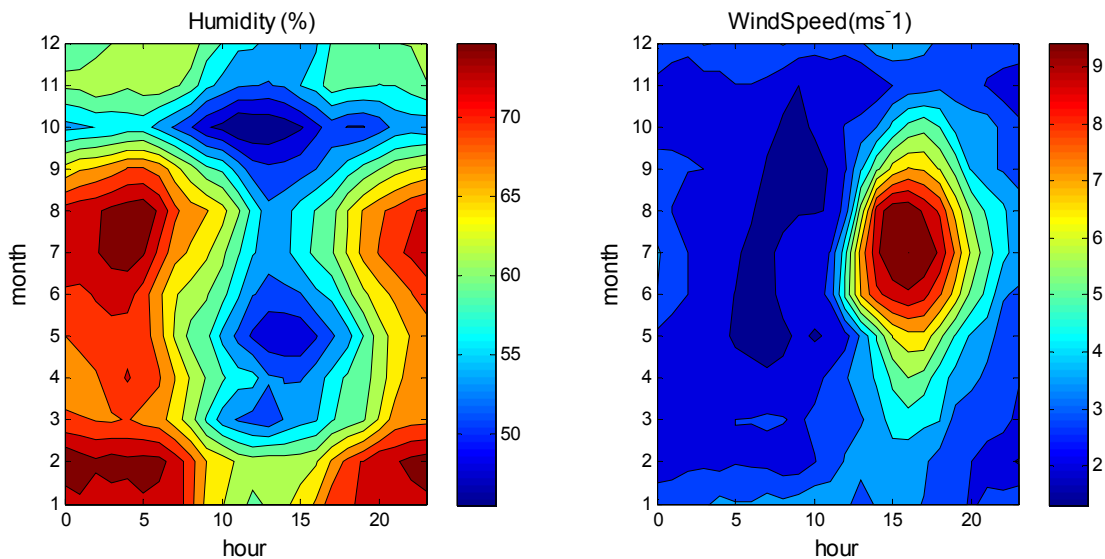
איור 8: סיכום שנתי של ממוצעים שעתיים וחודשיים של קרינה ארוכת גל (Wm^{-2} , ימין) וקצרת גל (שמאל).



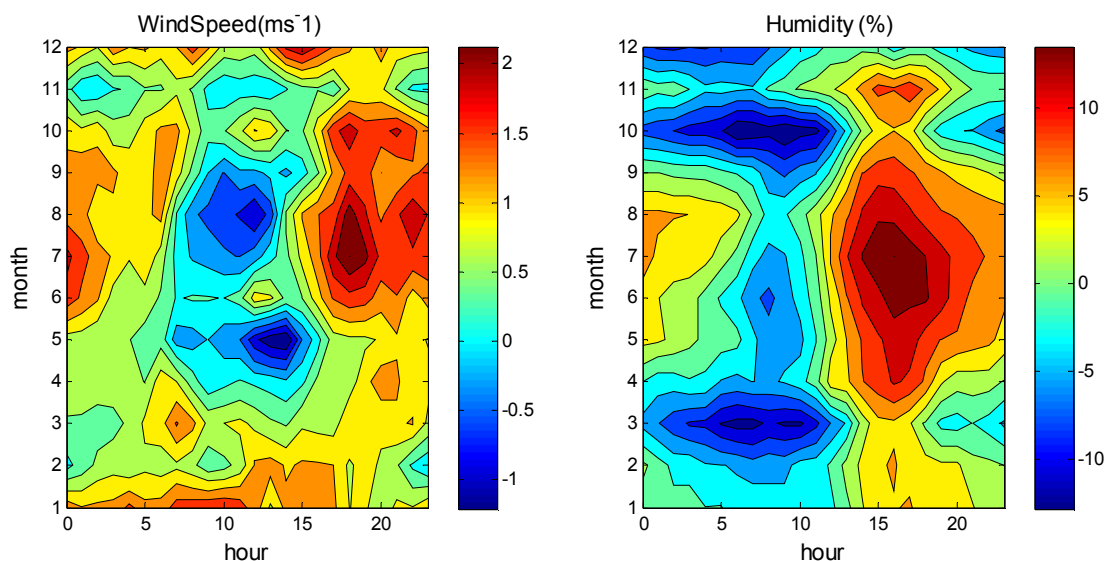
איור 9: ההפרש בין ממוצע שעותי לחודש משנת 2012 לעומת ממוצע דומה עבור השנים 1996-2011. מימין: קרינה ארוכת גל (Wm^{-2}), משמאל: קרינה קצרת גל (Wm^{-2}).

לחות יחסית ומהירות רוח

סיכום שנתי של ממוצעי מהירות הרוח והלחות היחסית (איור 10 ו-11) מדגים את רוחות אחר-הצהריים הקיציות האופייניות לאגם. השעות 15:00 – 16:00 הן שעות שיא הרוח לאורך כל השנה (שעון חורף, שעת השיא בפועל היא 14:00 לפי שעון קיץ), והחודשים יוני-יולי-אוגוסט הם החודשים בהם הרוחות הן החזקות ביותר. חודשי החורף והשעות 00:00 עד 10:00 הם בהכללה הזמנים שבהם ממוצע שעותי של מהירות הרוח הוא הנמוך ביותר ועומד על פחות מ-2 מ' לשנייה. הלחות היחסית (%) מעל פני האגם מצויה בד"כ בהתאמה שלילית עם מהירות הרוח (מהירות גדלה – לחות פוחתת). נתוני מהירות הרוח של 2013 נלקחו מנתוני תחנה A ואלה דומים לנתוני הרוח בתחנת טבחה שמרכיבים את הנתונים ההיסטוריים. לפיכך במהלך שנת 2013 קיימות בד"כ רק סטיות אקראיות של מהירות הרוח בכל שעות היממה ממהירות הרוח לפי הנתונים ההיסטוריים (1996-2012). הלחות היחסית על פני המים במרכז האגם (תחנה A) גבוהה ככל הנראה מהלחות היחסית בתחנת טבחה (כ-700 מ' מהחוף) ומתחנת גינוסר (על החוף) ולכן קיים הפרש של כ-10% בין הממוצע של 2013 לבין הנתונים ההיסטוריים.



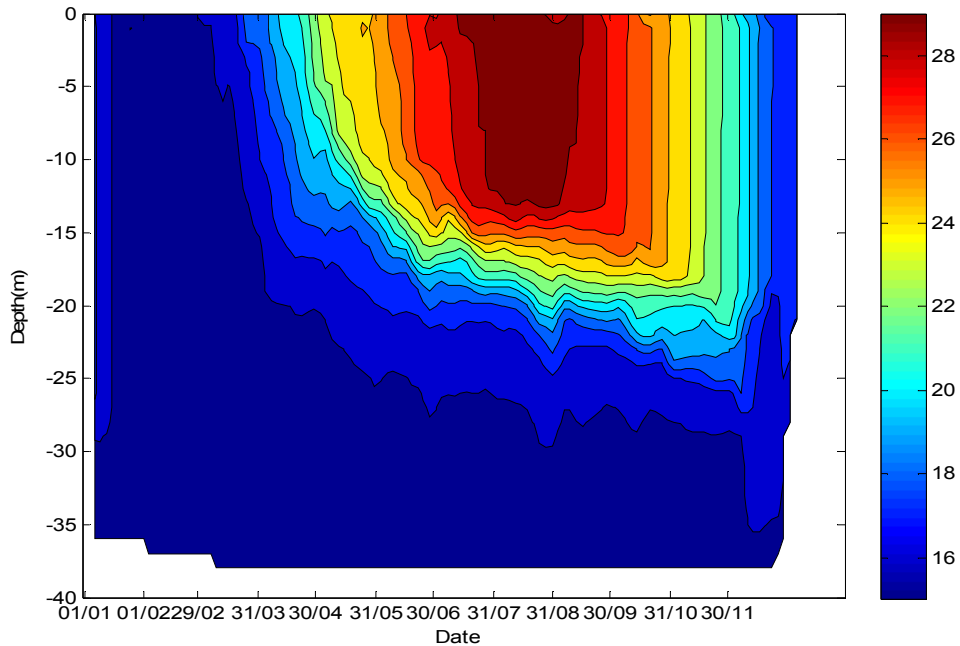
איור 10: סיכום שנתי של ממוצעים שעותיים וחודשיים של לחות יחסית (שמאל) ומהירות רוח (ימין).



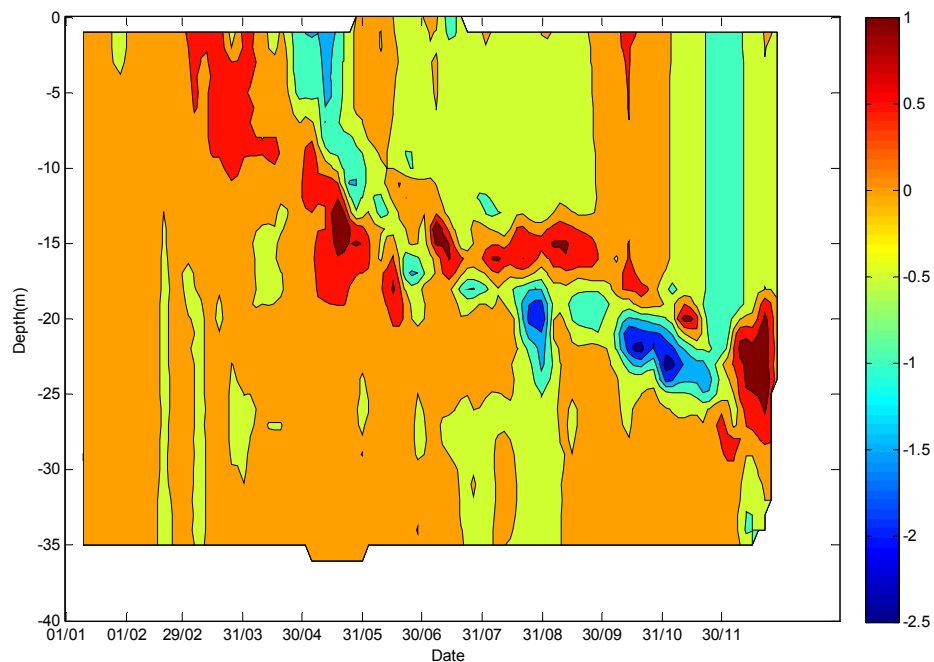
איור 11: ההפרש בין ממוצע שעותי לחודש משנת 2012 (גינסר) לעומת ממוצע דומה עבור השנים 1996-2011 (טבחה ותחנה A). מימין: מהירות רוח (ms^{-1}), משמאל: לחות יחסית (%).

סיכום שנתי של טמפרטורת האגם

פרופיל טמפרטורת גוף המים נמדד על בסיס שבועי באמצעות הרוזטה במספר תחנות דיגום. בסיכום הנוכחי נתייחס רק למדידות שנעשו בתחנה A. שנת 2013 התאפיינה לכאורה בשכוב תרמי סטנדרטי (איור 12), ובהשוואה לשנים קודמות (2000-2012, איור 13) ניכר כי: 1. טמפרטורת המים באפילימניון היתה בשנה זו מעט נמוכה מהמוצע ב- 12 השנים האחרונות; 2. השיכוב היה בקירוב בעומק דומה למוצע השנים האחרונות. בדיקת השכוב התרמי במהלך 2013 העלתה כי הוא נמשך כ- 273 יום, בהשוואה למוצע רב שנתי העומד על כ- 290 ± 30 יום בממוצע רב שנתי של 15 השנים האחרונות.



איור 12: טמפרטורת האגם לשנת 2013.



איור 13: ההפרש בין טמפרטורת האגם לשנת 2013 לטמפרטורה הממוצעת בשנים 2000-2012. טמפרטורת המים באפילימניון היתה בשנה זו מעט נמוכה (0.5 מעלות) מהממוצע ב- 12 השנים האחרונות; והשכוב נראה דומה למדי למוצע הרב שנתי.

1.4 ממצאי הניטור הכימי

עמי נשרי, ירון בארי-שליון ומיקי שליכטר

כמו בשנים קודמות מוצגים נתוני הניטור הכימי משכבת ה-אפילימניון וה-היפולימניון בתחנה A בשנת 2013 בהשוואה לממוצעים רב שנתיים (איור 14) השנה בחרנו להשוות את נתוני 2013 לממוצע רב שנתי של עשר השנים האחרונות (2002-2012). להלן סיכום הממצאים לגבי שנת 2013:

אלקליניות: בשכבת האפילימניון אלקליניות גבוהה מהממוצע הרב שנתי בחודשים מרץ ואפריל ומעט נמוכה ממנו בחודש מאי. בשאר השנה הערכים קרובים מאד לממוצע הרב שנתי. בשכבת ההיפולימניון חריגות מהממוצע הרב שנתי נראות בחודשים ינואר (נמוך) אוגוסט (גבוה) ודצמבר (גבוה).

סידן: ערכי הסידן באפילימניון תואמים את ערכי הממוצע הרב שנתי ברוב תקופת השיכוב (מאי נובמבר) אך חורגים ממנו כלפי מטה הן בינואר והן בדצמבר וכלפי מעלה בחודשים מרץ-אפריל. בהיפולימניון הערכים דומים לממוצע הרב שנתי מפברואר עד יוני אך גבוהים ממנו לאחר מכן עד סוף השנה (למעט חריגה חדה כלפי מטה באוגוסט).

כלוריד: רמה נמוכה בשתי השכבות ביחס לממוצע הרב שנתי. בשכבת האפילימניון ירידה בכמות הכלוריד מינואר עד מאי מייצגת את ההשפעה הגדולה יותר של זרימות הירדן לעומת אידוי וכניסה של כלוריד מהמעיינות המלוחים לשכבה זו. בשכבת ההיפולימניון נשמרת רמה קבועה של כלוריד לאורך כל תקופת השיכוב.

חמצן: ערכי החמצן בשנה זו תואמים באופן כללי את הערכים הרב שנתיים בשתי השכבות. עם זאת עליית החמצן באפילימניון בחורף ובאביב מלווה בערכים נמוכים מהממוצע הרב שנתי עד מרץ, כנראה כתוצאה של פעילות פוטוסינטטית נמוכה מהממוצע הרב שנתי (ראה גם חודשים ינואר-פברואר בדיאגרמת כלורופיל, איור 19 העליה בפעילות פוטוסינטטית במרץ-אפריל מתבטאת בעליה בערכי חמצן משמעותית רק באפריל. קיץ 2013 היה מאופיין בפריחה משמעותית של אצות ירוקיות בד בבד עם רוחות מערביות. פריחת האצות מתבטאת בעליה גדולה בריכוזי כלורופיל ויצור ראשוני. אצות ירוקיות נוטות להתמחזר בשכבת המים העליונה (אכילות ע"י זואופלנקטון). מצב זה מסביר את העובדה כי ריכוזי הכלורופיל גבוהים אינם מלווים בריכוזי חמצן גבוהים מהממוצע הרב שנתי. גם בסוף השנה (דצמבר) יש ירידה של ערכי חמצן אל מתחת לערכי הממוצע הרב שנתי באפילימניון ובאופן דומה עליה משמעותית בשכבה התחתונה בחודש זה.

pH: ערכי ההגבה בשתי השכבות גבוהים במידה ניכרת רב השנה לעומת הערכים הרב שנתיים. הערכים הגבוהים מאד באפילימניון בחודשים אפריל עד אוגוסט עשויים לנבוע מבעיות אנליטיות, אולם נושא זה דורש בדיקה. בהנחה כי הערכים נכונים, הרי שישנה חוסר התאמה בין פרופיל החמצן לפרופיל ה-pH בחודשים אלו בעיקר בהתחשב בכך שהאצות הדומיננטיות הן ירוקיות קטנות המתמחזרות בגוף העליון של המים. כמו כן הערכים הגבוהים מיוני עד אוגוסט אינם תואמים את ערכי היצרנות הראשונית הגבוהה בחודשים אלו כפי שנראים בפרופילי הכלורופיל ופרודוקטיביות (פרק 1.6).

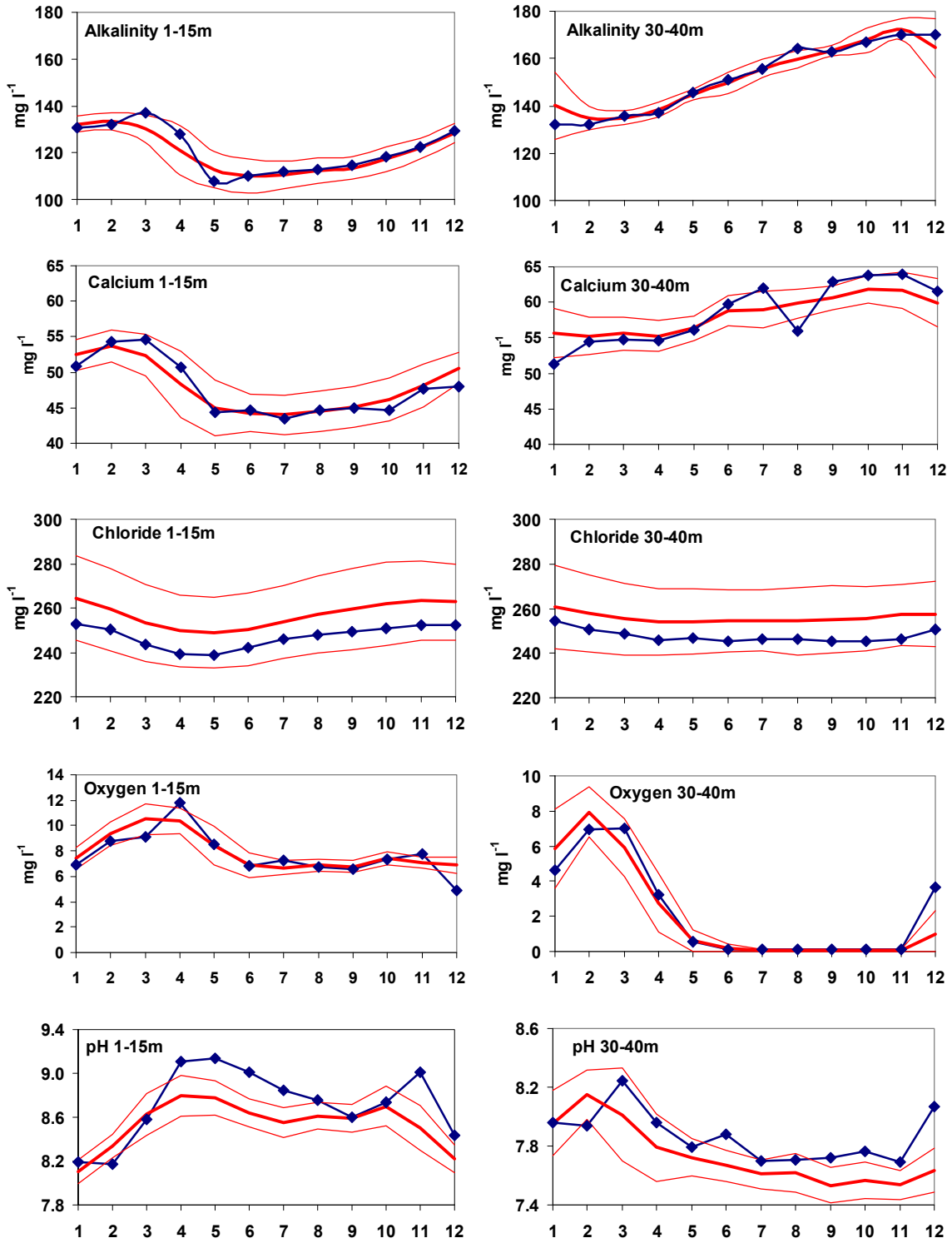
זרחן: ערכי זרחן כללי מראים התאמה יחסית טובה לממוצע הרב שנתי בשתי השכבות, רב השנה. חריגות נראות בשכבת ההיפולימניון בחודשים נובמבר-דצמבר בהם הערכים נמוכים משמעותית מהממוצע הרב שנתי. כמו כן ברב חודשי השיכוב ערכי הזרחן הכללי בשכבת האפילימניון נמוכים במעט מהממוצע הרב שנתי. לעומת זרחן כללי, זרחן מומס כללי מראה התאמה טובה לממוצע הרב שנתי בשכבת האפילימניון בחודשי השיכוב, אך ערכים גבוהים משמעותית מהממוצע הרב שנתי נראים בחודשים ינואר עד מרץ. בשכבת ההיפולימניון ערכי הזרחן המומס הכללי נמוכים משמעותית מהממוצע הרב שנתי בחודשים נובמבר-דצמבר. זרחן מומס מגיב מראה התנהגות דומה לזרחן מומס כללי, והוא כנראה המרכיב העיקרי

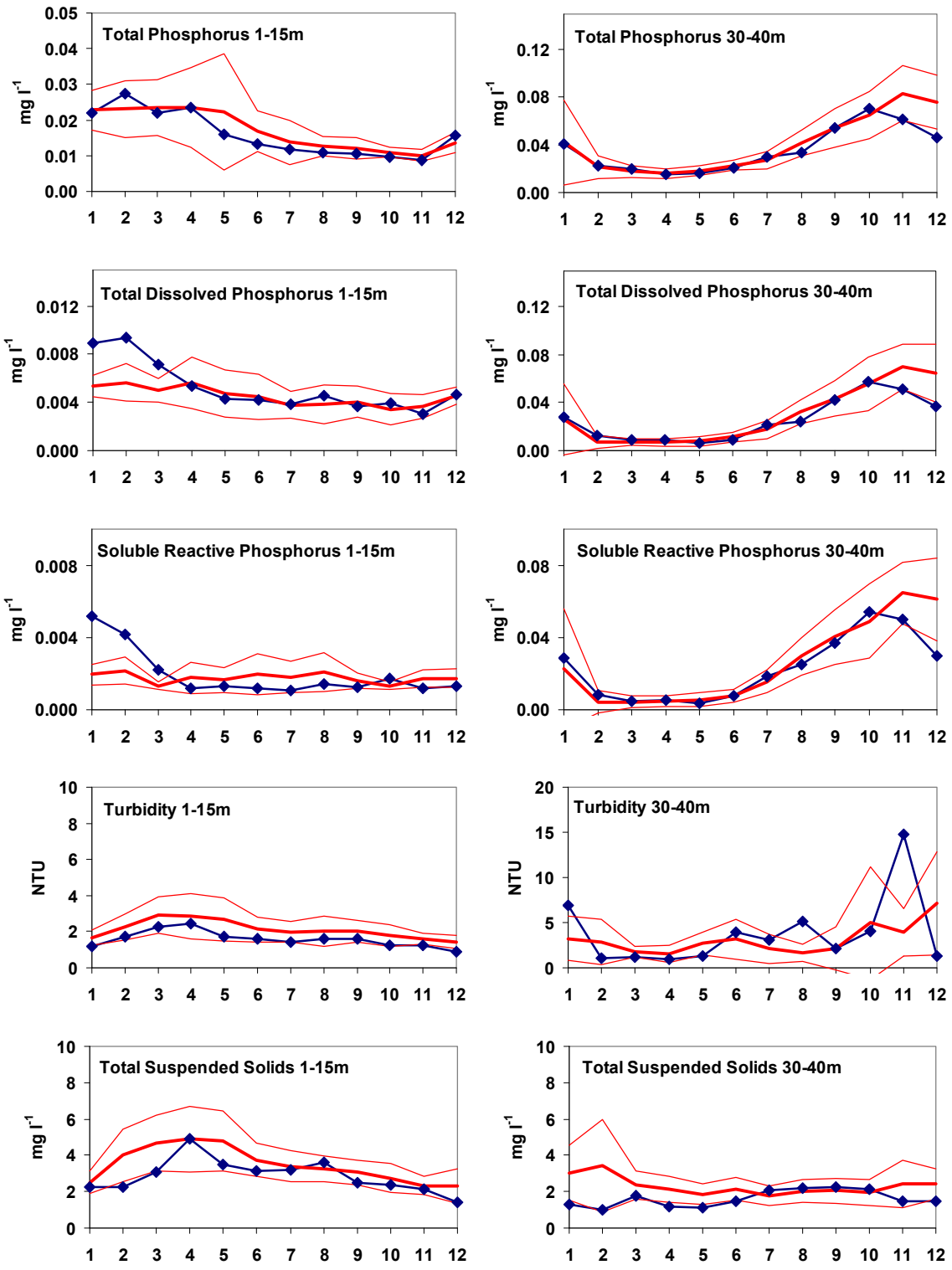
בזרחה המומס הכללי. בחודשי השיכוב רמת הזרחן המומס המגיב קבועה ונמוכה מהמוצע הרב שנתי בדומה לזרחן הכללי. הירידה לערכים נמוכים מהמוצע הרב שנתי עבור זרחן מומס מגיב עשויים להעיד כי יש לחץ על מאגר הזרחן ע"י פעילות ביולוגית ראשונית. בחודשים אלו העליה בכלורופיל (מרץ עד אפריל) ואחר כך ירידה, אך לערכים הגבוהים מהמוצע הרב שנתי מעידה על פעילות ביולוגית גבוהה אשר לוחצת על מאגר הזרחן הזמין במים העליונים. ההשוואה של ערכי 2013 לפרופילי זרחן מומס כללי וזרחן מומס מגיב רב-שנתיים של עשרות השנים האחרונות (1974-2012) אינה משנה את התמונה.

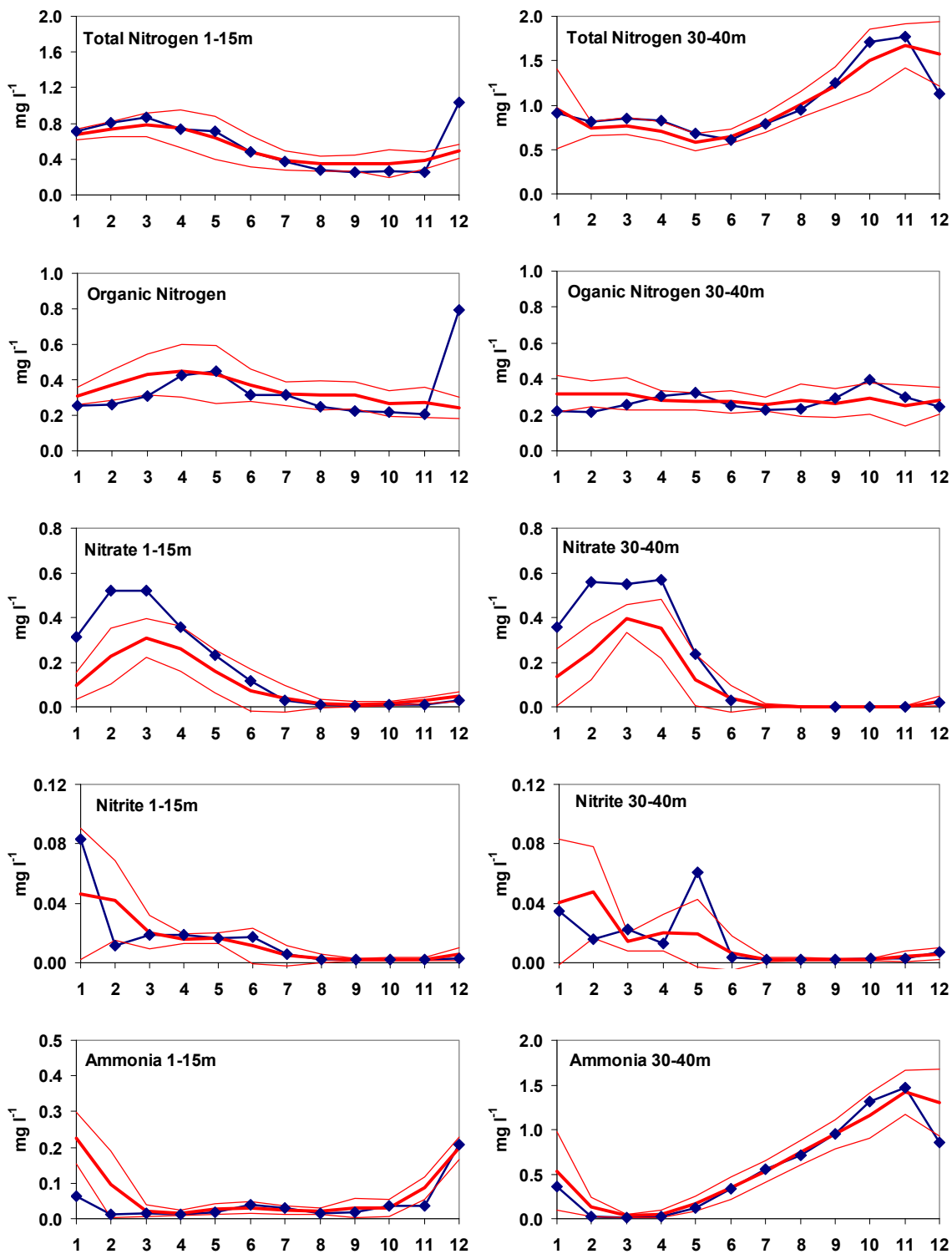
חנקן: ערכי חנקן כללי בשתי השכבות מראים התאמה למוצע הרב שנתי. סטייה ניכרת מעל הממוצע הרב שנתי בדצמבר 2013 נובעת מרמות חריגות של חנקן כללי (וכן חנקן אורגני) בשבוע של ה-13 לדצמבר בתחנה A בעומקים 1-10 מטרים (5.5-1.5 מיקרוגרם/לליטר), עקב מערכת שטפונית יחידה לחודש זה וחזקה במיוחד, אך לא נמצאה התאמה לרמת עכירות גבוהה בתאריך זה. בשאר החודש נמדדו רמות נמוכות בהרבה וקרובות למוצע הרב שנתי של שני פרמטרים אלו.

ערכי חנקן אורגני בשכבת האפילימניון היו נמוכים מהמוצע הרב שנתי רב השנה ורק בחודשים אפריל-מאי וביולי הם קרובים למוצע הרב שנתי. בחודשים ינואר עד מרץ ישנה התאמה עם פעילות יצרנית ראשונית נמוכה יותר מהמוצע הרב שנתי (פרק 1.6). עם זאת רמה נמוכה של חנקן אורגני ברב חודשי השיכוב מנוגדת לרמות כלורופיל ולפעילות יצרנית גבוהות מהמוצע בחודשים אלו.

פרופיל הניטראט מראה ריכוזים גבוהים בהרבה מעל הממוצע הרב שנתי בחודשים ינואר עד מרץ בשתי השכבות וירידה חריפה עד ערכי הממוצע הרב שנתי ביולי באפילימניון וביוני בהיפולימניון. הריכוזים הגבוהים בחורף ותחילת האביב מוסברים בשטפים הגבוהים של ניטראט בירדן מדצמבר 2012 ועד פברואר 2013 אשר מסתכמים בכ-1000 טון, כ-2/3 מהשטף ההידרולוגי השנתי (אוקטובר 2012 עד ספטמבר 2013). הירידה החריפה בשתי השכבות עד יוני/יולי קשה להסבר שכן הפעילות היצרנית הראשונית לפחות עד יוני אינה גבוהה מהמוצע הרב שנתי.







איור 14: ממוצעים חודשיים של ריכוזי הפרמטרים השונים בכנרת בשנת 2013 (קו כחול) בהשוואה לממוצע הרב שנתי של עשר השנים האחרונות (קו אדום עבה) \pm סטיית תקן אחת (קוים אדומים דקים). הנתונים מוצגים בנפרד עבור שכבת המים העליונה (1-15 מ' עומק) והתחתונה (30-40 מ' עומק).

פרופיל הניטריט מראה ברב השנה התאמה לפרופיל הרב שנתי. ערכים גבוהים משמעותית של ניטריט נראים ב-אפילימניון בחודש ינואר ומלווים בירידה חדה אל מתחת לממוצע הרב שנתי בפברואר ואחר כך התייצבות על הערך הממוצע הרב שנתי. עליה בניטריט בתחילת החורף מיוחסת בד"כ לתהליך

הניטרפיקציה של אמוניום לאחר שבירת השיכוב. העליה החרפה של ערכי ניטריט בינואר אל מעל הממוצע הרב שנתי קורלטיבית לירידה משמעותית של אמוניום מתחת לממוצע הרב שנתי בשתי השכבות בינואר-פברואר. יש לציין כי שיא הניטריט המלווה בנפילה החדה באמוניום קורלטיבי גם לשיא בספיקות הירדן אשר שונה (מוקדם יותר) מהממוצע הרב שנתי. לשם השוואה בשנת 2012 נצפתה עליה חריגה של ערכי ניטריט בפברואר אל ערכים הדומים לערכי ינואר 2013 (כ- 0.08 מג' לליטר), ובשנה זו שיאי הספיקה היו בפברואר ומרץ. אנו מציעים את האפשרות (שכבר הועלתה בזמנו בע"פ ע"י בן ציון כברי) שהאינוקולום לאספקת חיידקי השלב הראשון בניטרפיקציה מקורו בירדן שם (בעמק החולה) מתחוללת ניטרפיקציה מהירה מאוד של אמוניום שמשתחרר מהקרקות. יתכן שכניסה מהירה של מי שטפונות גורמת באגם לחוסר סינכרון בין שלבי הניטרפיקציה והאצה מועדפת של $\text{NH}_4 \rightarrow \text{NO}_2$.

עכירות ומוצקים מרחפים: ערכי עכירות וסך המוצקים המרחפים באפילימניון נמוכים רב השנה מהממוצע הרב שנתי. העליה בחודשים ינואר עד אפריל בסך המוצקים המרחפים וכן הירידה עד יוני תואמת עליה ואח"כ ירידה בפעילות הביולוגית הראשונית בחודשים אלו (פרופילי כלורופיל ופרודוקטיביות, פרק 1.6). עם זאת הערכים הנמוכים של סך המוצקים המרחפים מתחת לממוצע הרב שנתי מיוני ועד נובמבר אינם מתאימים לעליה בפעילות הביולוגית, ובעיקר ברמות הגבוהות של כלורופיל בחודשים אלו. הסבר אפשרי לניגוד זה בעיקר בחודשים ספטמבר עד נובמבר הוא כי הפעילות הביולוגית הראשונית כוללת מעברים (שינוי אוכלוסיות, או שינוי תכולה של כלורופיל בתאי אותה אוכלוסיה) אשר אינם מתבטאים בעליית המסה הביולוגית וכך אינם מתבטאים בסך המוצקים המרחפים בשכבה זו.

בשכבת ההיפולימניון סך המוצקים המרחפים עד יולי נמוך מהממוצע הרב שנתי כאשר דפוס זה משקף את מה שקורה בחלק העליון. עליה ממאי ועד יולי לערכים גבוהים מעט מהממוצע הרב שנתי מולי והתקבעות על ערכים אלו עד אוקטובר כנראה מייצגת שקיעת חומר מהשכבת ה-אפילימניון, זאת בניגוד לתצפית כי בחודשים אלו שכבת ה-אפילימניון מאופיינת ברמות נמוכות.

נופרית: ערכי הסולפאט בשתי השכבות גבוהים מעט מהממוצע הרב שנתי עד הקיץ (יולי-אוגוסט). נתוני סולפאט חסרים מחודשים יוני יולי עבור ההיפולימניון ויולי עבור האפילימניון.

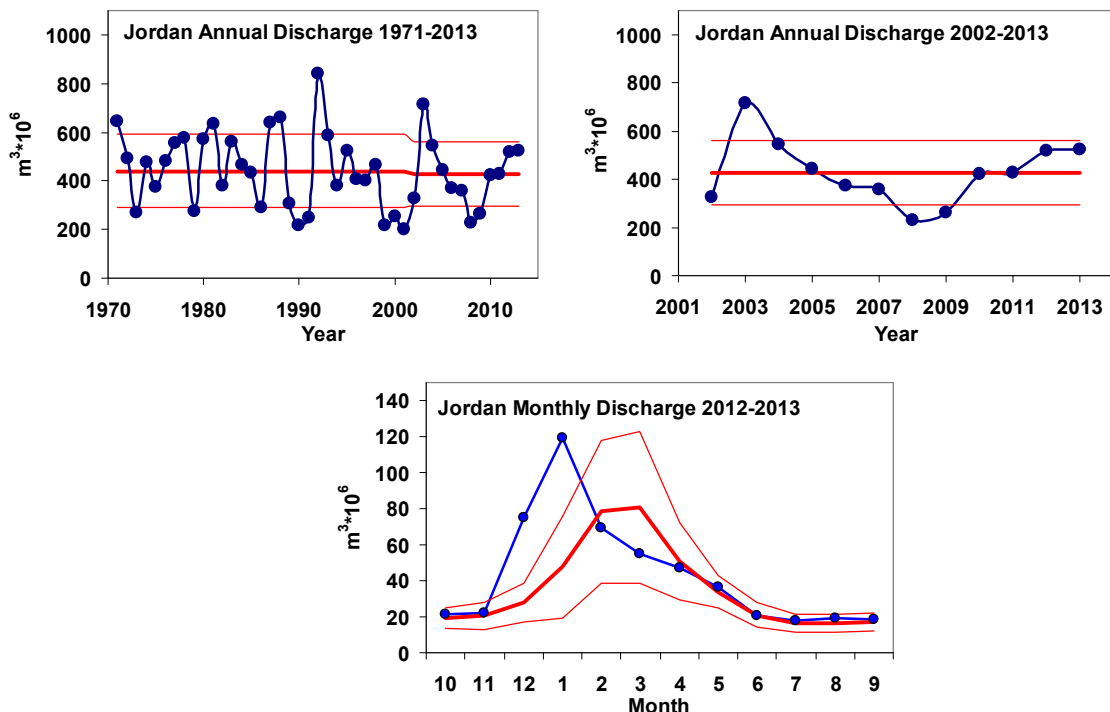
באפילימניון בספטמבר עד דצמבר רמת הסולפאט יורדת ומתייצבת לערכי הממוצע. ירידה זו מנוגדת לטרנד המצופה ובו התגברות האידוי, ירידה בספיקת הירדן וכניסת סולפאט ל-אפילימניון בלבד אמורים לגרום לעליה בסולפאט בשכבה זו. בהיפולימניון ישנה ירידה עד ספטמבר אל ערכים משמעותית נמוכים מהממוצע הרב שנתי, אח"כ עליה לערכי הממוצע הרב שנתי באוקטובר-נובמבר ושוב ירידה בדצמבר. הירידה בסולפאט ב-היפולימניון ממאי עד ספטמבר שוות ערך לכ- $230 \mu\text{mole/l}$. לעומת זאת סולפיד עולה בחודשים אלו רק בכ- $150 \mu\text{mole/l}$. שאלת אמינות תוצאות הסולפאט עולה בהתחשב שאנליזה זו התבצעה השנה במעבדה אחרת משאר האנליזות הכימיות כולל אנליזות סולפיד.

סיליקה: רמת ערכי הסיליקה בשתי השכבות גבוהה עד גבוהה מאד ביחס לממוצע הרב שנתי לאורך כל השנה. בהנחה סבירה כי שטפי הסיליקה בנחלים לא היו שונים השנה משמעותית משנים קודמות הרי שתופעה זו באפילימניון מעידה על סילוק מועט מאד של סיליקה מהמים ע"י יצרנים ראשוניים ועל כן כנראה על פוריות נמוכה של אצות צורניות. הרמות בהיפולימניון אמנם גבוהות מהממוצע הרב שנתי אך מראות מגמה דומה של עליה מתונה מינואר ועד דצמבר.

הספיקות בירדן:

סך ספיקת הירדן בשנה ההידרולוגית 2012-2013 גבוהה מהממוצע הרב שנתי הן בהתייחסות לעשר השנים האחרונות והן בהתייחסות לכל סדרת הנתונים (מ-1971) (איור 15 למעלה). דפוס הספיקות החודשי שונה מהממוצע הרב שנתי (10 שנים) ומראה שיא ספיקה מוקדם ומרוכז סביב חודש ינואר (איור 15 למטה) המלווה בעומסים גבוהים מהרגיל של חנקן כללי ואורגני, ניטראט, זרחן, זרחן מומס ומומס זמין, אלקליניות, סולפאט וסך מוצקים כלליים. עבור רב הפרמטרים האלו בין 50-80% מהעומס השנתי היה

מרוכז בין דצמבר 2012 לפברואר 2013. כמו כן, כתוצאה משילוב ספיקות ועומסים גבוהים בחורף 2013, העומסים השנתיים של רב פרמטרים אלו (למעט סך מוצקים מרחפים) גבוהים, לעיתים בצורה משמעותית, מהמוצע הרב שנתי.



איור 15: למעלה: ספיקות מים שנתיות של הירדן (קו כחול). ממוצעים רב שנתיים (קוים אדומים עבים) \pm סטיית תקן אחת (קוים אדומים דקים) מסומנים לשם השוואה לתקופה מ-1971 (שמאל) ו-2001 (ימין). למטה: ספיקות חודשיות של הירדן לשנה ההידרולוגית אוקטובר 2012 עד ספטמבר 2013 (קו כחול). ממוצע רב שנתי (קו אדום עבה) \pm סטיית תקן אחת (קוים אדומים דקים) מסומנים לשם השוואה.

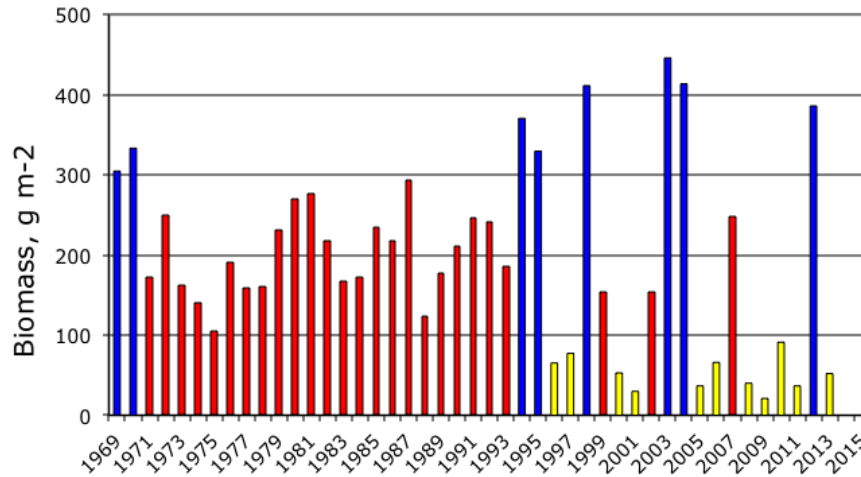
1.5 פיטופלנקטון

תמר זהרי ואלה אלסטר

הפיטופלנקטון בכנרת ב-2013: המהלך השנתי

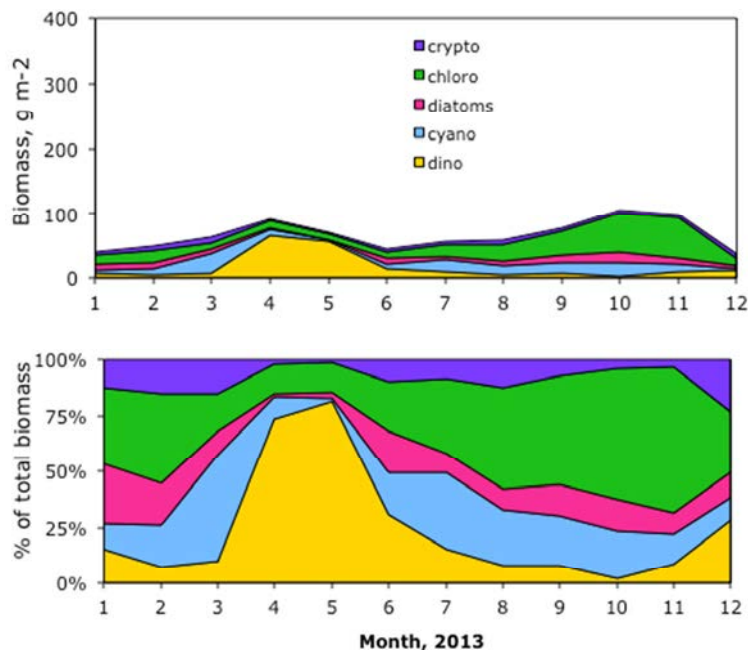
ניטור אוכלוסיות הפיטופלנקטון המוצג בדוח זה מבוסס על נתונים חלקיים, עקב חופשת לידה של ד"ר אלה אלסטר שמבצעת את הספירות המיקרוסקופיות. בוצעו ספירות על דוגמאות מכל תאריכי הדיגום, אך בחלק מהתאריכים נספרה דוגמא מעומק אחד בלבד והחישוב בוצע בהנחה שדוגמא זו מייצגת את כלל עמודת המים שמעל לתרמוקלינה. עם השלמת הספירות של כלל הדגימות שנאספו המספרים שמוצגים בדוח זה יעודכנו.

הממוצע החודשי של ביומסת הפרידיניום ב 2013 היה, בשיאו שחל באפריל, רק 52 ג' למ^2 , כלומר נמוך מערך הסף של 100 ג' למ^2 לפיו אנו מגדירים "שנת פרידיניום". לפיכך, שנת 2013 עונה להגדרה של "ללא פריחת פרידיניום" ונוספת לעשר השנים מאז 1996 בהן פרידיניום לא פרח (איור 16).



איור 16: השוואת עצמת פריחת הפרידיניום בין השנים 1969 – 2013. עצמת הפריחה מבוטאת כמוצע הביומסה החודשי בחודש בו בימסת הפרידיניום הגיעה לשיאה השנתי (ממוצע חודשי אחד לכל שנה). בהתאם לעוצמת הפריחה האביבית השנים חולקו לשלוש קטגוריות: שנים ללא פריחה (צהוב, ביומסה שלא עלתה על 100 ג' למ"ר), שנים עם פריחה ממוצעת (אדום, ביומסה בין 100-300 ג' למ"ר) ופריחה מאסיבית במיוחד (כחול, ביומסה מעל 300 ג' למ"ר). בולטת העובדה שעד אמצע שנות ה-90 כל השנים היו ממוצעות, מאז 1994 נצפו רק 3 שנים של פריחה ממוצעת, 6 שנים של פריחה מאסיבית ו-11 שנים (כולל 2013) ללא פריחה.

שנת 2013 הייתה יוצאת דופן מבחינת המהלך השנתי של ביומסה והרכב המינים של הפיטופלנקטון. ללא פריחת פרידיניום הביומסה האצתית בחורף ובאביב הייתה נמוכה בהרבה מהרגיל, עם שיא ביומסה חודשית של 91 ג' למ² באפריל. לעומת זאת בקיץ 2013 הביומסות היו גבוהות מהרגיל, עם שיא ביומסה חודשית באוקטובר (105 ג' למ²), גבוה מהשיא האביבי (איור 17 למעלה).

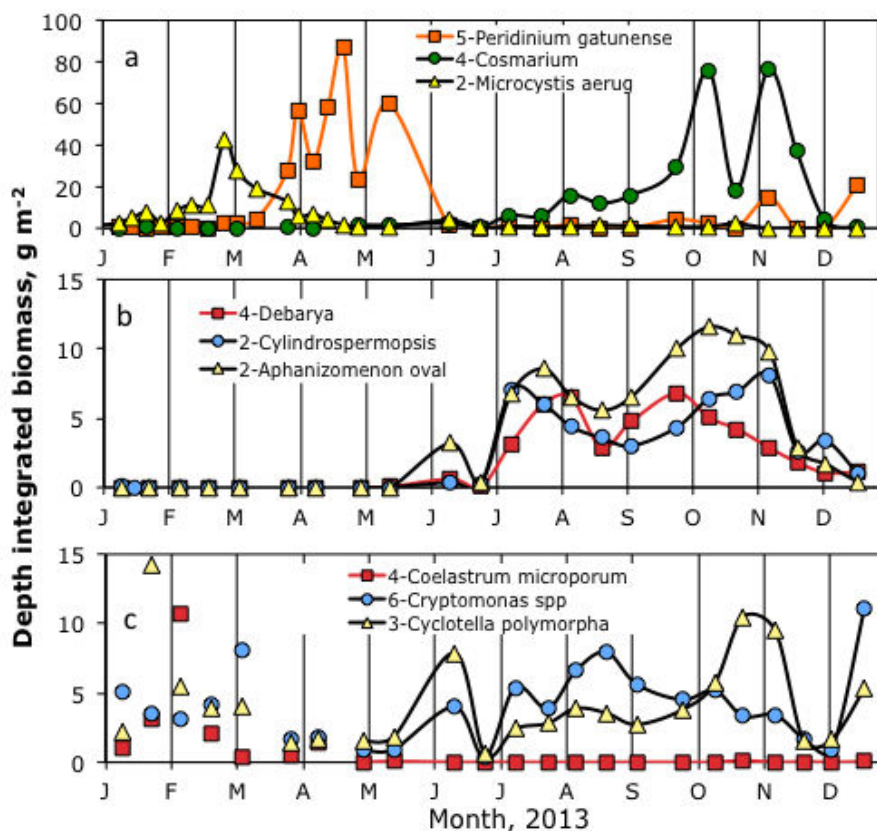


איור 17: ממוצעים חודשיים של ביומסת קבוצות הפיטופלנקטון העיקריות בכנרת (למעלה) ותרומת כל קבוצה לסך הביומסת הפיטופלנקטון (למטה) בשנת 2013.

גם ריכוזי הכלורופיל והייצור הראשוני הראו דפוס דומה, של ערכים גבוהים יותר בקיץ-סתיו מאשר בחורף-אביב (פרק 1.6). בממוצע שנתי הביומסה האצתית הייתה נמוכה במקצת מהממוצע הרב שנתי, 66 ג' למ² ב-2013 לעומת ממוצע רב שנתי של 79 ג' למ² (1969-2012). למרות הביומסות הנמוכות בחורף-אביב, ולמרות העדר פריחת פרידיניום, קבוצת הדינופלגלטים הייתה התורמת העיקרית לכלל הביומסה באביב והדגם השנתי של תרומת הקבוצות השונות נראה דומה לדגם בשנת פרידיניום (איור 17 למטה).

הרכב המינים

שלשה מינים תרמו תרומה משמעותית לסך הביומסה בשנת 2013 (איור 18a): בחורף – הכחולית מיקרוציסטיס, עם שיא של 42 ג' למ"ר ב-4 למרץ. אצה זו יצרה קרומים צפים ורעלנים מקבוצת המיקרוציסטינים, בריכוזים שבנקודות זמן מסוימות עברו את הסף המותר של 1 מ"ג לליטר (פרק 2.17). באביב – האצה הדינופלגלטית פרידיניום, עם שיא של 87 ג' למ"ר ב-28 לאפריל, אם כי השיא היה קצר יחסית לשנים אחרות והממוצע החודשי עמד על 52 ג' למ"ר. אמנם פרידיניום לא התפתח לממדי פריחה בשנה זו אך למרות זאת גם בריכוזים של כמאה תאים למ"ל היא נוטה להיות המין הדומיננטי מבחינת סך הביומסה בגלל גודל התא הבודד הגדול שלה. בסתיו, באופן בלתי שגרתי, פרח האצה הירוקית *Cosmarium sp.*, עם שיא של 76 ג' למ"ר ב-14 לאוקטובר ושוב ב-11 לנובמבר. זו פעם ראשונה שאנו צופים בפריחה מאסיבית של אצה זו, שעדיין לא הוגדרה לרמת המין ומעט מאד ידוע על הביולוגיה שלה. במקביל לפריחת הקוסמריום בסתו, נצפו גם ריכוזים גבוהים של אצות חוטיות, ובפרט הירוקית החוטית המוגושה (שבעבר נקראה *Debarya* ומופיעה בשם זה באיור 18b), והכחוליות מקבעות החנקן אפניזומנון וצילינדרוספרמופסיס. מינים נוספים שתרמו לביומסות הגבוהות בחצי השני של השנה היו הצורנית *Cyclotella polymorpha*, הירוקית *Coelastrum microporum*, והקריפטופיט *Cryptomonas*.

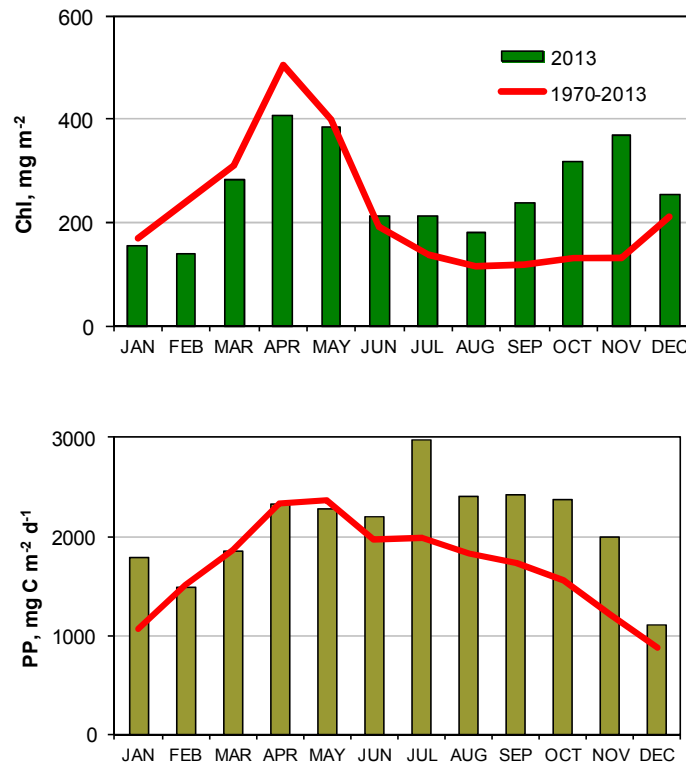


איור 18: המהלך השנתי (נתונים שבועיים או דו-שבועיים) של: (a) *Peridinium*, *Cosmarium*, *Microcystis*; (b) מינים חוטיים עם תרומה משמעותית לסך הביומסה; (c) מינים נוספים עם תרומה משמעותית לסך הביומסה.

1.6 כלורופיל וייצור ראשוני

יוסף יעקבי וסמיון קגנובסקי

תכולת הכלורופיל הממוצעת וערך הייצור הראשוני בשנה החולפת היו גבוהים באורח ניכר מהממוצעים הרב-שנתיים של שני מדדים אלה וההבדל נבע מהערכים הגבוהים שנמדדו במחצית השנה השנייה, מיולי ועד דצמבר (טבלה 3). ממוצע צפיפות הכלורופיל בפרק הזמן שמינואר ועד יוני היה אף נמוך מהממוצע הרב-שנתי ובעיקר בשל הערכים הנמוכים יחסית בפברואר ואפריל (איור 19 למעלה). בשנה זו לא הייתה הופעה מסיבית של פרידיניום, אך הכחולית מיקרוציסטיס יצרה אוכלוסיות צפופות ביותר החל בסוף ינואר. אולם, גם אוכלוסיות צפופות של מין זה אינן יוצרות בכנרת ביומסה המשתווה לאלה של פרידיניום. כנגד זאת ממוצע צפיפות הכלורופיל של מחצית השנה שמילוי ועד דצמבר היה כמעט כפול מזה של הממוצע הרב-שנתי ובחדשים ספטמבר ואוקטובר ונובמבר הגיע לערכים שטרם נמדדו בכנרת – פי 2, 2.4 ו-2.8 מהממוצע הרב-שנתי, בהתאמה. ממוצע הייצור הראשוני של מחצית השנה הראשונה, מינואר ועד יוני, דמה לממוצע הרב-שנתי (טבלה 3) וכך במרבית החדשים, אבל עם יוצא מן-הכלל בינואר (איור 19 למטה), בו הנתון של 2013 היה גבוה מהממוצע הרב-שנתי באורח ניכר. כנגד זאת, כל ממוצעי החודשים מיולי ועד דצמבר היו גבוהים בעקביות מהממוצע הרב-שנתי.



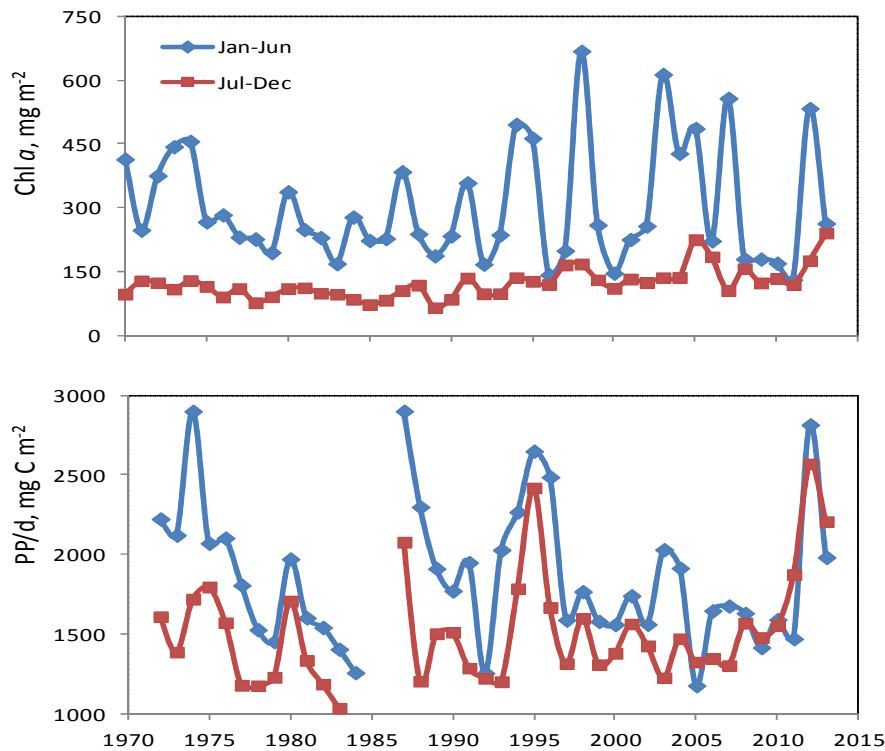
איור 19: תכולת כלורופיל (למעלה) וייצור ראשוני (למטה) בעמודת המים העליונה של 0 – 15 מ', כפי שנמדדו בכנרת בתחנה A. עמודות – ממוצעים חודשיים ב-2013, קו – ממוצעים חודשיים רב-שנתיים.

צפיפות כלורופיל במחצית השנה הראשונה גבוהה מזו של השנייה בכל השנים בהן נערכות מדידות שיטתיות בכנרת, אם כי בשנים האחרונות מוצאים יותר מקרים של פער קטן ואף קטן מאד (איור 2 למעלה). הפער בין הייצור הראשוני של ינואר-יוני לבין זה של יולי-דצמבר היה לאורך שנים קטן מההפרש של צפיפות הכלורופיל, אבל עד שנת 2005 הערך במחצית השנה הראשונה היה בעקביות גבוה יותר מזה של המחצית השנייה. אולם מאז 2005 יש שנים בהן הממוצע של הייצור ביולי-דצמבר גבוה מזה של הממוצע של ינואר-דצמבר, כפי שנמדד ב-2013 (איור 20 למטה) וצריך לציין שהפער "החריג" של השנה

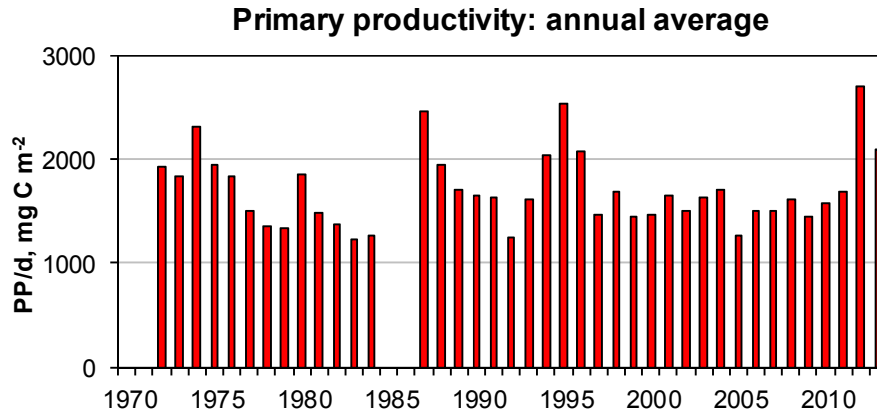
האחרונה אינו הגבוה ביותר בבסיס הנתונים שלנו. למרות כל שהשינויים שנצפו, הממוצעים הכלל שנתיים של מדדי הפיטופלנקטון אינם חריגים למה שנמדד החל בשנות השבעים של המאה הקודמת ובמיוחד כל האמור ביחס לערכי הייצור הראשוני (איור 21).

טבלה 3: ממוצעים (\pm סטיית תקן) שנתיים וחצי-שנתיים של כלורופיל וייצור ראשוני בכנרת: השוואה של 2013 עם הנתונים הרב-שנתיים.

	ייצור ראשוני, מג' פחמן/ מ ² / יממה רב-שנתי ²		כלורופיל, מג' מ ² רב-שנתי ¹		
	2013	2013	2013	2013	
ינואר-יוני	1984 \pm 302	1858 \pm 442	300 \pm 134	264 \pm 104	
יולי-דצמבר	2208 \pm 575	1524 \pm 342	124 \pm 36	241 \pm 80	
ינואר-דצמבר	2096 \pm 473	1692 \pm 356	212 \pm 75	253 \pm 93	
					2013 - 1970 ¹
					2013 - 1972 ²



איור 20: ממוצעים חצי-שנתיים של תכולת כלורופיל (למעלה) וייצור ראשוני (למטה) בעמודת המים העליונה של 0 – 15 מ', כפי שנמדדו בכנרת בתחנה A.



איור 21: ממוצע שנתי של תכולת כלורופיל (למעלה) וייצור ראשוני (למטה) בעמודת המים העליונה של 0 – 15 מ', כפי שנמדדו בכנרת בתחנה A.

1.7 קיבוע חנקן

אורה הדס, ריקי פנקס, נחמה מלינסקי-רושנסקי, אסף סוקניק

פריחות של ציאנובקטריה מקבעות חנקן בכנרת, כמו אפניזומנון וצילינדרוספרמופסיס, מעלה שאלה לגבי היכולת להעריך את השינויים באוגר החנקן ומשמעותו לגבי התהליכים הביו-גיאוכימיים באגם. ללא מדידה אמינה של רכיב קיבוע החנקן במאזן האגמי, תחזיות עונתיות ושנתיות לוקות בהערכה חסרה. לפיכך יש חשיבות רבה לבחון את החשיבות היחסית של קיבוע החנקן במאזנים העונתיים באמצעות מדידות סדירות של קיבוע חנקן בכנרת. בדיקות של פוטנציאל קיבוע החנקן בתרביות של אפניזומנון במעבדה ובמי כנרת שהודגרו בעומקים שונים *in situ* החלו בקיץ של שנת 2001 ומאז מהווים חלק מהניטור השגרתי באגם בקיץ ובסתיו. המדידה מסתמכת על פעילות האנזים ניטרוגנאז המצוי בתאים מיוחדים הקרויים הטרוציסטים, והאחראי על קיבוע החנקן האטמוספרי. המעקב במעבדה נעשה ע"י תהליך חיזור גאז האצטילן לאתילן ע"י הניטרוגנאז, ומדידת שעורי האתילן הנוצרים על ידי כרומוטוגראף גזים. מצאנו שקיבוע החנקן תלוי באנרגיית אור, עולה עם הזמן, מעוכב על ידי אמוניה ובחושך הוא אינו מתקיים. קיימת תלות בין הפריחות של ציאנובקטריה מקבעות חנקן באגם לבין ההרכב הכימי של עמודת המים, כשקיבוע החנקן בכנרת תלוי בין יתר הגורמים בכמויות החנקן המקובע המגיעות אל האגם בזרימות השטפוניות מאגן ההיקוות ובריכוזים שלו בקיץ (תהליכי הדניטריפיקציה) וכן בפולסים של DIN ובעיקר אמוניה בקיץ ובסתו.

בשנת 2013 נמדדו ערכים נמוכים של קיבוע חנקן. בחודש יולי לא היה כלל קיבוע למרות שבעמודת המים נרשמו 183 פילמנטים של אפניזומנון ו 1531 פילמנטים של צילינדרוספרמופסיס במל', אך לא נצפו הטרוציסטים. באוגוסט נמדד קיבוע נמוך עם 0.177 טון חנקן מקובע לאגם ליום. בספטמבר ובאוקטובר הערכים היו נמוכים אף יותר. סה"כ הקיבוע לשנת 2013 הסתכם ב 5.26 טון לאגם, בהשוואה ל 79 טון בשנת 2012 (ראה טבלה 4), כשהקיבוע החל ביולי ונמשך עד נובמבר. ב 2013, בסוף יוני נמדדו ריכוזי ניטראט של 180 מיקרוגרם N לליטר ב 1 מ' עומק. ביולי נרשמה ירידה בריכוזי הניטראט אך עדיין נמדדו 49 מיקרוגרם N לליטר בעומק של 3 מ' ו 28-37 מיקרוגרם N לליטר של אמוניה. הריכוזים הגבוהים יחסית של חנקן מקובע מומס במים ייתרו את הצורך בקיבוע חנקן אטמוספרי. שיעור קיבוע החנקן ב- 2013 נמצא בטווח הנמוך של הערכים שנמדדו החל משנת 2001 (טבלה 4).

טבלה 4: קיבוע חנקן בכנרת בשנים 2001-2013 (טון לאגם)

Year	N ₂ Fixed Tons per Lake
2001	97.5
2002	12.5
2003	0.5
2004	83.4
2005	123
2006	35.1
2007	1.6
2008	59
2009	81.1
2010	21
2011	6.9
2012	79
2013	5.26

1.8 חיידקים - ספירת חיידקים כללית וייצור שניוני

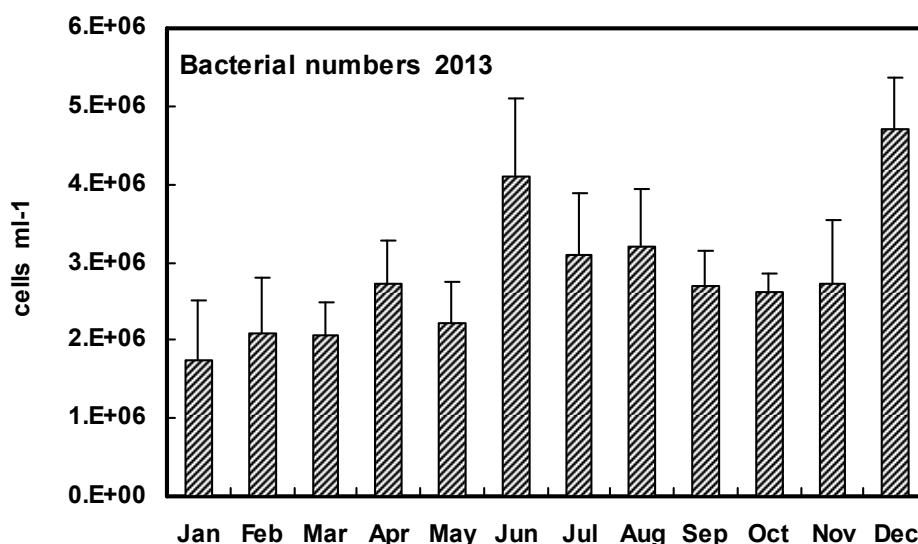
חמי רושנסקי וטומי ברמן

חיידקים הטרוטרופים הם מרכיב חשוב במארג המזון, עם תפקיד מרכזי בפירוק חומר אורגני ומיחזור נוטריאנטים. ניטור של חיידקים בתחנה A ב 6 עומקים, החל לפני יותר מעשור (ספירה כללית משנת 1989, וייצור שניוני משנת 2001), ונמשך ב 2013 בתדירות של פעם בחודש. מעקב שגרתי אחר פרמטרים אלו חשוב בכדי לגלות שינויים בתפקוד הלולאה המיקרוביאלית בפרט ובאקוסיסטמה של האגם בכלל.

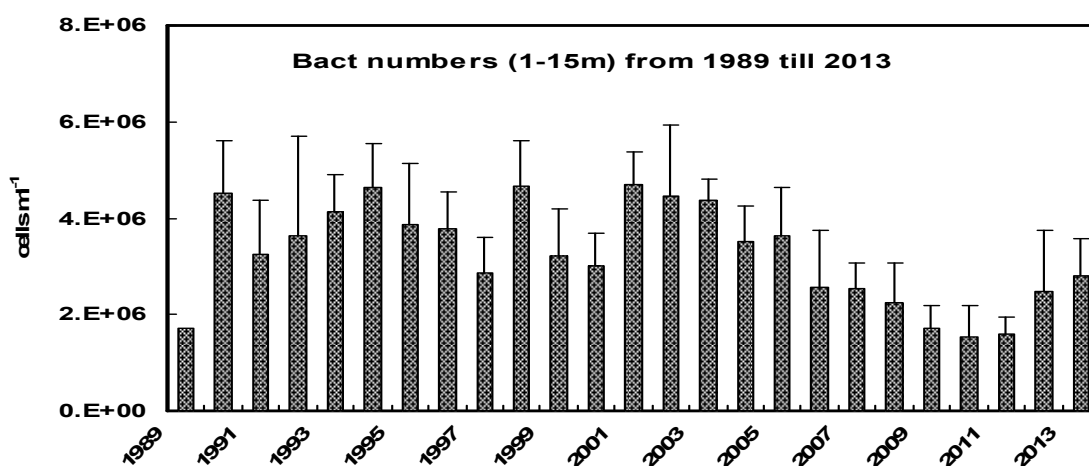
ספירת חיידקים כללית (מיקרוסקופיה לאחר צביעה ב – DAPI)

התפלגות תוצאות ספירות החיידקים החודשיות ב 2013 (בעומקים 1 עד 15 מ') תואמת את מה שנצפה בדרך כלל. נרשמו מספרי חיידקים נמוכים יחסית בחודשי החורף, עליה ביוני ובקיץ, ירידה לאחר מכן ושיא בדצמבר 2013 (איור 22). עלייה חדה ומובהקת במספרי החיידקים נרשמה גם בדצמבר 2012. בעוד שהערכים שנספרו חודש לאחר מכן בינואר 2013 היו נמוכים ודמו לערכים שנצפים בד"כ בינואר. יתכן שהערכים הגבוהים בדצמבר 2012 ו 2013 נבעו מכניסת מים מוגברת כתוצאה מגשמים ראשונים כבדים לפני הדיגום. בדצמבר 2011, לא נצפתה עלייה חריגה במספר חיידקים וזה תואם לכניסת מים חלשה יותר לפני הדיגום (כשליש בהשוואה לדצמבר 2012 ו 2013).

משנת 1989 עד לשנת 2005 נשמרה יציבות יחסית במספר החיידקים בתחנה A. משנת 2006 ועד 2010 נצפתה ירידה במוצע השנתי של מספר החיידקים (איור 23). משנת 2011 נרשם שינוי במגמה זו. ב 2013, הממוצע השנתי של מספרי חיידקים עמד על 2.52×10^6 תאים למ"ל (בעומקים 1 עד 15 מ'), והינו גבוה יותר מאשר בשנת 2012 (2.39×10^6 תאים למ"ל). מגמת העלייה השנתית במספרי החיידקים ממשיכה וצריך לחכות עוד מספר שנים כדי לברר אם היא מובהקת.



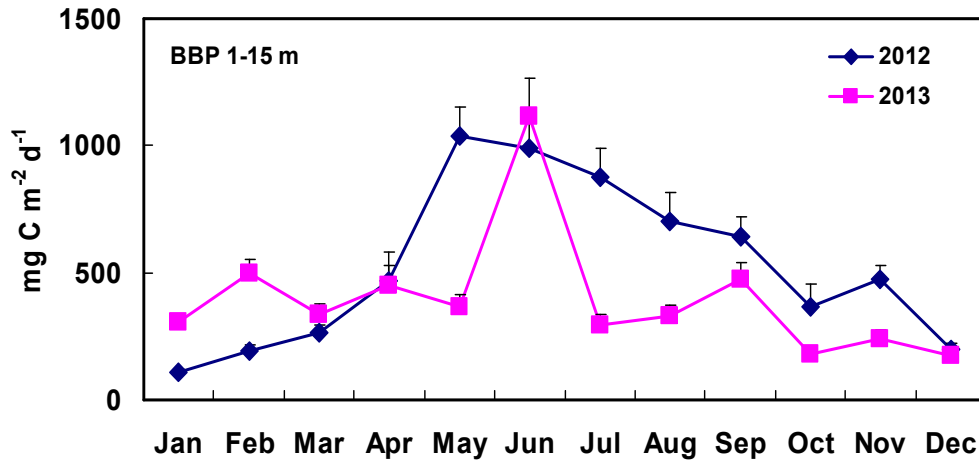
איור 22: ממוצע חודשי (2013) של מספר חיידקים (תאים למ"ל) בכנרת, בתחנה A, בעומקים 1 עד 15 מ'.



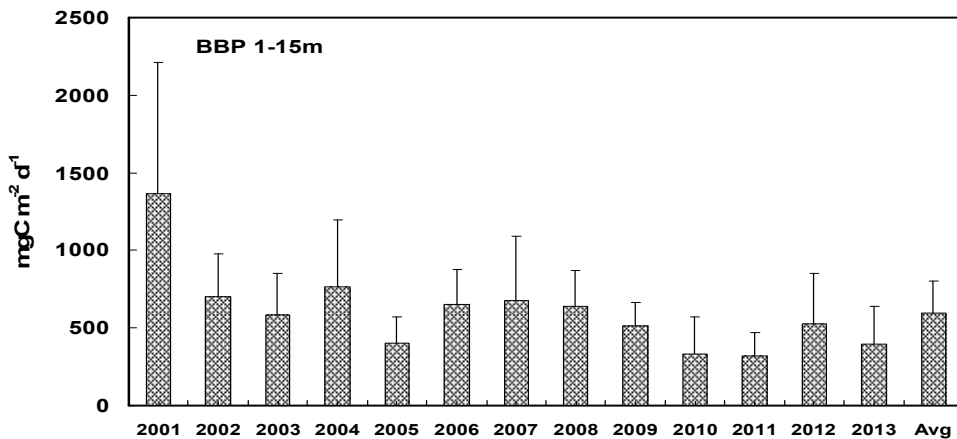
איור 23: ממוצעים וסטיות תקן שנתיים של מספר חיידקים למ"ל (לפי ממוצעים בעומקים 1-15 מ'), 1989-2013.

ייצור שניוני של חיידקים (BBP) לפי שיטת קליטת לאוצין מסומן רדיואקטיבית

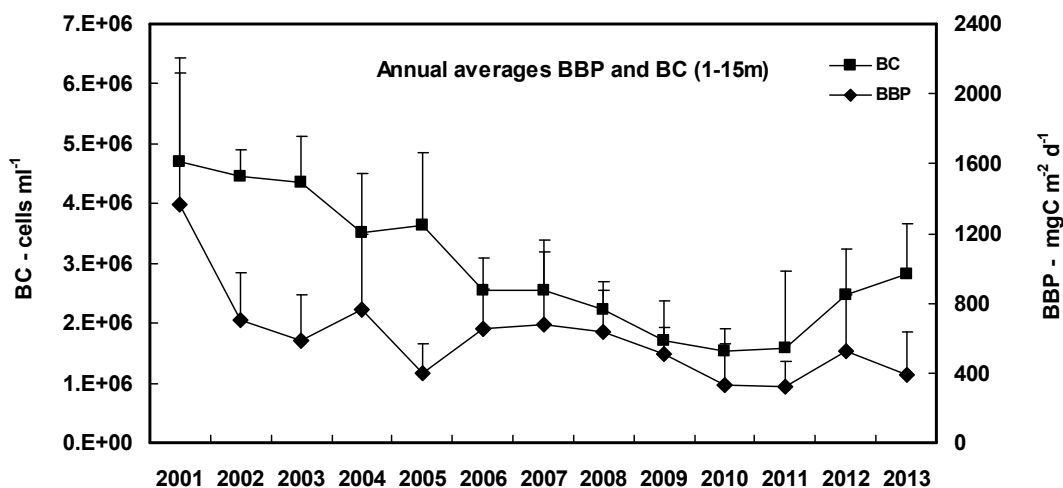
הייצור החיידקי (BBP, Bacterial Biomass Production) שנמדד ב 2013 היה נמוך יחסית לאורך השנה עם שיא יוצא דופן בחודש יוני (איור 24). בניגוד לרוב השנים (לא מוצג) ול 2012 (איור 24), לא נצפו ערכים גבוהים יחסית בפעילות החיידקית בחודשי הקיץ. מאז 2001, הממוצע השנתי של הייצור החיידקי הראה נטייה של ירידה (איור 25). בולטת במיוחד הפעילות היחסית גבוהה ב 2001 והנמוכה ב 2010-2011. הממוצע השנתי של BBP ב 2013 היה נמוך יותר בהשוואה ל 2012, בה התפתחה פריחה משמעותית של פרידינום. בשנת 2013 נראה שוב הקשר ההפוך בין מספר החיידקים לפעילות המטבולית שלהם, כפי שנצפה בשנים 2001-2005 (איור 26).



איור 24: ממוצעים חודשיים של ייצור חיידקי (BBP, מג' פחמן/מ²/יום) בתחנה A, 1-15 מ' בשנים 2012 ו 2013.



איור 25: ממוצעים וסטיות תקן שנתיים של ייצור ראשוני חיידקי (BBP, מג' פחמן/מ²/יום) ב 1-15 מ', משנת 2001 עד 2013, וממוצע לכל התקופה.

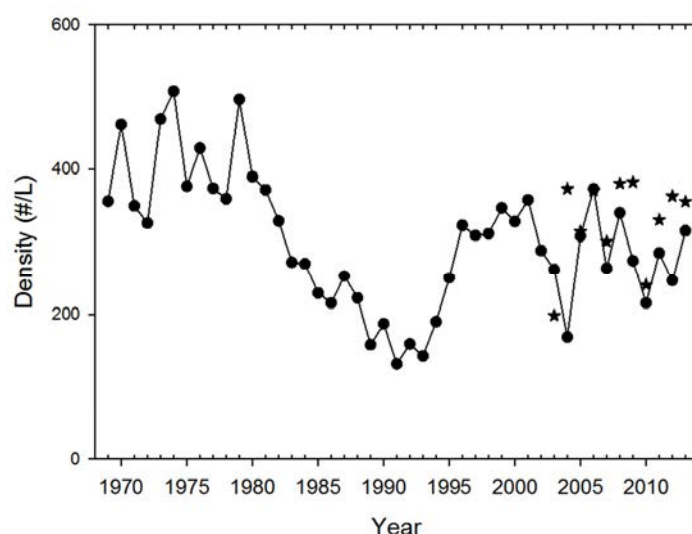


איור 26: ממוצעים וסטיות תקן שנתיים של מספרי חיידקים (BC, תאים למ³) וייצור ראשוני חיידקי (BBP, מג' פחמן/ממ²/יום) ב 1-15 מ', משנת 2001 עד 2013.

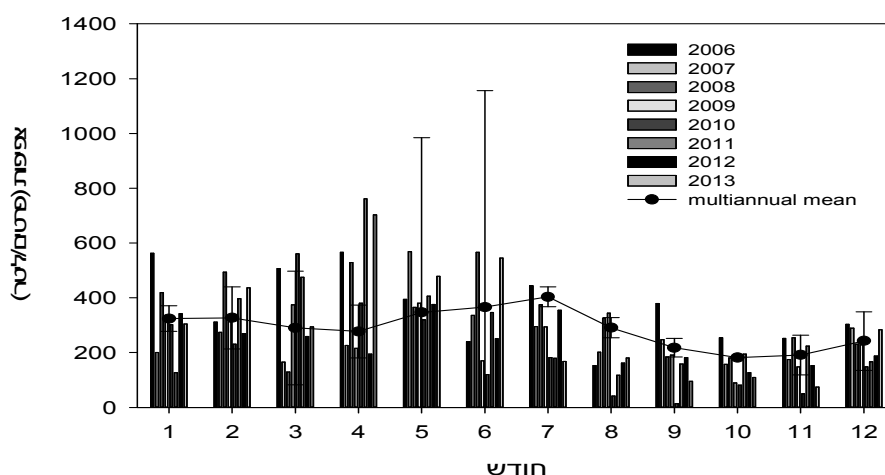
1.9 זואופלנקטון

גדעון גל ושרה צ'ווה

במעקב אחר השינויים בצפיפות הכוללת של הזואופלנקטון באגם מאז שנות ה-70, בעזרת דגימות המיקסים (איור 27), ניתן לראות שבשנה האחרונה חלה עלייה בצפיפות הזואופלנקטון אחרי הירידה בשנת 2012 עם המשך מגמת שיפור מאז המינימום של שנת 2010. יחד עם זאת, השינויים בשנים האחרונות מעידים על המשך חוסר יציבות באוכלוסיית הזואופלנקטון במבט רב שנתי, בניגוד לאופי האוכלוסייה בשנים האחרונות של המאה הקודמת (1996-2001). מתוך ניתוח חודשי של תוצאות שיטת המיקסים עולה כי השינוי שחל בצפיפויות הזואופלנקטון, ביחס לשנה הקודמת, היה בעיקר במהלך חודשי החורף-אביב (חודשי פברואר-יוני). במהלך חודשי הקיץ-סתיו ערכי הצפיפויות היו נמוכים יותר בשנה החולפת ביחס לשנת 2012 (איור 28). הבדלים אלו נבעו בעיקר מירידה בצפיפויות של פרטים מהקופודים מהמין מזציקלופס ומין של הרוטיפר, אנוראופסיס.



