

לא ניתן להסתפק בפעולות שימור סביל לשם הגנה על שוניית אלמוגים, אלא יש לנקוט גם בפעולות שיקום פעיל, כגון יערנות ימית | צילום: יעל הורשובסקי-פרידמן



סקירות

יערנות ימית: "כי יער הוא, ובראתו, והיה לך תוצאותיו"

(יהושע י"ז, 18)

יעל הורשובסקי-פרידמן^[1],^[2] וברוך רינקביץ^[1]

^[1] המכון הלאומי לאוקיינוגרפיה, החברה לחקר ימים ואגמים לישראל, חיפה
^[2] החוג לביולוגיה אבולוציונית וסביבתית, אוניברסיטת חיפה

yaelh@ocean.org.il^[1,2]

buki@ocean.org.il^[1]

תקציר

מצבן של שוניות האלמוגים מתדרדר כתוצאה מפעילויות מעשה ידי אדם, שבשילוב עם השפעת שינויי אקלים גלובליים, מאיימות על עתידן. כדי לשמר מערכת אקולוגית מגוונת זו יש לתגבר את פעולות השימור הסביל בצעדי שיקום פעיל. בשל הדמיון האקולוגי, הביולוגי והתפקודי בין עצים לאלמוגים, ניתן להיעזר בעקרונות שיקום פעיל של חברות יער. לפיכך הועלה לפני יותר מעשור רעיון היערנות הימית, שמקורו בשיטת היערנות היבשתית. שיטה זו מורכבת משני שלבים: (1) ייצור של מושבות אלמוגים חדשות במשתלת אלמוגים וגידולן שם; (2) העתקת מושבות אלו, בהגיען לגדלים מאימים, לשוניות פגועות. משתלות אזוריות שמינים מקומיים מנוהלים בהן, מאפשרות ליצור מאגר אלמוגים שזמין לפעולות שיקום בדרישה מְדִידת. במסגרת המחקר ברצינול היערנות הימית פותחו מספר דגמי משתלות באתרים שונים בעולם. לכל טיפוס משתלה תכונות המאפשרות יתרון בתנאי סביבה מסוימים. במשתלות אלו הוערך הפוטנציאל לייצור המוני של אלמוגים ממינים שונים ולגידולם בתנאי גידול זהים. לא רק שהמשתלה הוכחה ככלי יעיל, המייצר תנאי גידול מיטביים לייחורי אלמוגים, אלא שגם עבודה בתנאי מזג אוויר קיצוניים הציגה פתרונות ניהול להתמודדות עם סערות ועם תנאי סביבה משתנים. המחקרים הראו שלמקטעי אלמוגים מספיקה תקופת משתלה הנעה בין חמישה חודשים לשנתיים כדי שיתפתחו למושבות בנות שתילה. את מאגר האלמוגים ניתן לייצר גם מתוצרי רבייה מינית. משתלת אלמוגים נמצאה גם כמקור להפצת פגיות בזכות יכולות רבייה מוגברות של אלמוגים במהלך גידולם במשתלה. לאחר שתילתם, הראו אלמוגי משתלה יכולת לשגשג באתרים מופרעים ואף תרמו לרביית האלמוגים בשונית הפגועה. נוסף על כך, שתילת אלמוגים יוצרת גומחות מרחביות ואקולוגיות חדשות עבור דגים וחסרי חוליות. שיטת היערנות הימית היא אפוא פתרון ייחודי ויעיל להתדרדרות מצבן של שוניות האלמוגים. אין ספק שמחקרים עתידיים יציגו היבטים נוספים בפיתוח בר־קיימא זה של שוניות אלמוגים.

מילות מפתח: גינון שוניות · משתלות אלמוגים · שוניות אלמוגים · שיקום פעיל · שתילת אלמוגים

מבוא

שוניות אלמוגים, מבתי הגידול המגוונים והיצרניים בעולם, מספקות שירותים ומשאבים חיוניים כגון מזון, הגנה חופית, פעילות תיירותית ותעסוקה למאות מיליוני בני אדם החיים בקרבתן. למערכת אקולוגית זו תפקידים ברבייה, בגדילה ובמעגלי תזונה של מגוון בעלי חיים^[25,16]. למרבה הצער, בעקבות שימוש יתר במשאבי השוניות, שינויי האקלים הגלובליים ופעילות האדם במהלך העשורים האחרונים, מתועד הרס מהיר של שוניות ברחבי העולם, שמאיים על עתידן^[23,18,12]. בין הפעילויות מעשה ידי אדם התורמות להתדרדרות זו נמנים דיג יתר ושימוש בשיטות דיג הרסניות, זיהום, פיתוח עירוני ותיירות ימית^[30]. שינויי האקלים (עלייה בטמפרטורת מי הים והחמצתם, עלייה בתכיפות סערות ועוד) מתגברים בתדירותם ובעוצמתם וגורמים לתופעות הרסניות כגון הלבנת אלמוגים (bleaching) – נגרמת מכך שאצות חד־תאיות סימביוטיות עוזבות את האלמוג או מתות^[27,8]. כדי לשמר את המגוון הביולוגי ואת כושר ההתחדשות של מערכת השוניות יש צורך בפעולות לשימור הקיים ולשיקום נזקים.

פעולות אלו יכולות להיות סבילות או פעילות^[7,23]. השיקום הסביל מתמקד בדרכים שאינן כרוכות בפעולה ישירה על שוכני השוניות, ומתמקד בביטול הגורמים המזיקים באמצעות ניהול ואכיפת חוקים, כדי לעודד את התנאים המתאימים להתאוששות דרך תהליכים טבעיים^[7,23]. שיקום מסוג זה אורך זמן רב והוא מתאים לשוניות שנפגעו מזערית (לרוב הן רחוקות מפעילות האדם). בשוניות הנמצאות תחת משטר מתמיד של גורמי הרס או בשוניות שעברו שינוי מופע (phase-shift), שהתפתחה בו מערכת שונה מבית הגידול המקורי^[18], יכולת השיקום הטבעי אינה קיימת או שאינה מדביקה את קצבי ההרס. מנגד, השיקום הפעיל מבוסס על פעילויות יזומות שמטרתן לזרז תופעות טבעיות. שתילת אלמוגים היא דוגמה לדרך פעילה המאפשרת לזרז את ההחלמה הטבעית ובכך להגן על המגוון הביולוגי המאיים או לשמר את תפקוד בית הגידול^[25], בייחוד כשהשינויים בתנאים הביולוגיים והפיזיקליים הם תכופים או משמעותיים. מהספרות המדעית עולה כי במרבית המקומות שנוסו בהן



