

יאר סוארי

המרכז הישראלי לחקר אסטוארים,
הפקולטה למדעי הים, המרכז
האקדמי רופין

דנה מילשטיין

חטיבת מדע וממשק, רשות הטבע
והגנים

מרב גלבוש

המרכז הישראלי לחקר אסטוארים,
הפקולטה למדעי הים, המרכז
האקדמי רופין

טל שדה

המרכז הישראלי לחקר אסטוארים,
הפקולטה למדעי הים, המרכז
האקדמי רופין

הדר צדקה

המרכז הישראלי לחקר אסטוארים,
הפקולטה למדעי הים, המרכז
האקדמי רופין

תום טופז

המחלקה למדעי הקרקע והמים,
המכון למדעי הסביבה, הפקולטה
לחקלאות, מזון וסביבה,
האוניברסיטה העברית בירושלים;
הפקולטה למדעי הים, המרכז
האקדמי רופין

ציטוט מומלץ

סוארי י, מילשטיין ד, גלבוש מ
ואחרים. 2022. רעילות אמוניה
כהסבר אפשרי לתמותות דגים
באסטוארים של נחלי החוף.
אקולוגיה וסביבה 13(2).



שפך אסטואר אלכסנדר לים | צילום: צוות המרכז הישראלי לחקר אסטוארים

רעילות אמוניה כהסבר אפשרי לתמותות דגים באסטוארים של נחלי החוף

22 בספטמבר, 2022

גיליון קיץ 2022 / כרך 13(2)

[חזית המחקר](#)

תקציר

תמותות המוניות של דגים, ובעיקר של קיפון בורי (*Mugil cephalus*), הן אירועים מוכרים באסטוארים של נחלי החוף הישראליים. בחרנו באירוע תמותה נרחב, שהתרחש בפרק זמן קצר במספר נחלי חוף באביב 2021, שישמש חקר מקרה לבדיקת הסיבה לאירועי תמותה מסוג זה. בעבר בחנו אנשי מקצוע וחוקרים אם מחסור בחמצן עשוי להיות גורם לתמותה, וכן בדקו נוכחות פתוגנים ותחלואה או רעילות של מזהמים אורגניים ואי-אורגניים בהקשר זה, אך לא התקבלו מסקנות חותכות. בהמשך הועלתה רעילות של אמוניה כגורם אפשרי לתמותה. אמוניה משתחררת לסביבה במהלך פירוק חומר אורגני ומצויה בשפע בנחלי החוף, שלרוב זורמים בהם גם קולחים. האמוניה המומסת נמצאת בשיווי משקל תלוי חומציות, טמפרטורה ומליחות בין שני צורונים, האמוניה היונית (NH_4^+) והצורון הלא מיון והרעיל (NH_3). ריכוזים גבוהים של הצורון הלא מיון פוגעים בממברנות של תאי עצב, ועשויים להוביל לפגיעה במערכת העצבים המרכזית ואף למוות. במחקר הנוכחי בוצע חישוב של ריכוז הצורון הלא מיון (הרעיל) על סמך מדידות של ריכוז האמוניה הכללית (סכום שני הצורונים), טמפרטורה ומליחות באסטואר נחל אלכסנדר בשנים 2014–2021. חישוב ריכוזי הצורון הלא מיון נעשה בהתאם לטווח ערכי ההגבה האופייני לאסטוארים בישראל, ונמצא שהם אינם מגיעים לערכים רעילים בערך הגבה של 7.5, אך הם גבוהים מסף הרעילות האקוטי שנמדד במעבדה ($\text{LC}_{50} 48\text{h}$) ב-25% מהזמן עבור ערך הגבה של 8.5. כמו כן, נמצא שריכוזי האמוניה הכללית וריכוזי הצורון הלא מיון והרעיל במי

האסטואר גבוהים יותר במהלך האביב מאשר בעונות אחרות, דבר התואם תצפיות של אירועי תמותה משמעותיים. הממצאים מצביעים על כך שאמוניה, באופן ישיר ובשילוב עם גורמי עקה נוספים, היא גורם שעשוי לתרום משמעותית לאירועי תמותה נרחבים. מחקר זה מצטרף למסקנות של מחקרים נוספים שמציגים את ההשלכות והנזקים לסביבה המימית מזרימות ממושכות של קולחים.

מבוא

באביב 2021, במהלך החודשים מרץ עד מאי, נצפו אירועי תמותה משמעותיים של דגים, בעיקר של בורי (*Mugil cephalus*) ממשפחת הקיפוניים, בחלקם התחתון (אסטואר) של הנחלים אלכסנדר, חדרה, שורק, לכיש והירקון. ייתכן שגורם התמותה היה חשיפה לזרימות קולחים, שמובילות לעומס נוטריינטים גבוה, לערכי חמצן נמוכים ולעלייה בריכוזי מזהמים אורגניים [17, 7, 4], אך הסיבות הספציפיות לאירועי התמותה אינן ברורות. אנשי מקצוע וחוקרים העלו מספר סברות, ובהן עלייה מואצת בטמפרטורת המים, מחסור בחמצן מומס, חשיפה למזהמים אורגניים ואי-אורגניים, תחלואה עקב חשיפה לפתוגנים, או שילוב של מספר גורמים יחד. ממדידות זמן אמת שנערכו באסטואר אלכסנדר [14, 4] עולה שמי העומק באסטואר מצויים במצב של חוסר חמצן ($anoxia$ מהזמן, ומי פני השטח נמצאים במצב זה 56% מהזמן, כך שנראה שמחסור בחמצן כשלעצמו אינו מספיק כדי להוות גורם יחיד לאירועי תמותה ממוקדים. כמו כן, במהלך אירוע התמותה שהתרחש באביב 2021 באסטואר של נחל לכיש נמדדו ריכוזי המזהמים האורגניים בדגים המתים (גד עופר, מידע בעל פה, אפריל 2022), ולא נמצאו ריכוזים חריגים. גם באירועים קודמים הממצאים היו דומים.

