

קרן מאור-לנדאו

הפקולטה למדעי החיים ע"ש מינה
ואבררד גודמן, אוניברסיטת בר-אילן

פיורלה פרדה

בוצת מדעי הים, המחלקה לביולוגיה,
גאולוגיה ומדעי הסביבה,
אוניברסיטת בולוניה, איטליה

סטפנו גופרדו

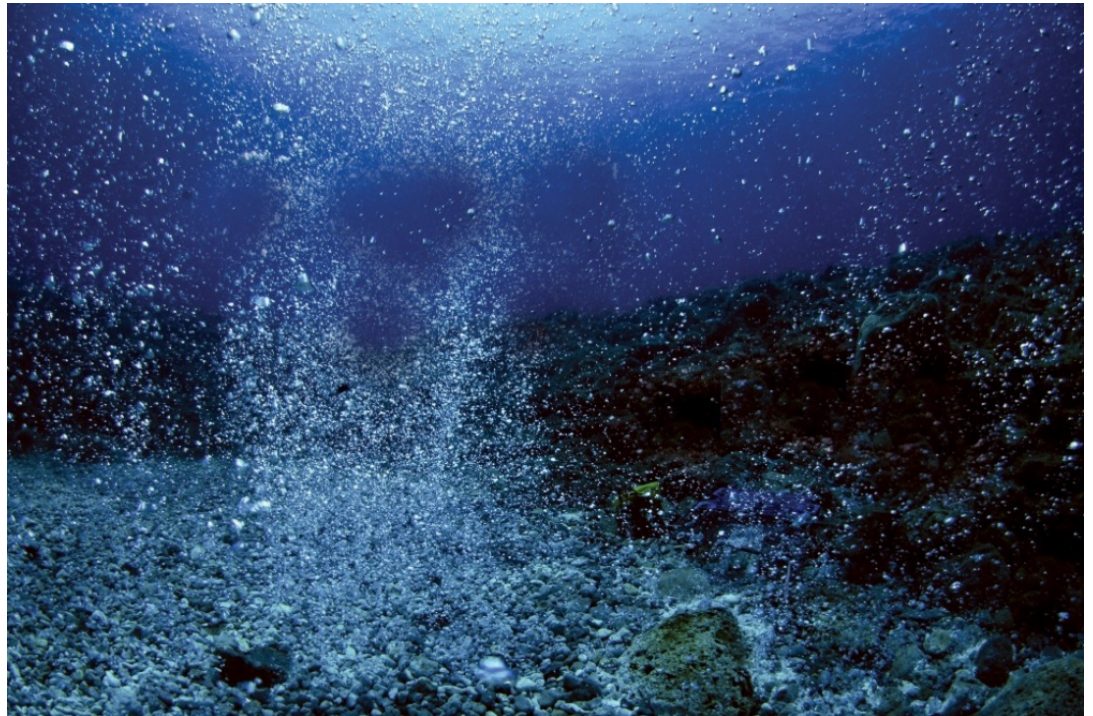
בוצת מדעי הים, המחלקה לביולוגיה,
גאולוגיה ומדעי הסביבה,
אוניברסיטת בולוניה, איטליה

צבי דובינסקי

הפקולטה למדעי החיים ע"ש מינה
ואבררד גודמן, אוניברסיטת בר-אילן

אורן לוי

הפקולטה למדעי החיים ע"ש מינה
ואבררד גודמן, אוניברסיטת בר-אילן



בעבוע טבעי של פחמן דו-חמצני יוצר מפל של ערך הגבה (pH) באיים האיטליים. במעבדה הטבעית הזו בוצע ניסוי השדה המתואר במאמר | צילום: Erik Caroselli

השפעות החמצת האוקיינוסים וההתחממות העולמית על אלמוג ים תיכוני

[חזית המחקר](#)

גיליון אביב 2014 / כרך 5 (1) / הים התיכון

4 במאי, 2014

ציטוט מומלץ

מאור-לנדאו ק, פרדה פ, גופרדו ס
ואחרים. 2014. השפעות החמצת
האוקיינוסים וההתחממות העולמית
על אלמוג ים תיכוני. *אקולוגיה
וסביבה* 5(1): 52–57.

על קצה המזלג

- עליית כמות הפחמן הדו-חמצני בעולם גורמת להתחממות ולהחמצת האוקיינוסים. שינויים אלה מעוררים חשש לגורלם העתידי של אלמוגים בכלל ושל אלמוגי הים התיכון בפרט.
- נבדקו השפעות של החמצה ועלייה בטמפרטורה על תפקוד אלמוגים ועל שרידותם בים ובמעבדה.
- נמצא כי שילוב של טמפרטורה גבוהה יחד עם החמצה פוגע בתפקוד האלמוגים ומגביר את התמותה, יותר מאשר השפעת כל גורם בנפרד.
- מחקר זה מדגיש את הצורך בפעולות גלובליות להקטנת גזי חממה.
- אם בעוד כ-50 שנה תנאי הסביבה הימית יהיו בהתאם לתחזיות, ואם תגובתם הפיזיולוגית של האלמוגים תהיה דומה לזו שהוצגה בניסויים קצרים אלה, עשוי הים התיכון להיוותר ללא אלמוגים, ואולי גם ללא בעלי חיים אחרים בעלי שלד גירני.