על עצים ואלמוגים

שוניות אלמוגים מתוארות גם כ"יערות הגשם של הים", וזאת בשל המגוון הביולוגי יוצא הדופן והיצרנות הגבוהה המאפיינים את שתי המערכות האקולוגיות האלו. בחינת המבנה והתפקוד של יערות ושל שוניות חושפת קווי דמיון נוספים. למבנה המרחבי של בתי הגידול במערכות אלה אחראים בהתאמה עצים ואלמוגי אבן, שתי קבוצות יצורים ישיבים שחלקם מוגדרים כ'מהנדסי סביבה' (ecosystem engineers). מהנדסי סביבה הם יצורים שבעצם הימצאותם ופעולתם יוצרים גומחות אקולוגיות ומרחביות שמינים רבים אחרים מאכלסים אותן. היעלמותם של מינים מהנדסי סביבה כרוכה בשינויים משמעותיים במגוון הביולוגי ובסילוקם של מינים המושפעים מנוכחותם או מחסרונם של מהנדסי הסביבה. נוסף על כך, מהנדסי סביבה, בעצם נוכחותם, יוצרים תת-תנאים שונים המאפשרים למינים אחרים להתפתח ומשנים את התנאים הא-ביוטיים (כגון עוצמות אור, מהירות זרם/רוח) והביוטיים (כגון סוג המינים ותפוצתם) של בית הגידול שהם מאכלסים [7, 24]. ישנם היבטי השוואה נוספים בין אלמוגים לעצים. לשתי קבוצות אלו יכולת רבייה מינית ווגטיבית, והם חולקים חוקים ארכיטקטוניים בסיסיים לגדילה של תצורות גוף.

שתי מערכות אקולוגיות אלו נמצאות בעשורים האחרונים תחת השפעת אדם כרונית ושינויי אקלים. נזק רב מוטב ליערות כתוצאה מפעילויות האדם הגורמות שינויים במבנה של חברות היער ובהרכבו, לבליית קרקע ואף למדבור. אי יכולתם של יערות להתאושש בכוחות עצמם הובילה לפיתוח כלים יעילים של שיקום פעיל שהצליחו לבלום את גמגמת ההרס ולהעשיר את המגוון הביולוגי תחת רציונל היערנות [7, 24]. מיני העצים הנבחרים לגידול במשתלות ומאפשרים לבנות מחדש חברות יער, הם לרוב אלו המראים את הביצועים הטובים ביותר בתנאי שיקום, דבר המצריך לעתים פשרה בין מדע למעשיות. יערות שתולים אינם מגוונים לרוב כמו יערות טבעיים, אך יחד עם זאת הם תורמים לשימור המגוון הביולוגי, מספקים בית גידול יקר ערך למינים בסכנת הכחדה, ומגדילים את היצרנות של אזורים חשופים ואת יציבותם [7, 25]. כיום, יערות שתולים הם כלי חשוב בשמירת המגוון הביולוגי היבשתי, וחלק מהיערות השתולים שניטעו במטרה לספק חומר לתעשיית העץ, נעשו מוקדי מגוון ביולוגי.

בשל הדמיון הביולוגי, המבני והתפקודי בין עצים ואלמוגים ובין יערות ושוניות, אך טבעי שעקרונות היערנות יסייעו בהנחת אבני הבניין התאורטיות והמעשיות לשיקומן הפעיל של שוניות אלמוגים. רציונל היערנות הימית נשען על עקרונות אלו ומורכב משני שלבים: השלב הראשון מתמקד ביצירת מושבות אלמוגים חדשות, ממקור וגטיבי (מקטעי אלמוגים קטנים כשברונים, ענפים) או מיני (תאי ביצה מופרים, פגיות), וגידולן במשתלה תת-ימית (*in situ*) או יבשתית (*ex situ*) עד הגיען לגודל ולצורה

פעולות ניהול סבילות, הן לא הצליחו לשפר את מצב השוניות או לבלום את התדרדרותן. רוב מאמצי השיקום הסביל התמקדו בהקמת שמורות ימיות חדשות, בהגדלת שטח השמורות הקיימות ובצמצום ניצול משאבי השונית [25]. אין ספק שיש ביכולתן של פעולות מסוג זה להוביל להקלת הלחץ האנתרופוגני (כתוצאה מפעילות האדם) המקומי, אך הן אינן מסוגלות לספק מענה למפגעים בקנה מידה גדול, כדוגמת אירועי תמותת אלמוגים כתוצאה מהלבנה [8, 17] או מלחץ אנתרופוגני כרוני. כישלון הפעולות הסבילות נובע, בין היתר, מבעיות תכנון, יישום והטמעה (דגמי שמורות שאינם משקפים את הבנת הסיכונים, לבלול לגבי מטרות וכו') [25]. בשל אי יכולתן של מרבית השוניות להשתקם ממפגעים אנתרופוגניים ללא התערבות, עלה הצורך בתגבור ממשק שוניות המבוסס על פעולות של שיקום פעיל [23, 24, 30].

תחילת דרכן של פעולות לשיקום שוניות פעיל

בעוד שעבור מגוון בתי גידול יבשתיים פותחו דרכי פעולה המבוססות על נהלים מגובשים, ארגז כלי השיקום הפעיל של הסביבה הימית נותר דל. מרבית פעילות השיקום התמקדה בעבר בעידוד התיישבות טבעית על-ידי השקעת מצעים מלאכותיים או בהעברת מושבות אלמוגים שלמות וקטעי אלמוגים משונית בריאה לשונית פגועה. אולם מחקרים הראו שלא ניתן לשלוט בהתפתחות אוכלוסיות על מצעים מלאכותיים או לנבא את הרכבו, ורק לעתים נדירות דומות אוכלוסיות אלו לאוכלוסיות השונית הטבעית, אפילו בחלוף זמן רב [20, 33]. נוסף על כך, השקעת עצמים מלאכותיים סובלת מקצבי גיוס מינימליים של מושבות אלמוגים חדשות, וכך יוצא שכרה המעשי של דרך פעולה זו - בהפסדה. חולשות נוספות של השימוש במצעים מלאכותיים מופיעות בשינוי הנוף הימי, בהגברת הזיהום הסביבתי [15] ובצמצום אספקת הפגיות (לרוות) לשונית הטבעית, בעצם העברת מצע "מתחרה" להתיישבות [1]. פעילות השתילה הישירה, שהתרכזה בהעברת מושבות שלמות או מקטעים משוניות סובבות לאזורים פגועים [5, 34], גרמה נזק רב לשונית המקור. מחקרים הצביעו על הצורך בשתילת מושבות גדולות או מקטעי מושבות גדולים מפני שנמצא קשר ישיר בין גודל המקטע לשרידותו [4, 34]. אולם השימוש במקטעים גדולים פוגע במושבות האם התורמות ומשפיע על שרידותן, על גדילתן ועל יכולת ההתרבות שלהן [6, 9]. נוסף על כך, פעילות זו אינה מתאימה לשיקום בקנה מידה גדול מפאת המגבלה בכמות מושבות האלמוגים שניתן לקצור בשוניות הטבעיות. לאור מגבלות אלו הוצע לפני כ-15 שנים רעיון 'גינון שוניות אלמוגים' [22, 23, 24, 25] לפיתוח שיטת יערנות ימית המבוססת על עקרונות שיקום יערות. בסקירה זו נציג את ההיגיון שמאחורי היערנות הימית ואת הכלים שגובשו במסגרת יישומה המחקרי בשנים האחרונות בארץ ובעולם.

