

## חושבים ירוק בונים כחול - השבחה אקולוגית של תשתיות ים וחוף

עדו סלע ושמרית פרקול-פינקל\*

SeArc - Ecological Marine Consulting  
shimrit@searc-consulting.com \*

כשני שלישים מאוכלוסיית העולם מתרכזת כיום בקווי החוף. כתוצאה מכך, תשתיות שונות, כדוגמת נמלים, מתקני התפלה, תחנות כוח, שוברי גלים וטיילות, תופסות את מקומם של חופים טבעיים. תשתיות אלה מחליפות בתי גידול יצרניים ומגוונים - כמו חופים סלעיים וחוליים ואף שוניות אלמוגים - בסביבות ימיות צמודות-עיר. על פי רוב הן מספקות שירותי מערכת ירודים ביחס לבתי גידול טבעיים. לפיכך, בשנים האחרונות חלה התקדמות רבה בפיתוח כלים וטכנולוגיות "ירוקות-כחולות" שיאפשרו פיתוח מקיים בסביבות חוף אלה.

לישראל קו חוף של כ-190 ק"מ, הכולל כ-70 ק"מ של תשתיות חוף. בימים אלה נמצאים רוב נמלי ישראל בתהליכי הרחבה, ולנוכח תכניות לפיתוח קווי החוף העירוניים, צפויה עלייה משמעותית בכמות התשתיות בחוף. תכניות אלה מספקות הזדמנות ליישום טכנולוגיות להקטנת המדרך האקולוגי של התשתית ולרתימתו לצורך אספקת שירותי מערכת.

בשנים האחרונות מתנהל מחקר רב בנושא השבחה של המערכות האקולוגיות המתפתחות על תשתיות חוף, ומדינות כמו ארה"ב, אוסטרליה, הולנד ואנגליה החלו לפעול כדי לשלב חשיבה סביבתית בתכנון מבנים בחופים [2, 3, 4, 5, 6, 8]. העיקרון המנחה הוא הרחבת שירותי המערכת שתשתיות - כמו קירות ים (מבנה דמוי קיר שבנוי לאורך החוף למניעת הרס החוף - seawall), שוברי גלים או עמודי רציפים - מספקות לסביבה, וזאת ללא הפרעה לשימוש היום-יומי בהן (עגינת כלי שיט, הגנה חופית או כל פעילות תעשייתית או עירונית אחרת). שילוב עקרונות של הנדסה אקולוגית בתכנון ובבנייה של תשתיות אלה מעלה את ערכן האקולוגי: הוא יוצר אזורי מסתור לדגים ולחסרי חוליות שמאפשרים הגנה להם ולצאצאיהם; הוא משפר את איכות המים במעגנות ובנתיבי השיט; הוא מקנה מגוון מינים דומה לזה המאפיין בתי גידול חופיים טבעיים.

בנייה אקולוגית של תשתיות ים וחוף נותנת מענה הן לדרישות המבניות של התשתית הן לצרכי המערכת האקולוגית הסובבת אותה. הבנייה האקולוגית באה לידי ביטוי ברמות שונות. ראשית, ישנה התייחסות לחומר התשתית, והשאיפה היא להשתמש בחומרים שמחד גיסא אינם פוגעים בסביבה הימית (ללא זליגה של רעלים או מתכות כבדות למשל), ומאידך גיסא - דומים מבחינת

תכונותיהם הכימיות או הפיזיקליות לבתי גידול טבעיים מבחינת חומציות המצע ומידת החספוס או הנקבוביות של המצע. שנית, פרט לחומר, בנייה אקולוגית מתייחסת גם לעיצוב ולתכנון, למשל - הגברת המורכבות המבנית של התשתית, כך שתוכל להציע מחסה או מסתור שמתאים לגידול צאצאים, תתחשב בחדירת אור ובזרימה, ותשמור על ריכוזי חמצן בעמודת המים כדי לאפשר פעילות ויצרנות ביולוגית.