איור 27: צפיפות שנתית ממוצעת של הזואופלנקטון באגם, על פי דיגום המיקסים, בין השנים 1969-2013. הכוכבים מציינים ערכי צפיפות שנתית ממוצעת על פי דיגום הפרופילים (עבור השנים 2003-2013).



איור 28: צפיפות חודשית ממוצעת של זואופלנקטון עבור השנים 2006-2013 (עמודות) והממוצע החודשי הרב שנתי לשנים 1970-2003 וסטיות תקן (קו אנכי), על פי דיגום המיקסים.

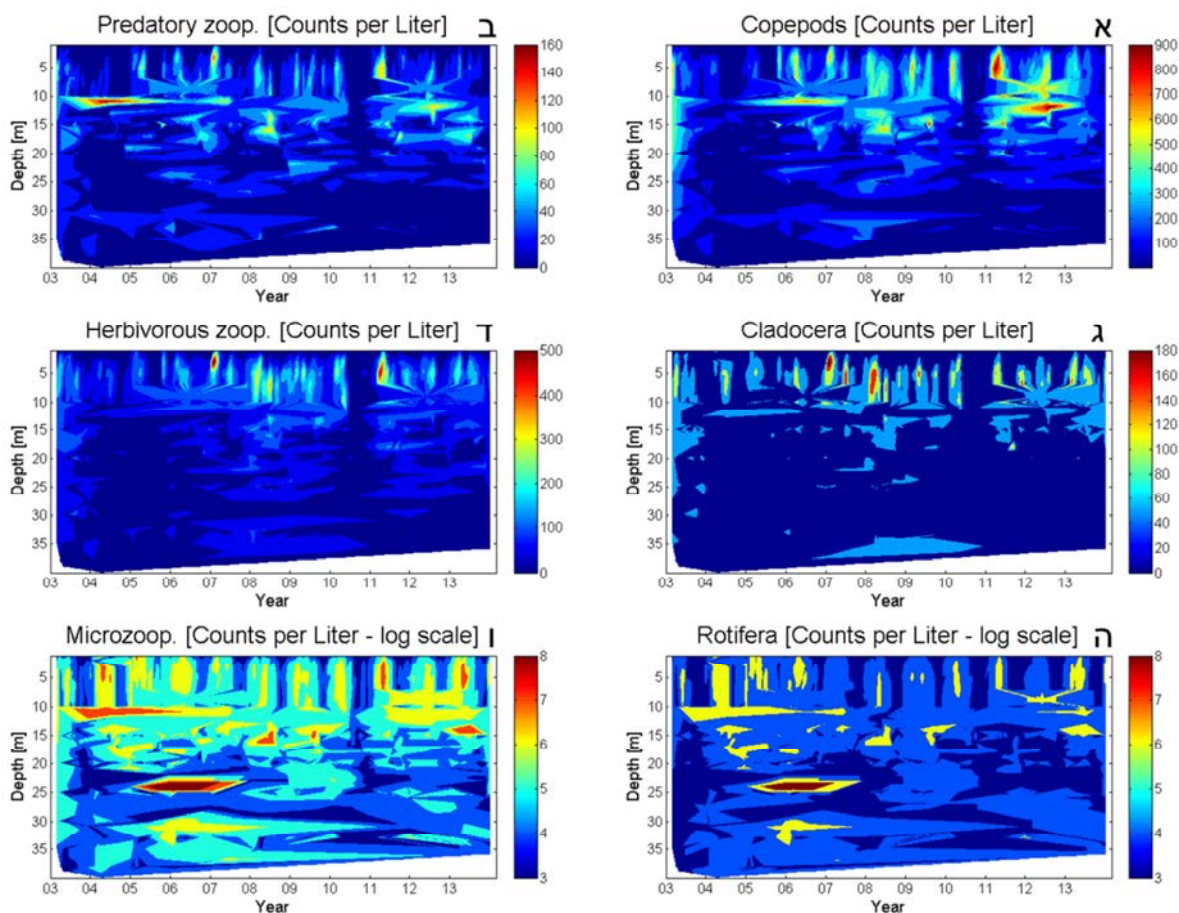
עפ"י דגימות המיקסים, הערכים החודשיים של צפיפות הזואופלנקטון בחודשים יולי-נובמבר נמוכים מהערכים החודשיים הממוצעים עפ"י הממוצע הרב-שנתי לשנים 1970-2003 (איור 28). בחודשים ינואר-יוני ודצמבר הערכים דומים או גבוהים מהממוצע הרב-שנתי עם הבדלים בולטים בחודשים אפריל ויוני הודות לערכים גבוהים של שני מינים של רוטיפרים, אנוראופסיס וקראטלה. בשני המקרים, נמצאו ריכוזים גבוהים במיוחד בעומקים ספיציפיים (על בסיס דיגום הפרופילים) ולא לאורך כל עמודת המים. למשל, האנוראופסיס נמצא בצפיפות של מעל 2300 פרטים לליטר ב-16.6.2013 בעומק של 14 מ', עומק התרמוקלינה באותו מועד. בעומק של 13 מ', לעומת זאת, נמצאו רק כ-137 פרטים לליטר. המין קראטלה נמצא בצפיפויות גבוהות במהלך אפריל, למשל ב-2.4.2013 תועדו כ-1500 פרטים לליטר בעומק 5 מ'.

מתוך בחינה של הערכים עפ"י דיגום הפרופילים ניתן לראות חוסר התאמה לתוצאות דיגום המיקסים. בניגוד לתוצאות המיקסים, בשנה האחרונה חלה התייצבות ביחס לשנה הקודמת עם ירידה מתונה בלבד בערכי הצפיפות (איור 27). מאז תחילת דיגום הפרופילים קיימים הבדלים באומדני צפיפות הזואופלנקטון באגם עם ערכים גבוהים יותר באופן עקבי בדיגום הפרופילים ביחס לדיגום המיקסים למעט השנים 2003, 2005. ההבדלים העקביים בין שתי השיטות נובעים מאופן הדיגום. בשיטת המיקסים נדגם נפח מים קטן יחסית (1 ל') במספר עומקים המעורבבים יחדיו ומסך הנפח מוצא ליטר מים לבדיקה במעבדה. בשיטת הפרופילים, בכל עומק נדגמים 10 ל' מים וכל דגימה כזאת נבדקת במעבדה במלואה. המשמעות היא שמינים בעלי צפיפות נמוכה אינם הולכים לאיבוד בדיגום בשיטת הפרופילים. אך חשוב מכך, יש ביטוי מדויק יותר של מינים אשר מרוכזים בעומקים מסוימים ואינם מפוזרים באופן אחיד בעמודת המים. ואכן, אם בוחנים את הפיזור של קבוצות הזואופלנקטון בעמודת המים בעונות השונות ניתן לראות את ההטרונגיות שבפיזור האנכי שלהם (איור 29). ניתן לראות שהפיזור של הזואופלנקטון הטורף והצמחוני (מיני הקלדוסירה ושלבי הביניים של הקופודים) מתרכז בעיקר בחלק העליון של עמודת המים לעומת המיקרו-זואופלנקטון (הרוטיפרים והשלבים הצעירים ביותר של הקופודים) שמופיע בצפיפויות גבוהות גם בחלקים עמוקים יותר של עמודת המים, בעיקר בחודשי הסתיו עם העמקת התרמוקלינה. בתקופה זאת מוצאים לעיתים קרובות צפיפויות גדולות של מינים שונים של זואופלנקטון, בעיקר רוטיפרים. כאשר דגימות מהעומקים השונים מעורבבים יחדיו ומיוצגים ע"י תת-דגימה בודדת הרי שהמידע על הריכוזים הגדולים הללו לא בא לידי ביטוי והתוצאה היא תת-הערכה של צפיפות הזואופלנקטון באגם.

על כן, אם בוחנים את אומדני הצפיפויות עפ"י שתי השיטות בחודשים השונים, ההבדלים הגדולים ביותר מתרחשים כאשר חלק מהמינים, גדולים כקטנים, כדוגמת קופודים בוגרים (הזואופלנקטון הטורף) ומיני רוטיפרים שונים, מרוכזים בריכוזים גדולים בעומקים ספיציפיים ואינם מפוזרים באופן אחיד על פני עמודת המים. גם העונתיות והשונות הרב-שנתית בפיזור של הקבוצות השונות נראים באופן ברור (איור 29). לאור השונות הרבה בפיזור האנכי, אין ספק שדיגום הפרופילים הוא לא רק חיוני אלא גם מספק אומדנים מדויקים יותר של צפיפות הזואופלנקטון באגם.

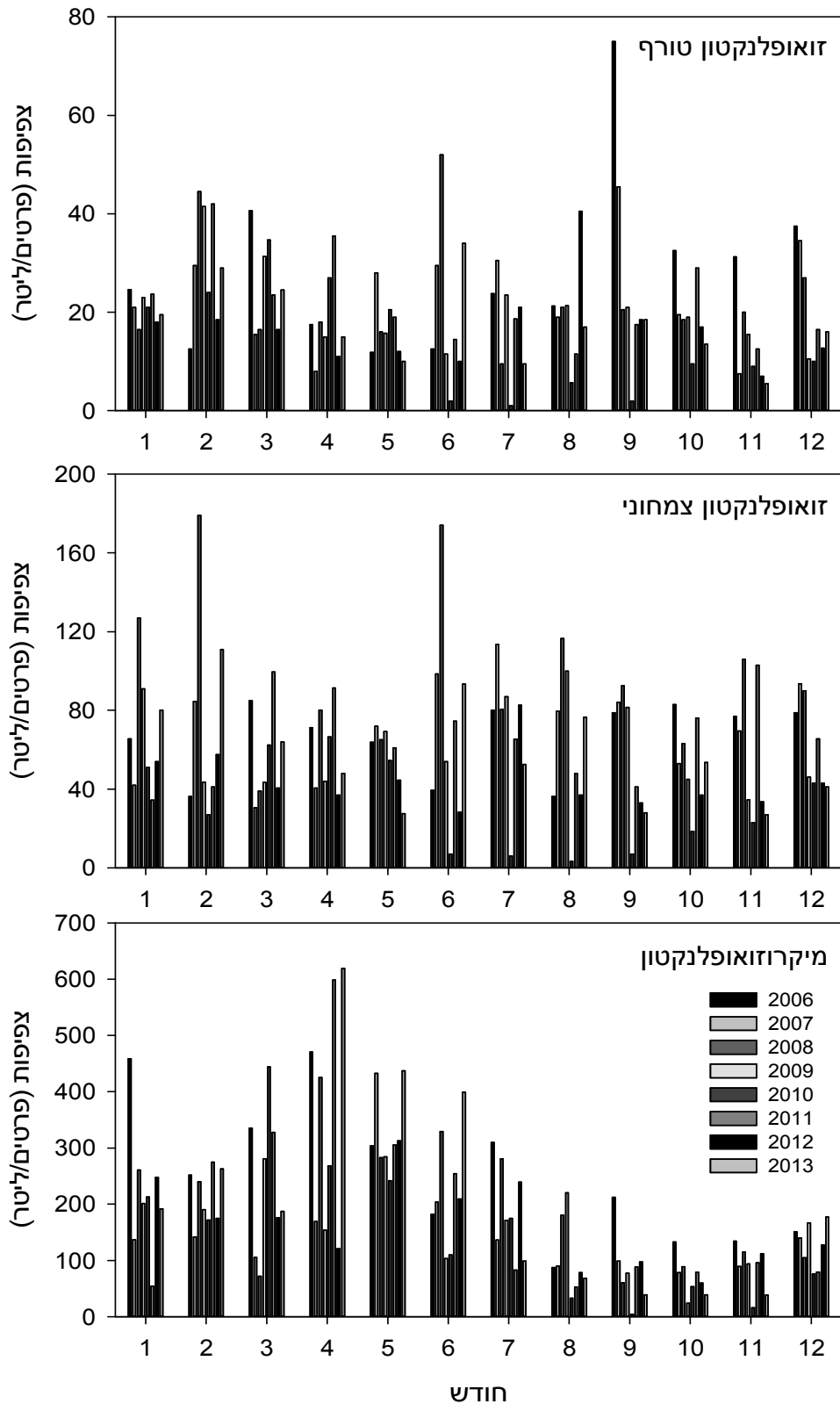
ניתן לבחון את אוכלוסיית הזואופלנקטון כקבוצות פונקציונאליות במקום כקבוצות טקסונומיות. אם בוחנים, עבור התקופה 2006-2013, את ההבדלים בין הצפיפויות החודשיות על פי החלוקה לשלשת הקבוצות הפונקציונאליות הכוללות את הטורפים (קופודים בוגרים), הצמחוניים (קלדוצירה והקופודיטים) והמיקרו-זואופלנקטון (רוטיפרים והנאופילי), ניתן להבחין במספר מגמות (איור 30). ראשית, ניתן לראות שהעלייה היחסית בצפיפות הכוללת של הזואופלנקטון במהלך השנה (עפ"י המיקסים) נבעה משינויים בכל שלושת הקבוצות אם כי דגם השינויים היה שונה בין הקבוצות. בחצי הראשון של השנה הזואופלנקטון הטורף היה בעל צפיפות גבוהה יותר מהשנה הקודמת למרות שלא מדובר על הבדלים גדולים למעט חודש יוני שבו הצפיפות הייתה גדולה בשנת 2013 פי 3.4 משנת 2012 (34 לעומת 10 פרטים לליטר). בשאר השנה ערכי 2013 היו מעט נמוכים יותר מערכי 2012 פרט לחודש אוגוסט שבו ערכי 2012 היו גדולים פי 2 מערכי 2013 (40.5 לעומת 17 פרטים לליטר). מעניין לציין שההבדלים הגדולים במהלך חודש יוני בזואופלנקטון הטורף נכונים גם לשתי הקבוצות האחרות, הזואופלנקטון הצמחוני והמיקרו-זואופלנקטון. בשניהם הייתה עלייה בצפיפות בשנת 2013 עד כדי פי 2 עד פי 3. במקרה של המיקרו-

זואופלנקטון ההבדלים הגדולים גם נראו במהלך החודשים אפריל ומאי עם ערכים גבוהים עד פי 6 (196 לעומת 121) בחודש אפריל. במחצית השנייה של השנה ההבדלים בין השנים קטנים יותר.



איור 29: סדרת זמן של ערכי הצפיפות החודשיים הממוצעים בעמודת המים על בסיס דיגום הפרופילים, מתחילת 2003 עד סוף 2013. שהצבעים כחולים מבטאים ערכי צפיפות נמוכים וצבעים אדומים מייצגים צפיפויות גבוהות. הערכים הם של (א) קופפודים, (ב) זואופלנקטון טורף, (ג) קלדוצ'ירה, (ד) זואופלנקטון צמחוני, (ה) רוטיפרים, (ו) מיקרו-זואופלנקטון. יש לשים לב להבדלים בין האיוורים בטווחי הערכים ולסקאלה הלוגוריתמית באיוורים ה, ו.

בחינה של שלבי ההתפתחות של הקופפודים באגם מעידה על הבדלים במגמות על בסיס שנתי (לא מוצג). השלבים הצעירים ביותר, הנאופלי, הציגו ירידה של 42% במספר הפרטים לליטר במהלך השנה לעומת שנת 2012, עפ"י דגימות הפרופילים. גם בריכוז הקופפודיטים חלה ירידה בסך 20%. תמונה דומה התקבלה גם עבור השלבים הבוגרים עם ירידה בצפיפות על פי שיטת הפרופילים ב-22%. מתוך התוצאות עולה כי עפ"י שיטת הפרופילים קיימת מגמת ירידה בשלוש השנים האחרונות בצפיפות הקופפודיטים והבוגרים. הסיבה למגמה הזאת אינה ברורה אבל אולי קשורה לעליה פוטנציאלית בלחץ הטריפה של דגים על הזואופלנקטון. במסגרת פרויקט אחר במימון משרד החקלאות נבדקים מקורות התזונה של מספר מיני דגים מרכזיים באגם כגון אמנון הגליל והכסיף (ראה פרק 3.9). מתוצאות ביניים של פרויקט זה עולה כי הזואופלנקטון, ובעיקר הקופפודים, מהווים מקור מזון מרכזי עבורם. כך שיתכן שמגמת הירידה נובעת מהעלייה בלחץ הטריפה של דגים אלו ושל הלבנון בעקבות הגידול המשמעותי באוכלוסיות שלהם בשלוש השנים האחרונות.



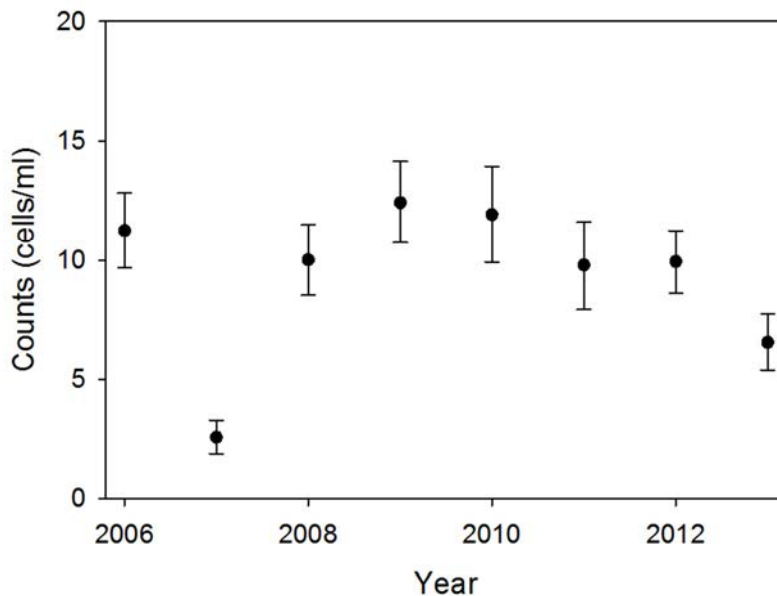
איור 30 : צפיפות חודשית ממוצעת של שלושת הקבוצות הפונקציונאליות של הזואופלנקטון באגם: הזואופלנקטון הטורף (איור עליון), הצמחוני (איור אמצעי), והמיקרו-זואופלנקטון (איור תחתון) עבור השנים 2006-2013, על פי דיגום המיקסים.

1.10 ציליאיטים

גדעון גל וחמי מלינסקי-רושנסקי

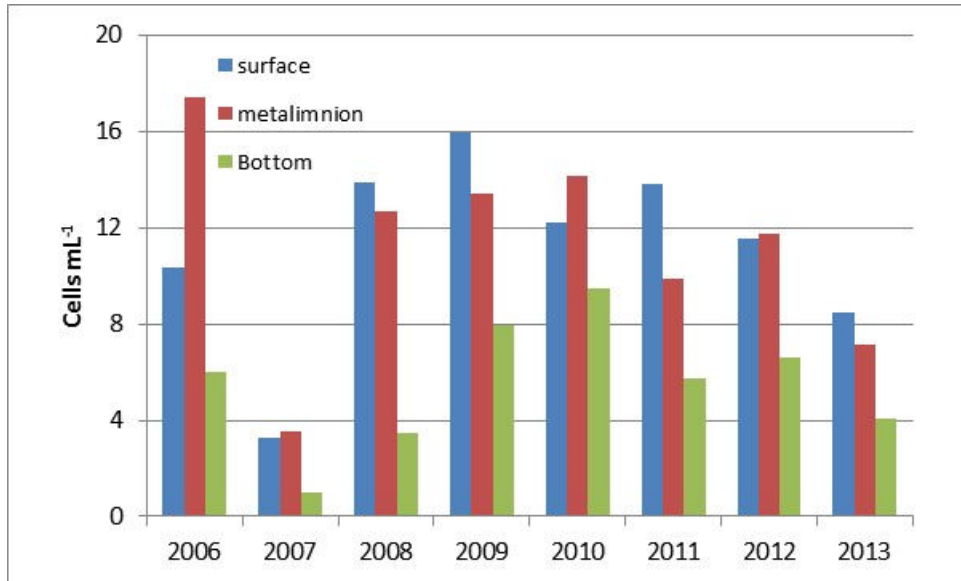
במהלך שנת 2013, בדומה לשנים האחרונות נערך ניטור הציליאיטים פעם בחודש בתחנה A משלוש שכבות של עמודת המים: פני המים (עומק 1 מ'), אזור המטאלימניון (20 מ') והשכבה העמוקה (34-40 מ'). בזמן השיכוב נלקחת דגימה נוספת מאיזור התרמוקלינה. הספירה נעשית לפי סוגים טקסונומיים עבור הסוגים המוכרים לנו כמו *Tintinidium*, *Coleps*, *Vorticella*, ולפי הצורות הגיאומטריות (כדור, גליל, ספרואיד) עבור ציליאיטים שאיננו בטוחים בהגדרתם. ניתן לתרגם את הספירות לביומסת פחמן עפ"י החישוב שב- 1 מיקרוגרם משקל רטוב ישנם 140 ננוגרם פחמן (140 ng C ל-1 µg).

מתוך ספירת דגימות הציליאיטים במהלך שנת 2013 נמצאו ערכי ממוצע שנתי של צפיפות (מספר הציליאיטים ליחידת נפח) נמוכים מאלו שנצפו בשנים קודמות ונמשכת מגמת הירידה שנצפתה מאז שנת 2009 (איור 31). הירידה בצפיפות בשנת 2013 נבעה מירידה בריכוזים בכל שכבות המים (איור 32). ריכוזי סה"כ הציליאיטים (כל המינים והצורות) ב-2013 בשכבת פני המים, המטאלימניון ובשכבה העמוקה היו בין 4.1 ל- 8.5 ציליאיטים למ"ל עם ממוצע שנתי של 6.6 תאים למ"ל שהוא הערך הנמוך ביותר שנצפה מאז שנת 2008, ומהווה רק 66%-1 ו-52% מערכי השיא שנצפו באגם בשנים 2012 ו 2009, בהתאמה. בניגוד לשנה שעברה (2012), השינויים בריכוזי הציליאיטים בשכבות השונות היו יחסית אחידים. נצפתה ירידה ב-71% בשכבה העליונה וכ-61% בשכבת המטאלימניון ובשכבה העמוקה, לעומת 2012.



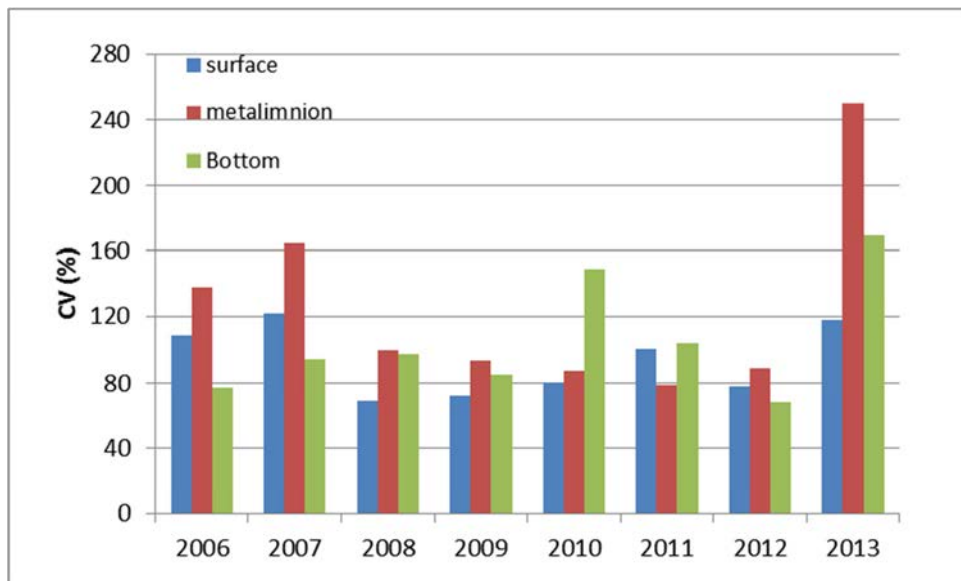
איור 31: ריכוז הציליאיטים השנתי הממוצע על בסיס דיגום של שלושת שכבות עמודת המים: האפילימניון, המטאלימניון, וההיפולימניון. מספר הדגימות בשנה נע בין 39-43. הקווים האנכיים מבטאים שגיאת התקן.

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. יחד עם מקור אפשרי זה לשגיאה, מגמת הירידה הברורה בריכוזי הציליאיטים מאז שנת 2009 איננה משאירה מקום לספקות על עצם קיום המגמה.



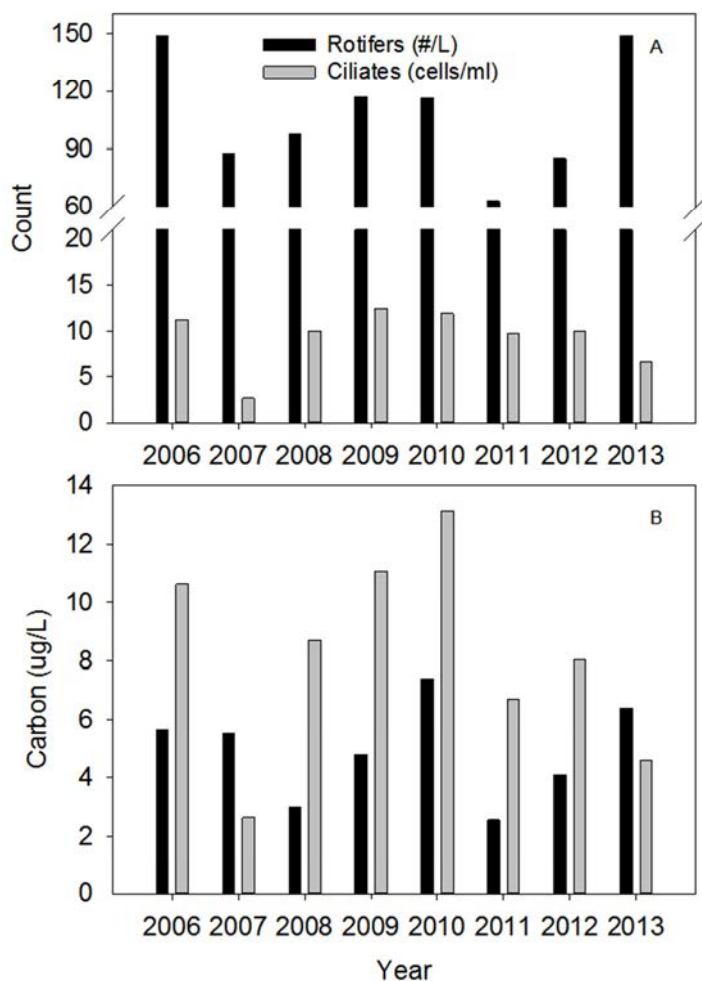
איור 32: הצפיפות הממוצעת של ציליאטים (מספר למ"ל) בשכבות העומק השונות עבור התקופה 2006-2013.

מעניין לציין שאנו רואים יציבות יחסית במידת השונות בין השנים 2008-2012, בניגוד לעלייה משמעותית בשנת 2013 (איור 33). השינוי במקדם השונות (CV) מצביע על עלייה, בעיקר בשכבה האמצעית והעמוקה, עם ערכי מקדם שונות (CV) גבוהים מ-200% ב-2013 לעומת 80% בשנים 2008-2012, למעט ערך חריג בשכבה העמוקה ב-2010.



איור 33. חישוב של מקדם השונות (CV), באחוזים, עבור כל אחת משכבות הדיגום בתקופה 2006-2013.

הערכים הגבוהים יחסית של הציליאטים שנראו בשנים 2008-2010 והערכים הנמוכים בשנת 2007 מתאימים למגמות שנראו בצפיפויות הרוטיפרים (ראה איור 34A) לעומת זאת, החל משנת 2011 חל ניתוק בין המגמות של הרוטיפרים והציליאטים. אם במהלך שנים אלו ישנה מגמת ירידה ברורה בריכוז הציליאטים הרי שבצפיפות הממוצעת של הרוטיפרים חלה עלייה שנתית בשיעור של 30-50%. לא ברור בשלב זה מה הגורם לירידה בריכוז הציליאטים במקביל לעלייה בצפיפות הרוטיפרים וכן מה הגורם והמשמעות בעלייה בשונות בריכוז הציליאטים בשנה האחרונה והקשר לשינויים בצפיפות הרוטיפרים.

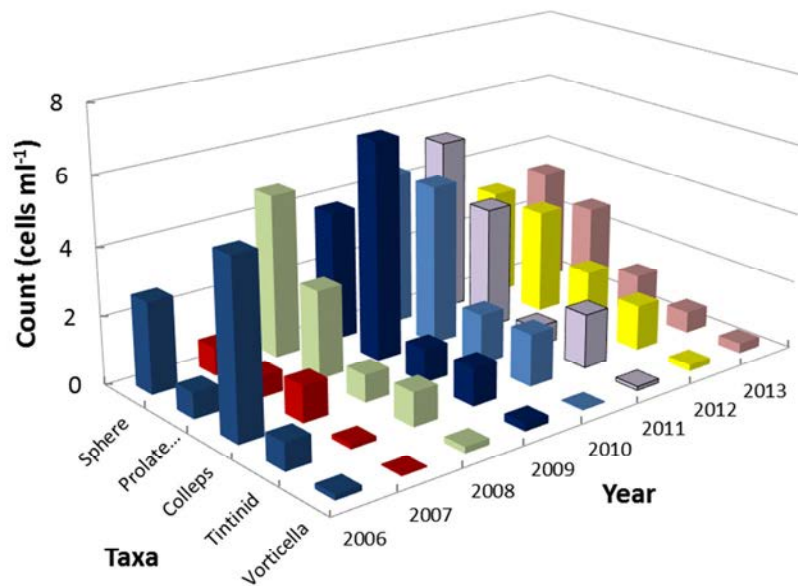


איור 34: השינויים בצפיפויות השנתיות הממוצעות (A) ובריכוז הפחמן (B) של הרוטיפרים (עפ"י שיטת הפרופילים) והציליאטים בעמודת המים עבור התקופה 2006-2013.

יחד עם מגמת הירידה בריכוז הציליאטים החל משנת 2011 מעניין לציין שהשינויים בין השנים אינם גדולים כל כך (איור 34A). הממוצע הרב שנתי (2006-2013) עומד על 9.3 פרטים למ"ל אם לוקחים בחשבון את שנת 2007 החריגה ו-10.3 פרטים למ"ל ללא שנה זאת. בהתייחסות לממוצע הרב שנתי (ללא שנת 2007) הרי שהשינוי בצפיפויות הפרטים, בין השנים, אינו גדול ונע בטווח שבין 1-34% כאשר הערך הגדול ביותר היה בין 2012 ל-2013. השינויים הרב-שנתיים בצפיפויות של יתר מרכיבי הזואופלנקטון גדולים הרבה יותר ובמקרה של הרוטיפרים, שינויים של מעל 30 ו-40% אינו חריג בשתי שיטות הדיגום (פרופילים ומיקס) עם ערכים שהגיעו לכדי 75-135% בשנה החולפת בתלות בשיטת הדיגום.

השוואה בין אוכלוסיות הציליאטים והרוטיפרים, במונחים של פחמן (איור 34B), מעידה על מגמות דומות לאלו שעולות מהשוואת הצפיפויות למעט מספר הבדלים. העלייה בצפיפויות הציליאטים בשנים האחרונות (עד שנת 2010) בולטת עוד יותר במונחים של פחמן. מגמת העלייה, בתכולת הפחמן בציליאטים, שהחלה אחרי הערכים הנמוכים בשנת 2007, המשיכה עד שנת 2010, עם עלייה של 18% משנת 2009 ל-2010, וירידה של 49% בשנת 2011. בשנת 2012, חלה עלייה מתונה של כ-20% בתכולת הפחמן מלווה בירידה של 34% בשנה החולפת. ערכי תכולת הפחמן של שנת 2013 הם הערכים הנמוכים ביותר מאז 2006 למעט השנה החריגה של 2007. ההבדלים בין ערכי השינויים בצפיפויות הציליאטים לאורך השנים לעומת השינויים בתכולת הפחמן בציליאטים נובעים משינויים בתרומה היחסית של המינים השונים באוכלוסיה (איור 35). לאחר שלוש שנים של עלייה בחלקם היחסי של מינים הנספרים בקטגוריה של Sphere (מינים בעלי צורת כדור) וכן מקבוצת הטינטינידה, החלה מגמת ירידה בשנת 2012 לעומת

עלייה בחלקם היחסי של פרטים מהסוג *Coleps*. בנוסף, יש לציין את מגמת הירידה בריכוזים של ציליאטים המקוטלגים בקבוצת Prolate spheroid זאת השנה החמישית.



איור 35: השינויים בצפיפויות השנתיות הממוצעות של קבוצות הציליאטים השונות בעמודת המים עבור התקופה 2006-2013.

בחינה של תכולת הפחמן של הציליאטים והרוטיפרים מציגה את ההבדלים בתרומה היחסית של שתי הקבוצות. עד לשנה החולפת הציליאטים תרמו חלק גדול יותר יחסית, בערכי פחמן, לעומת תרומתם של הרוטיפרים. בממוצע על פני התקופה 2006-2012, במונחים של ממוצעים שנתיים, הציליאטים היוו 65% מסך הפחמן הנתרם ע"י הציליאטים והרוטיפרים יחדיו. בשנה החולפת, לעומת זאת, חלה ירידה בתרומה היחסית של הציליאטים במקביל לעלייה בתרומה של הרוטיפרים. השנה חולפת הייתה בסך הכל הפעם השניה מאז שנת 2006 שבה התרומה היחסית של הרוטיפרים למאגר הפחמן הייתה גדולה יותר מזו של הציליאטים.

אין בידינו מספיק מידע בשלב זה להסביר את הסיבה להבדל הגדול בשנת 2013 אבל ללא ספק זה קשור למגוון התהליכים המתרחשים במערכת האקולוגית של הכנרת. רק בעתיד נדע האם מדובר על שנה חריגה בדומה לשנת 2007 או במגמה שתלווה אותנו בשנים הקרובות.

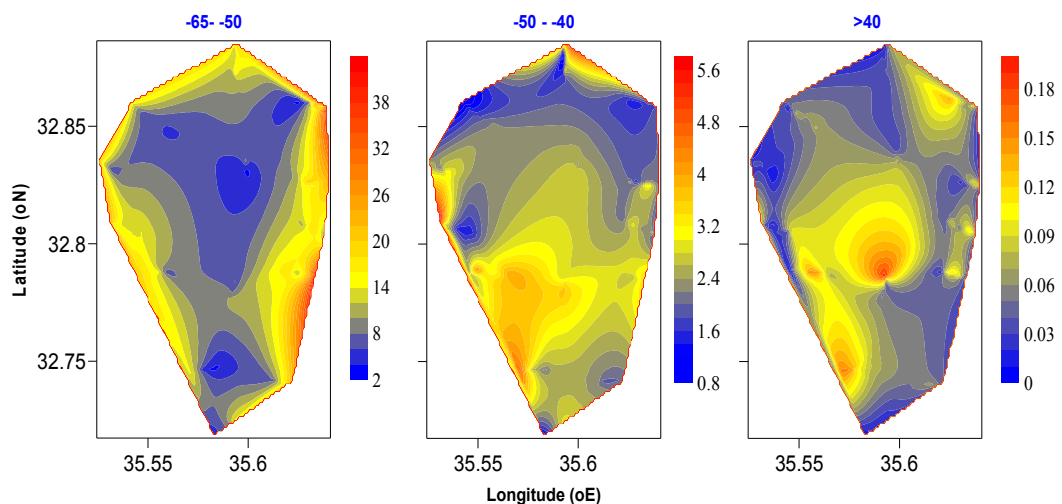
1.11 דגים - סקרים הידרואקוסטיים

איליה אוסטרובסקי ואלכס רינסקי

סקרים אקוסטיים, שמטרתם הערכה כמותית של מספרי הדגים וגודלם באגם, בוצעו באקוסאונדר מדעי בעל אלומה מפוצלת 120kHz, דגם Simrad EY60. הסקרים נערכו לאורך 14 חתכים בשעות הלילה, כיון שבלילה הדגים מפוזרים על פני עמודת המים לעומת שעות היום בהן הם מקובצים בלהקות. לפני כל סקר כויל האקוסאונדר בעזרת כדור סטנדרט. האקוסאונדר המדעי צויד במערכת GPS שמאפשרת רישום דגמים מרחביים דו-מימדיים של פיזור המטרות האקוסטיות. מכיון שאקוסאונדר מפוצל אלומה מאפשר זיהוי מהחיישן לכל מטרה, הרי שניתן לאפיין מיקום תלת-מימדי של המטרות בגוף המים. דיגום הדגים נעשה בטווח שמעבר ל-2 מ' מהחיישן. חשובי צפיפויות הדגים נעשו בעזרת תוכנת עיבוד הנתונים ההידרואקוסטיים (S5, Sonar5, Lindem Data Acquisition, http://folk.uio.no/hbalk/sonar4_5/index.htm)

טווח המטרות האקוסטיות חולק ל-4 קבוצות: מטרות שגודלן האקוסטי $< -65\text{dB}$ הינן לרוות, מטרות -65 - 50dB משויכות לרוות ולדגיגים, מטרות -40dB - 50 הינן ככל הנראה בוגרים של לבנון (Mirogrex terraesanctae) ושל רוב הדגים האחרים, ומטרות $> -40\text{dB}$ משויכות לדגים גדולים, רובם של מינים בעלי ערך מסחרי.

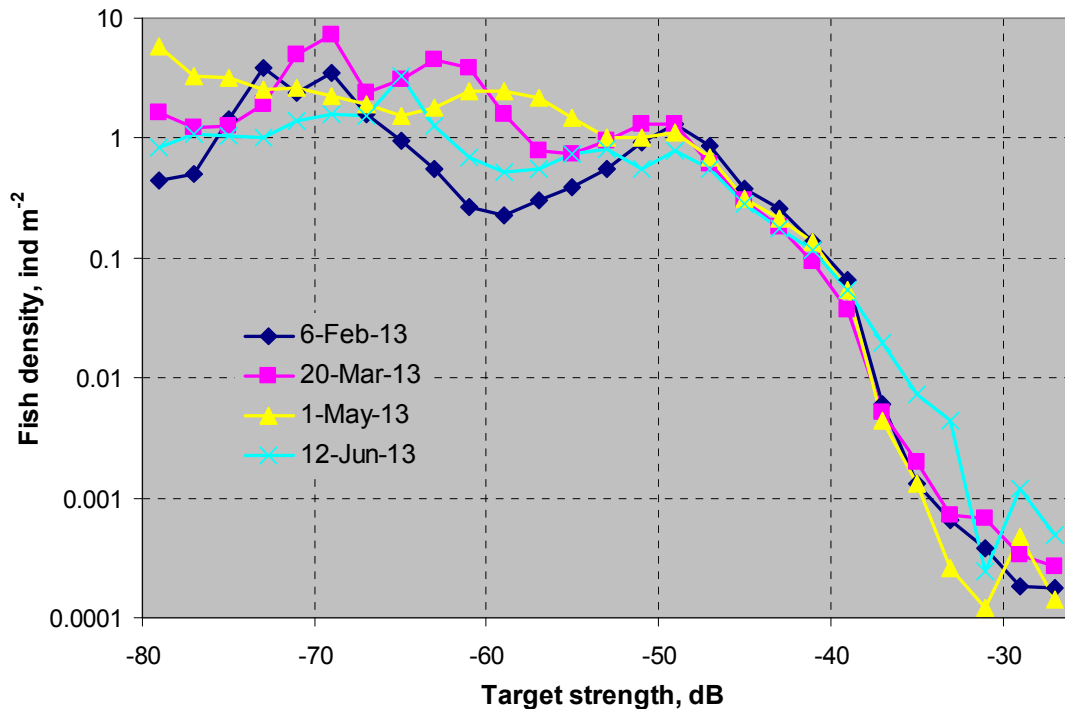
התפוצה המרחבית של הדגים שונה בין קבוצות הגודל השונות באגם. לדוגמא, הפיזור המרחבי של 4 קבוצות הגודל ב 1.5.2013 (איור 36) מראה שהדגים הקטנים (-65 - 50dB) מרוכזים ליד החופים, הדגים בגודל בינוני (-50 - 40dB) מתרכזים בקרבת החלק הדרום מערבי של האגם והדגים הגדולים ($> -40\text{dB}$) היו נפוצים בכתמים בכל האגם.



איור 36: תפוצה מרחבית של דגים באגם הכנרת ב- 1.5.2013. צפיפות הדגים מבוטאת בפרטים/מ"ר.

עקומות התפלגות גודל הדגים באגם בתאריכי הדיגום השונים (איור 37) מראות בדרך כלל שני שיאים ברורים של מספרי דגים בכל קבוצת גודל (ולפעמים שלושה). שיא אחד, של דגים קטנים יחסית (בסביבות -70dB בולט בסקר של פברואר ושוב בסקר של מרץ 2013, כאשר לרוות הלבנון והדגיגים מאכלסים את חלקו העמוק של האגם. השיאים של המטרות הקטנות יותר זזו עם הזמן לכיוון מטרות גדולות יותר, דבר המצביע על גידול הדגים במהלך החורף והאביב (איור 37). מיקומו של השיא הגדול יותר (-51 - 49dB) הינו יציב למדי והוא מיוחס ללבנונים בני שנה-שנתיים.

כמויות הדגים $> -50\text{dB}$ שנמדדו ביוני-יולי 2011, 2012, 2013 היו 100, 240 ו-320 מליון, בהתאמה. ממצא זה מעיד על גידול משמעותי בכמות הדגים במים הפלאגיים במהלך 3 השנים האחרונות. גידול זה עשוי להיות מיוחס להתפתחות אזור גדול של צמחיה טבולה מסביב לאגם בשנים 2012-2013. ליטורל שכזה הינו אזור רביה מוגן היטב עבור הדגים הגדולים, ובנוסף משמש כסביבת הזנה עבור הדגיגים, המבטיחה את תנאי הגידול וההישרדות האופטימליים עבורם.



איור 37: תפוצת גודל דגים באגם הכנרת ב- 2013.

1.12 מארג המזון במים הפלאגיים

תמר זהרי, גדעון גל, בשת"פ עם ד"ב המברייט (אונ' אוקלהומה)

תמונה מעודכנת של מארג המזון הפלאגי הוכנה לספר החדש על הכנרת. תמונה זו מסכמת ידע רב שהצטבר במהלך העשורים האחרונים של ניטור ומחקר בכנרת. שיטות שונות ומגוונות שימשו את החוקרים במחקרי מארג המזון, שכללו בדיקות תכני קיבה, ניסויי האכלה עם ובלי מזון מסומן, בדיקת הרכבים איזוטופיים של פחמן וחנקן של מרכיבי מארג המזון, ומודלים. אנו מבינים כיום שמארג המזון הפלאגי בכנרת מורכב הרבה יותר מהגרסה הפשטנית של שתי שרשראות מזון (שרשרת הפרידיניום ושרשרת הנופלנקטון) שהייתה מקובלת בשנות ה-70. מארג המזון כולל 12 קבוצות פונקציונליות עיקריות של אורגניזמים, שכולם תורמים למאגר משותף של נוטריאנטים אנאורגניים, אורגניים ודטריטלים – אבל בקצבים שונים. התבוננות באיור 38 של סכמת מארג המזון מציגה מספר נקודות עיקריות:

(1) ברמה הטרופית הנמוכה ביותר, של היצורים האוסמוטרופיים (כאלו שלוקחים את חמרי הדשן להם הם זקוקים ישירות מהמים) יש שש קבוצות פונקציונליות שונות של ייצורים, הכוללות ייצורים ראשוניים וחיידקים הטרוטרופיים.

(2) התפקיד המרכזי שיש למיקרוזואופלנקטון (ריסניות, שוטוניות הטרוטרופיות, גלגליות ונאופלי של קופפודים) בהעברת נוטריאנטים במעלה מארג המזון ובמיחזור שלהם. המעגל המיקרוביאלי בו פועלים יצורים אלו פעיל בסדר גודל יותר מאשר המעגלים שעוברים דרך המאקרו-זואופלנקטון בהעברת חמרי דשן במעלה מארג המזון ובמינרליזיה שלהם והחזרתם ל"דיסק הנוטריאנטים" שבבסיס המארג.

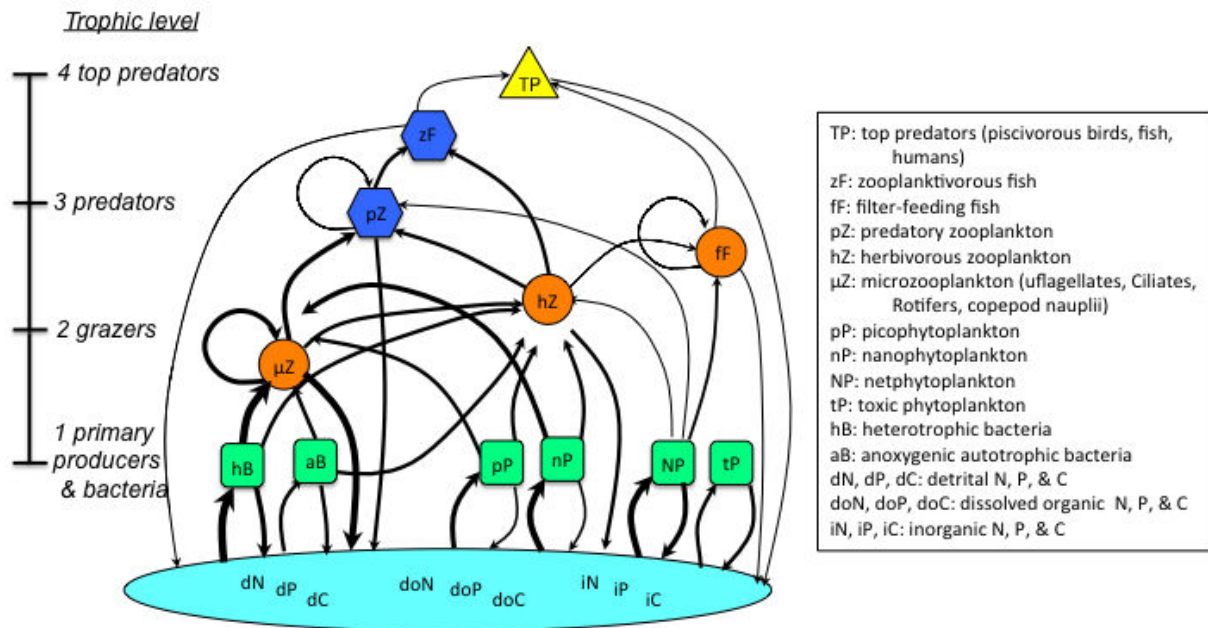
(3) בכנרת משולשים טרופיים מורכבים של שני טורפים שניזונים מאותו טרף אך בו זמנית אחד משני הטורפים ניזון גם מהטורף השני. דוגמא לכך הם הזואופלנקטון הצמחוני (הטרף), הזואופלנקטון הטורף (ניזון מהזואופלנקטון הצמחוני) והלבנון (ניזון מהזואופלנקטון הצמחוני והטורף גם יחד). משולשים טרופיים אלו גורמים לכך שקשה לחזות תוצאה של מניפולציה על אחד המרכיבים, כמו למשל דיג מסובסד של הלבנון, או "דילול סרדינים" כפי שזה נקרא בעבר.

(4) סביר שלטורפי-על (ציפורים, דגים טורפים, דייגים) תפקיד חשוב מזה שנחקר עד כה, יש מקום לחקור מקומה של קבוצה זו במארג המזון.

התפתחות התבוננות שלנו לגבי מארג המזון בכנרת משקף במידה רבה את ההתפתחויות בתחום האקולוגיה האקוטיית בכלל.

לאחרונה החל במעבדה מחקר של המסלול המיקוטי (ראו פרק 3.7) – מסלול מיקרוביאלי נוסף בו פטריות טפיליות מקבוצת הכיטרידים משתתפים במיחזור נוטריאנטים ומהווים בעצמם מזון לזואופלנקטון.

The Kinneret pelagic foodweb



איור 38: תיאור סכמתי של מארג המזון בכנרת. הסרגל משמאל מציין רמות טרופיות, הצורות הגיאומטריות מציינות קבוצות פונקציונליות: ריבועים - אורגניזמים אוסמוטרופיים, עיגולים - יצורים הרביבורים, משושים - טורפים מדרגה 1, משולש - טורפי על. החיצים בין הקבוצות הפונקציונליות מציינים מעבר פחמן C, חנקן N וזרחן P בין המרכיבים השונים, ועובי החיצים פרופורציונלי לשטף. חיצים מעגליים בתוך קבוצה מסוימת מעידים על קניבליזם או תזונה בתוך הקבוצה. למשל בקבוצת המיקרוזואופלנקטון, μZ, רוטיפרים ניזונים מריסניות ושוטונות. בקבוצת הדגים הצמחוניים, fF, הכוונה היא לדגים שטורפים את הצעירים בקבוצה זו. חיצים שיורדים ל"דיסק הנוטריאנטים" מציינים מינרליזציה או שחרור נוטריאנטים כמו גם אובדן כחומר דטריטלי.

1.13 חלזונות וצדפות

תמר זהרי, בני סולימני

ב-2012 התחלנו בניטור שגרת של מולוסקה (= רכיכות, חלזונות וצדפות) בליטורל של הכנרת. הדיגום מתבצע פעמיים בשנה, בתקופת מפלס המינימום ושוב בתקופת מפלס המקסימום, בחמש תחנות סביב הכנרת (חוקוק, גינוסר, חמי טבריה, גופרה, שיטים) ובכל תחנה בשלשה עומקים: 0.3 מ', 2.5 מ', 5 מ'. אי לכך, עם שינוי המפלס מיקום נקודות הדיגום משתנה בין דיגום אחד למשנהו. בעומקים 2.5 מ' ו-5 מ' הדיגום מתבצע מסירה ובצלילה בעוד שבעומק הרדוד הוא מתבצע מהחוף עם מסכה ושנורקל. באמצעות מסגרת מתכת אנו תוחמים באופן אקראי ובשתי חזרות בכל עומק דיגום ריבוע של 33.3×33.3 ס"מ של קרקעית האגם בעומק הדיגום, אוספים את כל התשתית שבתוך הריבוע: חול ואבנים לתוך דלי, מביאים את החומר שנאסף למעבדה לזיהוי וספירת הרכיכות החיות (קונכיות וצדפות ריקות לא נספרות). התוצאות מוצגות כמספר פרטים למ"ר מכל מין, תחנה ועומק.

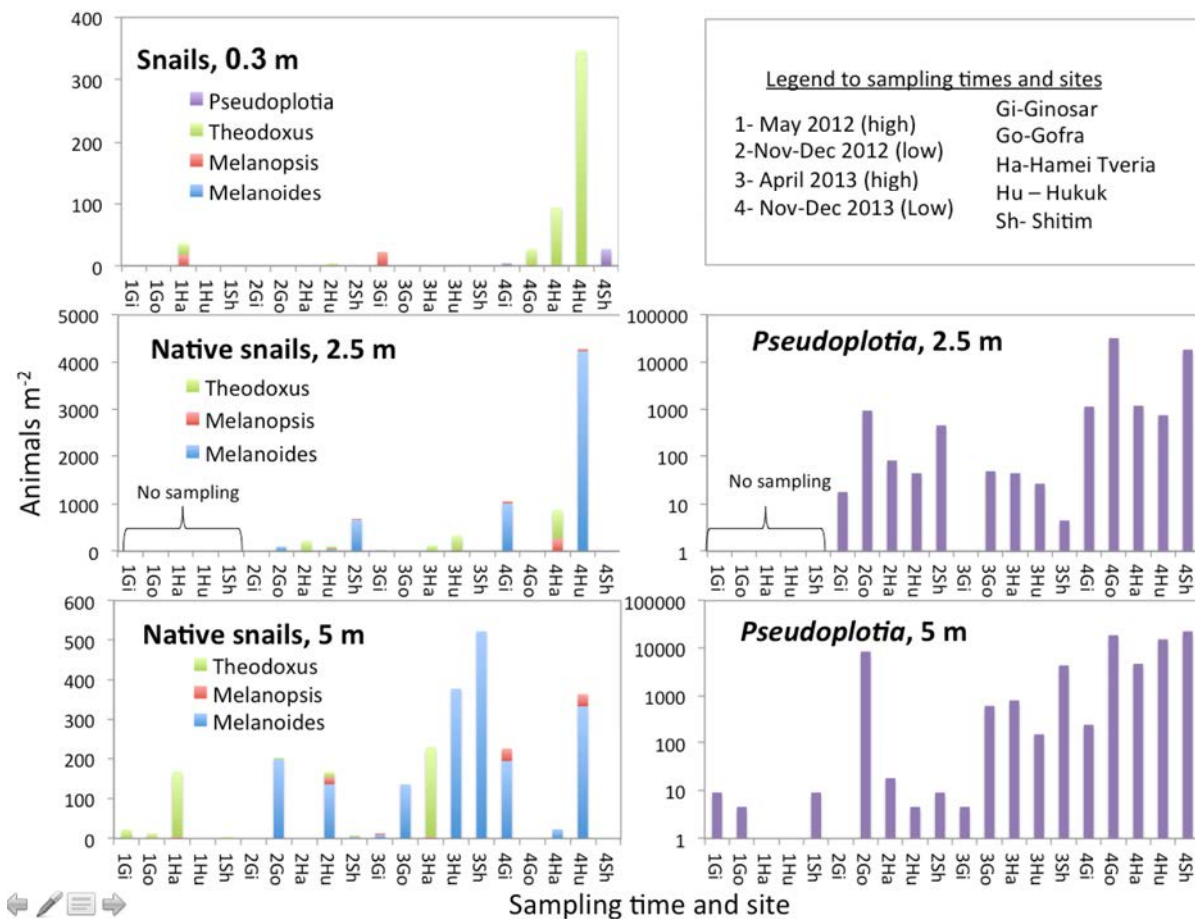
אחת התופעות שחוזרות על עצמה היא הפיזור המרחבי המאד לא אחיד של הרכיכות. באופן בולט, ההבדלים במספר הפרטים בין שתי החזרות שנדגמות בכל עומק הם לעיתים גדולים מאד, למרות שהמרחק בין הריבועים הנדגמים הוא של מטרים בודדים.

תופעה נוספת שחוזרת על עצמה היא שכמות הרכיכות במים הרדודים (0.3 מ') נמוכה בהרבה מאשר במים העמוקים יותר (2.5 ו-5 מ'). ברוב הדיגומים והתחנות לא נמצאו חלזונות כלל או פרטים בודדים, אם כי בדיגום בסתו 2013 (דיגום מס' 4) נמצאו עשרות עד מאות של פרטים של סהרונית (תיאודוקסוס). המין הפולש, פסאודופלוטיה, לא נמצא כלל ברוב הדיגומים והתחנות (איור 39).

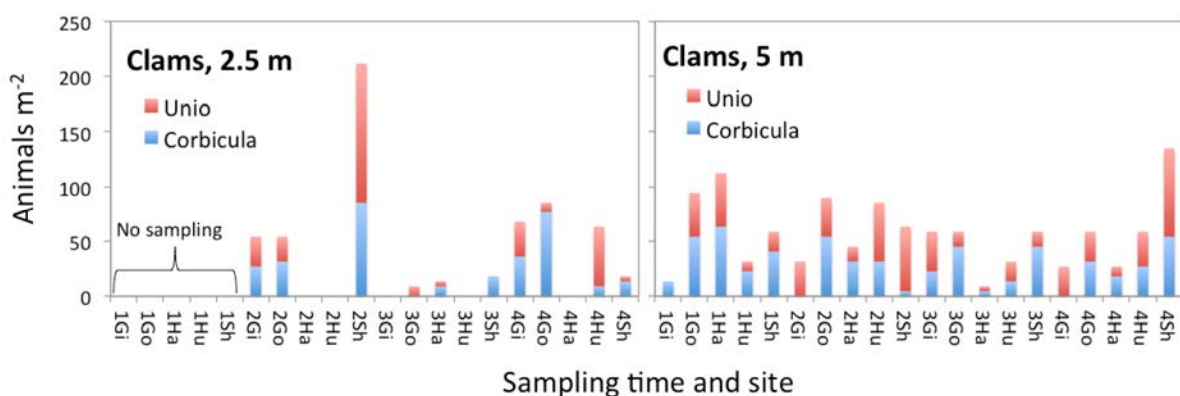
לעומת זאת בעומקים 2.5 ו-5 מ' נמצאו בכל דיגום ודיגום עשרות עד עשרות אלפי פרטים של חלזונות. המספרים הגבוהים ביותר היו של המין הפולש, פסאודופלוטיה, שנמצא בכל התחנות והדיגומים, למעט גינוסר בעומק 2.5 מ' באביב 2013 (דיגום מס' 3). מין זה היה נפוץ במיוחד בסתו 2013 (דיגום 4) בכל התחנות, עם ריכוזים מעל 30,000 פרטים למ"ר (איור 39). גם המינים הטבעיים לאגם נרשמו בתחנות אלו, אך בריכוזים נמוכים בהרבה (איור 39), של עשרות (שחריר) עד מאות (מגדלית, סהרונית).

ניתן לסכם את הממצאים עד כה בכך שהחלזון הפולש הוא עדיין המין הדומיננטי בכנרת שדחק את מיני החלזונות הטבעיים. הוא כנראה מעדיף את המים העמוקים יותר ואת התשתית החולית, אם כי ניתן למצוא אותו גם על אבנים. חשוב לציין שהמגדלית חזרה לכנרת. בשנים 2010-2011 מין זה לא נצפה כלל.

צדפות משני המינים המוכרים בכנרת (אוניו וקורביקולה) נעדרו לגמרי מהמים הרדודים: בכל התחנות ובכל תאריכי הדיגום לא נדגם אפילו פרט חי אחד של שני מינים אלו בעומק 0.3 מ' (הנתונים לא מוצגים). לעומת זאת ב-5 מ' נדגמו שני מיני הצדפות בכל תאריכי הדיגום והתחנות, בריכוזים של עשרות צדפות מכל מין למ"ר (איור 40). בעומק הביניים נמצאו ערכי ביניים, צדפות נמצאו בחלק מהתחנות ובחלק מהתאריכים. יוצא דופן היה ריכוז גדול של צדפות (כ-100 פרטים למ"ר מכל מין) בחוף שיטים בנוב' 2012 (מפלס מינימום).



איור 39: ריכוזי החלזונות מהמינים השונים (מס' פרטים למ"ר) בחמש תחנות דיגום במפלסי מינימום ומקסימום ובעומקים שונים בשנים 2012 – 2013. המספרים לאורך ציר איקס מציינים את מספר הדיגום (מ-1 עד 4) כאשר המספרים הזוגיים נדגמו במפלסי מינימום והאי-זוגיים במפלסי מקסימום, האותיות הן קיצור לשם התחנה. תאריכי הדיגום ושמות התחנות מפורטים באיור עצמו. בעומקים 2.5 ו-5 מ' הערכים עבור המין *Pseudoplotia scabra* מוצגים בנפרד ובסקלה לוגריתמית בגלל הערכים הגבוהים של ריכוזי החלזונות בחלק מהתחנות ותאריכי הדיגום.



איור 40: ריכוזי הצדפות מהמינים השונים (מס' פרטים למ"ר) בחמש תחנות דיגום במפלסי מינימום ומקסימום ובעומקים שונים בשנים 2012 – 2013. צדפות לא נמצאו אף פעם במים הרדודים ולכן הנתונים לא מוצגים. הקודים לתאריכי הדיגום ושמות התחנות שעל ציר איקס כבאיור 39.

1.14 חומר אורגני ואנאורגני מומס

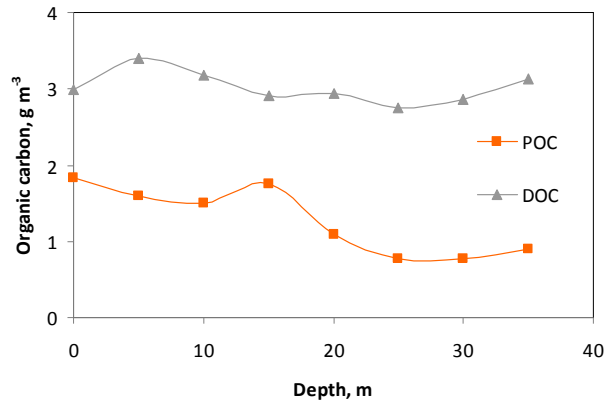
ורנר אקרט ובני סולימני

מדדנו את ריכוזי הפחמן המומס בעמודת המים בתחנה A עפ"ר ב-8 עומקים, במקביל למדידה של ריכוז החומר החלקיקי באותם העומקים. 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 הריכוז של הפחמן האורגני והאי-אורגני המומס במים. המדידה בוצעה באמצעות TOC-V cph/cpn Total Organic Carbon Analyzer של SHIMADZU המודד את ערכי הפחמן ע"י חישן אינפרא אדום.

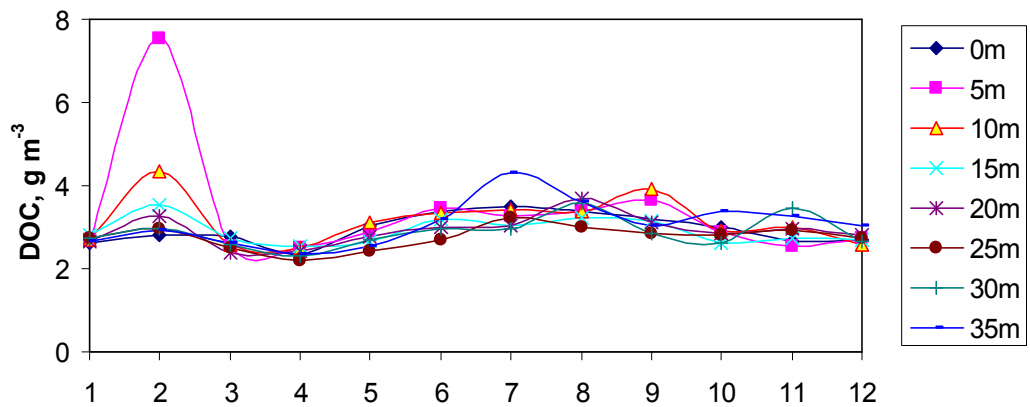
חומר אורגני היווה את חלק הארי של החלקיקים בכנרת. ריכוזו הממוצע בחלקיקים נע בין 27 ל-62% מהפחמן האורגני המומס (טבלה 5). בכל העומקים ובמרבית הדוגמאות שנבדקו על-ידינו (152/157), ריכוז החומר האורגני המומס היה גבוה מריכוז החומר האורגני החלקיקי. אולם, דגמי הפיזור האנכי של שני מרכיבים אלו של הפחמן האורגני במים היו שונים – השונות האנכית של ריכוזי הפחמן האורגני המומס הייתה נמוכה בעוד ריכוזי הפחמן האורגני החלקיקי היו גבוהים בשכבות העליונות ונמוכים יותר בעומקים של 15 מ' ומטה (איור 41). הפיזור האנכי של החומר האורגני החלקיקי משקף את פיזור כלל החלקיקים ואלה מצידם מושפעים ככל הנראה מפיזור הפיטופלנקטון בעמודת המים. השונות העיתית של הפחמן האורגני המומס הייתה נמוכה ביותר להוציא את ממצאי חודש פברואר, כאשר ריכוזים גבוהים באורח בולט נמצאו בעמודת המים העליונה (איור 42), קרוב לודאי כמוצר לוואי של הופעה מסיבית של מיקרוציסטיס בקרבת פני המים. ריכוזי הפחמן האי-אורגני המומס היו גבוהים בסדר גודל מריכוזי הפחמן האורגני המומס (טבלה 5). שני המשתנים היו בלתי תלויים לחלוטין, כאשר דגם הפיזור האנכי הממוצע של הפחמן האי-אורגני המומס הראה מגמה ברורה של עלייה מפני המים אל עבר הקרקעית (איור 43) בפרק הזמן בו שורת הומותרמיה בכנרת, אבל, פיזור החומר האי-אורגני המומס היה אחיד למדי בכל עמודת המים (איור 44). עם התייצבות השיכוב החומני נראתה מגמה של עלייה בריכוז החומר האי-אורגני המומס בשכבות שמתחת לתרמוקלינה ואילו באפילימניון החלה עלייה במרכיב זה עם תחילת שקיעת התרמוקלינה בספטמבר.

טבלה 5: ריכוז כלל החלקיקים (TSS), שיעור החומר האורגני בחלקיקים (LI), ריכוז החומר האורגני החלקיקי (POC), ריכוז החומר האורגני המומס (DOC) וריכוז החומר האי-אורגני (DIC) בעמודת המים של הכנרת, שנמדדו בשמונה עומקים בתחנה A ב-2013.

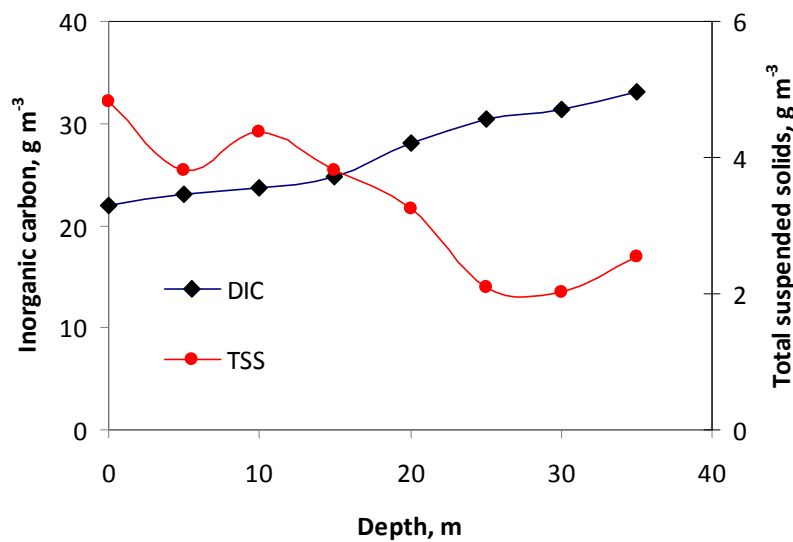
Depth	TSS, g m ⁻³	LI, %	POC, g m ⁻³	DOC, g m ⁻³	DIC, g m ⁻³
0	4.8	0.74	1.8	3.0	21.9
5	3.8	0.83	1.6	3.4	23.1
10	4.4	0.68	1.5	3.2	23.7
15	3.8	0.94	1.8	2.9	24.8
20	3.3	0.68	1.1	2.9	28.1
25	2.1	0.81	0.8	2.7	30.5
30	2.0	0.80	0.8	2.9	31.4
35	2.6	0.71	0.9	3.1	33.0



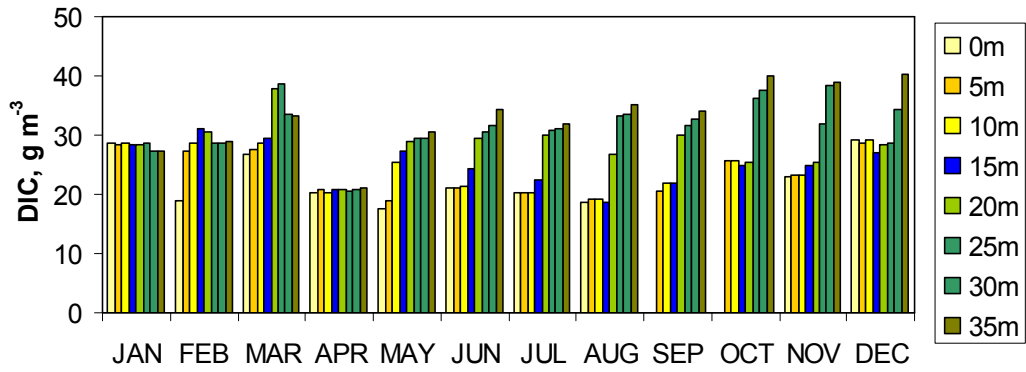
איור 41: ממוצעי הריכוזים של החומר האורגני החלקיקי (POC) והחומר האורגני המומס (DOC) בעמודת המים של הכנרת, שנמדדו בתחנה A ב-2013.



איור 42: ממוצעים חודשיים של ריכוז פחמן אורגני מומס בכנרת ב-2013 בשמונה עומקי דיגום.



איור 43: שינויים עם העומק בממוצעי הריכוזים של החומר האי-אורגני המומס (DIC) וכלל החומר החלקיקי (TSS) בתחנה A ב-2013.



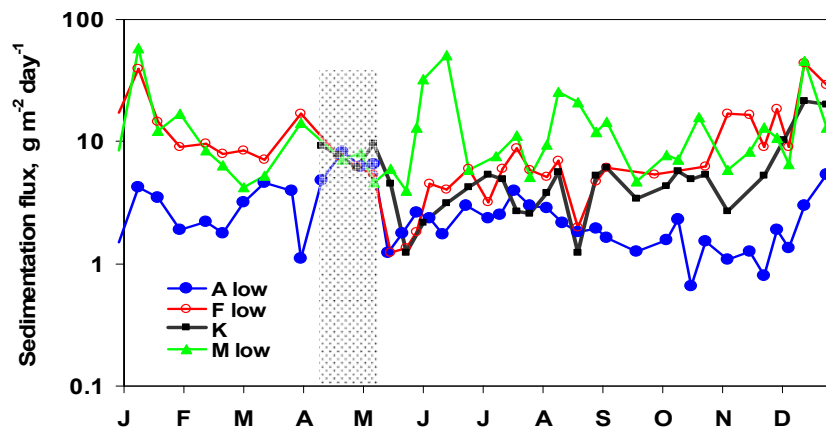
איור 44: השונות העיתית של ריכוז הפחמן האי-אורגני המומס בכנרת ב-2013 בשמונה עומקי דיגום.

1.15 סדימנטציה

איליה אוסטרובסקי וניר קורן

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

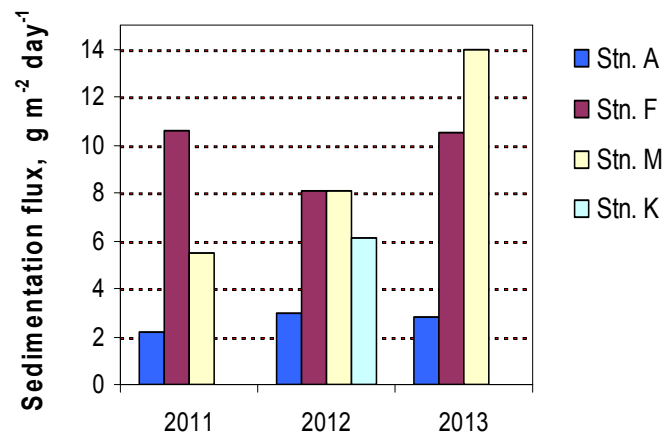
במהלך תקופת החורף ההולומיקטי (ינואר - דצמבר) קצבי הסדימנטציה בתחנות הפריפריאליות K ו-M היו גבוהים יותר מאשר בקיץ ובתחילת הסתיו (איור 45). במהלך תקופת שקיעת הקלציט (אפריל-תחילת מאי) נצפה גידול בקצב הסדימנטציה בתחנה A. תקופות של סדימנטציה מוגברת נצפו גם בקיץ בתחנה הרדודה ביותר - M.



איור 45: דינמיקה עונתית של קצבי הסדימנטציה בתחנות השונות ב-2013. תקופת השקעת CaCO_3 באפריל-מאי מודגשת.

בין מאי לנובמבר נעו קצבי הסדימנטציה בתחנה A בין 0.7 ל- 3.9 ג' חומר יבש/מ"ר/יום, בעוד שבתחנות F ו- K הם נעו בין 1.2 ל- 8.8 ג' חומר יבש/מ"ר/יום. בתחנה A קצבי סדימנטציה נמוכים (0.6-2.3 ג' חומר יבש/מ"ר/יום) נמדדו בעיקר בסתיו. הגברת קצב הסדימנטציה התרחשה בתחנה F בנובמבר, בעוד שבתחנות A ו- K – בדצמבר. עליה זו בסדימנטציה נגרמה עקב ההעמקה של הטרמוקלינה והשקעה מחדש של חומר חלקיקי טרי אשר הצטבר מתחת לטרמוקלינה. בתחנה הרדודה M נצפו שינויים גדולים בקצבי הסדימנטציה (3.9-58.6 ג' חומר יבש/מ"ר/יום) במהלך השנה.

במהלך 2013 קצבי הסדימנטציה הממוצעים השנתיים בתחנות A, F ו- M היו 2.8, 10.5 ו- 14.0 ג' חומר יבש/מ"ר/יום, בהתאמה. עבור תחנה K לא חושבו קצבים שנתיים עקב מחסור בנתונים לחודשים ינואר עד אפריל (איור 45). בתחנות A, F ו- M קצבי הסדימנטציה הממוצעים היו די דומים לערכי הממוצעים הרב שנתיים ($\pm SE$) אשר חושבו לתקופה 2012-1999, 3.3 ± 0.3 , 9.3 ± 0.8 ו- 14.0 ± 1.5 ג' חומר יבש/מ"ר/יום, בהתאמה. במהלך 3 השנים האחרונות קצבי הסדימנטציה השנתיים הממוצעים נשארו יחסית ללא שינוי בתחנות A ו- F אך גדלו בצורה משמעותית בתחנה M (איור 46). תופעה זו עשויה להיות מיוחסת לריקבון של הצמחיה המוצפת בליטורל.



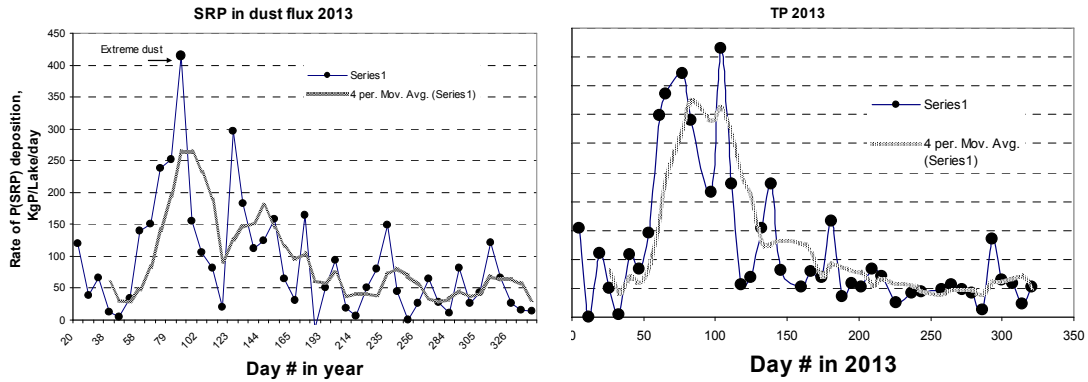
איור 46: קצבי סדימנטציה ממוצעים במיקומים השונים ב- 2011 - 2013.

1.16 זרחן באבק

עמי נשרי, אדית ליבוביץ, ניר קורן

בשנת 2013 עברנו למתכונת ניטור שגרתי של הזרחן באבק במסגרת מערך הניטור של האגם. דיגום האבק מבוצע ע"י הצבת דליים מלאים במים מזוקקים מורעלים בסודיום אזיד. נפח הדלי המלא הוא כ- 18 ל' ושטח הפנים העליון שלו 650 סמ"ר. יש צורך לשמור על מפלס מקסימלי של המים בדלי. הדלי מכוסה ברשת גסה למניעת עמידת ציפורים על דפנות הדלי. הדליים, 4 חזרות בכל פעם, מוצבים על גג המעבדה לחקר הכנרת במרחקים של כ- 2 מ' זה מזה. אחת לשבוע בממוצע תכולת הדלי מסוננת לאיסוף החומר החלקיקי והדלי מוצב לתקופת איסוף האבק הבאה. מים מזוקקים לקיזוז הפסדי אידוי מוספים בהתאם לעונה ולצורך. התוצאה המדווחת מהווה ממוצע של 4 החזרות אלא אם כן דלי אחד מפגין חריגות (בכיוון מעלה) והוא מוגדר כמזוהם בזרחן ולא נכלל במסגרת הממוצע. הנחת הבסיס היא שמה שנמדד על גג המעבדה מייצג את כל האגם.

ניתן להבחין ב-2 תקופות עיקריות לשטפי זרחן באבק (איור 47): אביב עם שטפים גדולים יחסית וקייץ-סתיו-חורף עם שטפים קטנים יותר.



איור 47: שטפי זרחן מומס (משמאל) וזרחן כללי (מימין) בכנרת ב-2013. הקו המעובה המרוסק מייצג ממוצע רץ (ל-4 תקופות איסוף אבק).

רוב הזרחן הנמדד הוא "מומס". מכיון שהזרחן הגיע לדלי עם חלקיקי אבק, סביר שהוא הופך להיות זרחן מומס עקב השהות בדלי, אבל זה גם הצפי במי האגם. השטפים האגמיים הממוצעים לחודש באביב הם בין 7 ל-8 טון זרחן ואילו השטפים הממוצעים ביתר העונות הם בסדר גודל של 1.5 טון זרחן לחודש. אירוע חריג חל במרץ 2013: לקראת סוף מרץ התחילה הופעת אבק מאסיבית עם שיא ב-30 למרץ. מועד זה היה גם מועד שיא כניסות הזרחן ה"מומס" לאגם באמצעות אבק. סה"כ הכניסה השנתית של זרחן מומס באמצעות אבק ב-2013 היא בערך 31 טון זרחן, כמות שהיא גדולה יותר מאשר כניסות הזרחן המומס מהירדן והנחלים. הדבר בולט בעיקר בקייץ שבו כניסות הירדן הם בסדר גודל של חצי טון ואילו כניסות הזרחן באבק כ-1.5 טון זרחן לחודש. משמעות הדבר שלאבק תרומה חשובה ועיקרית למאזן הזרחן באגם, תרומה שחשוב להמשיך ולכמת אותה. מסיבה זאת, בתחילת 2014 הוספנו תחנת דיגום אבק נוספת במזרח האגם, התוצאות מתחנה זו ידווחו בשנה הבאה.

1.17 אינדיקטורים לזיהום צואתי

אורה הדס, ריקי פנקס, נחמה מלינסקי-רושנסקי

במסגרת הניטור השגרתי נבחנו סמנים (אינדיקטורים) חיידקים לזיהום צואתי המצביעים על זיהום בקטריאלי של מי האגם. מצורפות תוצאות הבדיקות החודשיות ב-14 אתרים סביב הכנרת (טבלה 6-14) הכוללים: (א) אתרי שאיבה; (ב) חופים מייצגים; (ג) מקום כניסת הנחלים לכנרת. התוצאות מדווחות כמספר חיידקים ל 100 מ"ל מים. הבדיקות נעשו בשיטת ה - Membrane filter. החיידקים שנבדקו הם: קוליפורמים צואתיים (Fecal coliforms), אשריכיה קולי (*Escherichia coli*) ואנטרוקוקי (Enterococci).

השנה ההידרולוגית 2012-2013 החלה עם גשם באוקטובר ומשקעים משמעותיים בנובמבר-דצמבר 2012 (97.4, 132.6 מ"מ גשם, בהתאמה) כלומר עד סוף 2012 הצטברו כמויות גשם של 230 מ"מ. מכאן, שהשטיפה הראשונה של אגן ההקוות נעשתה כבר בנובמבר - דצמבר 2012 וזרימות שטפוניות התבטאו בעליה במספר האינדיקטורים לזיהום צואתי בכניסת הירדן לכנרת עם 3600 קוליפורמים צואתיים, 912 אשריכיה קולי, 5720 אנטרוקוקים ל 100 מ"ל מים (טבלה 6, 1-14). ארוע הגשם החזק הבא עם 171.9 מ"מ גשם, בינואר 2013, כבר היה לאחר שרוב הזיהום החיידקי מאגן ההיקוות נשטף והגיע לכניסת הירדן בדצמבר. בכל התקופה מינואר ועד סוף מאי 2013, במשך חמישה חודשים, ירדו סה"כ 267 מ"מ גשם, עם מרץ כמעט יבש ופברואר עם 21.2 מ"מ גשם בלבד. משטר חלוקת המשקעים ב 2013 מתבטא במספרי האינדיקטורים לזיהום צואתי. בחודשים פברואר, מרץ, אפריל נספרו בכניסת הירדן לכנרת בין 290 ל 104 חיידקים קוליפורמים צואתיים ב 100 מ"מ מים. מספרים אלה קטנים בסדר גודל בהשוואה לשנת 2012, מאחר ורוב הזיהום החיידקי כבר

נשטף עם הגשמים הראשונים (ראה לעיל). לגבי סוף שנת 2013 (שנה הידרולוגית חדשה) באוקטובר ירד הגשם הראשון ובדצמבר נמדדו 133.6 מ"מ גשם ללא זרימות שטפונית כך שמספרי החיידקים נמוכים (טבלה 6 (1-14)). יש לציין שבמשך כל שנת 2013, באתרי השאיבה ובמקום כניסת הנחלים לירדן מספרי האינדיקטורים לזיהום צואתי נמוכים. ושוב המסקנה, שהגשמים הראשונים שוטפים את אגן ההיקוות ועם תחילת הזרימות בירדן מתחיל להגיע רוב הזיהום החיידקי, בעיקר בפעימה הראשונה.

