

התוכנית הלאומית לניטור מפרץ אילת

יונתן שקד

האוניברסיטה העברית, המכון
הבינאוניברסיטאי למדעי הים
באילת

Yonathan.s@mail.huji.ac.il

תקציר

התוכנית הלאומית לניטור מפרץ אילת אוספת נתונים מרובים ומגוונים מזה שני עשורים במטרה לאפיין את מצבה של המערכת הטבעית בצפון מפרץ אילת, וליצור מסד נתונים אובייקטיבי וזמין. משך הזמן הארוך ואופיים הסדור של הנתונים הנאספים מאפשרים הפרדה של תנודות זמניות ומגמות מתמשכות, כמו גם זיהוי של אירועים חריגים. בפרק זה מוצגות שלוש דוגמאות מתחומים שונים שבהם עוסקת התוכנית, הממחישים את אופן הפעולה והיתרונות של ניטור מתמשך במפרץ.

הדוגמה הראשונה עוסקת בניטור שונית אלמוגים והדרכים שבהן מנסה התוכנית לאמוד את בריאותה. בפרט מתוארים השינויים באחוז כיסוי האלמוגים, התפלגות גודלי המושבות ושינויי המגוון בשני העשורים האחרונים. נמצאו תנודות רבות במהלך השנים ובכל זאת, ניתן לומר כי שוניות אילת בריאות יותר מאשר היו בתקופה שבה החל הניטור. עם זאת, בשנים האחרונות נמצאה האטה במגמת השיפור ואף הידרדרות מסוימת המשויכת, בחלקה, לפגיעתה של סערה דרומית חזקה.

הדוגמה השנייה עוקבת אחר המחזוריים הרב-שנתיים בריכוזי נוטריינטים במים העמוקים. לרוב, המים העליונים במפרץ עניים בחומרי מזון, אך ערבוב עמודת המים מעלה נוטריינטים מהעומק ומזין יצרנות ראשונית ואת כל מארג המזון. בד בבד יורדים ריכוזי הנוטריינטים במים העמוקים. בתקופת הניטור מתועדים ארבעה מחזורים של ערבוב עמוק; בשנים הראשונות לניטור היו ריכוזי החנקן (נוטריינט עיקרי) במי העומק גבוהים, אך לאחר כל ערבוב עמוק הצטברו מחדש לאט יותר – עד לערבוב העמוק האחרון (2022) שבעקבותיו עלה ריכוז החנקן בעומק מהר מאשר במחזורים קודמים. העשרת המים בנוטריינטים היא תהליך אשר עשוי לפגוע במרקם הקיים במפרץ.

הדוגמה השלישית עוקבת אחר עליית טמפרטורת המים והשלכותיה האפשריות על המערכת. התחממות המים העליונים מהווה איום ישיר על שוניות אלמוגים עקב רגישותם של האלמוגים לטמפרטורות גבוהות. בנוסף לכך, ערבוב עונתי של עמודת המים תלוי בהפרשי הטמפרטורות בין פני הים ובין המים העמוקים. על כן, שינויים במשרעת הטמפרטורות בין העומקים עשויים לשנות את תדירות, עומק ומשך הערבוב העונתי, וכך לשנות את אופייה של המערכת. תוכנית הניטור מתעדת עלייה מתמשכת בטמפרטורה, הן של המים העמוקים והן של פני הים, אך פני הים מתחממים בקצב מהיר יותר וכך, חורפים של ערבוב עמוק הפכו נדירים יותר לאורך התקופה שבה פועלת התוכנית.

את המערכת בביטחון רב יותר ולהפריד בין תנודות מחזוריות ובין שינויים מגמתיים.

הניטור במפרץ אילת עוקב אחר בתי גידול ומשתנים סביבתיים רבים בתדירות שנה על פני טווח של שנייה ועד שנה – כתלות במשתנה הנמדד. ממצאי הניטור עשויים להיות מתוקשרים בזמן התרחשותם ובכל מקרה, הינם מתועדים בדוחות הניטור השנתיים המוגשים למשרד להגנת הסביבה ומפורסמים לציבור.

במשך הזמן, הצביעו מדידות הניטור על מפגעים מקומיים (למשל, מוקדי כניסה לים של נוטריינטים או הפרעות פיזיות באזורים החופיים), בעיות אקולוגיות בזמן התהוותן (למשל, תמותת דגים כתאומית, פריחת אצות, תמותת קיפודי-ים, פגיעה בעשבי-הים) ושינויים דרמטיים גם מסיבות טבעיות (למשל, סערות חזקות או סדרות של שיטפונות והשפעתן המיידית על המערכת). אך מעבר לכך, המעקב הרציף והמתמשך אחר מרכיבי המערכת האקולוגית במפרץ אילת מאפשר אפיון טוב של טווח הערכים הטבעי לה, עבור מגוון משתנים חשובים (למשל, טמפרטורות וריכוזי נוטריינטים במים העליונים והעמוקים, גלים וזרמים אופייניים, אחוז הכיסוי ומצאי סוגי האלמוגים בשוניות, אפיון קרקעית הים הרדוד באתרים שונים ועוד ועוד).

בהמשך הפרק מובאות מספר דוגמאות לממצאי הניטור המתמשך באילת.

התוכנית הלאומית לניטור מפרץ אילת (להלן, "תוכנית הניטור", "התוכנית") הוקמה על-ידי המשרד להגנת הסביבה בכדי ליצור תשתית ידע מדעי שעליו ניתן יהיה לבסס החלטות בהקשר לשימור ופיתוח הסביבה הימית באילת. התוכנית פועלת במתכונת סדורה כבר כעשרים שנים, באמצעות המכון הבינאוניברסיטאי למדעי הים באילת, על-ידי צוות מקצועי ומיומן שמעסיקה האוניברסיטה העברית במימון והנחיית המשרד להגנת הסביבה.

באופן זה, תוכנית הניטור נשענת על ידע נרחב אשר נצבר במכון הבינאוניברסיטאי במשך עשורים רבים קודם להקמתה, ונהנית משיתוף פעולה קרוב עם קהילת מדעני הסביבה הימית הפועלת במפרץ. התוכנית מנוהלת על-ידי ועד מנהל בראשות המדענית הראשית של המשרד להגנת הסביבה וכולל מדעני ים ונציגים מהמשרד ומרשות הטבע והגנים.

בעשורים האחרונים עולה ההכרה בחשיבותן ויתרונותיהן של תוכניות ניטור בשמירה על הסביבה הטבעית, ובמשך הזמן מתגבשים הקווים המנחים אשר הופכים תוכניות ניטור לתוכניות אפקטיביות (למשל,¹).

בין היתר, מדובר ביצירת סדרות זמן רציפות ורבות שנים שבהן נעשה שימוש במיטב הכלים המדעיים בלי לוותר על יציבות אשר מאפשרת המשכיות ומקלה על ניתוח הנתונים הנאספים; שמירה על קשר עם מטרות הניטור ובמקרה זה, צורכי המשרד להגנת הסביבה; וחילופי ידע עם קהילת מחקר פעילה: מצד אחד, הנתונים שאותם אוספת התוכנית זמינים לקהל בכלל ולקהילת המדענים בפרט ומשמשים במחקרים רבים ומגוונים, ומצד שני, הניטור נעזר בקהילת המדענים לגבי שיטות העבודה, פירוש התוצאות ועוד. באופן זה מתאפשרים בחינה מדוקדקת של הנתונים, שיפור ההבנה והידע לגבי המפרץ, ועדכון השיטות בהתאם לכלים מדעיים חדשים.