נוספים בהמשך. כמו כן, שתילת אלמוגי משתלה בחזרה בשונית המקור מצמצמת את האפשרות להיעלמות של מינים וגנוטיפים מקומיים ולכן מאפשרת לשמר את השונות הגנטית המקומית [7].

גינות שוניות אלמוגים – לקחים שנלמדו ממקומות שונים

מחקרים שנערכו בשנים האחרונות באילת ובמספר מקומות ברחבי העולם בחנו את השימוש בשיטת היערנות הימית על שני שלביה. בסקירה הנוכחית נתרכז בעיקר בשלבי המשתלה ונציג מספר מרכיבים רעיוניים וביצועיים שגובשו כתוצאה ממחקרים אלו.

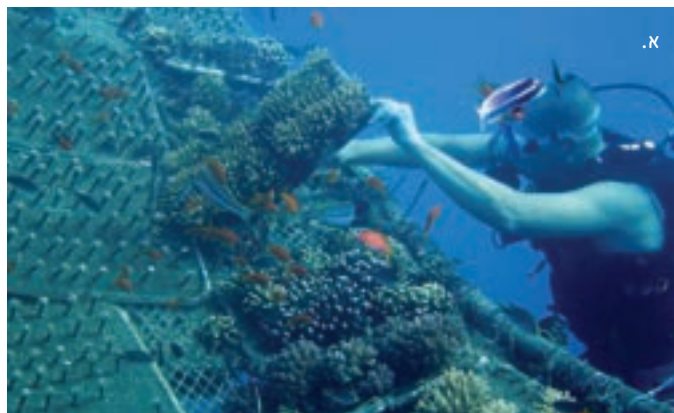
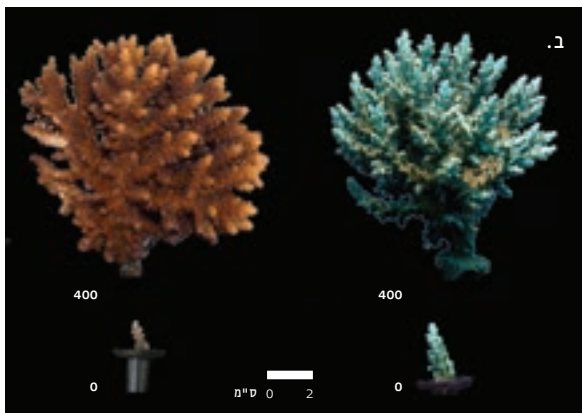
שרידות אלמוגים במשתלה וגידול מקביל של מינים שונים תחת תנאי משתלה זהים: אחד המחקרים הראשונים שבחן את ישימות השלב הראשון של רעיון הגינון הוא עבודתם של Shafir ועמיתיו [30] במשתלה הצפה בגוף המים (איור 1א) בעומק של 6 מטר, ובגובה 12 מטר מעל הקרקעית, בצמוד לכלובי דגים שהיו בצפון מפרץ אילת. מושבות אם מחמישה מיני אלמוגים נאספו ממצעים מלאכותיים ושימשו לייצור 6,813 ייחורים וגוטיביים. לאחר חמישה חודשי גידול הייתה תמותת האלמוגים הממוצעת נמוכה מאוד, כ-13%. המושבות, שהחלו כשברונים, שחזרו במהרה את המבנה המרחבי הטיפוסי למין האלמוג (איור 1ב). לאחר שנה גדלו האלמוגים לממדים המתאימים לשתילה בשונית. מיני אלמוגים נוספים שגודלו בהמשך הציגו תוצאות טובות אך יותר, והצביעו על כך שמקטעי אלמוגים קטנים שלא היו שורדים בתנאים טבעיים מצליחים לשגשג במשתלה ולגדול למושבות בוגרות תוך זמן קצר במיוחד [32]. עבודות נוספות שנערכו בתנאי סביבה מגוונים אחרים הראו

הנדרשים. בשלב השני מעתיקים מושבות חדשות אלו לשוניות פגועות. לתנאי משתלה מוגנים מספר יתרונות: ראשית, הם מאפשרים לייצר מושבות אלמוגים רבות ממספר מקורות שונים. ניתן להשתמש בשברי אלמוגים המפוזרים בשונית בשל סופות או עקב פעילות צלילה, שממילא לא היו שורדים בתנאים טבעיים. ניתן גם לגדל מושבות משרוני אלמוגים זעירים (הכוללים 1-10 פוליפים, יחידות הבסיס של האלמוג) ולייצר מספר רב של מושבות חדשות בזמן קצר, תוך השפעה מזערית על מושבות האם שהשברון נלקח מהן. ניתן גם להשתמש בתוצרי רבייה מינית ולגדל פגיות אלמוגים המתפתחות למושבות, פתרון המכוון להגדלת המגוון הגנטי [19, 22, 23]. שנית, תנאי משתלה מוגנים מספקים לאלמוגים זמן אקלום המאפשר גדילה לממדים מיטביים לשתילה, ובכך מעלים את פוטנציאל ההסתגלות לסביבה החדשה לאחר השתילה [23, 24]. הקמת משתלות שמינים וגנוטיפים מקומיים מנוהלים בהן בצורה בת-קיימא פותרת את הצורך לאסוף אלמוגים משוניות מאוימות, מאפשרת לספק מספר רב של אלמוגים המותאמים לתנאים מקומיים תוך שליטה בעושר המינים, ויוצרת מאגר אלמוגים זמין לדרישה מידית [7, 24].