כל הנאמר לעיל מצביע, כל שנה מחדש, על הקשר בין זרימות בנחלים לבין זיהום בקטריאלי באגם. הדבר נכון הן לצפון הכנרת והן בדרום. בקיץ יש מספרים נמוכים של חיידקים האינדיקטורים לזיהום צואתי בכל תחנות הדיגום.

טבלה 6 (1-14): אינדיקטורים חיידקיים לזיהום צואתי (מס' חיידקים ב-100 מ'ל מים) בתחנות שונות ב- 2013

1 Jordan inflow				2 Water carrier intake			
	Fecal C.	E. coli	Enteroc.		Fecal C.	E. coli	Enteroc.
Jan.	36	15	13	Jan.	27	14	12
Feb.	290	80	33	Feb.	11	3	3
Mar.	216	112	40	Mar.	6	3	2
Apr.	104	42	42	Apr.	1	1	1
May.	9	6	6	May.	5	1	7
Jun.	2	1	0	Jun.	2	2	0
Jul.	5	0	2	Jul.	7	0	1
Aug.	6	0	3	Aug.	14	2	0
Sep.	11	7	2	Sep.	2	0	0
Oct.	12	12	9	Oct.	4	0	1
Nov.	20	11	6	Nov.	2	0	1
Dec.	22	10	25	Dec.	13	6	7

3 Golan Intake				4 Tiberias intake			
	Fecal C.	E. coli	Enteroc.		Fecal C.	E. coli	Enteroc.
Jan.	2	1	0	Jan.	12	11	9
Feb.	3	0	0	Feb.	1	0	0
Mar.	3	4	0	Mar.	1	1	0
Apr.	4	1	5	Apr.	0	1	0
May.	6	1	2	May.	4	0	5
Jun.	5	0	2	Jun.	3	1	3
Jul.	15	5	5	Jul.	62	9	7
Aug.	5	1	0	Aug.	13	0	2
Sep.	6	4	8	Sep.	3	2	1
Oct.	70	15	17	Oct.	0	0	0
Nov.	83	8	11	Nov.	11	2	1
Dec.	3	3	3	Dec.	8	8	9

5 Jordan Valley intake				6 Kursy			
	Fecal C.	E. coli	Enteroc.		Fecal C.	E. coli	Enteroc.
Jan.	62	42	45	Jan.	2	1	1
Feb.	31	12	11	Feb.	26	12	7
Mar.	6	1	2	Mar.	4	2	7
Apr.	2	2	0	Apr.	21	3	18
May.	0	0	1	May.	27	3	21

Jun.	0	0	1
Jul.	10	3	5
Aug.	6	1	0
Sep.	4	5	0
Oct.	5	5	5
Nov.	5	5	5
Dec.	9	2	0

Jun.	12	4	3
Jul.	144	11	32
Aug.	2	2	1
Sep.	5	6	3
Oct.	21	3	1
Nov.	32	8	5
Dec.	10	3	9

7 Amnun

	Fecal C.	E. coli	Enteroc.
Jan.	74	29	25
Feb.	210	80	31
Mar.	16	6	7
Apr.	9	6	1
May.	9	1	0
Jun.	7	1	0
Jul.	5	2	3
Aug.	4	0	3
Sep.	16	4	9
Oct.	3	2	14
Nov.	7	4	0
Dec.	20	10	19

8 Dugit

	Fecal C.	E. coli	Enteroc.
Jan.	15	9	6
Feb.	25	12	24
Mar.	14	5	7
Apr.	134	4	70
May.	45	30	15
Jun.	20	12	2
Jul.	132	20	44
Aug.	6	1	2
Sep.	2	1	0
Oct.	31	19	10
Nov.	9	4	2
Dec.	1	1	3

9 Zachi

	Fecal C.	E. coli	Enteroc.
Jan.	24	10	12
Feb.	35	33	19
Mar.	10	8	8
Apr.	5	2	2
May.	2	2	11
Jun.	6	2	0
Jul.	8	3	10
Aug.	3	2	10
Sep.	4	2	5
Oct.	8	6	3
Nov.	3	3	2
Dec.	0	0	4

10 Masudia

	Fecal C.	E. coli	Enteroc.
Jan.	11	11	10
Feb.	21	8	6
Mar.	4	3	6
Apr.	6	3	2
May.	5	1	17
Jun.	1	0	1
Jul.	10	4	23
Aug.	3	2	9
Sep.	4	1	3
Oct.	2	1	0
Nov.	9	6	3
Dec.	1	1	0

11 Maagan Beach

	Fecal C.	E. coli	Enteroc.
Jan.	27	13	11
Feb.	18	15	1
Mar.	0	0	1
Apr.	2	2	3
May.	3	0	2
Jun.	0	0	0
Jul.	10	4	0
Aug.	27	4	7
Sep.	3	1	1
Oct.	1	0	0
Nov.	6	5	12
Dec.	9	2	2

12 Alumot

	Fecal C.	E. coli	Enteroc.
Jan.	5	3	2
Feb.	13	10	3
Mar.	0	0	0
Apr.	2	1	1
May.	2	0	0
Jun.	1	0	0
Jul.	4	2	5
Aug.	26	0	10
Sep.	2	0	0
Oct.	2	0	0
Nov.	0	0	0
Dec.	6	2	1

13 Amud inflow				14 Yarmuch			
	Fecal C.	E. coli	Enteroc.		Fecal C.	E. coli	Enteroc.
Jan.	1	0	1	Jan.	50	28	23
Feb.	1	1	0	Feb.	12	1	2
Mar.	0	0	0	Mar.	4	0	0
Apr.	1	0	0	Apr.	1	1	2
May.	0	0	2	May.	3	0	0
Jun.	0	1	2	Jun.	1	0	0
Jul.	1	0	0	Jul.	0	0	0
Aug.	9	0	16	Aug.	22	0	5
Sep.	0	0	0	Sep.	1	1	0
Oct.	4	1	0	Oct.	2	0	0
Nov.	0	0	0	Nov.	1	0	0
Dec.	1	0	1	Dec.	4	2	1

1.18 רעלני ציאנובקטריה

אסף סוקניק, דיתי ויינר-מוציני, איליה אוסטרובסקי, שמואל כרמלי (אונ' תל-אביב) ו Ramsy Agha (UAM, Spain)

המערך האנליטי לזיהוי ולכימות רעלני ציאנובקטריה בכנרת פועל ברציפות החל משנת 2000. דגימות מים נאספות בתחנה A בכנרת בתדירות של אחת לחודש. באירועים של פריחת מיקרוציסטיס היוצרת משטחים צפים, נדגמים משטחי הציאנובקטריה בדלי ונמדד ריכוז הרעלנים בביומאסה. באירועים של פריחת אפניזומנון נדגמת גם הביומסה באמצעות גרירת רשת של 20 מיקרומטר. לאחר מיצוי וריכוז, הדגימות נלקחות לאנליזה איכותית וכמותית לרעלנים משתי קבוצות: מיקרוציסטינים (שמקורם בעיקר מיקרוציסטיס) וצלינדרוספרמופסין (מאפניזומנון). המדידות מבוצעות בשיטות HPLC מתאימות והתוצאות מוצגות כריכוז הרעלן ליחידת נפח מים (בדגימות מים) או כריכוז הרעלן בביומאסה (ליחידת משקל יבש). תוצאות הזיהוי והכימות של רעלני ציאנובקטריה בכנרת בשנת 2013 מוצגות בטבלה 7. בשנת 2013 נרשמה בכנרת נוכחות של מיקרוציסטיס החל מחודש ינואר ובמהלך כל חודשי החורף. במהלך העונה נצפו ארועים רבים של צופת של מיקרוציסטיס וריכוז הרעלנים בביומאסה נע בין מאה למעל אלף מיקרוגרם לגרם חומר יבש (טבלה 7).

בעונה זו, ריכוז מיקרוציסטינים מוכרים (YR, LR, RR) במים היה מתחת לסף הגילוי, אולם בשיא, הפריחה בסוף פברואר, נמדדו מיקרוציסטינים גם במים וריכוזם הכולל היה בגבול 1 מיקרוגרם לליטר, כתלות במקום הדיגום (פרטים בהמשך). מיקרוציסטינים בריכוז נמוך נמצאו גם בדגימת מים מאפריל תוצאה המייצגת ככל הנראה את יציבות הרעלנים במים.

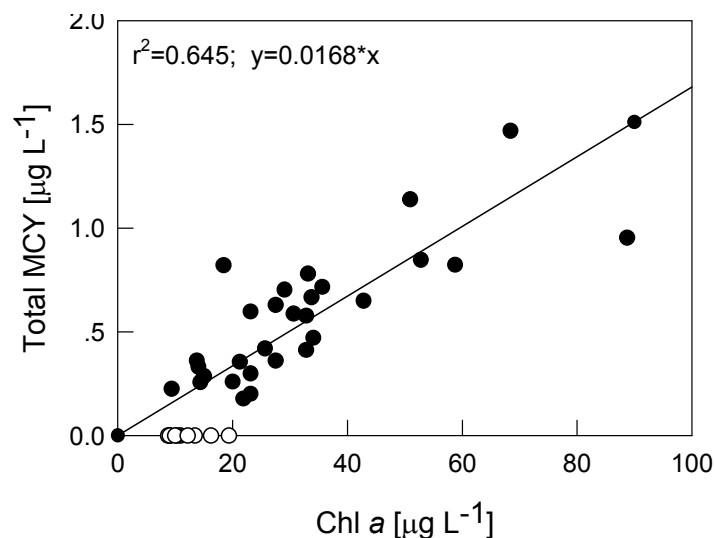
בחודשי הקיץ והסתיו של שנת 2013 נצפתה בכנרת אוכלוסייה מתונה של אפניזומנון ששיאה היה מאוגוסט ועד נובמבר 2013. בתקופה זו לא נמצאו עקבות של צלינדרוספרמופסין לא בדגימות מים ולא בדגימות ביומאסה שנאספו ברשת פלנקטון. תוצאות אלו מעידות על תפוצה נמוכה מאד של אפניזומנון בכנרת ב 2013.

טבלה 7: ריכוז רעלני כחוליות (צלינדרוספרמופסין ומיקרוציסטינים) בדגימות מים וביומאסה של פיטופלנקטון שנאספו מהכנרת במועדים שונים במהלך שנת 2013. הדגימות נאספו בתדירות של אחת לחודש או בתדירות גבוהה יותר במידה ונצפתה התפתחות של ציאנובקטריה באגם. באירועים אלו רוכזה הביומאסה של הפיטופלנקטון על ידי סינון או איסוף ברשת ונקבעה נוכחות הרעלנים בביומאסה. במועדים מסוימים בהם נצפתה באגם צופת של מיקרוציסטיס נאספה דגימת צופת ובוצעה אנליזה על בסיס משקל יבש של החומר שנאסף. תס"ג – תחת סף גילוי. לא נבדקו ריכוזי הרעלנים בביומאסה במועדים בהם לא נצפתה אוכלוסייה של ציאנובקטריה מייצרות רעלנים.

תאריך דיגום	ריכוז צלינדרוספרמופסין במים (µg/L)	ריכוז צלינדרוספרמופסין בביומאסה (µg/g dw)	ריכוז מיקרוציסטינים במים (µg/L)	ריכוז מיקרוציסטינים בביומאסה (µg/g dw)
13.1.13	תס"ג		תס"ג	
15.1.13			YR=374; LR=409; RR=84; Mic Like=25	
23.1.13			YR=92; LR=64; RR=37;	
27.1.13			YR=47; LR=52; RR=26; Mic Like=2	
30.1.13			Mic Like=1.17	
11.2.13			YR=41; LR=31; RR=14; Mic Like=1.5	תס"ג
18.2.13	תס"ג			תס"ג
26.2.13			YR=165; LR=132; RR=117; Mic Like=4	
27.2.13			YR=193; LR=163; RR=278; Mic Like=14.3	YR=0.27-0.9; LR=0.1-0.18; RR=0.14-0.4;
6.3.13				תס"ג
13.3.13			YR=26; LR=51; RR=103;	
17.3.13	תס"ג			תס"ג
20.3.13				תס"ג
7.4.13	תס"ג		YR=0.2; RR=0.13	
28.4.13				תס"ג
19.5.13				תס"ג
16.6.13				תס"ג
14.7.13				תס"ג
22.7.13		תס"ג		
11.8.13		תס"ג		
14.8.13		תס"ג		
1.9.13		תס"ג		
8.9.13		תס"ג		
15.9.13		תס"ג		
13.10.13		תס"ג		
10.11.13		תס"ג		
16.12.13		תס"ג		

אירועי פריחה במהלך חורף 2013, והתפוצה הגבוהה של אוכלוסיית המיקרוציסטיס באגם אפשרה ביצוע מערך דיגום מפורט אשר עקב אחר הדינמיקה של אוכלוסיית המיקרוציסטיס באגם. במספר ימי פעילות שהתקיימו בפברואר ומרץ 2013 נאספו דגימות מים מעומקים שונים ובאזורים שונים באגם בהם נצפתה צופת של מיקרוציסטיס. בדגימות שנאספו נקבע ריכוז מיקרוציסטינים, ריכוז כלורופיל, התפוצה של מושבות מיקרוציסטיס, וכן אופינו המטאבוליטים המשניים המיוצרים על ידי מיקרוציסטיס. אנליזה שבוצעה על יותר מ 40 מידגמים שנאספו בעומקים ובאתרים שונים הראתה קשר בין ריכוז הכלורופיל במים וריכוז הכולל של מיקרוציסטינים (איור 48). ככלל, ניתן לראות מתאם גבוה בין ריכוז מיקרוציסטינים וכלורופיל. הפיזור הגבוה יחסית סביב קו הרגרסיה מקורו ככל הנראה בהרכב מגוון של

הפיטופלנקטון בדגימות, הן מבחינת הרכב המינים (מיקרוציסטיס ומיני אצות אחרות) והן מבחינת רמת הרעילות של אוכלוסיית המיקרוציסטיס. באיור 48 מופיעות תוצאות של מידגמים שלא נמצאו בהם מיקרוציסטינים (נקודות ריקות על קו $y=0$). תוצאות אלו מיצגות ככול הנראה אוכלוסיות בהן אוכלוסיה דומיננטית של אצות ירוקיות או אחרות, וריכוז המיקרוציסטיס נמוך במיוחד וכך גם ריכוז הרעלן. בכל הדגימות בהן נמצאו מיקרוציסטינים נמצא מיקרוציסטין-YR (30 מדגמים מתוך 40) כרכיב דומיננטי. מיקרוציסטין-RR היה שני בחשיבותו ונמצא ב 19 מדגמים ומיקרוציסטין-LR נמצא רק ב 8 מהמדגמים. נוכחות של שלושת הרעלנים יחד נמצאה רק ב 6 מדגמים. ממצאים אלו מעלים את האפשרות שאוכלוסיית המיקרוציסטיס באגם מורכבת ממינים שונים וממושבות בעלות פנוטיפ שונה של רעלנים. שילוב הרעלנים השונה מוגדר בספרות כ chemotype ומאפשר אפיון של האוכלוסיה באמצעים כימיים מוגדרים ולא רק על בסיס מורפולוגיה של התאים והמושבות.



איור 48: יחס בין ריכוז כלורופיל וריכוז כולל של מיקרוציסטינים בדגימות מים שנאספו בעומקים ואתרים שונים בכנרת באירוע פריחה של מיקרוציסטיס בסוף פברואר 2013.

את סיווג המושבות של מיקרוציסטיס ושל אוכלוסיות הנשלטות ע"י מיקרוציסטיס, לקבוצות המאופיינות על פי הרכב כימי של הרעלנים הנמצאים במערכת, ניתן להרחיב על ידי הכללה של מצאי מטאבוליטיים משניים המיוצרים ומופרשים על ידי מינים זונים שונים של מיקרוציסטיס. מעבר למיקרוציסטינים ניתן למצוא בקבוצה זו של חומרים מולקולות בעלות מבנה פפטידי מורכב ופעילות אופינית של עכוב אנזימים כמו פרוטאזות ופוספאטאזות. בין החומרים הללו ניתן למנות Microginin, Aeruginosin, Micropeptin, Cyanopeptolin, Anabaenopeptin ועוד. בכל קבוצה מספר רב של חומרים בעלי מבנה כימי דומה. בדגימות מים מהכנרת שנאספו במהלך פריחת המיקרוציסטיס בפברואר ומרץ 2013 נמצא מגוון של מטאבוליטים משניים. הזיהוי של חומרים אלו בוצע בעזרת ספקטרומטר מאסות מסוג MALDI-TOF.

בטבלה 8 מוצגת רשימת המטאבוליטים המשניים שנמצאה ב 18 דגימות מאירוע פריחה של מיקרוציסטיס. המדגמים נאספו מעומקים ואתרים שונים בכנרת. הרשימה מדגימה את מגוון השילובים של החומרים על פיהם ניתן להגדיר מספר קבוצות אופיניות chemotypes. בסה"כ בכ 90 דגימות שנאספו במהלך 3 ימי דיגום בסוף פברואר ובמרץ נמצא מגוון של כ 37 chemotypes, אבל לא ניתן היה לקבוע מאפיין ברור לפיזור ה chemotypes באגם. למועד הדיגום קשר חזק יותר למגוון ה chemotypes באגם מאשר למיקום הדיגום (מקום גיאוגרפי או עומק). אפיון מעמיק יותר של אוכלוסיות המיקרוציסטיס מתוכנן לחודשים הקרובים בפברואר – מרץ 2014 עם הופעה של האוכלוסיה החורפית של מיקרוציסטיס באגם.

טבלה 8 : מגוון מטאבוליטיים משניים שנמצאו בדגימות שנאספו מעומקים ואזורים שונים בכנרת במועד פריחה של מיקרוציסטיס באגם. שילוב המטאבוליטיים המשניים הנמצא בדגימות השונות מאפשר הגדרה של כ 18 chemotypes שונים. בשורה הראשונה בטבלה מצוינים המטאבוליטיים השונים נוכחות המטאבוליט מסומנת בספרה 1 והיעדרותו בדגימה בספרה 0.

#	Aeruginosin 98-Aa	Aeruginosin unknown	Mcyst-H4YR	Cyano-peptolin 1063	MCYS T-LR	MCYS T-RR	Anabeanopeptin F	MCYS T-YR	MCYS T-FR
1	1	1	0	0	1	1	0	1	0
7	1	1	0	0	1	0	0	1	0
12	1	0	1	1	0	0	0	0	0
21	1	1	0	0	1	1	0	1	0
31	1	1	0	0	0	1	0	1	0
38	1	0	0	0	1	1	0	1	0
39	1	1	0	0	1	1	0	1	0
1	1	1	0	0	1	0	0	0	0
15	1	0	1	0	1	1	0	0	0
16	1	0	1	1	1	1	0	0	0
19	1	0	1	1	1	0	0	0	0
20	1	1	0	1	1	1	1	0	0
4	1	1	0	0	1	1	0	0	0
21	1	1	0	1	1	1	0	1	0
23	1	1	1	1	1	1	0	0	0
3	1	1	0	0	1	1	0	0	0
9	1	1	0	1	1	1	0	0	0
10	1	1	0	0	1	1	1	1	0

1.19 חומרי הדברה

פג אסטרסון, עדית ליבוביץ'

דגימות מים לאנליזות של חומרי הדברה נלקחו 2-3 פעמים בחודש מהתחנות הדיגום השונות כנרת, במסגרת הדיגום השגרתי באגם. במקביל נאספו באופן שגרתי דגימות מים מגשר אריק וכן מספר דגימות ממי גשמים שנאספו על מרפסת המעבדה. כמו בשנים שעברו, נבדקו גם דגימות דגים ומים שנדגמו ע"י אגף הדיג מאגם הכנרת, מגופי מים בסובב כנרת, ומים התיכון. כל דגימות המים מוצו לממס אורגני ונבחנו ע"י מערכת GC/MS. זימי הדגים שהובאו למעבדה הופרדו מדגימות הדגים, מוצו ונבחנו באופן דומה לדגימות המים. תוצאות הניטור של דוגמאות המים מתחנות הכנרת וגשר אריק מרוכזות בטבלאות פא' ו'ב', תוצאות דגימות אגף הדיג מרוכזות בטבלאות פא' ו'ב' (מוזכרות רק התוצאות החיוביות).

כמו בשנים עברו, הריכוזים של כל חומרי ההדברה שנמצאו במי כנרת במסגרת הניטור השגרתי היו נמוכים מריכוז המהווה סכנה מידית. במחצית הראשונה של השנה Endosulfan- α נמצא ב- 83% מימי הדיגום בתחנה אחת לפחות (טבלה פא'), בריכוזים שהגיעו על למקסימום של 0.18 ppb. חומר נוסף המופיע זה מספר שנים באופן תדיר באגם ובירדן הצפוני הוא p,p-DDD (ב- 61% מימי הדיגום), שהגיע למקסימום של 0.11 ppb בסוף 2012. חומר זה הוא תוצר פירוק של חומר המוצא p,p-DDT המופיע רק ב- 22% מימי הדיגום במחצית השנה הראשונה (טבלה פא'). תופעה זו הגיונית שכן תוצרי הפירוק של DDT (DDE ו DDD) הם בעלי קצב פירוק איטי יותר מחומר המוצא. כפי שדווח בשנה שעברה חומר זה קיים בסדימנט ויש להניח שהוא עולה מידי פעם בעמודת המים. גם p,p-DDT וגם Endosulfan הינם חומרי הדברה מסחריים ששימושם הוגבל בישראל לפני מספר שנים אך נאסר לשימוש לחלוטין בארצות רבות אחרות.

טבלה 9א' : בדיקות מים (תחנות כנרת וירדן צפוני), תאריכים 27-11-2012 – 19-05-2013 (מתוך 18 ימי דיגום).
 התחנות מכוודות לפי צבע: גשר אריק: AB, תחנה A, תחנה D, תחנה G, תחנה H, תחנה K.

Comp/ Date	Chlor- pyriph os	Endosulfan α	Endo- sulfan β	p,p-DDD	p,p-DDT	Terbutryne
27-11-12				0.02(AB)		
03-12-12		0.01(G),0.06(H)			0.007(H)	
16-12-12	0.02(K)	0.004(H), 0.005(K)		0.11(A)		
25-12-12						0.004(AB)
30-12-12	0.02(G)	0.01(G)				
15-01-13		0.005(H), 0.18(K)		0.02(A),0.08(D), 0.08(G), 0.06(H),0.07(K)	0.016(K)	
16-01-13		0.16(AB)		0.03(AB)	0.02(AB)	0.002(AB)
03-02-13	0.01(D)	0.01(A)		0.03(D),0.002(G)		0.003(H)
17-02-13		0.005(G) ,0.01(H), 0.015(K)				
21-02-13		0.01(AB)				0.003(AB)
03-03-13		0.015(K)	0.2(A)	0.01(K)		
17-03-13		0.008(G),				
19-03-13		0.008(AB)		0.004(AB)		
07-04-13		0.01(A),0.01(K)	0.07(A)	0.04(A),0.08(H), 0.03(K)		
21-04-13		0.04(H),0.05(K)		0.007(H)		0.002(D)
28-04-13				0.05(AB)		
05-05-13		0.09(A),0.005(G) ,0.03(H)				0.003(K)
19-05-13		0.008(A), 0.07(H),0.03(K)		0.008(A)	0.008(H), 0.004(K)	0.005(A)

במחצית השנייה של השנה (טבלה 9ב') המצב נראה הפוך: p,p-DDD הופיע בכ-73% מימי הדיגום בהשוואה ל Endosulfan- α (39%). בנוסף לנגזרות DDT ו Endosulfan, נמצא באגם גם החומר Terbutryne, חומר זה משמש להדברת עשבים ואו אצות הגדלות במאגרים וכלי השקיה. למרות שריכוזו נמוך בסדרי גודל מריכוז המהווה סכנה מיידיית לאדם, לא מן הנמנע כי יש לו השפעה בריכוזים נמוכים אלו על אוכלוסיית הפיטופלנקטון באגם ואף באגן ההיקוות. חומרים נוספים כגון Chlorpyriphos, Diazinon ו Alachlor נמצאו פעמים ספורות בלבד.

השנה בניגוד לשנה שעברה לא נמצאה אפילו דוגמא אחת של מי גשמים ובה חומרי הדברה.

טבלה 9ב: בדיקות מים (תחנות כנרת וירדן צפוני), תאריכים 22-05-2013 – 24-11-2013 (מתוך 18 ימי דיגום).

Comp/Date	Alachlor	Diazinon	Endosulfan α	Endosulfan β	p,p-DDD	p,p-DDE	p,p-DDT	Terbutryne
22-05-13		0.01(AB)	0.08(AB)					
02-06-13			0.03(D)	0.19(H)	0.009(G),0.009(H)			0.001(K)
30-06-13					0.007(G)			
14-07-13	0.02(G)				0.006(H)			
25-07-13					0.006(AB)			
28-07-13					0.005(D)	0.004(A)		0.002(A), (0.002(G), 0.002(H)
11-08-13			0.01(H), 0.02(K)		0.005(A),0.002(G), 0.003(H),0.003(K)		0.001(K)	
25-08-13					0.002(A),0.003(G), 0.002(H)			
28-08-13					0.003(AB)			
08-09-13		0.003(K)	0.02(K)		0.004(A),0.007(D), 0.005(K),0.004(AB)			0.001(H)
13-10-13			0.02(H)		0.002(H)			0.002(D)
27-10-13					0.004(G),0.001(H)			0.002(G), 0.001(K)
28-10-13					0.004(AB)			
10-11-13			0.004(H)					0.001(D), 0.001(G)
24-11-13			0.004(K)		0.004(D)			

כבשנים האחרונות (עד לשנה זו) בוצעו אנליזות לנוכחות חומרי הדברה במספר דגימות דגים ומים (מי סירות בעיקר) שנדגמו על ידי אנשי אגף הדיג. אלו נבדקו באופן שיגרתי ועקב חשד להרעלת דגים מכוונת. דגימות אלו הכילו באופן עקבי ריכוזי חומרי הדברה גבוהים בסדרי גודל מדגימות המים של תחנות הדיגום באגם הכנרת, לעיתים אף ב-7 סדרי גודל גבוהים יותר (עיין טבלאות 10א' ו 10ב').

טבלה 10א: ריכוזי חומרי הדברה בדגים (דיגום ע"י אגף הדיג)

Compound/Date	p,p DDD	p,p DDE	Endosulfan- α	Fish sample
14-03-2013			0.2	1
14-04-2013	1.28	9.1	1.95	2
18-04-2013		8.6	367.9	3
19-04-2013		7.16		4
19-04-2013		12.7		5
19-04-2013		12.1		6
19-04-2013		7.33		7
22-04-2013		24	967.7	8
29-05-2013	לא נמצאו כל חומרי הדברה			9
10-06-2013	0.2	3.4	4.23	10
30-07-2013	לא נמצאו כל חומרי הדברה			11
16-10-2013	1.1	3.8		12

טבלה 10: ריכוזי חומרי הדברה בדגימות מים (דיגום ע"י אגף הדיג)

Compound/Date	p,p DDT	p,p DDD	p,p DDE	Endosulfan-sulfate	Endosulfan- α	Water sample
12-02-2013					0.08	1
12-02-2013	לא נמצאו כל חומרי הדברה					2
14-03-2013			0.02		0.2	3
14-04-2013					0.1	4
18-04-2013				0.02	0.02	5
10-06-2013				0.64	1.75	6
11-07-2013		0.004	0.01		0.02	7
18-07-2013	0.002	0.004	0.009		0.6	8
18-07-2013					0.12	9

תופעה זו נצפתה בעבר ושויכה למקרי הרעלות לצרכי דיג, וכן ליכולת הדגים לרכז את חומרי ההדברה ברקמות שומן וכבד. כלל האצבע לרמות גבוהות של חומרי הדברה בכנרת נקבע כריכוז הגבוה מ- 1 ppb (1 $\mu\text{g L}^{-1}$) במים. ריכוז המסמן רמות הגובלות במקרה הרעלה מאסיבית הינו ריכוז הגבוה מ- 50 ppb (הריכוז הגבוה ביותר של חומר הדברה שנמצא במי כנרת במסגרת הניטור השגרתי מאז שנת 2000 הוא 16.2 ppb). השנה זוהו שני אירועי הרעלה בחודש אפריל (עיין דגימות דגים 3 ו 8 בטבלה 10א). דגימת דג 3 הובאה מחוף צופי ים הסמוך למושב כנרת, זאת לאחר זיהוי מספר דגים מתים הצפים באגם. דגימת דגים מס' 8 הובאה מנחל תנור בצפון הארץ, לדברי פקחי אגף הדיג מדובר היה בהרעלה שמקורה אינו ידוע אך קיימת סבירות כי מקורה בלבנון. בשני מקרים אלו ריכוזו של חומר יחיד (Endosulfan) היה גבוה במיוחד ולכן יש להניח כי אכן מדובר בהרעלה מכוונת.

1.20 הערכת שפיעת המלח במעיין הברבוטים

גדעון טיבור, ברק חרות, תמי זילברמן (מכון גאולוגי) ועמי נשרי

במימון רשות המים

מטרה: קביעת ספיקות נוזלים ושטפי מומסים מהבורות באזור טבחה.

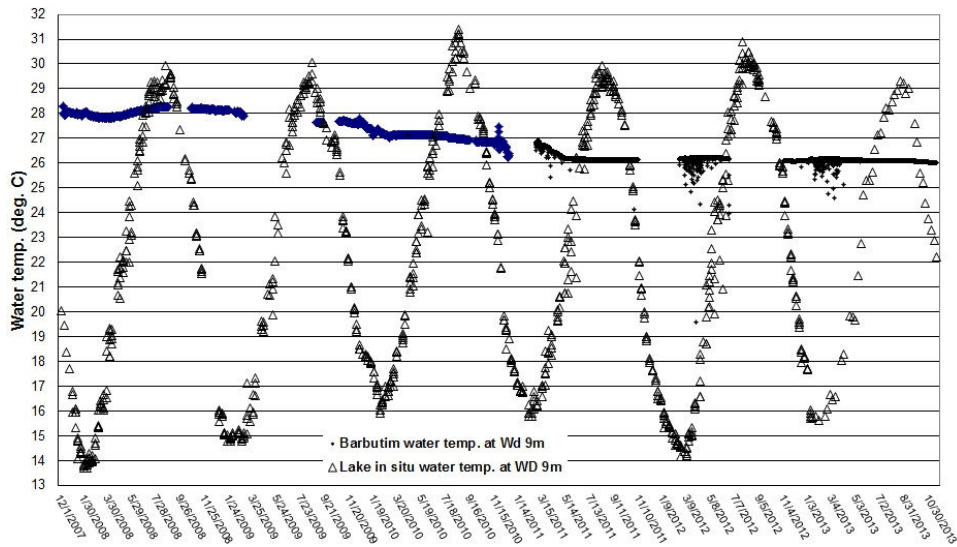
המחקר ינסה לענות על השאלות הבאות: מהם קצבי השפיעה מהבורות? האם וכיצד משתנים קצבים אלו במהלך השנה? מהם הגורמים המשפיעים על השינויים?

הניטורים מפתח צינור הברבוטים החלו ב-13 בדצמבר 2007 וכוללים כיום דיגום מים חודשי מבסיס צינור הברבוטים ואנליזה של כלורידים וניטראט במעבדה לחקר הכנרת. אנליזות לפרמטרים אחרים (יונים עקריים והרכב איזוטופי) מבוצעות במכון הגאולוגי (לפי הצורך) כמו כן מבוצעת מדידה שעתית של מהירות הזרימה והטמפרטורה באמצעות מד זרימה אקוסטי של חברת SonTek המותקן בתוך הצינור. דו"ח זה מציג את תוצאות המדידות שבוצעו בצינור הברבוטים מדצמבר 2007 ועד דצמבר 2013.

טמפרטורת המים בצינור הברבוטים

נתוני הטמפרטורה בקצה הצינור נמדדים בתדירות שעתית. גרף הטמפרטורה היומית הממוצעת בצינור 2007 - 2012 יחסית לטמפרטורת המים באגם בעומק זהה (9~ מ') מוצגת באיור 49. טמפרטורת המים בצינור (טמפרטורת הנביעה) היא כמט קבועה עם ירידה של כ- 2°C מ- 28°C בדצמבר 2007 ועד ~ 26°C בסוף נובמבר 2013. לעומת זאת, במי האגם הסמוכים לצינור בעומק זהה, טמפרטורת המים משתנה

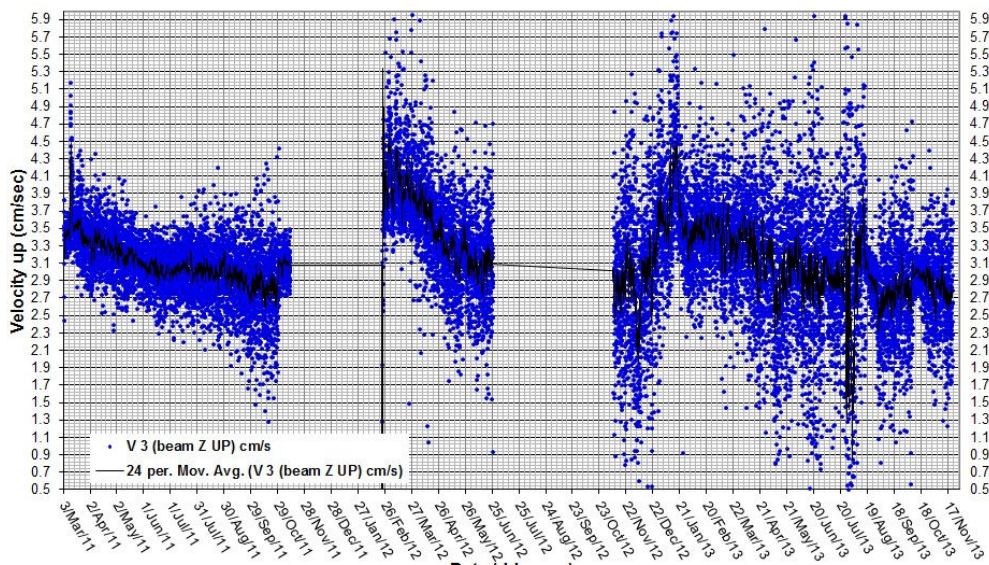
מ- 13.5°C בחודשי החורף ועד $\sim 31^{\circ}\text{C}$ בקיץ. באופן כללי ניתן לומר שבשנת 2013 האגם בעומק 9 מ' היה חם יותר ובקיץ קר יותר יחסית לשנת 2012. הטמפרטורה המינימלית נמדדה באמצע ינואר והייתה 15.7°C ואילו הטמפרטורה המקסימלית נמדדה בסוף אוגוסט ועמדה על 29.3°C .



איור 49: ממוצע יומי של טמפרטורת המים בצינור הברבוטים מה-13 בדצמבר 2007 ועד ה-22 בנובמבר 2013 יחסית לטמפרטורת האגם (משולשים) בעומק של 9 מ'. עיגולים כחולים סנסור ה- Andera ועיגולים שחורים – סנסור Sontek.

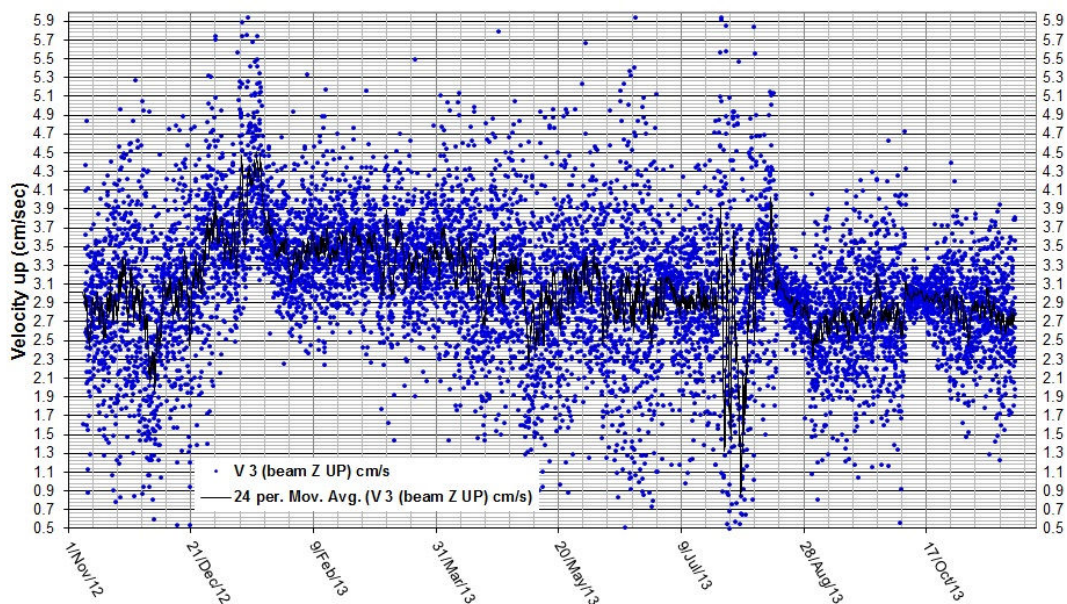
ספיקות בצינור הברבוטים

בתחילת מרץ 2011 התחלנו במדידה שעתית של מהירות הזרימה באמצעות מד זרימה אקוסטי של חברת SonTek שהותקן בתוך צינור הברבוטים. בנתונים שנאספו (איור 50) ניתן לראות מחזוריות שבה בחודשי החורף מהירויות הזרימה גבוהות (עד ~ 4.2 ס"מ לשנייה) ואילו בחודשי הקיץ הן נמוכות (עד ~ 2.7 ס"מ לשנייה). מהירויות אלו שקולות לספיקות של 32-45 ליטר לשנייה (~ קצת יותר ממיליון מ³ לשנה).



איור 50: מהירות הזרימה מצינור הברבוטים (ס"מ לשנייה) בתקופה 3 למרץ 2011 עד 22 לנוב' 2013. מהירות הזרימה נמדדה אחת לשעה. הקו השחור מציג ממוצע רץ שחושב בתדירות של יממה.

במהלך שנת 2013 מהירות הזרימה בצינור הברבוטים נעו ממקסימום יומי של 4.5 ס"מ לשניה באמצע ינואר ועד מינימום יומי חריג של 0.9 ס"מ לשניה ביולי (איור 51). איננו בטוחים שאכן חלה ירידה רב שנתית בספיקת הברבוטים וכרגע נראה שהעליות בספיקה הן תופעה חורפית שאולי אין לה קשר לשינויים הכימיים והאיזוטופיים המפליגים שחלו בטווח ארוך (ראה בהמשך). האלמנט הפיזיקלי היחיד שנראה קשור לריכוזי המליחות הוא הירידה הרלוונטית בטמפרטורה של מי הברבוטים.



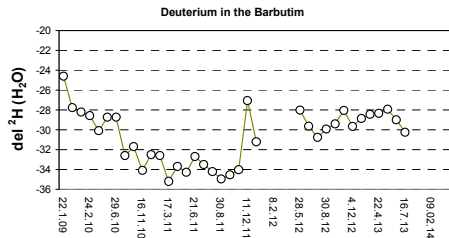
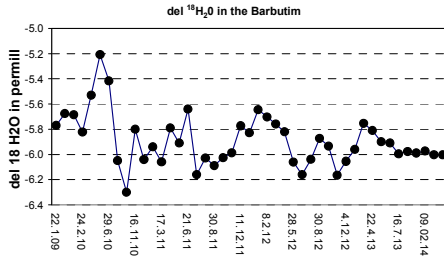
איור 51: מהירות הזרימה מצינור הברבוטים (ס"מ לשנייה) במהלך השנה האחרונה (1 נובמבר 2012 עד 22 נובמבר 2013). ממוצע רץ (קו שחור) חושב בתדירות של יממה.

ריכוזי כלוריד, מוליכות חשמלית, ניטראט והרכב איזוטופי של מי הברבוטים

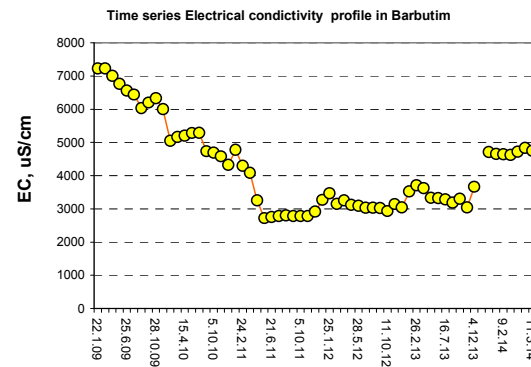
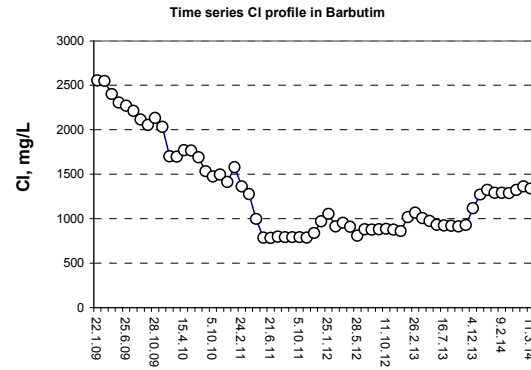
בין ינואר 2009 לבין אמצע 2011 נצפתה ירידה מתמשכת בריכוז הכלוריד במי הברבוטים, מרמות אופייניות של סביב 3000 מג"ל כלוריד ועד לכ-850 מג"ל (איור 52). במקביל ירדה המוליכות החשמלית שלהם מ-7000 ל-3000 מיקרוסימנס לס"מ. ירידה זו נפסקה באמצע 2011 ורמת המליחות נשארה די קבועה עד סוף 2013 עם עליות חורפיות קלות יחסית. במקביל לירידה בכלוריד ובמוליכות החשמלית נמדדה ירידה של פרמטרים אופייניים אחרים של המליחות, כגון ריכוז הנתרן, מגנזיום, סטרונציום, אשלגן ליתיום וברומיד (שלא מוצגים כאן). ריכוז הניטרט ירד בתחילה במקביל לירידת המליחות מבערך 1.4 ל-1.1 מ"ג חנקן לליטר. אולם בהמשך ניכרת וריאביליות עונתית רבה.

ההרכב האיזוטופי של המים (דאוטריום וחמצן 18 באיור 53), מצביע על מעין הקלה איזוטופית עד אמצע 2011 ולאחריה הכבדה קלה, אך קשה לסמוך על רצף הנתונים לאורך כל השנים בגלל בעיות אנליטיות. כיום ההרכב האיזוטופי האופייני של מי הברבוטים הוא של $\delta^{18}\text{O} 6.0 \pm 0.1\text{‰}$ ושל $\delta^2\text{H} 29 \pm 1\text{‰}$.

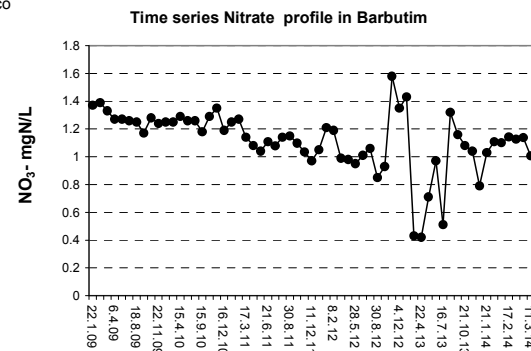
הירידה המקבילה של המליחות והטמפרטורה בנביעת הברבוטים מצביעה על כך שמקור המליחות חם יותר וששפיעתו היחסית קטנה. אולם חוסר הקשר (כפי שזה נראה כרגע) בין ספיקת הנביעה למליחות מצביע על כך שהירידה בתרומת הגורם המלוח והחם לא השפיעה על ספיקת הצינור. אחת מהאפשרויות להסביר תופעה זו היא נוכחות של תמלחת מאוד מלוחה בעומק שתרומת המים (H_2O) שלה ביציאה מהברבוטים בטלה בשישים ואילו תרומת המומסים סיגניפיקנטית. אולם בחורפים עם עלית מפלסי מי התהום ועלית מפלס האגם מסתמנת עליה קלה במליחות.



איור 53: שינויים לאורך זמן בהרכב האיזוטופי של חמצן במים (למעלה) ושל דאוטריום במים (למטה) במי הברבוטים, ינואר 2009 עד מרץ 2014.



30



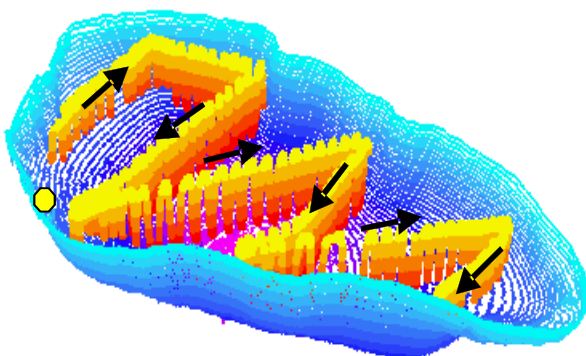
איור 52: שינויים לאורך זמן בריכוזי הכלוריד (למעלה) מוליכות חשמלית (באמצע) וניטרט (למטה) בנביעת הברבוטים, ינואר 2009 עד מרץ 2014.

1.21 מערכת נגירת לניטור מרחבי משולב של פרמטרים גיאוכימיים וביולוגיים

אסף סוקניק, שמשון זכאי ומיקי שליכטר

מערכת ניטור נגירת המופעלת בכנרת מאפשרת מיפוי תלת-ממדי וקבלת מידע על הפיזור המרחבי של מספר מדדים לימנולוגיים באגם. כלי ניטור זה מורכב ממערכת חיישנים המותקנת על "נשא", הנגרר במים על ידי כלי שיט. הנשא יכול לרחף בגוף המים תוך ביצוע תנודות מחזוריות מעלה ומטה ואיסוף נתונים סימולטני. מתכונת זו של ניטור, הקרובה לניטור סינופטי, מאפשרת מיפוי תלת-ממדי וקבלת תמונה כוללת של מספר מדדים לימנולוגיים ופיזורם בגוף המים. המשתנים הניתנים למדידה במערכת זו הם: טמפרטורה, ריכוז כלורופיל, עכירות ומוליכות חשמלית (מליחות). מבנה המערכת הנגרת ואופן הפעלתה פורט בדוחות קודמים.

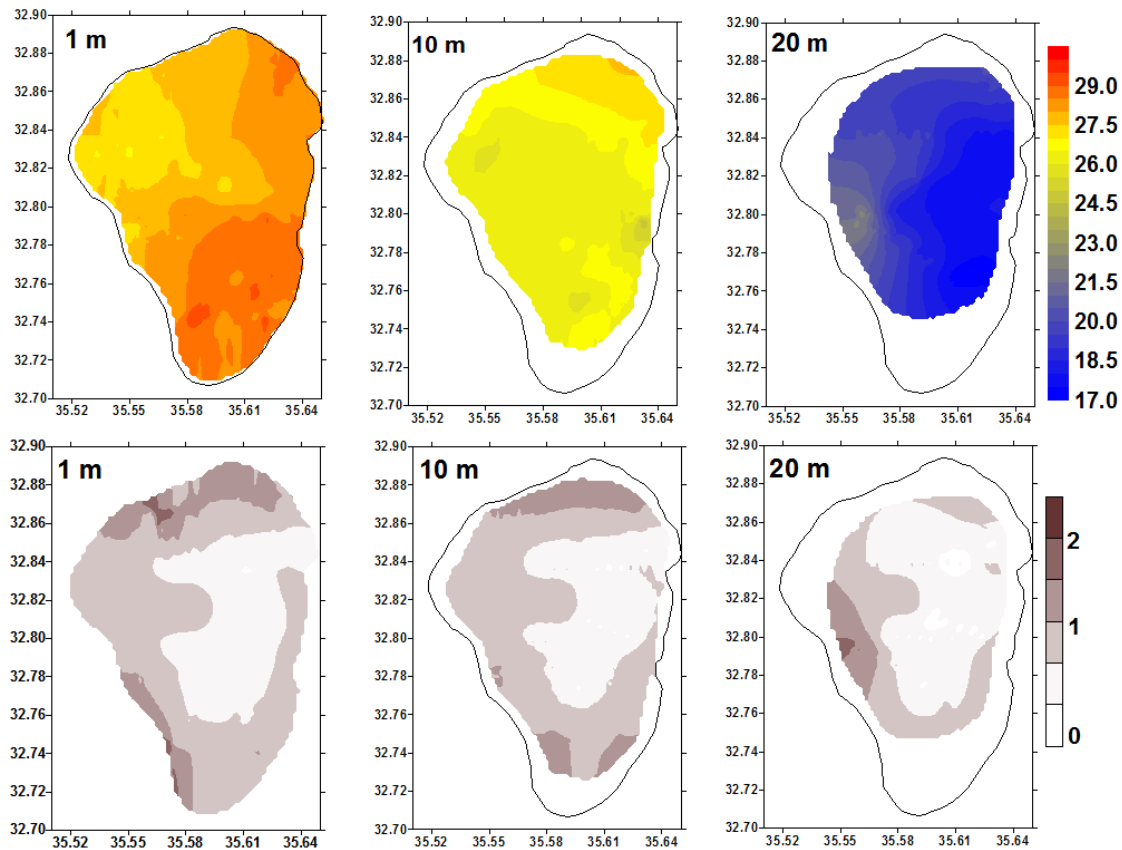
לביצוע סקר בכנרת המערכת מופעלת מסיפון ה"חרמונה" שהותאמה והוכשרה להפעלתה תוך עבודה יציבה ובטוחה, גם בים סוער ותחת משטר רוחות קייצי. מסלול השיוט של תוכנית הניטור המרחבי מוצג



איור 54: מסלול השיוט של תוכנית הניטור המרחבי מוצג על גבי מפה תלת-ממדית של הכנרת. המסלול, המתחיל מול טבחה (נקודה צהובה), כולל ארבעה חתכים בכיוון כללי מזרח מערב ומסלולים המחברים ביניהם. ניתן לראות את חדירת המנ"ג לעמודת המים. החיצים מסמנים את כיוון השיט.

באיור 54 על פני מפה תלת-ממדית של הכנרת. המסלול, המתחיל בטבחה, כולל ארבעה חתכים בכיוון כללי מזרח-מערב ומסלולים המחברים ביניהם. איור 54 מציג גם את חדירת המערכת הנגרת לעמודת המים מעומק 1 מ' ועד עומק של 29 מ' מפני המים. איור 55 מוצגת השוונת של טמפרטורת המים ושל העכירות בשכבות עומק שונות בכנרת כפי שחושבו ממדידות שנערכו במהלך סקר שנערך באמצע יוני 2013. במועד הסקר טמפרטורת האפילימניון (שכבת מים של 1 ו 10 מ'), נעה בין 26 ל 29 מעלות. בשכבת המים העליונה נמדדה שוונת מרחבית גדולה יותר כאשר במזרח האגם נמדדו טמפרטורות גבוהות יותר יחסית למערב הכנרת. בשכבת המים של 10 מ' טמפרטורת המים אחידה יחסית כ 26 מעלות. שכבת המים של 20 מ' מיצגת מים היפולימנטים בעלי טמפרטורה של כ 17-18 מעלות. הטמפרטורות הנמוכות יותר נמדדו בחלק המזרחי של האגם ומשקפות התרוממות זמנית של התרמוקלינה וההיפולימניון. נתוני העכירות המוצגים באיור 55 מציגים שבשולי האגם העכירות גבוהה יותר מאשר במרכז, וככל שמעמיקים העכירות בשולים יורדת. העכירות הגבוהה יחסית בשולי האגם מקורה ככל הנראה בהרחפה של הקרקעית כתוצאה מגלים פנימיים גלי שטח.

במהלך שנת 2013 בגלל סיבות תיפעוליות בוצע סקר מלא אחד. המידע שנאסף במהלך סקרים שבוצעו בשנים האחרונות הוצג בדוחות המעבדה וממנו ניתן היה להצביע על תבניות לימנולוגיות מאפיינות לעונות השונות ולאזורים שונים באגם. אולם אופי הסקרים והתדירות הנמוכה לא אפשרו מעקב וזיהוי מהלכים ותופעות עונתיות או אירועים חריגים. לפיכך צומצם מספר הסקרים הסטנדרטים, והמערכת תופעל בהמשך במתכונת ממוקדת במטרה להשתלב במחקרים נקודתיים.

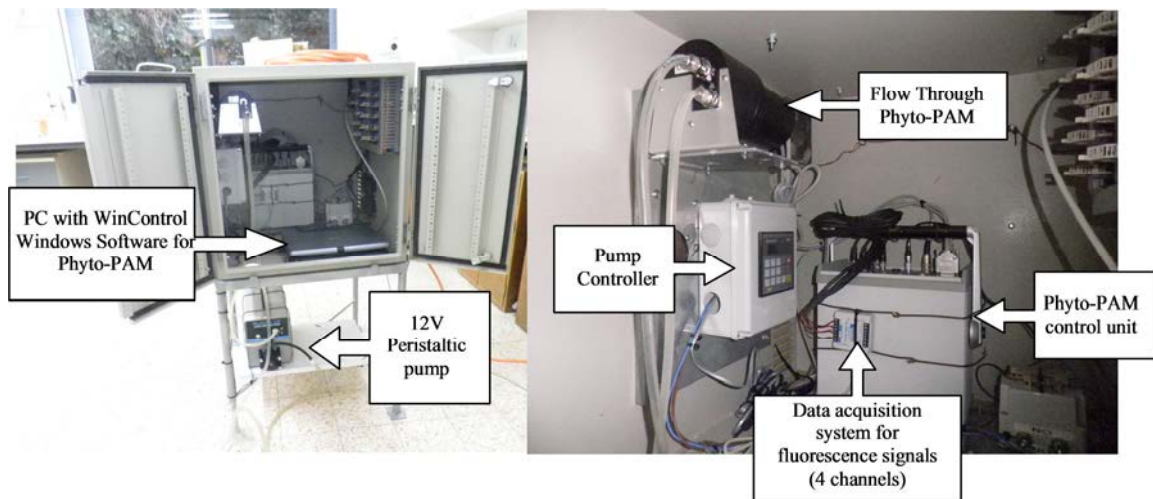


איור 55: מפות של המבנה החומני (למעלה) ושל פיזור החומר המרחף (למטה) בכנרת ביוני 2013 בעומק של 1, 10 ו 20 מ'. המפות חושבו תוך עיבוד תוצאות שנאספו ע"י מערכת הניטור הנגדרת בעזרת תוכנה לאינטגרציה מרחבית. סולמות הצבעים שמימין מייצגים את סקלת הטמפרטורה (למעלה) והעכירות (למטה). השטח הנסקר קטן ככל שמעמיקים בגוף המים.

1.22 מערכת *PhytoPAM* במרכז האגם למדידה בזמן אמת של הרכב ופעילות הפיטופלנקטון

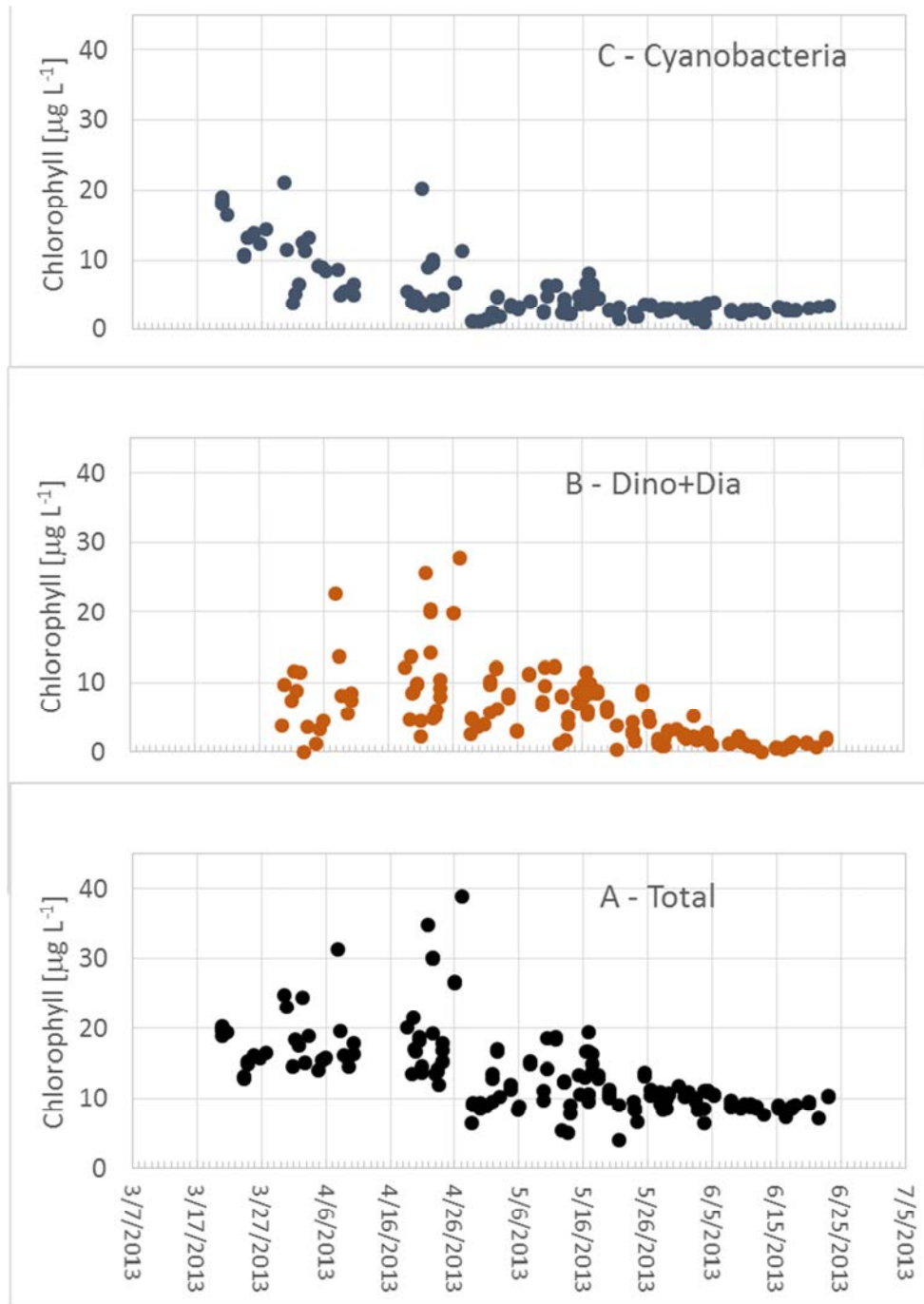
אסף סוקניק, שמשון זכאי, דיתי ויינר-מוציני, יורי ליצנסקי

מערך ניטור הכנרת כולל רפסודת ניטור העגונה במרכז הכנרת בתחנה A. לפני כשנתיים הוכנסה לפעולה מערכת מדידה המבוססת על הערכת התגובה הפוטוסינתטית של אצות במים בשיטה של פלואורסנציה מאופננת שמאפשרת מדידה בזמן אמת של ריכוז הכלורופיל במים וחלוקתו לקבוצות אצות על פי פיגמנטי עזר אופייניים, ובמקביל מודדת פרמטרים של המערכת הפוטוסינתטית בקבוצות האצות השונות. המערכת ניזונה במים הנשאבים מעומק נתון באגם ומבצעת סידרה של מדידות תוך שליטה דרך רשת האינטרנט. המערכת על מכלול המרכיבים שלה מוצגת באיור 56 ומורכבת ממשאבת דיגום הנשלטת ע"י בקר ממוחשב, מערכת מדידה אופטית ובקר המערכת – *PhytoPAM* מתוצרת Walz גרמניה ומחשב בקרה המחובר לרשת האינטרנט וניתן להפעלה ולהעברת נתונים מכל אתר ובכל זמן.



איור 56: צילום מערך השאיבה הבקרה המדידה ונשליטה של מערכת ה-PhytoPAM שהותקנה ברפסודת המחקר בתחנה A ומופעלת בשליטה מרחוק. רכיבי המערכת מצוינים.

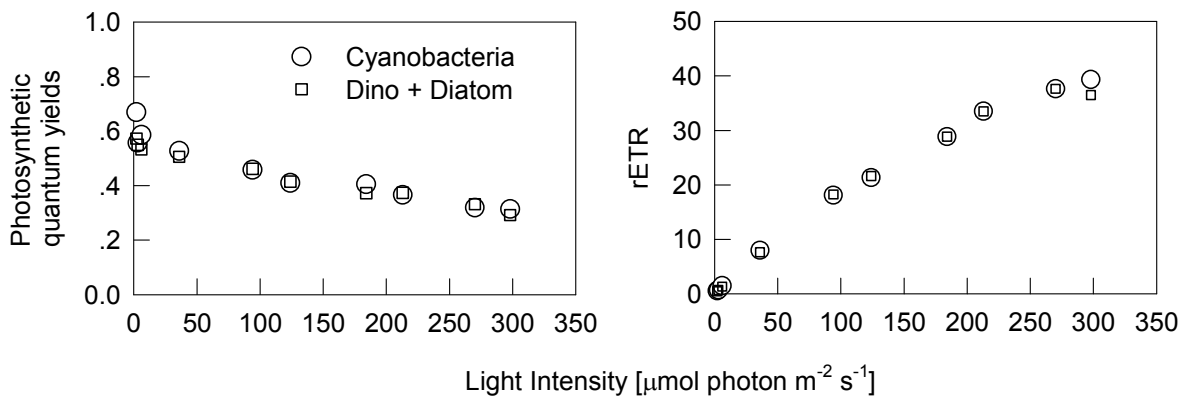
מערכת ה-PhytoPAM שהותקנה ברפסודת המחקר, מבצעת מדידות של מים שנשאבים אל תא המדידה מעומק של 1 מ'. המדידות מבוצעות בתדירות של 1 עד 3 פעמים ביממה וזאת במהלך של הפעלה מרחוק. מידע שנאסף במהלך שנת הפעילות האחרונה על התפלגות הכלורופיל על פי קבוצות טקסונומיות מוצג באיור 57. הריכוז הכולל של כלורופיל בתקופה המוצגת נע בין 5 ל 40 מיקרוגרם לליטר (איור 57A). ערכי השיא נמדדו בסוף אפריל. התפלגות הכלורופיל בין הקבוצות הספקטרליות של הפיטופלנקטון מראה דומיננטיות ברורה של דינופלגלטים וציאנובקטריה בחודשים מרץ עד יוני עם שינויי בתפוצה היחסית של האוכלוסיות השונות. אות מוגבר של אוכלוסיית ציאנובקטריה (מיוחס למיקרוציסטיס) נמדד במהלך חודש מרץ (איור 57C). אמנם לא בוצעו מדידות PhytoPAM בפברואר, אך ממדידות אחרות הראו התפתחות ופריחה של מיקרוציסטיס בפברואר ומרץ ודעיכה באפריל. דעיכת המיקרוציסטיס לוותה בעליה בתפוצה של אוכלוסיית הפרידיניום שהגיעה לשיא של כ 30 מיקרוגרם כלורופיל לליטר לקראת סוף אפריל (איור 57B). למרות התנודות שנמדדו באות הפלורוסנטי שמקורו בכלורופיל המיוחס לדינופלגלטים המגמה העונתית היא של פריחה של פרידיניום. התנודות בריכוז הכלורופיל הנמדד מקורן בדינמיקה של מיקום אוכלוסיית הפרידיניום שמשתנה בזמן הן במימד העומק והן במימד המיקום הגיאוגרפי. יתר על כן חשוב לציין שהפעלת ה-PhytoPAM מתבצעת אחת ליום ולכן צפויים שינויים בריכוז הנמדד מיום ליום בהחלה שהדינמיקה של האוכלוסיה ומיקומה מהיר יותר.



איור 57: שינויים בתפוצת הכלורופיל בכנרת במהלך אביב – קיץ 2013. A - שינוי בריכוז הכולל של כלורופיל במהלך התקופה. B שינוי בריכוז כלורופיל שמקורות בפיטופלנקטון מקבוצות הדינופלגטים וצורניות (בעיקר מיצג פרידיניום). C - שינוי בריכוז כלורופיל שמקורות בציאנובקטריה. הנתונים נאספו על ידי מערכת ה-PhytoPAM. שהופעלה מרחוק דרך רשת האינטרנט.

במהלך תקופת המדידה נמצא שבמועדים מסוימים, לאוכלוסיות הפיטופלנקטון השולטות פעילות פוטוסינתטית דומה (איור 58). בסוף אפריל נמצא שלאוכלוסיית הדינופלגטים ולאוכלוסיית הציאנובקטריה ערכי Y (maximal photosynthetic efficiency) דומים בעוצמות אור שונות, ושעקום הפעילות כנגד עוצמת האור (rapid light curve) דומה עבור שתי האוכלוסיות. התגברות ועליה בתפוצה

של פרידיניום בשבועות העוקבים מקורה ככל הנראה בתנאים הסביבתיים באגם או תוצאה מהפרעה אלולופאטית שמקורה בפרידיניום, אך לא בביצועים הפיסיולוגיים של האוכלוסיות השונות.



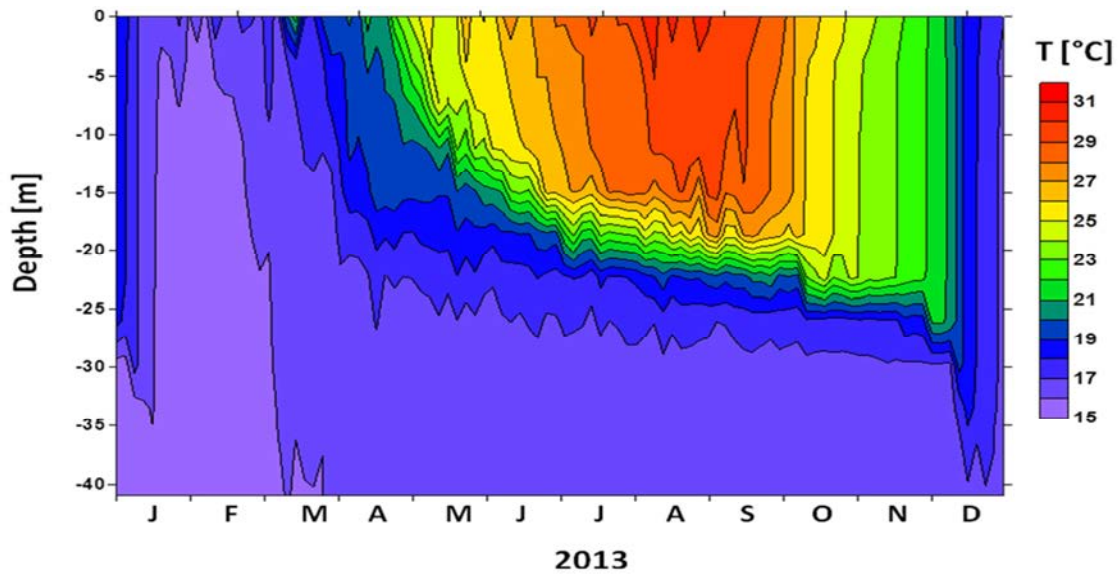
איור 58: תגובת הפעילות הפוטוסינתטית של אוכלוסיית הפיטופלנקטון בכנרת ב 27 באפריל 2013 (אוכלוסייה מעורבת של מיקרוציסטיס ופרידיניום) לעוצמות אור שונות. שינוי ביעילות הקוונטית (משמאל) ושל הקצב היחסי של העברת אלקטרונים במערכת האור ה II (מימין). המדידות נערכו בזמן אמת במדידה רציפה של מערכת PhytoPAM. לאחר שדגימת המים עברה איכלו בחושך למשך כ 15 דקות. מערכת המדידה הופעלה מרחוק דרך רשת האינטרנט.

1.23 פרופיילר אוטונומי מדגם *Autoreel-manta* בתחנה A

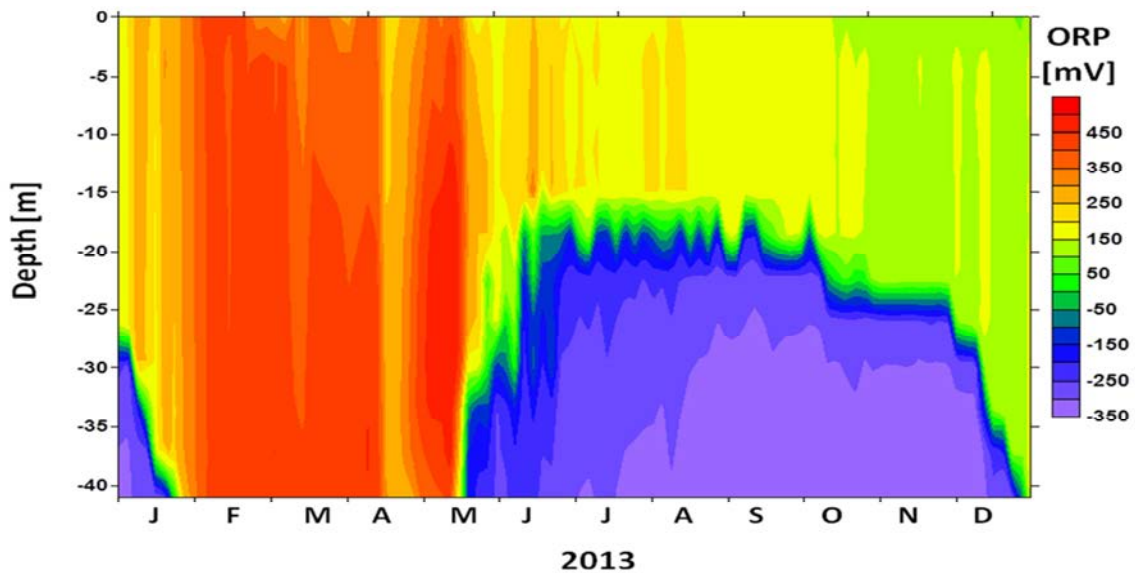
ורנר אקרט, בני סולימני ומיקי שליכטר

ב- 2002 החלה המעבדה לחקר הכנרת לנטר את עמודת מי האגם בעזרת ציוד אוטומטי המופעל מדוברת האקוראפט בתחנה A. בשנת 2009 הוחלפה יחידת ה- RUSS-YSI, שפעלה במקום בשנים 2002-2008, ע"י מכשיר המופעל על ידי כננת ומורכב מדגם רב חיישנים מדגם MANTA (Eureka, Austin, Texas) ומפרופילר עצמאי מותאם למקום, אשר פותח על ידי Instrumental Solutions Inc, Vicksburg Mississippi. דיגום הפרופילים החל בסוף דצמבר 2009 במדידות טמפרטורה, עומק, חמצן מומס, pH, מוליכות, פוטנציאל חימצון/חיזור, עכירות וכלורופיל a פעם אחת עד 4 פעמים ביממה לאורך עמודת המים ברזולוציה של 0.5 מ'.

בתחילת ינואר 2013 עמודת המים היתה עדיין משוכבת כשעומקי הטרמוקלינה והכמוקלינה חפפו, ב- 27 מ' (איורים 59 ו- 60). ערבוב מלא התרחש במהלך המחצית השניה של ינואר. טמפרטורת המים הנמוכה ביותר שנרשמה בזמן הערבוב היתה 15.7°C באמצע פברואר. המוליכות היתה $1150 \mu\text{Scm}$, pH-8.2 וכל עמודת המים היתה רוויה ביחס לחמצן מומס (לא מוצג). בדרך כלל תחילת השיכוב התרמי נצפית במרץ בעוד שבשנת 2013 נידחתה תחילת השיכוב עד לסוף אפריל ושכבת ה- BBL הפכה לחסרת חמצן רק במאי, כאשר מדידות פוטנציאל הרדוקס (ORP) הפכו לשליליות (איור 60). במהלך רוב תקופת השיכוב נשארה הכמוקלינה בערך בעומק 20 מ' עד לצניחתה ל- 25 מ' בתחילת אוקטובר 2013. לתהליך ההתקררות של האפילימניון (27°C באוקטובר עד ל- 19°C בתחילת דצמבר) לא היתה השפעה גדולה על עומק הטרמוקלינה, אך כתוצאה מאירוע סערה חורפית קיצונית באמצע דצמבר 2013 הטרמוקלינה צנחה אל מתחת ל- 35 מ'. הערבוב המלא של חורף 2013/14 התרחש מוקדם יחסית, כבר ב- 24 לדצמבר 2013.



איור 59: שינויי איזותרמות בעמודת המים של הכנרת במהלך 2013.



איור 60: דיאגרמת איזופלטות של פפוטנציאל הרדוקס, ORP, בעמודת המים של הכנרת במהלך 2013.

1.24 ניטור סינופטי באמצעות צילומי לוויין המשולבים במערכת *SISCAL*

גדעון טיבור, יוסי יעקבי, לנא אשקר (מכון גיאולוגי), תומר כתר

מטרות המחקר

1. ניטור שגרתי של הפיזור המרחבי של טמפרטורה, כלורופיל, ועכירות בפני המים באגם
2. נתוני פרישה מרחבית בעת אירועים חריגים (פריחות, זיהומים, שינויי מפלס קיצוניים)
3. בניית בסיס מידע סינופטי רב-שנתי של כלל האגם
4. נתוני כיול עבור המודלים האקולוגיים של הכנרת
5. הפצת המידע הנאסף לרשויות ולציבור באמצעות מרכז המידע הימי הלאומי (ISRAMAR) ואתר רשות המים

השימוש בלווינות למיפוי איכות המים בכנרת נעשה באמצעות מערכת SISCAL (www.siscal.net) שפותחה במסגרת מחקר של התוכנית האירופאית החמישית וכיום מוטמעת ע"י חברת Informus והמכון לחקר ימים ואגמים. הניטור מתבסס על שני לווינים (MODIS Aqua & Terra) שלהם רזולוציה מרחבית של 1x1 ק"מ ועל לוויין ה-VIIRS עם רזולוציה מרחבית של 750x750 מ' שמצלמים כל יום. זמן החליפה של הלווינים הוא בין השעות 8:00 עד 10:00 זמן GMT. מקור צילומי הלווינים הוא מהארכיון "המתגלגל" של NASA באיחור של עד כ-12 שעות. במהלך 2013 עודכן השרת של SISCAL, תוכנת ה-EU-GIS ואתר ISRAMAR כך שיוכלו לטפל בצילומי הלוויין ה-VIIRS החדש. שתהליך כיוול האלגוריתמים שלו החל.

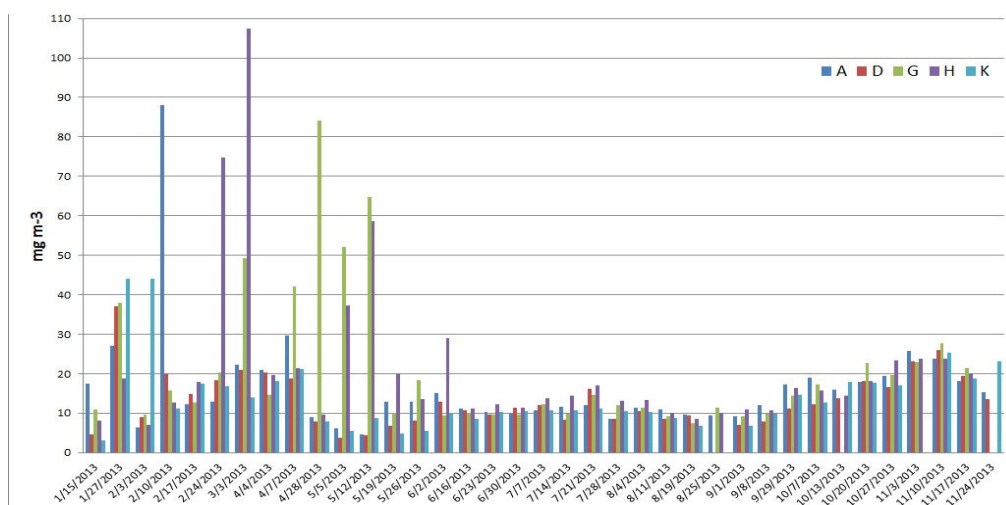
שלבי הניטור

שלב א – קליטת צילומי הלוויין קרוב ל"זמן אמת"
 שלב ב – בדיקה וכיוול אלגוריתמים קיימים עבור: טמפרטורת פני המים (SST), ריכוזי כלורופיל (Chl a), ריכוזי חומר מרחף (TSM) ועומק סקי (Secchi depth) מול נתונים מהשטח שנאספים ע"י המעבדה לחקר הכנרת במסגרת תוכנית הניטור וסקרים אחרים. חלק מנתוני הכלורופיל שנאספים בתחנות הניטור נלקחים בסמוך לזמן חליפת הלווינים.

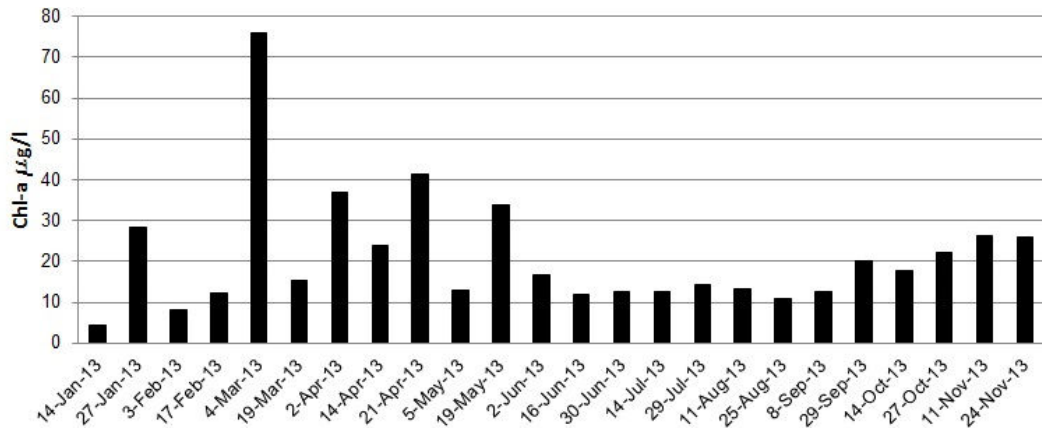
שלב ג – אנליזה סינופטית של נתוני כל האגם
 שלב ד – הפצת המידע הנאסף לרשויות ולציבור באמצעות מרכז המידע הימי הלאומי (ISRAMAR) ואתר רשות המים
 דו"ח זה מסכם את הפעילות שנעשתה במהלך 2013:

שלב א - קליטת צילומי לוויין: במהלך 2013 נקלטו ושולבו במערכת ה-SISCAL ובאתר ISRAMAR 117 צילומי לוויין מסוג MODIS ו-34 צילומי לוויין מסוג VIIRS.

שלב ב - כיוול מוצרי הלוויין השונים מול נתוני *in situ*: במהלך 2013 נמשכו הכיוול והבדיקה של האלגוריתמים מול נתוני הניטור מתחנות A, D, G, H, K (איור 61) וכן מול נתוני הדיגום האוטומטי בתחנה A (איור 62). בדומה לשנה שעברה, ניתן לראות שריכוזי כלורופיל גבוהים מ- $30 \mu\text{g L}^{-1}$ נמדדו במהלך חודשים פברואר-מאי עם מקסימום של $107.3 \mu\text{g L}^{-1}$ (תחנה H בתחילת חודש מרץ).

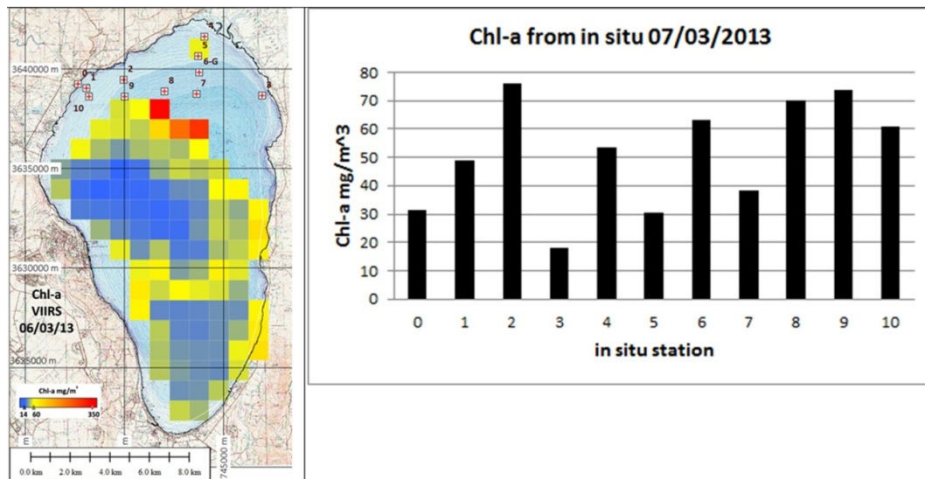


איור 61: נתוני כלורופיל שנמדדו ע"י המעבדה לחקר הכנרת במהלך 2013 קרוב לזמן חליפת הלוויין בתחנות הניטור (A, D, G, H, K). ערכים הגבוהים מ- $30 \mu\text{g L}^{-1}$ נמדדו בחודשים פברואר-מאי.



איור 62: נתוני כלורופיל שנמדדו אוטומטית קרוב לפני השטח בתחנה A במהלך 2013.