ניטור סביבתי יכול לבוא לידי ביטוי בשני אופנים עיקריים: האופן הראשון: חזרה על מדידות באופן שגרתי ובתדירות מספקת צפויה לחשוף שינויים דרמטיים בסמוך לזמן התרחשותם וכך לאפשר התייחסות מהירה. האופן השני: באמצעות מעקב מתמשך אשר דרכו שינויים מגמתיים, גם אם מתרחשים בקצב איטי, עשויים להיחשף ולאפשר היערכות הולמת. מכיוון שבמערכות טבעיות ישנן תנודות רבות על פני סקאלות זמן שונות (למשל, עונתיות או רב-שנתיות), ככל שהמעקב נמשך זמן רב יותר כך ניתן לאפיין

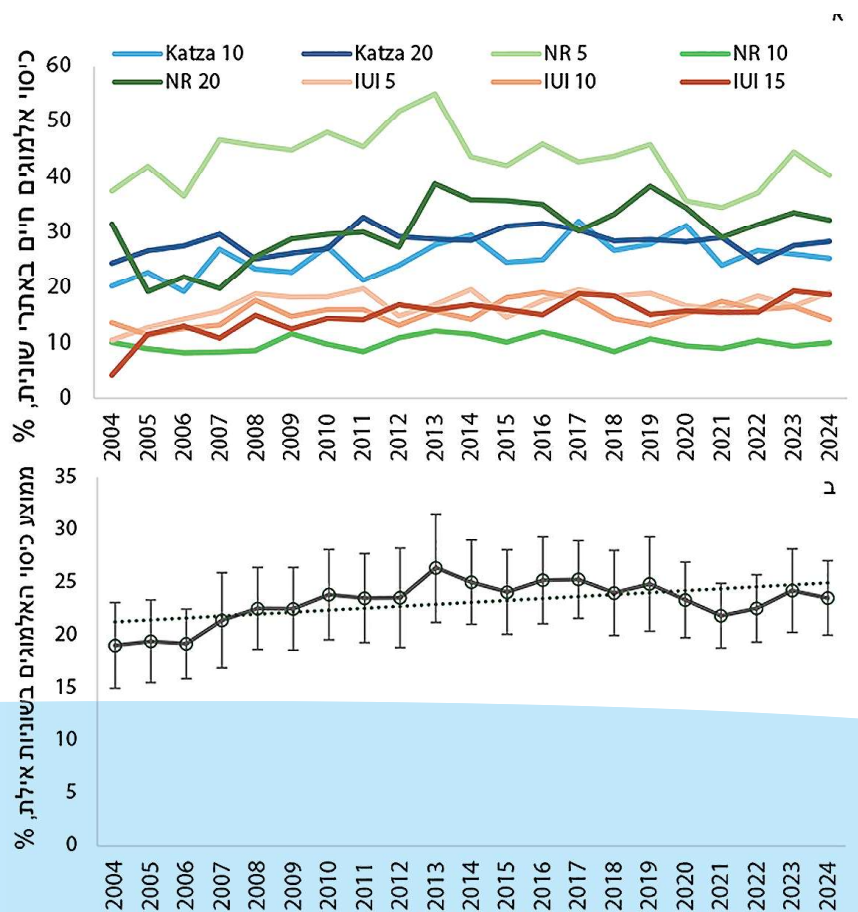
התפתחות שוניות האלמוגים באילת בעשרים השנים האחרונות

שוניות האלמוגים באילת הן בית גידול מגוון וייחודי בישראל, הנמצא בשיווי משקל עדין עם סביבתו ומתקיים בזכות מערך תנאי סביבה ספציפיים אשר רק בהם מתקיימות שוניות אלמוגים. מחקרי עבר תיעדו הידרדרות דרמטית בבית גידול זה (למשל, ²) והתוכנית החלה לנטר את שוניות אילת באופן סדיר בשנת 2004, לקראת סוף תקופת פעילותן של חוות הדגים בצפון המפרץ. התוכנית עוקבת אחר מדדי שונית רבים בשמונה אתרי שונית באילת, במטרה לאפיין את מצב השוניות עד כמה שניתן. רבים מהנתונים נאספים בשיטת "חתכי הקו" לפיה צוללים מומחים פורסים סרט מדידה לאורך השונית ומתעדים את כל מה שנמצא תחת הסרט במקטעים שאורכם עשרה מטרים (³, איור 1). המקטעים נפרסים בכל אתר באופן שרירותי עד אשר נאספים נתונים מספקים לאפיון סטטיסטי של האתר. לרוב נסקרים 15-25 חתכי קו בכל אתר, כתלות במידת השונות הפנימית שבו (ראו דוחות הניטור השנתיים המוגשים למשרד להגנת הסביבה ^{4,5}).

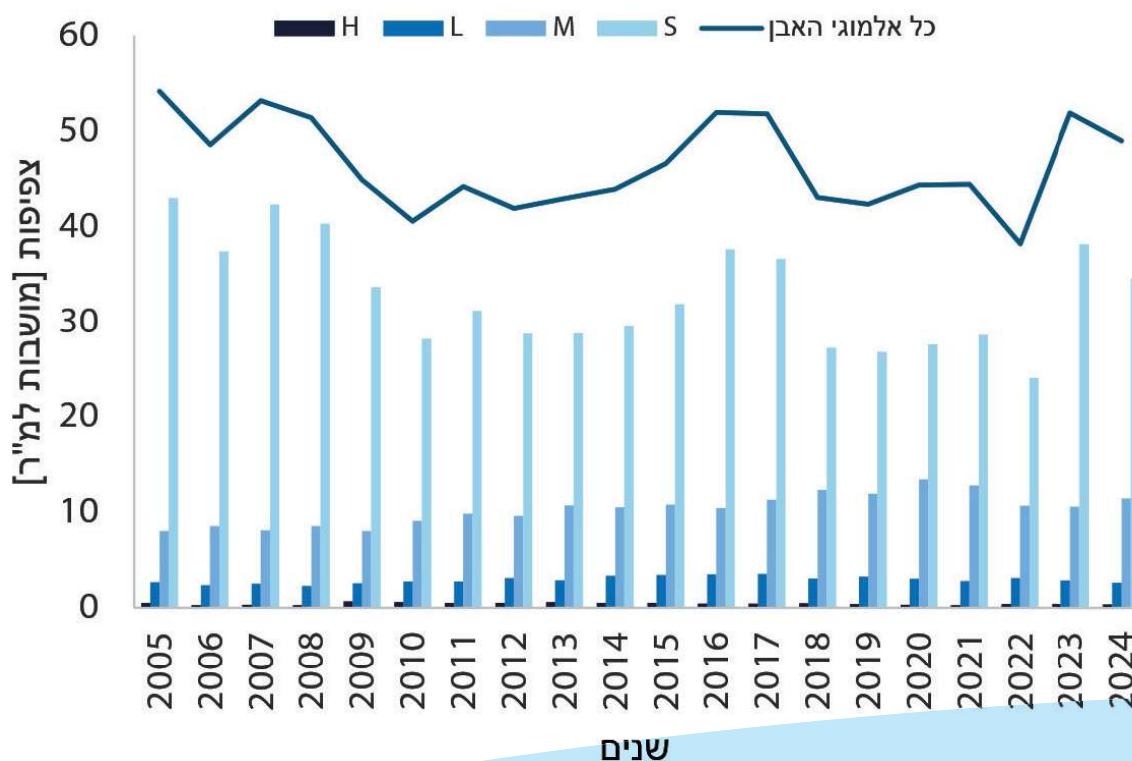


איור 1. איסוף נתונים בסקרי השונית, בשיטת "חתכי קו".