פעולת השתילה מאפשרת להחליף מושבות אלמוגים מתות במושבות חדשות, ובכך להאיץ את זמן ההתאוששות של השונית ההרוסה [23, 24]. שיקום על-ידי שתילה דומה לתהליך סוקצסיה (succession) טבעית שבו הוספת האלמוגים יוצרת מעין "חברת חלוץ" המכינה את הקרקע לחברה מורכבת יותר שעתידה להתפתח. נוסף על כך, שתילת אלמוגי משתלה באתר פגוע יוצרת גומחות מרחביות ואקולוגיות חדשות עבור דגים וחסרי חוליות ימיים, מונעת השתלטות של אצות, ומקלה על התיישבות אלמוגים

איור 1. דגם משתלה אלמוגים צפה שפותח באילת

(א) מבט כללי על המשתלה, שבה מגשים עם שברוני אלמוגים בראשית גידולם ומגשים עם מושבות בוגרות טרם שחילתן. צילום: יעל הורשובסקי-פרידמן. (ב) שתי דוגמאות להתפתחות מושבות שיטית משברונים (יום 0), לאחר 400 ימי גידול במשתלה האלמוגים. איור 1ב באדיבות שי שפיר.



היבשתיות, משתלות האלמוגים הימיות פתוחות לסביבה ונתונות ל"מטר" של התיישבות של חיות המגיעות מהפלנקטון, ומתפתחות על המושבות שבמשתלה וביניהן. תוצאה זו היא ערך מוסף לשיקום השונית כולה: כך נשתלים לא רק האלמוגים אלא גם פאונה מגוונת בשונית^[32,30].

Shaish ועמיתיה^[26] השוו בין דגם משתלה הצף בגוף המים למשתלה המונחת על הקרקעית, באתר המושפע מזרמים חזקים בפיליפינים. ההבדלים באחוזי תמותת המושבות, ניתוקן וקצב גדילתן לא היו מובהקים בין שתי המשתלות הללו, אך המשתלה שקובעה לקרקעית הראתה עמידות גבוהה יותר לתנאים ההידרולוגיים. נוסף על כך, בניית המשתלה המקובעת ותחזוקתה היו קלות יותר בתנאי הסביבה המקומיים.

דגם נוסף וחדשני של משתלת אלמוגים - משתלת חבלים - הציעו Levy ועמיתיו^[13]. גוף משתלה זו הוא למעשה חבלים שבתוכם "נוצצים" שברוני אלמוגים המוכנסים ישירות לתוך גדיל החבל (איור 2 א ו ב). יתרונות משתלה מסוג זה הם הקלות והמהירות שהיא נבנית בהן, בנוסף לעלות הנמוכה הדרושה לבנייתה (החבל מהווה הן את מבנה המשתלה הן את מצע הגידול). שטח מגע המושבות עם המים הוא מרבי (איור 2 ג ו ד) ונצפו בה אחוזי שרידות גבוהים, ניתוק מזערי וקצבי גדילה מהירים. בשל השטח המינימלי של המשתלה היא אינה מאפשרת התיישבות יצורים יוצרי חברת צמדה (fouling) רבים ולכן תחזוקתה מזערית. נוסף על כך, לאחר שהאלמוגים גדלים - ניתן לשתול את החבלים כפי שהם במהירות, הן על מצע רך הן על מצע קשיח, תכונה המאפשרת שיקום בקנה מידה נרחב^[13].

הצורך להתאים את מבנה מתקן המשתלה לתנאים מקומיים קיבל משנה תוקף בעבודתם של Shaish ועמיתיה בפיליפינים^[27] במהלך תקופה ששררו בה תנאי מזג אוויר קיצוניים שכללו שני טיפונים, תקופת מונסונים סוערת במיוחד, קרינה גבוהה והתחממות קיצונית של מי הים. מפגעים אלו, יחד עם אירוע זרימת מים מתוקים, גרמו להלבנת אלמוגים אזורית מסיבית והשפיעו על ניתוק השתילים במשתלה, על שרידותם ועל קצב גדילתם. החוקרים מצאו שאפשר להתמודד עם תופעות סביבתיות אלו על-ידי פעולות ניהול נכונות כגון הורדה זמנית של המשתלה לעומק רב יותר כדי לצמצם את השפעות הקרינה והטמפרטורה. עמידותם היחסית של מיני האלמוגים השונים לתופעת ההלבנה והתאוששותם של מינים נוספים במשתלה לאחר ההלבנה, ממחישים את הצורך לבחון מראש את התאמת המינים הנבחרים לאתר היעד^[27]. תופעה דומה נצפתה במשתלת אלמוגים בג'מייקה ששרדה שתי סופות הוריקן חזקות.

מלבד ההתחשבות בתנאי הסביבה, על פעולות השיקום להתאים למגבלות החברתיות-כלכליות המקומיות. מרבית המשתלות ומצעי הגידול נבנו מחומרים נפוצים, זולים וזמינים

שכלי המשתלה מסוגל לספק תנאי גדילה מיטביים למקטעי אלמוגים ולאפשר גידול של מספר מינים שונים במקביל. Shaish ועמיתיה^[26] מיקמו כ-7,000 מקטעים משבעה מיני אלמוגים בשתי משתלות שונות בפיליפינים, האחת צפה והשנייה מקובעת לקרקעית. לאחר שנה נצפתה שרידות ממוצעת של 91% במשתלה הצפה ושל 85% במשתלה המקובעת. באתר שנפגע בעת הצונאמי בתאילנד ב-2004 הוקמה משתלה שהכילה 1,120 מקטעים משני מיני שיטית (*Acropora*) הנפוצים מקומית. לאחר ארבעה חודשי משתלה עמדה השרידות הממוצעת של השתילים על 95%^[21]. באיים הקריביים נבדקו 88 מקטעים של מין השיטית *Acropora cervicornis* הנמצא בסכנת הכחדה. לאחר שני חודשי גדילה הם הראו תמותה התחלתית של כ-17%, שהצטמצמה לפחות מאחוז אחד בששת החודשים הנוספים^[12]. Mbije ועמיתיו^[15] גידלו בשתי משתלות באיים זנזיבר ומאפיה שבטנזניה שישה מינים הנפוצים מקומית. גם בניסוי זה הייתה תמותת המקטעים נמוכה מאוד תחת תנאי הגידול שסיפקו המשתלות, ונעה, כתלות במין, בין 3%-24% (אך לרוב >10%) בזנזיבר ובין 13%-40% (אך לרוב >25%) במאפיה. עד כה גודלו במשתלות השונות ברחבי העולם (במקומות שתוארו לעיל ובאתרים נוספים כגון סינגפור, מאוריציוס, קולומביה ועוד) יותר מ-30 מיני אלמוגים שונים, מעופים, גושיים ומשתרעים, וכולם בהצלחה ניכרת.