המערכת

תקציר

עליית ריכוזי פחמן דו-חמצני אטמוספרי מביאה להתחממות עולמית ולהחמצת האוקיינוסים, ומעוררת חשש רב לקיום אלמוגים משקייעי שלד, עקב התאמתם לטווח צר של תנאי טמפרטורה וחומציות המים. מאפייניו הגאוגרפיים-אוקיינוגרפיים של הים התיכון תרמו להחמצת מימיו מאז המהפכה התעשייתית, החמצה המוערכת כגבוהה יותר מהממוצע העולמי. בניסוי שנערך לאחרונה בשיתוף קבוצת מחקר מאיטליה ומישראל נבדקו השפעות שינויים בחומציות מי הים, הן לאורך מפל (gradient) טבעי של ערך ההגבה (pH) באיים האיווליים באיטליה הן בניסוי מעבדה באוניברסיטת בר-אילן, על אלמוגים תיכוניים מהמין *Balanophyllia europaea*. תמותת האלמוגים תועדה בעזרת סדרת תצלומים שבוצעו לאורך השנה בניסוי השטח. התוצאות הראו כי התמותה בערכי הגבה שהיו נמוכים מהנורמה, הייתה גבוהה במיוחד בעונה החמה. באותו זמן הוצבו במעבדה אלמוגים במערכת אקווריומים בתנאים מבוקרים בעלי ערך הגבה קבוע של 7.8 ועלייה מתונה של טמפרטורות מי הים, החל ב-17 מעלות צלזיוס ועד ל-29 מעלות, לאורך 8 חודשים. תועדה ירידה חדה ביעילות הפוטוסינתזה שהחלה בחשיפה לטמפרטורה של 20 מעלות, וירידה כזו היא מחוון מקובל לעקת חום של אלמוגים. מהתוצאות שהתקבלו מניסוי השטח ומניסוי המעבדה עולה כי האלמוגים עמידים פחות בפני שינויים בערך ההגבה בטמפרטורות גבוהות: היכולות הפוטוסינתטיות של האלמוגים נפגמות, וחלה תמותה נרחבת של הרקמה החיה.

מבוא

עלייה בריכוזי הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה משנה את ההרכב הכימי של האוקיינוסים, תופעה הידועה בשם: "החמצת אוקיינוסים", וכן מובילה להתחממות עולמית ולעלייה בטמפרטורת פני הים (SST – Sea Surface Temperature). במהלך העשורים האחרונים תועדה עלייה של כ-0.3–0.4 מעלות צלזיוס בממוצע השנתי של טמפרטורת פני הים [16], ומודלים חוזים עלייה נוספת של כ-4 מעלות לפחות עד סוף המאה [15]. ערך ההגבה (pH) של האוקיינוסים הנמדד כיום עומד על כ-8.1. ערך זה נמוך ב-0.1 יחידות מערך ההגבה טרום המהפכה התעשייתית, כלומר המים חומציים יותר משהיו [9], ועד שנת 2100 הוא צפוי לרדת ב-0.3–0.4 יחידות נוספות [5].

באזורים ממוזגים, כדוגמת הים התיכון, צפויים ההשפעות הללו להיות קיצוניות יותר. הים התיכון מאופיין כ"אוקיינוס מיניאטורי" [3], ומחקרים מצביעים על קצב התחממות גבוה עד פי שלושה לעומת אוקיינוסים אחרים [15]. מחקרים מעריכים כי מאפייניו הגאוגרפיים-אוקיינוגרפיים של הים התיכון (אלקליניות גבוהה [7], שיעור תחלופת מים גבוה וריכוזים גבוהים של העשרה בפחמן דו-חמצני ממקור אנושי [2]) תרמו להחמצת מימיו מאז המהפכה התעשייתית בכ-0.14 יחידות pH, החמצה המוערכת כגבוהה בהשוואה לממוצע העולמי [6].

שינויים אלה מעוררים חשש רב להישרדותם של אורגניזמים ימיים משקייעי שלד, ובפרט של אלמוגים, עקב התאמתם לטווח צר של תנאי טמפרטורה וחומציות המים. במהלך העשורים האחרונים השפיעה ההתחממות העולמית בצורה חריפה על אלמוגים בכל מיני האוקיינוסים, וגרמה לאירועי הלבנה המוניים שתדירותם, היקפם הגאוגרפי ועוצמתם נמצאים במגמת עלייה, ופעמים רבות מסיימים במות האלמוג [4, 14]. מעבר לכך, נמדדו קצבי השקעת שלד נמוכים באלמוגי אבן בתנאי החמצת האוקיינוסים [17].