אחד המדדים העיקריים המתקבלים בשיטה זו הוא מדד "אחוז כיסוי האלמוגים בשונית". בכל חתך מחושב האורך המצטבר של אלמוגי אבן חיים תחת סרט המדידה, ומנורמל לאורך החתך הכולל (עשרה מטרים). ממוצע אחוז הכיסוי בכל החתכים באתר הוא אחוז הכיסוי הממוצע הנמדד באותו אתר. ממוצע אחוז הכיסוי של כלל האתרים הוא "אחוז הכיסוי הממוצע של אלמוגי אבן חיים בשוניות אילת" (להלן "אחוז הכיסוי הממוצע באילת"). בחינה של השינויים באחוז הכיסוי הממוצע בשוניות אילת מראה כי בשנים הראשונות לניטור מדד זה עמד על ערך של כ-19%. משנת 2007 החלה עלייה מתמשכת בערך המדד והשיא נמדד בשנת 2013, כ-6%. בשנים הבאות ערך המדד נע סביב 25%, עד שבשנת 2020 החלה ירידה בכיסוי האלמוגים ובשנת 2021 עמד ערך המדד על כ-22% בלבד. מאז נמדדה עלייה קלה ובקיץ 2023 נמדד אחוז כיסוי ממוצע של 23.5% בשוניות אילת (איור 2). אומנם השונות בתוך ובין אתרי השונית הנסקרים רבה, אך כמות החזרות הגדולה יחד עם פרק הזמן הארוך שבו מבוצעים הסקרים באופן עקבי מקנים ביטחון סטטיסטי בתוצאות המתקבלות.

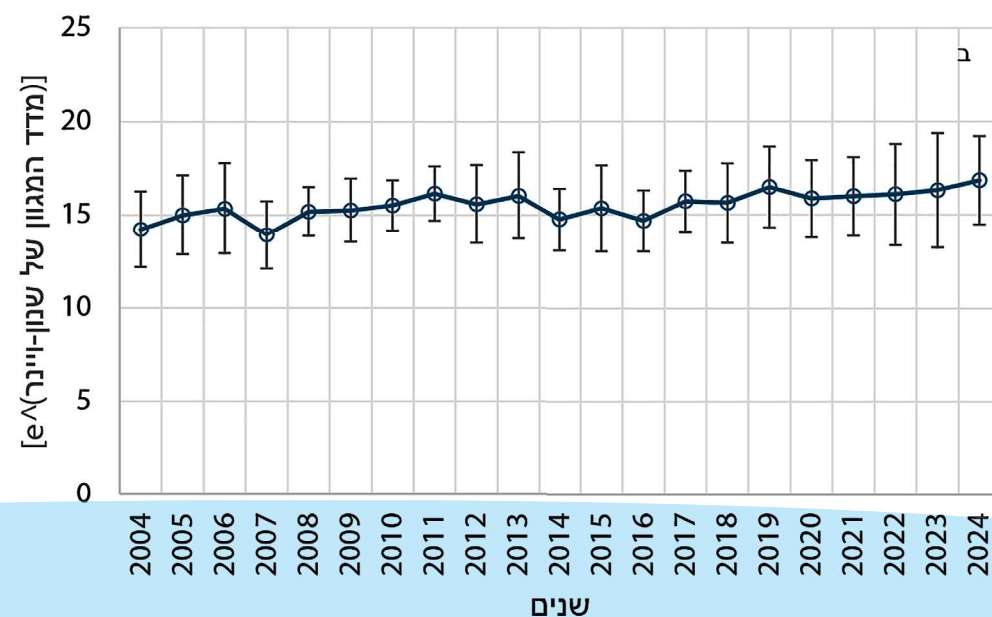
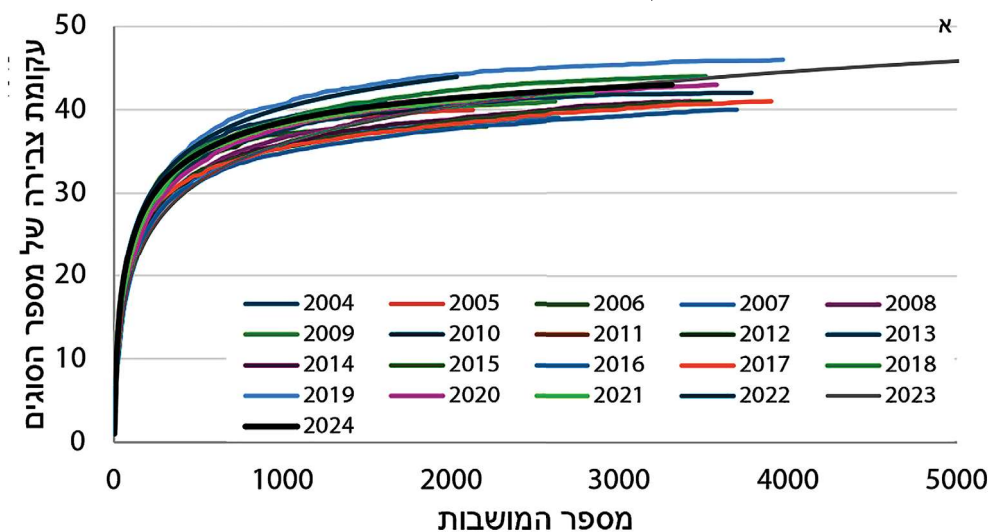


אלמוגי האבן הנסקרים מחולקים לארבע קבוצות גודל בכדי לעקוב אחר שינויים באוכלוסייה מבחינת התיישבות, צמיחה ותמותה. בבסיס אנליזה זו עומדת ההנחה שעבור כל סוג אלמוג, אלמוגים קטנים הם אלמוגים צעירים וככל שהם חיים זמן רב יותר כך יהיו גדולים יותר. בשנות הניטור הראשונות נמצאה התפלגות גדלים שבה כ-80% מאוכלוסיית האלמוגים בשוניות אילת היו שייכים לקבוצת הגודל הקטנה, המייצגת גיל אלמוגים נמוך מ-5 ל-3 שנים (על-פי ניתוח סדרות זמן מצולמות, ראו דוח הניטור השנתי לשנת 2019⁴). במשך הזמן, חלקה של קבוצת גודל זו ירד, ובמקביל עלה חלקה של קבוצת הגודל הבינונית, המייצגת טווח גילים הנע בין 3 ל-10 שנים. אך גם צפיפות המושבות הקטנות בשוניות אילת ירדה עם הזמן מכ-40 מושבות קטנות למ"ר שונית בשנים הראשונות לניטור, עד לכ-30 מושבות למ"ר בשנת 2013. בשנים 2018-2020 הייתה צפיפות המושבות הקטנות 24-27 מושבות למ"ר בלבד ואילו בשנת 2023, נמדדה עלייה, כ-38 מושבות קטנות למ"ר, בדומה לשנות הניטור הראשונות (איור 3). בשנת 2024 היוו המושבות הקטנות כ-63% מסך מושבות האלמוגים בשוניות אילת.