סקר לאיסוף נתוני כיוול בצפון הכנרת בוצע ב-7 למרץ 2013, במסגרתו נלקחו דגימות מים, פרופילי טמפרטורת מים (באמצעות מכשיר CTD) ומדידות ספקטראליות של המים באמצעות ספקטרומטר שדה ב-10 תחנות בצפון האגם (איור 63). מאחר וצילום הלוויין מיום הדיגום לא היה טוב (אובך) השתמשנו בצילום לוויין VIIRS מה-6 למרץ, אך גם ביום זה רוב תחנות הדיגום היו ללא כיסוי בגלל עננות ולכן לא יכולנו לבצע את הכיול.

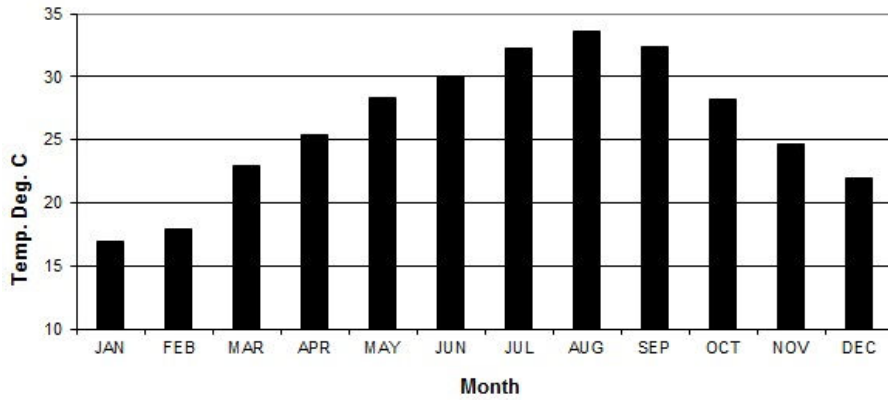


איור 63 מימין: ריכוזי הכלורופיל שנמדדו בהפלגת הכיול בתאריך ה-7/3/13. משמאל: מפת ריכוזי כלורופיל בתאריך ה-6 למרץ 2913 שהתקבלה מאנליזה של לוויין VIIRS. מיקום 10 תחנות הדיגום לכיול שבוצע ב-7 למרץ 2013 מצויין בסימני + אדום.

שלב ג – אנליזה סינופטית של האגם

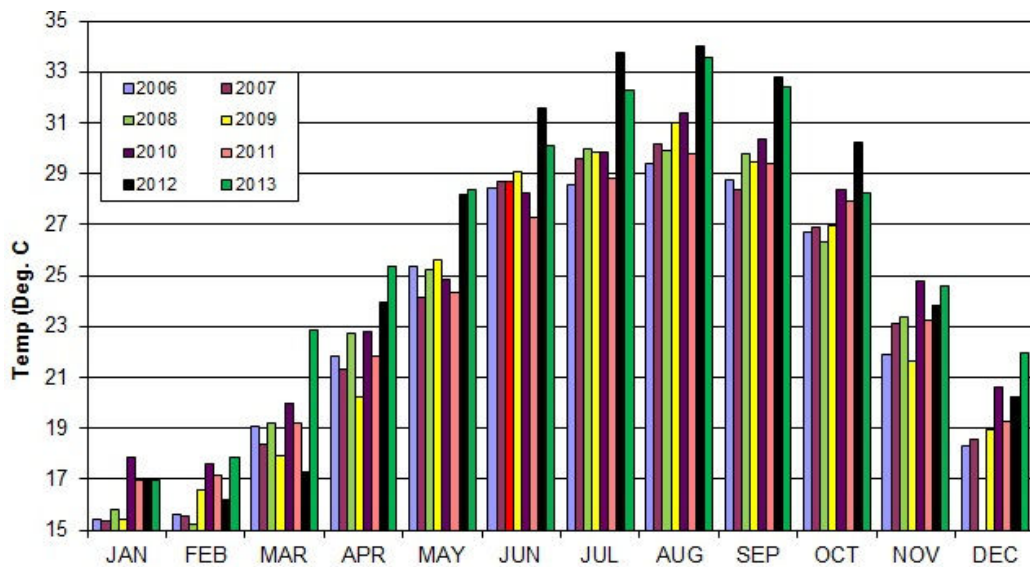
1. טמפרטורת פני המים (SST)

טמפרטורת פני האגם החודשית הממוצעת בשנת 2013 (איור 64) חושבה על בסיס 117 צילומי לוויין מסוג MODIS שאין בהם עננות או הפרעות אטמוספיריות אחרות. באופן דומה, טמפרטורת פני המים החודשית הממוצעת חושבה לכל חודש מאז 2006. בשנים 2012-2013 הטמפרטורות שחושבו מנתוני הלוויין גבוהות בעוד כ-2 מעלות מהטמפרטורות שחושבו בשנים 2006-2011 ולכן משנת 2014 נחזור לתהליך של כיול האלגורייתם של טמפרטורת פני המים (SST).



איור 64: טמפרטורת פני המים (SST) החודשית הממוצעת בשנת 2013 שחושבה מצילומי MODIS.

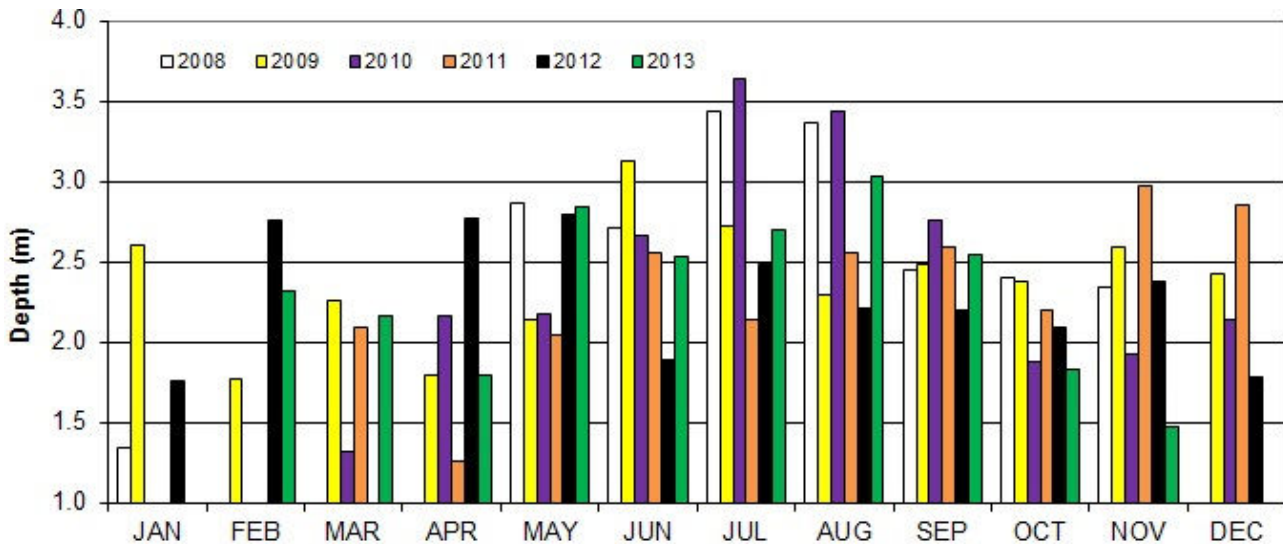
חודש ינואר היה עם הטמפרטורה החודשית הממוצעת הקרה ביותר 17°C ואילו הגבוהה ביותר, 33.6°C , חושבה בחודש אוגוסט. יש לציין שטמפרטורות אלו משקפות את טמפרטורת המיקרונים העליונים של עמודת המים והן גבוהות יותר מאלו שנמדדות במכשירים אחרים. השוואת טמפרטורת פני השטח החודשית הממוצעת לזו שנרשמה בשנים קודמות (2006-2013) מוצגת באיור 65. ניתן לראות שבהשוואה לשנים 2006-2011 ה-SST ב-2013 היה גבוה מהממוצע בכל החודשים למעט ינואר. ההפרש הגדול ביותר נמדד בחודשים מרץ-אפריל, יוני-ספטמבר ובדצמבר. בדומה לשנת 2012 הטמפרטורה הממוצעת בחודשים יוני עד ספטמבר היתה משמעותית יותר גבוהה מבשנים קודמות.



איור 65: טמפרטורה חודשית ממוצעת של פני המים בכנרת בין השנים 2006-2013

2. עומק סקי (Secchi)

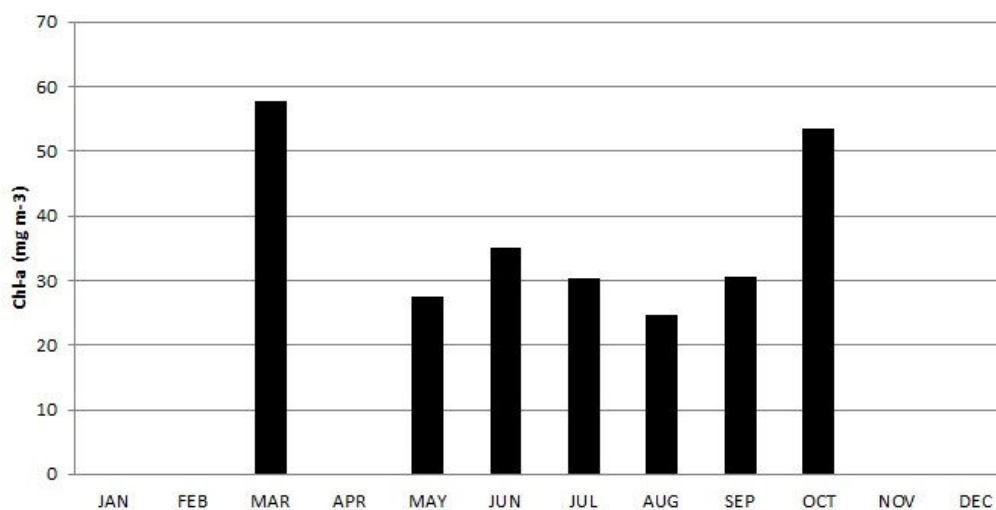
עומק סקי הוא מדד לשקיפות המים. אנליזה סינופטית של עומק הסקי החודשי הממוצע במהלך השנים 2008 עד 2013 מוצגת באיור 66. בשנת 2013 עומק הסקי הממוצע נע בין מינימום של 1.5 מ' בנובמבר ועד מקסימום של 3 מ' באוגוסט.



איור 66: עומק סקי (SEC) חודשי ממוצע באגם בשנים 2008 עד 2013. בחודשים ינואר ודצמבר 2013 תמונות הלוויין לא אפשרו חישוב עומק סקי.

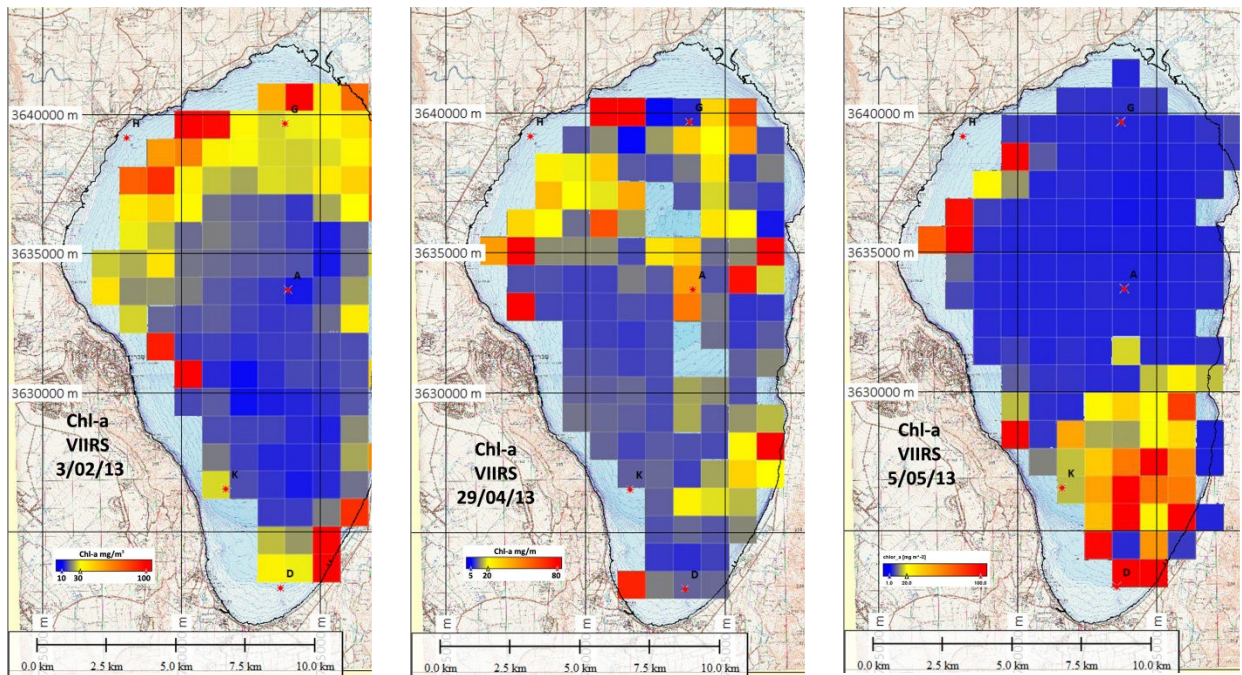
3. ריכוזי כלורופיל

אנליזה חודשית של ריכוזי הכלורופיל התבססה על צילומי לוויין מסוג MODIS-aqua עם רזולוציה של 1x1 ק"מ. הריכוזים הממוצעים בחודשים מרץ ומאי היו דומים לאלו הנמדדו בשטח (איורים 67 ו-68) אולם בשאר החודשים הערכים הם הרבה יותר גבוהים מאלו שנמדדו בשטח למרות שהמגמה נכונה.



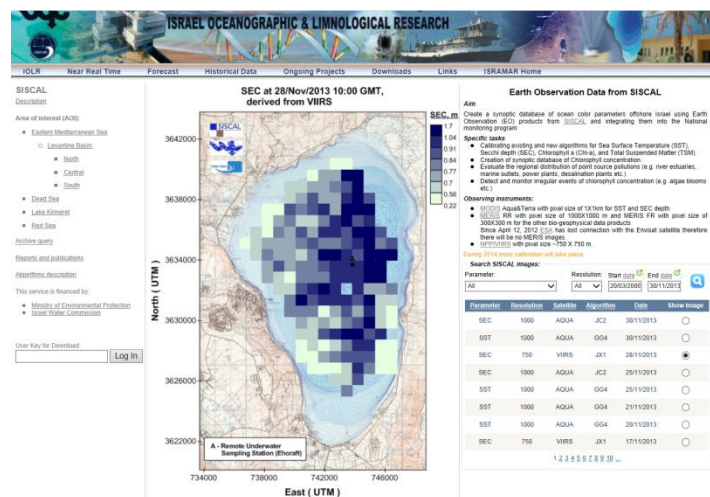
איור 67: ממוצע חודשי של ריכוזי כלורופיל באגם בשנת 2013, בהתבסס על תמונות לוויין MODIS-Aqua. בחודשים ינואר-פברואר, אפריל ונובמבר- ודצמבר לא היו תמונות לוויין טובות או מספיק תמונות לחישוב הממוצע.

כמו כן החל הכיול של צילומי לוויין VIIRS ברזולוציה של 750 מ' לפיקסל. באיור 68 ניתן לראות מפות כלורופיל שיוצרו בתקופה בה ריכוזי הכלורופיל היו גבוהים בכנרת (פברואר – מאי)



איור 68: מפות ריכוזי הכלורופיל (עדיין לא מכויל) שהתקבלו מאנליזה של לוויין ה- VIIRS בתאריכים 3/02/13 (שמאל), 29/04/13 (מרכז) ו- 5/05/13 (ימין). מיקום תחנות הדיגום של הניטור השבועי מוצגות על המפה.

שלב ד – הפצת המידע הנאסף לרשויות ולציבור במצעות מרכז המידע הימי הלאומי (ISRAMAR) ואתר רשות המים: הפצת המידע לרשויות ולציבור נעשית היום דרך האתר במרכז המידע הלאומי (<http://isramar.ocean.org.il>) באמצעות ממשק המאפשר הצגת מוצרי הלוויין השונים מהכנרת. במהלך 2013 נבנה ממשק המאפשר למעבדה בטבחה להוריד את הנתונים של תמונות הלוויין ישירות מהאתר וכן נעשה שילוב של נתוני לוויין ה- VIIRS (איור 69).



איור 69: דוגמא של הממשק לחיפוש מוצרי סיסקל באתר המידע הימי הלאומי המציג את עומק הסקי מלוויין ה- VIIRS.

תוכנית העבודה לשנת 2014
א. המשך כיול האלגוריתמים בשטח עבור לוויין ה- VIIRS.

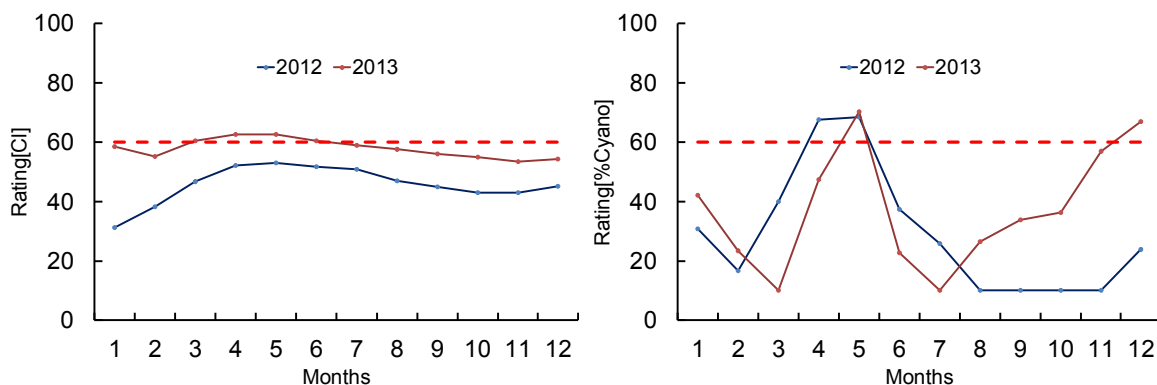
- ב. בדיקה מחודשת של כיול האלוגוריתם של טמפרטורת פני המים עבור לוויין ה-MODIS.
- ג. המשך האנליזות הסינופטיות
- ד. המשך אספקת נתונים סינופטיים בזמן כמעט אמיתי במהלך אירועים חריגים (לדוגמא: פריחות, זיהומים)
- ה. המשך פיתוח יישומים בממשק של מרכז המידע הלאומי <http://isramar.ocean.org.il>.

1.25 מדד כמותי להערכת איכות המים

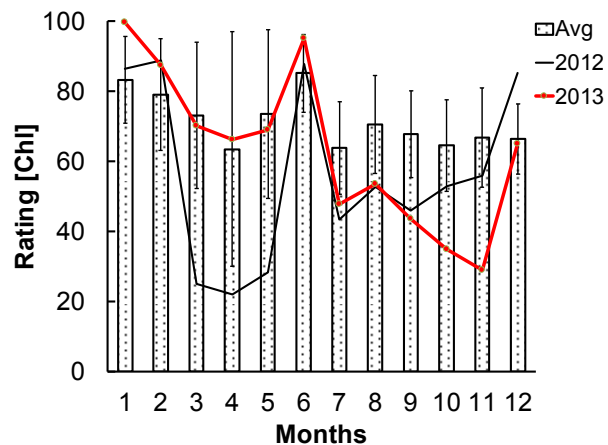
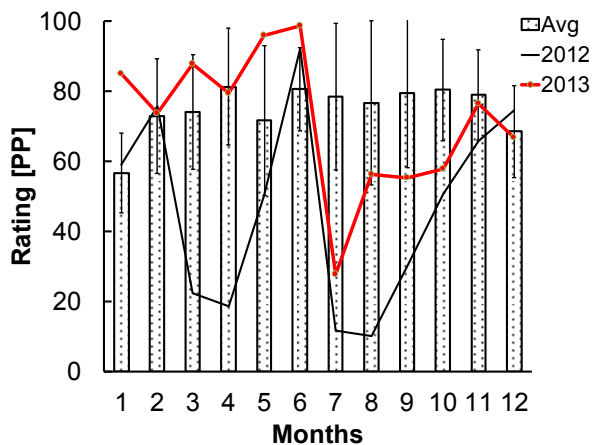
ארקדי פרפרוב, טומי ברמן

מדידת איכות המים (WQ) בכנרת נמשכת לפי השיטה שפורטה בעבר (דו"ח חיא"ל T15/2003). לפי שיטה זו, תשעה פרמטרים נבחרים מקבלים ציון (R; Rating) בין 10 ל-100 לכל חודש בשנה לפי ערכם ביחס לסקלות מוסכמות. בנוסף להסתכלות על כל אחד מתשעת הפרמטרים מחושב גם אינדקס משוקלל, (CWQI Combined Water Quality Index) שנותן ציוד משוקלל אחד לאיכות המים בכל חודש או שנה. שני פרמטרים של איכות המים גרמו בשנים האחרונות לירידה בציון של האינדקס המשוקלל: ריכוז הכלוריד ואחוז הציאנובקטריה. ב-2013 הציון לשני פרמטרים אלו היה רוב הזמן בסביבות או מתחת לערך 60, אך באופן בולט הציונים היו רוב הזמן גבוהים יותר מאשר הציונים שנתקבלו ב-2012 (איור 70). פרמטרים נוספים שקבלו ציונים נמוכים לפחות בחלק מחודשי השנה ב-2013 היו הייצור הראשוני והכלורופיל, אך גם עבורם הציונים ב-2013 היו רוב החודשים גבוהים יותר מאשר ב-2012 (איור 71). כתוצאה מכך, ערך האינדקס המשוקלל, CWQI, היה ב-10 מחודשי השנה ב-2013 גבוה יותר מאשר ב-2012 (איור 72).

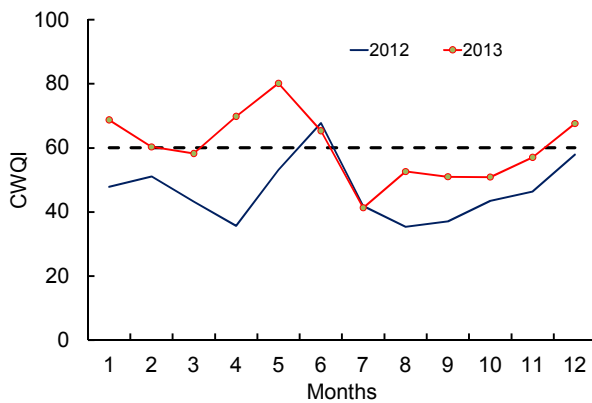
השינויים הרב-שנתיים (1991-2013) של מדד CWQI מוצגים באיור 73. ציונים נמוכים נרשמו בתקופות שונות, מסיבות שונות: בשנים 2000-2002, המאופיינות במפלס נמוך, לריכוזי הכלוריד הגבוהים היתה השפעה מכרעת על CWQI בשנתיים האחרונות, הפרמטרים העיקריים שהשפיעו על איכות המים היו ההתפתחות המואצת של הציאנובקטריות בקיץ. ערך ה-CWQI הממוצע לשנת 2013 (60.3) היה יותר גבוה מהממוצע הרב שנתי (56.1) בין 2001 עד 2007.



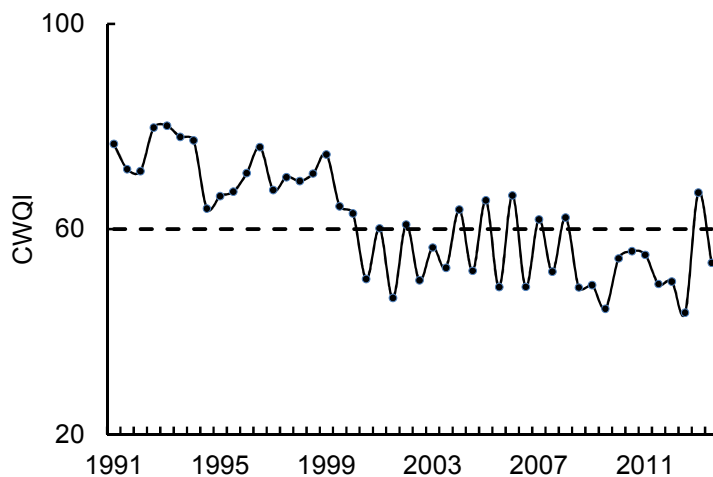
איור 70: שינויים עונתיים בציונים, R, של שני פרמטרים לאיכות מים (כלוריד ואחוז ציאנובקטריה) ב-2012-2013. כאשר $R < 60$ איכות המים מוגדרת כ- "לא קבילה".



איור 71: שינויים ברמת הייצור הראשוני (PP) וכלורופיל (Chl) בשנת 2012 (קו שחור) ובשנת 2013 (קו אדום) בהשוואה לממוצעי הערכים בשנים 1991-2011 (עמודות). הבארים האנכיים מציינים את ערכי סטיית התקן.



איור 72: המהלך השנתי של ציוני מדד איכות המים המשולב, CWQI, בכנרת ב 2013 בהשוואה ל 2012.



איור 73: שינויים לאורך זמן ב- CWQI 1991-2013 (ממוצעים חצי-שנתיים)

1.26 מרכז מידע כנרת

מיקי שליכטר

מטרותיו של מרכז המידע הקיים במעבדה לחקר הכנרת הנן לרכז את המידע הנאסף מתוכנית הניטור, לתעדו, לעבד אותו ולהפיצו. מרכז המידע הנו מערכת הכוללת את מאגר נתוני הניטור, תיעוד הנתונים, תוכניות מחשב הנכתבות לצורך קליטה ועיבוד הנתונים, יישומים הנכתבים לשימוש חוקרי המעבדה. במרכז המידע משולבת מערכת מידע גיאוגרפית המשמשת לתצוגה, עיבוד וניתוח של נתונים גיאוגרפיים.

חלק מהמידע מוצג בצורה גרפית באתר האינטרנט של חיא"ל.

מאגר הנתונים במרכז המידע כנרת מבוסס על תוכנית ניטור הכנרת המתבצעת ע"י המעבדה לחקר הכנרת החל משנת 1969. כלולים בו נתונים מתחומי המטאורולוגיה, פיסיקה, כימיה וביולוגיה של האגם. המידע נאסף ברציפות ובשיטתיות בתחנות דיגום קבועות ובתדירות קבועה. בנוסף לגוף מידע זה נמצאים במאגר נתונים הקשורים לאגן ההיקוות המתעדכנים מגופים חיצוניים (מקורות, השרות ההידרולוגי), נתונים מפרויקטים המתבצעים במעבדה ושאינם כלולים בתוכנית הניטור ונתונים ממקורות אחרים שנאספו למטרות מוגדרות באופן חד-פעמי.

מאגר הנתונים מהווה את הבסיס לניתוח ממצאי הניטור: באמצעותו ניתן לזהות ולבדוק מגמות רב שנתיות המתרחשות באגם, לבדוק קשרים והאינטראקציות בין מרכיביה השונים של המערכת האקולוגית בכנרת לאורך זמן והוא משמש בסיס לבניית מודלים לחיזוי תהליכים בכנרת. בנוסף מאגר נתוני הכנרת משמש ככלי מחקרי בו עושים שימוש אינטנסיבי חוקרים במעבדה ובמוסדות מחקר אחרים.

תכולת מאגר נתוני הכנרת מסוכמת בטבלה 11. תאור מפורט של מאגר הנתונים, תכולתו, ארגונו ותפעולו מופיע בדו"ח "מאגר נתוני כנרת" (שליכטר 2006, דו"ח חיא"ל T20/06).

טבלה 11: סוגי המידע במאגר הנתונים של המעבדה לחקר הכנרת

שנת התחלה	תכולה	סוג המידע
1969	הנתונים המקוריים, בפורמט המקורי, במצב דחוס, ללא שינוי ועיבוד. (עד 1992 על גבי מדיה מגנטית). מאורגנים ע"פ נושאים בספריות מחשב.	מידע גלמי
1969	בסיסי נתונים הכוללים טבלאות נתונים בתחומים: בתימטריה, מטאורולוגיה, טמפרטורה, זרמים, כימיה, פיטופלנקטון, זואופלנקטון, דגים, ירדן, ירמוך, ליטרול	נתוני ניטור
1992	טבלאות תיעוד (kin_info) בהן מצויה אינפורמציה שנאספה אודות טבלאות הנתונים, תחנות הדיגום וטבלאות Info ייחודיות לנושאים שונים.	תיעוד
2001	אוסף הקבצים המעובדים במערכת הממ"ג: קובצי מפות, תלת ממד, shape files, personal geodatabase, coverages, ותמונות בנושאים: בתימטריה, תחנות ניטור, סקרים מרחביים, אגן היקוות, גיאולוגיה, דגום כלורופיל רב-ערוצי.	נתוני ממ"ג
2004	תמונות סינופטיות של הפרמטרים: טמפרטורת פני המים, כלורופיל, סקי, עכירות	תצלומי לוויין
סקרים מרחביים:		
2000	נתונים גולמיים ובסיסי נתונים מסקרים מרחביים שהתבצעו החל משנת 2001.	נתוני המערכת הנגררת
2000	נתונים גולמיים ובסיסי נתונים מסקרים מרחביים חודשיים בשנים 2000-2004.	נתוני המפר"ע

2002	נתונים גלמיים ובסיסי נתונים: טמפרטורות נחלים, LDS (מטאורולוגיה וטמפרטורות), RUSS (נתונים איכות מים). נתונים מעובדים: נתוני קלט ונתוני אימות למודל.	פרויקט המודלים
נתונים מגורמי חוץ:		
2004	נתונים מתחנות מטאורולוגיות צמח, בית צידא, A, חרמון	נתוני השרות המטאורולוגי
1970	נתוני ריכוזים ועומסים של פרמטרים כימיים מתחנות גשר חורי וגשר אריק בירדן מתקבלים מחברת "מקורות". נתונים הידרולוגיים (זרימות בנחלים) מתקבלים מהשירות ההידרולוגי, רשות המים.	נתוני אגן היקוות

סכום העבודה בשנת 2013

ניהול שוטף של מאגר הנתונים

- קליטת הנתונים המתקבלים מהחוקרים, ממכשירי מדידה שונים או מגורמי חוץ: חברת מקורות, שרות מטאורולוגי ורשות המים, בדיקתם וקליטתם לבסיסי הנתונים.
- בקרה על התוכניות לקליטה אוטומטית של נתונים. לבסיס הנתונים נקלטים נתונים באופן אוטומטי ע"י תוכניות מחשב בתחומים הבאים: נתוני חמש תחנות מטאורולוגיות מאזור הכנרת ושתי תחנות מטאורולוגיות בחרמון, נתוני הפרופילים ממערכת הדוגם האנכי-Manta, נתוני מערכת הטרמיסטורים מתחנות A ותחנת ברבוטים. מערכות קליטת הנתונים דורשות פיקוח ובקרה שוטפים.
- ביצוע חישובים המבוססים על הנתונים וקליטתם לטבלאות. לדוגמא-חישובי בימוסה של פיטופלנקטון מתוך נתוני ספירות ומדידות התאים.
- עיבוד נתונים לצורכי המחקר בפרויקטים שונים.
- העברת בסיס הנתונים המעודכן לנציבות המים.
- העברת נתונים לגורמי חוץ (מקורות, חוקרים וסטודנטים במוסדות מחקר).
- גיבויים שוטפים ותקופתיים של מאגר הנתונים.

פיתוח ותחזוקה של היישום "כנרת"

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

מערכת מידע גיאוגרפית

במסגרת זו נעשה עבוד המידע הגיאוגרפי במערכת המידע הגיאוגרפית והפקת מפות לפרויקטים שונים. השנה בוצעה עבודת הכנה לקליטת תצלומי לוויין של הכנרת למערכת ה-GIS מתוך אתר ISRAMAR

קליטת תחומי מידע חדשים למאגר המידע: השנה נוספו לבסיס הנתונים:

- נתוני חיישנים חדשים מתחנה מטאורולוגית A : נתוני קרינה קצרת גל וקרינה ארוכת גל, לחץ ברומטרי וטמפרטורת פני המים.
- נתוני Trace elements מהשנים 2000-2010 נוספו למסד נתוני הכימיה.
- נתוני כיסוי צומח בליטורל.
- נתוני הרוזטה - מערכת דיגום מים ממוחשבת: נכתבה תוכנית לקליטת נתונים הנאספים ע"י הרוזטה במהלך הניטור הכימי והביולוגי.

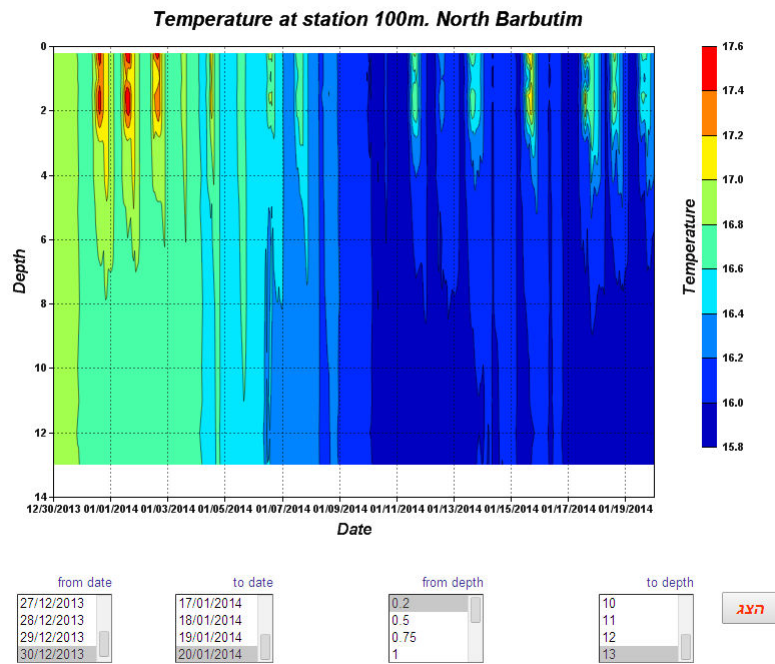
- הורחבה התוכנית לבדיקת נתוני ספירות הפיטופלנקטון ולמציאת ערכים חריגים.
- נבנתה תבנית (ב- Excel) לקליטת נתוני חומרי הדברה.

1.27 אתר האינטרנט "מרכז מידע כנרת"

מיקי שליכטר, יורי לשינסקי, תמר זהרי ואלון רימר

בנובמבר 2011 נפתח לציבור אתר האינטרנט של "מרכז מידע כנרת". האתר משולב באתר האינטרנט של חיא"ל. מטרת האתר להציג לציבור מידע אודות הכנרת בנושאים שונים:

- מידע אודות מרכז המידע - מטרות מרכז המידע ומקור הנתונים.
 - המערכת האקולוגית בכנרת - הצגה של נושאים שונים בתחומי הפיסיקה, כימיה וביולוגיה של הכנרת. כל נושא מיוצג ומוסבר בטקסט בליווי גרפים, תמונות, מאמרים ועוד.
 - תוכנית הניטור של הכנרת - הצגת מערך הניטור המתבצע בכנרת: המכשור הקיים, תחנות הדיגום, תדירות הדיגום, הפרמטרים הנמדדים ועוד.
 - תצוגת נתונים בזמן אמת - תצוגה גראפית אינטראקטיבית של נתונים מטאורולוגיים ושל נתונים הנמדדים ע"י הדוגם האנכי (טמפרטורה, עומק, חמצן מומס, pH, מוליכות, פוטנציאל חימצון/חיזור, עכירות וכלורופיל a; ראה סעיף 1.22 פרופיילר אוטונומי).
 - נתוני עבר - תצוגה גרפית של נתונים פיסיקליים, כימיים וביולוגיים הנמדדים במסגרת תוכנית הניטור החל מראשיתה בשנת 1969.
 - מדדי איכות מים - תצוגת תרשימים שנתיים של מדדי איכות המים בכנרת.
 - פרסומי המעבדה לחקר הכנרת - דוחות שנתיים, דוחות בנושאים שונים, מאמרים נבחרים. במהלך שנת 2013 נמשכה עבודת העדכון השוטף של האתר בנתוני הניטור המוצגים בגרפים:
 - נתוני הדוגם האנכי.
 - נתוני טמפרטורת המים ממערכת ה-LDS בתחנת ברבוטים.
 - נתוני מטאורולוגיים מתחנה A.
 - נתוני ממוצעים חודשיים של פרמטרים מתחום הכימיה, פיטופלנקטון, זואופלנקטון ומטאורולוגיה.
- האתר עודכן בדוחות חדשים ובמאמרים.
- נוספה תצוגה גרפית אינטראקטיבית של נתוני טמפרטורה מתחנת ברבוטים (איור 74).



איור 74: תצוגת גרפית אינטראקטיבית של נתוני טמפרטורת המים מתחנת ברבוטים בין התאריכים 30 לדצמבר 2013 ועד ה-20 לינואר 2014, ובין העומקים 0.2 עד 13 מ'. בולטת תופעת ההתחממות היומית וההתקררות הלילית של המים ב-3 המטרים העליונים בתחנה זו.

2 מחקרי הניטור

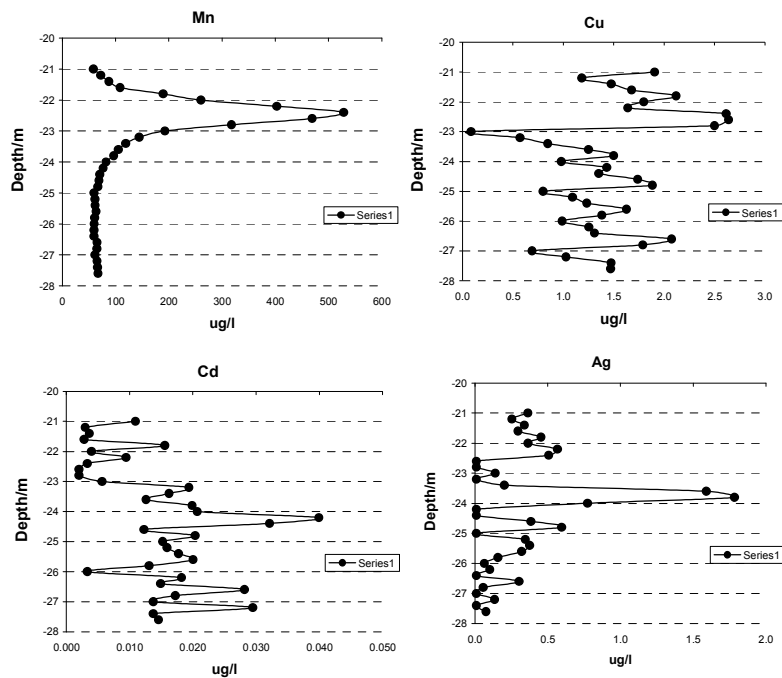
2.1 מתכות קורט

עמי נשרי, גלית שרעבי, לודוויק הליץ (מכון גאולוגי)

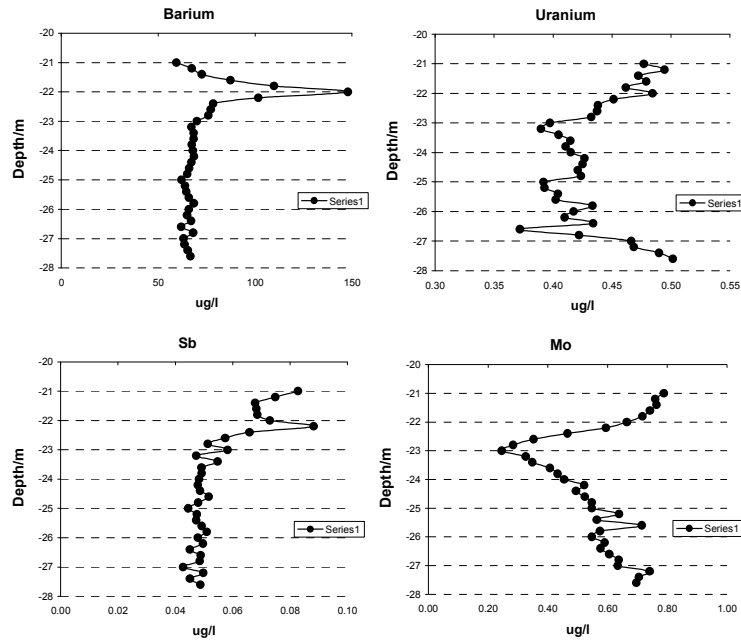
מטרה: הכרת התנהגות המתכות וריכוזיהן בכנרת ובאגן ההיקוות

ניטור זה מבוצע מזה כ-15 שנה במסגרתו נדגמים בכנרת 3-4 פרופילים לשנה לאנליזה של מתכות קורט. האנליזות מבוצעות במכון הגאולוגי בירושלים.

בסתו איזור התרמוקלינה-כמוקלינה-אוקסיקלינה מהווה זירה ועונה מענינים במיוחד למעקב אחרי ריכוזי המתכות. בעונה זו הכמוקלינה-תרמוקלינה מתחדדת וגרדיאנט הריכוזים והטמפרטורה פרוס על 1-2 מ' בלבד לעומת הקיץ שבו שכבת הביניים משתרעת על כ-6 מ'. בשלהי אוקטובר 2013 הכמוקלינה נמצאה בין העומקים 22-23 מ' באיור 75 ניתן להבחין בשיא גדול של מנגן בעומק של 22.4 מ'. בעומק זה, שבו נמצאה גם האוקסיקלינה, תחמוצות מנגן ששוקעות מלמעלה מתחזרות ולכן ערך הרדוקס ששורר במישור זה הוא בעל ערך מוגדר. מתוך נתוני ריכוזי האמוניום (לא מוצגים) עולה שבעומק של 23 מ' קיימת הערמות של חומר אורגני ופירוקו. בעומק זה גם מתחוללים שינויים שמהותם לא ברורה בריכוזי הנחושת (מינימום) ואילו בבסיס תת-שכבה זו, בעומק 24 מ' נכרת הערמות כסף וקדמיום ומינימה באנטימון ובארניום (איור 75, 76). התנהגות הבריום (איור 76) מהווה תעלומה מכיוון שהשיא המודגש של יסוד זה מצוי כ-40 ס"מ מעל לשיא של המנגן והסיבות לכך עדיין אינן ברורות.



איור 75: פרופילים של רכוזי מנגן (שמאל למעלה), נחושת (ימין למעלה), קדמיום (שמאל למטה) וכסף (ימין למטה) באזור התרמוקלינה (20-28 מ' עומק) בשלהי אוקטובר 2013.



איור 76: בריום (למעלה משמאל) אורניום (למעלה מימין), אנטימון (למטה משמאל) ומוליבדנום (למטה מימין) באוקטובר 2013.

2.2 יישום מודל תלת-ממדי לכנרת

גדעון גל בשיתוף עם אלי גלנטי (אוני' תל אביב)

במימון רשות המים

כחלק מפרויקט החירום לניטור הכנרת הוחלט לפתח מודל תלת מימדי פיסיקלי, אליו יצומדו מודלים כימיים וביולוגיים. המודל אמור לשמש ככלי לחקר הכנרת ולקבלת החלטות באשר לניהול האגם. הדגש הינו על יכולת ניטור וחיזוי פריחת אצות, ופרמטרים כימיים כגון חנקן, זרחן, וחמצן.

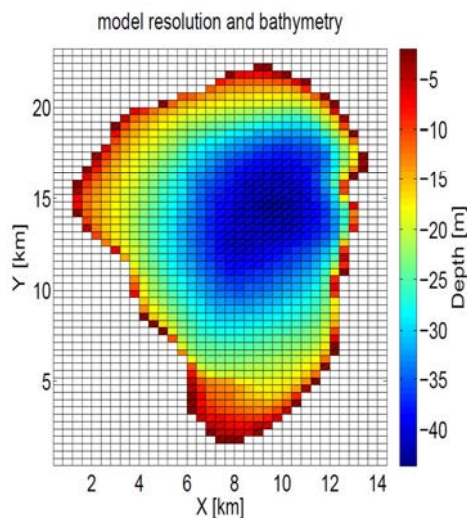
בעשור האחרון נעשו מספר מחקרים על ידי הקבוצה האוסטרלית בראשות פרופ' אימברג אשר בחנו באמצעות המודל פיסיקלי ELCOM מאפיינים שונים של הדינאמיקה של האגם ומאפיינים פיסיקליים כגון אופן שכוב המים, התגובה לרוח משתנה, ערבוב באמצעות גלים פנימיים, אופן הזרימה ליד הקרקעית, ומאפיינים ביולוגיים כגון פריחת האצות באביב. בנוסף, בשנים האחרונות נערכו מספר מחקרים על הכנרת אשר עשו שימוש במודל הפיסיקאלי התלת מימדי ROMS.

בשלב ראשון של מחקר זה בחנו את המודלים האפשריים ליישום בכנרת ועל בסיס שיקולים שונים בחרנו להשתמש במודל הסירקולציה הגלובלית (GCM) של אוניברסיטת MIT (mitgcm.org). את הפירוט של השיקולים לבחירת מודל זה ניתן למצוא בדוח השנתי לשנת 2012.

התאמה לכנרת

לצורך התאמת המודל לכנרת נעשה שימוש בנתוני בתימטריה של המעבדה לחקר הכנרת ברזולוציה של 400 מ' (איור 77). הרזולוציה האופקית של המודל נקבעה באופן ראשוני ל-400 מ', בדומה לזו של המודל האוסטרלי. נבחנו גם הרצות עם רזולוציה גבוהה יותר של 200 ו-100 מ' אך אלו לא הראו שיפור משמעותי

בתוצאות. הרזולוציה האנכית נקבעה ל-1 מ' (עומק האגם עד 42 מ'), כאשר במטר העליון הרזולוציה היא 0.25 מ', ובמטר השני הרזולוציה היא 0.5 מ'. הרזולוציה העדינה קרוב לפני השטח נועדה לאפשר זרימה גם קרוב לחופים שם עומק המים קטן.



איור 77: רזולוציית המודל האופקית עם גודל תא של 400 מ'. הצבעים מצביעים על העומק המקסימלי (אדום – פני שטח, כחול – עומק של 42 מ').

הערבוב האופקי במודל נעשה באמצעות פרמטריזציה Smagorinsky, והיפר-ויסקוסיטי מסדר 4. צעד הזמן הינו 5 ד' לרזולוציה של 400 מ'. הערבוב האנכי מתבצע באמצעות חישוב של האנרגיה הקינטית הטורבולנטית (TKE). פרמטריזציה זו מותאמת לאגנים קטנים בהם הרזולוציה האנכית גבוהה מאד.

אילוצים בפני השטח – רוחות ושטפי חום ומים

המודל אולץ עם תנאי שפה מטאורולוגיים בשתי קופיגורציות – הראשונה מתבססת על מדידות נקודתיות, והשנייה מתבססת על מודל אטמוספרי מרחבי. בכל המקרים, המדידות נלקחות כממוצעים שעתיים כך שהמחזור היומי בא לידי ביטוי בצורה מלאה.

בקונפיגורציה הראשונה, המודל אולץ עם תנאי שפה מלאים (רוחות, שטפי חום ומים) המתבססים על המדידות הסדירות בתחנה A (רוחות) ובתחנה המטאורולוגית שבקרבת המעבדה, KLL (שטפי חום ומים). בקונפיגורציה זו ההנחה היא שתנאי השפה כפי שנמדדו בתחנות מייצגים את תנאי השפה בכל האגם.

רוחות: הרוחות כפי שנמדדו בתחנה A משמשות לאילוף המודל בכל המרחב, כלומר מניחים שהרוח הינה אחידה על פני כל האגם ושלא קיימת שונות מרחבית. הנחה זו נובעת מהרצון להסתמך על מדידות זמינות. נעשה ניסיון להשתמש במדידות בתחנות אחרות באגן, אולם התוצאות לא הראו שיפור בסימולציה. על מנת להעריך את חוסר הדיוק הנובע מההנחה שלעיל, הורץ מודל אטמוספרי WRF (Weather Research and Forecasting Model) שחישב את הרוחות המרחביות. המודל האגמי הורץ עם רוחות אלה והתוצאות מוצגות בדו"ח זה.

שטפי חום ומים: שטפי החום במודל מחושבים באופן מלא על סמך תצפיות מתחנה A, ומהתחנה המטאורולוגית של KLL. שטפי החום הנכנסים לפני המים נלקחים ישירות משטפי חום יורדים קצרי גל וארוכי גל שנמדדו בתחנת KLL. כמו כן, על סמך מדידות אטמוספריות של טמפרטורת האוויר, הרוחות, והלחות היחסית, חושבו בכל צעד זמן שטפי החום היוצאים מהאגם, ושטף החום הכמוס הנובע מהאידוי. יש לציין כי המודל לא אולץ להתאים את עצמו לטמפרטורת מים נמדדת.

במסגרת עבודה זו לא הוכללו כניסות ויציאות מים מהאגם, אך אפשרות זו ניתנת ליישום במודל ללא צורך בפיתוח נוסף. בהעדר הכניסות יש לצפות לחוסר דיוק במאזן החום והמים והשפעה על תנועת המים בעיקר בחלקו הצפוני של האגם.

שימוש ברוחות ממודל WRF

הקונפיגורציה השנייה מתבססת על רוחות מחושבות ממודל אטמוספירי, ושטפי חום בדומה לקונפיגורציה הראשונה. מטרתנו כאן היתה לבדוק את המגבלה של שימוש ברוחות רק מתחנה A, וללא שונות מרחבית, ולצורך כך שוחזרו הרוחות באזור הכנרת על ידי הרצת מודל WRF שהותאם ספציפית לאזור (Shilo et al., 2008). ההרצות בוצעו על ידי אלעד שילה. המודל האטמוספירי מקבל את תנאי השפה שלו מרה-אנליזה של נתוני NCEP (National centers for Environmental Prediction Re-Analysis), בשריג גס (12 ק"מ) הכולל את כל מזרח הים התיכון. המודל מורץ בשריג הגס בו משולבים שני שריגים עדינים יותר של 4 ק"מ ושל 1.3 ק"מ. השריג העדין ביותר ממורכז סביב איזור הכנרת. מודל ה-WRF הורץ עבור שתיים מהתקופות בשנת 2005, אביב וקיץ. הרוחות שהתקבלו מהמודל האטמוספירי שימשו כתנאי שפה למודל האגמי ותוצאות הרצת המודל הושו להרצה עם רוחות מתחנה A בלבד. בשתי תקופות המבחן, הרוחות שחשבו על ידי מודל ה-WRF היו בהתאמה טובה מאד לתצפיות.

אימות תוצאות המודל הפיסקלי

על מנת לאמת את תוצאות המודל, נבחרו ארבע תקופות במהלך שנת 2005, כל אחת של כ-10 ימים: אביב (13-22 באפריל, 2005), קיץ (22 באוגוסט עד 1 לספטמבר, 2005), סתיו (9-18 לנובמבר, 2005), וחורף (20-29 לינואר, 2006). המודל הורץ עבור כל תקופה כאשר הוא מאולץ עם תנאי השפה כפי שפורטו לעיל.

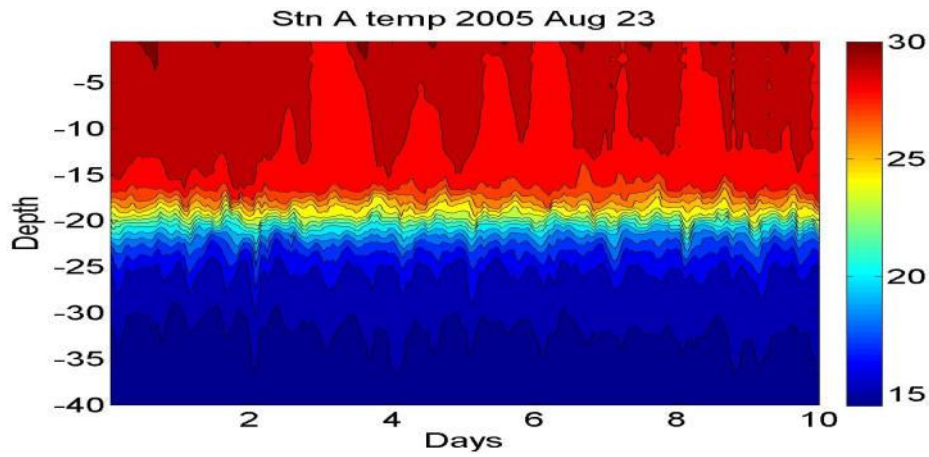
תוצאות המודל הושו לתצפיות ממגוון מקורות: פרופילי טמפרטורה רציפים מתחנה A, פרופילי טמפרטורה שבועיים מתחנות H,G,A,D, מדידות לוויין מודיס מסיסקל (שהתקבלו מדר' גדעון טיבור), ופרופילי טמפרטורה ממכשיר המיניבאט.

בנוסף לארבע התקופות הקצרות, בוצע ניסוי בו הורץ המודל לתקופה של חודש אחד מלא (אוגוסט 2005). חודש זה נבחר כיוון שבתקופה זו הרוחות היומיות סדירות והתרמוקלינה יציבה. לכן, כל סטייה של המודל ממצב זה מצביעה על הקושי הפנימי שלו לשמור על דינאמיקה שמשקפת את המציאות לאורך זמן. זהו אחד האתגרים בבניית מודל פיסקלי לכנרת (היכולת להריץ את המודל לתקופה של יותר מאשר מספר ימים), וכאן אנחנו מציגים את הצעדים הראשונים בכיוון זה. תוצאות המודל מאומתות אל מול המדידות מתחנה A.

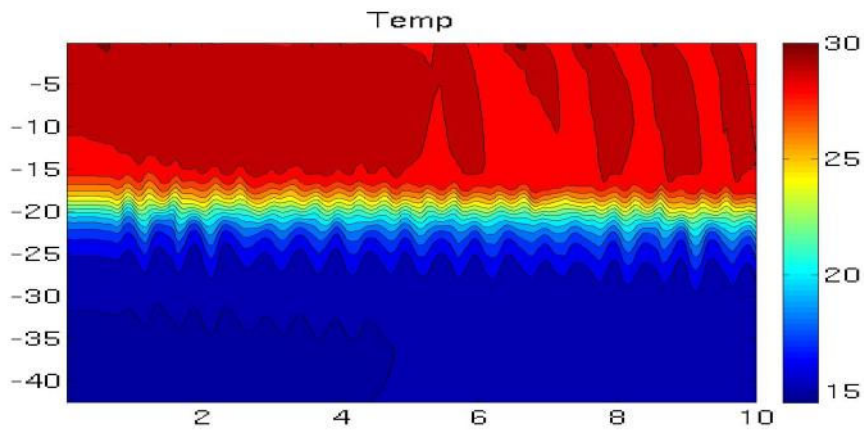
בגלל מגבלות מקום מוצגות בדוח זה תוצאות עבור רק אחת מארבעת התקופות (22 באוגוסט עד 1 לספטמבר 2005) שנבחנו עם המודל.

תקופה זו מתאפיינת ברוחות סדירות בתרמוקלינה חריפה ויציבה (איור 78), ושטפי חום מאוזנים (סוף מגמת החימום). תוצאות המודל (איור 79) מצביעות על יכולת לדמות את המבנה האנכי באופן מצוין, אם כי הטמפרטורה בשכבה המעורבבת גבוהה במקצת מזו הנצפית. התרמוקלינה קומפקטית כמו במציאות והמאפיינים שלה נשמרים לאורך כל תקופת ההרצה. המודל מצליח לייצר את הגלים הפנימיים באגן – אמנם חסרים הפרטים המדויקים אבל ההעמקה היומית ניכרת. שימוש ברוחות ממודל WRF (איור 80) מוסיפות במידת מה לרב הגוניות של הגלים הפנימיים, אך פחות מאשר בתקופת האביב. יתכן שדבר זה נובע מכך שבקיץ הרוחות סדירות יותר ואחידות יותר.

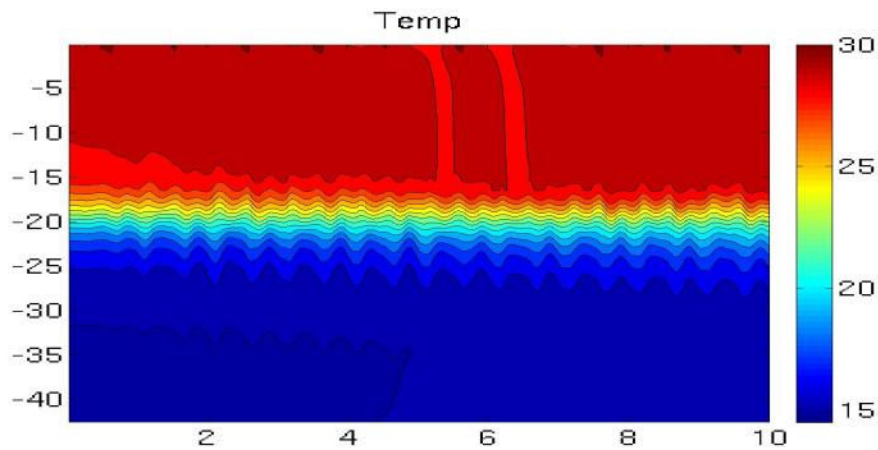
השינויים בזמן של הטמפרטורה (וכן של הזרמים ועומק התרמוקלינה) מתאפיינים במחזוריים ימתיים וחצי ימתיים (איור 81). שוב, המחזור החצי ימתי בולט יותר במודל מאשר בתצפיות. ניתן לראות בסדרת הזמן את ההתאמה הטובה בין המודל לתצפיות. שימוש ברוחות ממודל WRF משפר באופן כללי את ההתאמה הבאה לידי ביטוי בעיקר בתדירות החצי-יממתית.



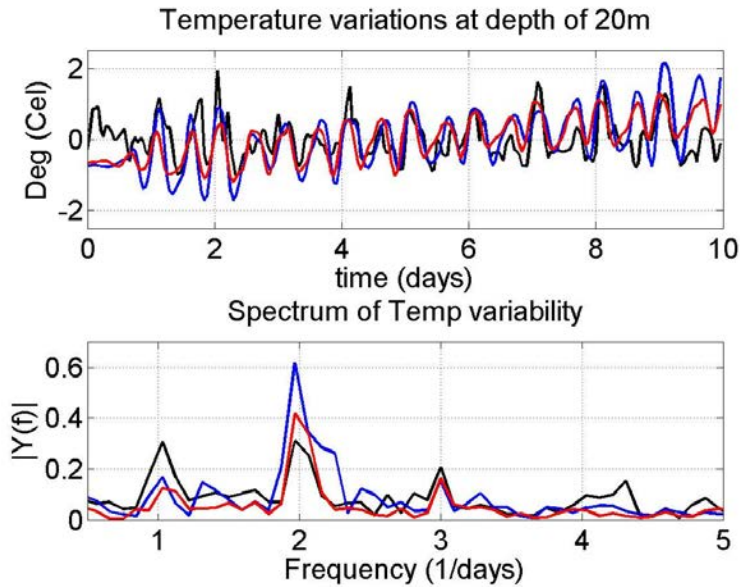
איור 78: הטמפרטורה של עמודת המים בתקופה 22 באוגוסט עד 1 לספטמבר 2005 (ימים 0 עד 10 בהתאמה) כפי שנמדדה בתחנה A. נכרת תרמוקלינה חדה בעומק שבין 17-22 מ'.



איור 79: הטמפרטורה של עמודת המים בתקופה 22 באוגוסט עד 1 לספטמבר 2005 לפי תוצאות המודל. נכרת התרמוקלינה החדה.

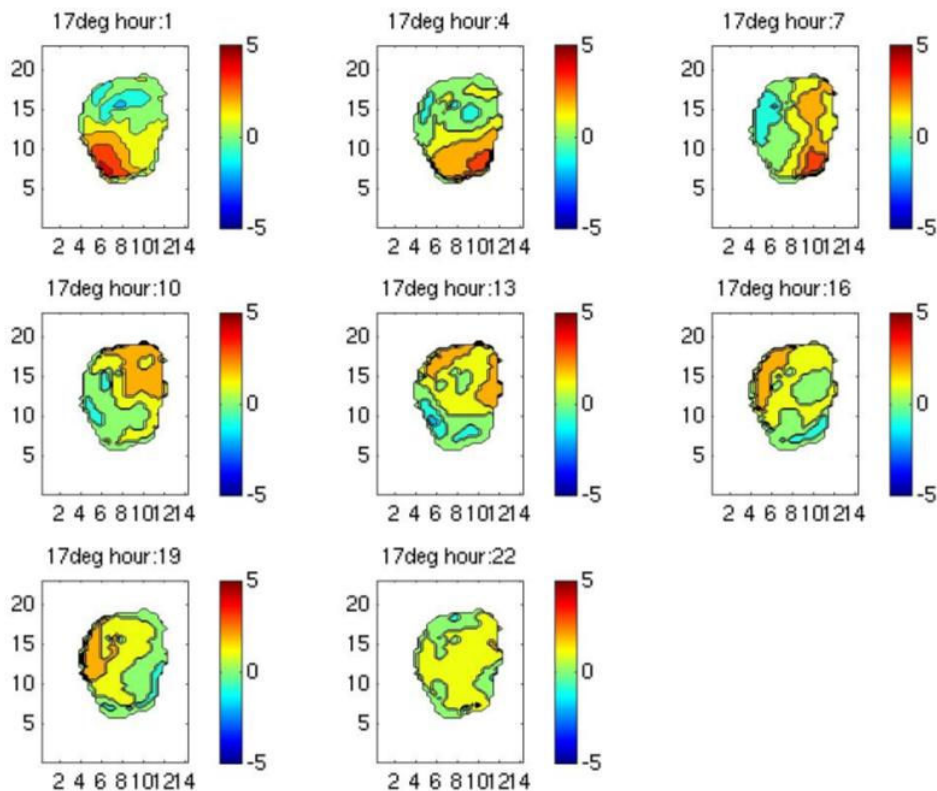


איור 80: הטמפרטורה של עמודת המים בתקופה 22 באוגוסט עד 1 לספטמבר 2005 מתוצאות המודל, תוך שימוש ברוחות WRF. גם כאן נכרת התרמוקלינה החדה.



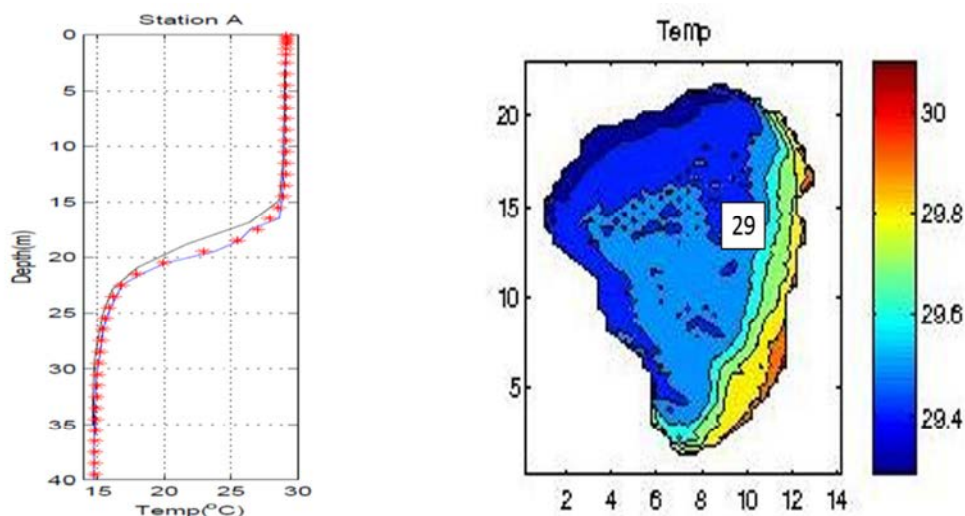
איור 81: שינויים בטמפרטורה באגם בעומק 20 מ' בתקופה 22 באוגוסט עד 1 לספטמבר 2005 (למעלה), וספקטרום עבור סדרת זמן זו (למטה). תצפיות – שחור, מודל – כחול, מודל עם רוחות מ-WRF – אדום.

את השינויים במהלך היממה (גלים פנימיים) ניתן לראות בשינויים בעומק התרמוקלינה (איור 82). איור זה מראה את השינוי בעומק התרמוקלינה (טמפרטורה של 17 מעלות) במהלך של היממה השלישית (24 לאוגוסט) בהרצת המודל. ניתן לראות את השילוב של המחזור היממתי עם המחזור החצי יממתי.



איור 82: שינויים בעומק (מ') של שכבת המים בה הטמפרטורה היא 17 מעלות במהלך יממה אחת. סקלת הצבע מציגה הפרש עומקים, במ'.

תצפיות של טמפרטורת האגם מלווין המודיס לא קיימות עבור תאריכים אלו. טמפרטורת פני האגם מהמודל (איור 83) מראה טווח של 29 עד 30 מעלות, המתאים למדידות מהאגם. השוואה למדידות ממערכת RUSS בתחנה A מראה התאמה מצויינת (איור 83).



איור 83: צד ימין - טמפרטורת פני המים לפי המודל ביום השלישי (24 באוגוסט) ב-12 בצהריים. צד שמאל - טמפרטורת עמודת המים לפי המודל ב-23 לאוגוסט (סימון אדום), לעומת הטמפרטורה שנמדדה בתחנת A (קו כחול) ומה-RUSS בתחנה A (קו שחור).

סיכום

פיתוח המודל הפיסיקלי הווה את הנדבך העיקרי בעבודה זו. לאור התוצאות שלעיל, ניתן לומר שהמודל מצליח לדמות תנאים פיסיקליים ריאליסטיים בכנרת באופן משביע רצון, בהשוואה למדידות ממגוון מכשירים וזמנים. הרזולוציה שנבחרה מספקת אינפורמציה טובה באשר לשינויים המרחביים באגם הנובעים מהשתנות הרוחות במהלך התקופות שנבחרו, אולם יתכן שעבור ניסויים עתידיים הדורשים הבחנה מרחבית גבוהה יותר, יהיה צורך בהקטנת גודל השריג.

עוד עולה כי השונות המרחבית של הרוחות משפיעה באופן מהותי על תוצאות המודל. עובדה זו עולה בקנה אחד עם עבודות קודמות ומדגישה את הצורך בפיתוח כלי להדמיית השתנות הרוח באגן הכנרת באופן מייצג מרחבית.

בחלקו השני של הפרוייקט, פותחה היכולת לעקוב אחר חומר פסיבי המוכנס לאגם. הוצגו מספר תרחישים, כניסה ממרכז האגם וכניסה משפך הירדן, בארבע התקופות שנבחנו בעבר (אביב, קיץ, סתיו, וחורף). בהינתן כניסת חומר בתחנה A, הבדלים משמעותיים נצפו באופן פיזור החומר בין התקופות השונות. בעוד שבאביב ובקיץ הזרמים החזקים מסיעים את החומר למרחקים גדולים ומפזרים אותו, בסתיו ובחורף הפיזור קטן בהרבה. בנוסף, חדירת החומר לעומק השכבה המעורבת עד לתרמוקלינה מתרחשת במהירות במהלך היממה הראשונה. לעומת זאת, חומר שהוכנס בשפך הירדן נשאר קרוב מאד למקום הכניסה, ללא תלות בעונת השנה. זאת בשל הזרמים החלשים הקיימים שם.

שימוש ברוחות ממודל WRF גרמו לשינויים ניכרים במהירות ובכיוון הזרמים באגם. בעקבות שינויים אלו נוצרו הבדלים, לעיתים מהותיים, באופן פיזור החומר. תוצאה זו מצביעה על הצורך בהרצת המודל עם רוחות בעלות התפלגות מרחבית.

צימוד המודל הפיסיקלי למודל כימי וביולוגי הקיים במודל ה-MITGCM וכיול ראשוני שלו, הראו יכולות סבירות לדמות ערכים כימיים וביולוגיים האופייניים לאגם. עם זאת, יש לזכור כי מודל זה פותח לסביבה של ים פתוח ועמוק ולא לסביבה האגמית של הכנרת.

קיום של מודולים ביו-כימיים של מודל MITGCM מאפשר פיתוח וכיול מודל אקולוגי המצומד למודל התלת-מימדי על כן, המשך פיתוח יכולות של מודל תלת-מימדי לכנרת יאפשר הרחבה משמעותית של היכולות והכלים העומדים לרשותינו בבחינה של שאלות מחקריות וממשקיות שונות. כלים אלו כוללים שלושה סוגים של אסופות של מודלים:

1. אסופה של מודלים ביו-כימיים על בסיס מודל הידרודינאמי תלת-מימדי משותף,
 2. אסופה של מודלים הידרודינאמיים (חד-מימדי ותלת-מימדי) עם מודל ביו-כימי משותף
 3. אסופה של מודלים אקולוגיים-פיזיקליים חד מימדיים של הכנרת
- אין ספק שפיתוח יכולות אלו יעמיד את הכלים העומדים לרשות מקבלי ההחלטות וחוקרים על רמה אחרת מהקיים כיום ובקו החזית של פיתוח ויישום מודלים למערכות אקווטיות.

2.3 שיפור ניטור הפלנקטון באגם בעזרת מערכת ה-FlowCAM

נאוה כרמל, גדעון גל ותמר זהרי

במימון רשות המים

מכשיר ה-FlowCAM הינו מכשיר שפותח לאפיון כמותי ואיכותי של חלקיקים בטווח הגדלים של מיקרופלנקטון (2 μm - 2 mm) בדגימת מים. שמו נגזר מתכנונו ככלי המאחד יכולות פעולה, הן של ציטומטר, הן של מיקרוסקופ והן של מצלמה לאנליזה של הרכב מיני הפלנקטון ואומדן נתוני הגודל שלהם.

ניטור אוטומטי באמצעות מכשיר ה-FlowCAM הינו מהיר יותר ומאפשר לבצע אנליזה בו זמנית של ריבוי פרטים, דבר שיסייע להרחבה משמעותית של בסיס נתוני מופעי אוכלוסיית הפלנקטון, הרכבם וגודלם. הנתונים יתרמו להבנה רבה ומקיפה יותר של התהליכים המתרחשים באגם ומכלול הגורמים הביולוגיים המשפיעים על איכות המים בכנרת.

תהליך הכנסת ה-FlowCAM כמכשיר ניטור אוטומטי במעבדה לחקר הכנרת

בשל מורכבותו של המכשיר, בשלב הראשון העבודה התמקדה בתפעול נכון של המכשיר, בכיולו והתאמתו לעבודה השוטפת בזיהוי מיני הפלנקטון בכנרת: קביעת תנאי עבודה סטנדרטיים, התאמת רכיבי המכשיר (עדשות, משאבות, סוגי צנרת, נוזל נושא ועוד) ותנאי הרצת הדגימה (נפח דגימה, מהירות זמן הרצה, מס' צילומים לשנייה ועוד) הייחודיים לכל קבוצת פלנקטון, לשם זיהוי אופטימאלי של המינים הנפוצים בכנרת.

בשלב השני, התחלנו בתהליך של זיהוי ואיפיון טווח ערכי הפרמטרים אותם מודד המכשיר, המייחדים כל מין, סוג או קבוצת מיני פלנקטון ובעיקר עבור המינים החשובים בכנרת. המידע על טווח הפרמטרים המאפיין כל מין משמש לבניית פילטרים דיגיטאליים לסיווג מיני הפלנקטון השונים בדגימות מים. החלת הפילטרים מיועדת לזהות את מיני הפלנקטון השונים בדגימת מי כנרת ולמיינם לקבוצת המין שלהם

(קלסיפיקציה) במטרה לקבל אומדן של גודל האוכלוסייה של מיני פלנקטון שונים בדגימת המים, יחד עם מידע איכותי לכל הפרטים החל ממדדי גודל ועד נתוני פלורסנציה.

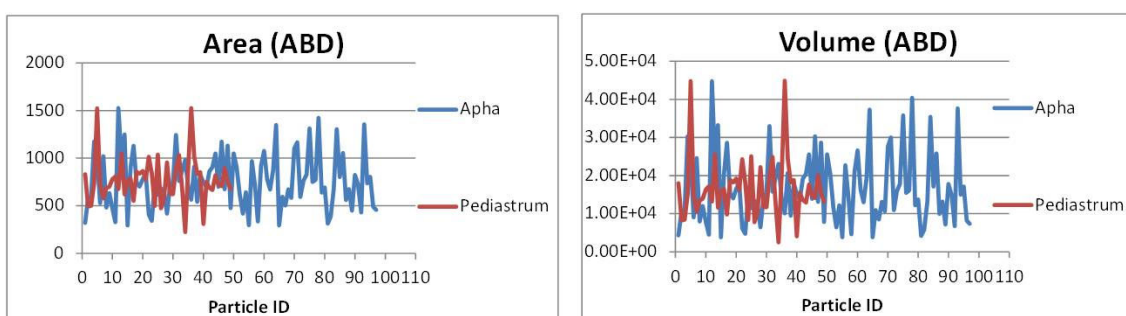
ייעול הגדרת הפילטרים המבצעים את עבודת המיון של המינים השונים לקבוצות מוגדרות (קלאסים)

איתור חלקיק (צילום מין פלנקטון) כמתאים להיות משויך לקבוצה מסוימת (קלאס) הינו עפ"י מידת התאמת נתוני המדדים המאפיינים את החלקיק לנתוני מדדי הפילטר הממייין. כאשר הגדרת מדדי הפילטר הממייין יהיו יותר ויותר מייצגים את רוב האוכלוסייה של מין מסוים ומבדילים אותו מכלל אוכלוסיית הפלנקטון, הרי הצלחתו בסיווג חלקיק לקלאס שלו תהיה גבוהה יותר. הגדרת המדדים לבחינת התאמת חלקיק לקלאס מסוים נעשה ע"י בניית פילטר. ניתן לבנות שני סוגים של פילטר בתכנת ה- Visual Spreadsheet (התוכנה המבצעת את עיבוד התמונה הדיגיטלי לדימויי החלקיקים):

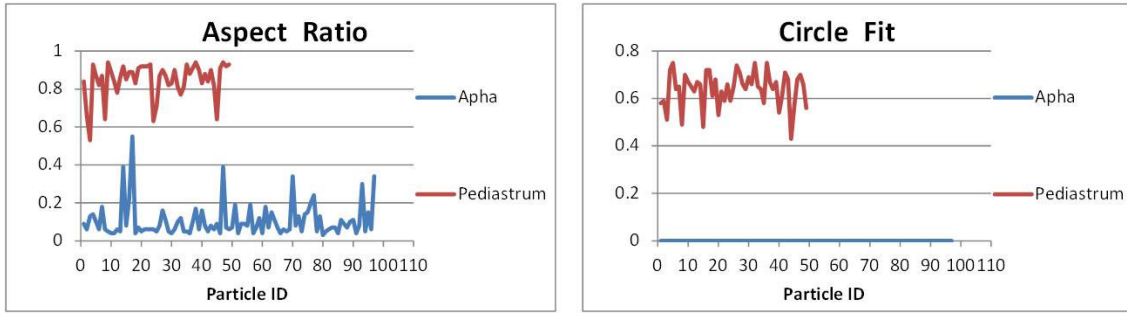
פילטר אחד הינו פילטר סטטיסטי (Statistical Filter) אותו בונה התוכנה עפ"י ניתוח סטטיסטי של מדדי החלקיקים בספריית הייחוס שעל-פיה נבנה הפילטר. פילטר זה מזהה ומשייך את המינים השונים לקלאסים אליהם הם שייכים, אולם עדיין ישנם חלקיקים שהפילטר לא מצליח לזהות ולשייך לקלאס המתאים ולכן נדרש להשלים את הסיווג בצורה ידנית. יעילות פילטר מסוג זה הינה כ-75%. סוג אחר של פילטר הינו פילטר ערכי (Value Filter) הנבנה ע"י המשתמש לפי מדדים המאפיינים את מין המטרה ואשר מבדילים אותו ממינים אחרים.

במטרה לקבוע את טווחי המדדים השונים האופייניים לכל מין ומין נדרש לזהות מה הם טווחים אלו. כמו-כן, יש לקבוע אילו מדדים הינם מייצגים ויכולים לשמש לאיפיון המין ומה הם הטווחים הייחודיים המבדילים את מין המטרה ממינים אחרים. עפ"י מדדים אלו ניתן להגדיר ידנית את הפילטר ולקבוע אותו כפילטר ערכי ולא כפילטר סטטיסטי שנבנה עפ"י האלגוריתם של התוכנה.

לצורך קביעת טווח ערכי המדדים נבנו עבור מספר מינים עקומות של כל המדדים המתבססות על נתוני המדדים של 50-100 פרטים. עקומה, שהינה ביטוי של טווח נתוני מדד מסוים של מין אחד הושוותה לעקומה של אותו מדד במין שני במטרה לבדוק אם ישנה חפיפה או הבדל בטווח הנתונים של המדד הנבדק. במידה וישנה חפיפה, הרי שמדד זה לא יוכל לשמש כמדד יעיל לבניית פילטר (איור 84). במידה ואין חפיפה בין ערכי מדד כלשהו הרי שמדד זה יוכל לשמש לבניית פילטר יעיל כמדד המבדיל בין המינים השונים (איור 85).

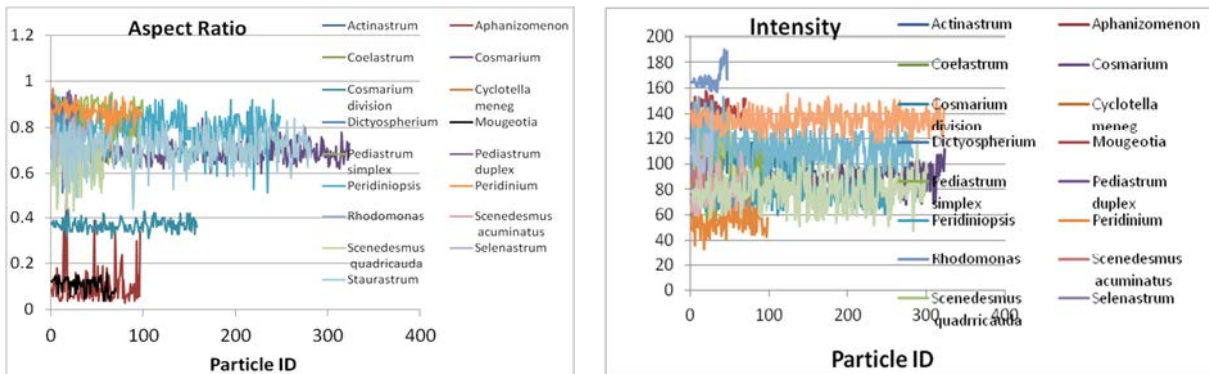


איור 84: עקומות המתארות את פיזור הערכים של שתי תכונות (שטח משמאל, נפח מימין) בעלות ערכים חופפים בשני מיני אצות: *Pediatrum* ו-*Aphanizomenon*. שני מדדים אלו אינם מדדים יעילים לשמש לבניית פילטר למיון והבדלה של שני מינים אלו, היות והערכים של שתי תכונות אלו נמצאים בסרגל ערכים חופף.



איור 85: עקומות המתארות את פיזור הערכים של שתי תכונות (יחס בין אורך ורוחב משמאל, התאמת שולי הדימוי למעגל מושלם מימין) בעלות ערכים בלתי חופפים בשני מיני אצות: *Pediastrum* ו-*Aphanizomenon*. שני מדדים אלו הינם מדדים יעילים לשמש להגדרת פילטר למיון והבדלה של שני מינים אלו, היות והערכים של שתי תכונות אלו נמצאים בסרגל ערכים שונה.

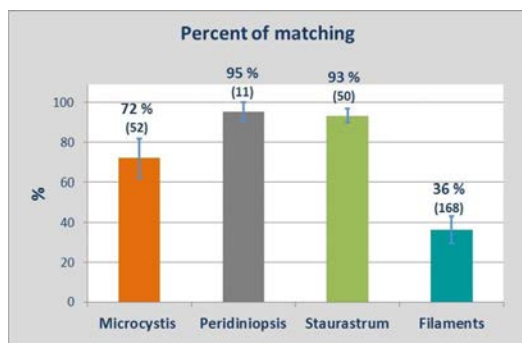
ניתוח התכונות הפוטנציאליות הייחודיות לכל מין ומין במטרה לייעל את פעולת הפילטרים הערכיים ולהגדיר טווח ערכים מייצג של כל תכונה במינים השונים, העלה שטווח ערכים אלו חופף במינים רבים. זו כנראה הסיבה לכך שתוכנת ניתוח התמונות של מכשיר ה-FlowCAM, בשל מנגנון מיון המסתייע באלגוריתם המתבסס על ניתוחים סטטיסטיים של התכונות, לא הצליחה במידה מספקת למיין בין מינים רבים בעלי טווח ערכים דומה בתכונות החלקיקים השונות. באיור 86 ניתן לראות דוגמא לחפיפה בטווח ערכים במינים השונים.