גורם אפשרי נוסף לתמותת דגים, שטרם נבחן בהקשר של תנאי העקה באסטוארים בישראל, הוא עלייה בריכוזי אמוניה. אמוניה היא אבן הבניין המרכזית בחלבונים המצויים בגופם של כל האורגניזמים, והיא מצויה בריכוזים גבוהים בקולחים שעשירים בחומר אורגני וגם בחומר אורגני שהתפרק למרכיביו האי-אורגניים. כאשר עומסי חומר אורגני גבוהים מגיעים לנחלי החוף בעקבות זרימת קולחים, ובשילוב נגר וסחף משדות חקלאיים, הם משפיעים תהליכים ביוגאוכימיים רבים. עלייה של ריכוז החומר האורגני באסטואר בעקבות זרימות אלה וצריכתו על-ידי אורגניזמים גורמות גם למחסור כרוני בחמצן בגופי מים [4]. בתנאים מסוימים אמוניה עשויה להיות רעילה לאורגניזמים. לכן, ריכוז כלל האמוניה הוא אחד הפרמטרים המנטרים בקביעות באגמים, בנחלים ובאסטוארים [3]. דגימה ומדידה בנפרד של צורוני האמוניה (המיוננים והלא מיוננים) קשה מאוד בתנאי שטח, ולכן מקובל לדגום את ריכוזי כלל האמוניה ולחשב את ריכוז הצורון הלא מיון על סמך נוסחאות שמתבססות על סדרה של ניסויי מעבדה [6].



תמותת דגי קיפון בורי בנובמבר 2015 | צילום: צוות המרכז הישראלי לחקר אסטוארים
זפרקציה המסיסה של אמוניה מתקיימת בשיווי משקל בין צורון מיון (אמוניום, NH_4^+) לאמוניה (NH_3) שאינה מיונת [6]. את אחוז המולקולות הנמצאות בכל אחד משני הצורונים מכתיבים בעיקר ערך ההגבה (pH), טמפרטורת המים והמליחות. ערך ההגבה נמוך (חומציות גבוהה) משמעו ריכוז גבוה יותר של יוני הידרוניום (H^+) במים, שחלק מהם מגיבים עם הצורון הלא מיון

של האמוניה וגורמים לעלייה באחוז הצורן המיון ממולקולות האמוניה הכללית ($\text{NH}_3^+ + \text{NH}_4$). לעומת זאת, כשערכי ההגבה עולים, ריכוז יוני ההידרוניום נמוך יותר, ואחוז צורן האמוניה הלא מיון עולה. התמיינות המולקולות בין שני הצורנים מושפעת במידה פחותה גם מהטמפרטורה (עליית טמפרטורה גורמת לעלייה בריכוז צורן האמוניה הלא מיון), ובמידה פחותה עוד יותר גם משינויים במליחות (עליית מליחות גורמת לירידה באחוז צורן האמוניה הלא מיון). השילוב של מנגנוני חלוקת היונים גורם לכך שבמים בטמפרטורה של 20 מעלות צלזיוס וערך הגבה של 7.0 הצורן הלא מיון הוא 0.4% מכלל האמוניה, ובאותה טמפרטורה בערך הגבה של 8.5 הצורן הלא מיון הוא 11.3% מכלל האמוניה.

אמוניה בצורתה הלא מיונת גורמת להשפעות מזיקות על בעלי חיים, והעיקרית שבהן היא ההשפעה על מערכת העצבים המרכזית^[12]. הצורן הלא מיון פוגע בממברנות התא של תאי העצב בצורה שמביאה לעלייה בריכוזי הנתרן והסידן. העלייה בריכוזים פוגעת בתפקוד התאים, ועשויה להוביל לתמותה. מידת הרעילות של האמוניה מושפעת משילוב של ריכוזה בסביבה עם זמן החשיפה של האורגניזם למולקולה. מידת העמידות לאמוניה משתנה מאוד בין מיני אורגניזמים ושלבי חיים שונים. מבין הדגים המאכלסים את האסטוארים, דגי קיפון הבורי רגישים יחסית לאמוניה. ספי הרעילות האקוטית, שנקבעו במספר מחקרי מעבדה^[18] כריכוז שגורם לתמותה של 50% מהפרטים (LC_{50}) של קיפון בורי, הם בטווח שבין 1.2 ל-2.3 מ"ג לליטר. השפעתה של האמוניה אינה מסתכמת בהשפעות אקוטיות וקצרות-טווח, ומסתבר שגם בריכוזים נמוכים יותר, ובייחוד בשילוב עם גורמי עקה נוספים כמו מחסור בחמצן, יש לאמוניה השפעות כרוניות^[12].