איור 3. שינויים בצפיפות מושבות האלמוגים בשוניות אילת, על-פי חלוקה לארבע קבוצות גודל, במשך תקופת הניטור. מושבות בקבוצת הגודל "קטנות" (S) בקוטר של עד 5 ס"מ, "בינוניות" (M): 5-15 ס"מ, "גדולות" (L): 15-30 ס"מ, ענקיות (H) בעלות קוטר גדול מ-30 ס"מ.

בכל תקופת הניטור, ועל אף השינויים באחוז הכיסוי והתפלגות הגדלים של מושבות האלמוגים, לא אובחנו שינויים גדולים או מגמתיים במדדי מגוון שונים עבור סוגי האלמוגים באילת (איור 4).



איור 4. א. עקומות צבירה של מספר הסוגים כנגד מספר הפרטים הנסקרים בשוניות אילת במשך תקופת הניטור. העקומות ממוצעות באמצעות תוכנת Past⁶. ב. מגוון סוגי האלמוגים בשוניות אילת, מיוצג באמצעות מספר הסוגים האפקטיבי⁷.

תמונת השוניות המצטיירת מתוך מדדים אלה מצביעה על כך שבשנים הראשונות לפעילות הניטור היו שוניות אילת במצב עקה אשר בא לידי ביטוי באחוז כיסוי נמוך ואוכלוסיית אלמוגים צעירה. הרכב סוגי המינים היה מגוון, ולא היה מחסור באספקת מתיישבים חדשים בשוניות. במשך הזמן עלה אחוז הכיסוי ואוכלוסיית האלמוגים החלה להתבגר. בד בבד נמצאה ירידה באספקת מתיישבים חדשים, אך הרכב סוגי האלמוגים נותר יציב. בשנים האחרונות נמדדו תנודות בכיסוי האלמוגים בין היתר, ניתן לייחס חלק מתנודות אלה לסערה דרומית חזקה אשר פגעה בחופי אילת בחודש מרץ 2020, וגרמה לנזק רב⁸. בסערה זו נמדדו על-ידי תוכנית הניטור רוחות דרומיות במהירות ממוצעת של 82 קמ"ש ומהירות מרבית של 106 קמ"ש, הרוחות החזקות ביותר במאגר המדידות.

בתקופה זו צפיפות מושבות האלמוגים הקטנות הייתה נמוכה יחסית וחלקם מכלל האלמוגים היה הקטן ביותר בתקופת הניטור, רק מעט יותר מ-60%. על אף התנודות הללו לא נמצאו שינויים גדולים בהרכב סוגי האלמוגים ונראה שהגורמים לשינויי הכיסוי, הצמיחה וההתיישבות משפיעים באופן דומה על מרבית סוגי האלמוגים המרכיבים את חברת האלמוגים בשוניות אילת.

מתוך כך ניתן לסכם כי בשנים הראשונות לפעילות הניטור שוניות אילת היו במצב של עקה ומגמת התאוששות וצמיחה נמצאה בין השנים 2007-2013. אחר כך היו מספר שנים של יציבות ובשנים האחרונות נמצאו תנודות ושינויים המעידים על כך שהמערכת נמצאת בשיווי משקל עדין ושוניות אילת במצב של רגישות גבוהה.

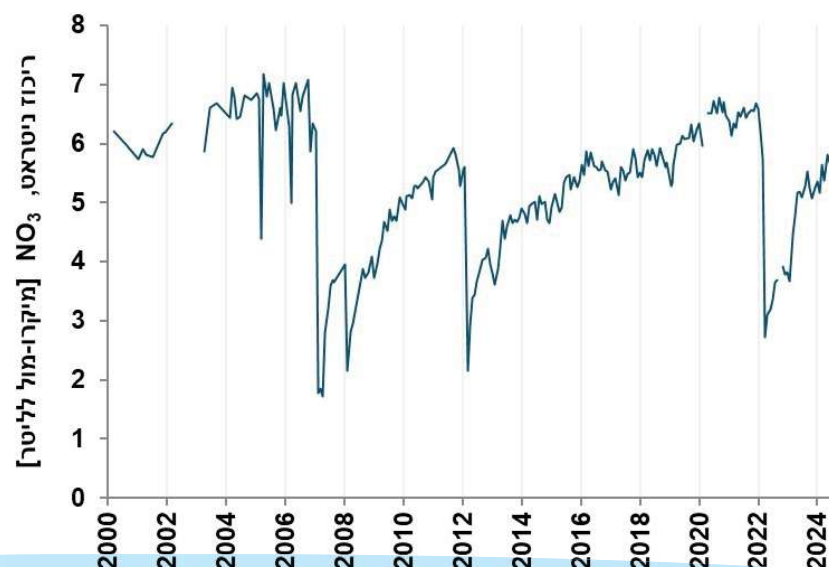
שינויים בריכוזי חנקן מומס

מפרץ אילת נחשב לים אוליגורופי עני בנוטריינטים (חומרי מזון מומסים, כגון חנקן, זרחן, וסיליקה), בזכות היותו אגן סגור המוקף יבשה מדברית עם מיעוט צמחייה וקניסות נחלים והתיישבות אנושית דלילה⁹. ים עני בנוטריינטים הוא תנאי חשוב לשגשוגן של שוניות אלמוגים (למשל,^{10, 11, 12}): צמיחת אצות בו מוגבלת והמים לרוב צלולים ומאפשרים חדירת אור לעומק. זו אחת הסיבות שלאורך השנים ריכוז הנוטריינטים במפרץ מהווה מוקד למחקר וניטור (למשל,^{13, 14}). ככלל, ריכוז הנוטריינטים במים העליונים נמוך מכיוון ששם מתקיימת פעילות פוטוסינתטית שבה נצרכים הנוטריינטים ובמים העמוקים הריכוזים גבוהים יותר מכיוון שלשם שוקע חומר אורגני ומתפרק למרכיביו.