איור 86: עקומות המתארות את פיזור הערכים של שתי תכונות (יחס בין אורך ורוחב ואינטנסיביות) בעלות ערכים חופפים ב-17 מינים שונים של מיקרו אצות בעלות עניין אקולוגי ומחקרי. שני מדדים אלו הינם דוגמא למורכבות של זיהוי ומיון מינים רבים ואיתור מדדים יעילים לשמש להגדרת פילטר למיון והבדלה של מינים רבים, היות והערכים של שתי תכונות אלו נמצאים בסרגל ערכים חופף.

בניתוח כלל ערכי התכונות של המינים השונים באמצעות גרפים דומים לכל תכונה ותכונה, נמצא שלא קיימת תכונה ייחודית אחת או יותר בה ניתן להשתמש כדי לזהות את המינים הרלוונטיים.

יעילות הפילטר הסטטיסטי נבדקה באמצעות קביעת מספר הפרטים שזוהו באמצעות פילטרים סטטיסטיים של ארבע מיני מיקרופלנקטון מתוך אוכלוסייה ידועה של המיקרופלנקטון בדגימת מים, (איור 87). מספר הפרטים שזוהו נכון בוטא כאחוזים ממספר הפרטים הקיימים שצולמו תוך כדי מעבר דגימת המים בתא הזרימה ובשדה הראייה של עדשת המיקרוסקופ שבמכשיר הפלואאו-קאם. ניתן לראות שבסוגים *Staurastrum* ו-*Peridiniopsis* יעילות הפילטר הייתה 93 ו-95%, בהתאמה, כששעורים אלו היו גבוהים בהרבה מהיעילות המצופה של 75% האופיינית לפילטרים הסטטיסטיים. בקבוצת ה-*Microcystis* אחוז היעילות היה כמצופה (72%) ובקבוצת החוטיות אחוז ההתאמה היה נמוך (36%). קבוצה זו היא קבוצה המורכבת ממספר מינים הנמנים הן עם הכחוליות והן עם הירוקיות ונדרשת עוד עבודה רבה לניתוח התכונות ובנית פילטר ייחודי יעיל לכל מין ומין.



איור 87: אחוז זיהוי מספר הפרטים של ארבע קבוצות וסוגים של מיקרו-אצות במכשיר הפלואוקאם לעומת הספירות הידניות. קווים אנכיים מציינים שגיאת תקן של הממוצעים (n=3). בסוגריים ממוצע של ספירה ידנית של מספר הפרטים שצולמו באוסף התמונות של דגימות המים (האוכלוסייה הידועה). במיקרוציסטיס נספרו רק מושבות המכילים יותר מ-10 תאים.

פתרון אפשרי לבעיה זו של איתור מדדים יעילים ומייחדים שימשו לסינון כל מין ומין וכן לסדר המיון של המינים השונים הינו באמצעות שימוש בכלים מתמטיים המסוגלים לעבד נתונים רבים ולהחליט מהם מדדים אלו ומהו סדר מיון המינים השונים. אחד מהכלים המתמטיים הללו יכול להיות מודל "עץ החלטות". ניתוח מתמטי כזה דורש מעורבות מקצועית של מתמטיקאי או איש מחשבים ואנו כמשתמשי התוכנה חסרי רקע מתמטי נדרש, ומיותר לציין שקוד האלגוריתם של תכנת עיבוד התמונה של ה-FlowCAM הינו קוד מוסתר. בעייה זו ואפשרויות הפיתרון לה הוצגו בפני אנשי הייצור Fluiding Imaging Technologies בארה"ב במהלך ביקור-השתלמות במשרדי החברה במדינת מיין בארה"ב באוגוסט 2013. בעקבות הצגת הצרכים שלנו בפניהם החברה עובדת על יישום של שלוש שיטות מתמטיות לקבלת החלטות של בחירת תכונות בולטות ומייצגות למינים רבים וסדר עריכת הקלאסיפיקציה ברמת התוכנה Visual Spreadsheet, המשמשת כבסיס להפעלת מכשיר ה-FlowCAM ובכללן שימוש ב"עץ החלטות". גרסה מעודכנת של התוכנה עם שינויים אלו יופץ בעתיד וצפוי לשפר את יכולת התוכנה להפריד ולזהות קבוצות טקסונומיות שונות. כמו-כן, נוספו לאחרונה לתוכנה תכונות חלקיקים נוספות האמורות לייעל את המיון של האצות בכלל והאצות החוטיות בפרט. שימוש בתכונות אלו הצריך החלפת גרסת התוכנה שבידנו והרצת דוגמאות אצות חדשות במטרה לבצע אנליזה של תכונות אלו לדימויי האצות.

תוכניות להמשך

בשלב השלישי של הפרוייקט נדרש לבדוק את מהימנות הניטור והדירותו יחסית לניטור המיקרוסקופי. שלב זה מתמקד בהרצת הדוגמאות השוטפות המשמשות לניטור המיקרופלנקטון בכנרת במכשיר ה-FlowCAM במקביל לספירה במיקרוסקופ. תיערך השוואה בין התוצאות המתקבלות של התפלגות מיני המיקרופלנקטון השונים בדגימת המים בשתי השיטות. תחושב מידת הסטייה ותיבדק אם הינה חוזרת על עצמה בשיטיות. גם אם התוצאות לא תהיינה זהות אך מידת הסטייה בין שתי השיטות תהיה עקבית, הרי שניתן יהיה לקבוע שמכשיר ה-FlowCAM יוכל לשמש ככלי ניטור אמין להתפלגות מיני הפלנקטון בכנרת. שלב זה מתבצע בימים אלו ומתמקד במספר מינים המהווים אבן בוחן לשימוש במכשיר הפלואו-קאם לניטורם.

2.4 שכלול ושיפור מערכת אינדקס איכות המים

ארקדי פרפרוב וגדעון גל

במימון רשות המים

מטרת המחקר היא עדכון ושכלול מערכת האינדקס לאיכות מים בכנרת הקיימת היום תוך פיתוח שני אינדקסים נפרדים, האחד שייצג את איכות המים בכנרת לצורך שמירה על המערכת האקולוגית (EC) והשני שייצג את איכות המים בכנרת כמי גלם למערכת אספקת המים (WS). עיקרי הפעילות בשנה החולפת עסקו בהגדרת הפרמטרים המתאימים ביותר למדד האקולוגי וקביעת קריטריונים להגדרת תחומי הערכים הקבילים והשיטות להמרת הריכוזים הנמדדים למדרג של המדד.

לצורך הגדרת הפרמטרים ואופן המרתם לערכי מדד נקבעו מספר עקרונות יסוד הכוללים:

- המערכת האקולוגית מוגדרת כמערכת הכוללת שילוב של שטפי אנרגיה וחומר, מחזוריים ביוכימיים המושפעים ומשפיעים על הביטחון הכוללת אוכלוסיות של יצרנים וצרכנים. מערכת זאת מקיימת יחסי גומלין עם תהליכים אגניים.
- שינויים במערכת האקולוגית מוגדרים ע"י שינויים במשתנים אקולוגיים ביחס למצב ייחוס שהתקיים במהלך תקופת הייחוס.
- משמעות הערכת מצב איכות המים של המערכת האקולוגית היא כימות השינויים האקולוגיים במושגים של "טוב" ו"רע".
- מערכת אינדקס איכות המים צריכה לשמש את מנהלי המשאב ומקבלי החלטות ככלי וכמטרה לשימור המערכת האקולוגית.
- מערכת אינדקס איכות המים צריכה לשקף יציבות של המחזוריים הביוגיאוכימיים, שטפי האנרגיה, מבנה אוכלוסיות היצרנים וגודל אוכלוסיות הצרכנים. יש לשאוף לשמר את המערכת האקולוגית של הכנרת במצב הדומה למצבה בתקופת הייחוס ככל הניתן הכולל מאפיינים כגון פריחות פרידיניום, פריחות בתדירות נמוכה של כחוליות ומצב מזו-איאטרופי.
- מערכת אינדקס איכות המים החדש תהיה ברת השוואה למערכת הישנה.

הגדרת תקופת הייחוס של המערכת האקולוגית

על בסיס ההכרות עם המערכת האקולוגית של הכנרת וצפי הצרכים העתידיים הוחלט ע"י צוות מומחים שתקופת הייחוס תכלול את השנים 1992-1969 בדומה למדד איכות המים הישן. המשמעות היא שמדד איכות המים והמדרגים הניתנים לפרמטרים השונים יהיו מבוססים על השונות בערכי הפרמטרים בתקופה זו המייצגת תקופת של תנאים קבילים ורצויים.

בחירת המשתנים האקולוגיים (הפרמטרים) למדד איכות המים

- צוות המומחים הסכים שמדד איכות המים יכלול משתנים אקולוגיים בלבד.
- לכן, משתנים כגון ריכוז הכלוריד, עכירות, ומספר חיידקי הקולי לא נכללים ברשימת הפרמטרים במדד החדש. אי הכללת ריכוז הכלוריד היא בעיקר על בסיס ההבנה ששינויים בריכוז הכלוריד בטווח של 200-300 מג"ל, המלווים את שינוי המפלס אינם משפיעים על תפקוד המערכת האקולוגית.
- על מנת לכלול משתנים המשקפים שינויים באוכלוסיית היצרנים באגם הוחלט לכלול ברשימה את ריכוז הפרידיניום והכחוליות במקום אחוז הכחוליות שהופיע במדד הישן.

- המערכת תכלול נציגות של אוכלוסיית הזואופלנקטון במושגים של ריכוז ולא ביומסה. השימוש יהיה בריכוז של הזואופלנקטון הטורף (השלבים הבוגרים של הקופפודים).
- עומק הסקי נכלל ברשימה כמדד של שקיפות המים.

שוונות עתית במשתנים האקולוגיים הכלולים במדד איכות המים החדש

ניתחנו את השוונות העיתית במשתנים האקולוגיים לאורך תקופת הייחוס תוך חישוב החציון והאחוזון ה-10 וה-90. טווח זה כולל בתוכו את מירב השוונות ומבטא את היציבות הרצויה במערכת האקולוגית (ראה איור 88). על בסיס הנחה זאת נקבעו הערכים הקבילים עבור כלל המשתנים. מתוך ניתוח של הסדרות העיתיות עולות הנקודות הבאות:

- קימת שוונות קטנה יחסית בערכי החומר המרחף (TSS) ועומק הסקי. השוונות הנמוכה שלהם מעידה על יציבות יחסית של מחזור החומר המרחף באגם למרות השינויים הרבים שחלו במערכת האקולוגית באגם לאורך השנים.
- קיימת מגמת עליה בריכוז הכלורופיל המצביעה על תהליך של איטרופיקציה באגם.
- חוסר יציבות ושוונות גדולה בריכוזי הכחוליות באגם- ירידה מתונה בין 1984-1992 ועליה משמעותית אחרי זה.
- עליה משמעותית בשוונות באוכלוסיית הפרידיניום לאחר שנת 1994. שתי נקודות אלו מעידות על חוסר יציבות באוכלוסיות היצרנים באגם החל מאמצע שנות ה-90.

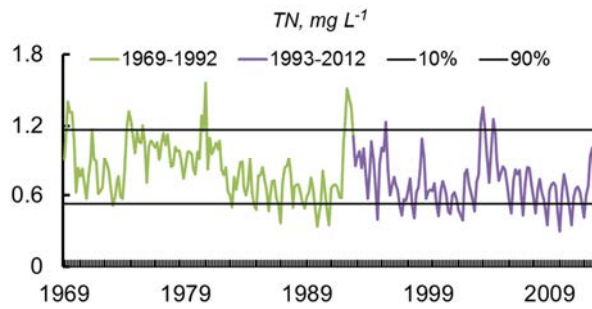
אופן קביעת עקומות המדרג

עקומות המדרג מגדירות את הקשר הפונקציונאלי שבין הריכוזים של משתנים כפי שנמדדים באגם לבין ערך המדרג במדד איכות המים: $R=f(WQI)$ שערכי המדרג (R) נעים בין 10 ל-100. עבור כל משתנה נקבעים ערכי סף תחתון ועליון המגדירים את הריכוזים הקבילים של משתנה זה. ערך המדרג בנקודת הסף הוא 60. ריכוזים של המשתנה בין ערכי הסף יזכו למדרג גבוה מ-60, ומחוץ לערכי הסף (מעל לעליון או מתחת לתחתון) יזכה את הריכוז במדרג נמוך מ-60 ולא קביל.

במחקר זה יישמו את השימוש באחוזונים לקביעת הטווחים הקבילים. גישה זאת יושמה בעבר ע"י הסוכנת להגנת הסביבה בארה"ב (EPA). השימוש בגישה זאת מאפשרת לנו להתמודד עם בעיית ההתפלגות הלא-נורמלי של הערכים לאורך הזמן ובעקבות כך הצורך בביצוע המרות שוונות של הערכים. לשם קביעת הערכים הקבילים בחנו את השימוש בטווחים 5%-95%, 10%-90%, 25%-75%. כמו כן קבענו את הערך החציוני כערך שבו המדרג הוא בערך מסקימלי ($R=100$). בעקבות סדרת איטרציות שבהם בחנו את ההשפעה של השימוש בכל אחד מהטווחים הנ"ל בעיקר על מספר המופעים החריגים בתקופת הייחוס בחרנו את הטווח 10%-90% כטווח האופטימלי. על פי הגדרת הטווח, סך של 20% המערכים בתקופת הייחוס (10% מהערכים הגבוהים ו-10% מהערכים הנמוכים) היו מחוץ לטווח אשר מתקבלים כשוונות טבעית סבירה. בטווח רחב יותר מספר החריגות האפשריות עולות עד כדי קבלה של כל הערכים האפשריים וטווח צר יותר גורם למספר חריגות גדול מדי.

למרות הכללים מנחים לקביעת הטווחים הקבילים לכל אחד מהפרמטרים נקבע שהפרמטר של ריכוז הכחוליות יהיה שונה והטוח הקביל ינוע בין 0-90%.

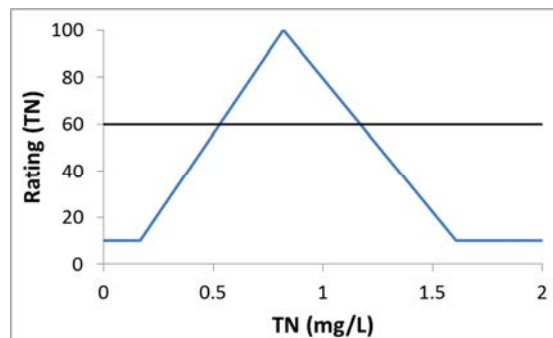
על בסיס טוח הערכים הקבילים (אחוזונים 10-90%) והערך החציוני, ניתן לקבוע את שאר ערכי המדרג כפונקציה של ריכוז בעזרת linear piece-wise approximation (איור 88).



א.

חנקן כללי		
מדרג	ריכוז (מג"ל)	פרמטר
60	0.53	10%
100	0.82	חציון
60	1.17	90%

ב.



ג.

R(TN)=10	If TN<0.17, TN>1.61
$R(TN)= 137.93*TN-13.1$	If 0.17<TN<=0.82
$R(TN)= -114.29*TN+193.71$	If 0.82<TN<=1.17

ד.

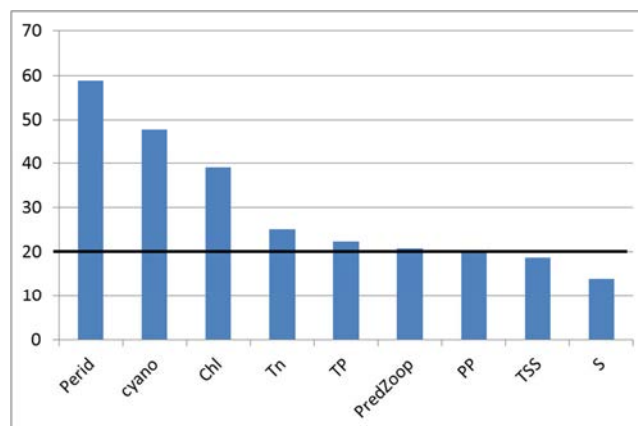
איור 88: דוגמא לחישוב התחומים הקבילים והמדרג של ריכוז החנקן הכללי בחורף-אביב. החישוב של הטווחים הקבילים נעשה על בסיס העשירון הראשון והתשיעי (א) והמדרג על סמך תחומים אלו והחציון (ב) והגדרת הקווים המחברים בין נקודות אלו (ג, ד).

מדד איכות המים לשימור המערכת האקולוגית כולל 9 פרמטרים בעלי טווחים המוגדרים כתנאים קבילים אשר בעזרתם ניתן לקבוע מטרות ניהול בר קיימא. שמירה על הערכים של פרמטרים אלו בטווח הערכים הקבילים יאפשר שמירה של המערכת האקולוגית במצב דומה למצב שהתקיים במהלך תקופת הייחוס. מתוך בחינה של המערכת האקולוגית בתקופה שלאחר תקופת הייחוס (1994-2012) עולה כי חלו שינויים רבים במערכת הכוללים התדרדרות בפרמטרים ביולוגיים (איור 89). במהלך התקופה הזאת חלו שינויים באוכלוסיית האצות אשר באה לידי ביטוי בחריגה גדולה מהערכים הקבילים של מדדי איכות המים. במצב של מערכת אקולוגית דומה במאפייניה לתקופת הייחוס היינו מצפים לערכי מדד נמוכים מ-60 בכ-20% מהמקרים. ואכן זה המצב עבור חלק מהפרמטרים. יחד עם זאת במקרה של הפרידיניום, הכחוליות

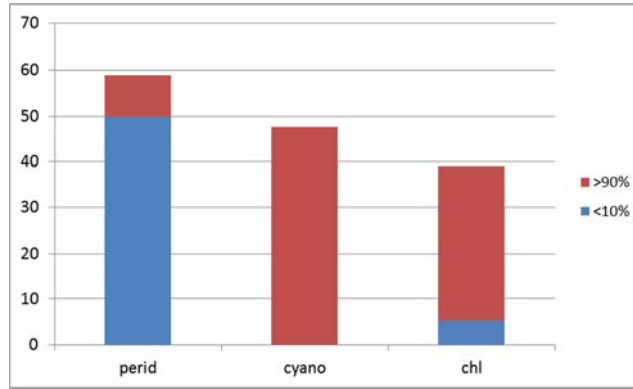
והכלורופיל אנו רואים חריגות ב 40-59% מהמקרים. דהיינו עד פי שלוש מהמצופה. בחינה של הרכב החריגות ביחס לעשירון הראשון והעשירון העליון בשלושת הפרמטרים בעלי החריגה הגבוהה ביותר (פרידיניום, כחוליות וכלורופיל) מצביעה על הבדלים מהותיים בין שלושת הקבוצות (איור 90). בזמן שעיקר החריגות בפרידיניום הם של ערכים הנמוכים מהעשירון התחתון הרי שבכלורופיל ובכחוליות עיקר הערכים הם חריגה עקב ערכים גבוהים מהערכים הקבילים. יש לציין שבמקרה של הכחוליות אין אפשרות לחריגה מתחת לעשירות הראשון מכיוון שהערך הקביל הנמוך ביותר הוא 0.

על בסיס חישובים אלו הטווחים הקבילים ($100 \geq R \leq 60$) של כלל המשתנים במדד החדש הם כדלקמן:

קיי-סטיו	חורף-אביב	משתנה (יחידות)
2.4-4.0	1.9-3.9	S- עומק סקי (מ')
1.93-3.91	2.59-7.82	TSS- חומר מרחף (מג"ל)
0.34-0.80	0.53-1.17	TN- חנקן כללי (מג"ל)
0.01-0.021	0.016-0.035	TP- זרחן כללי (מג"ל)
3.1-10.8	6.1-42.8	Chl- כלורופיל (מג"ל)
0.72-2.10	0.81-2.8	PP- יצור ראשוני (ג' פחמן למ"ר ליום)
0.0-0.706	0.0-0.1725	Cyano- ריכוז כחוליות (מג"ל)
0.085-1.43	0.41-15.1	Perid- ריכוז פרידיניום (מג"ל)
9.2-37.3	7.0-40.1	Zoop-p- זואופלנקטון טורף (מס' לליטר)

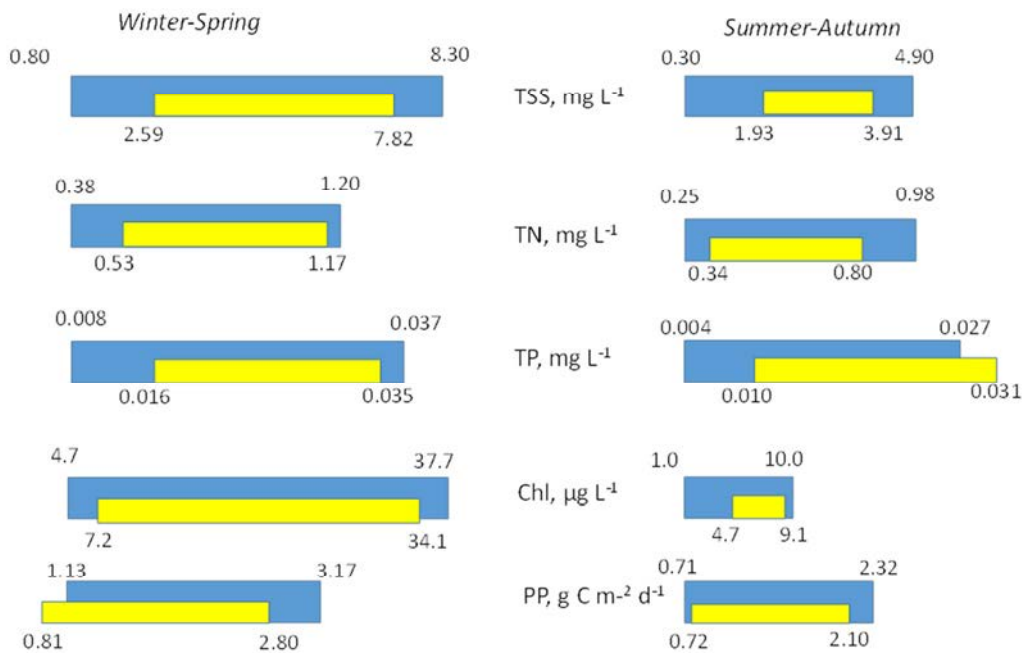


איור 89: אחוז החריגות מהטווחים הקבילים בכל אחד מהפרמטרים. הקו האופקי השחור מציין את הערך הצפוי (20%) עפ"י הגדרות הטווחים הקבילים. ערכים גבוהים מ-20% מבטאים אחוז חריגות גבוה מהצפוי.



איור 90: התפלגות החריגות מהטווחים הקבילים עבור שלושה פרמטרים שבהם אחוז החריגות היה גבוה במיוחד: פרידיניום, כחוליות וכלורופיל. הכחול מבטא את אחוז החריגות שהיו נמוכות מהטווח הקביל ועל כן ערכים נמוכים מהעשירון התחתון והאדום מייצג את האחוז החריגות מעל הטווחים הקבילים.

חשוב לציין שטווח ערכי המדד החדש צרים יותר מהטווחים שהיו קיימים במדד איכות המים המקורי (איור 91).



איור 91: השוואה בין הטווחים הקבילים במדד האיכות המים לשימור המערכת האקולוגית (צהוב) לבין ערכי מדד איכות המים המקורי (כחול).

באיור 92 מוצגות סדרות עיתיות (ממוצעים חודשיים) של תשעה המשתנים האקולוגיים בכנרת המופיעים במדד איכות המים החדש.

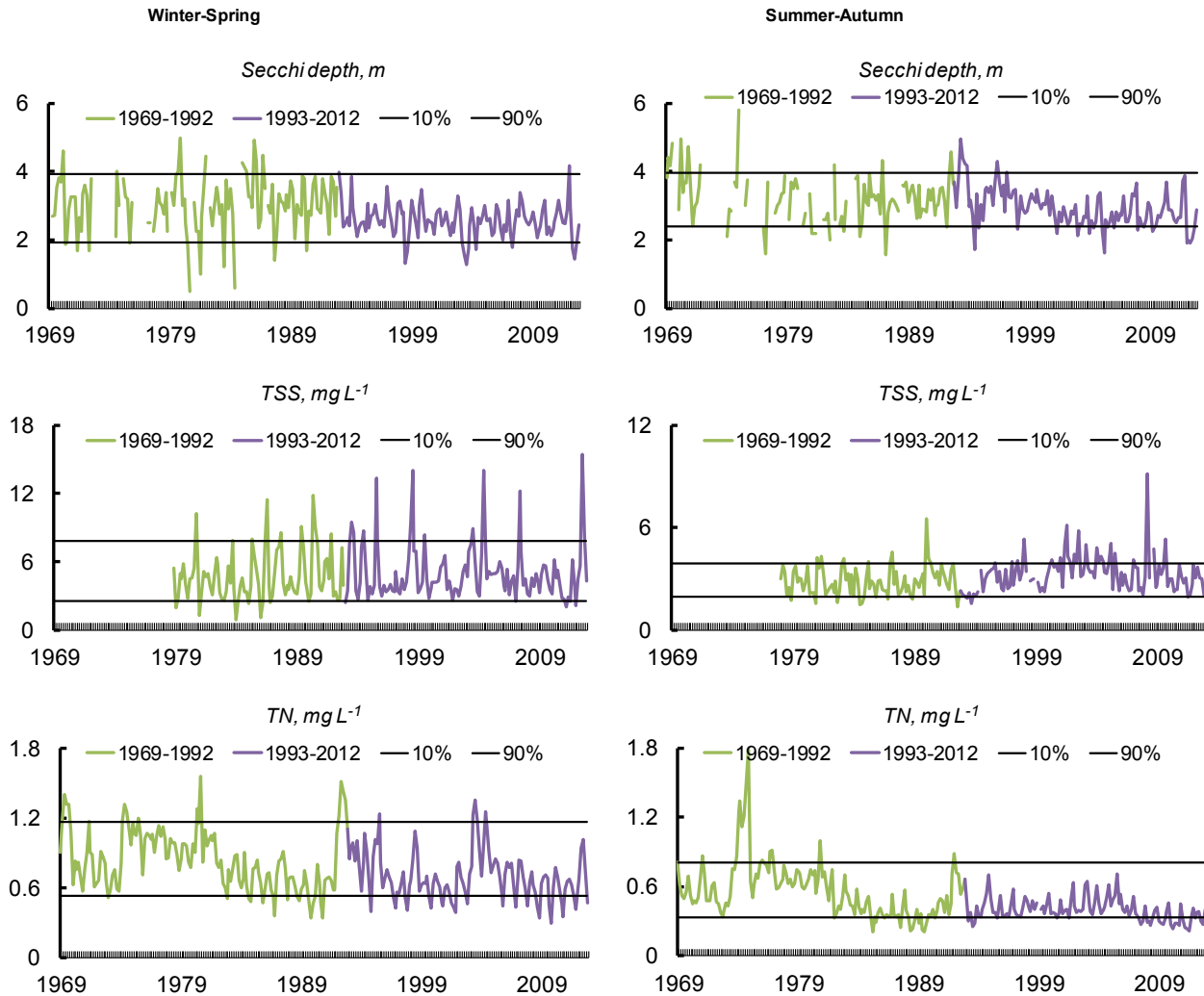
תכניות להמשך

על מנת להשלים את פיתוח מדד איכות המים לשימור המערכת האקולוגית נותרו עוד מספר שלבי עבודה אשר יתבצעו בתקופה הקרובה. שלבים אלו כוללים:

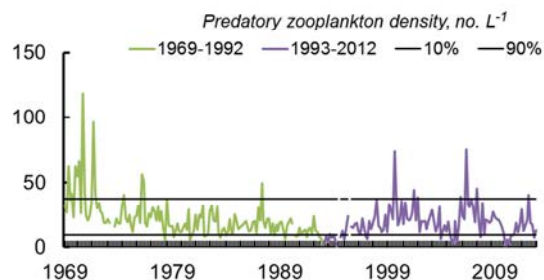
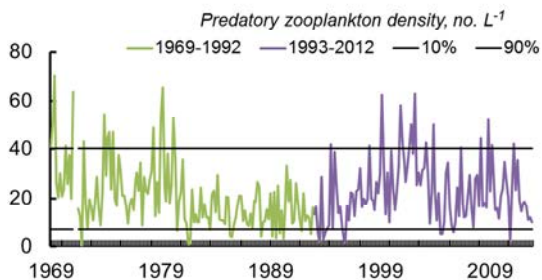
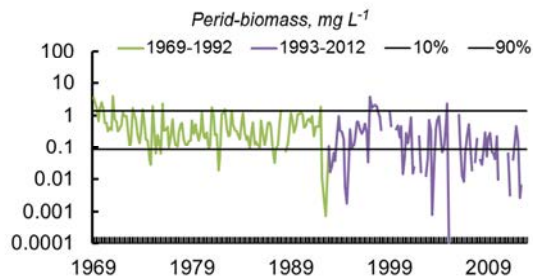
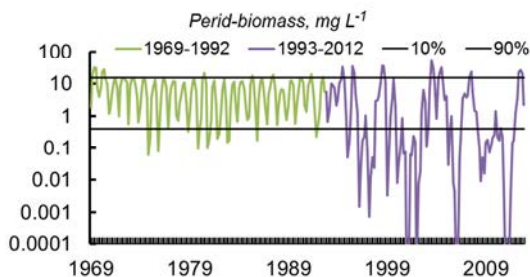
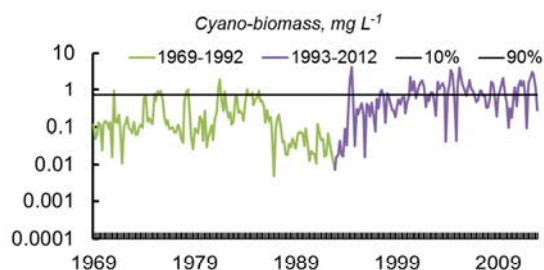
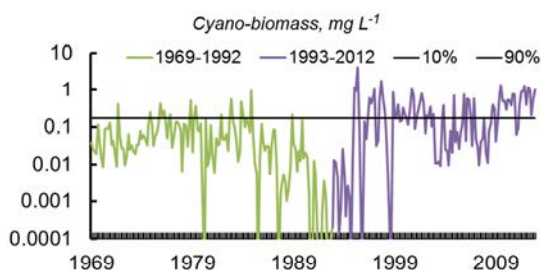
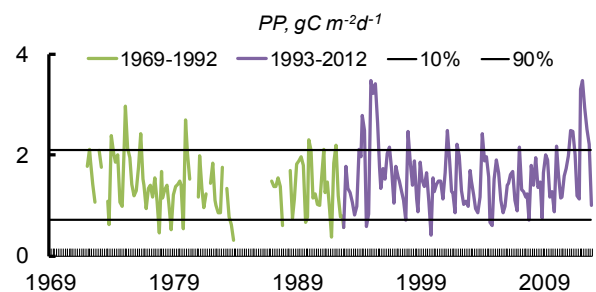
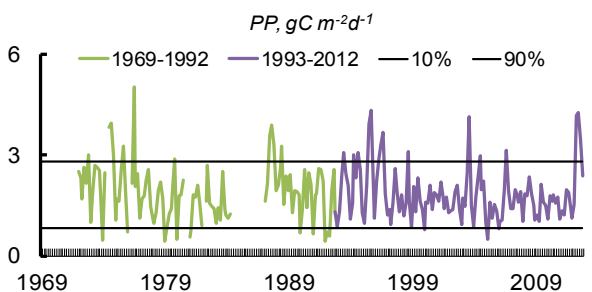
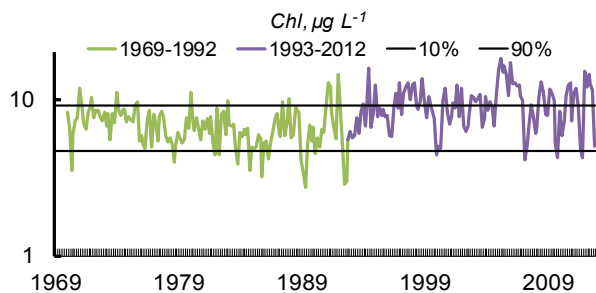
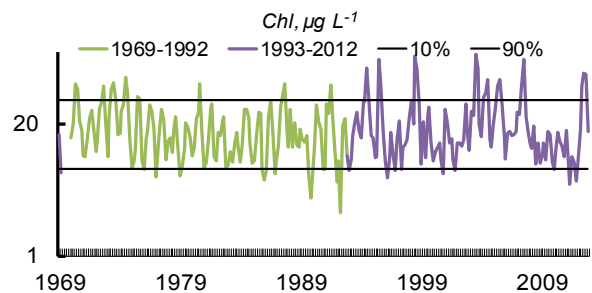
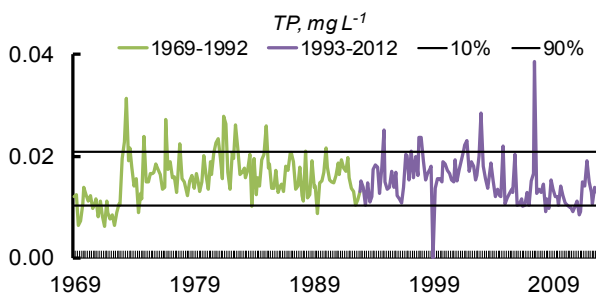
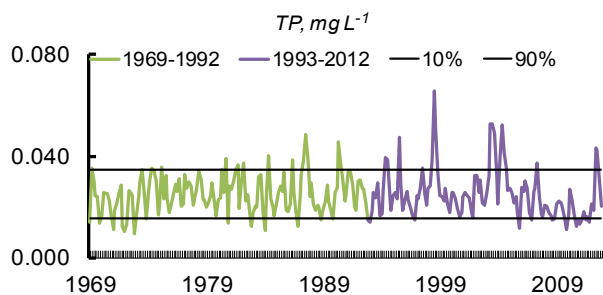
- סיום קביעת הטווחים הקבילים של ערכי המדד
- אישור אופן חישוב המדד המשולב אשר יתבסס על השיטה שיושמה בחישוב המדד המשולב המקורי (CWQI).

• סיכום אופן הצגת המדד מבחינה גרפית וויזואלית למקבלי החלטות

במקביל תימשך עבודת פיתוח מדד איכות המים כמי גלם למי שתיה. בחירת הפרמטרים והטווחים שלהם נעשית בעיקר ע"י נציגי רשות המים ואנשי מקורות ושיתוף של מומחים נוספים. לאתר תום קביעת הפרמטרים אלו והטווחים שלהם ע"י אותו צוות מומחים תבחן האפשרות ליצירת מדד משולב משוקלל המשלב בין מדד איכות המים לשימור המערכת האקולוגית לבין המדד לשמירה על המים כמי גלם למי שתיה.



איור 92: (המשך בדף הבא): סדרות עתיות של המשתנים האקולוגיים המופיעים במדד איכות המים החדש. תקופת הייחוס (1969-1992) מצויינת בירוק. הטור השמאלי מבטא את הערכים עבור חורף-אביב (ינואר-יוני) והטור הימני את הערכים עבור קיץ-סתיו (יולי-דצמבר). הקווים האופקיים מציינים את אחוזון ה-10 והאחוזון ה-90. יש לשים לב שבחלק מהאיורים הציר האנכי בסקאלה לוגריתמית.



3.1 הסעת מזינים משכבת המים התחתונה לעליונה בקיץ

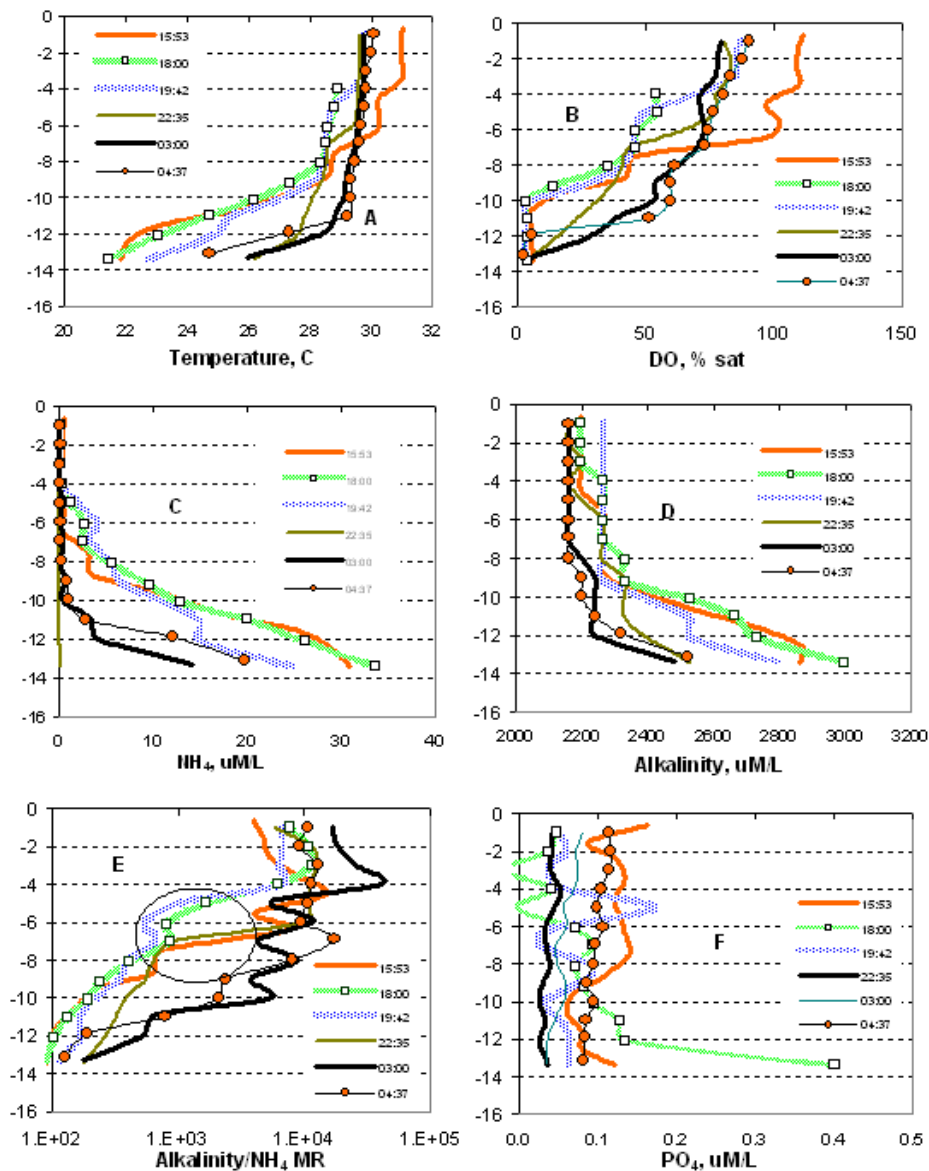
עמי נשרי, איליה אוסטרובסקי, ורנר אקרט, יורי לצ'נסקי, אדית ליבוביץ, סמיון קגנובסקי, מוטי דיאמנט, עוז צברי ויהודית וינר מוציני

במימון רשות המים

קיום פעילות אצתית בשכבת המים העליונה המוארת (האפילמניון), בכנרת מחייב אספקת נוטריאנטים כגון חנקן וזרחן. אלה עשויים להגיע לשכבה זו כתוצאה מתרומות חיזוריות, דהיינו באמצעות נחלים או אבק או באמצעות תרומות פנימיות בין-שכבתיות שבהן נוטריאנטים מוסעים מהשכבה העמוקה (ההיפולימניון), עשירת הנוטריאנטים. את התרומות החיזוריות אנו מנטרים אך את התרומה הפנימית חייבים להעריך בדרך מושכלת. תרומה פנימית זו היא פועל יוצא של ערבוב שוליים בין שתי השכבות שנובע מהגלים הפנימיים באגם והיא מתבצעת ב-2 אופנים: א. מעבר ישיר של מומסים כתוצאה מערבוב בשולי האגם ובו מים מההיפולימניון חודרים לאפילימניון. עד לביצוע הפרויקט הנוכחי גודלו של מעבר זה היה עלום והוא עומד במוקד המחקר הנוכחי. ב. תנועת הסייש הפנימי חושפת אזור קרקעית שבמרבית שעות היממה מכוסה במים היפולימנטיים משוללי חמצן אולם בחלק מהיממה, בתלות בעצמת הסייש, היא מכוסה במים אפילימנטיים ולכן הנוטריאנטים שמשתחררים באותו זמן כתוצאה מתהליכי פירוק בקרקעית מגיעים ישירות לאפילימניון. את גודל התרומה העקיפה לאפילימניון, באמצעות חשיפת הקרקעית, לא יכולנו למדוד במסגרת הנוכחית. אי ידיעת השטפים הפנימיים הבלתי מנוטרים גרמה בעבר לאי ודאות גדולה בהבנת הסיבות להיקף הפעילות האצתית בקיץ-סתיו. לדוגמא לא היה ברור האם בתקופת השכוב שקיעת אבק כמקור לזרחן באגם מהווה מקור עיקרי או משני לפעילות האצתית. הפרויקט הנוכחי הוא חלק ממאמץ כוללני שנתמך ע"י רשות המים לפענוח שטפי המזינים לשכבה הפוטית של האגם וכולל בין השאר גם את שטפי הזרחן באבק ואת הדינמיקה של מחזור החנקן באגם.

השלב הראשוני של המחקר כלל ניסיון לדון בעצמת תהליכי הערבוב ובשכבות המים שאכן משתתפות בתהליכים אלו. שלב ראשוני זה נסמך על מידע ומסקנות שנאספו בעבודות קודמות וכמוכן על מידע שנאסף במסגרת המחקר הנוכחי. שלב זה שימש לבניית מודל קונצפטואלי של האפיונים הביו-גאוכימיים והפיזיקליים בתת השכבות השונות של גוף המים התחתון. שלב אחר שבוצע במקביל כלל הצבת מערכות ניטור אוטומטיות, כולל I. שרשראות תרמיסטורים, II. מד חמצן רציף ו-III. מד זרם רציף. רק שילוב מושכל של כל הפרמטרים שנבדקו (טמפרטורה, ריכוזי חמצן, ריכוזי אמוניום, אלקליניות ומוליכות חשמלית בו-זמנית הביא להסקת מסקנות חד-משמעיות ביחס לתנאי הערבוב.

במחקר הנוכחי הדיגום בוצע בשילוב של מדידות *in-situ* "אלקטרוניות" רציפות לאורך תקופות ארוכות יחד עם דיגום מים אינטנסיבי לתקופות קצרות של כמה עשרות שעות. בשעות אלו עגנו באזורים שנבחרו במשך כ-24 שעות ומידי שעתיים נדגמו פרופילים ברזולוציה גבוהה ולאחר מכן בוצעה אנליזה במעבדה של פרמטרים רלוונטיים. התחנות שנבחרו כללו הן את הצד המערבי והן את צידו המזרחי של האגם. במערב נבחרו תחנה סוב-ליטורלית (F) שמצויה בעומק ממוצע של 21 מ' ובמרחק של כ-1.5 ק"מ מהחוף. ותחנת ה"ברבוטים" המצויה 850 מ' מחוף המעבדה לחקר הכנרת ובעומק טיפוסי של 16 מ'. במזרח נדגמה תחנת עין-גב שמצויה במרחק 300 מ' מהחוף ובעומק מים של 16.7 מ'. נתונים מסדרת מדידות לאורך 24 ש' בתחנה הסמוכה לצינור הברבוטים מוצגים באיור 93.



איור 93: דוגמא לפרופילים של פרמטרים שונים שנלקחו בו-זמנית ובשעות שונות (6 פרופילים בתוך 24 שעות) באזור שוליים של האגם (מול המעבדה) בעומק מים של כ-14 מ' ב 25-26 ליוני 2012: A. טמפרטורת המים, B. ריכוזי חמצן מומס (% רוויה), C. ריכוזי אמון, D. אלקליניות, E. היחס המולרי אלקליניות לאמון, F. ריכוזי אורטופוספט. היחס המולרי שבין האלקליניות לבין יון האמוניום (פנל E) משתנה בין כמה אלפים באפילמניון ל-200-300 בלבד בהיפולימניון. ערכי ביניים (מסומנים בעיגול בין 4 ל-8 מטר עומק בשעה 19:42) מייצגים תערובות של מים מ-2 השכבות. תערובות אלו מכילות חמצן בריכוז של בערך 50% רויה (B), האלקליניות שבהם יחסית גבוהה (D) ריכוזי האמוניום בהם הוא גבוה באופן בולט ביחס לשכבה שמעל (C), ריכוזי יון הזרחה בהם זהה למי השכבה העליונה והתחתונה (F). חשוב להבחין בכך שטמפרטורת התערובת (בערך 28.5 מעלות) מתאימה לטמפרטורה שבבסיס האפילימניון. גם הפרופיל שנדגם בשעה 18:00 הוא בעל תכונות דומות.

תהליכי ערבוב של מים היפולימנטיים לתוך האפילמניון הם תוצאה נלווית של חדירת מי השכבה התחתונה לאזורי שוליים תוך חיכוך עם הקרקעית היחסית רדודה שגורם לערבוליות אנכית גדולה וכתוצאה מכך אינטרוזיה של חלק ממים אלה לשכבה האפילימנטית העליונה. ההעמקה ההדרגתית העונתית של התרמוקלינה מהווה ביטוי למעבר מסות מים זה בין השכבות שבו האפילמניון גדל ואילו השכבה התחתונה מצטמצמת. השאלות שעמדו בפנינו בתחילת המחקר היו: א. האם ניתן לאפיין במדידות שדה תערובות שמעידות על כניסת מים היפולימנטיים לאפילימניון; ב. מיהו מרכיב הקצה ההיפולימנטי שתורם לתערובות אלו ומהם האפיונים הכימיים שלו, וכן באיזה תזמון ובאיזה אזורי אגם

מתקיימות תערובות אלו. העבודה הנוכחית דרשה הבנה טובה במונחים של ריכוזי חנקן וזרחן מומסים; ג. כמה מים היפולימנטיים מתערבבים בזמן נתון ומה גורל התערובת לאחר היווצרות של שלוב בין תהליכים פיזיקליים, בעיקר אלה שמוליכים לערבוב מים בין השכבות, לבין האיפיונים הביוגאוכימיים של שכבות אלו.

הבעיה של זיהוי חבילות המים המעורבות (מים היפולימנטיים בתוך אפילימנטיים) נפתרה כאשר נמצא שבמרבית המקרים התרמוקלינה העונתית היא גם הכמוקלינה. דהיינו מתחת לאופק זה לא נמצא חמצן, ריכוזי האמוניום, האלקליניות והמוליכות החשמלית היו גבוהים יחסית, ואילו המים היו קרים יחסית. ואילו מעל לאופק זה בדרך כלל נמצא חמצן, המים היו חמים יותר, ריכוזי האלקליניות והמוליכות החשמלית היו נמוכים יותר באופן בולט, ואילו ריכוז האמוניום היה נמוך במיוחד. מצאנו שחבילות המים המעורבות מתאפיינות בריכוזי/רמות של פרמטרים שמייצגות את היחס הנפחי שבין מרכיבי הקצה של התערובת. כנ"ל גם לגבי הטמפרטורה של התערובת שמקנה לה Buoyancy שמתאים להתמקמות חבילות אלה בחלק העליון של המטלימניון (המטלימניון = שכבת האמצע בעלת גרדיאנט תרמי חריף) או בחלק התחתון של האפילימניון. בשלב השני של התהליך מתקיים ערבוב אנכי בשכבת המים העליונה (כתוצאה מהשפעת הרוח המערבית החזקה והשכיחה) שמאפשר הכלת התערובות שמצויות בבסיס שכבה זו או בחלק העליון של המטלימניון בתוך עמודת המים של השכבה הפוטית.

מסקנות המחקר הן:

במשך הקייץ תרומת הזרחן הזמין ביולוגית משכבת המים התחתונה (LWM) לעליונה היא שולית. מסקנה זו נובעת מכך שריכוזי הזרחן הזמין והכללי בשכבה ההיפולימנטית שמצויה בשולי האגם שמתערבת בתוך האפילימניון דומים לריכוזי צורוני זרחן אלו באפילימניון או לעיתים גבוהים מהם אך במעט. אי לכך ערבוב בשכבה העליונה לא מביא לתרומה נטו או לתרומה שולית בלבד. הסיבה לכך היא שבחלק העליון של עמודת המים התחתונה בתת השכבה שקרויה היפולימניון (בין בערך 20 לבערך 30 מ' עומק), מתקיים תהליך מורכב של סילוק זרחן מומס והעברתו לשכבה שמתחת הקרויה Benthic (Boundary Layer – BBL). חידקים שכנראה שוקעים יחד עם חמרים אורגניים מהאפילימניון קושרים אליהם זרחן מומס כאשר הם בתוך ההיפולימניון והופכים אותו למאגרי פולי פוספט תוך-תאיים. בהמשך שוקעים חידקים אלו לתת השכבה העמוקה ביותר (BBL) שם מתרחש פירוק אנזימטי של הפוליפוספט והזרחן המומס תוצר פירוק זה מצטבר ב-BBL. הפירוק האנזימטי מתרחש בשיווי משקל איזוטופי עם מי הסביבה. רצף תהליכים זה "מנקה" את הזרחן המומס ממי ההיפולימניון ומעביר אותו ל-BBL. אי לכך מכיון שמים מה-BBL לא מגיעים לתערובות השוליים אלא רק מי היפולימניון, ההיפולימניון מהווה שכבת חייץ מדולדלת זרחן שלמעשה מונעת מעבר זרחן מגוף המים התחתון לעליון. יעילות שכבת חייץ זו תלויה בין השאר בעובייה וזה מצידו תלוי במפלס המים באגם. ככל שהמפלס נמוך יותר שכבה זו דקה יותר ולכן יעילה פחות בבלימת העברת זרחן מעלה. ממצאים אלו: א. משאירים את הזרחן באבק כגורם העיקרי שעשוי להסביר את ההתנהגות הביולוגית של האגם בקיץ-סתיו ובשנים שחונות ו-ב. מהווים בסיס מוצק למדיניות התפעולית שתמכנו בה בעבר של מזעור ירידת מפלס האגם כתוצאה משאיבה.

תרומת החנקן (האמוניאקלי) הקיצית מה-LWM לאפילימניון נאמדת על ידינו בסדר גודל של 35 טון לחודש בקיץ. זהו סדר גודל דומה לתרומת החנקן (הניטריטי) שמגיע מהירדן לכנרת. דהיינו התרומות הקיציות העיקריות של חנקן אנאורגני מומס לשכבה הפוטית מסתכמות בכ-70 טון לחודש. מאידך שיקוע החנקן מהשכבה הפוטית לשכבה התחתונה ושאיבות מהאגם הוא בסדר גודל של בין 100 ל-150 טון לחודש. הערכת שיקוע זו נובעת מאמזן קצב הצטברות האמוניום ב-LWM במהלך הקיץ. ההפרש בין הכניסות ליציאות מהשכבה הפוטית מסביר היטב מדוע בעונה זו חלה ירידה הדרגתית באוגר החנקן הכללי (כולל גם האורגני) האפילימנטית שעשוי בסופו של דבר להוות גורם חשוב בהתפתחות אצות כחוליות מקבעות חנקן אטמוספרי בעונה זו.

3.2 מנגנוני בקרה גיאוכימיים בתהליכים המגבילים ייצור מתאן באגמים

ורנר אקרט, אורית סיון, מיכל אדלר ואיתי בר אור

במימון האקדמיה הלאומית למדעים

ייצור מתאן מיקרוביאלי (מתאנוגנזה) מוכר כתהליך הסופי במינרליזציה מיקרוביאלית של חומר אורגני בתנאים אנאירוביים. ישנם שלושה מנגנונים ידועים למתאנוגנזה: (1) מתאנוגנזה אצטוקלסטית, בו המצע הוא אצטט, תהליך זה מאפיין סביבות יבשתיות; (2) מתאנוגנזה מיימנית, בו המצע הוא מימן ופחמן דו חמצני (פד"ח) ביחס של $H_2:CO_2$ 4:1, והוא מאפיין סביבות ימיות; (3) מתאנוגנזה מתילוטרופית, בו המצע הוא תרכובות אורגניות לא תחרותיות בעלות קבוצות מתיל כמו דימתילסולפיד (dimethylsulfide) ותרמתילאמין (trimethylamine). חיידקים המחזרים ברזל (מחזרי ברזל) וסולפט (מחזרי סולפט) מתחרים עם מייצרי המתאן (מתאנוגנים) על מצע זמין (מימן ואצטט). לחיידקים מחזרי ברזל וסולפט עדיפות תרמודינמית על מתאנוגנים מכיוון ואלה מסוגלים לנצל מצע זה בריכוזים נמוכים מאלו הזקוקים למתאנוגנים. המצאות מצע זמין בריכוזים מספקים ונוכחות אוכלוסיות מחזרי ברזל ומחזרי סולפט שולטים בתנאים המגבילים את ייצור המתאן. ממצאים ממחקר קודם שלנו מציעים כי בסדימנט במרכז הכנרת מתאנוגנזה מוגבלת לעומק של 3 עד 25 ס"מ ובנוסף קיים מבלע למתאן בעומק זה. לאחרונה הראנו עדויות גיאוכימיות כי מבלע זה קשור לתהליך חמצון אנאירובי של מתאן והצגנו עדויות לכך שתהליך זה מצומד לחיזור תחמוצות ברזל, ולא לחיזור סולפט.

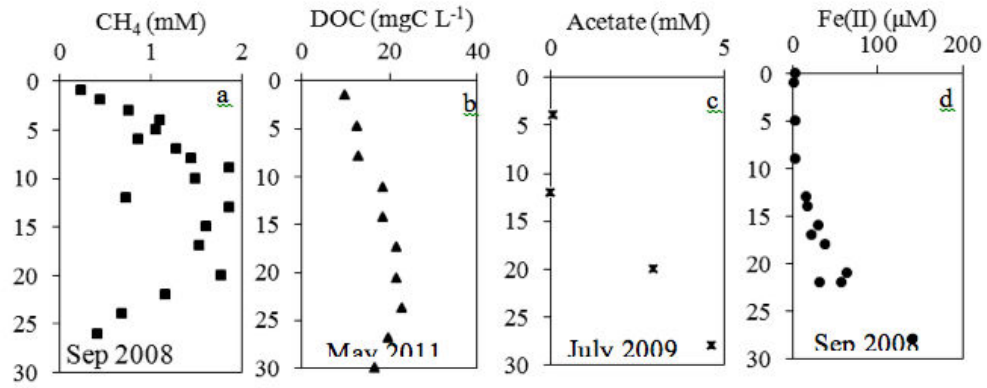
חלק ממטרות המחקר של מחקר זה הן למצוא מהם הגורמים המגבילים את תהליך המתאנוגנזה בסדימנט העמוק של הכנרת ואת האפשרות שהעדרות תהליך זה החל מעומק מסוים קשורה לתהליך חמצון אנאירובי של מתאן. זאת באמצעות התמקדות בתרכובות אורגניות כמו אצטט דימתילסולפיד, מתאן תיול ופחמן אורגני מומס.

שאלות המחקר:

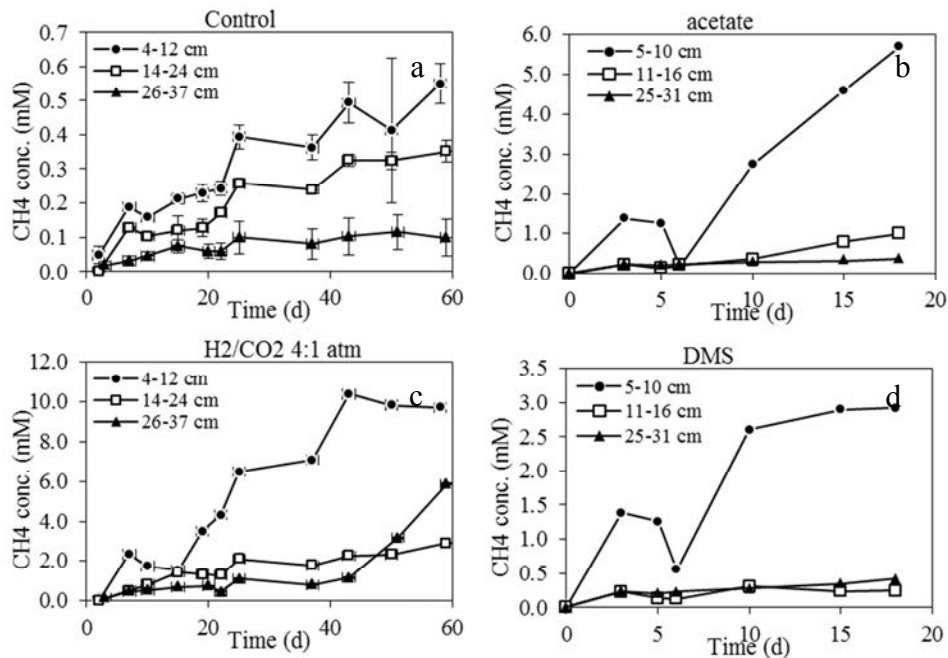
- האם מתאנוגנזה מוגבלת בסדימנט העמוק (<20 ס"מ) של הכנרת?
- מה הם התהליכים השולטים בסדימנט העמוק?
- מה תפקיד הברזל בסדימנט העמוק של הכנרת?
- מה מנגנון המתאנוגנזה העיקרי בסדימנט העמוק?

פרופילים של מי חללים מתחנה A (איור 94) מראים כי אף על פי שריכוז המתאן יורד עם העומק, ריכוז הפחמן האורגני המומס וריכוז האצטט עולים. הפרופילים מעידים שתהליך המתאנוגנזה אינו מוגבל ע"י ריכוז המצע. בנוסף, העליה בריכוז הברזל הדו-ערכי בסדימנט העמוק מעידה על תהליך חיזור תחמוצות ברזל בסדימנט העמוק. במחקר קודם הראנו עדויות גיאוכימיות שחימצון אנאירובי של מתאן בסדימנט העמוק מצומד לחיזור תחמוצות ברזל כקבל אלקטרונים סופי.

בניסוי אינקובציה עם סדימנט הכנרת מעומקים שונים (רדוד 4-12 ס"מ, אמצעי 11-24 ס"מ ועמוק 25-37 ס"מ) ובתוספות מצע שונות המתאימות למנגנוני המתאנוגנזה: 7 מילימולר אצטט, 7 מילימולר DMS ואטמוספירה של 80% מימן ו-20% פד"ח, ריכוזי המתאן נמדדו לאורך הזמן (איור 95). תוצאות הניסוי תומכות בהיפוטזה שתהליך המתאנוגנזה נעדר החל מעומק מסוים. בהתחשב בזה שריכוזי אצטט ופחמן אורגני מומס עולים בעומק זה, ממצא זה הוא מפתיע. הוספת תרכובות מצע שונות (7 מילימולר אצטט, 7 מילימולר דימתילסולפיד, אטמוספירה של 80% מימן ו-20% פד"ח) אינה משנה את התמונה הכללית של האטה משמעותית בתהליך המתאנוגנזה בסדימנט העמוק (מתחת ל-15 ס"מ עומק).

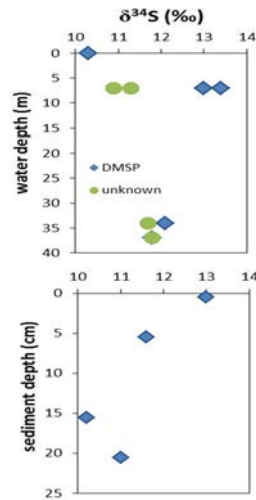


איור 94: פרופילי עומק של מתאן (a) פחמן אורגני מומס (b) אצטט (c) וברזל דו ערכי (d) במי החללים של סדימנט הכנרת מתחנה A.



איור 95: ריכוז המתאן לאורך זמן בניסויי אינקובציה בהם הוספנו תרכובות מצע שונות לעומקים שונים של הסדימנט. (a) בקורת, (b) אצטט, (c) אטמוספירה של מימן ופחמן דו חמצני ביחס של 4:1, (d) דימתיל סולפיד-DMS.

אנו משערים כי אחת הסיבות האפשריות להאטה בקצב המתאנוגנזה בסדימנט העמוק היא חיזור תחמוצות ברזל ע"י מתאנוגנים, תהליך שדווח בספרות על תרביות טהורות של מתאנוגנים. תהליך זה צריך להיבדק בפרמטרים נוספים בהמשך. בנוסף, לאחרונה התחלנו פרויקט סקר שנתי (בשיתוף עם דר' אלכסיי קמישני מאונ' בן גוריון ודר' אלון עמרני מהאונ' העברית) של ריכוזים וערכי $\delta^{34}\text{S}$ של תרכובות אורגנו-גופרתיות בעמודת המים ובסדימנט של אגם הכנרת (לדוגמא: דימתילסולפיד DMS, דימתילסולפניופרופיונט DMSP, מתאן תיול MT). פרופיל ראשוני של $\delta^{34}\text{S}_{\text{DMSP}}$ מראה כי הערכים נעים בטווח $+10\%$ – $+14\%$ וישנה תרכובת נוספת בעלת ערכים דומים שלא זוהתה עדיין (איור 96).



איור 96: פרופיל עומק מעמודת המים והסדימנט של ערכי $\delta^{34}\text{S}$ של DMSP ותרכובת אורגנו-גופרתית נוספת שלא זוהתה עדיין.

3.3 האם האצה הירוקית מוגושיה צפויה להחליף את פריחות הפרידיניום ?

אורה הדס, ריקי פנקס, נחמה מלינסקי-רושנסקי, תמר זהרי ואסף סוקניק

במימון רשות המים

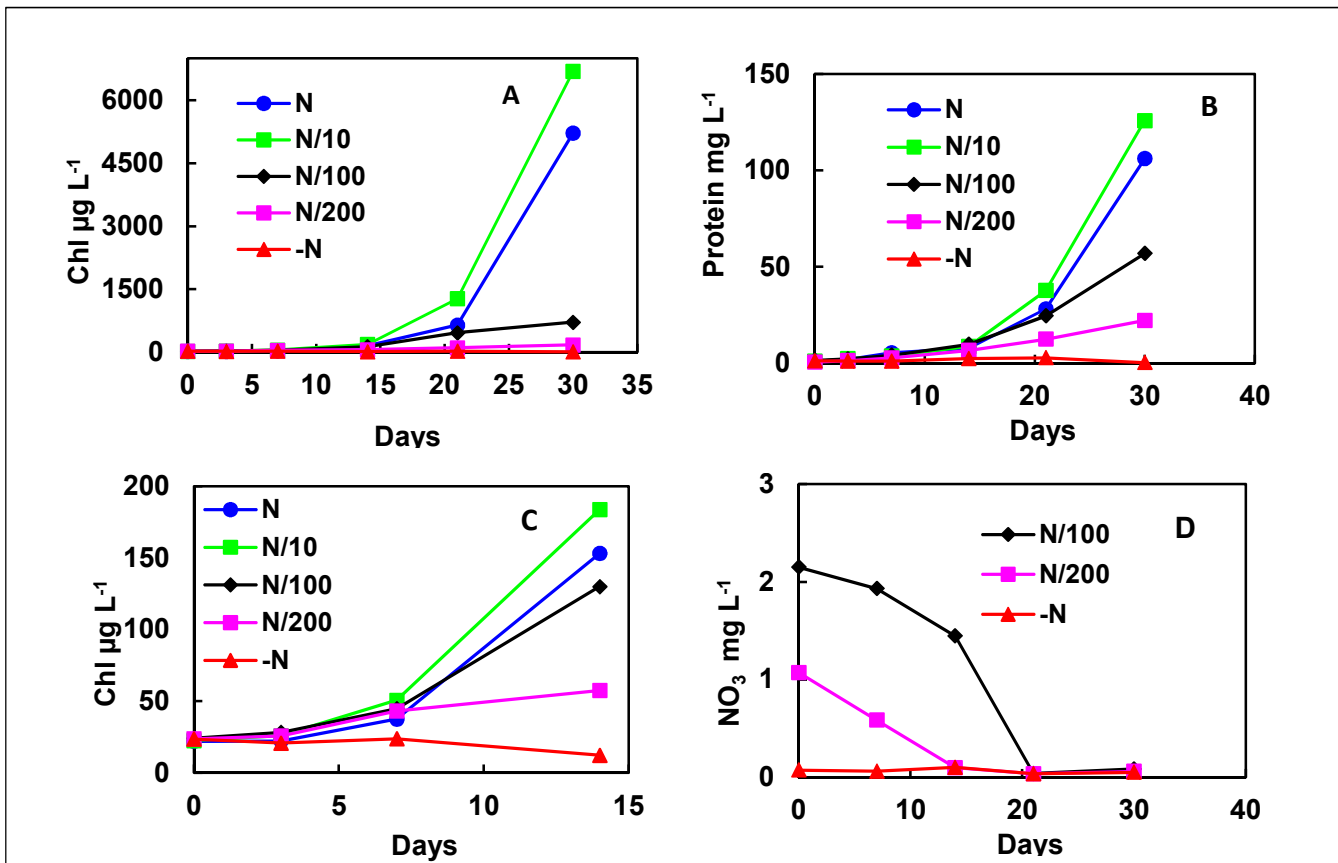
בשני העשורים האחרונים אנו עדים למגמת שינוי בתבנית האופיינית של הרכב מיני הפיטופלנקטון בכנרת יחסית לתקופה של שנות השבעים והשמונים. היציבות העונתית שהתקיימה בעבר במשך לפחות 25 שנה, הופרה החל משנת 1994. מאז, ההופעה השנתית הקבועה והסדירה של פריחות הפרידיניום נעלמה, הפרידיניום פרח כמעט רק בשנים ברוכות משקעים, ברוב השנים האחרות לא הופיעה כלל ועל מקומה התחרו אצות אחרות. כך לדוגמה ב 2005 במקום הפרידיניום נצפתה בחודשי האביב פריחה מסיבית של הירוקית החוטית *Mougeotia* sp. (להלן: מוגושיה), מין פולש שמאז שנת 2004 נמצא במי כנרת בעונות שונות. ב-2005 פריחת המוגושיה הגיעה לשיא ביומסה של 158 גרם למ"ר, והוכיחה את פוטנציאל החדירה וההתבססות של אצה זו בהיעדר הפרידיניום. ב-2010 המוגושיה נצפתה בכל עמודת המים האפילימנטית לא רק באביב אלא גם בקיץ ובסתיו והגיעה לשיא עם כ 3000 פילמנטים למ"ר וביומסה של 183 ג' למ"ר בדצמבר. ב-2012 הייתה פריחת פרידיניום עם מקסימום ביומסה של 387 ג' למ² במאי. ב 2013 הביומסה של המוגושיה היתה קטנה יחסית אך הדבר נכון גם ליתר מיני הפיטופלנקטון. מטרת המחקר ללמוד את הפיסיולוגיה של המוגושיה ואת יחסי הגומלין בינה לבין הפרידיניום.

ניסויים בשנת 2013

1. גידול בריכוזי חנקן שונים

במסגרת לימוד התכונות האקופיסיולוגיות של המוגושיה בצענו ניסויי גידול מוגושיה בתרביות מעבדה בריכוזים שונים של חנקן. תרביות של מוגושיה (שבודדה מהאגם) גודלו במצע BG11 בריכוזי חנקן שונים. טווח הריכוזים שנבדקו היה בין 17.6 מג' N לליטר (מצע BG מלא, N) לבין 0.088 מג' N לליטר (מצע BG N/200) וללא תוספת חנקן (-N). הניסויים בוצעו בתנאי הארה של 50 מיקרומול פוטון למ² לשניה. גידול המוגושיה בריכוזי החנקן השונים מבוטא כעליה בריכוז כלורופיל במיקרוגרם לליטר וכעליה בריכוז החלבון במיליגרם לליטר.

מתוצאות הניסויים עולה שהמוגושיה גדלה היטב במצע BG11 העשיר בניטראט. היא יכולה לגדול בכל טווח ריכוזי החנקן שנמדדו, כל עוד יש חנקן במצע. המוגושיה אינה יכולה לגדול ללא חנקן מקובע. ה lag phase נמשך כשלושה ימים ולאחר מכן יש הכפלה של ריכוזי הכלורופיל עד היום השביעי (איור 97C). החל מהיום השביעי מתחיל גידול לוגריתמי אך קצב הגידול משתנה בריכוזי החנקן השונים. במצע BG מלא ובמצע BG N /10 הגידול הלוגריתמי נמשך עד היום ה 30 (בו נפסק הניסוי) מבלי שהמוגושיה בבקבוקי הניסוי הגיעה לשלב הסטציונרי, בעוד שבמצע BG N /100 ו BG N /200 הגידול הלוגריתמי נפסק ביום ה 20 וה 14, בהתאמה, ומתחיל השלב הסטציונרי (715 ו 172 מיקרוגרם כלורופיל לליטר בהתאמה) (איור 97A,C). בהסתכלות בביומסה על פי בדיקת החלבון (איור 97B) רואים עליה לוגריתמית בביומסה גם בריכוזי חנקן של BG N /100. ההבדל בין מדדי הגידול יכול לנבוע מכך שבחסר חנקן יש פגיעה בכלורופיל ומכאן ריכוזו הנמוך בבקבוק הניסוי כשריכוז החנקן שהוסף היה קטן פי מאה בהשוואה למצע BG מלא. תימוכין לדבר ניתן לראות באיור 97D, המראה שכעבור 21 ו 14 יום לא נשאר חנקן בבקבוקי הניסוי שהכילו BG N /200 ו BG N /100, בהתאמה, ומכאן הפסקת הגידול הלוגריתמי. כאמור המוגושיה אינה יכולה לגדול ללא חנקן מקובע. זמני הדור וקצבי הגידול בכל מצע מוצגים בטבלה 12. אין הבדל בקצב הגידול בין מצע BG-11 מלא למצע BG N /10.



איור 97: גידול מוגושיה במצע BG11 בריכוזי חנקן שונים לאורך 30 ימי הניסוי. מוצגים ריכוזי כלורופיל (A, C) וחלבון (B) כמדד לגידול, וריכוזי הניטראט שנותרו במדיום (D). פאנל C מציג את פירוט הנתונים של פאנל A לגבי השבועיים הראשונים Y.

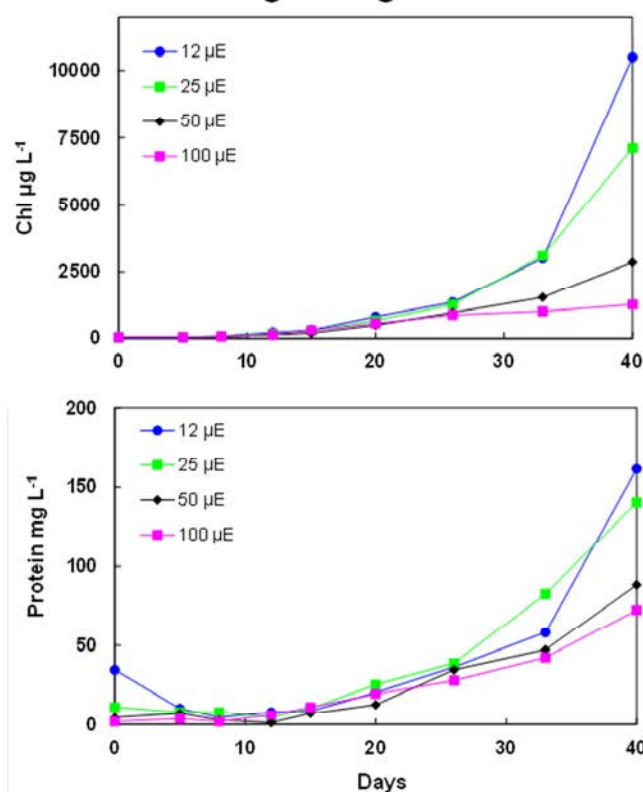
טבלה 12: קצבי גידול וזמני דור של מוגושיה במצע גידול BG בריכוזי חנקן שונים.

BG Medium	μ (day ⁻¹)	DT (days)
N	0.21	3.3
N/10	0.21	3.3
N/100	0.12	5.8
N/200	0.06	11.6
-N	No growth	-

2. גידול מוגושיה בעוצמות אור שונות

תרביות של מוגושיה (שבודדה מהאגם) גודלו במצע BG11 בעוצמות אור בטווח שבין 0 (חושך) ל 100 (מיקרומול פוטון) למ² לשניה. גידול המוגושיה בעוצמות האור השונות בוטא כעליה בריכוז כלורופיל וחלבון במיקרוגרם לליטר. החלבון שימש כמדד לבימסה בנוסף לכלורופיל מאחר והכלורופיל מושפע מעוצמות האור. באור נמוך יוצר יותר כלורופיל ובעוצמות אור גבוהות הוא נהרס. נמצא שקצבי הגידול היו גבוהים יותר בעוצמות אור נמוכות, אבל היה גידול גם בעוצמות גבוהות (איור 98).

Mougeotia growth at different light regimes



איור 98 משמאל: גידול מוגושיה בעוצמות אור שונות במשך 40 יום. ריכוזי כלורופיל וחלבון כמדד לגידול. מימין: צבע התרביות בתוסו הניסוי.

מסקנות

מאחר והמוגושיה יכולה לקלוט ולגדול על חנקן כניטראט (בניגוד לירוקיות אחרות כמו הסצנדסמוס) יש לה יתרון בתקופת האביב, כשהאגם עשיר בניטראט כתוצאה מתהליכי הניטריפיקציה, ומניטראט הבא עם מי השטפונות מאגן ההקוות. מאחר וגם הפרדיניום יכולה לקלוט ניטראט שתי אצות אלה מתחרות ביניהן. בדוח השנתי הראנו שכשהפרדיניום בפריחה המוגושיה אינה יכולה להרים ראש. ייתכן והאפיניות של הפרדיניום לניטראט גבוהה יותר ומכאן ההצלחה שלה כשהפריחה החלה. אך בשנה כמו 2005, שהיתה שנה ללא פרדיניום עם ריכוז ניטראט גבוה, הייתה פריחה מסיבית של מוגושיה. יתרה מכך, המוגושיה הופיעה במספרים גבוהים גם בדצמבר 2010 מדוע? מאחר ובדצמבר תהליך הניטריפיקציה כבר החל, כלומר האמוניה חומצנה לניטראט, טמפרטורת המים עדיין גבוהה, תנאים מצויינים למוגושיה הנהנית הן מהניטראט ומן הורסטיליות הרבה שלה לגדול בטווח רחב של עוצמות אור וטמפרטורה.

כלומר, המוגושיה היא אצה אופורטוניסטית המנצלת את תנאי הסביבה לגידול ולפריחה. אי ההצלחה שלה בחלק מהשנים נובעת מכך שכנראה היא מדוכאת על ידי מיני פיטופלנקטון אחרים; באביב על ידי הפרדיניום ובקיץ סתיו על ידי הציאנובקטריה מקבעות החנקן אפניזומנון אובליספורום וצילינדרוספרמופסיס.

3.4 תרדמה ונביטה בציאנובקטריה

רות קפלן-לוי, דותן סלע, סנמה אליזרוב, דיתי וינר-מוציני ואסף סוקניק

במימון הקרן הישראלית למדע ומלגת אשכול לבתר דוקטוראט ממשרד המדע לר.ק.-ל.

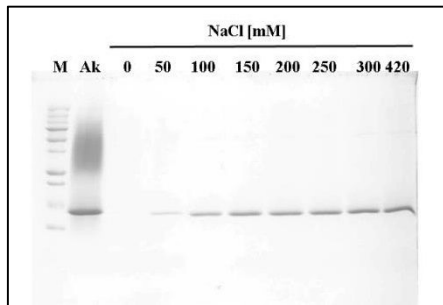
פריחה של ציאנובקטריום חוטית, רעילה ומקבעת חנקן *Aphanizomenon ovalisporum*, נצפתה בכנרת לראשונה באוגוסט 1994 ומאז האצה מופיעה מדי קיץ. במהלך הפריחה, מספר תאים על פני פילמנט האפניזומנון מתמיינים לאקינטים. האקינט שנוצר ניתק מהפילמנט ושוקע אל קרקעית האגם, שם ישהה עד שתנאי הסביבה יתאימו לנביטה ולגדילה מחודשת. מעט מאוד ידוע היום על התהליך הפיזיולוגי ועל האות הגורם לנביטה. המטרה הכללית של מחקר זה היא להבין תהליכים תוך תאיים המתרחשים בזמן הנביטה. מטרת ספציפיות הן: 1. אופטימיזציה של תנאי הנביטה ואיפיון השלבים הראשוניים בתהליך. 2. לחקור אלו תהליכים תוך תאיים מתרחשים בנבט מתוך פרופילים של ביטויי גנים בשלבים שונים או בדיקת ביטוי של גנים ספציפיים. 3. איפיון הביוסניטיזה של הרעלן צילינדרוספרמופסיס בזמן הנביטה.

הפקה של תאי קיימא משאר אוכלוסיית התאים בתרבית בוצעה לאחר השרייה ליצירת אקינטים. ב. A. *ovalisporum* ההתמיינות לאקינטים מתבצעת בתנאים ללא אשלגן (BG11/-K) ובאור קבוע וגבוה (30 $\mu\text{mol photon m}^{-2} \text{s}^{-1}$) במשך 17 יום. מספר הפילמנטים והאקינטים בתרבית נספרו ביום ה-17 והאקינטים בודדו כמתואר ב Sukenik et al., 2007¹. על מנת לבדוד את האקינטים משאר אוכלוסיית התאים הם עוברים טיפול עם ליזוזים ובעקבותיו שטיפות עם 10mM EDTA, חומר זה הינו כלטור של יונים די-וולנטים כגון Mg^{+2} המשמש את האנזים כקו-פקטור. אך למרות השטיפות, בדיקה של חלבונים מאקינטים מבודדים הראתה שהאנזים עדיין נמצא בכמויות גדולות בדוגמא (איור 99, AK). אנו משערים שבניסויי נביטה, כאשר אנו מוסיפים מצע מלא הכולל מגנזיום, הליזוזים שנותר בדוגמא ממשיך לפעול

¹ Sukenik, A., J. Beardall, et al. (2007). "Photosynthetic characterization of developing and mature akinetes of *Aphanizomenon ovalisporum* (cyanoprokaryota)" J. Phycol. 43: 780–788

ולחזור את דופן הפפטידוגליקן של התא ובכך פוגע בחיוניות וביכולת הנביטה של האקינטים. מה שיכול להסביר את האחוז הנמוך של הנביטה המתקבלת. לכן כיוול פרוטוקול הפקת אקינטים נדרש על מנת להגדיל את אחוז האקינטים הנובטים.

הערכת אחוז האקינטים החיוניים נעשתה בעזרת הצבען של תאים מתים (Invitrogen cat SYTOX (S7020) הנקשר לחומצות גרעין של תאים הפגועים בממברנה, ותאים חיים זוהו תוך ניצול של אוטופלורסנציה מהאקינטים המגיע מאנטנות הפיקובילינים והכלורופיל.



איור 99: השפעת טיטרציית מלח על התנתקות הליזוזים הספוח ממעטפת האקינטים. הרצת חלבונים בג'ל חלבונים דנטורטיבי (SDS-PAGE) וצביעתה Coomassie blue. אקינטים מבודדים (AK) ותרחיף שטיפות עם ריכוזי מלח שונים (TE + NaCl). ניתן לראות שככל שריכוז המלח גבוה יותר, כך יותר ליזוזים נישטף.

אופטימיזציה של תהליך בידוד אקינטים

תחילה בוצעה הערכה של הזמן המיטבי לדגירה של התרבית עם ליזוזים. לכן נלקחה תרבית בהשרייה ביום ה 17 וזו נשטפה פעמיים ממצע הגידול עם 50 mM Tris HCl pH 7.5, 1 mM MgCl₂ והוספה של ליזוזים לריכוז סופי של 1 mg/ml. מעקב אחר התפרקות התאים התבצעה באופן איכותי במיקרוסקופ עם צביעת SYTOX לאחר הדגרת התרבית ב 37°C למשך פרקי זמן שונים (15, 20, 30 ו-60 דקות). מניסוי זה הסקנו שהדגרה עם ליזוזים בריכוז האמור ב 37°C למשך שעה מספיקה כדי לפרק את רוב התאים הוגטיבים בלי לפגוע בחיוניות של 84% מהאקינטים.

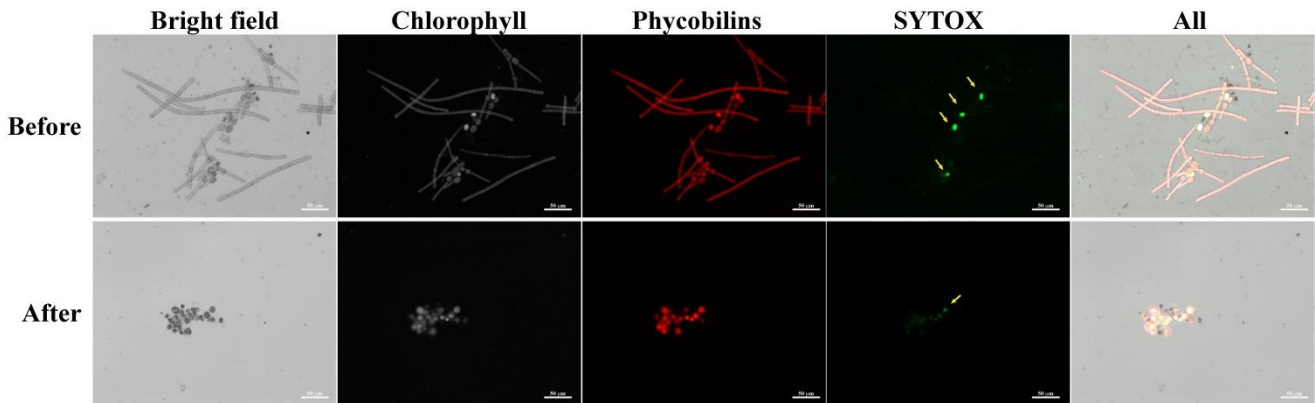
פעילותו של האנזים ליזוזים הופסקה על ידי הוספת 10 mM EDTA, אך האנזים היה עדיין נוכח בדוגמא. לכן נבדקה השפעת ריכוזי מלח שונים בבופר השטיפה על יכולת ההפרדה של הליזוזים הספוח מהאקינטים (איור 100). כמו כן נבדקה השפעת ריכוזי המלח השונים ומספרי השטיפות על חיוניות התאים בצביעת SYTOX (טבלה 13).