זרמת קולחים לנחלים היא פרקטיקה נפוצה בעולם, אך בישראל, ובאזורים צחיחים למחצה בכלל^[7], זרימות של קולחים בנחלים מקבלות משמעות יתרה, שכן ספיקות הבסיס בנחלים נמוכות מאוד או שאינן קיימות כלל. נחלים באזורים אלה מוגדרים כנשלטים על-ידי קולחים (effluent-dominated) וסובלים משמעותית מירידה באיכות המים ומפגיעה אקולוגית ובריאותית^[8]. הקולחים הזורמים לנחלי החוף בישראל בגלל מגבלות הולכה, עודפים ותקלות במערכת הטיפול, זורמים במורד הנחלים ונכנסים לאסטוארים בדרכם אל הים התיכון. האסטוארים הקטנים בקו החוף הישראלי משתרעים על פני מספר קילומטרים. התנאים הפיזיקליים והכימיים בהם בעקבות מפגש מי הנחל עם מי הים שחודרים לנחל וזורמים סמוך לקרקעית במעלה האסטואר, אפשרו היווצרות של מערכות אקולוגיות ייחודיות. זמן השהות האופייני למי נחל אלכסנדר נע בין 12 ל-37 ימים^[14]. זהו פרק זמן ארוך באופן יחסי, ולכן האסטוארים כמערכת אקולוגית רגישים אף יותר מנחלים לעומס חומרי הזנה שמקורו בזרימות הקולחים. ואכן, ריכוזי האמוניה הכללית בגופי מים אלה מגיעים לפרקים לערכים גבוהים מהמקובל בגופי מים טבעיים אחרים. לדוגמה, החל משנת 1995, במסגרת תוכנית הניטור הלאומית בים התיכון^[3] של חוקרי חקר ימים ואגמים לישראל, נדגמים פעמיים בשנה מי האסטוארים מעשרה נחלים מייצגים. בניטור נמצא שבשמונה מעשרת הנחלים הנדגמים נמצאו יותר מפעם אחת ריכוזי אמוניה כללית שעלו על 10 מ"ג לליטר^[3]. אומנם אין בישראל תקן לריכוז סביבתי, אך תקן ההזרמה לנחלים הוא 2.5 מ"ג לליטר^[6].



מידת נתונים פיזיקליים של המים (באמצעות CTD) בראש אסטואר אלכסנדר / צילום: המרכז הישראלי לחקר אסטוארים
במסגרת מחקר אקולוגי ארוך-טווח המתבצע באסטואר של נחל אלכסנדר נמדדים ריכוזי האמוניה הכללית אחת לחודש החל משנת 2014, והם זמינים באתר האינטרנט של המחקר [2]. במאמר זה אנו מנתחים את בסיס נתוני המחקר כמודל לאסטוארים של נחלי החוף. אנחנו מאפיינים את המהלך השנתי של ריכוזי האמוניה הכללית ושל הפרקציה הלא מיוננת. מטרת המחקר היא לבחון אם אמוניה בלתי מיוננת עשויה להוות גורם משמעותי באירועי תמותת דגים באסטוארים של נחלי החוף בישראל.

שיטות וחומרים

במסגרת המחקר האקולוגי ארוך-הטווח של המרכז לחקר אסטוארים, מי אסטואר אלכסנדר נדגמים אחת לחודש החל משנת 2014 בארבע נקודות לאורך האסטואר (הדגימה לא התקיימה ברוב שנת 2019). דוגמאות מים נאספות בפני השטח ובעומק עומדות המים סמוך לקרקעית בנקודות שעומק המים בהן עולה על חצי מטר. ריכוזי האמוניה הכללית נקבעו במעבדת המרכז לחקר אסטוארים בשיטה פלואורומטרית [10] המתבססת על הוספת ריאגנט (OPA) שמגיב עם אמוניום ויוצר תצמיד פלואורסצנטי. השיטה עברה התאמות כך שבוצע עקום כיול פנימי לכל דוגמה. שיטה זו מפצה על ההשפעות של שינויים במאפייני המים (matrix effect) בין התחנות השונות באסטואר.