המערכת מאופיינת בדינמיקה עונתית שמתחוללת בה בתקופת הקיץ, כאשר שכבת המים העליונה מופרדת מהמים העמוקים בזכות שיכוב תרמלי יציב (מים חמים בקרבת פני הים מעל מים קרים יותר בעומק), ריכוז הנוטריינטים במים העליונים אפסי והמערכת היצרנית מורעבת. ככל שמתקדמת עונת החורף והמים העליונים מתקררים, מתאפשר ערבוב בינם לבין המים העמוקים יותר וכך מגיעים למים העליונים נוטריינטים מהעומק. ככל שהערבוב עמוק וממושך יותר, כך יגיעו נוטריינטים רבים יותר למים העליונים. ככל שחולף זמן רב יותר מאז ערבוב שכבות המים העמוקות, כך נצברים בהן נוטריינטים רבים יותר. עליית נוטריינטים מהעומק למים העליונים תומכת בפעילות יצרנית ופריחת של אצות^{15, 16}. אצות מתחרות באלמוגים על משאבים ועלולות לפגוע במערכת השונית בשני אופנים: פיטולנקטון – מיקרואצות חד-תאיות זעירות וציאנובקטריה – בעמודת המים גורמות לעכירות ומורידות את כמות האור החודרת לעומק, ומקראצות ישיבות תופסות שטחי שונית פנויים ובמצבי קיצון אף מכסות אלמוגים. דינמיקה זו היא הסיבה שלאורך השנים עלה חשש מהעשרת צפון המפרץ בנוטריינטים ומעבר ממצב אוליגורופי (לפחות בקיץ), שבו יש יתרון

לשוניות האלמוגים, למצב מזותרופי או אפילו אאוטרופי (עשיר בנוטריינטים), שבו שוניות אלמוגים יאבדו את יתרון היחסי בתחרות על משאבים, למשל¹⁷.

עקב החשיבות הגדולה המיוחסת לריכוזי נוטריינטים במי המפרץ עוקבת תוכנית הניטור אחר ריכוזי נוטריינטים עיקריים בעמודת המים בצפון המפרץ. להלן תיאור של הדינמיקה הרב-שנתית של ריכוזי ניטראט (NO_3^- , חנקן) בעמודת המים העמוקה בקצה הדרומי של המים הטריטוריאליים של ישראל: בשנים הראשונות לניטור ריכוזי החנקן המומס (ובפרט הניטראט, נוטריינט עיקרי) במים העמוקים בצפון המפרץ, בעומק של 700 מטרים, עמד ריכוז הניטראט על 6-7 מיקרו-מול לליטר. בשנת 2007 עורבבה עמודת המים עד לעומק גדול מזה (עומק הקרקעית בתחנת המדידה בקצה המים של ישראל במפרץ) וכתוצאה מכך התרחשה פריחת אצות חזקה וממושכת וריכוז הניטראט במים העמוקים ירד מאוד. עם תום הערבוב החל החנקן להצטבר מחדש במי העומק, אך בחורף הבא, 2008, שוב אירע ערבוב עמוק. במשך תקופת הניטור תועדו עוד שני אירועים של ערבוב לעומק גדול מ-700 מטרים, בשנת 2012 ובשנת 2022. בארבע השנים שלאחר הערבוב של 2008 הגיע ריכוז הניטראט המומס בעומק 700 מטרים לכ-5.9 מיקרו-מול לליטר. ארבע שנים לאחר הערבוב של שנת 2012, ריכוז הניטראט בעומק זה היה 5.2 מיקרו-מול לליטר. כך נראה שבתקופה זו קצב צבירת החנקן במים העמוקים בצפון המפרץ ירד. נדרשו עוד כשלוש שנים עד שריכוז הניטראט השתווה לזה שלפני ערבוב 2012, וחלפו שמונה שנים מאז הערבוב ב-2012 עד שריכוזו במים העמוקים הגיע לזה של טרום-ערבוב 2007 (איור 5).



איור 5. ריכוזי ניטראט (NO_3^-) בעומק 700 מטרים, כעשרה ק"מ דרומית לאילת, מאז שנת 2000.

הערבוב העמוק של שנת 2022 גרם לפריחת אצות ממושכת אך כבר בסוף אותה שנה היה ריכוז הניטראט בעומק 700 מטר 3.8 מיקרו-מול לליטר. כעבור שנה נוספת, בסוף 2023, שנתיים בלבד לאחר הערבוב העמוק, כבר נמדד שם ריכוז ניטראט של 5.5 מיקרו-מול לליטר. נראה שבשנים האחרונות עולה מחדש קצב הצטברות החנקן המומס (ונוטריינטים אחרים אשר מודדת תוכנית הניטור) במים העמוקים, בהשוואה לעשור הקודם.

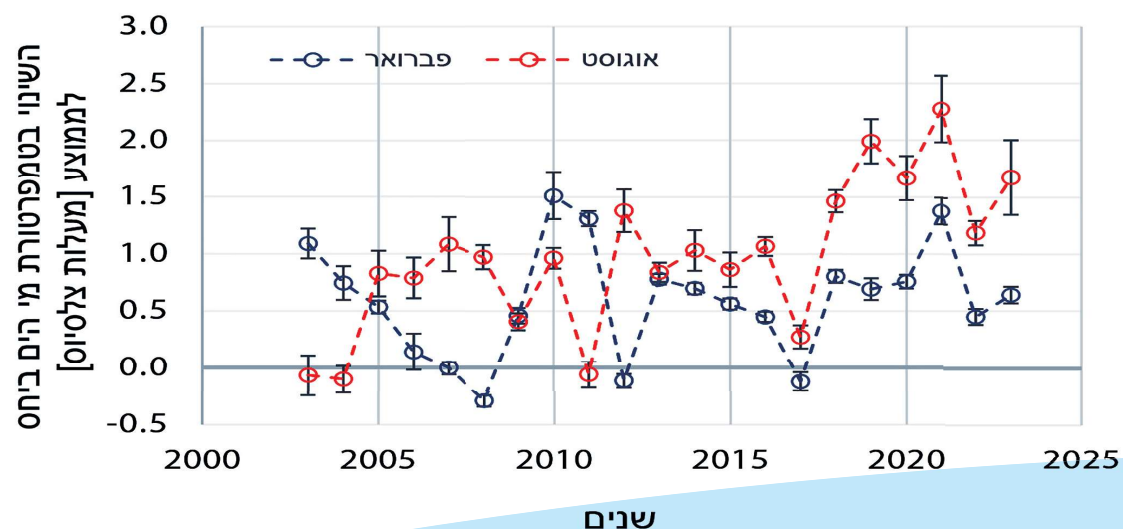
הניטור רב-השנים של כמויות וריכוזי נוטריינטים בצפון המפרץ הובילו לזימונה של ועדת מומחים על-ידי המשרד להגנת הסביבה אשר דנה בהשפעות אפשריות של הגדלת כמויות הנוטריינטים המוזרמות למפרץ ממקורות חיצוניים. הדיון נעשה במאמץ לקבוע את כושר הנשיאה של המערכת לנוטריינטים, ובפרט חנקן מומס, וכך את כמות ההזרמות המרבית שיכול המשרד להתיר. נתוני הניטור שימשו את הוועדה בקביעת הערך המרבי של סך ההזרמות השנתיות. ערך זה משמש את הוועדה להיתרי הזרמה לים במתן היתרי הזרמה, וכך מסייע להגבלת הזרמות ומציאת אלטרנטיבות לפעולות פיתוח שצפויות להשפיע לרעה על תפקודה של המערכת הימית.