טבלה 13: ריכוזי מלח NaCl בבופר שטיפה והשפעתם על אחוז האקינטים החיים

NaCl [mM]	אקינטים חיים [%]
0	55
50	64
100	76
150	71

מניסויים אלו הסקנו ששלוש שטיפות עם 50mM Tris HCl pH 7.5, 10 mM Tris EDTA, 100 mM NaCl לאחר טיפול עם ליזוזים מספיקים כדי לסלק את האנזים מהדוגמא. כמו-כן לאחר בדיקה, מצאנו ששלב הסוניקציה המתבצע בסוף תהליך ההפקה, על מנת להפריד גושים ולפרק תאים וגטטיבים שנותרו, גרם לאיבוד של 9% מהיבול ולכן הוא מיותר.

הפרוטוקול המשופר השפיע לא רק על חיוניות התאים אלא גם על יעילות היבול, כך שנתקבלו פי 3 יותר אקינטים מאשר בתהליך ההפקה המקורי (איור 100).

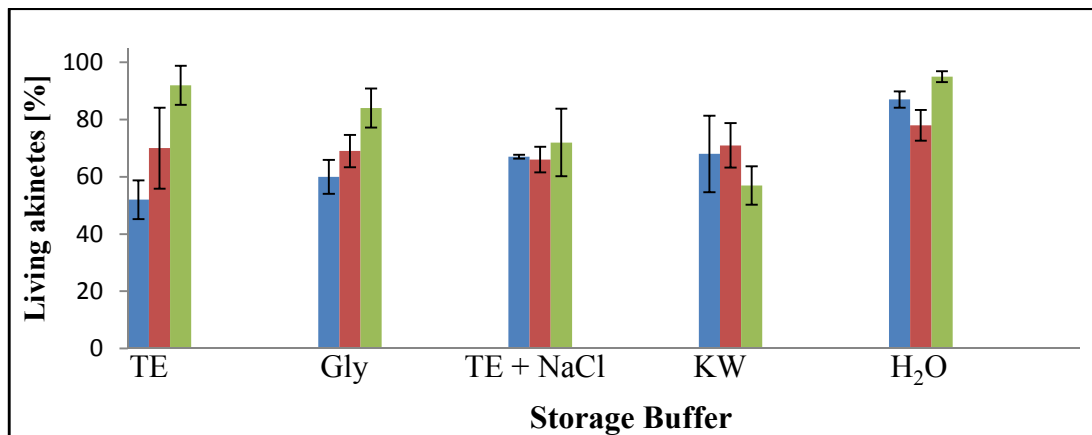


איור 100: אקינטים של *Aphanizomenon ovalisporum* לפני ואחרי הפקה. למעלה - תרבית בת 17 יום בהשרייה, צבועה ב SYTOX. שימו לב לארבעת האקינטים המתים לפני ההפקה (חצים צהובים). למטה – אקינטים מבודדים בתהליך ההפקה המשופר.

אופטימיזציה לשימור אקינטים מבודדים

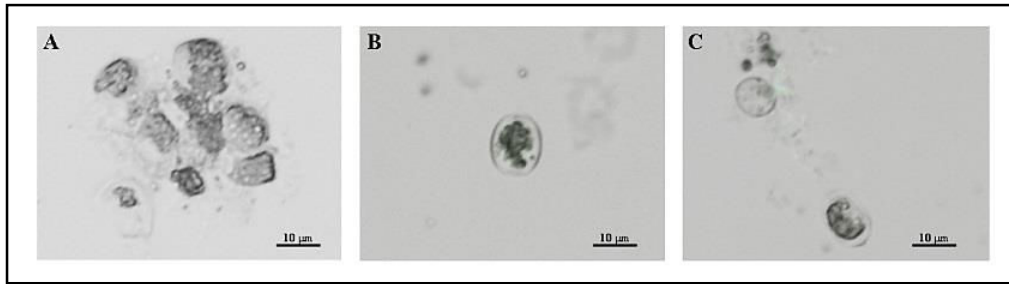
תנאי השמירה של האקינטים משפיעים לא רק על צורתו המורפולוגית של האקינט אלא גם על החיוניות שלו, לכן בדקנו השפעת חמש תמיסות שימור ושלוש טמפרטורות שונות על שרידות האקינטים. לאחר שבועיים בטיפולים השונים נצבעו דוגמאות ב SYTOX לקביעת אקינטים חיים/מתים.

חמשת תמיסות השימור שנבחרו הן: (1) 50mM Tris HCl pH 7.5, 10 mM Tris EDTA (TE) תמיסת השטיפה הראשונית בהפקת האקינטים; (2) 50mM NaCl (TE + 10% Glycerol); (3) 10% Glycerol; (4) מים היפולימנטיים מאגם הכנרת מעומק 39 מ' (5) מים Milli-Q. שלושת הטמפרטורות שנבדקו הן: 20°C – טמפ' גידול התרבית, 15°C – טמפ' בעומק האגם ו- 4°C. התוצאות מסוכמות באיור 101.



איור 101: תנאי שמירה אופטימליים לשמירת אקינטים חיוניים בתנאי מעבדה. האקינטים המבודדים שומרו ב: 50mM Tris HCl (TE + NaCl); 10% Glycerol (Gly); 50mM Tris HCl pH 7.5, 10 mM Tris EDTA (TE) Milli- (H₂O); (KW) מים היפולימנטיים מהאגם מעומק 39 מטר; pH 7.5, 10 mM Tris EDTA, 50mM NaCl water. טמפרטורות: ירוק – 20°C; אדום – 15°C וכחול – 4°C.

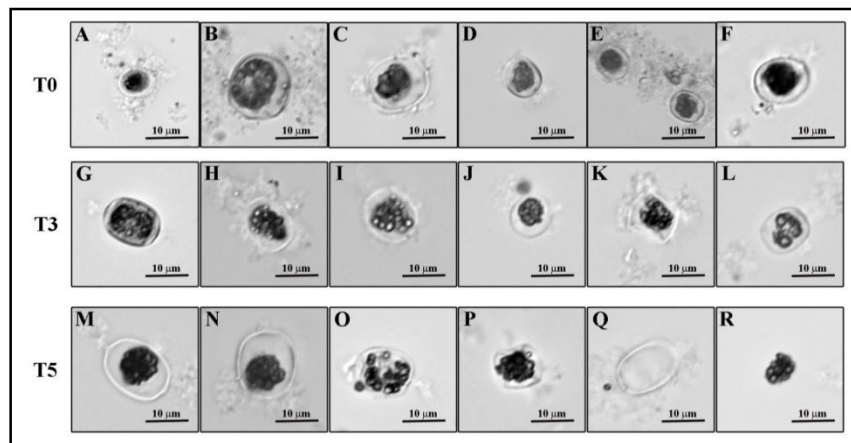
אחוזי האקינטים החיים הגבוה ביותר התקבלו בדוגמאות שנשמרו ב 20°C ללא קשר לתמיסת השמירה. את השימור המיטבי ניתן להבחין באקינטים השוהים ב TE או מים Milli-Q, אך ב TE ניתן לראות שהציטופלסמה מתכווצת והתא מתעוות (איור 102).



איור 102: מורפולוגיית אקינוטים לאחר שבועיים ב 20°C . (A) אקינוטים שנשמרו ב TE, (C-B) אקינוטים שנשמרו ב Milli-Q

נביטה:

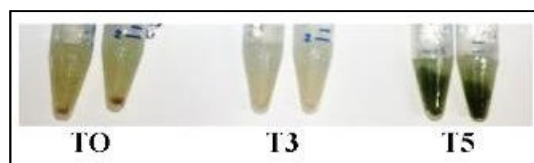
העמדנו ניסויי נביטה במצע BG11, 28°C עם אורכי גל שונים (אדום, ירוק, כחול ואור לבן) ומצאנו שאחוז הנביטה בכל התנאים שנבדקו מאוד נמוכים ($<1/2500$), למרות שנצפו פילמנטים אחרי 3 שבועות בבאריות שהיו בהם מעל ל 50,000 אקינוטים והיו תחת אור לבן. השינויים המורפולוגיים שהתרחשו באורכי גל השונים במשך הניסוי תועדו במיקרוסקופ (איור 103). אולם למרות השינויים שנצפו תחת תנאים אלה יעילות הנביטה היתה פחותה מ 0.04%.



איור 103: שינויים במורפולוגיית אקינוטים בניסוי נביטה. (A-F) אקינוטים באורכי גל השונים בזמן אפס. אקינוטים בני שלושה שבועות שגודלו תחת אור ירוק (G); אור אדום (L,K,I,H) ואור לבן (J). אקינוטים בני 5 שבועות שהודגרו תחת אור ירוק (O); אור אדום (R,Q,P,N,M). (Q) מעטפת אקינט ריקה; (R) פרוטופלסט.

בדיקת פוטנציאל רעילות של הנבט

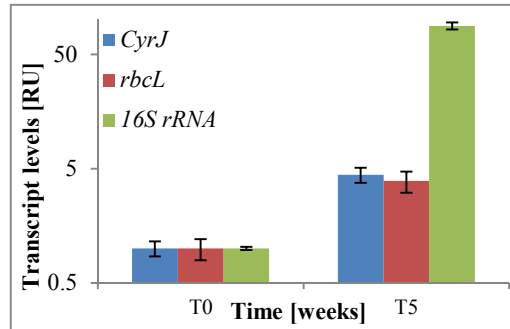
פוטנציאל הרעילות של *A. ovalisporum* בזמן הנביטה נבדק על ידי מדידת הרעלן עצמו בזמן אפס, 3 ו-5 שבועות מרגע העברת האקינוטים למצע מלא באור לבן ובטמפרטורה האופטימלית לגידול (28°C). אחרי 4 שבועות ניתן היה לראות פילמנטים המעידים על נביטה (איור 104).



איור 104: נביטת אקינוטים לאחר 5 שבועות בתנאי גדילה מיטביים. מבחנות 15 מ"ל לפני הכנה לבדיקת צילנדרוספרמופסין ב HPLC-DAD. בזמן אפס ניתן לראות משקע של אקינוטים (T0). לאחר שלושה שבועות

בתנאי גידול המשקע נעלם (T3). פילמנטים של *A. ovalisporum* לאחר 5 שבועות בתנאי גידול מתאימים (T5).

על מנת לבדוק את ההתאמה בין המצאות הטוקסין ויכולת הבייוסינטיזה של הרעלן על ידי *A. ovalisporum* הופק RNA מתרביות אקינוטים בזמן אפס ולאחר חמישה שבועות. ביטויים של שלושה גנים נבדקו על ידי RT-qPCR: 1. הגן המקודד לאנזים בתהליך הבייוסינטיזה של צילינדרוספרמופסין *cyrJ*. 2. גן המקודד לתת היחידה הגדולה של RuBisCO (*rbcL*) כמדד לקיבוע פחמן וגדילה. 3. *16S rRNA* כביקורת. התוצאות מסוכמות באיור 106. צילינדרוספרמופסין נמדד רק בפרקציה שגודלה במשך 5 שבועות (איור 106, T5) עם ממוצע של 2.768 מיקרוגרם רעלן לדוגמא.



איור 106: ביטוי גנים באקינוטים בוגרים (T0) לעומת תרבית מאקינוטים שנבטו בת 5 שבועות (T5). רמת השיעור של 3 גנים מ 50,000 אקינוטים נבדקה ב RT-qPCR. רמת הביטוי מחושבת יחסית לביטוי של כל גן בזמן אפס.

בזמן אפס לניסוי הנביטה רק ביטוי של *16S rRNA* נמדד. לאחר 5 שבועות ניתן להבחין בהגברה של פי 4 בביטוי של *cyrJ* ו-*rbcL*, בעוד כמות הביטוי של *16S rRNA* גדל פי 80. תוצאות אלו מתאימות לממצאים קודמים בהם הבחנו בהשתקה של מערכת הבייוסינטיזה של הרעלן בהתמיינות לאקינוטים ובאקינוטים בוגרים. דבר המצביע על כך שהרעלן צילינדרוספרמופסין ב *A. ovalisporum* קשור לגדילה הוגטיבית של האורגניזם.

3.5 האם ניתן לשלוט בפריחות ציאנובקטריה בקייץ על ידי אספקת חנקן מבוקרת?

אסף סוקניק, אורה הדס, עמי נשרי, ריקי פנקס, נחמה מלינסקי-רושנסקי, דיתי וינר-מוציני, אדית ליבוביץ

במימון רשות המים

הופעת האצה הכחולית *אפניזומנון אובליספורום* במאסף המינים של הכנרת בקיץ 1994 מהווה נקודת מפנה חשובה בהרכב אוכלוסיות הפיטופלנקטון באגם. החל מקיץ 2001 נוספה למצאי האצות בכנרת כחולית נוספת, *צילינדרוספרמופסיס רסיבורסקיי* שיצרה פריחה קיצית מסיבית ב 2005. *אפניזומנון אובליספורום* נמצאה כיצרנית של הרעלן צילינדרוספרמופסין ונוכחותה מהווה איום על איכות המים. *אפניזומנון צילינדרוספרמופסיס* כמו גם מינים אחרים של ציאנובקטריה מסוגלים לקבע חנקן אטמוספרי (N_2) ובכך להתגבר על תנאים בהם קיים מחסור בחנקן מקובע. בכנרת בחודשי הקיץ והסתיו ריכוזי החנקן האנאורגאני המומס (DIN) באפילימניון נמוכים במיוחד ותכונה זו מקנה לכחוליות יתרון סביבתי ברור- בתנאים המגבילים התפתחות של אצות אחרות (סביבה ענייה בחנקן זמין). *אפניזומנון צילינדרוספרמופסיס* מסוגלים להתפתח וליצור אוכלוסייה יציבה שממדיה יקבעו על פי זמינות המשאב המגביל (זרחה במקרה זה) שכן זמינות החנקן האלמנטרי (N_2) במים אינה מוגבלת.

במחקר שהגיע לסימו בשנת 2013, נבחנה ההשפעה של אספקת חנקן (בצורות שונות ובמועדים שונים) למי הכנרת, על התפתחות אוכלוסיית הפיטופלנקטון ועל האפשרות לצמצם את גודל האוכלוסייה של ציאנובקטריה מקבעות חנקן. הנחת העבודה היא שבתנאים מסוימים, הגברת זמינות החנקן תעכב התפתחות ציאנובקטריה מקבעות חנקן, ותאפשר התייצבות של אוכלוסייה של ירוקיות (או צורניות).

בסדרה מורכבת של ניסויי מעבדה, נבחנה האפשרות שהעשרה של מי כנרת בחנקן מקובע (אמוניה או חנקן) ו/או בזרחן תקבע את המין הדומיננטי בתרבית, תצמצם את תפוצת הציאנובקטריה מקבעות החנקן ותעלה את התפוצה של אצות מקבוצת הירוקיות (ו/או צורניות). הניסויים בוצעו בתנאי מעבדה שאפשרו בחינה של מספר רב של משתנים (סוג המים, אופי האינוקולום, תוספת של צורני חנקן ו/או זרחה, ומיני פיטופלנקטון משתי קבוצות טקסונומיות). הניסויים בוצעו בתנאי הארה וטמפרטורה המתקיימים בחלל המעבדה ולכן טווח עוצמות האור והטמפרטורות היה מצומצם יחסית ולא תאם תנאי קיצון של אור וטמפרטורה כפי שמתקיימים בשדה.

נמצא שהעשרה של מצע סינתטי BG11 (בסיסי) במקורות חנקן ו/או זרחן אפשרה התפתחות וגידול של מיני הנוסטוקלס שנבחנו (אפניזומנון וצלינדרוספרמופסיס). חשוב לציין שמינים אלו מוחזקים במעבדה תקופות ארוכות וגדלים במצע BG11 מלא, ולכן עברו התאמה לתנאי גידול אלה, כמו גם מיני הירוקיות שנבחנו בניסויים אלו. יכולת הציאנובקטריה לצבור זרחן מהווה יתרון ברור בסביבה דלה בזרחן, ואוכלוסיות עם מאגרי זרחה פנימיים שנחשפו לתנאי מחסור בחנקן עברו למטאבוליזם של קיבוע חנקן אטמוספרי. בתנאים אלו נמצא יתרון לאפניזומנון על פני אצות ירוקיות. תוספות של מקורות חנקן וזרחן אפשרו גידול מואץ ומוגבר של אוכלוסיית הציאנובקטריה ובתרביות בהן אספקת מקורות החנקן הוכפלה וגוונה (אמוניה + ניטראט) המעבר לקיבוע חנקן היה בשלב מאוחר יותר, והטרוציסטים הצטברו רק בשבוע השני לגידול. בכל התרביות בהן השתתפו ציאנובקטריה, תוספת של זרחה גרמה לצריכה מהירה יחסית של מקורות החנקן המקובע ומעבר לקיבוע חנקן אטמוספרי. מבין מיני הירוקיות שנבחנו במצע גידול סינתטי נמצא שלסנדסמוס יתרון בגידול ושהתפתחות אוכלוסיית הסנדסמוס בתגובה לתוספת מזינים מהירה יותר מזו של אוכלוסיית האפניזומנון.

היישום של מי כנרת מסוננים שנאספו בעונות שונות לבחינת פוטנציאל הגידול של ציאנובקטריה מקבוצת הנוסטוקאלס, הדגים את ההשפעות האפשריות של תוספות נוטרינטים על ההתפתחות והאינטראקציה בין מיני ציאנובקטריה ואצות ירוקיות. ככלל, בניסויים אלו נמצא שגידול של אפניזומנון התאפשר במי כנרת מסוננים, שנאספו בסוף החורף או בתחילת הקיץ גם ללא תוספות נוטרינטים. הגידול בתנאים אלו, ללא תוספת מזינים, היה מוגבל אך משמעותי. עם זאת ומסיבה לא ברורה, הוספת המזינים (אמוניה ו/או זרחה) כלל לא היטיבה עם אוכלוסיית אפניזומנון או צלינדרוספרמופסיס, שדעכו. בדומה לתוצאות שהתקבלו במצע הסינתטי, במי כנרת מסוננים מתחילת הקיץ, אוכלוסיית האפניזומנון התפתחה בנוכחות סנדסמוס ואף עכבה את התפתחות הסנדסמוס. מים מהחורף לא תמכו בהתפתחות אפניזומנון וגם לא בהתפתחות של צלינדרוספרמופסיס בתרבית מעורבת עם הירוקית סנדסמוס. בתרביות שגדלו במי כנרת מהקיץ התפתחות האפניזומנון לוותה ביצירה של הטרוציסטים שכלל הנראה סייעו במשק החנקן של התרביות. ככלל נמצא שגידול מוגבר של אצות מקבוצת הירוקיות התאפשר במי כנרת מסוננים בעקבות תוספות של מקורות חנקן וזרחן.

בניסויי העשרה של מי כנרת במזינים שנערכו בשני מועדים שונים נמצא שלאוכלוסיית הפיטופלנקטון שמגיעה עם מי הכנרת חשיבות בקביעת אופי המינים והתפתחות המין השולט בטיפולים השונים. אוכלוסיית הציאנובקטריה שבאינוקולום האביבי כמו אפניזומנון ומינים אחרים מסוגלות לקלוט חנקן מקובע בעילות ולגדול תוך תגובה מהירה למחסור בחנקן ויצור הטרוציסטים. התפתחות ביומסה גבוהה של מינים של ציאנובקטריה אפשרית גם ללא מימוש הפוטנציאל לקיבוע חנקן אטמוספרי. בנוסף, לציאנובקטריה מקבעות החנקן יתרון ברור בתנאים של ריכוזי זרחן נמוכים בשל מנגנוני קליטת זרחן יעילים. התחזקות והתבססות של הצורניות והירוקיות נצפו בניסוי העשרה של מי כנרת (לא מסוננים)

מהקיש. עם זאת ללא העשרה, נשמרה והתפתחה אוכלוסייה של ציאנובקטריה בעלת פוטנציאל לקבוע חנקן.

על פי תוצאות סדרות הניסויים השונות יש קושי להגיע למסקנה ברורה לגבי גורל ואופי אוכלוסיות הפיטופלנקטון שיתפתחו בכנרת בתגובה לתוספת מזינים. מצד אחד, תוצאות ניסוי העשרה של מי כנרת מעידות על פוטנציאל שליטה באוכלוסיות הפיטופלנקטון ע"י תוספת ומניפולציה של מזינים, אולם חשוב לציין שבתנאים מסוימים תוספת חנקן למי כנרת עלולה גם לעודד אוכלוסייה של ציאנובקטריה שתתפתח ועלולה להגיע לדומיננטיות בקיץ ובסתיו.

בדיון בתוצאות הניסויים שבוצעו במסגרת מחקר זה ובמשמעות התפעולית שלהן, יש לקחת בחשבון את מגבלות המערכת הניסויית. כך לדוגמה נבחנו רק מספר מינים מצומצם של אצות וציאנובקטריה, ותוספת מנתית אחידה של נוטרינטיים. משתנים כמו יחסים התחלתיים בין המינים הנבדקים והמצב הפיסיולוגי של המזרע ששימש לניסויים לא נבדקו כלל ועשויים להשפיע על התפתחות והשתלטות מינים דומיננטיים במערכת. בנוסף לא עסקנו באופן ישיר מדוע לא מוצה פוטנציאל הגידול של מזרע של *אפניזומנון* או *צלינדרוספרמופסיס* עם העשרה של התרביות בזרחה, אמוניה או שילוב שלהם.

בניגוד להשערה הראשונית שתוספת חנקן מקובע תעכב התפתחות ציאנובקטריה מקבעות חנקן ותעודד התפתחות ירוקיות (או צורניות), בחלק מהניסויים נמצא שתוספת חנקן מעודדת התפתחות מהירה של *אפניזומנון* הנתמכת בתכולה תאית ראשונית גבוהה של זרחן ויכולת מהירה ליצירה של הטרוציסטים וקיבוע חנקן. בתנאים אלו נמצא שתוספת חנקן ממקורות שונים דווקא גורמת להתחזקות ציאנובקטריה מקבעות חנקן ולא של ירוקיות.

3.6 פיתוח יכולות DNA ברקוד למיני הפיטופלנקטון בכנרת

רות נעמי קפלן-לוי, אלה אלסטר, יעל בנימיני ותמר זהרי

במימון המשרד לאנרגיה ומים, ותשתיות מדעיות ממשרד המדע

היכולת לזהות ולקרוא לאורגניזם בשם הוא נדבך חשוב בהבנתנו ויכולתנו לשמר את המגוון הביולוגי הקיים בעולמנו. ברקוד של דנ"א הינה דרך ליצירת תווית לאורגניזם בהתאם לרצף גן ספציפי בגנום שלו, אולם חסך בידע טקסונומי גורם לעיתים לטעויות חמורות בזיהוי אורגניזמים בכלים מולקולאריים בלבד. הפיטופלנקטון בכנרת הינה קבוצה של מיקרואורגניזמים מימיים המאופיינים היטב מורפולוגית, לכן קבוצה זו הינה מועמדת מצויינת לשימוש ברקוד. אנו בחרנו להשתמש ברצפים משני מקטעים בגנום כאשר הראשון הינו מקטע מהגן *rbcL* המשמש לזיהוי הסוג והמקטע השני נפרש על פני *rDNA-ITS1* המאפשר להבחין בין מינים קרובים אבולוציונית.

בפרוייקט זה אנו מייצרים בסיס נתונים אשר יעמוד כלבנת ידע ראשונה עליה ניתן לבנות מחקרים רבים, תוך מניעת טעויות עתידיות וזיהוי מהיר ומדויק של הפיטופלנקטון בכנרת. בסיס נתונים זה ישמש כדוגמא להמשך הברקוד של מיקרו-אורגניזמים מקבוצות טקסונומיות שונות ומיקומים גיאוגרפיים נוספים.

מטרות המחקר:

1. לפתח כלים ליצירת ברקוד דנ"א של מיני הפיטופלנקטון הקיימים בכנרת (כ-200); 2. יצירת בסיס נתונים של רצפי דנ"א נגיש באינטרנט, להשלמה ושדרוג שיטת הזיהוי המשמשת היום למיקרו-אצות בכנרת.

משימה 1 – בידוד מיני פיטופלנקטון מהכנרת:

החל מינואר 2012, חומר חי לבידוד מינים שונים של פיטופלנקטון מהכנרת נדגם אחת לשבוע בתחנה A, שבמרכז האגם. דגימות נוספות נלקחו מדי פעם מתחנות חופיות כגון חוף חוקוק וטבחה. הדגימות נלקחו מעומק של 0-1 מ' בעזרת רשת פלנקטון (20 מיקרון). הדגימות הטריות נבדקו, בוצע זיהוי לרמה של סוג/מין וצילום במיקרוסקופ אולימפוס. מים מהדוגמאות החיות (50 - 100 מיקרוליטר מכל דוגמה) פוזרו בצלוחיות אגר 1.5% עם מצע BG11 כפול או מצע SCM. הצלוחיות עברו אינקובציה במשך 2-4 שבועות בטמפרטורה של 25°C ותנאי תאורה רציפה בעוצמה של כ-70 מיקרומול-קוונט/שנייה. זני אצה הנראים לעין הועברו לצלוחיות אגר חדשות סטריליות וגודלו באותם התנאים. עבור מינים נדירים או קשים לגידול בידדנו 20-50 תאים כאשר כל תא הוכנס למבחנה נפרדת לשם ביצוע single-cell PCR. התאים בודדו בשיטת המיקרומניפולציה ושומרו בהקפאה ב-80°C. עד היום בודדו 67 מינים (טבלה 14).

משימה 2 – אמפליפיקציה רצפי הדנ"א של הגנים *rbcL* ו-*rDNA SSU-ITS1*

דנ"א גנומי ממיני פיטופלנקטון שבודדו הופק והמקטעים הנבחרים הוגברו בשיטת PCR כמפורט בדו"ח של 2012. עם סיום התוכנית 20% מתוצר ה-PCR נבדק באלקטרופוריזה, על ג'ל אגרוז 1%.

משימה 3 – שיבוט וריצוף

תוצרי ה-PCR מהאצות נוקו ושובטו ומושבבות חיוביות גודלו להפקת הפלסמידים ושליחת הדנ"א לריצוף לחברה חיצונית. המידע שהתקבל מהריצופים עובד בעזרת תוכנת BioEdit והרצפים אוגדו למסמך אחד בטרם הגשתם לבסיס הנתונים הבין-לאומי GeneBank. עם הפקדת הרצפים בבסיס הנתונים, כל רצף יקבל מספר (accession number) אותו נעדכן בקטלוג האינטרנטי של המיקרו-אצות בכנרת. על מנת למנוע טעויות ברצף חומצות הגרעין הנובעות מהתהליך, אנו מרצפים לפחות שלושה שיבוטים שונים של אותו מקטע דנ"א מכל מין של פיטופלנקטון. מספר הרצפים שהושגו עד היום מכל מקטע דנ"א מרוכזים בטבלה 14 לפי הקבוצות הטקסונומיות של המינים. מידע מולקולארי על המינים השונים אפשר לנו לעדכן, לאמת או לשנות שמות של מינים בקטלוג (טבלה 15).

טבלה 14: סיכום מצב הדנ"א ברקוד לשנת 2013. בטבלה מצויינות הקבוצות הטקסונומיות הידועות בכנרת ומספר המינים שבודדו מכל קבוצה. מהמינים שבודדו עד כה מצויינים מספר המינים הנמצאים בתהליך הברקוד בשלבים שונים ומספר הרצפים שהושגו עד כה במאגר הנתונים מכל קבוצה טקסונומית.

קבוצה טקסונומית	תרבויות / תאים בודדים	מינים בברקוד	<i>rbcL</i>	<i>SSU-ITS1</i>
Chlorophyta	41	22	48	43
Cryptophyta	1	-	-	-
Cyanobacteria	18	15	34	34
Diatom	3	3	1	-
Dinoflagellate	4	3	-	-
סה"כ	67	43	83	77

טבלה 15: עדכון או אימות שמות מיני פיטופלנקטון בהתאם לממצאים המולקולאריים. בטבלה מצויינות הקבוצות הטקסונומיות הידועות בכנרת ומספר המינים שבודדו מכל קבוצה. מהמינים שבודדו עד כה מצויינים מספר המינים הנמצאים בתהליך הברקוד בשלבים שונים ומספר הרצפים שהושגו עד כה במאגר הנתונים מכל קבוצה טקסונומית.

שמות מעודכנים	שמות המינים בקטלוג עד כה
Cyanobacteria	
<i>Microcystis aeruginosa</i>	<i>Microcystis sp. brown</i>
<i>Chrysoosporum bergii</i>	<i>Anabaena bergii</i>
<i>Chrysoosporum ovalisporum</i>	<i>Aphanizomenon ovalisporum</i>
<i>Limnothrix sp.</i>	<i>Lyngbia sp.</i>
Chlorophyta	
<i>Monoraphidium griffithii</i>	<i>Ankistrodesmus falcutus</i>
<i>Chlorella sorokiniana</i>	<i>Chlorella sp.</i>
<i>Mougeotia sp.</i>	<i>Mougeotia sp.</i>
<i>Chlorococcum sp.</i>	<i>Oocystis sp.</i>
<i>Asterococcus superbus</i>	<i>Chlamydomonas sp. 2</i>

לדוגמא הירוקית *Asterococcus superbus* שהוגדרה על ידי פולינגר בשנות ה 70 לא זוהתה בשנות ה 2000 ונחשבה כמין שנעלם. מידע גנטי הוכיח שהבעיה היתה בזיהוי המין בדוגמאות מאחר והתרבות שבודדה והוגדרה כ *Chlamydomonas sp. 2* היא בעצם *Asterococcus superbus*. נוסף על כך נמצאה ציאנובקטריה נוספת בכנרת אותה חשבנו ל *Lyngbia sp.*, אך הברקוד איפשר לנו לזהות אותה כ *Limnothrix sp.*. בשני מקרים אחרים הברקוד איפשר להגדיר מרמת הסוג לרמת המין, כמו גם לעדכן שמות של פיטופלנקטון שעם הזמן שמות המינים הללו השתנו (טבלה 15).

3.7 כיטרידים (*Chytrid fungi*) ופירוק אוכלוסיות הפיטופלנקטון בכנרת

אסף סוקניק, תמר לשם, אורה הדס, דיתי וינר-מוציני

במימון משרד המדע הטכנולוגיה והחלל

כיטרידים מהווים קבוצה של פטריות ירודות במחלקת הכיטרידימיקוטה (*Chytridiomycota*) השייכת לממלכת הפיטריות. אלו הם יצורים מיקרוסקופיים בעלי שוטון (איבר תנועה) החיים בסביבות מימיות מגוונות (מים מתוקים ומים מליחים ובקרקע). הם מתפקדים הן כמפרקי חומר מת (ספרופיטים) והן כטפילים של אורגניזמים רבים כגון: צמחים, אצות ובעלי חיים (בעלי חוליות וחסרי חוליות). מחזור החיים של הכיטרידים מתחלק לשניים: (1) שלב הייצור בו בתוך ספורנגיות מיוצרות זואוספורות חדשות שמשחררות למים, (2) שלב ההדבקה בו הזואוספורות החופשיות (גודלן 2-3 מיקרון) שוחות במדיום ומחפשות מארח (אצה, דו-חיים וכו') להיצמד אליו. תחילה נצמדת זואוספורה חופשייה לדופן תא האצה המארחת ומקיפה עצמה במעין מעטפת עבה שולחת ריזואיידים אל תוך תא המאכסן ומתחילה תוך ספיחת נוטריאנטים מהאצה להתפתח לספורנגיה, גוף המייצר בתוכו ברבייה א-מינית זואוספורות חדשות. המחזור נגמר כאשר הספורנגיה משחררת זואוספורות חדשות למים. לרוב הכיטרידים מתרבים ברבייה א-מינית אך קיימת אפשרות לרבייה מינית. ברבייה מינית שתי זואוספורות נצמדות אחת לשנייה במקום לדופן האצה, סביב שתי הזואוספורות ניבנת מעטפת עבה. אחת הזואוספורות תתרום את תכולתה לשניה אשר תתפתח לספורנגיה דיפלואידית ותייצר זואוספורות חדשות הפלואאידיות.

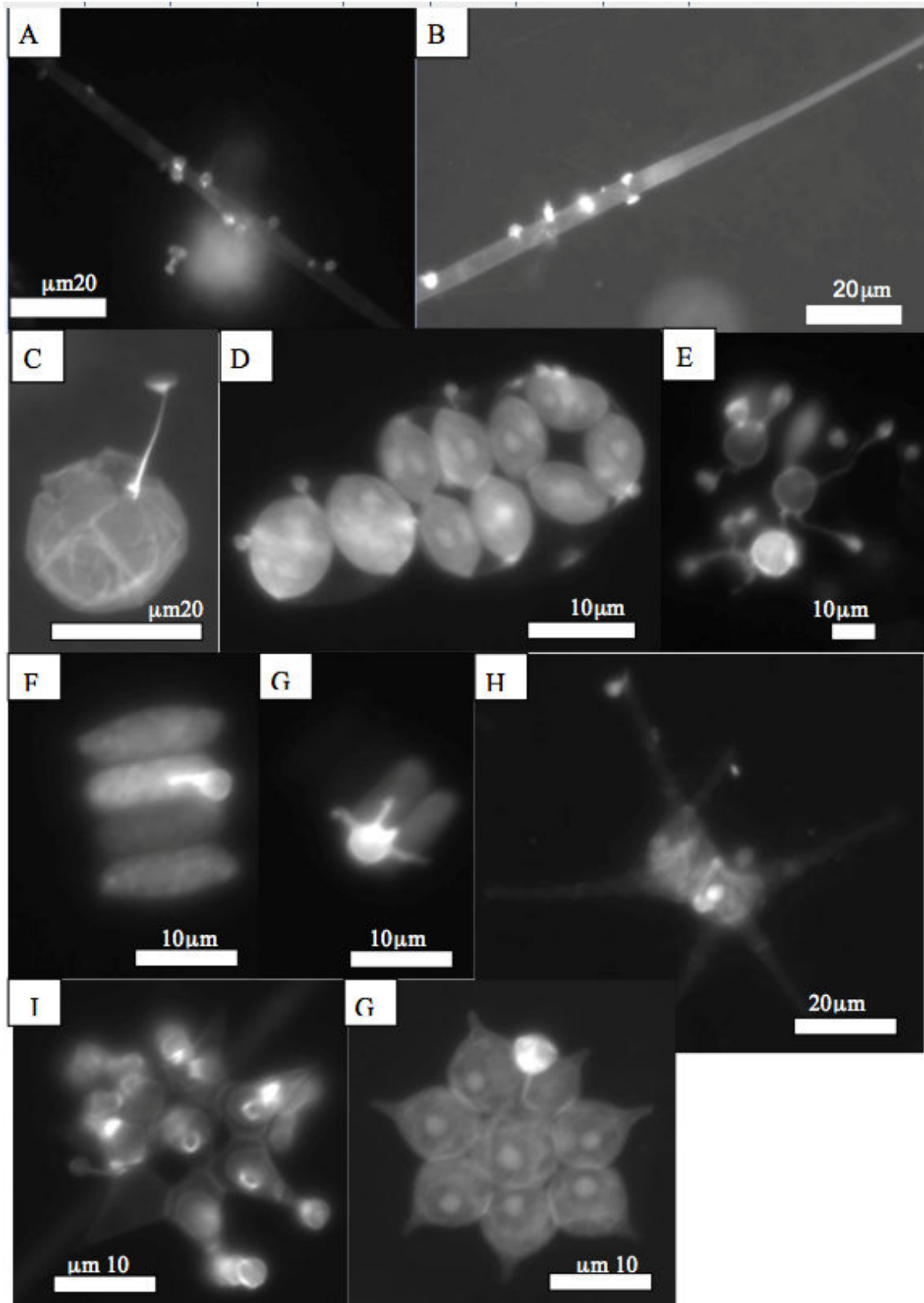
הכיטרידים פועלים כמפרקים ביולוגים של חומרים קשי פירוק כגון כטיין, קרטיין ותאיית, מה שגורם להם להיות בעלי תפקיד חשוב במעגל הנוטרינטיים. בנוסף, כפרזיטים של אורגניזמים ימיים, הכיטרידים לוקחים חלק בשליטה על האוכלוסייה (מבחינת גודל ומבנה).

למרות הניטור הקבוע המתבצע בכנרת מזה למעלה מ-4 עשורים, מעט מאוד ידוע על תפוצתם ותפקידם של הכיטרידים במארג המזון ובמיחזור נוטרינטיים באגם. המחקר היחידי שנעשה בנושא התבסס על חקירת קריסת אצת הפרידניום בחורף 2000 ומעקב אחר אוכלוסיות האצה בשלוש שנים שלאחר מכן (2001-2003). בעבודה זו נמצא שכיטריד מהסוג *פליקטוכיטריום* (*Phlyctochytridium*) מדביק בעיקר תאי פרידניום במצב של עקה או נקשר לתאים מתים של פרידניום. לפיכך נקבע שפליקטוכיטריום פועל כספרופיט בעל העדפה לתאי פרידניום, אך מאחר ואינו פרזיט, ככל הנראה אינו מעורב ישירות בהתמוטטות פריחת הפרידניום בכנרת (Alster & Zohary, 2007²).

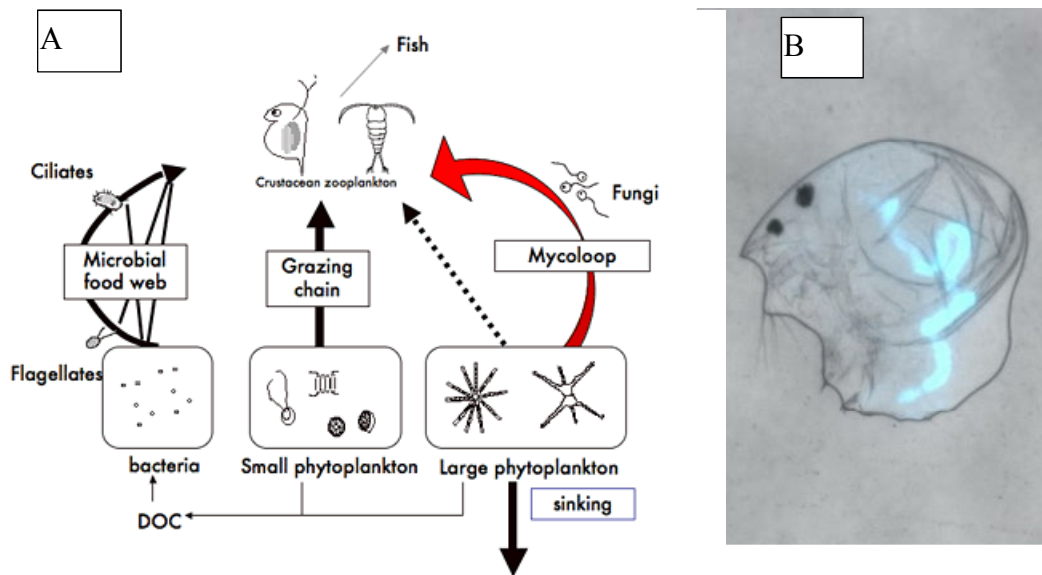
במסגרת מחקר רב תחומי שמטרתו זיהוי הגורמים הביולוגיים המעורבים בהתמוטטות פריחת פיטופלנקטון באגם אנו מבצעים בשנתיים האחרונות דיגומים קבועים בכנרת במטרה לזהות את נוכחות הכיטרידים באגם ואת האצות אותן הם מדביקים. דיגומות מים הנאספות מהכנרת במועדים שונים מסוננות על פילטר, נצבעות בצבע פלואורסנטי (Calcofluor White CFW) ונצפות בעזרת מיקרוסקופ פלורוסנטי. נמצא כי הכיטרידים בכנרת מדביקים מינים שונים מקהילת הפיטופלנקטון באגם, בעיקר אצות אאוקריוטיות מקבוצות טקסונומיות מגוונות. בין המינים שנמצאו נגועים היו קלוסטריום (*Closterium*), אאוציסטיס (*Oocystis*), קואלסטרום (*Coelastrum*), סנדסמוס (*Scenedesmus*), סטאורסטרום (*Staurastrum*), פדיאסטרום (*Pediastrum*) ומוגושיה (*Mougeotia*) השייכים לקבוצת הירוקיות ופרידניום (*Peridinium*) המשתייכת לקבוצת הדינופלגלטים (איור 107). ממצאים ראשוניים אלו מהווים הוכחה לכך שלכיטרידים תפקיד בעיצוב הרכב אוכלוסיות הפלנקטון בכנרת.

לכיטרידים גם תפקיד חשוב במארג המזון. את יחסי הגומלין בין הרמות הטרופיות נהוג היה לתאר כפירמידת מזון המבוססת על היצרנים הראשוניים ומהם אנרגיה וחומר עוברים אל הצרכנים השניונים וכן הלאה עד טורפי העל. היום ידוע שהמערכת מסובכת יותר וכוללת יחסי גומלין מורכבים בין הרמות הטרופיות השונות כאשר חיידקים מהווים לולאה צדדית ומהותית המעורבת בפירוק חומר אורגני ומיחזור נוטרינטיים (המעגל המיקרוביאלי). עדויות חדשות מראות כי גם לכיטרידים (פטריות) תפקיד חשוב במארג המזון המתבטא בשני היבטים: (1) פירוק חומר אורגני ומיחזור נוטרינטיים בדומה למעגל המיקרוביאלי, (2) הפיכה של אצות שאינן זמינות ליצרנים השניונים (בגלל מימדי התא או דופן בלתי פריקה) לזואוספורות של כיטרידים שהן קטנות יחסית וזמינות לטריפה על ידי יצורים מסננים. לרוב, אצות מקבוצת הצורניות (Diatoms) להן דופן סיליקה ואצות בעלות מימדים גדולים (כדוגמת הפרידניום או ירוקיות מושבתיות) לא נאכלות על ידי זואופלנקטון ושוקעות לקרקעית האגם ללא השארת תרומה במארג המזון. כאשר כיטריד נדבק לאצה הוא שואב ממנה נוטריאנטים ועוזר בפירוקה ותוך כך מיצר עשרות ומאות תאי זואוספורות, תאים אלו של הכיטרידים הם קטנים ונאכלים על ידי הזואופלנקטון. יחסי גומלין אלו המתווכים על ידי כיטרידים הוגדר כמעגל מיקוטי (של פטריות) במקביל למעגל המיקרוביאלי כפי שמוצג באיור 108A. הוכחות ראשוניות של הזנת זואופלנקטון על כיטרידים מוצגות באיור 108B בו אנו מדגימים קליטה של כיטרידים על ידי קופפוד ממשפחת הסריודפניה (*Ceriodaphnia* sp) שנחשף לתרבית מעבדתית של הכיטריד. הצבע הכחול הממלא את מעי החיה מעיד על רעיה וקליטה של זואוספורות של כיטרידים.

²Alster, A. & Zohary, T. (2007). Interactions between the bloom-forming dinoflagellate *Peridinium gatunense* and the chytrid fungus *Phlyctochytrium* sp. *Hydrobiologia* 578, 131-139.



איור 107: אצות כנרת נגועות בכיטרידים. התמונות נלקחו מדוגמאות מי כנרת שנאספו באגם ונצבעו בצבע פלורסנטי. צולם במיקרוסקופ פלורסנטי. (B+A) קלוסטריום (*Closterium*, C) פרידניום (*Peridinium*, D), אאוסיסטיס (*Oocysts*, E), קואלאסטרום (*Coelastrom*, G+F), סנדסמוס (*Scenedesmus*, H), סטאוראסטרום (*Staurastrum*), פדיאסטרום (*Pediastrum*). המבנים הבוהקים הם גופי פרי של כיטרידים הדבוקים לאצה. (קנה מידה מופיע כמלבנים לבנים אופקיים)



איור 108: הקשר בין זואופלנקטון וכיטרידים. (A) דיאגרמת המארג הפלנקטוני על פי (Kagami et al. 2007³). החץ האדום מיצג את המסלול המיקוטי. אצות גדולות שבגלל מימדיהן לא נצרכות על ידי זואופלנקטון נאכלות על ידי הכיטרידים הגדלים בהם והופכים את האצה למסה גדולה של תאים קטנים של זואוספורות שנאכלים ע"י זואופלנקטון. (B) פרט של סריודפניה אשר ניזון על כיטרידים. צביעה עם צבע פלורוסנטי לכיטרידים מעידה על נוכחותם במעי הסריודפניה (ניסויי ההזנה בוצע בשיתוף עם שרון מכר). ניסויי הזנה זה מראה שהכיטרידים מהווים מזון לזואופלנקטון ובכך תורמים למארג המזון הימי.

3.8 וירוסים – תפקידם בבקרה על/של תפוצת אוכלוסיות הפיטופלנקטון בכנרת

אורה הדס, ריקי פנקס, נחמה מלינסקי-רושנסקי, בשיתוף עם דבי לינדל, אירנה פיקרסקי ויותם חולתא - הטכניון

במימון משרד האנרגיה והמים

וירוסים הם "צורות החיים" הנפוצות באוקיינוסים וכנראה גם במקווי מים מתוקים. מתרבות ההוכחות שהדבקה בוירוסים אחראית לתמותה של יצורים אוטוטרופים והטרוטרופים במים, ומכאן להשפעה על מחזור הפחמן ורגרציה של נוטריאנטים. ליזיס של היצור המודבק הופכת את התוכן התאי והביומסה שלו

לדטריטוס אורגני מומס או חלקיקי שיכול לשמש יצורים פרוקריוטיים במים. תהליך זה תומך בייצור ההטרוטרופי של פרוקריוטים אך מקטין את יעילות העברת החומר לרמות טרופיות גבוהות יותר.

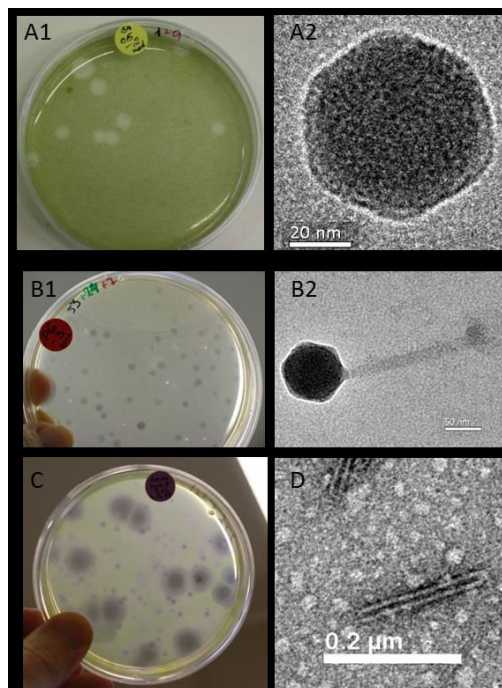
בכנרת, אנו עדים בעשרים השנים האחרונות לשינוי תבנית אוכלוסיות הפיטופלנקטון באגם. נזכיר רק את ההעלמות של הפריחה השנתית האופיינית של הצינדיניום והופעה של פריחות של ציאנובקטריה מקבעות חנקן כמו האפניזומנון והצילינדרוספרמופסיס, הופעה של לינגביה ומהירויות, פריחות של מוגושיה. השאלה האם יש תפקיד לוירוסים, על ידי הדבקה וליזיס של המאכסן, לבקר ולהשפיע על תפוצת אוכלוסיות הפיטופלנקטון באגם היא מטרת מחקר זה.

³ Kagami, M., de Bruin, A., Ibelings, B. W. & Van Donk, E. (2007). Parasitic chytrids: their effects on phytoplankton communities and food-web dynamics. *Hydrobiologia* 578, 113-129.

בשנה השניה למחקר (2013) המשכנו בבידוד ואפיון של הוירוסים התוקפים תרביות של *אפניזומנון*, *צילינדרוספרמופסיס*, *סינכוקוקוס*, *מיקרוציסטיס* (חום וירוק), וכן מינים ימיים של *סינכוקוקוס* ו*פרוכלורוקוקוס*. המינים לעיל שמשו כמאכסנים והודגרו עם מים מעומקים שונים מתחנה A, בפברואר, מאי ויולי 2013, בנוסף לדגימות שנאספו בשנת 2012. התרביות עם מי הכנרת נזרעו על אגר BG מוצק ובמצע BG נוזלי. כעבור שבועיים התקבלו מרבדי ציאנובקטריה ופלאקים (אזורים שקופים או שקופים למחצה), האופייניים ושונים מורפולוגית בכל מין של וירוס וציאנובקטריה. פלאקים אלו הם תוצאה של הדבקת וירוסים ממי אגם שגרמו להמסה של תאי המאכסן (ליזיס) (איור 109A). בנוסף, לאחר הדגרת מי כנרת עם הציאנובקטריה במצע הנוזלי התקבלו 100 ליזאטים מעומקים שונים ותאריכים שונים המצביעים על המסה של המאכסן, קרי הדבקה ויראלית של אותם מינים כמו במצע המוצק.

עד עכשיו התקבלו 20 תבדידים נקיים של וירוסים שאופיינו מורפולוגית במיקרוסקופיה אלקטרונית. המיקרוסקופ האלקטרוני הראה 3 טיפוסי ויריונים: ויריון עם קפסיד איקוסהדרלי בגודל 60 ננומטר התוקף *צילינדרוספרמופסיס*; ויריון בעל קפסיד של 70 ננומטר וזנב לוליני המדביק *סינכוקוקוס*, וויריון בצורת מקלון באורך 200 ננומטר ורוחב 20 המדביק *אפניזומנון* (איור 109).

ריאקציית *polymerase chain reaction (PCR)* ו*sequencing* מ 60 פלאקים נתנו חותמת של גנים הדומים לקבוצה T4-like myoviruses ו-T7-like cyanophages השייכים לקבוצה הידועה כמדביקה ציאנובקטריה. תוצאות אלו מצביעות על כך שבמי כנרת יש נגיפים התוקפים סלקטיבית מינים שונים של ציאנובקטריה ומרמזת (אולי) על תפקידם בקביעת המינים "מי ימצא ומתי" במי האגם.



איור 109: פלאקים וויריונים שבודדו ממיני ציאנובקטריה שונים; (A) וירוס P4sp של צילינדרוספרמופסיס, פלאקים קטנים וקפסיד איקוסהדרלי. (B) וירוס P5 של הסינכוקוקוס WH8102. פלאקים קטנים וויריון עם קפסיד איקוסהדרלי וזנב ארוך. (C) וירוסים של סינכוקוקוס זן P עם שני סוגי פלאקים. (D) ויריון של *אפניזומנון* בצורת מקלון ופלקים בעלי הילה.

3.9 העדפות המזון הצמחוניות של הזואופלנקטון

שרון מכה, רות נ. קפלן-לוי וגדעון גל

במימון משרד המדע

הזואופלנקטון הצמחוני בכנרת ניזון רק מחלק קטן מהפיטופלנקטון. מגבלה זאת קיימת בגלל גודלן של האצות, צורתן, והיכולת להפריש רעלנים. כתוצאה מכך רעיית הזואופלנקטון משפיעה באופן חסר פרופורציה על אוכלוסיית הפיטופלנקטון בכנרת, מצד אחד, ומצד שני הזואופלנקטון תלוי במרכיב יחסית קטן מתוך כלל האצות באגם. בעבר נערכו מספר מחקרים אשר ניסו לזהות את מיני האצות הנתונות לרעייה ע"י הזואופלנקטון הצמחוני אך מחקרים אלו היו מצומצמים בהיקפם וטרם השינויים הגדולים שחלו באוכלוסיית האצות באגם. על כן, בכדי להבין טוב יותר את יחסי הגומלין בין הזואופלנקטון לפיטופלנקטון באגם ובעיקר ביכולת של הזואופלנקטון להשפיע על הרכב וגודל האוכלוסייה יש צורך לזהות את המינים המשמשים כמקור מזון לזואופלנקטון.

בגלל אופי אוכלוסיות הזואופלנקטון והפיטופלנקטון באגם (בעיקר גודלם) שימוש בכלים המסורתיים הקיימים לקביעת יחסי טורף-נטרף מוגבלים ועל כן יש צורך לפתח פרוטוקול עבודה לשימוש בכלים מולקולריים. מכאן שזיהוי ספציפי של הפיטופלנקטון יעשה באמצעות מציאת הרצף המקודד לתת-יחידה הגדולה של אנזים RuBisCO (*rbcL*), המשמש כסמן מולקולרי למציאת טרף צמחוני. מכיוון ש RuBisCO הינו חלק ממעגל קלווין (קיבוע פחמן), מעגל שאינו קיים בזואופלנקטון. רצף מקטע זה יאפשר לנו לזהות את האצה הספציפית שנאכלה על ידי אותו פרט זואופלנקטון, בכך שנפיק ממנו DNA, נגביר קטע עם פריימרים המותאמים לגן ה-*rbcL* ונרצף את האצה ששימשה למאכל ונוכל לזהות תוך הצלבה של הרצף המתקבל עם הברקוד הגנטי של פיטופלנקטון הכנרת (פרק 3.6).

מטרת מחקר זה, היא לזהות את מקורות המזון של הזואופלנקטון ולאמוד את השפעת הרעייה של הזואופלנקטון על אוכלוסיית הפיטופלנקטון בכנרת. בעיקר נתמקד בשאלות הבאות:

1. איזה ממיני הזואופלנקטון צמחוניים?
2. איזה ממיני הפיטופלנקטון משמשים כמזון עבור הזואופלנקטון?
3. כיצד משפיעה רעיית הזואופלנקטון על אוכלוסיית הפיטופלנקטון בכנרת?

1. ניסויים באמצעות זואופלנקטון מתרביות

פיתחנו שיטה מולקולרית במעבדה, לבדיקת הרכב מזונם של הזואופלנקטון לפני שידגמו ישירות מהאגם: איתור של גן ה-*rbcL* בזואופלנקטון מתרביות הגידול.

בכדי לבדוק את האפשרות להשיג תוצר PCR מפרט זואופלנקטון יחיד, נערך ניסוי שהתבצע על 3 קבוצות שונות המכילות כל אחת 5 פרטים של *Ceriodaphnia* spp.: הפריטים בקבוצה 1 נלקחו מתרבית הגידול שלהם אשר הכילה מספר סוגי אצות, הפריטים בקבוצה השנייה הוכנסו למי כנרת שסוננו ב GF/F למשך 3 ימים מבלי שניתן להם מזון, הפריטים בקבוצה השלישית הועברו לכלים המכילים מי כנרת מסוננים והואכלו ב *Scenedesmus* spp. למשך 10 ימים. הפריטים קובעו באתנול 80% ולאחר מכן עברו שטיפות חוזרות במים מזוקקים (Milli-Q) לסילוק האתנול. כל פרט הוכנס למבחנה עם מצע של Milli-Q 2µl ואוכסן ב 80°C למשך חצי שעה לפחות. מכל פרט הופק DNA באמצעות REDEExtract-N-amp plant PCR kit (Sigma, XNAPS) על פי פרוטוקול היצרן. כ- 4µl מה DNA המופק שימש כמצע ל-nested PCR. בכדי להגביר את גן ה-*rbcL* תכננו פריימרים דגנרטיביים, שמגבירים מקטע של 850 בסיסים לערך בראקציית ה PCR הראשונה:

KL- 530F: 5' ACNRTNAAACCNAAAYTAGGTYTNTC

KL- n1387R: 5' AANNTRATNTCTTTCCANAVNTC

תוצרי ה PCR הראשון שימשו כמצע DNA לראקציית ה PCR השנייה, עם פריימרים דגנרטיביים שנלקחו מ Giri et al., 2004. תוצרי ה PCR השני נבדקו באמצעות ג'ל אלקטרופורוזיס כשהפרגמנט המצופה הינו באורך של 800 בסיסים לערך. לאחר שתוצרי ה PCR השני עברו ניקוי ושיבוט הם נשלחו לריצוף.

היכולת של הזואופלנקטון לאכול מין אצות ספציפי נבדקה על ידי צילום תכולת הקיבה של פרטים שונים במיקרוסקופ פלורסנטי. התהליך בוצע על ידי איסוף פרטים מתרביות הגידול והכנסתם לצלחת פטרי המכילה תרבית של אצה ספציפית למשך 30 ד'. לאחר מכן כל פרט צולם באמצעות מיקרוסקופ פלורסנטי עם פילטר לזיהוי כלורופיל. התהליך בוצע לסוגי זואופלנקטון שונים עם סוגים שונים של אצות שבודדו מהאגם. כבקרה שלילית צולמו פרטים אשר לא קיבלו מזון במשך 3 ימים.

2. דיגום זואופלנקטון מהאגם

באמצעות פרוטוקול העבודה שפותח ניתן לכייל מערכת למציאת מיני הפיטופלנקטון שנאכלים על ידי זואופלנקטון *in situ*:

איתור גן ה rbcL בזואופלנקטון מאגם הכנרת

מי כנרת נאספו באמצעות Niskin Sampler, מיכל דיגום אשר נסגר בו זמנית משני צדדיו ומאפשר איסוף מים מעומק ספציפי, עומק הדיגום נקבע על פי ניטור הזואופלנקטון בשבוע הדיגום. המים סוננו על רשת של 100 מיקרון והזואופלנקטון נאסף לנפח של 10 מ"ל מים. קיבוע של תוכן הדגימה נעשה על ידי הוספה של 40 מ"ל 100% אתנול. לאחר מכן נאספו 12 פרטים מקבוצות הזואופלנקטון העיקריות, כל פרט הוכנס למבחנה עם מצע של 2 µl Milli-Q ואוכסן ב 80°C- למשך חצי שעה לפחות. מכל פרט יופק DNA באמצעות REDEExtract-N-amp plant PCR kit (Sigma, XNAPS) על פי פרוטוקול היצרן. כ- 4 µl מה DNA המופק שימש כמצע ל- nested PCR (כמתואר למעלה). לאחר שתוצרי ה PCR השני עברו ניקוי ושיבוט הם נשלחו לריצוף.

בניית מאגר גנטי (Barcode) של מיני הזואופלנקטון הדומיננטים באגם

בידוד זואופלנקטון מהאגם באמצעות רשת אנכית. קיבוע הפרטים באמצעות אתנול 80%. צילום כל פרט לשם זיהוי מורפולוגי. מכל מין נאספים 3 פרטים ומופק DNA להגברת מקטעים מהגנים:

1. *Cytochrome c oxidase (COI)*

2. *18S rRNA-ITS1*

תוצאות

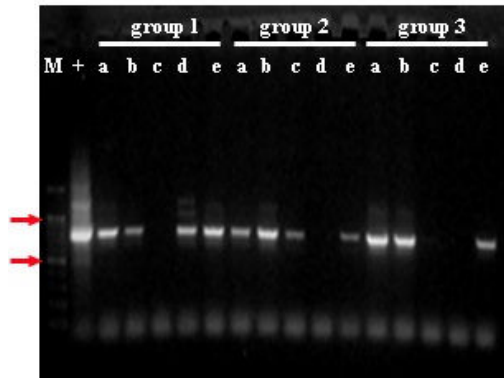
1. ניסויים באמצעות זואופלנקטון מתרביות

בידוד תרביות זואופלנקטון

בשלבם הראשונים בגידול תרביות של זואופלנקטון יש צורך לייצב את האוכלוסייה, זהו שלב קריטי הקובע באם האוכלוסייה תקרוס או תשרוד, אנו סבורים ששלב זה תלוי בגורמים שונים כגון כמות מזון, זמני האכלה קבועים, עוצמת אור וכ"ו ועל כן הקושי בגידול תרביות לאורך זמן.

עד כה גודלו בהצלחה 3 מינים מסדרת ה- Cladocera: *Bosmina* sp., *Moina* sp., *Ceriodaphnia* sp.

איתור של גן ה-*rbcL* בזואופלנקטון מתרבויות הגידול המזון בקיבתם של ה-*Ceriodaphnia sp.* משלושת הטיפולים השונים (מתרבית הגידול, ללא מזון ושהואכלו ב *Scenedesmus sp.*) נבדק באמצעות שיטה מולקולרית. התקבלו תוצרי nested PCR באורך של ~800 בסיסים מכל 3 הטיפולים (איור 110). על אף שלא ציפינו לקבל הגברה של מקטע ה DNA מקבוצת הזואופלנקטון שהורעבו, ניתן לראות בברור כי מקטע ה DNA הוגבר. בכדי למצוא את מקור ה DNA שהוגבר על ידי ה nested PCR שני שיבטים מכל קבוצה נשלחו לריצוף. תוצאות הריצוף מאשרות כי מדובר בגן ה *rbcL*, תוצאות ה BLAST מראות כי בשלושת הטיפולים ה *Ceriodaphnia spp.* ניזון מ *Scenedesmus sp.*



איור 110: תוצרי ה nested PCR שנבדקו על ידי אלקטרופורוזה על ג'ל אגרוז 1%. קבוצה 1 (*Ceriodaphnia* שבדדו מתרבית הגידול. 2) *Ceriodaphnia* שהורעבו. 3) *Ceriodaphnia* שהואכלו עם *Scenedesmus spp.* (+). *Chlorella sorokiniana* כביקורת חיובית. M- סמן DNA, 100bp. חץ אדום עליון- פרגמנט DNA באורך 1kb, חץ אדום תחתון- פרגמנט DNA באורך 0.5kb.

צילום תכולת הקיבה של זואופלנקטון

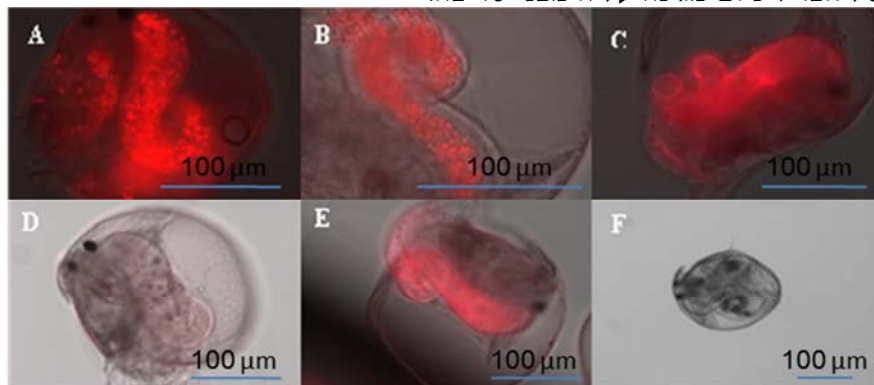
זואופלנקטון הינם שקופים תחת אור לבן, מכאן שלאחר שהם ניזונים ניתן לזהות פיגמנטים של אצות בתוך קיבתם באמצעות מיקרוסקופ פלורסנטי. פרטים של *Ceriodaphnia* הואכלו עם סוגי אצות שונים (טבלה 16) ותכולת הקיבה שלהם נבדקה באמצעות מיקרוסקופ פלורסנטי.

טבלה 16: רשימה של מיני הזואופלנקטון ותגובתם לאצות שהואכלו בניסוי ההאכלה. (+) אצות שנאכלו, (-) אצות שלא נאכלו

תגובת הזואופלנקטון	מיני הפיטופלנקטון	מיני הזואופלנקטון
-	<i>Aphanizomenon ovalisporum</i>	<i>Ceriodaphnia spp.</i>
+	<i>Chlorella spp.</i>	
-	<i>Peridinium gatunense</i>	
+	<i>Scenedesmus spp.</i>	
+	<i>Selenastrum spp.</i>	
+	<i>Sphaerocystis spp.</i>	
+	<i>Chlorella spp.</i>	
+	<i>Sphaerocystis spp.</i>	

הפלורסנציה החזקה והצורה של האצות בתוך קיבת ה *Ceriodaphnia* (איור C-111A) מעידה על כך שהפרטים אכלו *Selenastrum sp.*, *Scenedesmus sp.* ו-*Sphaerocystis sp.*, כשסופקו להם כמזון. לעומת

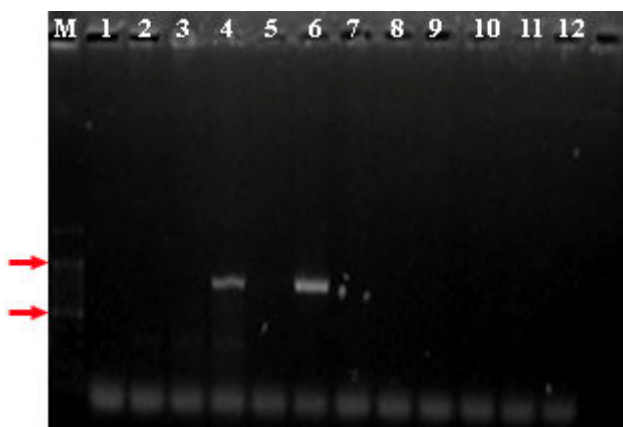
זאת כשציאנובקטריה, חוטית ממין *Aphanizomenon ovalisporum* ניתנה להם, נצפתה פלורסנציה חלשה ללא שאריות של פילמנטים בקיבת ה *Ceriodaphnia* (איור 111E). תוצאה זו מעידה על כך ש *Ceriodaphnia* לא אכלה את *A. ovalisporum*. לא נצפתה פלורסנציה בקיבת ה *Ceriodaphnia* שהורעבו (איור 111F), כמו גם כשניתנה להם אצה ממין *Peridinium gatunense* (איור 111D). ככל הנראה גודלה של הפרידיניום מגינה עליה מפני טריפה.



איור 111: פרטים של זואופלנקטון לאחר ניסוי האכלה או תקופת הרעבה. פרטי ה *Ceriodaphnia* שהואכלו עם (A) *Selenastrum* sp. (B), *Scenedesmus* sp. (C), *Sphaerocystis* sp. (D), *Peridinium gatunense* (E), *Aphanizomenon ovalisporum* (F) לביקורת, פרט *Ceriodaphnia* שהורעב במשך 3 ימים.

2. דיגום זואופלנקטון מהאגם איתור גן ה *rbcL* בזואופלנקטון

תהליך איסוף הזואופלנקטון מדיגום האגם וניתוח הדגימות במעבדה יכול להוביל למצב העקה של הפרטים. השפעת מצב זה על תוכן קיבת הזואופלנקטון אינה ברורה. ייתכן שזו הסיבה לכך שבתוצאות הראשוניות התקבלו רק 2 תוצרי PCR מתוך 12 הפרטים שנבדקו (איור 112). מריצוף הפרגמנט שהתקבל עולה כי הפרט של *Copepoda* sp. אכל *Microcystis* sp. בעוד פרט של *Moina* sp. אכל *Scenedesmus* sp.



איור 112: תוצרי ה nested PCR שנבדקו על ידי אלקטרופורוזה על ג'ל אגרוז 1%. התקבלו 2 תוצרים: *Copepoda* (שורה 4), *Moina* sp. (שורה 6). -M סמן DNA, 100bp. חץ אדום עליון- פרגמנט DNA באורך 1kb, חץ אדום תחתון- פרגמנט DNA באורך 0.5kb.

3. מיפוי המאגר הגנטי (Barcode) של מיני הזואופלנקטון הדומיננטיים באגם.

עד כה ריצוף של הגן *COI* נערך לטקסונים: *Diaphanosoma sp.*, *Copepoda spp.* ו- *Moina sp.* מינים נוספים כגון *Ceriodaphnia sp.* נמצאים כרגע בהליך השיבוט.

פעולות לעתיד:

1. המשך ניסויי מעבדה להפקת DNA והגברת מקטע *rbcL* עם מינים שונים של זואופלנקטון ופיטופלנקטון.
2. סיום כיוול מערכת הדיגום של זואופלנקטון מהכנרת: איסוף זואופלנקטון מהכנרת, הפקת ה-DNA שלו והגברת מקטע ה-*rbcL*.
3. קביעת פרוטוקול הגברה של רצף *18S rRNA-ITS1* מהזואופלנקטון לבניית מאגר הנתונים (Barcode).
4. המשך בניית המאגר הגנטי (Barcode) של הזואופלנקטון.

Giri, B. J., Bano, N., Hollibaugh, J. T. (2004) Distribution of RuBisCO Genotypes along a Redox Gradient in Mono Lake, California. *Applied and Environmental Microbiology*, 70: 3443-3448

3.10 ממשק הדיג בכנרת- תזונת דגים

גדעון גל בשיתוף ג'ימי שפירו (אגף הדיג)

במימון משרד החקלאות

לאור השינויים שחלו בפלנקטון של הכנרת בעשורים האחרונים, נדרשת בחינה מחודשת של מקורות המזון של מיני הדגים המרכזיים באגם ובעיקר של אמנון הגליל. במחקר, במימון רשות המים, שהסתיים לאחרונה נמצא שגם בהעדר פרידיניום הזואופלנקטון אינו מהווה מקור מזון מרכזי לאמנון הגליל ושכנראה חומר חלקיקי אחר (אצות) הם המקור העיקרי. בניגוד לשימוש באיזוטופים, שיטת ניתוח תכני הקיבה נותנת תמונה מהימנה של חומר שנבלע עד כדי לזיהוי המין בתנאים מסוימים אך השיטה דורשת עבודה רבה והפרטים שנאכלו אינם תמיד ניתנים לזיהוי.

מטרת המחקר העיקרית היתה בחינת השפעת השינויים שחלו בכנרת על הדגים המסחריים באגם, בדגש על אמנון הגליל. בחינה זאת נעשתה תוך בדיקת תמורות בהרכב המזון והתחרות בין המינים השונים על מקורות המזון ובעקבות כך ההשפעה האפשרית על מארג המזון. לשם בדיקת השפעת השינויים שחלו באגם על הדגים בחנו במהלך השנתיים הראשונות של המחקר את תוכני הקיבה והמעיים של מספר רב של דגים. הדגש בעבודה זו הייתה על בחינה בעיקר של אמנון הגליל תוך דיגום מינים אחרים כגון הכסיף ומיני אמנונים אחרים.

דיגום הדגים לצורך המחקר נעשה מתוך דגים שנתפסו כחלק משלל הדיג המסחרי של ספינת הדיג של עין גב. על כן, מיקום הדיגום ושעות הדיגום היו תלויים באתרי הדיג ושעות הפעילות של מפעילי הספינה. אתרי דיגום הדגים כללו את האזור דרומית לשפך הירדן, בית-צידה, גופרה, רמות, קורסי, עין-גב, ואזור מרכז האגם שביני צינברי להאון. הדיג מספינת עין-גב נעשה ע"י שימוש ברשת הקפה ועל כן הדגים אינם לכודים ברשת במים למשך פרק זמן ארוך אלא נלכדים ומועלים ישירות לספינה. הדגים נלקחו מתוך

הרשת עם הוצאת הרשת מהמים. הדגים שנאספו כחלק מהדיגום זוהו לרמת המין ומשקלם (לדיוק של ± 10 ג') ואורכם (± 1 ס"מ) תועדו.

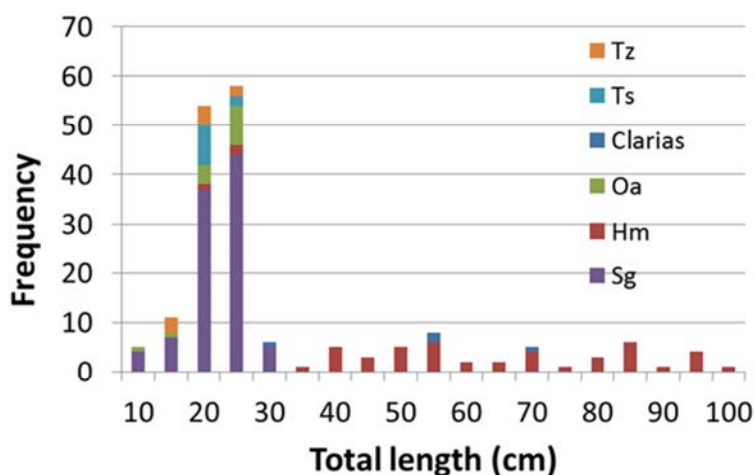
הדגים שנאספו קובעו בצנצנות עם 8% פורמלין ואחרי 24 ש' הועברו להמשך שימור ל-70% אתנול וטיפול במעבדה. הטיפול במעבדה כלל את האלמנטים הבאים:

- מדידת אורך המעי (כל המינים)
- שקילת תוכן קיבה (למינים עם קיבות)
- בדיקה ראשונית של תוכן הקיבה

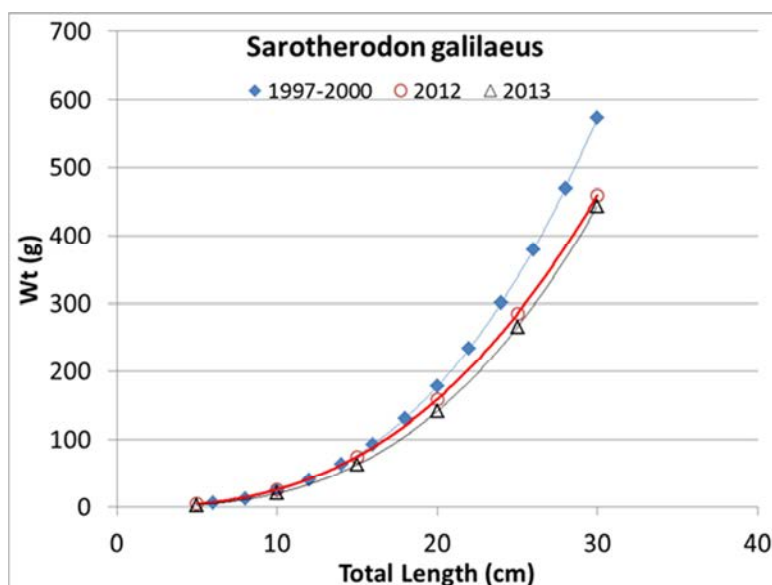
במינים ללא קיבות- חלוקת המעי ל-3 חלקים שווים, שקילת תוכן המעי הקדמי ושימור. שקילת תוכן המעי של שני החלקים הנותרים לצורך אומדן משך הזמן שעבר בין זמני האכילה שלהם לדיגום.

שימור הקיבות והמעי נעשה ב-70% אתנול ובמקרים שבהם נערכו בדיקות ראשוניות של תוכני קיבה הרי שהתכנים נשמרו בפורמלין.

סך הכל נדגמו עד כה 192 דגים מתוכם 70 במהלך 2012, ו-98 ב-2013 וכן היו ברשותנו עוד 14 דגימות שנדגמו בשנת 2010. אמנון הגליל מהווה מעט יותר מ-50% מסך הדגים והכסיף כ-25% מסך הדגים שנדגמו. האורך הממוצע של דגי אמנון הגליל היה 20.1 ס"מ (טווח 9.0-29.0 ס"מ וסטיית תקן 3.7 ס"מ, איור 113) והמשקל הממוצע היה 179.0 ג' (טווח בין 31.5-360.0 ג', סטיית תקן 69.7 ג'). יש לציין שלמרות שההבדלים בין אורכי הדגים ב-2012 וב-2013 היו קטנים, 20.4 ו-20.2, בהתאמה הרי שהיו הבדלים במשקל הממוצע. בשנת 2012 המשקל הממוצע היה 195.2 ג' לעומת המשקל הממוצע בשנת 2013 שהיה 169.8 ג'. יחד עם זה קשה להבדיל בין עקומות המשקל-אורך של אמנון הגליל של השנתיים הללו אך הדגים היו בעלי משקל נמוך יותר ביחס לדגים שנדגמו בשנים 1997-2000 (איור 114).

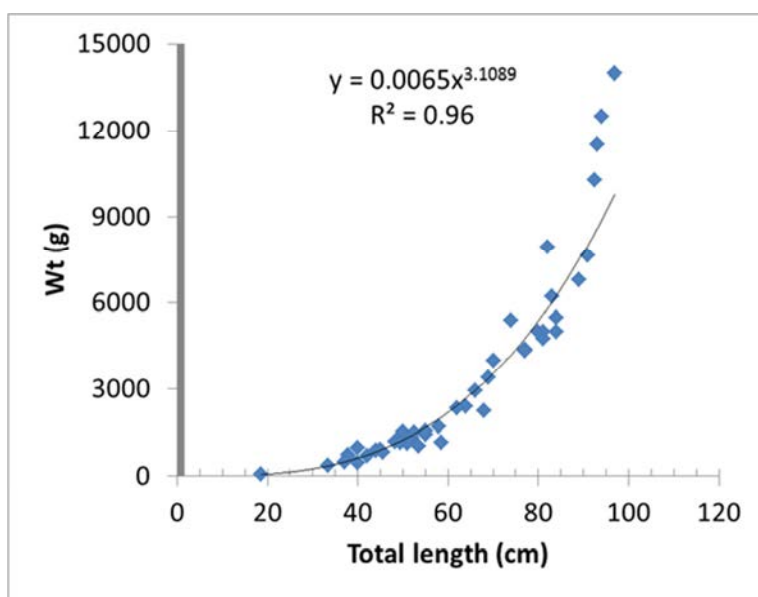


איור 113: התפלגות אורכי הדגים שנדגמו במהלך השנה השנייה של המחקר. התרומה של כל אחד מהמינים מזוהה עפ"י צבע: Tz - אמנון מצוי, Ts - טברנון, Sg - אמנון הגליל, Oa - אמנון הירדן, Hm - כסיף, Clarias - שפמנון.



איור 114: עקומות אורך-משקל עבור אמנון הגליל עפ"י דגים שנדגמו בשנים 2012 ו-2013 וכן עבור מדגם דגים מהשנים 1997-2000.

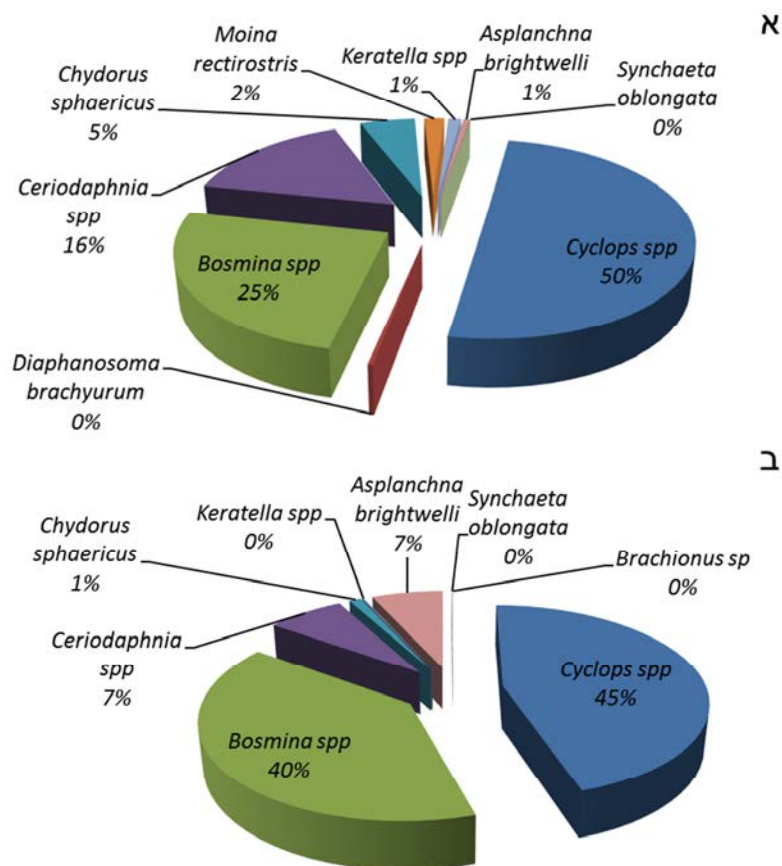
כצפוי, היה דמיון רב ביחס אורך-משקל של אמנון הירדן ואמנון הגליל, דגי אמנון המצוי היו בעלי משקל נמוך יותר ודגי הטברנון הציגו ערכי ביניים. במקרה של דגי הכסיף, האורך הממוצע היה 53.6 ס"מ (21-97) והמשקל הממוצע היה 3,565 ג' והטווח בין 14,000-360 ג' (איור 115).