חקר השפעות העלייה בטמפרטורת מי הים והחמצת האוקיינוסים (להלן: השינוי העולמי) על אלמוגים מהים התיכון נמצא בראשיתו, ושאלות רבות עודן פתוחות. במסגרת פרויקט שממנתה הקרן האירופית המכונה Coral Warm, בדקנו כיצד משפיעים שינויים בחומציות מי הים, לאורך מפל (gradient) טבעי של ערך ההגבה ובניסוי מעבדה, על האלמוג *Balanophyllia europaea*. *B. europaea* הוא אלמוג בעל פוליפי יחיד (solitary), צורתו סגלגלה, וקוטרו עד 20 מ"מ (אורך 1). הוא מאופיין בסימביוזה עם אצות חד-תאיות שיתופיות בשם זואוקסנטלות. *B. europaea* הוא אלמוג שאינו בונה שוניית (ahermatypic), אולם הוא נפוץ בבתי גידול סלעיים בים התיכון, וניתן למצוא אותו בצפיפות גבוהה של עד 100 פרטים ל-1 מ"ר [12]. מכאן, שלא אלמוג זה חשיבות מרובה במארג האקולוגי בים התיכון. אלמוג זה היה למושא מחקר בעיקר בתחומים של דינמיקה של אוכלוסיות וגדילה [10], רבייה [9] והשקעת שלד [11, 13]. כדי לבחון את ההשפעה של חומציות מי ים ועליית טמפרטורות עקבנו במחקר זה אחר תמותת פוליפים של *B. europaea* לאורך עונות השנה, ונמדדה היעילות הפוטוסינתטית של האצות הסימביוטיות שברקמות האלמוג כמדד לעקת חום באלמוגים.



איור 1. האלמוג *Balanophyllia europaea* | צילום: Francesco Sesso

שיטות וחומרים

ניסוי השטח נערך ליד האי Panarea באיים האיוליים (איטליה) באתר המאופיין בבעבות קבוע של פחמן דו-חמצני וולקני, היוצר מפל טבעי של ערך ההגבה (pH), ומהווה מעבדה טבעית. פוליפים של *B. europaea* הועתקו לארבע תחנות נבחרות בעומק של 10 מטר שערכי החומציות שלהן היו כדלקמן: 8.07 (כאתר הביקורת), 7.87, 7.74 ו-7.4, כדי ללמוד את השפעת חומציות מי ים על האלמוג. כדי לעקוב אחר תמותת הפוליפים השתמשנו בסדרת תצלומים שבוצעו לאורך השנה, וניתחנו אותם בתכנת המחשב Nikon NIS Elements.