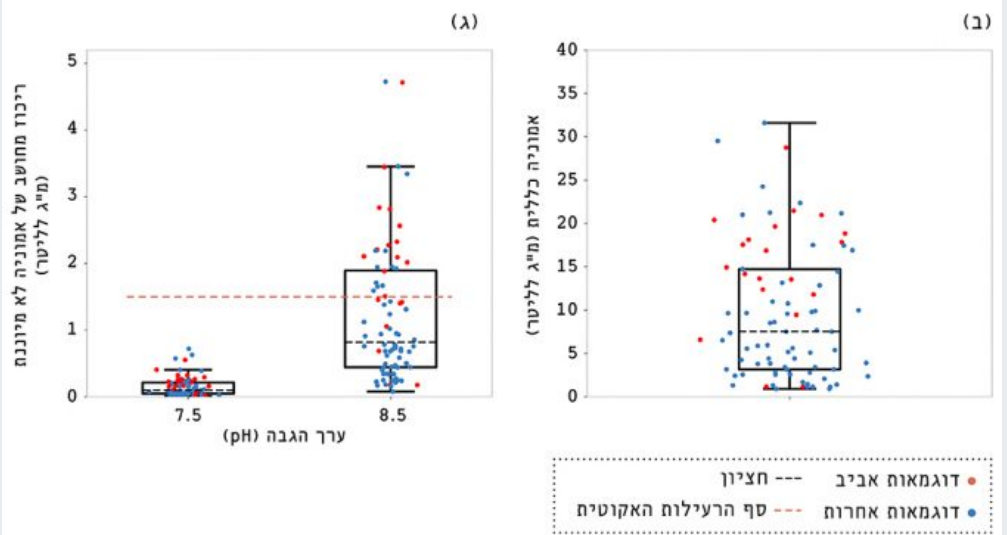
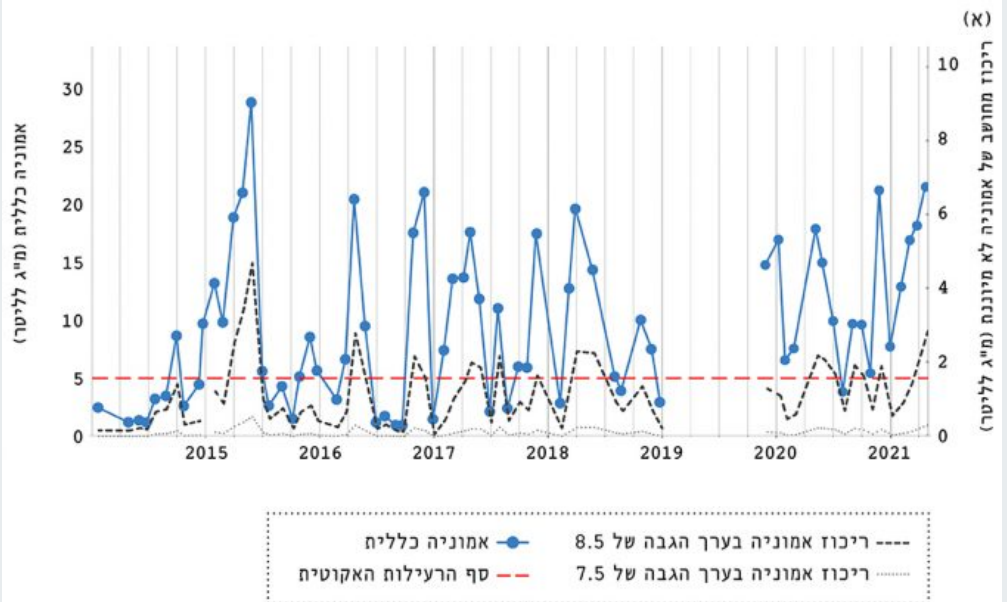
ריכוז צורן האמוניה הלא מיון (הרעיל) חושב מנתונים שנאספו בשנים 2014–2021, בהתחשב בריכוז האמוניה הכללית, בטמפרטורה ובמליחות שנמדדו בזמן הדגימה [6]. מכיוון שלא התבצעו במסגרת המחקר מדידות סדירות של ערך הגבה, החישוב התבצע עבור ערכי הגבה של 7.5 ו-8.5. ערכי הגבה אלה משקפים את טווח ערכי ההגבה במדידות שבוצעו במסגרת תוכניות ניטור מימי החופים [3] ותוכניות הניטור באסטוארים של הנחלים קישון, לכיש והירקון.

תוצאות ודיון

ריכוזי האמוניה הכללית באסטואר אלכסנדר בשנות הדגימה (איור 1) נעו בין ריכוזים של מיליגרמים בודדים לליטר לריכוז של 30 מ"ג לליטר. במהלך רוב שנות המחקר הריכוזים היו יציבים יחסית. מנעד הריכוזים כלל גם דפוס עונתי: ריכוזי האמוניה הכללית הגבוהים ביותר נמדדו באביב (מרץ עד מאי) של שנת 2021, שנצפתה בו תמותת דגים במרבית נחלי החוף, נמדדו ריכוזי אמוניה של 17 עד 25 מ"ג לליטר. ריכוזים אלה גבוהים רק במעט מהריכוזים שנמדדו ברוב השנים הקודמות.

איור 1. סדרת זמן ותרשים קופסאות של ריכוזי כלל האמוניה ושל האמוניה הלא מיוננת

א. סדרת זמן של ריכוזי האמוניה באסטואר אלכסנדר בשנים 2014–2021. מוצגים ריכוזי כלל האמוניה (ציר y משמאל) וריכוזי צורן האמוניה הלא מיוננת (ציר x מימין). ריכוזי צורן האמוניה הלא מיוננת שגבוהים מהקו האדום האופקי, חוצים את סף הרעילות האקוטית (LC_{50} 48h) של אמוניה לדגי קיפון בורי (1.5 מ"ג לליטר). ב. ריכוזי האמוניה הכללית באביב ובשאר חודשי השנה שנמדדו במרכז אסטואר נחל אלכסנדר במהלך השנים 2014–2021. ג. ריכוזי צורן האמוניה הלא מיוננת באותם חודשים, שחושבו לפי ערכי הגבה של 7.5 ו-8.5 ועל סמך מדידות הטמפרטורה והמליחות בזמן הדגימה. הקו האופקי האדום מייצג את סף הרעילות האקוטית (LC_{50} 48h) של אמוניה לדגי קיפון בורי (1.5 מ"ג לליטר).