טמפרטורת פני הים וטמפרטורת המים העמוקים

טמפרטורת המים העליונים במפרץ אילת נעה בטווח עונתי קטן בהשוואה לחופי הים התיכון של ישראל אך גם כאן, משרעת מחזור הטמפרטורות העונתי בפני הים גדולה בהרבה מהשינויים הנמדדים בין שנה לשנה. משך הזמן שבו פועלת תוכנית הניטור ארוך דיו על מנת לאפשר זיהוי של מגמת חימום רב-שנתית בעשורים האחרונים, הן בפני הים והן במים העמוקים¹⁸.

בפני הים, עקב משרעת הטמפרטורה העונתית הגדולה, ראוי לבחון את טמפרטורות החורף (פברואר) וטמפרטורות הקיץ (אוגוסט) בנפרד.

ממדידות יומיות שנעשו כל בוקר בסמוך לשונית האלמוגים על-ידי מעבדתו של פרופ' אמציה גנין עולה שבמשך עשור השנים 1988-1998, טמפרטורת פני הים הממוצעת בחודש פברואר עמדה על 21.04 מעלות צלסיוס, ואילו זו של חודש אוגוסט עמדה על 26.26 מעלות.



איור 6. טמפרטורות פני הים הממוצעות לחודשים פברואר ואוגוסט מאז תחילת הניטור, בהשוואה לטמפרטורה הממוצעת לחודשים אלה בעשור השנים 1988-1998. נתוני טמפרטורה לשנים 1988-1998 נאספו במעבדתו של פרופ' א. גנין. קווי השגיאה הם רווח בר סמך (95%).

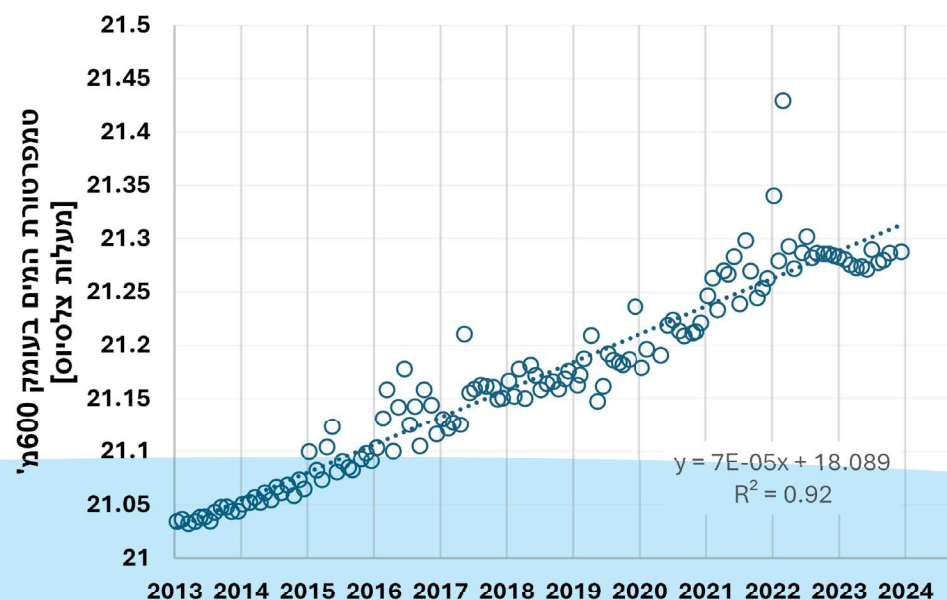
מאז הקמתה, המשיכה תוכנית הניטור את המדידות היומיות שהחלו במעבדתו של פרופ' גנין בשנת 1988. כך ניתן להשוות מדידות שנעשו באופן דומה על פני יותר משלושה עשורים. מדידות אלה מראות שבסמוך לשונית, טמפרטורת פני הים הממוצעת בחודש פברואר 2003 הייתה 22.13 מעלות ובאוגוסט אותה שנה 26.2. בשנת 2023 טמפרטורת פני הים הממוצעת בחודש פברואר הייתה 21.68 מעלות ובאוגוסט 27.94.

בסך הכול, ניתן לעקוב אחר מגמה ברורה של עליית טמפרטורת פני הים הן בחורף (פברואר) והן בקיץ (אוגוסט). בעשור האחרון, מלבד בשנת 2017, טמפרטורת פני הים באוגוסט גבוהה ב-1-2 מעלות בהשוואה לממוצע חודש זה בשנים 1988-1998. בחודש פברואר טמפרטורת פני הים בעשור האחרון, מלבד בשנת 2017, גבוהה ביותר מחצי מעלה בהשוואה לשנים 1988-1998 (איור 6).

על-פי המדידות היומיות בסמוך לשונית, הקצב הממוצע של עליית טמפרטורת פני הים בחודש פברואר הוא כעשירית המעלה בכל עשור מאז תחילת הניטור (2003) וכפול מזה בעשור האחרון (מאז 2013). הקצב הממוצע של התחממות פני הים בחודש אוגוסט הינו 0.73 מעלות בעשור מאז תחילת הניטור ו-1.1 מעלות בעשור האחרון. במילים אחרות, קצב עליית הטמפרטורה גדל.

במים העמוקים התנודות העונתיות קטנות הרבה יותר וטמפרטורת המים כמעט קבועה. על כן, וגם מכיוון שתדירות המדידות קטנה הרבה יותר, עבור המים העמוקים נכון לדבר על ממוצעים שנתיים.

מדידות טמפרטורת המים בעומק 600 מטרים בעשור 1988-1998 מעטות, אך מהן עולה כי הטמפרטורה הממוצעת בעומק זה הייתה 20.73 מעלות.



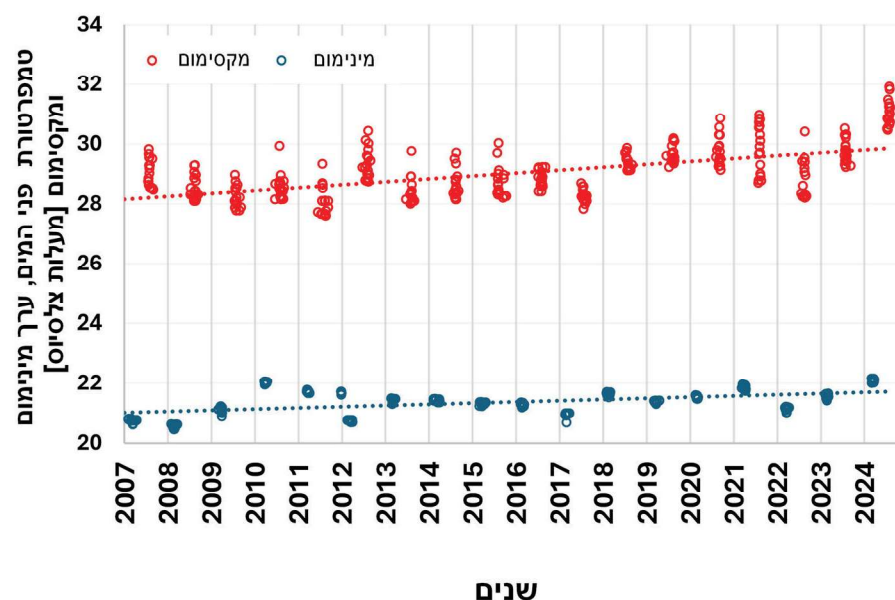
איור 7. טמפרטורת המים בעומק 600 מטרים מדרום לאילת, כפי שנמדדה על-ידי תוכנית הניטור בעשור האחרון.