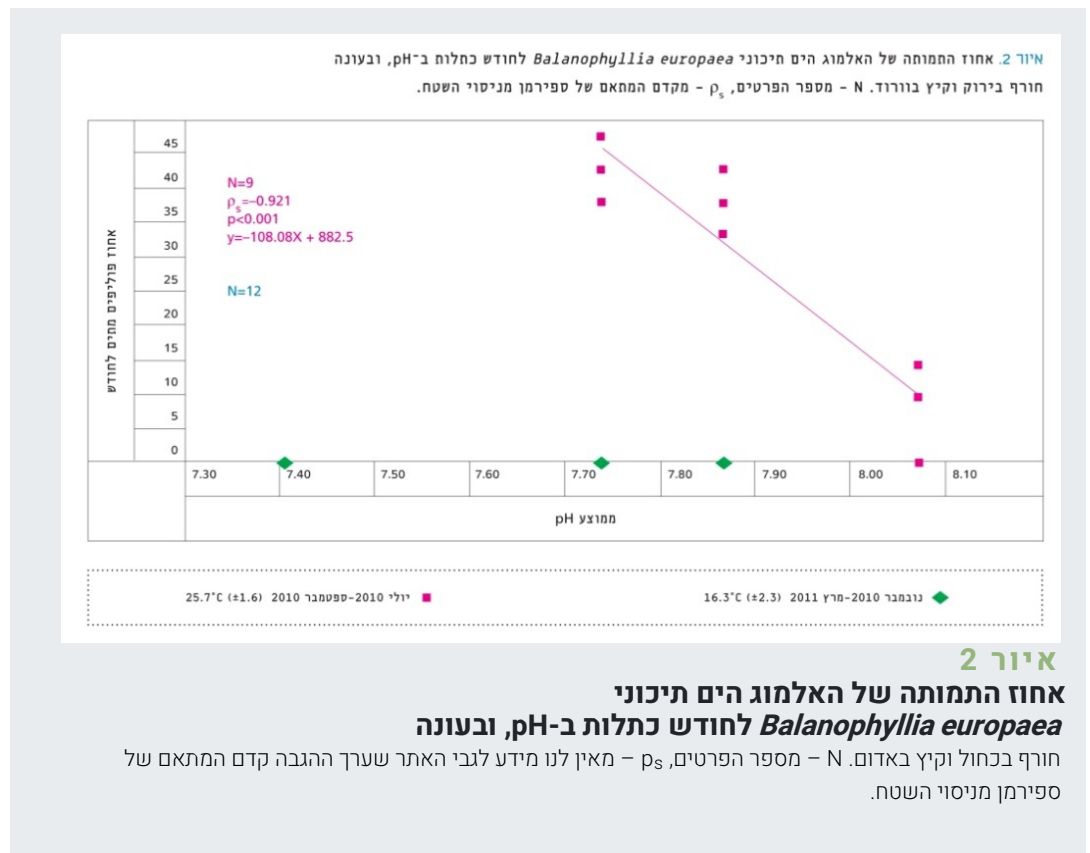
במעבדה באוניברסיטת בר-אילן הוצבו פוליפים של *B. europaea* במערכת אקווריומים בתנאים מבוקרים: באקווריום ראשון ערך ההגבה היה קבוע ועמד על 7.8, עם עלייה מתונה בטמפרטורה (שינוי של מעלה אחת לאורך שלושה שבועות) מ-17 מעלות ל-29 מעלות לאורך 8 חודשים. באקווריום שני, שערך ההגבה בו עמד על 8.1 והעלייה בטמפרטורה בו הייתה מתואמת עם האקווריום הראשון, הונחו פוליפים נוספים. חלק מהאלמוגים הונחו באקווריום ביקורת עם תנאים הדומים לאלה שבסביבתם הטבעית בים הליגורי (איטליה): 17 מעלות וערך הגבה של 8.1. ערך ההגבה באקווריומים נמדד על-ידי אלקטרודות pH שכוילו אחת לשבוע בעזרת תמיסות בופר pH ייעודיות. מעבר לכך, האלקליניות במערכת הניסויית הוערכה אחת לשבועיים על-ידי טיטור (Gran titration), וערכה נשמר קבוע, 3 (בקירוב) mEq kg^{-1} . לאורך תקופת הניסוי, בהפרשים של 3 מעלות, נמדדה היעילות הפוטוסינתטית (Effective Quantum Yield) של המערכת הפוטוסינתטית II של האצות השיתופיות שבתאי האלמוג. המדידות בוצעו בעזרת מכשיר IPAM – Imaging Pulse Amplitude Modulation ולאחר 30 דקות של הסתגלות לחושך. היעילות הפוטוסינתטית (Fv/Fm) חושבה על-ידי קביעת ערך הפלואורונות (fluorescence) המתקבל לאחר תקופת החושך (F0) והפלואורונות המרבית (Fm), כשכל מרכזי הריאקציה מחוזרים.

$(Fv/Fm = [Fm - F0]/Fm)$. יחס Fv/Fm משמש סמן מקובל לעקת חום באלמוגים ומסייע בניטור היכולות הפוטוסינתטיות של האצות השיתופיות [8, 1].

תוצאות

ניסויי השטח הראו כי בעת חודשי החורף (נובמבר עד מרץ), כשהטמפרטורה הממוצעת היא 16.3 מעלות, חלה תמותה מועטה של פוליפי *B. europaea* ולא נמצא קשר ישיר לערך ההגבה (איור 2). בניגוד לכך, בעונה החמה, כשהטמפרטורה הייתה 25.7 מעלות בממוצע, עמד שיעור התמותה על כ-50% מהפוליפים בחודש באתרים בעלי ערך הגבה נמוך, לעומת התמותה באתר

הביקורת שהייתה נמוכה משמעותית. נראה כי בקיץ תמותת הפוליפים של *B. europaea* היא בהתאמה לערך ההגבה, מכאן כי התמותה גדלה משמעותית עם העלייה בחומציות מי הים. אין לנו מידע לגבי האתר שערך ההגבה שלו עמד על 7.4 בקיץ, מאחר שתחנת דגימה זו של האלמוגים נסחפה בגין תנאי ים סוערים.