איור 1

סדרת זמן ותרשים קופסאות של ריכוזי כלל האמוניה ושל האמוניה הלא מיוננת

א. סדרת זמן של ריכוזי האמוניה באסטואר אלכסנדר בשנים 2014–2021. מוצגים ריכוזי כלל האמוניה (ציר y משמאל) וריכוזי צורן האמוניה הלא מיוננת (ציר x מימין). ריכוזי צורן האמוניה הלא מיוננת שגבוהים מהקו האדום האופקי, חוצים את סף הרעילות האקוטית (LC_{50} 48h) של אמוניה לדגי קיפון בורי (1.5 מ"ג לליטר). ב. ריכוזי האמוניה הכללית באביב ובשאר חודשי השנה שנמדדו במרכז אסטואר נחל אלכסנדר במהלך השנים 2014–2021. ג. ריכוזי צורן האמוניה הלא מיוננת באותם חודשים, שחושבו לפי ערכי הגבה של 7.5 ו-8.5 ועל סמך מדידות הטמפרטורה והמליחות בזמן הדגימה. הקו האופקי האדום מייצג את סף הרעילות האקוטית

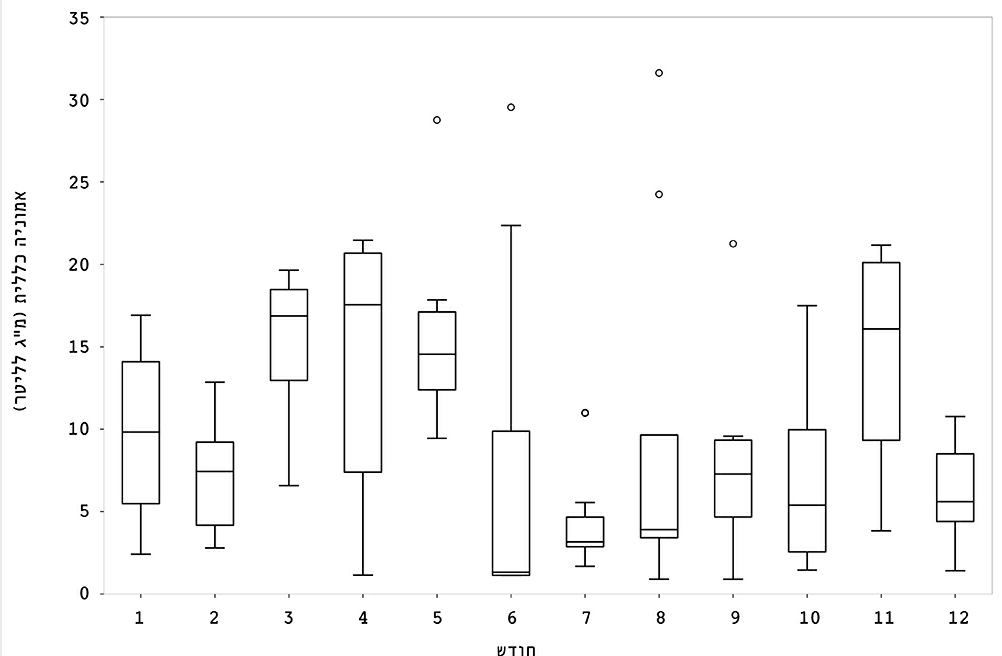
(LC₅₀ 48h) של אמוניה לדגי קיפון בורי (1.5 מ"ג לליטר).

חישוב ריכוזי צורן האמוניה הלא מיון (והרעיל) מראה שבהיתן סף ערכי ההגבה הנמוך שנבחר (7.5), ריכוזי האמוניה שנמדדו עשויים לגרום להשפעות כרוניות אך לא חצו את סף הרגישות האקוטי. עם זאת, בהיתן ערך הגבה של 8.5 נחשפו הדגים ב-25% מהמדידות החודשיות לריכוזי אמוניה רעילים, וב-12 מהן היו הריכוזים אפילו כפולים מסף הרעילות האקוטי ואף למעלה מכך. ערך ההגבה באסטוארים צפוי להיות דינמי, מכיון שהוא מושפע משני מקורות מים דומיננטיים – הים ומעלה הנחל. בים ערך ההגבה יציב יחסית – 8.1 [9]. לעומת זאת, משרעת ערכי ההגבה במי הנחל רחבה יותר, ועשויה לנוע סביב 7 כאשר מקור המים הוא מי מערכת או קולחים, ולעלות לערכים של 8 ואף יותר כאשר מקור המים טבעי ונשלט על-ידי מערכת קרסטית האופיינית לישראל. הערכות אלה מבוססות על הסוג והריכוז של המומסים במי הנחלים של ישראל, ומתאימות גם לסוג הממצאים בשטח. בתוכנית הניטור הלאומית בים התיכון [3] נמצא ש-18 מ-40 ערכי הגבה שנמדדו באסטוארים של נחלי החוף היו גבוהים מ-8. נוסף על התכונות הכימיות של מי האסטואר, היצרנות הראשונית וקצבי הנשימה הגבוהים באסטואר [4] צפויים לגרום לשינויים משמעותיים בערך ההגבה של המים. במחקר שנערך בנהר התמזה (Thames) באנגליה [11] נצפתה עלייה של ערך ההגבה מ-8.4 ל-8.6 במקביל לעלייה של ריכוז החמצן המומס מריכוז הרוויה לריכוז של 125% רוויה. השפעת היצרנות הראשונית על ערך ההגבה צפויה להיות משמעותית עוד יותר באסטואר אלכסנדר, שבפני השטח שלו בחודשים אפריל עד יוני 2021 נעו ריכוזי החמצן בין 4% רוויה בשעות הלילה ל-150% רוויה בצהריים [2].