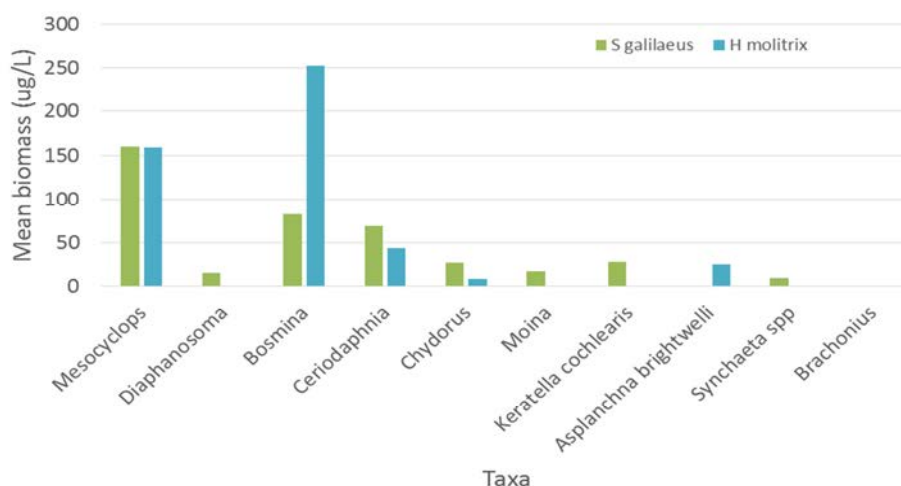
איור 115: גרף אורך-משקל של דגי הכסיף שנדגמו.

בדיקת תוצאות ניתוחי תוכן הקיבה והמעיים שערכנו על דגי אמנון הגליל והכסיפים מצביעים על דמיון, מבחינת הזואופלנקטון, בהרכב מיני המזון. בשני המינים הללו התרומה היחסית של הקופפודים על שלביהם השונים והבוסמינה מהווים 75% (אמנונים) עד 85% (כסיפים) מסך הביומסה של הזואופלנקטון הנאכל לאורך השנה (איור 115). בשני המינים הקופפודים היוו בין 45-50% מהביומסה. גם ניתוח של התרומה של מיני הזואופלנקטון השונים עפ"י הביומסה הממוצעת שנמצאה בדגים שנדגמו במהלך 2012-2013 מצביע על ממצאים דומים (איור 117). הביומסה (משקל רטוב) הממוצעת של קופפודים שנמצאה בקיבות ובמעיים של דגי אמנון הגליל ודגי הכסיף הייתה דומה ועמדה על כ- $160 \mu\text{g L}^{-1}$. ההבדל הבולט היה

בתרומה של הבוסמינה לביומסה הממוצעת כאשר בדגי הכסיף הערכים היו גבוהים יותר ועמדו על כ- μg 250 L^{-1} לעומת כ- $83 \mu\text{g L}^{-1}$ בדגי האמנון. התוצאות המוצגות בדוח זה מעידות על פוטנציאל לתחרות על מקורות המזון בין דגי אמנון הגליל ודגי הכסיף.



איור 116: התרומה היחסית של מיני הזואופלנקטון השונים לאמנון הגליל (א) ולדגי הכסיף (ב) באגם במהלך 2012-2013. התוצאות מבוססות על סה"כ הביומסה שחושבה על פני כל הדגימות במהלך השנים 2012-2013.



איור 117: הביומסה הממוצעת בדגי אמנון הגליל והכסיף עפ"י חלוקה טקסונומית של זואופלנקטון. החישוב מבוסס על אותם פריטים שנמצאו בדגים שנבדקו.

על מנת לבחון עצם קיום תחרות בין המינים על מקורות המזון יש לבחון את מידת החפיפה בזמן בין מקורות המזון. דהיינו האם שני המינים ניזונים מאותם מקורות באותה תקופה (חודשים) בשנה. כמו כן,

יש צורך לחשב את הצריכה ע"י הדגים ביחס למלאי המזון הקיים. חפיפה בזמן במקורות המזון אינה הוכחה מספקת לתחרות. יש צורך להראות שישנה מחסור במזון ביחס לצריכה. במהלך השנה קרובה, נמשיך בדיגום הדגים ואף נבצע מספר דיגומים בשעות הלילה על מנת לבחון את ההבדלים במרכיבי המזון ביום ולילה וכן את ההשפעה על אומדני צריכת המזון של הדגים. בנוסף ננסה להעריך האם קיימת תחרות בין שני המינים ע"י בחינת הצריכה לעומת מצאי המזון וכן מידת החפיפה במקורות המזון לאורך השנה.

3.11 איתור אתרי הטלה של אמנונים ואפיון העדפות קינון בסמוך לצמחייה מוצפת

תמר זהרי, דיוד קמינגס, בשת"פ עם אביטל גזית, ומנחם גורן (אונ' ת"א)

במימון משרד החקלאות

לדגי הכנרת חשיבות רבה בשמירה על המאזן האקולוגי באגם ועל איכות המים. קריסת יבול אמנון הגליל בכנרת משלל של למעלה מ 300 טון ב 2005 לפחות מ 10 טון ב 2008 היווה אינדיקטור לבעיה בממשק הכנרת. לקריסת אוכלוסיית אמנון הגליל יש כנראה מספר סיבות ואחת מהן היא מחסור באתרים מתאימים להטלה במפלסים נמוכים. בעיה נוספת עשויה להיות של שרידות נמוכה של הדגיגים במפלסים נמוכים, כאשר חסר בליטורל מסתור מטורפים (אבנים וצמחייה חופית מוצפת) ומקורות מזון. רביית אמנונים בכנרת נחקרה בעבר, עם דגש על אמנון מצוי אך עבודות אלו נעשו לפני כמעט שלשה עשורים, כאשר טווח תנודות המפלס היה קטן מהנוכחי וכאשר התשתית והכסות הצמחית ברצועת הליטורל, בה הדגים מקננים, היו שונים מהקיים בשנים האחרונות.

מטרות המחקר: (1) לאתר את אתרי ההטלה של האמנונים הבולטים בכנרת, א. גליל, א. ירדן וא. מצוי; (2) לקבוע את עונתיות הרבייה ולברר את הקשר בין עוצמת הרבייה לעונתיות; (3) לאפיין את אתרי ההטלה מבחינת הצמחייה ועומק המים.

אתרי המחקר ותדירות הדיגום: בשנה ב' של המחקר התמקדנו בחמישה אתרי דיגום: מגדל, צינברי, שיזף, שפמנון וזאכי, בהם עקבנו אחת לשבוע אחר מספר הקינים ליח' שטח לאורך חתכים ניצבים לקו המים, תוך כדי אפיון סביבת הדיגום (אופי התשתית, עצמת הצמחייה, עומק המים, טמפ' המים). בשפמנון חלק מהזמן התנאים לא התאימו לדיגום בגלל עכירות גבוהה של המים. מתחילת אפריל ועד אמצע ספטמבר 2013 נדגמו 16,262 מ"ר לאורך 290 חתכים.

המדידות והחתכים בוצעו לפי הפרוטוקול שבדו"ח השנה הקודמת. החתכים המלבניים ברוחב 2 מ' נעשו בניצב לחוף מקו המים עד לעומק של 2.5 מ'. בכל מטר של החתך התבצעה בדיקה שכללה משבצת מלבנית ששטחה 2 מ² (מטר של החתך ומטר מכל צד שלו). בתוך כל משבצת נמדדו עומק עמודת המים וטמפרטורת המים, אופיינו סוג המצע וצפיפות הצמחייה, ונספרו הקינים.

אפיון הצמחייה: הצמחייה במים (צומח חופי שהוצף עם עליית המפלס) חולקה לקטגוריות של צפיפות. הוגדרו חמש קטגוריות מ 0 עד 3, כאשר 0 מציינת היעדר צמחייה, 1 - צמחייה דלילה, 2 - צמחייה בינונית, 3 - סבך צמחייה מפותח ו-4 מציינת צמחייה שכוסחה ע"י סירה קוצרת והיא חסרת נוף מעל לפני המים. הגדרת צפיפות הצמחייה נעשתה עבור כל יחידת דיגום וללא התחשבות בשטח שמסביב ליחידת הדיגום. הצומח לא הוגדר לפי מינים אלא רק לפי עצמת הצימוח, אבל באופן בולט המינים השליטים היו קנה ואשל.

זיהוי וספירת קינים: קיני אמנונים הם לרוב גומות חפורות בקרקעית האגם, מנוקות מאצות ומחלקיקים אחרים, שקוטרן גדול מאורך הדג המקנן, הן זוהו לרוב כגומה בעלת תחתית בהירה בקרקעית. במקומות

בהם התשתית סלעית ניתן היה למצוא גם קינים שהם שקע בינות האבנים שנוקה מחומר אורגני וחלקיקים אחרים. אמנון מצוי מקנן גם במחילות שחפורות מתוך גומת האם. נספרו כל הקינים הפעילים למראה. בקינים לא פעילים מצטבר בתוך זמן קצר חומר אורגני או אחר, קינים כאלו לא נספרו. ספירת הקינים של אמנון הגליל הייתה בעייתית. זכרי מין זה חופרים גומה רדודה המשמשת להטלה ולהפריה וננטשת מיד לאחר לקיחת הביצים לפה על ידי שני ההורים (איור 118). כתוצאה מכך, הקינים שלהם לעיתים קרובות לא מוגדרים ונהרסים במהירות ולכן נעשה אומדן עוצמת ההטלה של אמנון הגליל על ידי אומדן ויזואלי של כמות הדגים שעסוקים בפעילות החיזור ורבייה, על סקלה בין אפס (העדר פעילות רבייה) לשלוש (פעילות רבייה אינטנסיבית). לצורך השוואה, אומדן חצי-כמותי אז בוצע גם עבור שני מיני המינים האחרים.



איור 118: קן עם ביצים (מימיו) והתטולה מקרוב (משמאל) של אמנון גליל טרם לקיחת הביצים לפה של שני ההורים. חוף צינברי, 2 לאפריל 2013 (צילומים: דייב קמינגס).

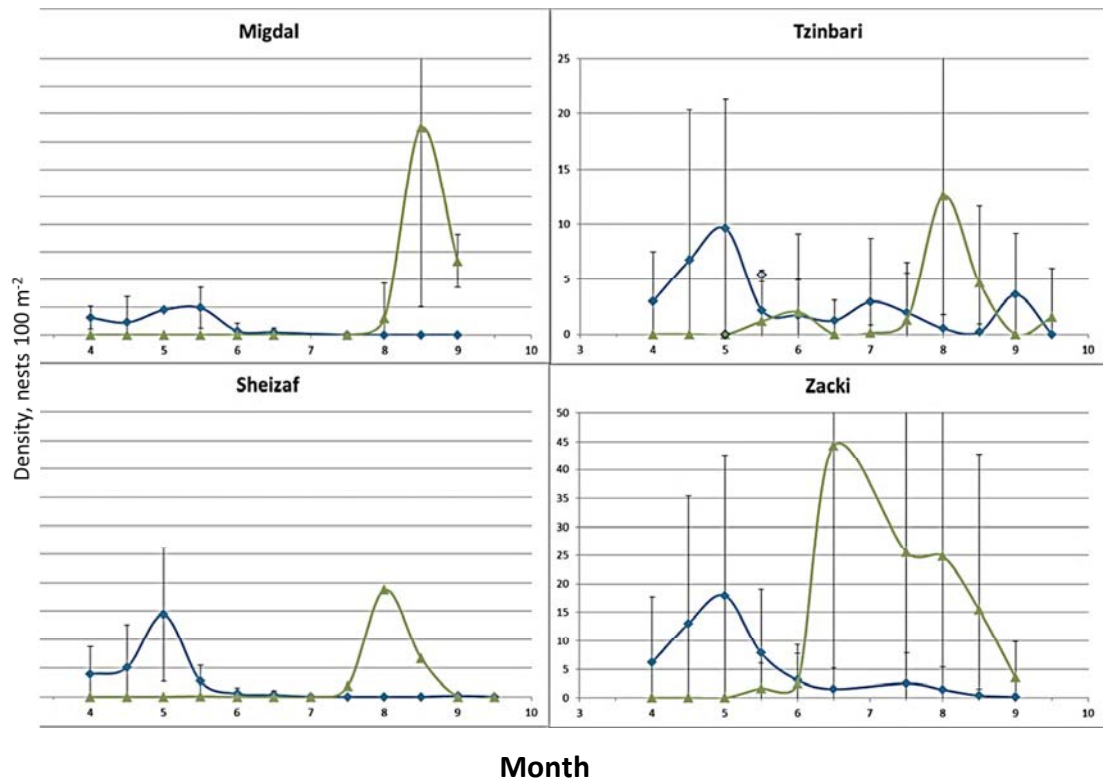
המהלך העונתי של צפיפות הקינים

קינים של אמנונים משלשת המינים נצפו בחופים שונים סביב הכנרת במשך קרוב לששה חודשים, החל מתחילת אפריל כאשר בוצע הסקר הראשון, ועד לסוף בספטמבר. באופן בולט, עצמת הקינון של אמנון הגליל ואמנון הירדן הייתה גבוהה יותר בין אפריל ליוני ודעכה ביולי עד להעלמות גמורה, בעוד שיא עונת הרבייה של אמנון מצוי היה בין יוני לאוגוסט (איור 119).

Station	week #	April					May					June					July					Aug					Sep											
		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38												
א. גליל	שיזף	1	2		2	3	2		1	1	1	0																										
	צינברי	1	1		2	2	1		1	1	1	1		1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	שפך שפמנון		2	3		2	1		3				0			0																						
	שפך זאכי		3	3	3	3	1	3	2		1		0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	מגדל דרום		1			1	1	0	1		1		0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	ממוצע		1.0	1.8	3.0	2.0	2.2	1.0	3.0	1.6	1.0	1.0	0.5	0	0.3	0.3	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
א. ירדן	שיזף	1	2		2	3	2		1	1	1	0																										
	צינברי	1	1		1	2	1		1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	שפך שפמנון		1	2		2	1		2			0			0	0	0																					
	שפך זאכי		3	3	3	3	1	2	2		1		0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	מגדל דרום		1			1	1	0	1		1		0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	ממוצע		1.0	1.6	2.5	1.8	2.2	1.0	2.0	1.4	1.0	1.0	0.5	0	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
א. מצוי	שיזף	0	0		0	0	0		0	0	0	0																										
	צינברי	0	0		0	0	0		0	0	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	שפך שפמנון		0	0		0	0		0		0		0		0	0	0																					
	שפך זאכי		0	0	0	0	0	1	2		2		3	3			3	3	3	3	3	2	2	1														
	מגדל דרום				0	0	0		0		0		0	0			0	0	1	2	2	3	3															
	ממוצע		0	0	0	0	0	0	1.0	0.4	0	0.8	0.5	1.0	1.0	0.3	0.3	0.8	1.0	1.3	1.5	1.3	1.5	1.3	1.5	1.3	0.5	0.8	0.8									

איור 119: עוצמת פעילות החיזור של שלושת מיני האמנונים כתלות בתאריך, בחמש תחנות דיגום והממוצע לכל התחנות עבור כל מין. העוצמה מדורגת בין 0 (אין פעילות) ל 3 (עוצמת פעילות גבוהה מאד). התאריך מופיע כמספר השבוע מתחילת השנה, כאשר שבוע 14 הוא בתחילת אפריל. משבצות ריקות – לא נדגם.

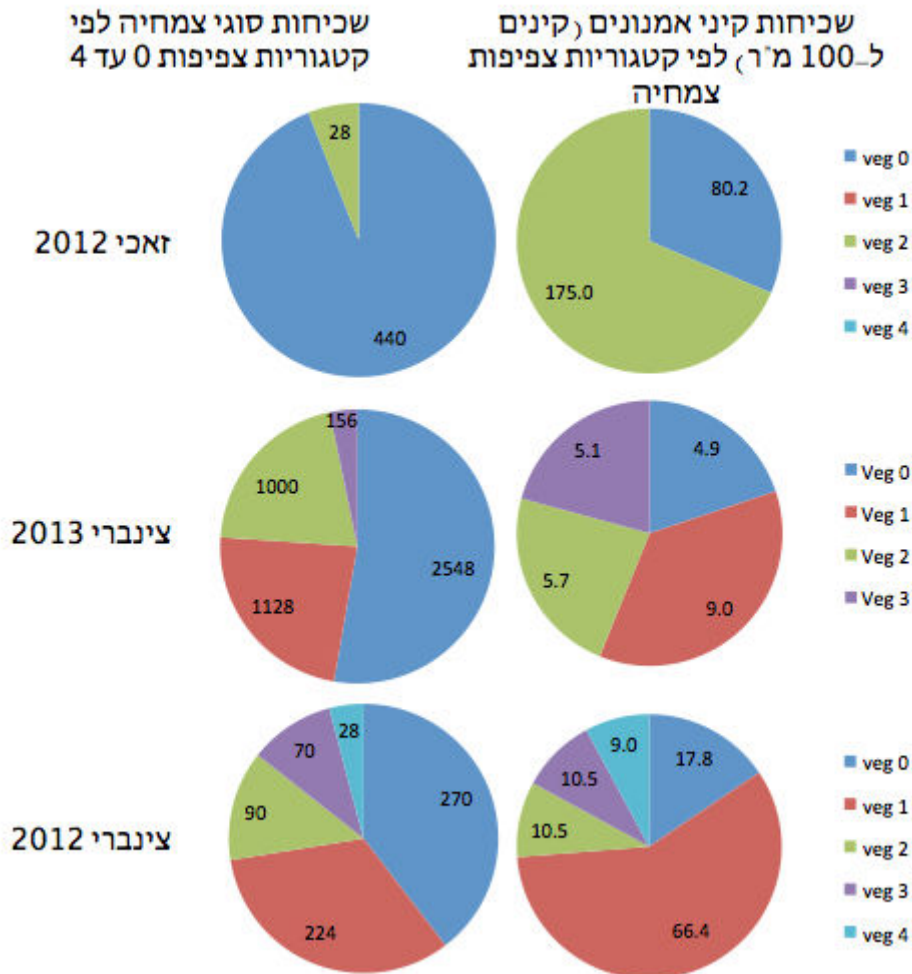
ממצא מעניין היה שבתחנות האגם צפיפות הקינים של אמנון מצוי הייתה נמוכה בתחילת הקיץ ועלתה מאד באוגוסט, ואילו בשפך הזאכי צפיפות הקינים הגבוהה של מין זה הייתה כבר ויוני ונמשכה לתוך אוגוסט. המהלך העונתי של צפיפות קיני האמנונים (מס' קינים ל-100 מ"ר) בארבע תחנות הדיגום מוצג באיור 120. השונות בעוצמת ההטלה בין האתרים, החתכים והתאריכים גבוהה מאד והיא מתבטאת בסטיות התקן הגדולות.



איור 120: המהלך העונתי של צפיפות קיני האמנונים (מס' קינים ל-100 מ"ר) בארבע תחנות הדיגום. הערכים המוצגים הם ממוצעים וסטיות תקן של צפיפות הקינים לאורך חתכים ניצבים. הקוים הירוקים מציגים את הנתונים של אמנון מצוי והקוים הכחולים של אמנון הירדן ואמנון הגליל. סטיות התקן מראות את השונות בצפיפות הקינים בין חתכים שבוצעו באותו תאריך דיגום ובאותה תחנה. סטיות התקן הגדולות נובעות משונות גדולה בפיזור המרחבי של הקינים.

קינן בסמיכות לצמחייה

באופן ברור האמנונים, ובפרט אמנון הגליל ואמנון ירדן, בחרו לקנן בינות צמחייה מוצפת או בקרבתה והעדיפו סביבה עם צמחייה על פני אזורים ללא צמחייה. באיור 121 מוצגות שלוש דוגמאות לכך. הדוגמא הבולטת ביותר היא מהזאכי בדיגום 2012. שם, מתוך 468 מ"ר ש נסקרו במהלך העונה לנוכחות קינים, 440 מ"ר היו ללא צמחיה בעוד רק 28 מ"ר (6%) היו מכוסים בצמחיה בצפיפות בינונית (veg 2). לא נמצאו באותה תחנה ועונה משבצות דיגום עם צמחייה מהקטגוריות האחרות. אבל באופן ברור, האמנונים בחרו את מעט המטרים הרבועים מכוסים הצמחייה לקינון: באזורים אלו צפיפות הקינים הממוצעת הייתה 175 קינים ל-100 מ"ר בעוד שבשטחים ללא צמחיה נמצאו רק 80 קינים ל-100 מ"ר. תמונה דומה, אם כי קצת פחות חדה נמצאה גם בחוף צינברי ב-2012 ושוב ב-2013. למרות שבשתי השנים השטח ללא צמחייה היה דומיננטי מבין הקטגוריות, עצמת קינון מירבית הייתה דוקא באזורים עם צמחייה דלילה (veg 1). תמונה דומה (לא מוצגת) נמצאה בזאכי ב-2013 ובתחנות נוספות שנדגמו ב-2012 בתדירות נמוכה מדי להצגה. במגדל לא היו כלל ריבועי דיגום ללא צמחיה (veg 0) לכן לא ניתן היה לעשות שם השוואה של העדפת צומח לקינון. עם זאת חשוב לציין שנצפתה שם פעילות הטלה אינטנסיבית – הכל בנוכחות צמחייה.



איור 121: השוואה בין השכיחות של סוג הצמחייה במשבצות הדיגום (לפי 4 קטגוריות) לבין צפיפות קיני האמנונים, בהתבסס על דיגום שבועי או אחת לשבועיים לאורך חתכים ניצבים לחוף בתחנות ועונות כמצויין באיור. משמאל: התפלגות שכיחות סוג הצמחייה. veg 0 = ללא צמחייה, veg 1 = צמחייה דלילה, veg 2 = צמחייה בינונית, veg 3 = צמחייה סבוכה, veg 4 = צמחייה שכוסחה בסירה הקוצרת. המספרים מציינים את השטח, במ"ר, עם צומח מאותה קטגוריה. מימין – צפיפות הקינים בכל קטגוריה. המספרים מציינים את המספר הממוצע של קינים ל-100 מ"ר מכל קטגוריה צומח.

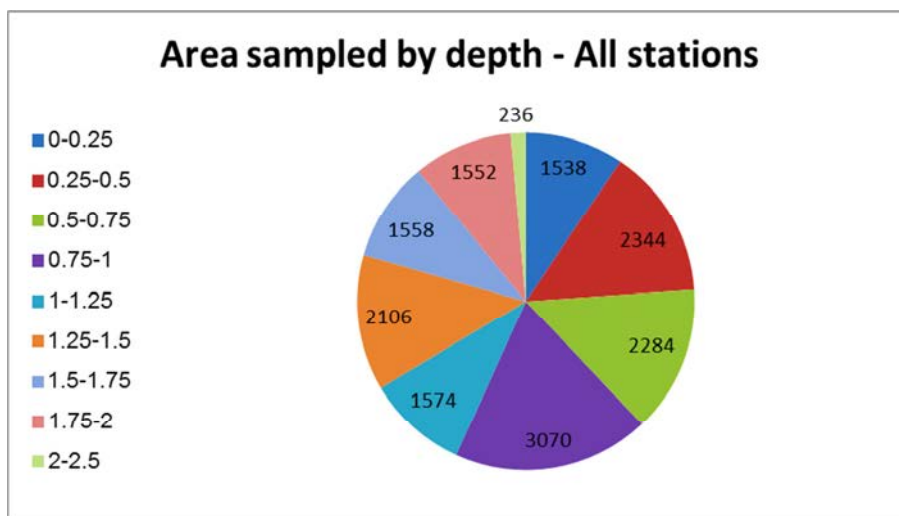
ממצא מעניין נוסף היה העדפה לקינון באיזורי צמחייה דלילה או בינונית על פני צמחייה סבוכה מאד.

עומק המים המועדף באתרי ההטלה

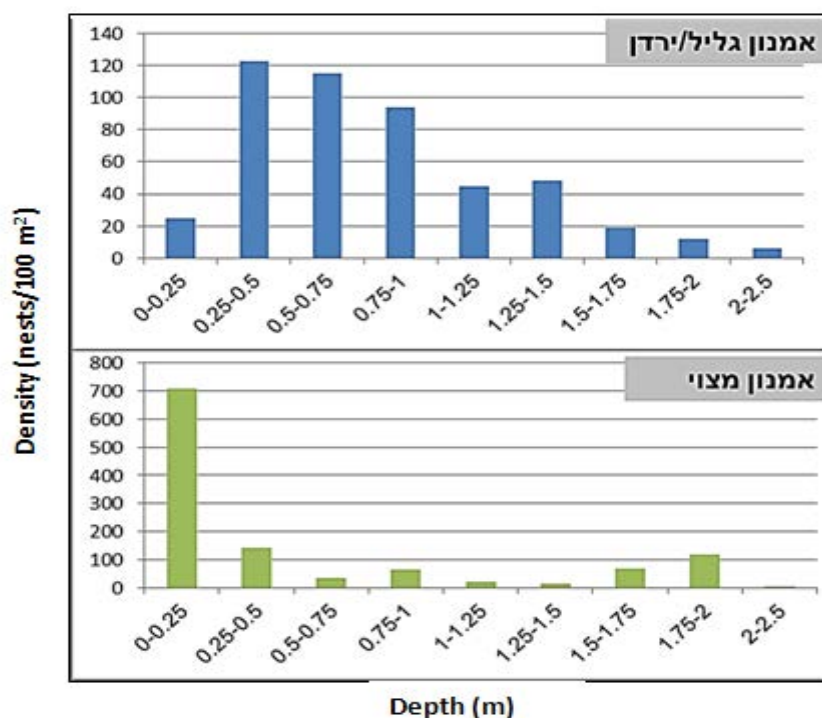
מים עמוקים: במטרה לבדוק האם האמנונים מטילים במים עמוקים נעשו 9 סקרים בצלילה לעומק של 3-10 מ' בתחנות הדיגום השונות במהלך מאי ויוני 2013. בכל סקר נסקרו כ-300 מ"ר של קרקעית אגם בעומקים שונים. באופן גורף, לא נמצאו קיני הטלה במים בעומקים אלו.

מים רדודים: במים רדודים מסתבר שהאמנונים מעדיפים מים בעומקים של 25-75 ס"מ לצורך קינון והטלה. בגלל הטופוגרפיה השונה בכל אתר חתך העומקים היה שונה. סה"כ התפלגות השטחים בין העומקים בשטח שנדגם מוצגת באיור 122. התפלגות צפיפות הקינים בעומקים השונים מוצגת באיור 123. מניתוח הנתונים שנאספו עד כה נראה שעומק ההטלה המועדף על מיני הדגים שנצפו הוא בטווח העומקים 25-100 ס"מ. העמודה המעידה על העדפה למים רדודים יותר מ-25 ס"מ היא תוצאה של קיום

אוכלוסייה מתרבה גדולה מאד במים הרדודים של נחל זאכי. בשאר אתרי הדיגום אמנון מצוי מעדיף את אותם עומקים כמו המינים האחרים.



איור 122: התפלגות השטחים בין העומקים בכלל השטח שנדגם בכל התחנות. המספרים בגזרות הצבועות הם השטח הכולל שנדגם בטווח העומקים הנתון.



איור 123: התפלגות צפיפות הקינים בעומקים השונים בכל תחנות הדיגום ב-2013.

מסקנות:

- רביית האמנונים התקיימה בכל היקף האגם, כפוף לזמינות נופים מתאימים, ולא דווקא בבטחה.
- שיא עונת הרבייה של אמנון הגליל ואמנון ירדן בשנת 2013 היה בין אמצע אפריל לאמצע יוני ואילו שיא הרבייה של האמנון המצוי היה חודשיים מאוחר יותר.

- יש מקום לשקול לשנות את תקנת הבטיחה כך שתכיל את חופי האגם כולו. התזמון של התקנה תואם לממצאים בשטח אבל ההגבלה לאזור הבטיחה אינה תואמת את הממצא המובהק שהאמנונים בכנרת מטילים סביב הכנרת כולה. אם יש רצון להגן על האוכלוסיה המתרבה, יש צורך להגן עליה בכל הכנרת.
- הפיזור המרחבי של הקינים היה הטרוגני מאד, גם בין תחנות דיגום, גם בין חתכים באותה תחנה, וגם בין משבצות לאורך אותו חתך. צפיפות הקינים ל-100 מ² נעה בין אפס להרבה עשרות קינים.
- אמנונים העדיפו באופן בולט לקנן בינות או בצמוד לצמחייה ונמנעו מלקנן באזורים חוליים חשופים לגמרי מכל מסתור. נצפתה גם העדפה לסבך דליל או בינוני בעוצמתו על פני צומח סבך מאד.

3.12 פיתוח שיטה לסימון דגי אמנון גליל לצורך מדידת הצלחת איכלוסם בכנרת

גיא רובינשטיין (אגף הדיג), איליה אוסטרובסקי ומנחם גורן (אונ' ת"א).

במימון משרד החקלאות

אמנון הגליל (*Sarotherodon galilaeus*) היינו דג בעל ערך כלכלי, אקולוגי, ותיירותי רב. אמנון הגליל מתרבה באופן טבעי בכנרת, אך גם מאוכלס לאגם עם דגיגים שהוטלו במכון רביה שנמצא בגינוסר. יש צורך לזהות מה תרומת האיכלוס לשלל הדיג ומה אחוז הדגים המאוכלסים שמגיע לבגרות.

מחקר זה עוסק ביישום שיטת סימון שתאפשר זיהוי של הדגים שמקורם מאכלוס בשלל הדיג. בחינת מידת ההתאמה של מספר שיטות סימון מקובלות במדע (סימון כימי, חיתוך סנפיר, תגים פנימיים, ותגים חיצוניים), מבחינת השפעתם על ביצועי הגדילה, אופן שימור הסימון, ועלויות כלכליות. העמדנו מספר ניסויים במטרה להתאים את פרוטוקולי העבודה לתנאי העבודה הנדרשים בתחנת גינוסר. בשנת המחקר 2013 העמדנו ניסוי גדילה למשך שנה לבחינת מידת יעילות הסימון.

מטרות המחקר הן למצוא את שיטות הסימון המתאימות ביותר לתנאי אכלוס אמנון הגליל בישראל, לבדוק את רמת השפעת הסמנים השונים על מדדי הגדילה, השרידות ורמת שימור הסמן לאורך זמן.

לאחר לימוד התנאים המקומיים וסקר ספרות נבחרו ארבע שיטות סימון שנבדקו במסגרת מחקר זה:

1. תג חיצוני מקודד באורך 20 מ"מ – שיטת סימון מקובלת לסימון פרטים המשוחררים לסביבה טבעית (נבדק בשנת המחקר הראשונה).
2. חיתוך שלושה קוצים ראשונים בסנפיר הגב – שיטה אשר לא מצריכה הוספת חומרים או התקנים זרים לדג.
3. סימון כימי בעזרת OTC (Oxytetracycline) – שיטה מקובלת לסימון מספר פרטים רב עם יכולת לסימון פרטים בשלבי גידול מוקדמים. יתרון של חומר זה על פני אחרים הינה העובדה שחומר זה מאושר לשימוש בדגים ע"י משרד הבריאות.
4. סימון פנימי עם CWT (Coded Wire Tag) – שיטת סימון עם עלויות נמוכות ופוטנציאל גבוה לזיהוי התג בעזרת גלאי מתכות מגנטי עם רגישות גבוהה. כל תג מקודד במספר סידורי רץ וניתן לזיהוי פרטני בהתבוננות במיקרוסקופ.

ב-2013 נבחנו שיטות הסימון 2-4 בצורה השוואתית אל מול ביקורת ללא סימון, לבחינת השפעה על ביצועי הגדילה. לכל אחת משיטות הסימון נערכו ניסויים משלימים בהתאם לצורך. הניסוי החל בתאריך 07/11/2012 – והסתיים בתאריך 19/06/2013. כל טיפול כלל ארבע חזרות. מערכת הגידול – 16 מכלים

בנפח של 1 קוב. מערכת פתוחה, מי כנרת, עם יכולת בקרת טמפרטורה. הזנה: מזון דגים צף המכיל 30% חלבון ו-3.5% שומן, המיוצר ע"י חברת צמח תערובות מזון. דגים - דגיגי אמנון גליל מלהקת הרבייה המשמשת לאכלוס הכנרת במשקל של 80 ג'. 50% זכרים, 50% נקבות, 50 דגים למיכל. איסוף נתונים – שקילות אחת לשלושה שבועות (בחודשי החורף בתדירות נמוכה יותר - מטעמי בריאות הדג). בעת השקילות הדגים טושטשו בעזרת שמן ציפורן, נשקלו שקילה יבשה (ללא מים) וניבדק אופן שימור הסמן.

שיטה 2: חיתוך סנפיר גב – חיתוך שלושה קוצים ראשונים בסנפיר הגב בוצע בעזרת מספרי ניתוח, בבסיס הקוצים. לאחר ביצוע החיתוך הדגים הועברו למיכל התאוששות עם אנטיביוטיקה מסוג OTC בריכוז של 10cc שמן ציפורן ל 200 ליטר מים למשך 10 שעות. נבחן זמן ההתחדשות של סנפיר הגב, ואחוז הדגים הניתנים לזיהוי כדגים מסומנים לאחר שהסנפיר הגיע ל 100% התחדשות באופן לא מושלם שמשאיר צלקת. המעקב אחר התחדשות הסנפיר התבצע בשני אופנים במקביל. הראשונה מדידה של אורך הרקמה המתחדשת ביחס לאורך המלא של דגים במשקל ממוצע זהה. לצורך כימות הנתונים ניבנתה סקלה כפי שמפורט בטבלה 17. המעקב הנוסף בדק אם אופן ההתחדשות כלל יצירת צלקת כתוצאה מאיחוי לא טבעי של הקוצים והרקמות המתחדשות. איחוי הקוץ נוצר לעיתים בזווית לא ישרה ביחס לבסיס (או שאיחוי הקוץ נוצר עם קימור בקוץ המתחדש).

טבלה 17 – סקלה לכימות רמת התחדשות סנפיר הגב לאחר חיתוך של שלושה קוצים ממנו. רמת האיחוי היא בהשוואה לקוץ הראשון שלא נחתך.

מס' סידורי	תיאור אופן האיחוי
1	אין כלל איחוי
2	התחלת איחוי, פחות מחצי קוץ הסנפיר לא קיים
3	איחוי של מעל לחצי קוץ הסנפיר הנחתך
4	איחוי כמעט מלא, ניתן לראות בשוליים קו לא טבעי של גדילה מתחדשת
5	איחוי מלא – לא ניתן להבחין שהדג עבר חיתוך

שיטה 3: סימון כימי בעזרת OTC (Oxytetracycline) – נערך סקר ספרות ונמצאו פרוטוקולי עבודה מתאימים. נבדקו אוטוליטים במיקרוסקופ פלורוסנטי במצב רגיל, לאחר שיוף אופקי ולאחר חיתוך ושיוף אנכי. בנוסף ניבדק חומר הגלם והאוטוליטים המסומנים בדיקת ייתכנות לזיהוי זריחה פלורוסנטית של החומר הכימי בעזרת מכשיר ספקטרופלורומטר.

שיטה 4: CWT – גודלו של התג המקודד היינו 1.1 מ"מ וקוטרו 0.25 מ"מ. התג ניתן לזיהוי בעזרת גלאי מתכות מגנטי עם רגישות גבוהה, כאשר כל תג מקודד וניתן לזיהוי פרטני בהתבוננות במיקרוסקופ. אזור החדרת התג שנבחר הינו חוטם הדג. השיקול המוביל לבחירה זה הינה שזהו האזור עם הסיכוי הנמוך ביותר להיאכל ע"י האדם. לאחר ניסוי הגדילה הראשון נערך ניסוי המשך שבחן סימון בארבעה אזורים שונים. משך הניסוי: אוקטובר 2013 – אוקטובר 2014. מספר דגים - 20 למיכל, ארבע חזרות לכל טיפול (סה"כ 320 דגים). הזנה – על פי דרישה, מזון 2 מ"מ צף, מעבר למזון 4 מ"מ עם הגעה למשקל ממוצע של 60 ג'. טמפ' – סביבה, מי כנרת.

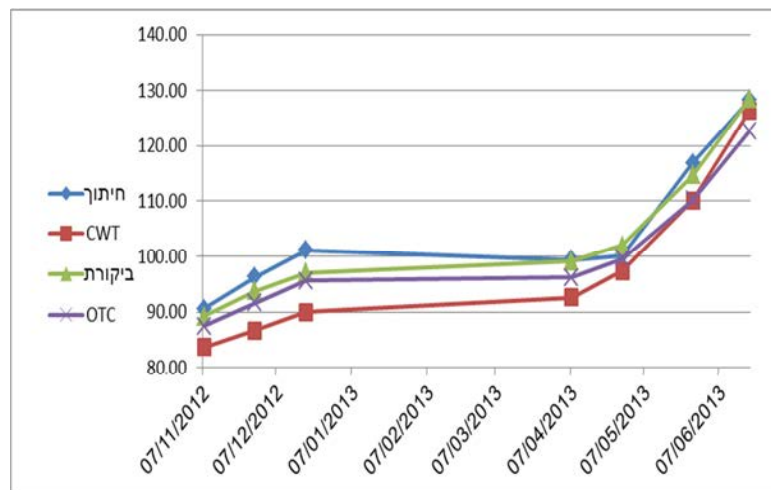
תוצאות:

בתנאי הניסוי נמצא ששלושת שיטות הסימון הנבדקות לא ייצרו השפעה שלילית על ביצועי הגדילה של הדגים (טבלה 18).

טבלה 18: ביצועי גדילה, נצילות מזון ושרידות.

מדד	א - חיתוך סנפיר גב	ב - תג פנימי CWT	ג - ביקורת ללא סימון	ד - סימון OTC כימי
מספר דגים במיכל	50	50	50	50
מספר חזרות לטיפול*	4	4	4	4
משקל ממוצע באכלוס (ג')	90.5	83.6	89.2	87.4
משקל ממוצע בגמר (ג')	128.2	126.3	128.4	122.6
משקל מוסף במהלך הניסוי (ג')	37.67	42.64	39.24	35.19
ימי גידול	224	224	224	224
תוספת משקל יומית (ג')	0.17	0.19	0.18	0.16
SGR (%)	0.16	0.18	0.16	0.15
צריכת מזון מצטברת (ק"ג)	4.63	4.16	4.25	4.32
* FCR	3.12	4.33	3.24	3.42
שרידות (%)	94	75	92	93

ביצועי הגדילה במהלך הניסויים השונים היו בהתאם לטמפ', נצפה גידול בחודש הראשון בו הטמפ' הממוצעת נעה בין 27°C ל 22°C. בהתאם, לא הייתה תוספת במשקל עם ירידת הטמפ' מתחת ל 20°C (איור 124).



איור 124 - ביצועי הגדילה לאורך תקופת הניסוי. ציר Y מציין את משקל הדג הממוצע, בגרמים.

חיתוך סנפיר - לאחר 224 יום נמצא ש 73% מהדגים לא עברו איחוי מלא של סנפיר הגב והיו ניתנים לזיהוי על פי פרמטר זה (טבלה 19). ב 48% מכלל הדגים נמצאה צלקת באזור החיתוך (חלקם עברו איחוי מלא וחלקם טרם) אשר אפשרה זיהוי על פי פרמטר זה (טבלה 20). המשך גידול בוצע עם 50 דגים למשך 119 ימים נוספים (מיכל 30) עד לקבלת איחוי מלא. לאחר 343 ימי גידול נמצא ש 100% מהדגים הגיעו לאיחוי מלא של הסנפיר החתוך (טבלה 21). בהשוואה בין קצב ההתחדשות לטמפרטורה נמצא שקצב ההתחדשות מתגבר בהתאם לקצב הגדילה (בטמפרטורות גבוהות). הצלקת נוצרת בתקופת ההתחדשות הראשונה, אין היווצרות צלקת חדשה בדגים שעוברים איחוי מאוחר. בשיטת החיתוך שנקטנו (שהיא לא עדינה במיוחד) לא היתה תמותה, לא היתה פגיעה בביצועי הגדילה ונמצאה יכולת זיהוי ב 46% מהדגים. ניתן להמשיך ולבדוק אם שיטות חיתוך "אלימות" יותר נותנות אחוזים טובים יותר ללא פגיעה בביצועי הגדילה.

% הדגים הניתנים לזיהוי על בסיס צלקת	סה"כ דגים עם צלקת	סה"כ דגים	5	4	3	2	1	ללא צלקת	נוכחות צלקת לפי רמות האיתוי מיכל
44%	20	45	8	6	6	0	0	25	25
47%	23	49	6	4	8	5	0	26	30
42%	20	48	2	6	9	3	0	28	34
59%	27	46	11	5	9	2	0	19	37
48%	90	188	27	21	32	10	0	98	סה"כ

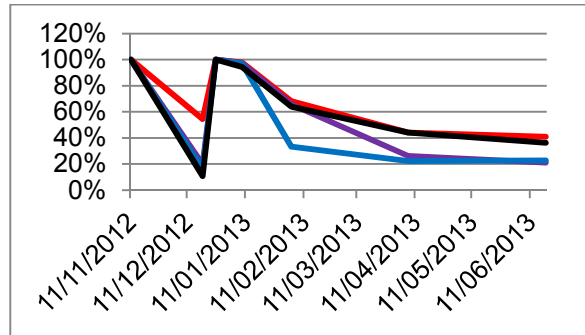
רמת האיתוי מיכל	1	2	3	4	5	סה"כ דגים
25	0	12	11	7	15	45
30	0	12	20	9	8	49
34	0	10	20	10	8	48
37	1	6	18	6	15	46
סה"כ	2	44	68	33	41	188

טבלה 21: יכולת הזיהוי עם המשך הגידול עד לקבלת איחוי מלא. המספרים מציינים מס' דגים בכל קטגוריה.

מספר דגים עם צלקת	סה"כ דגים עם מלא איחוי	איחוי מלא עם צלקת	איחוי מלא ללא צלקת	איחוי לא מלא עם צלקת	איחוי לא מלא ללא צלקת	חלוקה לפי רמת האיתוי + נוכחות צלקת	ימים מחיתוך
23	41	18	23	5	3	259	
23	46	20	26	3	0	300	
23	49	23	26	0	0	343	

OTC – בעבודה של סימון בטבילה ב OTC מצאנו שהנושא מורכב מאוד, ויש חשיבות רבה מאוד לפרטים המשתנים בפרוטוקולים השונים ושינויים סביבתיים כאלה ואחרים משפיעים של הצלחת השיטה. ערכנו התאמות וחידדנו את פרוטוקולי העבודה לתנאים שלנו אך עד כה לא הצלחנו לזהות את הסימון של החומר הפלורוסנטי באוטוליט של הדג.

CWT – הדגים סומנו באמצעות מחט בצורה ידנית באזור החוטם. כל דג שסומן נבדק בעזרת הגלאי לנוכחות הסמן לאחר החדרתו. 30 יום לאחר סימון הדגים נמצא התג רק ב 30% מהדגים (איור 125). הסבר לאחוז הנמוך של הדגים אשר הכילו את הסמן יכול להיות באופן החדרת הסמן, שכן באזור החוטם ישנה רקמה בשרית קטנה יחסית בין חללי הסינוסים, החדרה לא מדויקת תוביל לפליטת התג ע"י גוף הדג. לצורך חידוד הגדרת אזור יעד החדרת הסמן ניתחנו דגים וקבענו את זווית ועומק החדרת המחט בעת הסימון. ערכנו סימון חוזר לאותם דגים שלא נמצא בהם הסמן. הגדילה בניסוי הייתה טובה (ממשקל ממוצע התחלתי של 83.6 עד משקל של 126.3 בפרוק), ומצאנו דעיכה עם הזמן בנוכחות הסמן (איור 125) ולאחר 195 ימים נמצא הסמן רק ב 35% מהדגים.



איור 125: אחוז הדגים המסומנים ב-CWT לאורך הניסוי ב-4 חזרות שונות לפי תאריכים וצבעים.

בשלב הבא באנו לבדוק אם סימון באזורים אחרים פחות רגישים יניב תוצאות טובות יותר. בניסוי זה בחנו סימון בארבעה אזורים שונים כאשר כל ארבעת האזורים הנבדקים בעלי ייתכנות לסימון עתידי בעזרת המכונה האוטומטית: חוטם (חזרה על אותו אזור מהניסוי הקודם), בסיס סנפיר גב קדמי, בסיס סנפיר גב אחורי, בסיס סנפיר שת. הדגים נבדקו לנוכחות הסמן אחת לשבועיים ולאחר 92 יום הסמן נמצא ב 100% מהדגים. נרשמו קצבי גדילה סבירים בהתאם לטמפ' המים (טבלה 22), עם כי לא מספיק משמעותיים בכדי לבחון את הצלחת הישארות התג בדג עם גדילתו. נכון ליום כתיבת הדוח הניסוי נמשך, בשל העובדה שהדגים נשמרים בטמפ' הטבעית לא ניתן מטעמי בריאות הדג לבדוק אותם בתקופת החורף, עם העלייה בטמפ' באביב נחזור ונדוק את נוכחות הסמן בדגים. הניסוי עתיד להימשך עד לאוקטובר 2014.

טבלה 22: ביצועי גדילה, נצילות מזון ושרידות בניסוי סימון בעזרת CWT באזורים שונים בגוף הדג

מדד	א – חוטם	ב – בסיס סנפיר גב קידמי	ג – בסיס סנפיר גב אחורי	ד – בסיס סנפיר שת
מספר דגים במיכל	20	20	20	20
מספר חזרות לטיפול*	4	4	4	4
משקל ממוצע באכלוס (ג')	17.95	17.05	15.9	16.01
משקל ממוצע בשקילה אחרונה 10.12.2013 (ג')	42.99	45.16	45.67	42.25
משקל מוסף במהלך הניסוי (ג')	37.67	42.64	39.24	35.19
ימי גידול	92	92	92	92
שרידות (%)	94	95	99	99
נוכחות הסמן (%)	100	100	100	100

3.13 סקר דגים באזורי הצמחייה בליטורל

תמר זהרי, דייב קמינגס, בשת"פ עם מנחם גורן ואביטל גזית (האוני' העברית), גיא רובינשטיין ותמיר אופק (מאגף הדייג)

במימון משרד החקלאות

לצמחייה בליטורל תפקיד מפתח במחזור החיים של כל דגי הכנרת. דגים כמו שלושת מיני האמנונים הגדולים (אמנון גליל, אירדן וא. מצוי) זקוקים לליטורל לצורך רבייה ומבלים בו את תקופת צעירותם. חלקם מבלים פרק נכבד מחייהם בחלקים אחרים של האגם בחיפוש מזון. צמחיית חוף מתפתחת בחופים חשופים בכנרת, ונעלמת מהם כשהם מוצפים. עוצמת התפתחות הצמחייה מושפעת מעוצמת תנודות

המפלס. לצמחייה זו תפקיד חשוב כמקום להטלה של דגים (בעיקר לאמנונים) וכמקום מסתור וגידול לדגיגים. כאשר לאחר רצף של שנים שחונות והתפתחות צמחיה עשירה על הקרקע שנחשפה במפלסים נמוכים יש עליה ניכרת במפלס המים בכנרת, באופן זמני בחלק מהאזורים המוצפים מתפתחים מטרדי ריח כתוצאה מתהליכי ריקבון של הצמחייה. כיוון שלליטורל הצמחי תפקיד חיוני במחזור החיים של רוב מיני אמנוני הכנרת מחד, והיותם של חלק ממקומות אלה מטרד לציבור מאידך, יש צורך בהערכה עדכנית וכמותית של חשיבות אזורי הצמחייה להמשך הקיום התקין של אוכלוסיות מיני הדגים השונים ובעיקר האמנונים. מחקר זה בא לאפשר שיקול על בסיס מדעי של האמצעים לטיפול במטרדים הנובעים מהתפתחות סבך צמחייה עבות במפלסים נמוכים ומתהליכי הריקבון של הצמחייה החופית לאחר הצפתה עם עליית המפלס.

מטרות המחקר הן:

- לאפיין את חברות הדגים באזורי הצמחייה לעומת איזורים ללא צמחיה בעונות השנה השונות ובמפלסי מים שונים.
- להגדיר את הקשר בין אופי הצמחייה (הרכב מינים, אחוז כיסוי) לבין הרכב חברת ואוכלוסיות הדגים (קבוצות גודל, הרכב מינים) באיזורים הנבדקים.
- להעריך את חשיבות הצמחייה כבית גידול לדגי אמנונים בוגרים ודגיגים צעירים.

אתרי הדיגום: לאחר סקר מקדים, נבחרו ארבעה אתרי מחקר על פי הרכב התשתית/תכסית והמיקום הגיאוגרפי במזרח או מערב הכנרת: שיזף, צינברי, שפך השפמנון, תחנת גינוסר. נערך תיעוד סטנדרטי, כולל צילומים, של אופי בית הגידול באתרים השונים על פי משתנים נבחרים (טמפ' המים, עומק המים, אופי התכסית האביוטית, נוכחות צומח).

הדיגום נעשה על ידי סגירת המקטע הנבדק ברשת צפופה (גודל עין כ 3 מ"מ) והוצאת הדגים על ידי חיטום באלקטרושוקר ייעודי (איור 126). סגירת המקטע נעשתה בצורה שתימנע בריחת דגים במהלך פריסת הרשת והידוקה לחסימת נתיבי מילוט (איור 127). כל יחידת דיגום כללה שני חיטומים של חצי שעה כל אחד עם הפסקה של חצי שעה בין החיטומים. כל אחד מהדגים שנאספו הוגדר, נמדד ונשקל. דגים שלא שימשו לבדיקות נוספות הוחזרו חיים לכנרת. ביום דיגום ניתן היה לבצע יחידת דיגום אחת, או שתי יח' דיגום בתנאי שהן בסמיכות גיאוגרפית כלומר שני חיטומים במקום עם צמחייה ושני חיטומים נוספים במקום סמוך ללא צמחייה.



איור 126: הדגום החשמלי (אלקטרושוקר) ואמנונים שנלכדו לאחר התאוששות (צילומים מ. גורן).



איור 127: שטחי דיגום עם ובלי צמחיה (צילומים ד. קמינגס).

רשימת התחנות והתאריכים שבהם התקיים הדיגום החשמלי מוצגת בטבלה 23. הדיגום נעשה על ידי ד' קמינגס, ג' רובינשטיין ות' אופק. בדיגום של ה-6 במרץ השתתפו גם ת' זהרי ומ' גורן. הדיגום תוכנן להתקיים בכל אתר שש פעמים בשנה (ארבע מתוכם בקיץ ובתחילת הסתיו), אך לאחר 8 ימי דיגום, ביולי 2013 השימוש באלקטרושוקר נאסר זמנית בגלל סיבות שאינן תלויות בחוקרים והעבודה נעצרה. איסור זה נמשך עד למועד כתיבת דוח זה בינואר 2014, אנו מקווים שניתן יהיה לחדש בקרוב את השימוש באלקטרושוקר.

טבלה 23: רשימת התחנות והתאריכים שבהם התקיים הדיגום החשמלי.

תאריך	אתר	תקציר העבודה
1. יום שני 28 ינואר 2013	אימק"א	ניסוי כלים ראשון למכשיר. עבודה מסירה. ללא סגירת רשת. הדגים נתפסו באזור הנביעה החמה של אימק"א.
2. יום רביעי 6 מרץ 2013	שיזף	עבודה ראשונה עם רשת מהחוף. קצה דרומי של שיזף. רשת אחת 150 מ"ר באזור "חשוף". רשת שנייה 100 מ"ר בסבך קנה.
3. יום שני 8 אפריל 2013	צינברי	עבודה עם רשת מהחוף. חוף רחצה צינברי. רשת אחת 150 מ"ר באזור חשוף. לא נעשתה רשת בצמחייה בגלל מפלס.
4. יום שני 29 אפריל 2013	שפך השפמנון	עבודה עם רשת מהחוף. אזור ניסוי כיסוח אשלים רט"ג. רשת אחת 150 מ"ר באזור "חשוף". רשת שנייה 150 מ"ר בסבך קנה.
5. יום שני 20 מאי 2013	תחנת גינוסר	עבודה עם רשת מהחוף. מול תחנת אגף הדיג. רשת אחת בסבך קנה 150 מ"ר. רשת שנייה בסבך אשל 100 מ"ר.
6. יום שישי 14 יוני 2013	שיזף	עבודה עם רשת מהחוף. פינה צפונית של שיזף. רשת אחת בסגירה מעגלית סביב עומד אשל וקנה 72 מ"ר. רשת שנייה באזור חשוף 150 מ"ר.
7. יום שני 17 יוני 2013	שפך השפמנון	עבודה עם רשת מהחוף. אזור ניסוי כיסוח אשלים רט"ג. רשת אחת 150 מ"ר באזור "חשוף". רשת שנייה 150 מ"ר בסבך קנה.
8. יום שני 01 יולי 2013	צינברי	עבודה עם רשת מהחוף. חוף רחצה צינברי. רשת אחת 150 מ"ר באזור חשוף. רשת שנייה באזור עם צמחייה 150 מ"ר.

במהלך 8 הדיגומים נדגמו בסה"כ 950 דגים הנמנים על 14 מינים. נעשתה השוואה בשכיחות ההופעה והגדלים של הדגים בבתי גידול חשופים הסמוכים לצמחיה בבתי גידול עם צמחיה צפופה. התוצאות מוצגות בטבלה 24. מהטבלה ניתן לכאורה ללמוד על הבדלים בין שני סוגי בתי הגידול הן לגבי צפיפות הדגים והן לגבי גודלם הממוצע, אך כיוון שמדובר רק בחלק מהעבודה שהופסקה באמצע, נשאר את מלוא ניתוח הנתונים והסקת המסקנות לסיומם של הדיגומים וקבלת כל התוצאות.

טבלה 24. השוואה נוכחות הדגים ומשקלם בין אזורים עם צמחיה לאזורים חשופים.

Species	ללא צמחיה			עם צמחיה		
	No.	Avg Weight	SD	No.	Avg Weight	SD
<i>Astatotilapia flavijosephii</i>	5	5.84	2.15	1		
<i>Carasibarbus canis</i>	13	8.41	4.68	2	10.10	0.10
<i>Cyprinus carpio</i>	0			1	682.50	
<i>Clarias gariepinus</i>	1	1054		0		
<i>Gambusia affinis</i>	9	0.41	0.18	22	0.52	0.34
<i>Garra rufa</i>	2	2.31	0.02	0		
<i>Mirogrex terrasanctae</i>	2	1.14	0.11	27	0.27	0.11
<i>Mugil sp.</i>	15	0.55	58.04	2	3.55	0.45
<i>Oxynoemacheilus tigris</i>	0			1	1.00	
<i>Oreochromis aureus</i>	21	56.76	0.23	18	108.68	76.24
<i>Salaria fluviatillis</i>	78	0.19	40.25	8	0.22	0.22
<i>Sarotherodon galilaeus</i>	118	19.73	13.22	109	85.49	109.85
<i>Tilapia zilli</i>	288	7.05	51.59	206	14.49	19.31
<i>Tristramela simonis</i>	0			1	19.60	
Total	552	12.28	51.59	398	41.84	84.85

3.14 פיתוח ויישום של מכשיר חדש להערכת ייצור ראשוני

ורנר אקרט, אייל קורצבאום, יוסף יעקבי, יאן קוהלר ופרנסיסקה לאינרט (מכון לייבניץ לביולוגיה של מים מתוקים, ברלין, גרמניה)

במימון MOS-BMBF

משנות ה-80 של המאה ה-20 החלו להיכנס לשימוש שיטות להערכת הרכב האוכלוסייה, הביומאסה והיצרנות הראשונית, על ידי מכשור המנצל את תופעת הפלואורסצנציה הנפלטת מהפיטופלנקטון. הפוטנציאל של שימוש בפלואורסצנציה לחקר פיטופלנקטון הוא רחב מאוד. בין השיטות הפלואורסנטיות המקובלות ניתן למצוא שיטות להפרדה בין חטיבות הפיטופלנקטון במיקרוסקופ פלואורסנטי, שיטות להערכת ריכוזי כלורופיל הנמדדים בעזרת פלורומטר (מכשיר המודד רמת פלואורסנציה) *in situ* ושיטות חישה מרחוק באמצעות לוויין. היתרונות הנמנים עם המעבר לשימוש בשיטה המנצלת את תופעת הפלואורסצנציה כוללים את העובדה כי המדידה יכולה להתבצע *in situ* בתנאים הטבעיים של בית הגידול, ואין צורך בהעברת הדוגמא למעבדה והכנתה לפני המדידה. המדידה הינה מהירה ועל כן ניתן לעשות מדידות רבות בזמן קצר, ובנוסף לכך ישנם מכשירים המיועדים לעבודה רציפה ולאורך זמן, כך שניתן לנטר אוכלוסיות פיטופלנקטון במקווי מים לאורך היממה ולאורך השנה.

במחקר הנוכחי נעשה שימוש בשיטה אשר כמעט ולא נחקרה ביחס לשיטות האחרות למרות הפוטנציאל הגלום בה. שיטה זו עושה שימוש בתופעה הנקראת פלואורסנציה דחוייה (Delayed Fluorescence). עיקרון שיטת מדידת הפלואורסצנציה הדחוייה מתבסס על מדידת התופעה של פליטת פוטונים מתאי הפיטופלנקטון המתרחשת לאחר העברת הדוגמא מאור לחושך. פליטת הפוטונים מתרחשת בחושך למשך עד כדקה ואף יותר ולכן נקראת התופעה פלואורסצנציה דחוייה (בניגוד לפלואורסנציה ישירה שנפלטת תוך ננו ומיקרושניות מרגע ההארה). הפלואורסנציה הדחוייה היא למעשה פליטת אור מהמערכת

הפוטוסינטטית לאחר העברת האורגניזם הפוטוסינטטי מאור לחושך. בהנחה, על פי מחקרים בנושא, שרמת הפליטה של פלואורסנציה דחוויה מושפעת מרמת הפוטוסינתזה שביצע האורגניזם ברגע העברתו לחושך מאפשר, אם כן, הצצה אל הפעילות הפוטוסינטטית בו.

בניסויים שנערכו השתמשנו במכשיר פ"ד בגירסה המעבדתית שלו, במקביל לניסויים שנעשו במכשיר זהה ע"י השותפים בגרמניה. בניסויים שלנו השווינו את קינטיקת הפ"ד של פיטופלנקטון למדדי פעילות פוטוסינטטית שנמדדים שגרתית – קצב קליטת פחמן רדיואקטיבי, קצב ייצור חמצן והשתנות פלואורסנציה (PAM) בהשראת אור טבעי. ההשוואה של מדדי הפלואורסנציה השונים מראה קווי דמיון בהשתנות הימתית של הפ"ד ושני המדדים של פלואורסנציה.

בנוסף, במהלך המחקר נעשה שימוש במכשיר העוקב אחר השינויים בפליטת הפלואורסנציה הדחוויה אשר פותח במקור כמכשיר מעבדתי שמטרתו הייתה לקבוע את ריכוזו של הכלורופיל הפעיל הכללי באוכלוסייה ולקבוע את הרכב האוכלוסייה על פי הקבוצות השונות המאופיינות בפיגמנטים ייחודיים לכל קבוצה באוכלוסייה הנדגמת. עם זאת, במחקר הנוכחי מטרתנו היא לתכנן, לבנות ולכיל מכשיר חדש אשר מיועד לרדת לעומק עמודת המים מסיפון ספינה המחקר. במסגרת המחקר הנוכחי, בשיתוף פעולה עם חוקרים מגרמניה, פותח אב טיפוס של מכשיר אשר מצויד במד אור ומד עומק, וביכולתו למדוד את רמת הפלואורסנציה הדחוויה של דוגמאות בכל עומק רצוי על פי שליטה מחשב נייד ותוכנה אשר נכתבה כחלק מהפרויקט. המטרה העיקרית של המחקר, אם כן, היא לרתום את תופעת הפלואורסנציה הדחוויה לשם מדידה של הפעילות הפוטוסינטטית בעומק עמודת המים בזמן אמת.

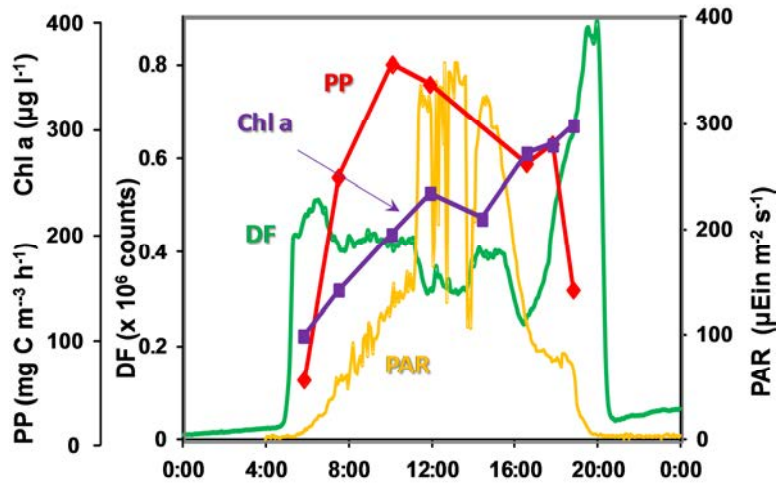
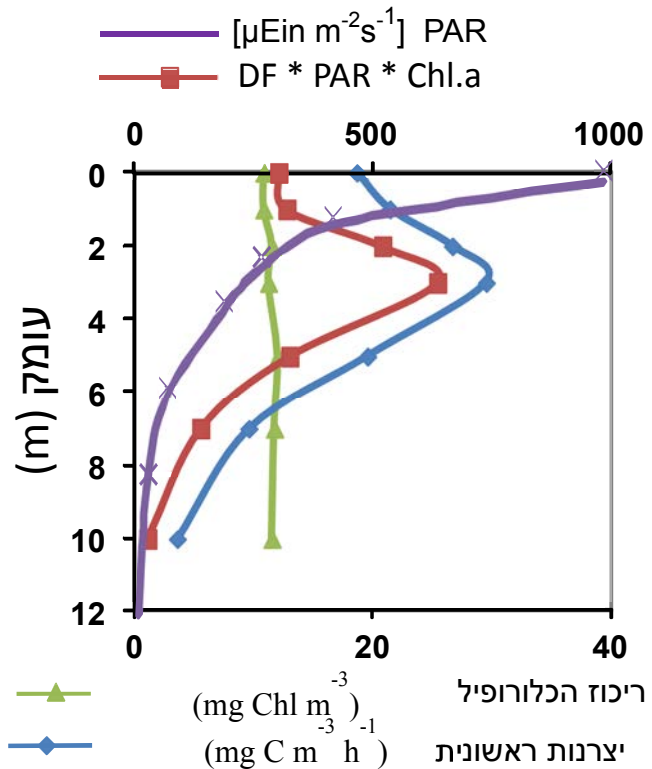
רמת הפלואורסנציה הדחוויה יכולה להמדד רק בחושך מוחלט ולשם כך מערכת משאבות וצינורות תוכננה לשאיבת דוגמא היישר מהמים אל תא חושך בתוך המכשיר. מדידת הפלואורסנציה מתבצעת על ידי פוטומולטיפלייר (אמצעי הקולט פוטונים ומייצר זרם חשמלי הניתן למדידה) בתוך התא חושך ורמת הפלואורסנציה נרשמת בקובץ התוכנה ביחד עם זמן המדידה, כמות האור ועומק המדידה (איור 128).

איור 128: אב-טיפוס של מערכת פלואורסנציה דחוויה שתוכנן ונבנה במהלך המחקר על פני סיפון ספינת המחקר של המעבדה לחקר הכנרת. המכשיר מכיל מד אור ומד עומק בחלקו העליון ומערכת משאבות וצינורות אשר דוגמות על פי פקודת מחשב דוגמת מים ובהמשך מודדת את רמת הפלואורסנציה הדחוויה הנפלטת מאוכלוסיית הפיטופלנקטון אשר ביצעה פוטוסינתזה עד לרגע שאיבתה אל תוך המכשיר. רמת הפלואורסנציה הדחוויה שאוכלוסיה זו פולטת מאפשרת את כימות רמת הפוטוסינתזה שאוכלוסיה זו ביצעה בתנאים בהם היא נמצאת.



בימים אלו נמדדות מדידות רבות בתחנה A במרכז האגם של רמת הפלואורסנציה הדחוויה בעומקים שונים במקביל למדידות היצרנות הראשונית בשיטת הפחמן המסומן ^{14}C (איור 129). ניסויים מעבדתיים נעשים על מנת לכיל את המכשיר ולבדוק את יכולותיו בהערכת הפעילות הפוטוסינטטית של אוכלוסיות פיטופלנקטון (איור 130). התוצאות שמתקבלות הינן מבטיחות ונעשים כיום כיולים אל מול שיטות אחרות על מנת לברר האם ישנה יכולת לאב הטיפוס של המכשיר החדש לחזות את מידת היצרנות הראשונית בעומקים השונים של עמודת המים באגם הכנרת ובאגם נוסף בגרמניה בזמן אמת ו-*in situ*.

איור 129: פרופיל עומק, 25.8.13 9:00-12:00
 בתחנה A במרכז הכנרת. הקו הסגול, עוצמת האור (PAR) שנמדד בכל עומק, מראה ירידה אופיינית בעוצמת האור עם ההעמקה בעמודת המים. הקו הירוק, ריכוז הביומסה של אוכלוסיית הפיטופלנקטון (כפי שנמדדה על ידי מיצוי כלורופיל a), מראה כי ריכוז האוכלוסייה היה אחיד למדי בכל העומקים שנבדקו. הקו הכחול, רמת היצרנות הראשונית כפי שזו נמדדה על ידי פחמן מסומן רדיואקטיבית, מראה ערכים אופייניים לכנרת בתקופה זו של השנה בעומקים השונים. (ישנו מקסימום של יצרנות ראשונית בעומק מטרים בודדים כאשר מעליו ישנה ירידה עקב חשיפה לאור חזק מידי ובעומק עמוק יותר ישנה ירידה כתוצאה של עוצמות אור הולכות ויורדות עם העומק. הקו האדום מייצג חישוב שביצענו על פי הרמה של הפלואורסנציה הדחוייה מוכפלת בכמות האור ובריכוז הכלורופיל הפעיל (אשר נמדד אף הוא במכשיר - אך ניתן גם להשתמש בריכוז הכלורופיל שנמדד במיצוי במעבדה) אשר נמדדים בכל עומק. כפי שניתן להתרשם הפרופיל הנמדד על ידי המכשיר החדש שפותח במחקר דומה מאוד לפרופיל היצרנות הראשונית.



איור 130: פרופיל יממתי (מדידות של מספר דקות לאורך יממה שלמה) המתאר השתנות מספר מדדים כתוצאה משינויים באור השמש בתרביית של המיקרואצה החד תאית *Chlorella*.

הקו הצהוב (מסומן ב-PAR) מתאר את השתנות עוצמת אור השמש לאורך היממה. ניתן לראות את העלייה בעוצמה עם הזריחה ב-5:00 בבוקר, הגעה למקסימום בצהריים ולאחר מכן ירידה עד שקיעת השמש ב-20:00 בערב. השינויים בעוצמת האור במהלך הצהריים מקורם בעננות חלקית. השינויים בעוצמת האור משפיעים על הפעילות הפוטוסינטטית כפי שזו נראית בעוצמת הפלואורסנציה הדחוייה (DF-הקו הירוק) כפי שנמדד כל 5 דקות על ידי האב טיפוס של המכשיר שפותח במהלך המחקר. קו הסגול (Chl a) המייצג את ריכוז הביומסה של אוכלוסיית הפיטופלנקטון (כפי שנמדדה על ידי מיצוי כלורופיל a) מראה כי האוכלוסייה הייתה חיונית ביותר וגדלה היטב בזמן הניסוי. את הפעילות הפוטוסינטטית של האוכלוסייה ניתן לראות בקו האדום (PP) אשר מתאר את רמת היצרנות הראשונית כפי שזו נמדדה בשיטת ה- ^{14}C .

היצרנות הראשונית מראה ערכים אופייניים לניסוי ימתי שכזה (היצרנות הראשונית עולה עם העלייה בעוצמת האור עד למקסימום מסוים כאשר עודף אור גורם לירידה ביצרנות הראשונית עקב חשיפת תאי האצה לאור חזק מידי כפי שניתן לראות בין השעות 11:00 ל-16:00).

בהמשך המחקר אנו ניצור אלגוריתם אשר יעשה שימוש באינפורמציה המתקבלת ממדידות הפלואורסנציה הדחוויה בעזרת המכשיר החדש והתנאים הסביבתיים כגון עוצמת האור בכל עומק, על מנת למדוד את קצב היצרנות הראשונית של אוכלוסיות הפיטופלנקטון בעומקים השונים של האגם.

בהמשך ניתן יהיה להשתמש במכשיר העובד על עקרונות דומים לביצוע עבודה עצמאית (להיות מותקן למשל על גבי רפסודה) לאורך זמן רב ולמדידות כל מספר דקות, כך שניתן יהיה להשתמש בו ככלי רב עוצמה לצורך ניטור ומחקר של הפעילות הפוטוסינטטית של אוכלוסיות הפיטופלנקטון בכנרת ובבתי הגידול אחרים כגון אגמים, נחלים, מאגרי מים ואוקיינוסים.

3.15 שימוש במודל אקולוגי-כלכלי לשיפור ממשק הדיג

איל אופיר, גדעון גל בשיתוף דפנה דיסני ומנחם גורן (אונ' תל-אביב) וג'ימי שפירו (אגף הדיג).

במימון משרד החקלאות

הדיג בכנרת מתאפיין, בשנים האחרונות, בחוסר יציבות קיצונית ובהפחתה משמעותית של כמות השלל בעיקר של המינים בעלי הערך המסחרי הגבוה ביותר, כגון אמנון הגליל, הכסיף, והבורי, עד כדי אפשרות היעלמותם מסל הדיג בכנרת. על פי נתוני אגף הדיג חלה ירידה בשלל הדיג הכולל מ-2163 טון בשנת 1998 לכמות של 840 טון בשנת 2007. בשנת 2008 הגיע שלל אמנון הגליל, הדג בעל הערך המסחרי הגבוה ביותר, ל-8 טון בלבד, ירידה של 98% ב-10 שנים וב-90% ביחס לשלל שנרשם רק ב-2004 (נתוני אגף הדיג, ועדת אכלוס כנרת 2009.5.7).

ניהול דיג מסחרי הוא סוגיה מורכבת איתה מנסות להתמודד מדינות רבות בעולם ואף גופים בין-לאומיים כמו ה-FAO. סיכום נתוני דיג באגמים ובמקווי מים רבים מצביע על כך שאוכלוסיות הדגים במקומות אלו סובלות מדיג יתר ונמצאות בסכנה אף יותר מאשר אוכלוסיות הדגים באוקיינוסים. דיג היתר גורם לירידה בגודל ובמספר הדגים הנידוגים (כאשר הוא ממוקד בדג ממין מסוים), או לשינויים בהרכב ומגוון המינים. בניהול הדיג קיימת סתירה בין הרצון להגדיל את רווחי הדייגים ולספק כמות דגים גדולה ככל הניתן לבין אפשרות הפגיעה באוכלוסיית הדגה. על מנת להתמודד עם הסתירה בין המטרות השונות אחד מכלי הממשק הנפוצים בניהול אוכלוסיות של מיני דגים מסחריים באגמים הוא אכלוס האגם בדגים ממינים מסחריים או הוספת מזון עבור דגים מסחריים. תוצאות האכלוס אינן תמיד על פי הצפוי ולעיתים גורמת לשינויים משמעותיים במארג המזון לפרקי זמן ארוכים. למרות ששיטה זו מסייעת בשימור האוכלוסייה אין היא מבטיחה שמירה על גודל הפרטים והביומסה לאורך זמן. בכנרת האתגר גדול עוד יותר מכיוון שיש רצון לשמר את אוכלוסיות הדגים מתוך הבנה וראיה מערכתית שישנה קשר בין יציבות המערכת האקולוגית על כלל מרכיביה ואיכות המים באגם. לכן, יש צורך לשקול כלי ממשק נוספים שניתן ליישם כגון הגבלת גודל העין ברשתות, הגבלת שלל הדיג, וכלים כלכליים מגוונים. היעילות שתתקבל מאימוץ מנגנון רגולטורי זה או אחר, או שילוב בין מנגנונים תלויה ישירות במאפייני המערכת האקולוגית והכלכלית, ובפרט בשני אלמנטים: אי הוודאות ביחס להתפתחות הדגה באגם והאינטראקציה בין מינים, ואי הוודאות ביחס לעלויות הכוללות מאימוץ ממשק דיג כלשהו (בכלל זה עלויות סביבתיות). בכדי לבנות ממשק דיג אופטימאלי יש לאמוד את מידת אי הוודאות במישורים אלו ולשלבם במודל כלכלי סטוכסטי המשלב בין התנהגות הדייג והמערכת האקולוגית.

עקב מורכבות המערכת האקולוגית באגמים בכלל, ובכנרת בפרט, קשה לחזות את התגובה של מרכיבי המערכת לצעדי ממשק שונים ללא כלי עזר כגון מודל אקולוגי. ואכן, מודלים אקולוגיים מסוגים שונים משמשים ככלים מרכזיים בתהליך קבלת ההחלטות של אנשי ניהול דיג החל משנות ה-50 במאה הקודמת. היכולת לבחון בצורה מדעית ואובייקטיבית את ההשלכות ארוכות הטווח של החלטות ממשק באמצעות מודלים הביאו את השימוש בהם לניהול דיג לרמה מקובלת ברחבי העולם. היום קיימות תוכנות רבות לבניית מודלים לניהול דיג ואחת המוכרות בהן היא התוכנה Ecopath with Ecosim (EwE). בבסיסה, תוכנת EwE יוצרת מודל מאזני של מערכת אקולוגית מורכבת, בעיקר על בסיס קשרי המזון של כלל הרכיבים במערכת כולל גם מרכיבים כגון לחץ דיג וטריפה ע"י עופות. לאחר שנוצר המאזן והתוכנה בדקה כי אכן המערכת מאוזנת והקשרים בין הפרטים הם הגיוניים, ניתן לבחון תוצרי בסיס של המערכת כמו: רמות טרופיות, צריכה, קשרי מזון, זרימת האנרגיה ועוד. על בסיס מודל זה ניתן ליצור שינויים במערכת ולבחון את השפעתם של שינויים אלו על המערכת האקולוגית בכלל, ואוכלוסיות הדגים, בפרט, לאורך זמן. כמו כן, ניתן לבחון תרחישי ניהול שונים ומורכבים לאורך זמן.

תוכנת EwE כוללת גם את האפשרות לכלול אלמנט מרחבי (Ecospace) המבצע חלוקה דינאמית של ביומסה על פני רשת המייצגת את שטח האגם, בעלת רזולוציה נתונה המוגדרת ע"י המשתמש. חלוקת הביומסה מתא מסוים לכלל התאים השכנים היא אחידה פרט למקרים שבהם אזורים מסוימים מוגדרים כהביטטים מועדפים או הביטטים שיש להימנע מהם. ברמה המעשית, רכיב Ecospace מפעיל את הרכיב הדינאמי בזמן (Ecosim) בכל אחד מהתאים ברשת ומפעילה מנגון העברת ביומסה מתא לתא, כולל שחיה ומעבר אקטיבי של דגים. בגלל היכולות המרחביות ניתן לבחון, למשל, את השפעתם של אזורים סגורים לדיג (למשל הבטיחה בצפון הכנרת) וכן מהם האזורים בכנרת הנדרשים לצורך שיקום ושמירה על אוכלוסיות הדגים השונות.

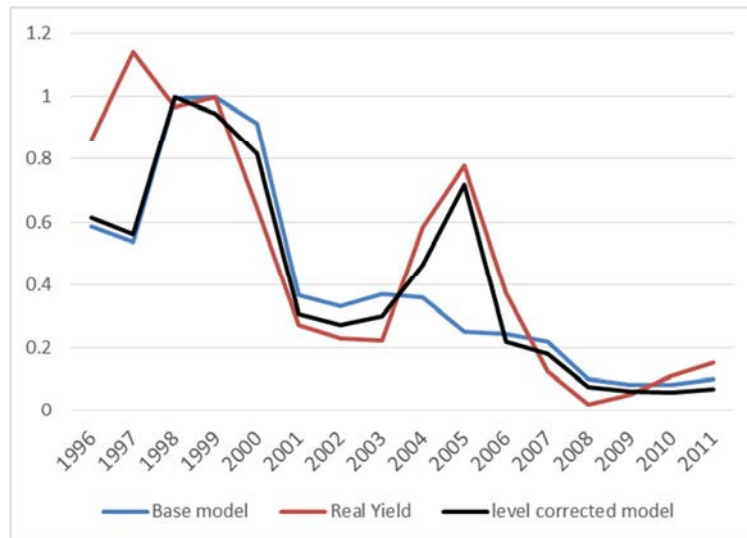
למרות נפיצותם של מודלים מהסוג EwE לתיאור שרשרת ההשפעות על המערכת האקולוגית, התוכנה סובלת מהעדרם של מספר מרכיבים. היכולת שלנו לתאר ולאפיין מערכת אקולוגית מוגבלת בגלל העדר נתונים ומידע, העדר יכולות אנליטיות יותר גבוהות, וקשיים במידול סטטיסטי של אי הוודאות המערכת, דבר שפוגע ברמת המהימנות של תוצאות המודל. ניתן לצמצם את חוסר הוודאות ע"י איסוף של מידע חדש (כפי שמתבצע כיום במסגרת פרויקטים אחרים) או ע"י שילוב של חוסר וודאות לתהליך המידול. בנוסף לאמור לעיל, אין ביכולתנו באמצעות המודל הקיים לבצע ניתוחי רגישות ביחס להתנהגות הדיג, אי הוודאות בעלויות הדיג, ותאור של מבנה השוק (קביעת מחיר אקסוגני או אנדוגני על ידי השחקנים במערכת). בהינתן חסר זה, לא ניתן לאמוד את מלוא ההשלכות הכלכליות והאקולוגיות של ממשקי דיג שונים. על מנת לשפר את יכולות המודל להתמודד עם חוליות חלשות אלו מוצע במסגרת מחקר זה לבצע שיפור ואף הרחבה של המודל הקיים.

מטרת הפרויקט היא פיתוח של כלי ניהול מתקדמים על מנת לספק למקבלי ההחלטות כלים שייסעו בשיקום הדיג המסחרי בכנרת ובקביעת מדיניות ניהול בת קיימא.

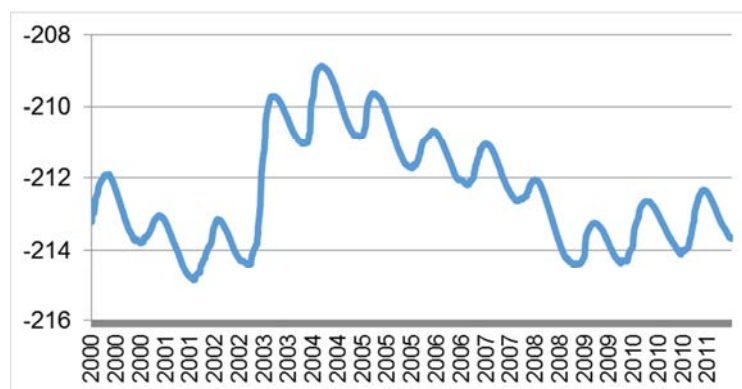
התאמה בין סדרת הנתונים למודל

ניתן לבחון בעזרת המודל הדינאמי את השינוי בביומסה והשלל עם הזמן. מטרת הרצת הכיול והאימות הייתה לבחון האם יש ביכולתו של המודל לחזות את המגמות בשלל הדיג כפי שאכן התרחשו במציאות. במהלך השנים בהם בוצעה הסימולציה (1996-2010) התרחשו שינויים קיצוניים בשלל אמנון הגליל, שאף הגיע לשפל של כל הזמנים בשנת 2008. עד כה הסיבות לשינויים אלו אינם ברורים ויתכן אף כי ישנם מספר גורמים אשר משפיעים על שלל זה. על מנת לבחון את יכולתו של המודל, בוצע אימות בין התוצאות המופקות מהסימולציה במודל לבין נתוני האמת, בכל הקשור לשלל אמנון הגליל. על מנת לבצע את הסימולציה הוכן מודל "מאזני" של האגם לשנים 1990-1995. למודל זה צורף סדרה עיתית (Time Series) של נתוני ביומסה של פיטופלנקטון וזואופלנקטון לשנים 1996-2010. על סמך הנתונים הללו והמודל ה"מאזני" המודל התבקש לאמוד את שלל הדיג. השוואה של תוצאות הסימולציה לנתוני האמת

(איור 131) מראה שהמודל אכן שיחזר את מגמות השינויים הקיצוניים אשר התרחשו בשלל הדיג של אמנון הגליל, זאת למעט עלייה משמעותית בשלל אשר התרחשה באזור שנת 2005. בחינה של המתרחש בשנים האלו מלמדת כי עלייה זו נובעת ככל הנראה מעלייה משמעותית בכמות אמנוני הגליל אשר נגרמה מעלייה משמעותית במפלס בחורף 2002/3 (איור 132) דבר שהגדיל מאוד את זמינות בתי הגידול של האמנונים.



איור 131: השוואת תוצאות המודל לשלל אמנוני הגליל. הציר האנכי מציג את שלל אמנון הגליל ביחס למספר המקסימאלי של השלל והציר האופקי את שנות הרצת המודל ונתוני האמת (התקבלו באדיבותו של גימי שפירו מאגף הדיג). מוצגים תוצאות של שתי הרצות שונות של המודל: הרצת בסיס ועם תיקון עבור השינוי המהיר במפלס בחורף 2002-2003 (ראה טקסט).