דוגמאות לחשיבה זו בתכנון תשתיות חוף ניתן למצוא בקיר הים המחודש בחוף סיאטל בארה"ב, הכולל פאנלים מעוצבים בעלי מורכבות גבוהה שהוכחו כיעילים בהרחבת מגוון המינים באזור [5], וכן במיזם Designing the Edge בהארלם [7], ששולבו בו ברכות סלע - בית גידול עשיר שנמצא בחופים סלעיים, וחסר בתשתיות חוף רגילות. אף על פי שהתחום חדש יחסית, כבר ניתן למצוא דוגמאות להסדרת נושא הבנייה האקולוגית של תשתיות חוף בחקיקה סביבתית, והנושא מתפתח מאד בשנתיים האחרונות. דוגמה עדכנית לכך היא הקמה של צוות רב-תחומי בארה"ב, שהחל את פעולתו בסתיו 2013, וממונה על השתתתת קווים מנחים לבנייה מקיימת באזור החוף המזרחי שנפגע רבות בהוריקן סנדי באוקטובר 2012.

בהתחשב בכך ש-70% מכלל הבנייה בחופים בעולם מבוססת בטון, מחקר רב כיום מוקדש ליצירת התנאים שיאפשרו לחומר זה לתמוך בחברה ביולוגית, תוך שמירה על תכונותיו ההנדסיות הנדרשות. בטון סטנדרטי, המבוסס על מלט פורטלנד, אינו מצע אידיאלי להתיישבות חי וצומח ימיים, ולרוב מאופיין בהתיישבות מינים פולשים או מינים אופורטוניסטיים (כמו למשל אצות משטח חלקלקות), שמהווים מטרד סביבתי, טכני וכלכלי. שינוי הרכב הבטון, הגדלת מורכבות פני השטח ותכנון נכון של התשתית, מאפשרים למגוון רחב של מינים להתיישב על המבנה ולשגשג בצורה דומה לזו שבבתי הגידול הטבעיים.

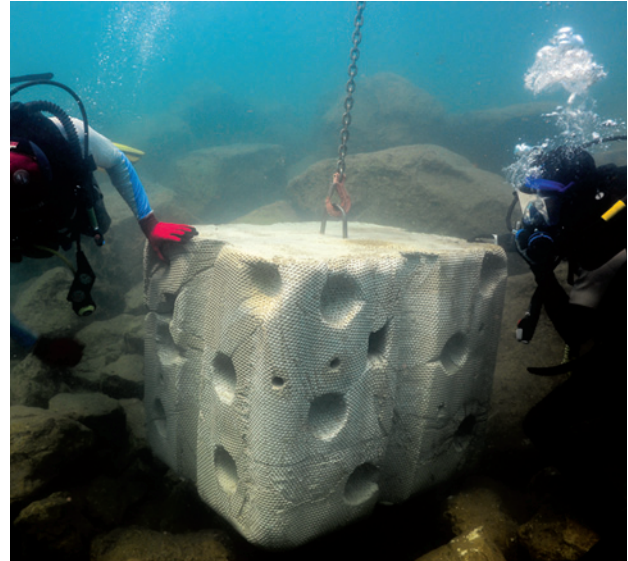
חופי ישראל הם מעבדה ייחודית למחקר זה בשל השילוב של מגוון סביבות ימיות (טרופית וממוזגת) והחשיפה למינים פולשים - במיוחד בחופי הים התיכון. בד בבד עם סקרי שטח המנטרים את המצב הקיים כיום בתשתיות ים לאורך חופי הארץ, מתבצעים גם מחקר ופיתוח המשלבים ידע מתחומי הביולוגיה, האקולוגיה, ההנדסה והתכנון [9].