ריכוזי האמוניה הכללית באסטואר אלכסנדר משתנים במחזוריות עונתית (איור 2). בחודשי הקיץ והסתיו (יוני-אוקטובר) ריכוזי האמוניה הכללית היו בטווח 2-8 מ"ג לליטר, והיו נמוכים מהריכוזים שנמדדו בשאר חודשי השנה. הריכוזים הגבוהים ביותר נמדדו באביב (מרץ-מאי) ובחודש נובמבר, אז מעל ל-50% מהזמן הריכוז היה גבוה מ-10 מ"ג לליטר. עקב התבנית העונתית הזו, כמעט כל המדידות של ריכוזי אמוניה הגבוהים מ-20 מ"ג לליטר מרוכזות בחודשי האביב ובנובמבר. בשיא החורף נמדדו ריכוזים בינוניים, שנעו ברוב המקרים בין 2 ל-15 מ"ג לליטר.

איור 2. ריכוזי כלל צורני האמוניה על פי חודשי השנה. הריכוזים נמדדו אחת לחודש באסטואר נחל אלכסנדר בשנים 2014-2021

הקופסאות החודשיות מציגות את האחוזונים 25 עד 75, והקו האופקי בכל קופסה מציג את החציון. הקווים האנכיים היוצאים מהקופסאות מציגים טווח הנתונים המלא. העיגולים מייצגים ערכי קיצון (במקרה כאן, ריכוזים גבוהים מהרבעון השלישי ביותר מ-1.5 פעמים טווח הריכוזים הבינ-רבעוני).



איור 2

ריכוזי כלל צורני האמוניה על פי חודשי השנה. הריכוזים נמדדו אחת לחודש באסטואר נחל אלכסנדר בשנים 2014-2021

הקופסאות החודשיות מציגות את האחוזונים 25 עד 75, והקו האופקי בכל קופסה מציג את החציון. הקווים האנכיים היוצאים מהקופסאות מציגים טווח הנתונים המלא. העיגולים מייצגים ערכי קיצון (במקרה כאן, ריכוזים גבוהים מהרבעון השלישי ביותר מ-1.5 פעמים טווח הריכוזים הבינ-רבעוני).

מהרבעון השלישי ביותר מ-1.5 פעמים טווח הריכוזים הבין-רבעוני).

מקור המים העיקרי באסטואר אלכסנדר הוא שפכים מהרשות הפלסטינית, המטופלים חלקית במתקן הטיפול בשפכים "יד חנה". להערכתנו, המחזוריות השנתית של ריכוזי האמוניה נובעת משני גורמים עיקריים: א. הזרמות שיא של קולחים לנחלים בעונת האביב עקב עודפים ופינוי אוגר במאגרי קולחים להשקיה; ב. שילוב של השפעות טמפרטורה ומיהול של מי האסטואר במי ים ומי גשמים בחורף. ריכוזי החנקות בכלל, והאמוניה בפרט, במי גשמים ^[1] ובמי הים ^[3] נמוכים משמעותית מאלה הנמדדים בקולחים שמזינים את נחל אלכסנדר, ולכן מיהול מי הנחל במי ים ובמי גשמים ^[14] בחודשי החורף צפוי לגרום לירידה בריכוז האמוניה. המיהול צפוי להיות משמעותי עוד יותר בעקבות הסרת שרטון החול בין הים לנחל, שתביא לחדירה מוגברת של מי ים בחודשים אלה ^[14]. השפעת הטמפרטורה מתבטאת בתהליך ההסרה של חנקות מהמים (דה-ניטריפיקציה). מטא-אנליזה ^[12] שבוצעה על קצבי דה-ניטריפיקציה ב-24 אסטוארים ובסביבות אקוויטיות נוספות הראתה שקצב התהליך בקיץ כפול מהקצב בחורף. ולכן, מתקני הטיפול בשפכים ותהליכים פנימיים באסטואר מסירים כמות גדולה יותר של חנקות בחודשי הקיץ. ריכוזי האמוניה הגבוהים שנמדדו בחודש נובמבר, עונת מסיק הזימים, קשורים כנראה להזרמות מוחל (פסולת נוזלית שמנונית מעיבוד זימים) מבתי בד בגדה המערבית לנחל שכם. המוחל, חומר בעל פעילות אנטי בקטריאלית ^[17], פוגע ביכולת הפעולה של מתקני הטיפול בשפכים, ולכן השפכים מוזרמים אל נחל אלכסנדר לאחר טיפול חלקי בלבד, אם בכלל.