איור 2

אחוז התמותה של האלמוג הים תיכוני

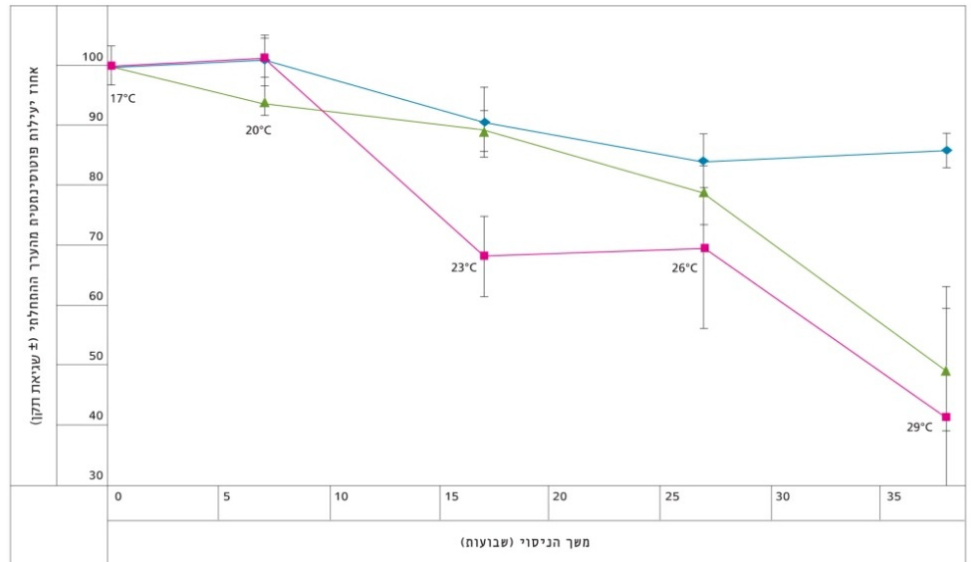
Balanophyllia europaea לחודש כחלות ב-pH, ובעונה

חורף בקיץ באדום. N – מספר הפרטים, ρ_s – מאין לנו מידע לגבי האתר שערך ההגבה קדם המתאם של ספירמן מניסוי השטח.

תוצאות ניסוי האקווריומים במעבדה מוצגות ב**איור 3**, ומסכמות את מדידות היעילות הפוטוסינתטית שבוצעו לאורך כל תקופת הניסוי. מתוצאות הניסוי עולה כי לא נרשמה ירידה משמעותית ביעילות הפוטוסינתטית של האלמוגים באקווריום הביקורת בהשוואה לערכים ההתחלתיים שנמדדו, והיא נשמרה בממוצע של כ-90% לאורך כל הניסוי. לעומת זאת, האלמוגים מאקווריום טיפול הטמפרטורה הראו ירידה ביעילות הפוטוסינתטית לאורך כל תקופת הניסוי, שמחריפה בקצבה לקראת סוף הניסוי. האלמוגים מהאקווריום שערך ההגבה בו נותר קבוע ברמה של 7.8 בשילוב עם עלייה בטמפרטורה, הראו ערכים נמוכים אף יותר החל ב-23 מעלות ומעלה, ובטמפרטורה של 29 מעלות חלה ירידה דרמטית נוספת של כ-30% ביעילות הפוטוסינתטית של האצות השיתופיות שבאלמוגים.

איור 3. יעילות פוטוסינתטית (Fv/Fm) כאחוז מהערך ההתחלתי בפוליפים של *Balanophyllia europaea* לאורך תקופת הניסוי באקווריוםים במעבדה

בכחול מוצג ממוצע היעילות הפוטוסינתטית של פוליפים מאקווריום הביקורת, בירוק מאקווריום בעל pH של 8.1 ועלייה מחונה בטמפרטורות (כמצוין בדיון ומסקנות), ובזרוע מאקווריום הטיפול בעל pH של 7.8 עם עלייה מחונה בטמפרטורה (כמצוין בדיון ומסקנות).



איור 3

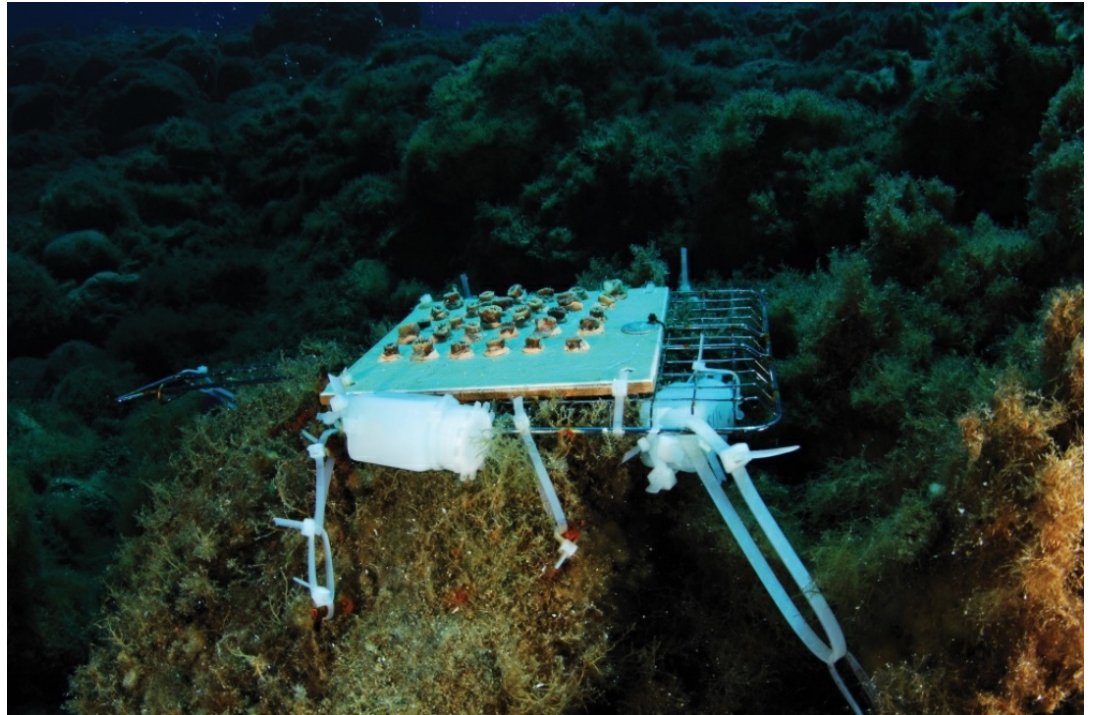
יעילות פוטוסינתטית (Fv/Fm) כאחוז מהערך ההתחלתי בפוליפים של *Balanophyllia europaea* לאורך תקופת הניסוי באקווריוםים במעבדה