סוגי משתלות והתאמתן לתנאי הסביבה המקומיים

התנאים הסביבתיים המגוונים השוררים באזורים שונים בעולם מכתבים את הצורך בפיתוח דגמי משתלות שונים שיאפשרו להתחשב במדדים הידרולוגיים, פיזיקליים ומטאורולוגיים מקומיים. בניית המשתלות מתאפיינת בקווים כלליים הכוללים מיקום באזורים המוגנים מסופות ומגלים (כדי לצמצם בעיות הנובעות מפעולות כוחות מכניים) ובאתרים המרוחקים מהשונית, מטורפיה, וממבקר^[15, 26, 30]. בים האדום פותח אב טיפוס למשתלה הצפה בגוף המים^[24, 30, 32]. לדגם משתלה זה יתרונות רבים. ראשית, גמישות המבנה מאפשרת תחלופת מים מתמדת סביב רקמת האלמוג (אספקת כמות מוגדלת של פלנקטון וחמצן מומס) וסילוק יעיל יותר של ריר המופרש מהרקמה. נוסף על כך, תזוזת המשתלה לכל הכיוונים עוזרת להיפטר מחלקיקי חול ומפירורים אורגניים שעלולים להיערם על האלמוג ולפגוע בפוליפים^[24, 30]. מיקום המשתלה בגוף המים, הרחק מהקרקעית, ממזער את הצטברות המשקעים (סדימנטים) ומאפשר התאמה של מיקום המשתלה לעומקים שונים בהתאם לצרכים של מיני אלמוגים שונים. משתלה מסוג זה מאפשרת לאלמוגים המתפתחים להסתגל לתנאי עומק וקרינה הדומים לתנאים השוררים באתר השתילה המיועד^[24]. נוסף על כך, כל מחקרי משתלות האלמוגים הצביעו על כך שבניגוד למשתלות הסטריליות

איור 2. דגם משתלת חבלים שפוחח בפיליפינים

(א) שברון אלמוג שיטית שהוכנס לגדיל החבל בראשית הגידול. (ב) לאחר כ־6 חודשים, מושבות שיטית שהתפתחו משברונים במשתלת החבלים וגדלו למושבות העוטפות את החבל. (ג) שורות של מושבות ממינים שונים לאחר כחצי שנה של גדילה במשתלת החבלים. (ד) שורות של מושבות המכסות לחלוטין את מצע החבל החשוף לאחר כ־10 חודשי גידול במשתלה. | צילום: גידי לוי



במבנה המשתלה ובשתילים מתבצע בתדירות חודשית [10, 13, 15], תחזוקה זו כוללת הסרת אצות המתחרות עם האלמוגים על אור ומקום, הסרת טורפי אלמוגים (כגון חלזונות מהסוג *Drupella*) המופיעים במשתלה, ריווח השתילים הגדלים וניקוי הצמדה שהתיישבה בקרבת האלמוגים או על גבי המתקן [10, 13, 15, 26, 28, 30].

העובדה שמשתלה תת־ימית פתוחה לסביבה, מאפשרת לא רק הגעה של בעלי חיים שוכני שונית אלא גם הופעה של טורפי אלמוגים, תופעה היכולה להוסיף לטיפול השוטף. עם זאת, משתלה הפתוחה לסביבה מאפשרת הגעתם של יצורים יקרי ערך, דגים הניזונים מטורפי אלמוגים ובעלי חיים רועים (כגון קיפודי

מקומית (כגון צינורות פלסטיק, חבלים, רשתות, אבני בניין) [10, 15], בטנזניה השתמשו Mbije ועמיתיו [15] אף ברשתות דיג מוחרמות ושילבו דייגים מקומיים בהקמת המשתלות.

תחזוקת המשתלה וזמן הגידול לקבלת אלמוגים המוכנים לשתילה

בדומה למשתלות יבשתיות, פעולות תחזוקה נכונות של המשתלות הימיות מאפשרות תנאי גידול מיטביים למושבות המתפתחות. כדי להקל על הטיפול במקטעי האלמוגים נהוג לסדר אותם בשורות על גבי מגשים, בסדרות ובקבוצות המורכבות מאותו המין, דבר המפשט את תהליך ניקוי המושבות. הטיפול

בהערכים שמשתלה בינונית יכולה לספק במהלך עונת רבייה עשרות מיליוני לרוות. לפיכך הם ממליצים למקם משתלות במהלך עונת הרבייה באתרים הנמצאים במעלה הזרם, כדי להגדיל את מספרי הפגיות המגיעות לשוניות היעד.

שתילת אלמוגי משתלה

שתילת מושבות אלמוגים נלמדה במספר אתרים ברחבי העולם. המחקר הראשון נערך בחוף הדקל, אתר פגוע שבצפון מפרץ אילת, שנשתלו בו 870 אלמוגי משתלה משבעה מינים מעופפים (איור 3). המושבות הועברו במהלך שתי פעולות שתילה (נובמבר 2005, מאי 2007) והוצמדו לחמישה בלטים חשופים. בד בבד, נבחרו באתר מושבות ממינים אלה הזרות בגודלן לשתילי האלמוגים, ששימשו כביקורת לניסוי. מושבות המשתלה הראו יכולת גבוהה לשרוד באתר הפגוע: 38% תמותה נרשמו לאחר כשנתיים במושבות שהועברו בנובמבר 2005 ו-36% נצפו לאחר כשנתיים ורבע במושבות שהועברו במאי 2007 (איור 4). תמותה זו היתה גבוהה רק בכ-6% לשנה מהתמותה הטבעית באתר (איור 4). זמן קצר לאחר השתילה הופיעו חסרי חוליות ודגים צעירים שהתיישבו באלמוגים החדשים (תצפיות אישיות).

מעקב אחר רביית מושבות השיחן חשף את אחת מההשפעות ארוכות הטווח של שתילת אלמוגי משתלה הנמצאים במצב פיזיולוגי מעולה [11]. מושבות אלה הראו רבייה מוגברת יחסית למושבות טבעיות, אפילו ארבע שנים לאחר שתילתן. מספר רב יותר של מושבות שתולות שחרר פגיות בהשוואה למושבות טבעיות, ומספר רב יותר של פגיות למושבה נאסף מהם. תוצאות אלה ממחישות את יכולתם של אלמוגי המשתלה לא רק לחזק את אוכלוסיית האלמוגים הדלה, אלא אף לתרום ליכולת ההתאוששות הטבעית של השוניות. שתילת אלמוגי משתלה המכילים תאי מין בתחילת עונת הרבייה יכולה לספק לשוניות פגועות כמות פגיות משמעותית, אסטרטגיה היכולה להוביל להאצת השיקום בעזרת תהליכים טבעיים.