טמפרטורת המים בעומק 600 מטרים נמדדת בהפלגות חודשיות שמוציאה תוכנית הניטור. מאז אותן מדידות ראשונות, עלתה הטמפרטורה השנתית הממוצעת ל-21.28 מעלות בשנת 2023 ובעשור האחרון (2013-2023) המים מתחממים בקצב של כ-0.026 מעלות בשנה (איור 7).

באותן הפלגות נמדדת גם טמפרטורת פני הים והממוצע לשנת 2023 עמד על 24.61 מעלות. קצב החימום הממוצע בעשור 2013-2023 הוא 0.073 מעלות בשנה.

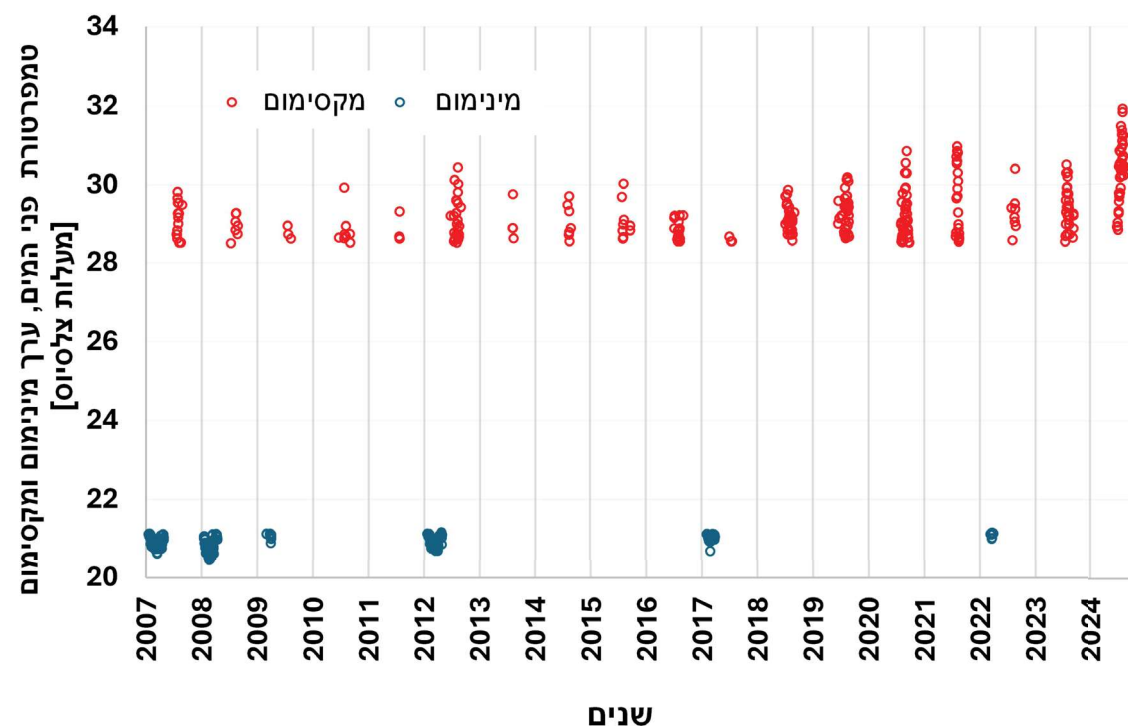
מדידות טמפרטורה בפני הים פשוטות, יחסית, ובסוף 2006 הציבה תוכנית הניטור חיישנים המודדים את טמפרטורת פני הים באופן רציף. מדידות אלה מאפשרות התבוננות ברזולוציה גבוהה יותר והבנה מעמיקה יותר של תהליך התחממות פני הים.

בחינת 5% הימים החמים ביותר והקרים ביותר בכל שנה (18 ימים בכל שנה, איור 8) מאז 2007 מראה כי הימים החמים נעשים חמים יותר בקצב של 1.1 מעלות בעשור, בהתאמה למדידות היומיות שהוזכרו למעלה. גם הימים הקרים ביותר מתחממים, בקצב של 0.37 מעלות בעשור – קצב גדול ממה שהוזכר למעלה מתוך המדידות היומיות, מכיוון שלא בכל שנה חודש פברואר הוא החודש הקר ביותר בשנה.



איור 8. טמפרטורת פני הים ב-18 הימים הקרים ביותר (כחול) והחמים ביותר (אדום) בכל שנה (5% מהמדידות השנתיות) מאז הצבת מערך המדידות האוטומטי בקצה מזח המכון הבינאוניברסיטאי בסוף שנת 2006.

כאשר בוחנים את 5% הימים החמים והקרים מתוך סך כל המדידות הרציפות שנאספו מאז 2007 (315 קריאות מינימום ומקסימום יומיות מתוך 6431 ימי מדידה) מסתבר שבכל קיץ מאז תחילת המדידות ישנם מספר ימים חמים, אך בשנים האחרונות ישנם יותר ימים חמים והטמפרטורה המרבית הנמדדת עולה. לעומת זאת, ימים קרים נעשים נדירים – כמעט כל המדידות ה"קרות" מרוכזות בשנים הראשונות למדידה, ובעשור האחרון היו מעט מאוד ימים "קרים" (איור 9).



איור 9. טמפרטורת פני המים ב-315 הימים הקרים ביותר והחמים ביותר מתוך כלל המדידות מאז הצבת מערך המדידות האוטומטי בקצה מזח המכון הבינאוניברסיטאי בסוף שנת 2006 (5% מהמדידות).

הטמפרטורות הגבוהות שנמדדות בקיצים האחרונים מהוות איום ישיר על המערכת האקולוגית בצפון מפרץ אילת עקב רגישותם של אלמוגים לטמפרטורות גבוהות. לעומת זאת, הטמפרטורות הנמדדות בחורף מהוות איום עקיף על המערכת כולה, דרך מנגנון ערבוב עמודת המים. כפי שהוזכר למעלה, בכל חורף מתקררים פני המים ונוצרת שכבה בעלת טמפרטורה אחידה שבה קיים ערבוב אנכי בין מים עליונים למים עמוקים יותר. עומק השכבה המערבבת תלוי במידה ובמשך הקירור. אם פני המים יתקררו לטמפרטורה דומה לטמפרטורת המים העמוקים למשך זמן מספיק – יוסר השכוב התרמלי וכל עמודת המים תעורב.