בכחול מוצג ממוצע היעילות הפוטוסינתטית של פוליפים מאקווריום הביקורת, בירוק מאקווריום בעל pH של 8.1 ועלייה מתונה בטמפרטורות (כמצוין בדיון ומסקנות), ובזרוע מאקווריום הטיפול בעל pH של 7.8 עם עלייה מתונה בטמפרטורה (כמצוין בדיון ומסקנות).

דיון ומסקנות

ניסוי השטח הראה כי קיימת התאמה חזקה בין תמותת הפוליפים למפל ערך ההגבה רק בזמן העונה החמה, כלומר בשילוב עם עלייה בטמפרטורה, ואילו בעונת החורף לא נמצאה התאמה משמעותית. מכאן משתמע כי בקיץ תמותת הפוליפים תלויה בחומציות מי הים ביחס ישיר: ככל שמי הים חומציים יותר אזי תמותת הפוליפים עולה (איור 1). כמו כן, תוצאות ניסוי המעבדה מצביעות על ירידה ביכולות הפוטוסינתטיות של האלמוגים עם העלייה בטמפרטורות, ירידה שמתגברת אף יותר בתנאים של ערך הגבה של 7.8 והחל ב-20 מעלות (איור 2).

שילוב של ניסויים אלה מלמד על ההשפעה הסינרגית של ירידה בערך ההגבה בשילוב עם עליית טמפרטורת מי הים על האלמוג שנבדק. בתנאים אלה נראה כי האלמוגים עמידים פחות: היכולות הפוטוסינתטיות נפגמות משמעותית, וניכרת תמותה רחבה של פוליפים.