Shaish ועמיתיה [28] שתלו 324 אלמוגי משתלה מהמין *Montipora digitata* בשני אתרים פגועים בפיליפינים. לאחר 15 חודשים עמדה התמותה באתרים אלו על 55% ו-16%, על אף אירוע הלבנה אזורי ותנאי מזג אוויר קשים ששררו באזור בתקופת הניסוי. המושבות החדשות הראו קצבי גדילה מהירים ועברו קיטוע תדיר של ענפיהן, אסטרטגיית רבייה א-מינית טיפוסית למין זה. חלק מהמקטעים נפלו על המצע החולי ויצרו "איי אלמוגים" חדשים מסביב לבלטים שהאלמוגים נשתלו עליהם. מבנים תלת-ממדיים אלו היו מוקד משיכה לדגים צעירים. ממשקנות המחקר עולה ששימוש במינים מעופפים מהירי גדילה הנקטעים בקלות, יכול לרז את שחזור תבליט השוניות ולתרום ליכולת הקיימות שלה.

ים ודגים צמחוניים), המצמצמים דווקא את עלויות התחזוקה ואת הזמן הדרוש לה על-ידי טיפול שוטף באצות המתיישבות במשתלה [32]. Shafir ועמיתיו [30] קיבלו "עזרה טבעית" בהסרת אצות וצמדה, מקיפודי ים ומדגים שגויסו מהפלנקטון, וניזונו מהם. במחקר המשך הוצעה ונבחנה דרך נוספת לייעל את פעילות התחזוקה: שימוש בחומרים מעכבי התפתחות צמדה על מצעי הגידול ובכך צמצום הזמן הנדרש לתפעול המשתלה [29].

שתילת מושבות גדולות הנמצאות במצב פיזיולוגי מעולה מגדילה את יכולת התאקלמותן בשוניות הפגועה. דרישה זו נוגדת את הצורך בקיצור זמן שהיית המושבות במשתלה כדי לצמצם את עלויות התפעול. ההבחנה המעשית בין שהות המושבות המתפתחות במשתלה לבין גודלן בעת השתילה תלויה במיני האלמוגים, בטיפוסי המשתלה, בתנאים המקומיים (אתר עשיר בנוטריינטים [30], אזור עם זרימת מים טובה [15]), בתנאים באזור השתילה ובלחצים כספיים. זמני הגידול הדרושים למקטעים כדי להפוך למושבות בנות שתילה נעים בין חמישה חודשים לשנתיים [15, 26, 28, 30]. אין ספק ששיפור התנאים במשתלה יכול לעזור בצמצום זמן השהייה בה.

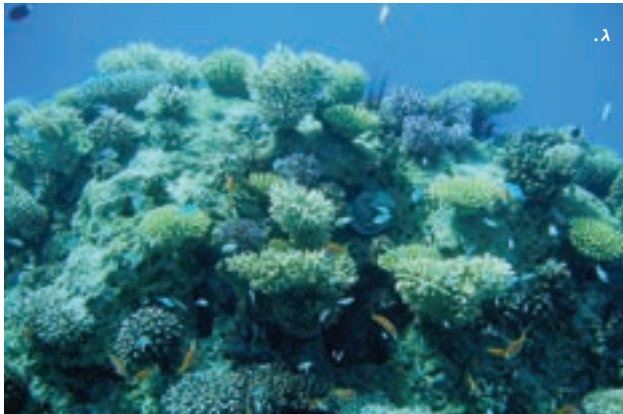
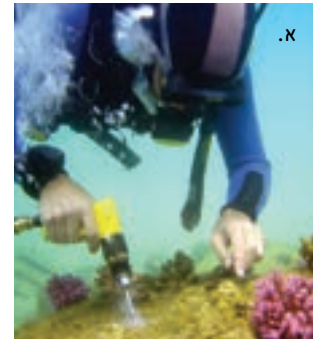
גידול אלמוגים מתוצרי רבייה מינית, ומשתלה כמקור לפגיות

מושבות האלמוגים במשתלה יכולות להיות מסופקות גם מתוצרי רבייה מינית [19, 24]. מיני אלמוגים משחררים למים בעונת הרבייה מספר עצום של תוצרי רבייה (תאי זרע וביצית או פגיות) ולכן גידול של לרוות יכול להוות מקור למספר רב של אלמוגים צעירים המעלים את השונות הגנטית של תוצרי המשתלות. במקרים שבהם מיני האלמוגים משחררים לגוף המים תאי מין, פותחו שיטות לאיסוף התאים ולהפרייתם במעבדה. את העוברים מגדלים במעבדה או בבקכות בים, ובהגיעם לבשלות מיישבים אותם ומעבירים אותם למשתלה. במינים המדגירים את הפגיות פותחו שיטות לאיסוף הפגיות בים, מיד לאחר שחרורן [2]. שתי דוגמאות מייצגות הן עבודתם של Omori ביפן [19] ושל Linden ו-Rinkevich באילת [14]. מושבות שיטית שמקורן בהפריה גודלו במשך 18 חודשים במשתלה ביפן בטרם שתילתן. ארבע שנים מאוחר יותר נצפו חלק ממושבות אלו משריצות בעצמן באתרן החדש. באילת, פגיות של השיחן *Stylophora pistillata* יושבו במעבדה והועברו למשתלת האלמוגים הימית לאחר חודש. בתום ארבעה חודשי גידול נרשמה שרידות העולה על 89%, והמושבות הצעירות החלו להתפתח לצורות תלת-ממדיות.

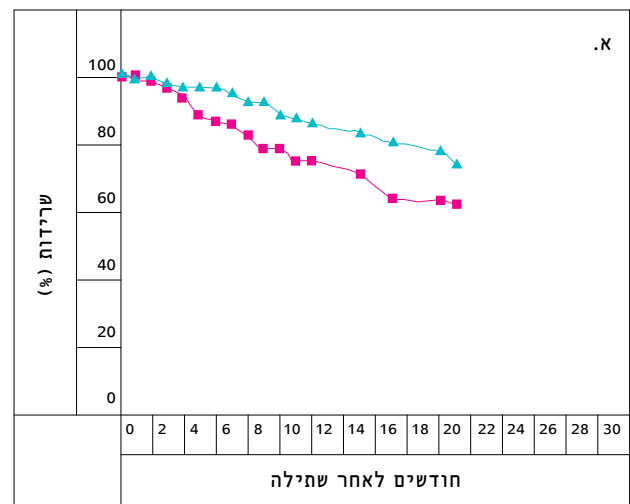
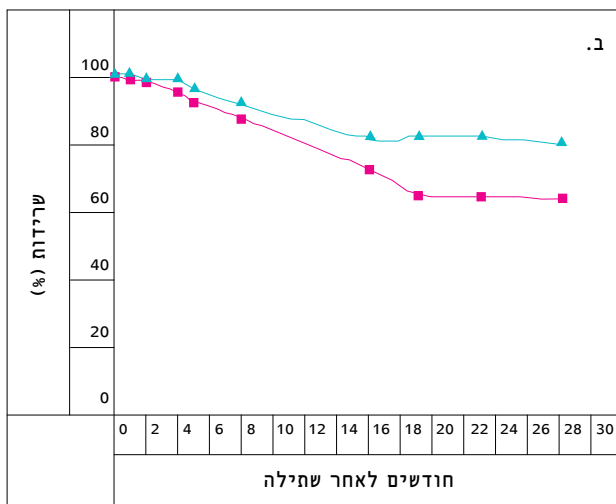
מחקרים שנערכו באילת הציגו פן מפתיע נוסף למשתלת אלמוגים: כלי פוטנציאלי להגברת הגיוס הטבעי. Amar ועמיתיה [3] תיעדו רבייה מוגברת במושבות שיחן במהלך גידולן במשתלה. הם הציעו להשתמש במשתלת אלמוגים כמקור להפצת פגיות,