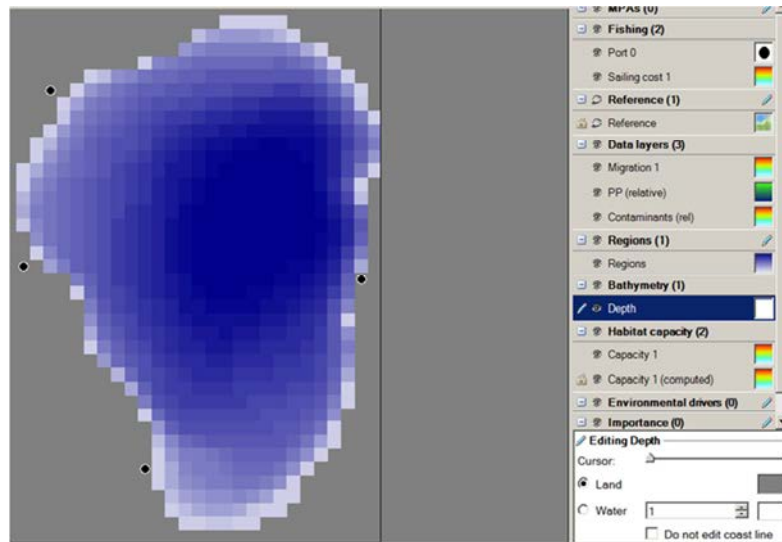
איור 132: שינויי מפלס האגם בין השנים 2000-2011. מהגרף ניתן לראות כי בחורף של 2002-03 חלה עלייה תלולה במפלס.

המודל אכן מצליח לצפות את המגמה הרב שנתית בשלל אמנוני הגליל כפי שהתרחשה במציאות. בכך ניתן להצביע על אימות לתחזיות המודל, דבר שמגדיל את מידת הביטחון בשימוש בתחזיות הללו לגבי תקופות זמנים עתידיות. יחד עם זה קיימת חוסר התאמה בשנים שצפויות להיות מושפעות מהעלייה התלולה במפלס (2-3 שנים אחרי העלייה) ובעקבות כך הירידה בשלל עד לנקודת השפל בשנת 2008. כיוון שהשפעת שינוי המפלס על בתי הגידול אינה כלולה בנתוני המודל, הרי שהמודל לא יכול לצפות זאת. ואכן תיקון של השלל במודל רק עבור השנים שצפויות להיות מושפעות מהעלייה התלולה במפלס גוררת התאמה טובה מאוד בין המודל לשלל האמיתי באגם (איור 131).

שיפור התשתית עבור הניתוח המרחבי

כחלק מהמחקר בכוונתנו לבצע בדיקה של סוגיות בעלות מימד גיאוגרפי. למשל אחת מהסוגיות שעומדות על הפרק היא בירור משמעות סגירתה של הבטיחה לדיג במשך כל השנה. על מנת לבחון שאלה זו ושאלות נוספות בעלות מימד גיאוגרפי בכוונתנו לבצע שימוש ברכיב בתוכנה שנקרא Ecospace. התוכנה בנויה משכבות מידע המכילות נתונים כמו: עומק, אזורים מוגנים, נמלי דיג, ייצור ראשוני, רוח, זרמים, בתי גידול ועוד. עד כה היה צורך להזין את הנתונים הנדרשים לשכבות אלו באופן ידני, דבר שגרם לחוסר דיוקים ואי התאמה בין מקורות המידע. לאחרונה בעקבות בקשות והגדרות של הפרויקט חל שינוי ופותח רכיב המסוגל לקלוט מידע משכבות גיאוגרפיות כך שהוא יכול לקבל נתונים כמו שכבות עומקי האגם המצויות בפורמטים גיאוגרפיים כמו קבצי Shp (איור 133). חשיבות הדבר היא ביכולת להגדיר בצורה מדויקת את בתי הגידול ואזורי התפוצה כנגזרת של מימד העומק, בכך ניתן לבטא את השפעתו של הליטורל על אזורי ההטלה והקינון ולבחון את השפעת שינויי מפלס האגם על המערכת האקולוגית. פריצת דרך זו תאפשר הגעה לתוצרים טובים יותר בכל הקשור לגיבוש המלצות תפעוליות באגם כמו איזה אזורים כדאי לסגור לדיג ומתי.

במהלך השנה הקרובה נרחיב את יכולות המודל המרחבי ונבחן את טיב תוצאות מודל זה. בנוסף, נבחן ונשלב מודל כלכלי לבחינת השפעת כלי ממשק כלכליים על השלל ומאמץ הדיג.



איור 133: הצגה של שכבת העומק במודל. קליטה של שכבות העומק מאפשרת ביטוי לעומקים השונים באגם ובכך מאפשרת הגדרה טובה של בתי הגידול השונים. בצד ימין מוצגים הכותרות של שכבות המידע המוזנות למודל.

3.16 חישה מרחוק של פיגמנטים במים פוריים: אגמים, מאגרים ומימי חופים

יוסף יעקבי, בשיתוף עם אנטולי גיטלסון (Lincoln-University of Nebraska) ואלכסנדר גילרסון (NYCC)

במימון הקרן הדו-לאומית למדע ארה"ב-ישראל, BSF

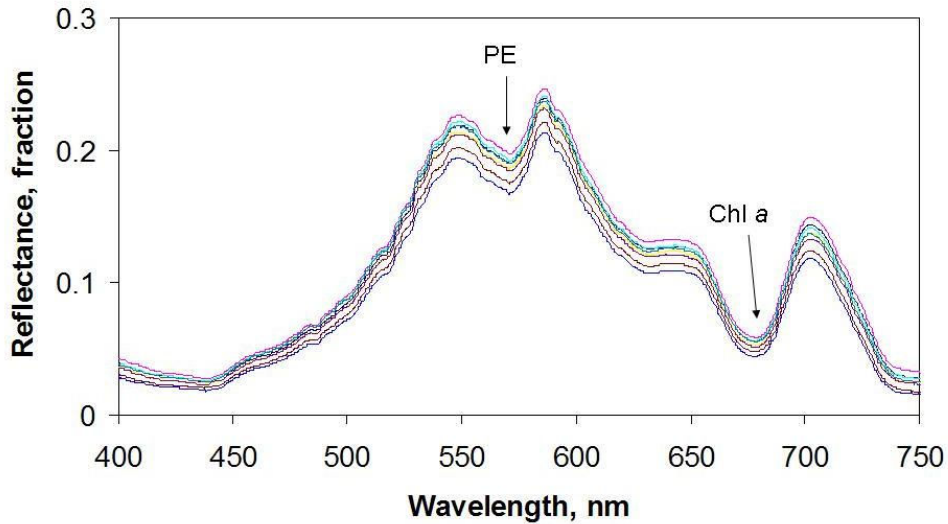
חישה מרחוק של פיגמנטים ובעיקר של כלורופיל היא טכנולוגיה מבוססת היטב. אלגוריתמים להמרת המידע האופטי למונחים של ריכוזי פיגמנטים זמינים ותוצרי העבודה באמצעות חישה מרחוק משמשים למיפוי פיטופלנקטון ברמה גלובלית ומקומית במי הים העמוקים. אולם, במי אגמים ומאגרים ובמידה רבה גם במי הים החופיים, האלגוריתמים המותאמים לים העמוק אינם ישימים; האקלים האופטי במי ים עמוקים נקבע בעיקר ע"י ריכוז הפיגמנטים ואילו במים יותר פוריים ניכרת גם ההשפעה של מרכיבי מים מורחפים ומומסים אחרים, כגון, חמר אורגני מומס צבעוני ומינרלים, דוגמת חרסיות. במים פוריים, המתאם בין ריכוז הכלורופיל והחומרים האחרים לעיתים קרובות נמוך מאד, בניגוד למצב בים העמוק. המרכבות האופטיות של המים הפוריים מחייבת פיתוח אלגוריתמים אחרים מאלה שמשמים בים העמוק ויש כיום כבר מלאי לא קטן של אלה, אם כי רובם בעלי תוקף מוגבל לסביבות מסוימות או לטווח ריכוזי פיגמנטים נתון.

ב-2013 ערכנו 10 הפלגות והמשכנו את העבודה בה החילונו ביוני 2012. בהפלגות אספנו מידע אופטי ובמקביל לקביעת ריכוזים של חלקיקים המעצבים את האות הספקטרלי הנובע מפני המים. סיכום ממצא של המדידות בטבלה 25.

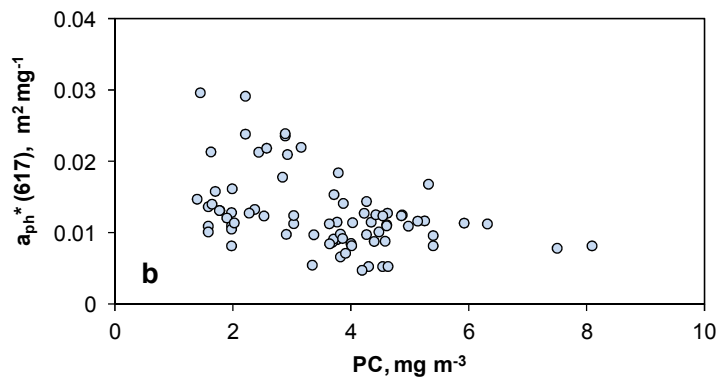
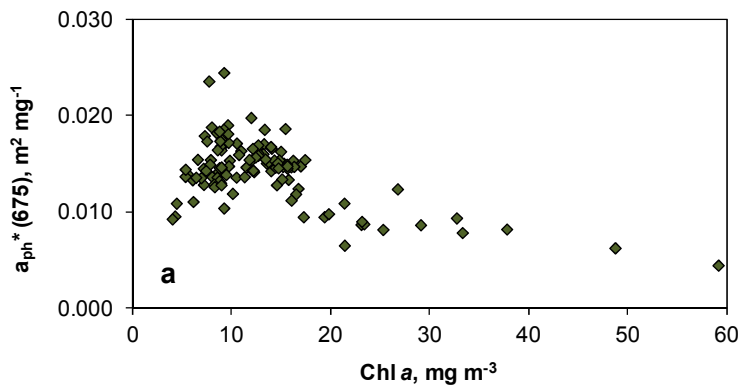
טבלה 25: סיכום סטטיסטי של מאפייני החלקיקים, ריכוזי פיגמנטים וספיחת אור ספציפית של פיגמנטים סומנים בדוגמאות של מי כנרת (בקרבת פני המים) בהפלגות שנערכו בין יוני 2012 ליולי 2013.

variable	min	max	median	average	std	c.v.
<i>Total suspended matter, mg m⁻³</i>						
Total particulate	2.5	6.5	4.4	4.3	0.91	21
Particulate organic	1.3	4.3	3.1	3.0	0.67	22
Organic matter, %	38	95	69	67	9.54	14
Inorganic particulate	0.2	3.3	1.3	1.5	0.50	35
<i>Pigment concentration, mg m⁻³</i>						
Chlorophyll <i>a</i>	5.3	59.1	11.1	12.8	7.7	60
Chlorophyll <i>b</i>	0.2	2.8	0.8	1.1	0.7	60
Chlorophyll <i>c</i>	0.4	14.6	1.0	1.6	2.0	125
Phycocyanin	1.4	8.1	3.6	3.4	1.4	42
<i>Specific absorption, m² mg⁻¹</i>						
Chlorophyll <i>a</i>	0.0044	0.0245	0.0146	0.0145	0.003	20
Phycocyanin	0.0122	0.0496	0.0221	0.0237	0.007	29

בפרק הזמן שמסוף ינואר ועד אמצע מרץ 2013 נשלט פיטופלנקטון של הכנרת ע"י הציאנובקטריום מיקרוציסטיס, שיצר ריכוזי תאים גבוהים, בעיקר בקרבת פני המים. זו תופעה נפוצה למדי במים פוריים, אך הייחוד של המיקרוציסטיס שהיה בתקופה הנ"ל בכנרת היה בכך שהתאים הכילו ריכוז גבוה של פיקואריתרין, כך שהגוון השלט של החלקיקים היה חום-אדום. בהתאם לכך, בדגם החזר האור מפני המים בלט שקע עם שפל מירבי באורך גל של 563 – 564 ננומטר (איור 134). הייחוד האופטי הזה מאפשר לזהות את המיקרוציסטיס "האדום" ולמפות את תפוצתו ע"פ האגם כולו במדויק, באמצעות הדמיות לוויין. עבודת המיפוי כרגע בטיפול של שותף (לא רשמי) אמריקני למחקר שלנו.



איור 134: החזר האור מפני המים בהפלגות בכנרת ב-4 מרץ 2013. החיצים מציינים את שיאי ספיחת האור של כלורופיל (Chl a) ושל פיקואריתרין (PE).



איור 135: היחסים בין ריכוזי פיגמנט ומקדם הספיחה הספציפי (a_{ph}^*), באורך הגל בו מתקיימת הפעילות האופטית המרבית של הפיגמנט. (א) ריכוז כלורופיל a וספיחת האור ע"י החלקיקים באורך גל של 675 ננומטר. (ב), ריכוז פיקוציאנין (PC) וספיחת האור ע"י החלקיקים באורך גל של 617 ננומטר.

אספנו מידע על מקדם הספיחה הספציפית (מס"ס = specific absorption coefficient) של שלשת הכלורופילים המצויים כדרך שיגרה בפיטופלנקטון ואת המס"ס של פיקוציאנין (המצוי בציאנובקטריה), ע"י מדידות בספקטרופוטומטר במעבדה. נתונים אלה חיוניים לצורך בניית אלגוריתמים אנליטיים והעבודה בכון זה מתקדמת. המס"ס המיוחס לכלורופיל a חושב על-סמך המדידה באורך גל של 675 ננומטר והיה

בממוצע $0.0145 \text{ מ}^2/\text{מ}^2\text{ג}$, וערכו היה בתלות הפוכה לריכוזי הפיגמנט הנבדק (איור 135a). השונות של המס"ס בכל הפלגה הייתה קטנה ביותר, אם כי היו הבדלים ניכרים בין ההפלגות השונות. המס"ס הממוצע באורכי גל של 636 ננומטר ושל 652 ננומטר, המיוחסים לשיא הפעילות האופטית של כלורופיל c ושל כלורופיל b, בהתאמה, נעו במשרעת רחבה יותר מהמס"ס של כלורופיל a, קרוב לודאי בשל הקושי לבודד את ההשפעה של האחרון על שני הפיגמנטים הנלווים. המס"ס של פיקוציאנין חושב לערך ממוצע של $0.0099 \text{ מ}^2/\text{מ}^2\text{ג}$, בהפחתת ההשפעה של הפעילות האופטית של הכלורופילים באורך גל של 617 ננומטר. כמו במקרה של כלורופיל a, ערכי המס"ס פחתו עם עלייה בריכוז הפיקוציאנין (איור 135b).

4 מחקרי אגן ההיקוות של הכנרת וגופי מים אחרים

4.1 ההידרולוגיה של שמורת החולה

אלון רימר, עמי נשרי

במימון רשות הטבע והגנים (רט"ג)

יישום לחישוב שגרתי עצמי של מאזן המים-חום-מליחות בשמורת החולה

בהמשך לעבודתנו שהוגשה לרט"ג במהלך 2012 ביצענו עבודה נוספת בשלב ב'. מהות שלב זה היא הכנת יישום לחישוב שגרתי עצמי של מאזן המים של גופי המים בשמורה.

בוצע יישום שבו יעודכנו נתוני הניטור מן השמורה מכל הסוגים - מטאורולוגיה, מפלס, מדידות כניסת מים, מדידות יציאת מים, ריכוזי כלוריד במספר נקודות מדידה, ונתונים נוספים. כל זאת על בסיס דיגום שבחלקו יומי ובחלקו חודשי. תוצאת היישום היא מאזן מים חודשי וניתוח ראשוני של התוצאות (כמו למשל מאזן מים וכלוריד + ניתוח של מידת ההתאמה בין מאזן הכלוריד עם מאזן המים). היישום מופעל עצמאית ע"י צוות השמורה, כך שלמעשה הוא מתעדכן ומאפשר לחשב את כל המשתנים הדרושים על ההידרולוגיה של השמורה כל הזמן. הצענו את היישום ב- EXCEL מהסיבות הבאות: א. כל פלטפורמה אחרת תדרוש תכנות של ממשק משתמש שעלותו תהיה גבוהה בהרבה מעלות היישום עצמו; ב. מניסיונונו זו הפלטפורמה שבה יש סיכוי הגבוה ביותר שתיהפך לכלי עבודה של ממש.

מגבלות חישוב מאזן מים בשמורת החולה

מאזן המים התקופתי של שמורת החולה עשוי להיות כלי כמותי נוח למעקב אחר ההשתנות בזמן של כמויות המים המזינות את השמורה. עריכת מאזנים תקופתית על פני רצף של שנים מספקת את הנתונים הדרושים להכרת המערכת ההידרולוגית של האגם וחיונית לקביעת מדיניות תפעול מתאימה. בשמורה קיימים לפי שעה נתוני מדידה המאפשרים רמת דיוק נמוכה יחסית של מאזן המים. נתונים אלה מאפשרים הערכה סבירה בלבד של מאזני המים. עם זאת, שיפורים במערך המדידה בהמשך עשויים לייצר מערכת מידע טובה בהרבה על רכיבי המאזן. להלן נציג את שיטת החישוב שבה נקטנו כדי לחשב את מאזן המים בשמורה על סמך הנתונים הקיימים, ולאור התוצאות נסקור את החסר במדידות שגרתיים, שביצוען יאפשר הבנה טובה בהרבה של המצב ההידרולוגי.

לפי שעה, בזמן כתיבת היישום הנוכחי, החלק העיקרי החסר במדידות בשמורה הוא הערכת כמות המים העוזבת את השמורה (מ"ק/חודש) בשתי היציאות העיקריות - יציאה 6 ויציאה 11 (איור 136). במסגרת היישום מחושבת הספיקה היוצאת מהשמורה בשתי שיטות שונות, וכן נעשית השלמה של הרכיבים הנוספים. חישוב המאזן החודשי הסופי אינו חף משגיאות, אך הוא מהווה קירוב סביר למדי למצב מערכת המים הנוכחית בשמורת החולה.

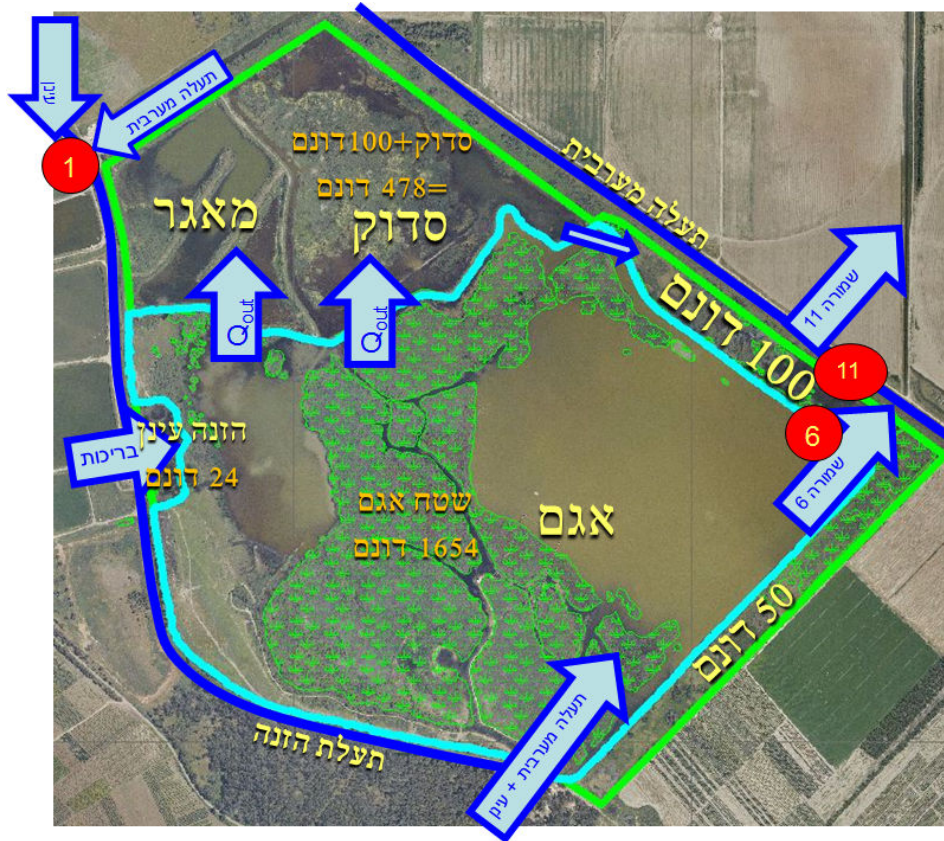
משטחי השמורה

בחישוב משוואות המאזן לוקחים חלק האזורים הבאים השייכים לשמורת החולה (טבלה 26):

שטח שמורת החולה מחולק ל"אגם" ו"מחוץ לאגם", הכולל את שטחי ה"סדוק" וה-"100 דונם" לצורך חישוב מאזני מים. השטח הנקרא "50 דונם" וחלק משטח "המאגר" (ראו מפה באיור 136) אינם כלולים במאזן.

טבלה 26: גודל השטחים השונים המופיעים באיור 136 (בדונם)

שם דונם	הזנה עינן	"100 דונם"	"סדוק"	"מאגר"	מחוץ לאגם	אגם	יחסי שטחים
	24.4	98.2	355.4	78	556	1654.4	0.336



איור 136: גופי המים של שמורת החולה. כל השטח, למעט ה"מאגר" וה"50 דונם", נכלל במודל המאזן הכללי שלהלן. השמורה ניזונה משתי כניסות מדודות (1) – "תעלה מערבית" ו"עינן", ומכניסה לא מדודה "בריכות". מים יכולים לעזוב את האגם בשני נתיבים ראשיים: 1. זרימה החוצה (Q_{out}) אל ה"סדוק", וממנו ל- "100 דונם" ולתעלת הירדן דרך יציאה "שמורה 11" (11); 2. זרימה ישירה מה"אגם" לתעלת הירדן דרך יציאה "שמורה 6" (6).

משוואת מאזן המים

משוואת מאזן המים מחודש לחודש נתונה ע"י:

$$(1) \quad \Delta V_L = (Q_{in} + R - Q_{out} - E)\Delta t$$

במשוואה זו ΔV_L (מ"ק) מציין את השינוי החודשי המדוד בנפח המים בשמורה (Δt חודש); Q_{in} (מ"ק/חודש) נפח כולל של כניסת מים בחודש; R (מ"ק/חודש) נפח כולל של גשם על שטח השמורה; Q_{out} (מ"ק/חודש) נפח כולל של יציאת מים בחודש; ו- E (מ"ק/חודש) נפח כולל של התאדות משטח השמורה. מתוך מאזן המים ניתן לחלץ את הספיקה היוצאת, שאיננה מדודה, ע"י המשוואה:

$$(2) \quad Q_{out} = Q_{in} + R - E - (V_{L_{t+1}} - V_{L_t})$$

שבה V_{L_t} מציין את נפח המים בשמורה בזמן t .

משוואת מאזן המלח

משוואת מאזן המלח (כלוריד) מחודש לחודש נתונה ע"י:

$$\begin{aligned} \Delta S &= (Q_{in} C_{in} - Q_{out} C_{out}) \Delta t \\ S &= CV \end{aligned} \quad (3)$$

במשוואה זו ΔS (ק"ג) מציין את השינוי החודשי בכמות הכלוריד בשמורה; C_{in} (מ"ג/ליטר) מציין את ריכוז הכלוריד האקוויולנטי של כניסת מים בחודש (בהנחת ריכוז 0 בגשם); C_{out} (מ"ק/חודש) מציין את ריכוז הכלוריד האקוויולנטי של יציאת מים בחודש. מתוך מאזן הכלוריד ניתן לחלץ את הספיקה היוצאת ע"י המשוואה:

$$Q_{out} = \frac{(Q_{in} C_{in} \Delta t - \Delta S)}{C_{out} \Delta t} \quad (4)$$

מאזן המים של שטח האגם

הספיקה היוצאת מהאגם, כפי שחושבה לפי מאזן המים, מייצגת את צירוף הספיקות היוצאות משטח האגם, הן ישירות לתעלה המערבית (יציאה "שמורה 6" באיור 136) והן לשטח "הסדוק" (מעבר המים מה"אגם" ל"סדוק" באיור 136). מאזן המים של שטח האגם נתון לפיכך ממשוואה 1 ומאיור 137 כאשר בחלקו החיובי של המאזן נמצאות הספיקות הנכנסות לאגם והגשם (מ"ק לחודש), בחלקו השלילי ספיקת היציאה מהאגם וההתאדות. השינוי בנפח האגם נמצא לעתים בחלק החיובי ולעתים בחלק השלילי כך שסה"כ המאזן יהיה שווה ל-0.

מאזן המים בשטח שמחוץ לאגם (סדוק + 100 דונם)

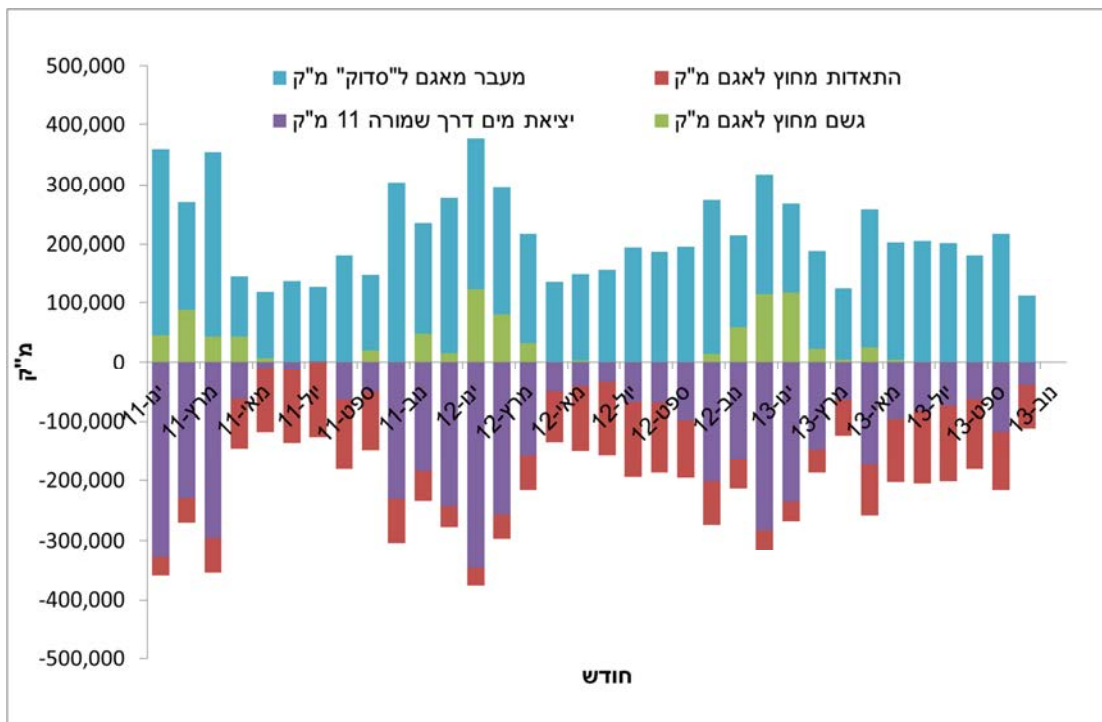
בחישוב זה הנחנו (בעיקר מסיבות של חוסר מידע) כי נפח המים שנמצא בשטח שמחוץ לאגם אינו משתנה מחודש לחודש, כלומר המפלס המאפיין את האזורים הללו הוא קבוע במהלך כל השנה. בהינתן הנחה זו משוואת מאזן המים בשטח שמחוץ לאגם היא:

$$Q_{(S)} + R_{OUT} - Q_{(11)} - E_{OUT} = 0 \quad (5)$$

שבה $Q_{(S)}$ ספיקה מהאגם לשטח השמורה; R_{OUT} גשם על השטח שמחוץ לאגם; ו- E_{OUT} התאדות מחוץ לאגם. המשתנה הרביעי $Q_{(11)}$ הוא הספיקה היוצאת ב"שמורה 11" (איור 136) שהיא השארית הסוגרת את מאזן משוואה 5. מאזן המים החודשי של השטח שמחוץ לאגם מתואר באיור 138 כאשר בחלקו החיובי של המאזן נמצאות הספיקות הנכנסות לאגם והגשם (מ"ק לחודש), בחלקו השלילי ספיקת היציאה מהאגם וההתאדות.



איור 137: מאזן המים של שטח "האגם" בשמורת החולה.



איור 138: מאזן המים החודשי של שטח ה"סדוק" + "100 דונם" (מחוץ לאגם) בשמורה.

סיכום

המאזן כולו רשום בדף שנקרא balance model. על מנת להוסיף נתונים חדשים ולכיל את המאזן יש לבצע מספר פעולות פשוטות כגון עדכון נתונים, והפעלת פונקציית ה- Solver ב- Excell. כל התוצאות והנתונים מופיעים גם בדף שנקרא "output". צמוד לדף זה נמצא דף נוסף "output pivot" שמאפשר להוציא דו"חות תקופתיים באמצעות השימוש בפונקציית ה- Pivot.

4.2 הפיטופלנקטון באגמון בשנה הידרולוגית 2012 - 2013

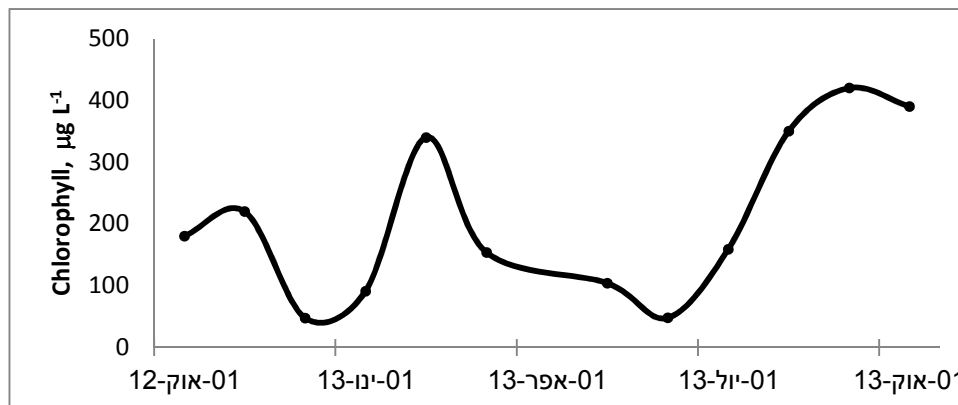
אלה אלסטר

במימון מיג"ל

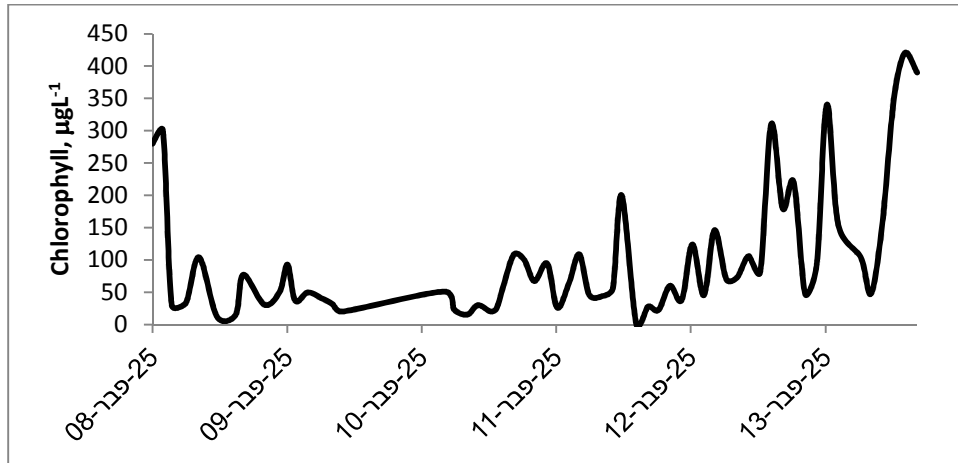
מטרת ניטור הפיטופלנקטון באגמון להתחקות אחר מגוון מינים והתפתחות של אוכלוסיית האצות באגם. ניטור זה החל עם הקמת האגמון ב-1994, הופסק ב-1998 והתחדש ב-2008. תוצאות הניטור מסודרות לפי שנים הידרולוגיות (מאוקטובר עד ספטמבר של השנה הבאה). בדוח הנוכחי מוצגות תוצאות ניטור האצות באגמון בשנה ההידרולוגית 2012 - 2013.

דוגמאות לבדיקות כלורופיל וזיהוי פיטופלנקטון נאספו בנקודת יציאת המים מהאגמון. הדוגמאות נאספו מדי חודש, 25 מ"ל מדגימת המים סוננו דרך פילטרים GF/C, הפילטרים נשמרו בהקפאה בטמפ' -20°C . כל דוגמא נבדקה בשתי חזרות. יתרת הדוגמא שומרה בלוגול בבקבוק כהה. הפילטרים הקפואים והדוגמאות המשומרות הועברו למעבדה לחקר הכנרת למדידת כלורופיל ולזיהוי האצות. הפילטרים שימשו למדידה פלואורומטרית של ריכוזי הכלורופיל לאחר מיצוי באצטון 90%. עשרה מ"ל של דוגמאות משומרות בלוגול נבדקו תחת מיקרוסקופ הפוך לאחר 24 ש' השקעה בתאי שיקוע. האצות זוהו לרמת המין או הסוג על פי הספרות הטקסונומית המקובלת Huber Pestalozzi 1969, Komarek and Fott 1983, Komarek and Anagnostidis 1999, 2005, Ettl 1978, Cox 1996, לפי סולם התדירות של Korde (1956).

כלורופיל: מאוקטובר 2012 עד אוקטובר 2013 ריכוזי הכלורופיל באגמון נעו בין 420 - 48 מיקרוגרם לליטר (איור 139). ריכוזי הכלורופיל הגבוהים ביותר נרשמו בספטמבר 2013 במהלך הפריחה של אצות כחוליות. ריכוזי הכלורופיל שנצפו בשנה ההידרולוגית 2012-2013 היו הגבוהים ביותר שנצפו מאז 2008 (איור 140).



איור 139: ריכוזי הכלורופיל באגמון בשנה הידרולוגית 2012 - 2013.



איור 140: ריכוזי הכלורופיל באגמון במהלך שנות הניטור (פברואר 2008 עד אוקטובר 2013).

הרכב המינים של הפיטופלנקטון: במהלך השנה ההידרולוגית 2012/13 נצפו 84 מינים/סוגים של אצות השייכות לשש מערכות: קריפטופיטה, עינגניות, ירוקיות, כחוליות, צורניות, קסאנטופיטה (טבלה 27). האצות הקריפטופיטיות שלטו באגמון במשך שישה חודשים: אוקטובר- נובמבר 2012, פברואר- מרץ 2013, יולי 2013 ואוקטובר 2013. אצות עינגניות שלטו באגמון שלושה חודשים: אוקטובר 2012, מרץ 2013 ו- אוקטובר 2013. אצות ירוקיות וצורניות שלטו באביב מפברואר עד מרץ 2013. פריחה של כחוליות נצפתה בסוף הקיץ באוגוסט- ספטמבר 2013.

טבלה 27: המינים הדומיננטיים באגמון וסה"כ מס המינים שנצפו בשנה ההידרולוגית 2012 – 2013. המספרים (למעט שתי השורות התחתונות) מציינים את ציון הדומיננטיות של המין על סקלה של 0-6, כאשר 0 = לא נצפה, 6 = נפוץ ביותר. בטבלה זו מופיעים רק המינים שקבלו ציון 5 ומעלה לפחות פעם אחת במהלך השנה. בשתי השורות התחתונות המספרים מציינים את מספר המינים שנצפה בכל תאריך.

Date	Oct-12	Nov-12	Dec-12	Jan-13	Feb-13	Mar-13	May-13	Jun-13	Jul-13	Aug-13	Sep-13	Oct-13
Cyanophyta												
<i>Anabaena spiroides</i>										6		
<i>Arthrospira</i> sp.											6	
<i>Oscillatoria</i> sp.											6	
<i>Phormidium</i> sp.											5	
Cryptophyta												
<i>Cryptomonas</i> sp.	6	6	6		6	5			5		4	6
Euglenophyta												
<i>Euglena mutabilis</i>	5											
<i>Euglena oxyuris</i>						5						
<i>Trachellomonas</i> sp.												6
Chlorophyta												
<i>Ankyra</i> sp.					6							
<i>Scenedesmus quadricauda</i>						5						
Diatoms												
<i>Synedra rumpens</i>					6	6						
No. of dominant species	2	1	1	0	3	4	0	0	1	1	4	2
Total no. of species observed	29	10	13	16	12	18	32	29	32	24	26	29

הרכב המינים באגמון היה כדלקמן: באוקטובר – דצמבר 2012 האצות הדומיננטיות (מקב' הקריפטופיטה) היו *Cryptomonas curvata*, *Cryptomonas* sp. בינואר 2013 לא נצפתה אצה שולטת, מגוון המינים שנצפו היה נמוך וריכוזי התאים שנצפו גם כן היה נמוכים, כמו גם ריכוז הכלורופיל. בפברואר ומרץ שלטו אצות ירוקיות *Ankyra* sp., *Scenedesmus* spp. וצורנית *Synedra rumpens*. מאפריל עד יוני צפיפות האצות ירדה, האצות שנצפו הכי הרבה היו *Nitzschia* sp., *Navicula* sp. ו- *Cryptomonas* sp. ביולי נצפו *Anabaena bergii* ו- *Cryptomonas* sp. באוגוסט-ספטמבר נצפתה פריחה של כחוליות, המינים השולטים היו *Phormidium* sp., *Anabaena spiroides*, *Spirulina* sp. ו- *Oscillatoria* sp. באוקטובר פריחת הכחוליות ירדה והשליטה עברה לקריפטופיטה *Cryptomonas* sp.

סיכום

משנת 2010 יש באגמון פריחות של אצות כחוליות שלא נצפו לפני כן. ריכוזי הכלורופיל במגמת עליה משנה לשנה. מיני הכחוליות השולטים בזמן הפריחה של אצות אלו משתנים משנה לשנה ולא נצפה מין אחד ששולט לאורך השנים, מה שיכול להעיד על כך שאוכלוסיית הכחוליות עדיין לא הגיעה לאיזון.

4.3 שימוש בקרומי קרקע ביולוגיים כאמצעי לייצוב פני שטח וכסוי אתרי פסולת

אורה הדס, עכסה לופו בשיתוף עם אברהם דודי מהקריה למחקר גרעיני

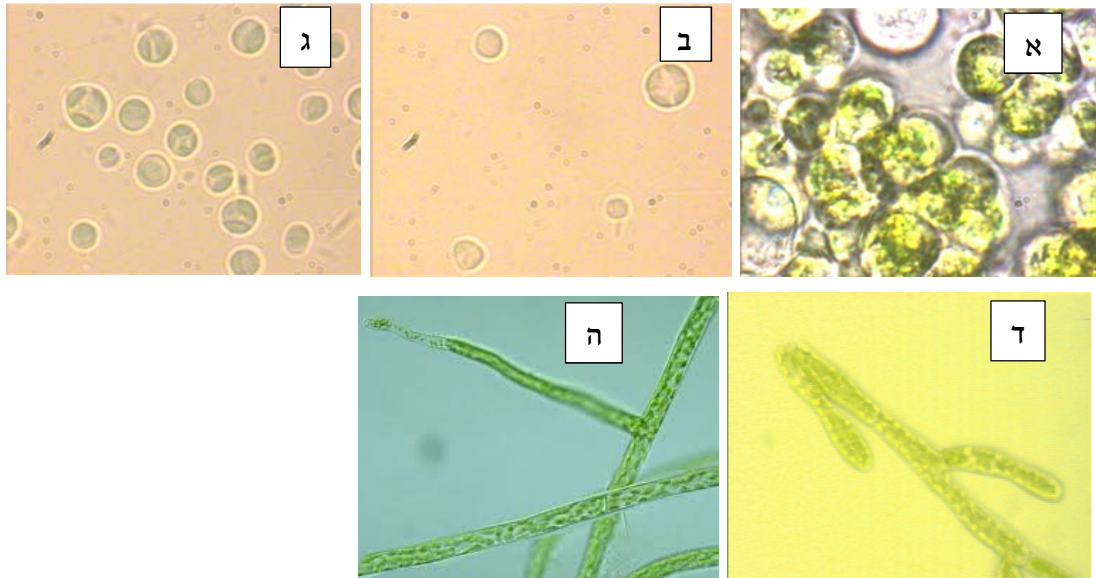
במימון משרד האנרגיה והמים

קרומי קרקע ביולוגיים מתפתחים באופן טבעי בקרקעות מדבריות ונוצרים מהדבקה של גרגרי חול על ידי פוליסכארידים שהופרשו בעיקר על ידי ציאנובקטריה (אצות כחוליות) חוטיות שהעיקרית שבהם היא *Microcoleus*. ציאנובקטריה אלה הם היצרנים הראשונים בקרומי הקרקע הביולוגיים כשאצות ירוקיות, טחבים, פטריות, חזזיות וחידקי קרקע חוברים אליהם. הקרומים והיצורים שמאכלסים את הקרומים חשופים לתנאי סביבה קיצוניים כמו טמפרטורות גבוהות ביום ונמוכות במשך הלילה, קרינה חזקה הן בתחום הנראה והן בתחומי ה-UV ומעברים של מחזורי הרטבה/יובש בתדירות גבוהה. הקרום הנוצר קשה, מייצב את פני השטח, מקטין את קצב החלחול, מצמצם את סחף הקרקע ומונע הסעה של חומרים רעילים ו/או תוצרי הפרוק. בנוסף, הקרומים הם מערכת חיה ודינמית עם אורך חיים אינסופי. ציאנובקטריה נוספת *Nostoc* חוטית ומקבעת חנקן בעלת תאים ייחודיים (הטרוציסטים) מספקת חנקן לקרום על ידי קיבוע חנקן אטמוספרי.

בשנה האחרונה למחקר התמקדנו בבידוד מרכיבי קרום נוספים מלבד המיקרוקולאוס והנוסטוק. בודדנו אצות מקבוצת הכלורופיטה וכן טחב. בדקנו המצאות גנים לאנזימים המאפשרים למיקרוקולאוס ולנוסטוק וכן לקרום הביולוגי השלם עמידות בפני עקה חימצונית.

חתיכות מהקרום הורחפו ב 1 מ' של מים סטריליים עברו vortex ומנות של 0.1 ו 0.2 מ' נזרעו על פלטות עם מצע SCM x2. הפלטות הודגרו באור גבוה בטמפרטורה של 20°C. מושבות שהתפתחו ונחשדו כאצות ירוקיות נזרעו מחדש על מצע SCM x2. לאחר הגידול המושבות נבדקו לתכולת הפיגמנטים במיקרוסקופ אפיפלואורסנטי באורכי האקסיטציה והאמיסיה האופייניים לכלורופיל ולפיקוציאנין על מנת להבדיל מי מהמושבות שייכת לאצות הירוקיות ומי לציאנובקטריה, בהתאמה.

בציאנובקטריה זוהו *Oscillatoria* ו *Nostoc*. בודדו 6 מינים של אצות ירוקיות שזוהו טקסונומית על ידי דר' אלה אלסטר וכן טחב אחד (איור 141)



איור 141: שלשה מיני אצות ירוקות (א-ג) וטחב (ד-ה) שבודדו מהקרומ הביולוגי. (ה) – טחב מיד עם יציאה מהספורה (נביטה) יוצר חוטים דמויי אצות הנקראים protonema.

שלשה מיני אצות זוהו בשיטות מולקולריות תוך שימוש ב sequencing של 18S ו *rbcl*. האצות שאופיינו כמרכיבות הקרומ באיור 141 על פי הזיהוי המולקולרי היו:

א. *Chlorosarcinopsis* ב. *Chlorella* sp. ג. *Chlorella* sp. (אצות ירוקות, Chlorophyta)
 ד. טחב *Syntrichia ruralis* (Bryophyta).

העצים הפילוגנטיים אינם מוצגים.

מסקנה: הקרומ הביולוגי מורכב מציאנובקטריה, אצות וטחבים כשכל מרכיב תורם לקרומ ומאפשר את קיומו בתנאי הקיצון בהם הוא חי.

עקה חימצונית ומנגנוני התמודדות

העמידה בתנאי סביבה קיצוניים ובעיקר חשיפה מוגברת לקרינת השמש וריכוזי חמצן גבוהים חושפים את האורגניזמים המרכיבים את הקרומ הביולוגי לעקה חימצונית העלולה לפגוע בתפקודים הפיסיולוגיים והביוכימיים. האורגניזמים, חייבים להצטייד במנגנוני הגנה שיאפשרו שרידות בתנאים אלה, היכולים להשתנות על בסיס יממתי. אסטרטגיה אחת להתמודד עם נזקי העקה החימצונית היא ביטוי ופעילות של אנזימים נוגדי חימצון שחלקם אנזימים מפרקים: GPX, Catalase, (SOD) Superoxide dismutase, Glucose-6-phosphate dehydrogenase (G6PD), (GRX) Glutathione reductase. האסטרטגיה השנייה היא שימוש במערכות אנטיאוקסידנטיות נמוך מולקולריות כמו ויטמינים וקרטנואידים.

מטרת חלק זה הייתה לבדוק האם האורגניזמים המרכיבים את הקרומ מצוידים במנגנוני שרידות להתמודדות בפני עקה חימצונית.

בדקנו את הגנים המעורבים בהגנה של הקרומ השלם וב *Microcoleus Nostoc* בפני עקה חימצונית. הגנים המקדדים לסופר אוקסיד דיסמוטז (SOD), אוקסידורדוקטז וגלוטרדוקסין, נמצאו הן בקרומ והן במיקרוקולאוס, בעוד שהגן לקטלז עובר אמפליפיקציה רק בקרומ הביולוגי, דבר המצביע שהגן נמצא במרכיבי קרומ אחרים ולא במיקרוקולאוס. בבדיקת ביטוי הגנים של האנזימים המגנים בפני עקה חימצונית רואים שרמת הביטוי במיקרוקולאוס גבוהה מזו שבוסטוק, הן בחשיפה של הקרומ לעוצמות האור הגבוהות והן בנמוכות, למעט הגן ל SOD שרמת ביטוי מוסטוק בקרומ הייתה גבוהה יותר בחשיפה לאור הנמוך. בהשוואה בין ביטוי הגנים בקרומ הטבעי השלם לבין הביטוי בתרביות המבודדות,

רמת הביטוי בקרום הביולוגי גבוהה יותר. כל זה עשוי להצביע על הגמישות התפעולית של הקרום הביולוגי הנחשף לתנאים קיצוניים ושורד וזאת משום ההפעלה הסלקטיבית של גנים, באורגניזמים שונים המרכיבים את הקרום, בתנאים הסביבתיים השונים והקיצוניים להם נחשף הקרום הביולוגי.

4.4 חלקיקים אקסופולימרים שקופים (TEP): מרכיב חשוב בשטף החומר האורגני

אורה הדס וטומי ברמן ז"ל בשיתוף עם: ניר קורן, ריקי פנקס, נחמה מלינסקי-רושנסקי ועכסה לופו

במימון האקדמיה הלאומית למדעים

חלקיקים אקסופולימרים שקופים (Transparent Exopolymer Particles – TEP) הם מיקרוג'לים פלנקטוניים המורכבים מפוליסכרידים, חומצות גרעין ודטריטוס. TEP יכולים להוות פלטפורמות הזנה לרשת החיידקית ואתרים לגידול, פעילות מטבולית של חיידקים ומחזור נוטריאנטים. הפולימרים האורגנים הא-ביויטיים שהנם חלק ממאגר הפחמן המומס (DOC) הופכים על ידי יצירת קשרים הידרופוביים לננוג'לים ומיקרוג'לים והם חלק חשוב במחזור וסדימנטציה של חומר אורגני, מתכות קורט, ואוכלוסיות מיקרוביאליות. שטף א-ביוטי זה צריך להלקח בחשבון כתורם ליצירת חלקיקים ולמעגל הפחמן בעיקר במים העמוקים.

מטרת המחקר לחקור את תפקידם של החלקיקים האורגנים השקופים (TEP) בשטף ובמחזור של פחמן אורגני בכנרת.

ריכוז ה TEP נמדד על ידי צביעה ב Alcian Blue שעבר קליברציה עם סטנדרט של פוליסכריד (Gum xanthine, GX) ומבוטא כמיקרוגרם GX אקוילונט לליטר.

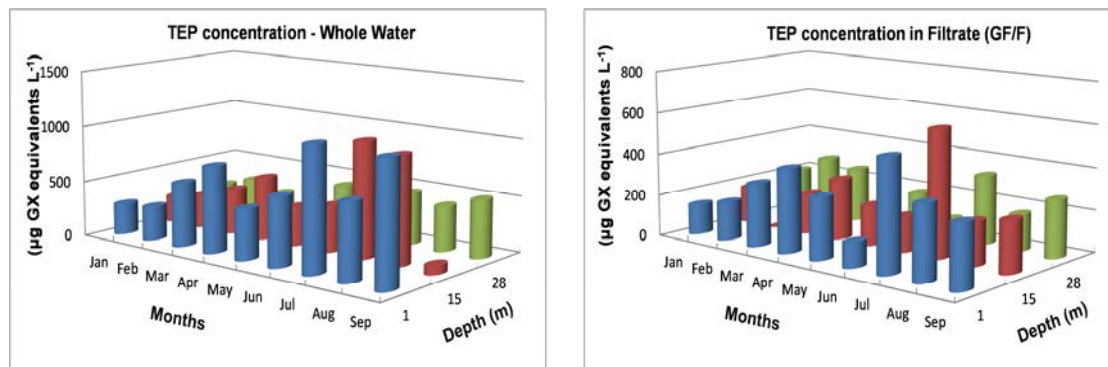
תוצאות שנת המחקר הראשונה מראות שהפרקציה של מי הכנרת שגודלה כ 0.4 מיקרון מורכבת מ TEP המהווים אתרים לפעילות ויצרנות חיידקית. הפרמטרים שנבדקו: ריכוז ה TEP, תפוצה ויצרנות חיידקים, כלורופיל, שיעורי נשימה, פעילות אנזימתית, השתנו עם העומק בעמודת המים ועונות השנה. רב החלקיקים הגדולים/שווים ל 0.4 מיקרון (מיקרוג'לים) נמצאו בעומק של 1 מ' ובשכבת התרמוקלינה. המים שעברו סינון (התסנין GF/F) והמייצגים TEP קולואידלי מראים אותה מגמה אך הערכים של כל הפרמטרים שנבדקו נמוכים בהרבה. הערכים הגבוהים של כל הפרמטרים היו קשורים בפריחות הפיטופלנקטון ובתהליכים העוקבים של הפרוק (חודשים מאי-יוני). תהליכי הפרוק התבטאו ביותר חומר אורגני שהגיע להיפולימיניון ולסדימנטים והיו מקור ליצירת TEP ועליה בפעילות החיידקית.

ריכוזי ה TEP בעומקים השונים ובעונות השונות מראים שגודל החלקיקים נע בין 4.4 עד ל 7.6 מיקרון והריכוז נע מ 0.63 ל 3 מיליון חלקיקים לליטר (איור 142). ריכוז החלקיקים עלה מפברואר (0.78 מיליון לליטר) לספטמבר (3 מיליון לליטר). הערכים הגבוהים ביותר של TEP נצפו ביולי והם בהתאמה לדגדגציה של ביומסת הפיטופלנקטון ויצירת תרמוקלינה יציבה.

לגבי תפוצת החיידקים והיצרנות החיידקית הערכים הגבוהים נצפו במאי-יוני 2013. במאי נצפו מספרי חיידקים גבוהים ב-28 מ', בשכבת המים שבה נוצרת הכמוקלינה, שם יש פעילות כמוסינתטית אינטנסיבית. בדגימות מים רבות החיידקים קטנים ועוברים את פילטר ה GF/F והם בעלי פוטנציאל לאכלס ולהיות פעילים בפרקציה המכילה TEP. ערכים גבוהים של יצרנות חיידקית, 92.57 מיקרוגרם פחמן לליטר לשעה, נמדדו בשכבת התרמוקלינה (15 מ') במאי, והיו בהתאמה למספרי החיידקים הגבוהים בשכבה זו. שיעורי הנשימה והפעילות האנזימתית השתנו עם העומק ועונות השנה והערכים המקסימליים תאמו את תקופות פרוק הפיטופלנקטון.

יש לציין שה TEP שדבוקים אליהם חלקיקי דטריטוס וחיידקים יכולים לשקוע לעבר ההיפולימניון והסדימנטים ועל ידי כך להעביר ולפזר חומר אורגני, נוטריינטים, וחיידקים בעמודת המים באגם.

TEP לא נלקח בחשבון בכל המודלים של שטפי הפחמן בכנרת ויש להוסיף פרקציה זו במודלים בעתיד.



איור 142: תפוצת חלקיקים אקסופולימרים צפופים (TEP) בעומקים ובעונות שונות בכנרת בשנת 2013. פנל שמאלי = מים מלאים, פנל ימני = מים מסוננים על GF/F. ריכוז ה TEP מבוטא כמיקרוגרם GX אקויוולנט לליטר.

5 נספחים

5.1 סטודנטים לתארים מתקדמים בהנחיית חוקרי המעבדה לחקר הכנרת - 2013

מס'	שם	תואר	אונ'	נושא	מנחה בחיא"ל
1.	אופיר אייל	דוקטור	חיפה	מודל דיג כנרת	ג' גל
2.	בר-אור א'	מוסמך	בן-גוריון	מעקב אחר חמצון מתאן אנארובי בסדימנט	ו' אקרט
3.	גלבוני י'	פוסט-דוקטורט	טכניון	השפעת פעילויות אנתרופוגניות על איכות מי הכנרת	ג' גל
4.	הגלעדי ע'	מוסמך	עברית	תגובת מיני זואופלנקטון להשפעות כימיות על דגים	ג' גל
5.	זילברמן ת'	דוקטור	מ' גיאולוגי	חקר מחזור החנקן בכלים איזוטופיים	ע' נשרי
6.	זמריקה מ'	דוקטור	Gdansk	סיווג קרקעות אגמים באמצעות הידרואקוסטיקה	א' אוסטרובסקי
7.	כרמל נ'	פוסט-דוקטורט	פקולטה לחקלאות	יישום טכנולוגיות FlowCAM	ג' גל
8.	לוינרט פ'	דוקטור	IGB	אפקט של רדיקליים חופשיים על פיטופלנקטון	ו' אקרט
9.	לופו ע'	פוסט-דוקטורט	חיפה	בקרת כחוליות	א' הדס
10.	לשם ת'	דוקטור	חיפה	זיהוי וכימות ציאנובקטריה	א' סוקניק
11.	מכר ש'	מוסמך	חיפה	רעיית אצות על ידי זואופלנקטון, העדפת מזון של הזואופלנקטון	ג' גל
12.	סוולנה ר'	פוסט-דוקטורט		מדדים ספקטרלים של ציאנובקטריה רעילה	א' סוקניק
13.	סלע ד'	פוסט-דוקטורט		ציאנובקטריה	א' סוקניק
14.	סלע מ'	דוקטורט	בן-גוריון	מתאנוטרופיה	ו' אקרט
15.	סנטוסו א'	דוקטור	Univ of Waikato	השפעת הפליטה של גזי חממה על אגם Rotorua	א' אוסטרובסקי
16.	פרינדטה ק'	דוקטור	IGB	השפעה של גלים פנימיים על סוגסטיה מיקרוביאלית של הפנ הביני	ו' אקרט
17.	קורצבאום א'	פוסט-דוקטורט	תל-אביב	ייצור ראשוני של אצות	ו' אקרט
18.	קפלן-לוי ר'	פוסט-דוקטורט	מלגת אשכול	בקרה מולקולארית של התפתחות אקינטים בכחוליות	א' סוקניק
19.	רובינשטיין ג'	מוסמך	חיפה	פיתוח שיטות סימון לדגיגי אמנון גליל	א' אוסטרובסקי

5.2 מחקרי המעבדה

I. מחקרים שהסתיימו במהלך 2013	
שם המחקר / שמות החוקרים	גורם מממן
<ul style="list-style-type: none"> • חנקן וציאנובקטריה בכנרת (א' סוקניק) • מודל תלת ממדי לכנרת (ג' גל) • ניטור כנרת – מערכת FLOWCAM (ג' גל) • תרומת מזינים לשכבה הפוטית (ע' נשרי, א' אוסטרובסקי) • איפיון מחזור החנקן בכנרת (ו' אקרט) 	משרד האנרגיה והמים: רשות המים
<ul style="list-style-type: none"> • שימוש בקרומים ביולוגיים (א' הדס) 	משרד האנרגיה והמים
<ul style="list-style-type: none"> • פיתוח מערכות פלואורסנציה דחויה (א' ורנר, י' יעקבי) 	משרד המדע/BMBF
<ul style="list-style-type: none"> • חלקיקים אורגניים שקופים במים, TEP (ט' ברמן ז"ל) 	הקרן הלאומית למדע
<ul style="list-style-type: none"> • PERSEUS (י' יעקבי) 	הקהילה האירופאית
<ul style="list-style-type: none"> • קורס אצות (א' סוקניק, ת' זהרי) 	מכללת תל חי
<ul style="list-style-type: none"> • ביצוע אנליזות פחמן אורגני (ו' אקרט) 	אוני' חיפה
<ul style="list-style-type: none"> • חוות דעת (א' רימר) 	מי-רקת טבריה
II. מחקרים שהתחילו ב-2013 או נמשכים בשנת 2013	
שם המחקר / שמות החוקרים	גורם מממן
<ul style="list-style-type: none"> • ניטור כימי וביולוגי (ת' זהרי וחוקרי המעבדה) • האצה הירוקית ופריחת פרידיניום, מוגושיה (א' הדס) • שטפי זרחן וחנקן לכנרת (ע' נשרי) • שיפור אינדקס איכות המים (א' פרפרוב) 	משרד האנרגיה והמים: רשות המים
<ul style="list-style-type: none"> • פיתוח יכולות DNA באר-קוד בכנרת (ת' זהרי, ר' קפלן-לוי) 	משרד האנרגיה והמים
<ul style="list-style-type: none"> • ממשק הדיג: משונות גנטית ועד קורמורנים (ת' זהרי ושותפים). • מודל אקולוגי כלכלי (ג' גל) • צמחייה חופית מוצפת ושרידות דגים (ת' זהרי) • ניטור חומרי הדברה בדגים (פ' אסטרון) 	משרד החקלאות
<ul style="list-style-type: none"> • קריסה של אוכלוסיות פיטופלנקטון (א' סוקניק) • מנגנונים מולקולריים בנביטת תאי קיימא (ר' קפלן לוי) 	משרד המדע, הטכנולוגיה והחלל
<ul style="list-style-type: none"> • חישה מרחוק של פיטופלנקטון (י' יעקבי) 	BSF
<ul style="list-style-type: none"> • תרדמה ונביטה של רעלני כחוליות (א' סוקניק) • עדויות גיאוכימיות לחימצון אנאירובי של מתאן (ו' אקרט) 	הקרן הלאומית למדע
<ul style="list-style-type: none"> • ביופילם (פ' אסטרון) 	אגודת הידידים של חיא"ל
<ul style="list-style-type: none"> • קורס לימינולוגיה (ת' זהרי וחוקרי המעבדה) 	אוני' עברית
<ul style="list-style-type: none"> • כלורופיל ואצות בשמורת החולה (ת' זהרי, א' אלסטר) 	רשות הטבע והגנים
<ul style="list-style-type: none"> • ניטור אצות באגמון (ת' זהרי, א' אלסטר) • הידרולוגיה של שמורת החולה (א' רימר) 	מיג"ל
<ul style="list-style-type: none"> • בדיקת רעלני כחוליות (א' סוקניק) 	מקורות
<ul style="list-style-type: none"> • אנליזות זרחן וסדימנטים (ע' נשרי, ג' סילברמן) • אנליזות פחמן אורגני (א' ורנר) 	פנימי
<ul style="list-style-type: none"> • אנליזת איכות מי ברכות (א' הדס) 	אחרות

- Berman, T.** 2013. Transparent Exopolymer Particles as critical agents in aquatic biofilm formation: Implications for desalination and water treatment. *Desalination and Water Treatment*, 51:4-6, 1014-1020.
- Berman, T., Parparov, A., Hadas, O., Sivan, O., Ostrovsky, I., Yacobi, Y.Z., Eckert, W.** 2014. The fate of organic carbon. Chap. 25. In: **Zohary T., Sukenik A, Berman T, Nishri A.** [eds] *Lake Kinneret: Ecology and Management*. Springer, Heidelberg (in press).
- Berman, T., Yacobi, Y.Z., Eckert, W., Ostrovsky, I.** 2014. Heterotrophic and anoxygenic photosynthetic bacteria. Chap. 15. In: **Zohary T., Sukenik A, Berman T, Nishri A.** [eds] *Lake Kinneret: Ecology and Management*. Springer, Heidelberg (in press).
- Berman, T., Zohary, T., Nishri, A., Sukenik, A.** 2014. General background. Chap. 1. In: **Zohary T., Sukenik A, Berman T, Nishri A.** [eds] *Lake Kinneret: Ecology and Management*. Springer, Heidelberg (in press).
- Blair, J.M., Hicks, B.J., Pitkethley, R., Ling, N., **Ostrovsky, I.,** Rowe, D. 2013. A bioenergetics assessment of the influence of stocking practices on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) growth and consumption in a New Zealand lake. *Freshwater Biology*, 58: 967-985, DOI:10.1111/fwb.12100
- Blair, J.M., **Ostrovsky, I.,** Hicks, B.J., Pitkethley, R.J., Scholes, P. 2013. Growth of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in warm-temperate lakes: implications for environmental change. *Can. J. Fish. Aquat.* 70815-823. DOI.org/10.1139/cjfas-2012-0409.
- Eckert, W., Nishri, A.** 2014. Phosphorus Cycle. Chap. 20. In: **Zohary T., Sukenik A, Berman T, Nishri A.** [eds] *Lake Kinneret: Ecology and Management*. Springer, Heidelberg (in press).
- Eshel G., Elifantz H., Nuriel S., Hohenberg M., **Berman T.** 2013. Microfiber filtration of lake water: Impacts on TEP removal and biofouling development. *Desalination and Water Treatment*, 51: 4-6, 1043-1049. 219 13. Frin
- Frindte, K., **Eckert, W.,** Attermeyer, K., Grossart, H.-P. 2013. Internal wave-induced redox shifts affect biochemistry and microbial activity in sediments: a simulation experiment. *Biochemistry* 113:423-434. DOI:10.1007/s10533-012-9769-1.
- Gal, G.,** Atanasova, N., **Parparov, A.** 2014. Modelling the Kinneret Ecosystem: A review of modeling approaches applied to the Lake Kinneret Ecosystem. Chap. 34. In: **Zohary T., Sukenik A, Berman T, Nishri A.** [eds] *Lake Kinneret: Ecology and Management*. Springer, Heidelberg (in press).
- Gal, G.,** Hambright, K. D. 2014. Metazoan zooplankton. Chap. 13. In: **Zohary T., Sukenik A, Berman T, Nishri A.** [eds] *Lake Kinneret: Ecology and Management*. Springer, Heidelberg (in press).
- Gal, G.,** Skerjanec, M., Atanasova N. 2013. Fluctuations in water level and the dynamics of zooplankton: a data-driven modelling approach. *Freshwater Biology*, 58: 800–816.
- Gross, A., **Nishri, A.,** Angert, A. 2013. Use of phosphate and oxygen isotopes for identifying atmospheric-P sources: A case study at Lake Kinneret. *Environ. Sci. Technol.* 47:2731-2727.

- Hadas, O.** 2014. Microbial processes within the nitrogen cycle. Chap. 22 In: Zohary T., Sukenik A, Berman T, Nishri A. [eds] Lake Kinneret: Ecology and Management. Springer, Heidelberg (in press).
- Hadas, O., Berman, T. Malinsky-Rushansky, N. Gal, G.** 2014. Unicellular zooplankton: Ciliates and flagellates. Chap. 14. In: Zohary T., Sukenik A, Berman T, Nishri A. [eds] Lake Kinneret: Ecology and Management. Springer, Heidelberg (in press).
- Hartmann, A., Wagener, T., **Rimmer, A.**, Lange, J., Brielmann, H., Weiler, M. (2013). Testing the realism of model structures to identify karst system processes using water quality and quantity signatures. *Water Resources Research* 49: 1–14.
- Hartmann, A., Weiler, M., Wagener, T., Lange, J., Kralik, M., Humer, F., Mizyed, N., **Rimmer, A.**, Barberá, J. A., Andreo, B., Butscher, C., Huggenberger, P. 2013. Process-based karst modelling to relate hydrodynamic and hydrochemical characteristics to system properties. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17: 3305-3321.
- Heller, J., Dolev, A., **Zohary, T., G. Gal.** 2014. Invasion dynamics of the snail *Pseudoplotia scabra* in Lake Kinneret. *Biological Invasions* 16: 7-12.
- Itskovich, V., Kaluzhnaya, O., **Ostrovsky, I.**, McCormack, G. 2013. The number of endemic species of freshwater sponges (Malawispongiidae; Spongillina; Porifera) from Lake Kinneret is overestimated. *J. Zoolog. Syst. Evol. Res.* DOI:10.1111/jzs.12022.
- Junier, P., Kim, O., Imhoff, J. F., Witzel, K-P., **Hadas, O.** 2013. "Effect of salinity on cyanobacterial community composition along a transect from Fuliya spring into water of Lake Kinneret, Israel". *Fundamental and Applied Limnology* 182 (2): 99-107.
- Katz, A., **Nishri, A.** 2013. Calcium, magnesium and strontium cycling in stratified, hardwater lakes: Lake Kinneret (Sea of Galilee), Israel. *Geochemica Cosmochemica Acta*, 105:372-394.
- Komlenic ,R., **Berman T.**, Brant J.A., Dorr, B., El-Azizi, I., Mowers, H. 2013. Removal of polysaccharide foulants from reverse osmosis feedwater using electroadsorptive cartridge filters. *Desalination and Water Treatment*, 51: 4-6, 1050-1056.
- Leunert F., Paul, A., **Eckert, W.**, Gerhardt, V., Grossart, H.-P. 2014. Phytoplankton Response to UV generated Hydrogen Peroxide from Natural Organic Matter. *Journal of Plankton Research* (in press)
- Leunert, F., Grossart, H.-P., Gerhardt, V., **Eckert, W.** 2013. Toxicant induced changes on delayed fluorescence decay kinetics of Cyanobacteria and Green Algae: A rapid and sensitive biotest. *PLoS ONE* 8:e63127DOI:10.1371/journal.pone.0063127.
- Li, Y. Waite, A.M., **Gal, G.**, Hipsey, M.R. 2013. An analysis of the relationship between phytoplankton internal stoichiometry and water column N:P ratios in a dynamic lake environment. *Ecological Modeling* (in press).
- Maldener, I., Summers, M.L. and **Sukenik, A.** 2014. Cellular differentiation in filamentous cyanobacteria. In: *The Cell Biology of Cyanobacteria* (Eds E. Flores and Herrero A.) Caister Academic Press. ISBN: 978-1-908230-38-6 (in press).
- Nishri, A.** 2014. Quantitative aspects of the nitrogen cycle. Chap. 21 In: Zohary T., Sukenik A, Berman T, Nishri A. [eds] Lake Kinneret: Ecology and Management. Springer, Heidelberg (in press).
- Nishri, A.** Halicz, L. 2014. Dynamics of redox sensitive elements. Chap. 28 In: Zohary T., Sukenik A, Berman T, Nishri A. [eds] Lake Kinneret: Ecology and Management. Springer, Heidelberg (in press).

- Nishri, A., Leibovici, E.** 2014. External nutrient sources Chap. 19 In: Zohary T., Sukenik A, Berman T, Nishri A. [eds] Lake Kinneret: Ecology and Management. Springer, Heidelberg (in press).
- Nishri, A., Stiller, M.** 2014. Inorganic carbon. Chap. 23 In: Zohary T., Sukenik A, Berman T, Nishri A. [eds] Lake Kinneret: Ecology and Management. Springer, Heidelberg (in press).
- Orihel, D., Hadas, O., Pinkas, R., Viner-Mozzini, Y. and Sukenik, A.** 2013. Internal nutrient loading may increase microcystin concentrations in freshwater lakes by promoting growth of *Microcystis* populations. *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology*.49: 225-235.
- Ostfeld, A., Tubaltzev, A., Rom, M., Kronaveter, L., **Zohary, T. and Gal, G.** (In press). A coupled data driven evolutionary algorithm for toxic cyanobacteria (Blue-Green algae) forecasting in Lake Kinneret. *J. Water Res. Pl.-ASCE*.
- Ostrovsky, I., Goren, M., Shapiro, J., Snovsky, G., Rynskiy, A.** 2014. Fish biology and ecology. Chap. 16 In: Zohary T., Sukenik A, Berman T, Nishri A. [eds] Lake Kinneret: Ecology and Management. Springer, Heidelberg (in press).
- Ostrovsky, I., Rimmer, A., Yacobi, Y.Z., Nishri, A., Sukenik, A., Hadas, O., Zohary, T.** 2013. Long-term changes in the Lake Kinneret ecocystem: the effect of climate change and anthropogenic factors. In: Goldman, C.R., Kumagai, M., Robarts, R.D. (Eds), *Climate Changes and Global Warming of Inland Waters: Impacts and Mitigation for Ecosystems and Societies*. John Wiley & Sons Ltd.
- Ostrovsky, I., Yacobi, Y.Z., Koren, N.** 2014. Sedimentation processes. Chap. 27 In: Zohary T., Sukenik A, Berman T, Nishri A. [eds] Lake Kinneret: Ecology and Management. Springer, Heidelberg (in press).
- Ostrovsky, I., Zohary, T., Shapiro, J., Snovsky, Z. and Markel, D.** 2014. Fisheries management. Chap. 36 In: Zohary T., Sukenik A, Berman T, Nishri A. [eds] Lake Kinneret: Ecology and Management. Springer, Heidelberg (in press).
- Parparov, A., Hambright, KD, Berman, T** 2014. Water quality assessment. Chap. 34 In: **Zohary T., Sukenik A, Berman T, Nishri A.** [eds] Lake Kinneret: Ecology and Management. Springer, Heidelberg (in press).
- Parparov, A., Berman, T., Zohary, T., Gal, G.** 2014. Seston. Chap. 26 In: **Zohary T., Sukenik A, Berman T, Nishri A.** [eds] Lake Kinneret: Ecology and Management. Springer, Heidelberg (in press).
- Parparov, A., Gal, G., Markel, D.,** 2013. Water quality assessment and management of Lake Kinneret water resources: results and challenges. pp. 165-180 In: Beker, N. (Ed.), *Water Policy in Israel: Context, Issues, and Options*. Springer,.
- Recknagel, F., **Ostrovsky, I., Cao, H., Zohary, T., Zhang, X.** 2013. Ecological relationships, thresholds and time-lags determining phytoplankton community dynamics of Lake Kinneret, Israel elucidated by evolutionary computation and wavelets. *Ecol. Model.* 255:70-86.
- Rimmer, A., Givati, A.** 2014. Hydrology. Chap. 7. In: **Zohary T., Sukenik A., Berman T. Nishri A.** [eds]. *Lake Kinneret – Ecology and Management*?. Springer, Heidelberg (in press).

- Rimmer, A., Hartmann, A.** 2013. Simplified conceptual structures and analytical solutions for groundwater discharge using reservoir equations. In: Nayak, P. (Ed), Water Resources Management and Modeling, InTech. 310 p. ISBN 978-953-51-0246-5
- Rimmer, A., Hartmann, A.** 2014. Optimal hydrograph separation filter to evaluate transport routines of hydrological models. *Journal of Hydrology*. 514 (2014) 249–257.
- Rimmer, A., Nishri, A.** 2014. Salinity. Chap. 8. In: **Zohary T., Sukenik A., Berman T. Nishri A.** [eds]. *Lake Kinneret – Ecology and Management*?. Springer, Heidelberg (in press).
- Roopin, M, **Y. Z. Yacobi**, Levy 2013. Occurrence, diel patterns, and the influence of melatonin on the photosynthetic performance of cultured *Symbiodinium*. *J. Pineal Res.*, 55: 89-100, doi:10.1111/jpi.12046
- Sorek, M., **Y.Z. Yacobi**, M. Roopin, I. Berman-Frank and O. Levy 2013. Photosynthetic circadian rhythmicity patterns of *Symbiodinium*, the coral endosymbiotic algae. *Proc R Soc B* 280: 20122942, doi.org/10.1098/rspb.2012.2942
- Sukenik, A., Carmeli, S., Hadas, O., Leibovici, E., Malinsky-Rushansky, N., Parparov, A., Pinkas, R., Viner-Mozzini, Y. and Wynne, D.** (2014) Water pollutants. Chapter 33. In: **Zohary T., Sukenik A, Berman T, Nishri A.** [eds] *Lake Kinneret: Ecology and Management*. Springer, Heidelberg (in press).
- Sukenik, A., Hadas, O., Kaplan, A.** 2014 Cyanobacteria. Chap. 12 In: **Zohary T., Sukenik A, Berman T, Nishri A.** [eds] *Lake Kinneret: Ecology and Management*. Springer, Heidelberg (in press).
- Sukenik, A., Kaplan-Levy, R. N., Viner-Mozzini, Y., Quesada, A. and Hadas, O.** (2013). Potassium deficiency triggers the development of dormant cells (akinetes) in *Aphanizomenon ovalisporum* (nostocales, cyanoprokaryota). *J Phycol* 49:580-7.
- Sukenik, A., Zohary, T., Markel, D.** 2014. The monitoring program. Chap. 32 In: **Zohary T., Sukenik A, Berman T, Nishri A.** [eds] *Lake Kinneret: Ecology and Management*. Springer, Heidelberg (in press).
- Tibor, G., Sade, R. Hall, J.K., Ben-Avraham, Z., **Nishri, A.** 2014. Lake Bathymetry and bottom morphometry. Chap. 4. In: **Zohary T., Sukenik A, Berman T, Nishri A.** [eds] *Lake Kinneret: Ecology and Management*. Springer, Heidelberg (in press).
- Tilahun, S.A., Guzman, C.D., Zegeye, A.D., Engda, T.A., Collick, A.S., **Rimmer, A., Steenhuis, T.S.** 2013. An efficient semi-distributed hillslope erosion model for the subhumid Ethiopian Highlands. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17:1051-1063. DOI:10.5194/hess-17-1051-2013
- van Emmerik, T.H.M., **Rimmer, A., Lechinsky, Y., Wenker, K.J.R., Nussboim, S., van de Giesen, N.C.** 2013. Measuring heat balance residual at lake surface using Distributed Temperature Sensing. *Limnol. Oceanogr. Methods* 11:79-90.
- Yacobi, Y.Z., Hadas, O., Erez, J.** 2014. Primary Production. Chap. 24 In: **Zohary T, Sukenik A, Berman T, Nishri A.** [eds] *Lake Kinneret: Ecology and Management*. Springer, Heidelberg (in press).
- Ziv, B., Shilo, E., **Rimmer, A.** 2014. Meteorology. Chap. 6. In: **Zohary T., Sukenik A., Berman, T., Nishri A.** [eds]. *Lake Kinneret – Ecology and Management*. Springer, Heidelberg (in press).
- Zohary, T, Sukenik A, Berman T, Nishri A.** [eds] 2014. *Lake Kinneret: Ecology and Management*. Springer, Heidelberg (in press).

- Zohary, T,** Gasith A. 2014. The Littoral zone. Chap. 29. In: Zohary T, Sukenik A, Berman T, Nishri A. [eds] Lake Kinneret: Ecology and Management. Springer, Heidelberg (in press).
- Zohary, T,** Hambright K.D., **Gal, G.** 2014. The pelagic foodweb: a synthesis. Chap. 17 In: Zohary T, Sukenik A, Berman T, Nishri A. [eds] Lake Kinneret: Ecology and Management. Springer, Heidelberg (in press).
- Zohary, T, Sukenik, A., Nishri, A.** 2014. Overview. Chap. 37. In: Zohary T, Sukenik A, Berman T, Nishri A. [eds] Lake Kinneret: Ecology and Management. Springer, Heidelberg (in press).
- Zohary, T, Sukenik, A., Berman, T.** 2014. *Peridinium gatunense*. Chap. 11. In: Zohary T, Sukenik A, Berman T, Nishri A. [eds] Lake Kinneret: Ecology and Management. Springer, Heidelberg (in press).
- Zohary, T, Yacobi, Y.Z., Alster A., Fishbein, T.,** Lippman, S. and Tibor, G. 2014. Phytoplankton. Chap. 10. In: Zohary T, Sukenik A, Berman T, Nishri A. [eds] Lake Kinneret: Ecology and Management. Springer, Heidelberg (in press).

5.4 דו"חות המעבדה בשנת 2013

מס' הדו"ח	המחבר/ת	נושא המחקר	סוג הדו"ח	הוגש ל-
T1	זהרי ת'	ממשק דגים בכנרת: משוונות גנטית ועד קורמורנים	שנתי	למדען הראשי במשרד החקלאות רשות המים
T2	אקרט ו' ואחרים	Characterization of methane cycling and redox coupling in Lake Kinneret using carbon isotopes.	שנתי	רשות המים
T3	אקרט ו' ואחרים	Development and implementation of a novel delayed-fluorescence based <i>in situ</i> profiler for primary productivity in aquatic systems.	שנתי	משרד המדע BMBF- MOS
T4	הדס א'.	האם האצה הירוקית מגושיה צפויה להחליף את פריחות הפרידיניום בכנרת? המשמעות לממשק האגם ולהספקת מים	שנתי	רשות המים
T5	אלסטר א'.	ניטור הפיטופלנקטון בשמורת החולה	שנתי	רט"ג
T6	אלסטר א'.	Phytoplankton monitoring in Lake Agmon.	שנתי	מיג"ל
T7	רימר א'.	עכירות ואיכות מים ירודה בתחנת השאיבה בטבריה, רום נקודת השאיבה לאביב-קיץ 2013.	סופי	תאגיד המים מי-רקת
T8	כרמל נ' ואחרים	שיפור ניטור הפלנקטון באגם בעזרת ה-FlowCAM.	שנתי	רשות המים
T9	גל ג'	מודל דיג בכנרת פיתוח ויישום מודל לשיפור ממשק הדיג	סופי	רשות המים
T10	נשרי ע' ואחרים	ניטור מתכות כבדות	שנתי	רשות המים
T11	נשרי ע' ואחרים	תרומת מזינים לשכבה הפוטית בכנרת	שנתי	רשות המים
T12	זהרי ת' ואחרים	ניטור ומחקרי כנרת. דו"ח פעילות המעבדה לשנת 2012	שנתי	משרד האנרגיה והמים
T13	נשרי ע' ואחרים	ניטור קידוחים ממערב לכנרת	שנתי	רשות המים
T14	סוקניק א' ואחרים	זמינות חנקן ופריחה קיצית של ציאנובקטריה בכנרת – האם ניתן לשלוט בפריחה על-ידי אספקה מוגברת של חנקן לאגם	שנתי	רשות המים
T15	הדס א' ואחרים	האם האצה הירוקית Mougeotia sp. צפויה להחליף את פריחות הפרידיניום בכנרת? המשמעות לממשק האגם ולהספקת מים	ביניים	רשות המים
T16	גל ג' ואחרים	יישום מודל תלת-ממדי לכנרת	סופי	רשות המים
T17	קפלן ר' ואחרים	Developing tools for DMA barcoding of the Kinneret phytoplankton species	שנתי	משרד האנרגיה והמים
T18	הדס א' ואחרים	שימוש בקרומי קרקע ביולוגיים כאמצעי לייצוב פני שטח וכסוי אתרי פסולת	ביניים	משרד האנרגיה והמים
T19	אקרט ו' ואחרים	Characterization of methane cycling and redox coupling in Lake Kinneret using carbon isotopes	ביניים	רשות המים
T20	כרמל נ' ואחרים	שיפור ניטור הפלנקטון באגם בעזרת מערכת ה-FlowCAM	סופי	רשות המים
T21	סוקניק א' ואחרים	זיהוי וכימות גורמים ביוטיים המעורבים בקריסה של אוכלוסיות פיטופלנקטון	ביניים	משרד המדע והטכנולוגיה
T22	נשרי ע' ואחרים	תרומת מזינים לשכבה הפוטית בכנרת	חצי שנתי	רשות המים
T23	הדס א' (מחקר של פרופ' ט' ברמן ז"ל)	Transparent exopolymer particles (TEP): Major factors in organic matter flux in Lake Kinneret	סופי	האקדמיה הלאומית למדעים
T24	רימר א' ועובדי המעבדה	חדשות כנרת מס' 34	שנתי	משרד האנרגיה והמים
T25	הדס א' ואחרים	האם האצה הירוקית מוגושיה תחליף את הפרידיניום במי הכנרת	שנתי	רשות המים