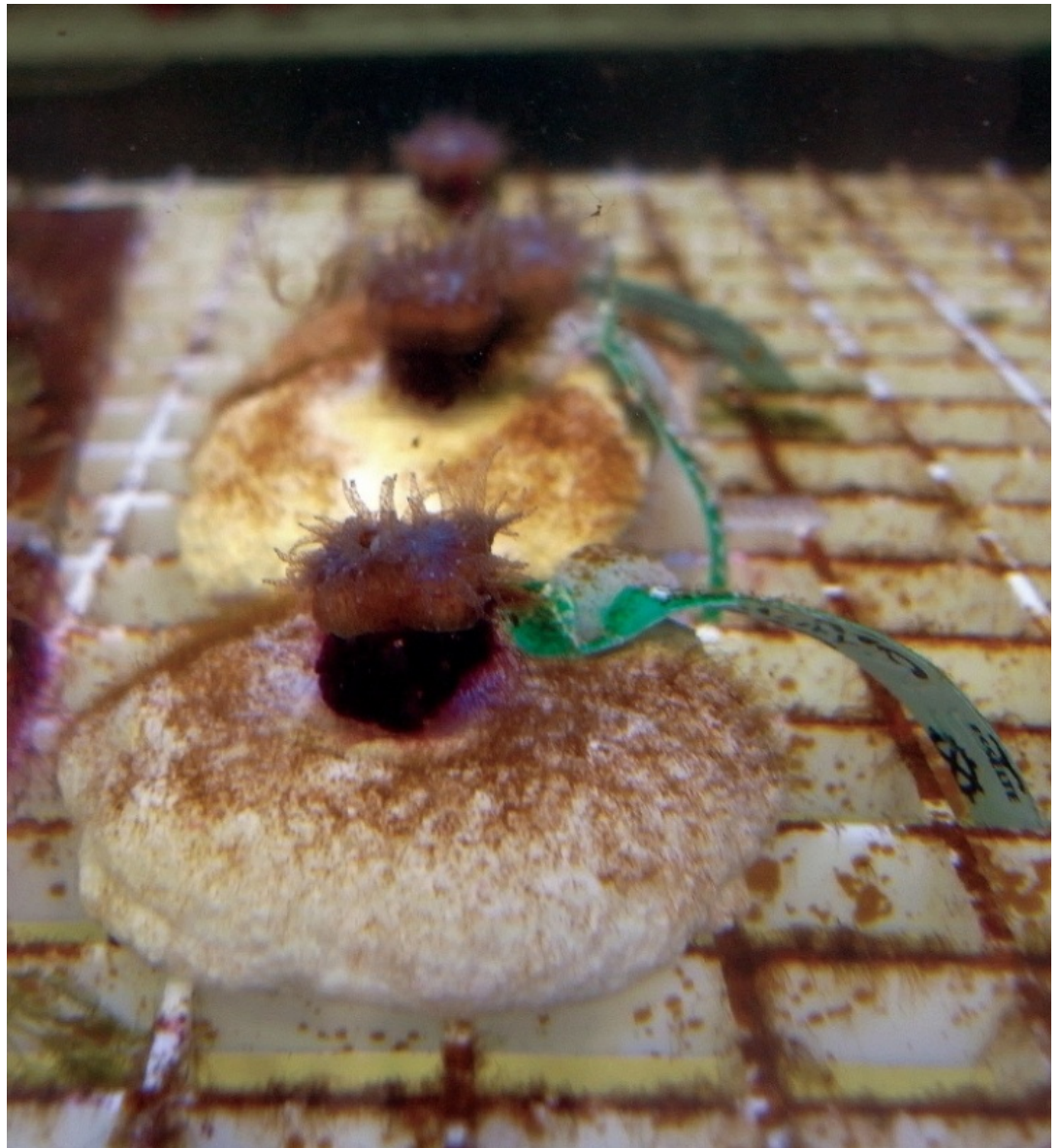


תחנת דגימה בעומק 10 מטר, האיים האדומים | צילום: Erik Caroselli

תוצאות אלה עולות בקנה אחד עם מספר מחקרים שבוצעו בעבר באלמוגים טרופיים: פוטוסינתזה והשקעת שלד באלמוג *Stylophora pistillata* נפגמו רק כאשר ירידה בערך ההגבההלוותה בעלייה חריגה בטמפרטורה [20]. במחקר אחר, לאחר 14 ימי ניסוי, הניבו האלמוגים *Pocillopora meandrina* ו-*Porites rus* תוצאות השקעת שלד עם מגמה דומה לשל *S. pistillata*, אולם היעילות הפוטוסינתטית שנמדדה לא הראתה התאמה לחומציות [18]. על פי מיטב ידיעתנו, רק מחקרם של Rodolfo-Metalpa וקבוצתו ב-2011 [21] התמקד בים התיכון באלמוג *B. europaea*: במחקר זה נבדקו קצבי השקעת השלד ותמותה לאורך מפל טבעי של ערך ההגבהה באי Ischia שבאיטליה במשך 4 עד 7 חודשים. תוצאותיהם תומכות בתוצאות מחקר זה ובטענה שחלה סינרגיה בין עלייה בחומציות מי הים לעלייה בטמפרטורת מי הים בתהליכי החיים באלמוגי אבן. אולם במחקר זה לא נבדקו ההשפעות על תהליך הפוטוסינתזה, וכן לא בוצע ניסוי דומה במעבדה בתנאים קבועים, ידועים ומבוקרים.

ישנה חשיבות גדולה לחקר השפעות השינוי העולמי באופן אינטגרטיבי ודרך חקר הדינמיקה הסינרגטית של מספר גורמי עקה באלמוגים, כמו עלייה בטמפרטורה ובחומציות. מספר מחקרים שמו זאת למטרה, אולם המידע בספרות המדעית לגבי השפעות ארוכות טווח משולבות של ערך הגבהה וטמפרטורה על תהליכי החיים באלמוגי אבן בים התיכון, לוקה בחסר. אף על פי שידוע לנו מעט מאוד על פוטנציאל ההסתגלות של אלמוגים ואם הוא רלוונטי לקצב שינוי האקלים העולמי, מחקר באמצעות ניסויים לטווח ארוך של מספר חודשים, כמו מחקר זה, הוא קריטי ביותר. התוצאות המוצגות במחקר זה מדגישות את החשיבות של לימוד משתנים אלה של טמפרטורה וערך הגבהה יחדיו, מאחר שהשפעתם יחד ולחוד שונה, וכן כי השקפה זו ראלית יותר לעתיד לבוא בהתחשב בשינוי העולמי הצפוי כבר בעשורים הקרובים.