יום יפה בשפך נחל אלכסנדר. בשנת 2017 לא הוזרמו קולחים לאסטואר, ובסוף הקיץ ילדים ומשפחות החלו לטבול בקרבתו / צילום: צוות המרכז הישראלי לחקר אסטוארים

בחודשי האביב שהתרחשה בהם תמותת הדגים בשנת 2021, ספיקת הקולחים לנחלי החוף עלתה באופן משמעותי. הסיבות לעלייה היו שהמאגרים היו מלאים במי גשמים, הצריכה החקלאית הייתה נמוכה, וספיקות השפכים המשיכו להיות גבוהות. נוסף על כך, הקולחים שזרמו לנחלים לא נמהלו, והטמפרטורות היו נמוכות מכדי להאיץ תהליכי פירוק, ולכן ריכוזי האמוניה היו גבוהים, ואיתם עלה גם פוטנציאל הרעילות לדגים ולמערכת האקוויטית בכלל. התבנית העונתית החזקה של ריכוזי האמוניה (איור 2), הכלורופיל והחמצן ^[14] מפחיתה כנראה את יכולת הדגים להפעיל מנגנוני הסתגלות להתמודדות עם רעילות האמוניה ^[13], ומגדילה את הסיכויים לאירועי תמותה נרחבים. במרבית נחלי החוף מתרחש שחרור מוגבר של קולחים בסוף החורף ובתחילת האביב, גם בנחלים שנצפתה בהם תמותת דגים נרחבת, ועל כן המחזוריות שנמדדה בנחל אלכסנדר מוצעת כמנגנון כללי לנחלי חוף.

לאורך המאמר התייחסנו לסף רעילות אקוטי של 1.5 מ"ג לליטר ^[18], אולם יש לציין שספי רעילות אקוטית אינם מציגים את התמונה במלואה. בעוד ש-50% מהדגים ימותו בריכוז זה לאחר חשיפה של 48 שעות, אחוזים משמעותיים מהאוכלוסייה עשויים להיפגע ולמות בריכוזים נמוכים יותר, בעיקר בזמני חשיפה ארוכים יותר. לדוגמה, קריטריון איכות המים הסיני, שעודכן בשנה שעברה ^[19], מסתמך על הריכוז המינימלי שמעליו צפויה פגיעה לכ-5% מתוך אסופה של 53 מיני אורגניזמים. הקריטריון

המעודכן מציג ערך סף של 1.05 מ"ג אמוניה כללית לליטר לחשיפה קצרת-טווח (עד שעה אחת, אחת לשלוש שנים) בערך הגבה של 8.5 ובטמפרטורה של 25 מעלות. לעומתו, ערך הסף לחשיפה ארוכת-טווח (ממוצע נע במשך ארבעה ימים) עומד על 0.18 מ"ג אמוניה כללית לליטר באותם תנאים סביבתיים, ריכוז שכ-95% מהמדידות באסטואר האלכסנדר חורגות ממנו.

נוסף על ספי הרעילות השונים לאורגניזמים שונים, חשוב להדגיש שהשפעות האמוניה אינן מתרחשות במערכת מבודדת, ושהאורגניזמים השונים, קיפונים במקרה הנוכחי, חשופים לעקות נוספות, כדוגמת מחסור בחמצן וחשיפה למזהמים נוספים בעלי השפעות כרוניות, כגון חומרי הדברה ותרופות [16,15]. מעבר לסיכון הישיר מהמזהמים ומהמחסור בחמצן, החשיפה הממושכת עשויה להוביל להשפעות מאגברות, ולהסתגלות של גורמי דחק שונים שיובילו להחלשת אוכלוסיית הקיפונים ולהיווצרות רגישות מוגברת לפתוגנים, שבעקבותיהן עשויה לחול התפרצות של תחלואה שתוביל לתמותה.



ום איסוף דגימות מנחל אלכסנדר / צילום: צוות המרכז הישראלי לחקר אסטוארים

מסקנות

הנתונים שנאספו לאורך שבע שנות ניטור ומחקר מראים שצורן האמוניה הלא מיוון עשוי להוות גורם תמותה משמעותי לדגי קיפון בורי באסטוארים של נחלי החוף. מידת הרעילות של אמוניה משתנה בין העונות, והיא גבוהה יותר בחודשי האביב ובחודש נובמבר. בדומה להעתרה, גם מקור האמוניה הוא בהזרמת קולחים לנחלים. מחקר זה מדגיש את החשיבות של ניטור רציף וסדרות נתונים ארוכות, ומצטרף למסקנות של מחקרים נוספים מהעשורים האחרונים שמציגים את ההשלכות והנזקים לסביבה המימית מזרימות ממושכות של קולחים.

תודות

הכותבים מבקשים להודות לקרן הקימת לישראל המממנת את ניטור נחל אלכסנדר, לפרופ' גיתי יהל שייסד את פרויקט הניטור, לקארין פיטליק שסייעה באנליזות המעבדה של האמוניה, ולכל המשתתפים בתוכנית הניטור לאורך השנים.