איור 3. שתילת אלמוגי משתלה בחוף הדקל שבאילת

(א) קדיחה בבלט חשוף בעזרת מקדחה המופעלת בעזרת אוויר דחוס. ניתן לראות על הסלע מושבות שיחית (*Pocillopora damicornis*) ושיחן (*Stylophora pistillata*) שהוצמדו למצע. (ב) שתילת אלמוג שיטית (*Acropora variabilis*) באמצעות נעיצת מסמר הפלסטיק שהאלמוג גדל עליו במשתלה, בחור קדוח במצע החשוף. (ג) בלט שתול מכוסה באלמוגי משתלה מהמינים *S. pistillata*, *P. damicornis*, *A. variabilis*, *A. pharaonis*, *A. valida*, *A. humilis* לאחר תקופה של ארבע שנים מרגע שתילתם על הבלט החשוף. ניתן לראות גם דגים מסוג אלמוגית השוליים (*Dascyllus marginatus*) וכרומית ירקרקת (*Chromis viridis*) המאכלסות את האלמוגים השתולים. | צילום: יעל הורושובסקי-פרידמן



איור 4. תוצאות אחוזי השרידות של אלמוגי משתלה שנשתלו בחוף הדקל ושל מושבות ביקורת הגדלות באופן טבעי באתר הניסוי באילת 554 אלמוגי משתלה מהמינים *S. pistillata* ו-*P. damicornis* שנשתלו בנובמבר 2005 ו-76 מושבות ביקורת ממינים אלה במהלך 21 חודשי ניטור. (ב) 316 אלמוגי משתלה מהמינים *S. pistillata*, *P. damicornis*, *A. humilis*, *A. variabilis*, *A. pharaonis* שנשתלו במאי 2007 ו-108 מושבות ביקורת ממינים אלה במהלך 28 חודשי ניטור.



▲ מושבות ביקורת ■ מושבות שתולה

סיכום

רבייה מינית (מספר רב של גוטיפים) לשם הגדלת המגוון הגנטי באזורים בעלי קישוריות ביולוגית נמוכה. משתלות משמשות אף ליצירת שוניות מלאכותיות צפות, ולעתים לא האלמוגים במשתלה הם מטרת היעד, אלא מיני שונות אחרים, הנמשכים לנוכחות האלמוגים.

הניסיון המצטבר ביערות הימית מאפשר לאגד את פעולות המחקר האינדיווידואליות למערך עבודה אחיד ולגבש "תורת ייעור ימית". עם זאת, העבודה בתנאי סביבה שונים, לעתים קיצוניים, ממחישה את הצורך בהמשך מיטוב השיטה ובהמשך פיתוח כלי ניהול חדשים שיאפשרו להתמודד עם צרכים נוספים. אתגרים רבים ניצבים עדיין בפני העוסקים במלאכת שיקום השוניות. היבטי השיטה הטכניים התפתחו רבות, אך בדומה ליערות, שאלות תאורטיות רבות נותרו עדיין ללא מענה. לפיכך יש להתמקד כיום בגיבוש התפיסות והמטרות העומדות מאחורי הרציונל, כדי לבנות תנאי ממשק שיאפשרו שימוש בר-קיימא בבית הגידול ובשירותיו בעידן של לחץ אתרופוגני הולך וגובר.

יישום רעיון היערנות הימית החל בשני מישורים פשוטים לכאורה, משתלות ושתילות. העבודה המחקרית שנעשתה ברחבי העולם הובילה לפיתוח היערנות הימית בכיוונים מפתיעים שלא עלו על הדעת קודם לכן. יותר משישה סוגים שונים של משתלות פותחו בתגובה לתנאי סביבה ספציפיים, תוך ניסיון לפישוט השיטה ולצמצום הזמן והעלות הדרושים לבניית המשתלה ולתחזוקתה, כמו גם לשתילת האלמוגים. כיום, עלות ייצור אלמוג במשתלה ימית וגידולו נעה סביב 0.2-1.5 דולר, כשהערך הגבוה דומה למחירו המינימלי של עץ במשתלה יבשתית. גם המטרות שלשמן נבנות המשתלות נעשו מגוונות, ואינן מסתכמות בייצור אלמוגים לצורכי שיקום בלבד. משתלות משמשות ככלי להצלת מינים בסכנת הכחדה הודות לאפשרות לגדל מושבות ממקטעים מזעריים לאחר איסוף מינימלי, ולהשתמש במושבות אלה כמקור לחומר נוסף ולפעולות שיקום עתידיות. אלמוגים מיוצרים במשתלות בהתאם לצרכים ייחודיים ולעתים אף מנוגדים, כגון עידוד מספר קטן של גוטיפים העמידים לטמפרטורות מים גבוהות, ולעומתו גידול מושבות מתוצרי