ניסויים אלה נערכו במסגרת פרויקט הממומן על-ידי הקרן האירופית Warm Coral, שמטרתו יצירת תחזיות לשרידות אלמוגים באזורים ממוזגים ותת-טרופיים בתנאים של טמפרטורה וחומציות מי ים גבוהות. בניסויים נוספים נשווה תוצאות אלה לתוצאות ניסויים דומים ארוכי טווח באלמוגים מים סוף הן ברמת ההשפעות הפיזיולוגיות הן בביטוי של גנים ושל מסלולים ביוכימיים ותאיים.



זולפים באקווריום שנמדדה בו יעילות פוטוסינתטית | צילום: קרן מאור-לנדאו

מקורות

1. Ainsworth TD, Hoegh-Guldberg O, Heron SF, et al. 2008. Early cellular changes are indicators of pre-bleaching thermal stress in the coral host. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **364**: 63–71
2. Bethoux JP, El Boukhary MS, Ruiz-Pino D, et al. 2005. Nutrient, oxygen and carbon ratios, CO₂ sequestration and anthropogenic forcing in the Mediterranean Sea. *The Handbook of Environmental Chemistry* **5**: 67–86
3. Bethoux J, Gentili B, Morin P, et al. 1999. The Mediterranean Sea: A miniature ocean for climatic and environmental studies and a key for the climatic functioning of the

- .North Atlantic. *Progress in Oceanography* **44**: 131–146
4. Brown BE. 1997. Coral bleaching: Causes and consequences. *Coral Reefs* **16**: s129–s138
5. Caldeira K and Wickett M. 2003. Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature* **425**: 365
6. Calvo E, Simó R, Coma R, et al. 2011. Effects of climate change on Mediterranean marine ecosystems: The case of the Catalan Sea. *Climate Research* **50**: 1–29
7. CIESM. 2008. Impacts of ocean acidification on biological, chemical and physical systems in the Mediterranean and Black Seas. Monaco. *CIESM Workshop Monographs* **36**: 124
8. Fitt W, Brown B, Warner M, and Dunne R. 2001. Coral bleaching: Interpretation of thermal tolerance limits and thermal thresholds in tropical corals. *Coral Reefs* **20**: 51–65
9. Goffredo S, Arnone S, and Zaccanti F. 2002. Sexual reproduction in the Mediterranean solitary coral *Balanophyllia europaea*. *Marine Ecology Progress Series* **229**: 83–94
10. Goffredo S, Caroselli E, Mattioli G, et al. 2008. Relationships between growth, population structure and sea surface temperature in the temperate solitary coral *Balanophyllia europaea* (Scleractinia, Dendrophylliidae). *Coral Reefs* **27**: 623–632
11. Goffredo S, Caroselli E, Mezzo F, et al. 2012. The puzzling presence of calcite in skeletons of modern solitary corals from the Mediterranean Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **85**: 187–199
12. Goffredo S, Mezzomonaco L, and Zaccanti F. 2004. Genetic differentiation among populations of the Mediterranean hermaphroditic brooding coral *Balanophyllia europaea* (Scleractinia: Dendrophylliidae). *Marine Biology* **145**: 1075–1083
13. Goffredo S, Vergni P, Reggi M, et al. 2011. The skeletal organic matrix from Mediterranean coral *Balanophyllia europaea* influences calcium carbonate precipitation. *PLoS One* **6**: e22338
14. Hoegh-Guldberg O. 2010. Coral reef ecosystems and anthropogenic climate change. *Regional Environmental Change* **11**: 215–227
15. IPCC. 2007. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of The Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon S, Qin D, Manning M, et al. (Eds). Cambridge, U. K. And NY USA: Cambridge University Press
16. Kleypas, JA, Danabasoglu Gokhan, and Lough JM. 2008. Potential role of the ocean thermostat in determining regional differences in coral reef bleaching events. *Geophysical Research Letters* **35**: L03613
17. Langdon C and Atkinson M. 2005. Effect of elevated pCO₂ on photosynthesis and

- calcification of corals and interactions with seasonal change in temperature/irradiance and nutrient enrichment. *Journal of Geophysical Research* **110**: C09S07
- Muehllehner N and Edmunds PJ. 2008. Effects of ocean acidification and increased temperature on skeletal growth of two scleractinian corals, *Pocillopora meandrina* and *Porites rus*. Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium; 7–11 (Jul 2008; Fort Lauderdale (FL
- Orr JC, Fabry VJ, Aumont O, et al. 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* **437**: 681–686
- Reynaud S, Leclercq Nicolas, Romaine-Lioud S, et al. 2003. Interacting effects of CO₂ partial pressure and temperature on photosynthesis and calcification in a scleractinian coral. *Global Change Biology* **9**: 1660–1668
- Rodolfo-Metalpa R, Houlbrèque F, Tambutté É, et al. 2011. Coral and mollusc resistance to ocean acidification adversely affected by warming. *Nature Climate Change* **1**: 308–312