הלכה למעשה

ד"ר רוז תמיר, רכז ועדת ההיגוי הבין-משרדית לצמצום הזרמות עודפי קולחים לסביבה:

למחקר זה תרומה קריטית לקבלת החלטות במסגרת הצורך בטיפול בקולחים והבנת הדרך המיטבית למשטר הזרמתם. בכך, הוא מצטרף למחקרים נוספים המציגים את ההשלכות והנזקים של הזרמות הקולחים לסביבה המימית בישראל.

הדבר הראשון במעלה שהמחקר מחזק הוא הקשר ההדוק שבין האיכות הנמוכה של הקולחים המוזרמים לנחלים ובין הנזק הסביבתי הנגרם. ההיבט השני שהמחקר מדגיש הוא חשיבות אופן ההזרמה (העיתוי, הקשר והספיקה).

קבוצת מחקר זו הדגישה בעבר את הצורך בהטמעת מערך הזרמת קולחים לנחלים באופן 'שיטפוני'. הכוונה היא לאגירה של קולחים ולהזרמה מהירה ומבוקרת של ספיקות גבוהות בפרק הזמן הקצר ביותר. לכן, להמלצתם, יש לבצע בחורף את ההזרמות בספיקות גבוהות ובסמיכות לאירועי שיטפון צפויים.

במחקר מודגשת הקריטיות שבתכנון ובהטמעה של 'השיטה' במערכות ההזרמה האופרטיביות. הטמעה זו תאפשר מעבר מהזרמות כרוניות הפוגעות בסביבה המימית עקב זמני חשיפה ארוכים בטמפרטורות גבוהות, לחשיפה קצרה בזמן שהמים קרים יותר. כך תיגרם פגיעה סביבתית מינימלית. רשות המים החלה בתהליכי חשיבה והטמעה של הזרמה שיטפופית כמתואר.

מקורות

1. באסה א. 2019. תפקיד מיקרואסטוארים בקביעת גורל נוטריאנטים המגיעים אל הים: נחל אלכסנדר כמקרה בוחן (עבודה לקבלת תואר שני). רחובות: האוניברסיטה העברית בירושלים.
2. המרכז לחקר אסטוארים. www.estuaries.org.il
3. חרות ב, סגל י, סילברמן ג' ואחרים. 2020. תוכנית הניטור הלאומית בים התיכון לשנת 2020, חלק 3 – ניטור זיהום ים (דוח חקר ימים ואגמים H50/2018).
4. סוארי י, שיש ל, גפני ש ואחרים. 2017. [עקות חמצן מתמשכות באסטואר של נחל אלכסנדר](#). *אקולוגיה וסביבה* 8(3): 44–52.
5. תקנות בריאות העם (תקני איכות מי קולחין וכללים לטיהור שפכים). התש"ע-2010.
6. Bower CE and Bidwell JP 1978. Ionization of ammonia in seawater: Effects of temperature, pH, and salinity. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* **35**: 1012–1016.
7. Brooks BW, Riley TM, and Taylor RD. 2006. Water quality of effluent-dominated ecosystems: Ecotoxicological, hydrological, and management considerations. *Hydrobiologia* **556**(1): 365–379.
8. Hamdhani H, Eppehimer DE, and Bogan MT. 2020. Release of treated effluent into streams: A global review of ecological impacts with a consideration of its potential use for environmental flows. *Fresh Water Biology* **65**(9): 1657–1670.

9. Hassoun AER, Fakhri M, Raad N, et al. 2019. The carbonate system of the Eastern-most Mediterranean Sea, Levantine Sub-basin: Variations and drivers. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* **164**: 54–73.
10. Holmes RM, Aminot A, K  rouel R, et al. 1999. A simple and precise method for measuring ammonium in marine and freshwater ecosystems. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **56**: 1801–1808.
11. Neal C, Harrow M, and Williams R. 1998. Dissolved carbon dioxide and oxygen in the River Thames: Spring–summer 1997. *Science of the Total Environment* **210–211**: 205–217.
12. Pina OE and Álvarez CM. 2006. Denitrification in aquatic environments: A cross-system analysis. *Biogeochemistry* **81**(1): 111–130.
13. Randall DJ and Tsui TKN. 2002. Ammonia toxicity in fish. *Marine Pollution Bulletin* **45**: 17–23.
14. Suari Y, Amit T, Gilboa M, et al. 2019. Sandbar breaches control of the biogeochemistry of a micro-estuary. *Frontiers in Marine Science* **6**: 224.
15. Topaz T, Boxall ABA, Suari Y, et al. 2020. The ecological risk dynamics of pharmaceuticals in micro-estuary environments. *Environmental Science and Technology* **54**: 11182–11190.
16. Topaz T, Egozi R, Suari Y, et al. 2020. Environmental risk dynamics of pesticides toxicity in a Mediterranean micro-estuary. *Environmental Pollution* **265**: 114941.
17. Tsagaraki E, Lazarides HN, and Petrotos KB. 2007 Olive mill wastewater treatment. In: Utilization of by-products and treatment of waste in the food industry. Boston (MA): Springer.
18. US-EPA. 1985. Ambient water quality criteria for ammonia – 1984.
19. Yan Z, Zheng X, Fan J, et al. 2020. China national water quality criteria for the protection of freshwater life: Ammonia. *Chemosphere* **251**: 126379.