מקורות

- Maldivian Islands. *Coral reefs* 14: 201-213.
- [6] Epstein N, Bak RPM, and Rinkevich B. 2001. Strategies for gardening denuded coral reef areas: The applicability of using different types of coral material for reef restoration. *Restoration Ecology* 9: 432-442.
- [7] Epstein N, Bak RPM, and Rinkevich B. 2003. Applying forest restoration principles to coral reef rehabilitation. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 13: 387-395.
- [8] Graham NAJ, Wilson SK, Jennings S, Polunin NVC, Robinson J, Bijoux JP, and Daw TM. 2007. Lag effect in the impacts of mass coral bleaching on coral reef fish, fisheries, and ecosystems. *Conservation Biology* 21: 1291-1300.
- [9] Guest JR, Todd PA, Goh BPL, and Chou LM. 2007. The effect of transplantation on reproduction in clonal ramets of *Goniopora columna* on Singapore's coral reef. *Invertebrate Reproduction and Development* 50: 133-138.
- [10] Herlan J and Lirman D. 2008. Development of a coral nursery program for the threatened coral *Acropora cervicornis* in Florida. In: Riegl BM and Dodge RE (Eds). *Proceeding of the 11th International Coral Reef Symposium*; 2008 July 7-11; Fort Lauderdale. Fort Lauderdale, Florida: National Coral Reef
- [1] Abelson A. 2006. Artificial reefs vs. coral transplantation as restoration tools for mitigating coral reef deterioration: Benefits, concerns, and proposed guidelines. *Bulletin of Marine Science* 78: 151-159.
- [2] Amar KO, Chadwick NE, and Rinkevich B. 2007. Coral planulae as dispersion vehicle: Biological properties of larvae released early and late in the season. *Marine Ecology Progress Series* 350: 71-78.
- [3] Amar KO and Rinkevich B. 2007. A floating mid-water coral nursery as larval dispersion hub: Testing an idea. *Marine Biology* 151: 713-718.
- [4] Bruckner AW and Bruckner RJ. 2006. Survivorship of restored *Acropora palmata* fragments over six years at the M/V Fortuna Reefer ship grounding site, Mona Island, Puerto Rico. In: Suzuki Y, Nakamori T, Hidaka M, Kayanne H, Casareto BE, Nadaoka K, Yamano H, and Tsuchiya M (Eds). *Proceeding of the 10th International Coral Reef Symposium*; 2004 June 28 - July 2; Okinawa, Japan. Tokyo, Japan: Japanese Coral Reef Society.
- [5] Clark S and Edwards AJ. 1995. Coral transplantation as an aid to reef rehabilitation: Evaluating of a case study in the



- [24] Rinkevich B. 2006. The coral gardening concept and the use of underwater nurseries: Lessons learned from silvics and silviculture. In: Precht WF (Ed). Coral Reef Restoration Handbook. Key Largo, Florida: NOAA.
- [25] Rinkevich B. 2008. Management of coral reefs: We have gone wrong when neglecting active reef restoration. *Marine Pollution Bulletin* 56: 1821-1824.
- [26] Shaish L, Levy G, Gomez E, and Rinkevich B. 2008. Fixed and suspended coral nurseries in the Philippines: Establishing the first step in the "gardening concept" of reef restoration. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 358: 86-97.
- [27] Shaish L, Levi G, Katzir G, and Rinkevich B. 2010a. Coral reef restoration (Bolinao, the Philippines) in the face of frequent natural catastrophes. *Restoration Ecology* 18: 285-299.
- [28] Shaish L, Levi G, Katzir G, and Rinkevich B. 2010b. Employing a highly fragmented, weedy coral species in reef restoration. *Ecological engineering* 36: 1424-1432.
- [29] Shafir S, Abady S and Rinkevich B. 2008. Improved maintenance for mid-water coral nursery by the application of an anti-fouling agent. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 368: 124-128.
- [30] Shafir S, Van Rijn J, and Rinkevich B. 2006. Steps in the construction of underwater coral nursery, an essential component in reef restoration acts. *Marine Biology* 149: 679-687.
- [31] Shafir S and Rinkevich B. 2008. The underwater silviculture approach for reef restoration: An emergent aquaculture theme. In: Schwartz SH (Ed). Aquaculture Research Trends. New York: Nova Science Publications.
- [32] Shafir S and Rinkevich B. 2010. Integrated long term mid-water coral nurseries: A management instrument evolving into a floating ecosystem. *University of Mauritius research journal* 16: 365-386.
- [33] Svane IB and Petersen JK. 2001. On the problems of epibioses, fouling and artificial reefs, a review. *Marine Ecology* 22: 169-188.
- [34] Yap HT, Alvarez RM, Custodio III HM, and Dizon RM. 1998. Physiological and ecological aspects of coral transplantation. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 229: 69-84.
- [11] Horoszowski-Fridman YB, Izhaki I and Rinkevich B. 2011. Engineering of coral reef larval supply through transplantation of nursery-farmed gravid colonies. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* (in press).
- [12] Hughes TP, Baird AH, Bellwood DR, Card M, Connolly SR, Folke C, Grosberg R, Hoegh-Guldberg O, Jackson JBC, Kleypas J, Lough JM, Marshall P, Nyström M, Palumbi SR, Pandolfi JM, Rosen B, and Roughgarden J. 2003. Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs. *Science* 301: 929-933.
- [13] Levy G, Shaish L, Haim A, and Rinkevich B. 2010. Mid-water rope nursery- testing design and performance of a novel reef restoration instrument. *Ecological Engineering* 36: 560-569.
- [14] Linden B and Rinkevich B. 2011. Creating stocks of young colonies from brooding coral larvae, amenable to active reef restoration. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 398: 40-46.
- [15] Mbiye NEJ, Spanier E, and Rinkevich B. 2010. Testing the first phase of the 'gardening concept' as an applicable tool in restoring denuded reefs in Tanzania. *Ecological Engineering* 36: 713-721.
- [16] Moberg F and Folke C. 1999. Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological Economics* 29: 215-233.
- [17] Mumby P and Steneck RS. 2008. Coral reef management and conservation in light of rapidly evolving ecological paradigms. *Trends in Ecology and Evolution* 10: 555-563.
- [18] Nyström M, Folke C, and Moberg F. 2000. Coral reef disturbance and resilience in a human-dominated environment. *Trends in Ecology and Evolution* 15: 413-417.
- [19] Omori M. 2011. Degradation and restoration of coral reefs: Experience in Okinawa, Japan. *Marine Biology Research* 7: 3-12.
- [20] Perkol-Finkel S, Shashar N and Benayahu Y. 2006. Can artificial reefs mimic natural reef communities? The roles of structural features and age. *Marine Environmental Research* 61: 121-135.
- [21] Putschim L, Thongtham N, Hewett A, and Chansang H. 2008. Survival and growth of Acropora spp. in mid-water nursery and after transplantation at Phi Phi Islands, Andaman Sea, Thailand. In: Riegl BM and Dodge RE (Eds). Proceeding of the 11th International Coral Reef Symposium; 2008 July 7-11; Fort Lauderdale. Fort Lauderdale, Florida: National Coral Reef Institute, NOVA Southeastern University.
- [22] Rinkevich B. 1995. Restoration strategies for coral reefs damaged by recreational activities: The use of sexual and asexual recruits. *Restoration Ecology* 3: 241-251.
- [23] Rinkevich B. 2005. Conservation of coral reefs through active restoration mesures: Recent approaches and last decade progress. *Environmental Science and Thechnology* 39: 4333-4342.



אלמוג משתלה מהמין שיחן,
חמש וחצי שנים לאחר שתילתו
באזור חשוף בבלט הניסוי, חוף
הדקל באילת. | צילום: יעל
הורשובסקי־פרידמן