לערבוב עמודת המים חשיבות גדולה במפרץ מכיוון שהעלאת נוטריינטים מהעומק היא הדרך העיקרית שבה מוזנת המערכת הביולוגית. התחממות פני המים בקצב מהיר מזה של המים העמוקים תיצור הפרש טמפרטורות הולך וגדל בין פני המים לעומק, ועליית טמפרטורות החורף תיצור מצב שבו חורפים שבהם עמודת המים מתערבבת לעומק 700 מטרים (עומק הקרקעית בתחנת המדידה בקצה גבול המים של ישראל) הופכים לנדירים. תהליך זה צפוי להשפיע באופן דרמטי על המערכת האקולוגית במפרץ, אף כי קשה לחזות איך יתבטא השינוי. ניתן, אולי, ליצור מודלים שיוזנו בנתונים הקיימים שאספה תוכנית הניטור ולנסות לענות על שאלה זו.

סיכום

התוכנית הלאומית לניטור מפרץ אילת מודדת מגוון גדול של מדדים ברוב בתי הגידול העיקריים המרכיבים את המערכת האקולוגית בצפון מפרץ אילת. במשך עשרים שנות פעילותה יצרה תוכנית הניטור מאגר נתונים גדול הכולל סדרות זמן ארוכות של משתנים חשובים, אשר בעזרתן ניתן לעקוב אחר השינויים המתרחשים במפרץ. מלבד היכולת לזהות שינויים גדולים העשויים להצביע על בעיות אקוטיות סמוך לזמן התרחשותן, ניתן בעזרת סדרות הזמן הארוכות גם לנסות להבין את השינויים האיטיים המתרחשים במערכת כולה.

בדוגמאות המובאות למעלה מתועדת עלייה בכיסוי האלמוגים החי בשוניות אילת בעשור הראשון לפעילות התוכנית ולאחר מכן תנודות המעידות על שיווי המשקל העדין שבו מצויה מערכת השוניות. מתוארים השינויים בריכוזי נוטריינטים בעמודת המים, ובפרט ריכוזי הניטראט במים העמוקים, עם דגש על השינויים בין השנים ולאורך תקופת הניטור. לבסוף, מתוארת העלייה המתמשכת בטמפרטורת המים, הן בעומק והן בפני הים והשלכתה האפשרית על תפקוד המערכת.

תודות

כל ההכרה וההערכה על איכות וכמות הנתונים מגיעה לצוות הניטור: ד"ר ענבל אילון, מוריאל דריי, ד"ר טל עמית, אירנה קולסניקוב וטניה ריבלין. ללא עבודתן המסורה והמקצועית לא היה על מה לדבר (או לכתוב). את התוכנית דחף, הקים, קידם וניהל מדעית במשך שנים רבות פרופ' (אמריטוס) אמציה גנין, ובשנים האחרונות מופקד הניהול המדעי בידי פרופ' מעוז פיין. התוכנית פועלת באמצעות האוניברסיטה העברית וזוכה לבית חם במכון הבינאוניברסיטאי למדעי הים באילת, אשר ללא תמיכתו לא יכולה הייתה לתפקד. המשרד להגנת הסביבה מממן את התוכנית הלאומית לניטור מפרץ אילת, לאורך השנים ועל אף הקשיים, והתוכנית פועלת מטעם היחידה הארצית להגנת הסביבה הימית ומשרד המדען הראשי במשרד להגנת הסביבה. תודה מיוחדת לד"ר דרור צוראל אשר תומך ועמל למען המשך פעילותה התקין והרציף של התוכנית וחוצץ בינה ובין קשיי הקיום.

רשימת מקורות

1. Lovett, G. et al. Who needs environmental monitoring? *Front. Ecol. Environ.* **5**, 253–260 (2007).
2. Loya, Y. The Coral Reefs of Eilat — Past, Present and Future: Three Decades of Coral Community Structure Studies. In E. Rosenberg & Y. Loya (Eds.), *Coral Health and Disease*, 1–6. Springer, Berlin, Heidelberg (2004).
3. Loya, Y. Community structure and species diversity of hermatypic corals at Eilat, Red Sea. *Mar. Biol.*, **13**, 100–123 (1972).
4. שקד, י. וגנין, א. התוכנית הלאומית לניטור מפרץ אילת דוחות מדעיים שנתיים (2007-2022). <https://iui-eilat.ac.il/Research/NMPReports.aspx>

5. שקד, י. ופיין, מ. התוכנית הלאומית לניטור מפרץ אילת, דוח מדעי שנתי (2023). <https://iui-eilat.ac.il/Research/NMPReports.aspx>
6. Hammer, Ø., Harper, D. A. T. & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontol. Electron.*, **4**, 1, art. 4, 9 (2009) at http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm
 7. Jost, L. Entropy and diversity. *OIKOS*, **113**, 363–375 (2006).
 8. Oron, S., Akkaynak, D., Goodman Tchernov, B. N. & Shaked, Y. How monster storms shape fringing reefs: Observations from the 2020 Middle East Cyclone. *Ecosphere*, **14**, 7, e4602 (2023).
 9. Torfstein, A., Kienast, S., Yarden, B., Rivlin, A., Isaacs, S. & Shaked, Y. Bulk and export production fluxes in the Gulf of Aqaba, Northern Red Sea. *ACS Earth Space Chem.*, **4**, 1461–1479 (2020).
 10. Swart, P. K. Coral reefs: Canaries of the sea, rainforests of the oceans. *Nature Educ. Knowledge*, **4**, 5 (2013).
 11. Adam, T. C., et al. Landscape-scale patterns of nutrient enrichment in a coral reef ecosystem: Implications for coral to algae phase shifts. *Ecol. Appl.*, **31**, 1, e2227 (2021).
 12. Birkeland, C. Geographic differences in ecological processes on coral reefs. In C. Birkeland (Ed.), *Coral Reefs in the Anthropocene*, 179–194. Springer Science+Business Media, Dordrecht (2015).
 13. Lazar, B., et al. Recent environmental changes in the chemical-biological oceanography of the Gulf of Aqaba (Eilat). In F. D. Por (Ed.), *Aqaba-Eilat, the Improbable Gulf. Environment, Biodiversity and Preservation*, 49–115, Magnes Press, Jerusalem (2008).
 14. Berman, H., Gildor, H. & Fredj, E. Inter-annual variability in phytoplankton and nutrients in the Gulf of Eilat/Aqaba. *J. Geophys. Res. Oceans*, **128**, 6, e2022JC019431 (2023).
 15. Levanon-Spanier, I., Padan, E. & Reiss, Z. Primary production in a desert-enclosed sea—the Gulf of Eilat (Aqaba), Red Sea. *Deep-Sea Res. A*, **26**, 673–685 (1979). [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(79\)90040-2](https://doi.org/10.1016/0198-0149(79)90040-2)
 16. Lindell, D. & Post, A. F. Ultraphytoplankton succession is triggered by deep winter mixing in the Gulf of Aqaba (Eilat), Red Sea. *Limnol. Oceanogr.* **40**, 1130–1141 (1995).
 17. Karcher, D. B. et al. Nitrogen eutrophication particularly promotes turf algae in coral reefs of the central Red Sea. *PeerJ*, **8**, e8737 (2020).
 18. Sengupta, S., Gildor, H. & Ashkenazy, Y. Depth-dependent warming of the Gulf of Eilat (Aqaba). *Clim. Change*, **177**, 107 (2024).