יחידת הגנה חופית רבועה, העשויה בטון פורטלנד "רגיל", נקראת אנטיפר (Antifer). לעומתה, ישנם 'אנטיפרים אקולוגיים' העשויים מבטון ייחודי שמתאים להתיישבות חי וצומח ימי, ונושאים פני שטח מורכבים שכוללים חורים וחריצים, המקנים מחסה לדגיגים ומעודדים התפתחות של חברת חי וצומח הדומה לזו שבשונית הטבעית (איור 1). שובר הגלים הראשי של הנמל הצבאי החדש בחיפה מורכב מאלפי יחידות אנטיפרים רגילים. לצורך הדגמת היכולת של תכנון מבוסס ביולוגיה בחופי

(טבלה 1) ושהיחס בין המינים הפולשים למינים המקומיים היה נמוך (טבלה 2). מינים פולשים הם חלק בלתי נפרד מחברת החי באזורנו. בבתי גידול טבעיים כמחצית ממיני הדגים וממיני הצדפות הם מינים פולשים, ובמיני החלזונות אחוז הפולשים גבוה בהרבה [10]. בתשתיות חופיות המצב אף חמור עוד יותר, ולפיכך יש חשיבות רבה להפחתת הדומיננטיות של המינים הפולשים על גבי האנטיפרים האקולוגיים. התוצאות מדגימות את היכולת של האנטיפרים האקולוגיים לפתוח את המצע לתחרות, כך שחברת החי על פני התשתית תתמוך במגוון רחב של מינים האופייניים לבתי גידול טבעיים באזור. חברת החי העשירה יותר תיצור מערכת אקולוגית יציבה ועמידה יותר, שתספק שירותי מערכת רבים יותר מאלה שמספקת חברת החי הדלה המאפיינת תשתיות בטון רגילות.

הבטון האקולוגי, המספק כלים יישומיים לבנייה מקיימת בחופים, פותח בישראל. כיום הוא משמש בעיקר בארה"ב - מפלורידה ועד לאגמים הגדולים שבגבול קנדה, תוך שיתוף פעולה עם גופים פדרליים כמו סוכנות האטמוספירה והאוקיינוגרפיה של ארה"ב (NOAA) והמשרד להגנת הסביבה של מדינת ניו יורק. היישום בישראל מוגבל, מאחר שבחקיקה הסביבתית נעדרת דרישה לפיצי אקולוגי במקרים של מיזמי פיתוח בקו החוף ובים. לפיכך, אין ליזמים תמריץ לכלול טכנולוגיות לבנייה "ירוקה" כחולה".

איור 1. הצבת 'אנטיפר אקולוגי' במימי מפרץ חיפה, במהלך העבודות להקמת הפולינום (האנגר ענק לצוללות חיל הים) | צילום: ECOncrete Tech LTD



הים התיכון הוצבו ביולי 2012 יחידות של אנטיפרים אקולוגיים במקביל לשובר הגלים הקיים. לאחר שנה בים נמצא שהאנטיפרים האקולוגיים תמכו במגוון מינים כפול ביחס לאנטיפרים הרגילים

טבלה 1. מיני חסרי חוליות שנמצאו באנטיפרים רגילים מבוססי בטון פורטלנד ובאנטיפרים אקולוגיים מין פולש - בוורוד, מין מקומי - בתכלת, מין שמקורו לא ידוע (cryptogenic) - בירוק. כל המינים שנצפו באנטיפרים האקולוגיים נמצאים גם בבתי גידול טבעיים באזור, בהתבסס על נתונים מהספרות [11] ועל הצפיות. \* מינים שנצפו מחוץ לשטח יחידת הדגימה.

קבוצה	מין	שם מדעי	אנטיפרים אקולוגיים	אנטיפרים רגילים
שושנות ים	איפטסיה	<i>Aiptasia sp.</i>	+	
	צדפה	<i>Alectryonella crenulifera</i>	+	
צדפות	בוצית מגוונת	<i>Brachidontes pharaonis</i>	+	+
	פטישון	<i>Malleus regula</i>	+	
	פנינית פשוטה	<i>Pinctada radiata</i>	+	*
	שדרנית קוצנית	<i>Spondylus spinosus</i>	+	+
חיטחבים	אוסטריאה	<i>Ostrea sp.</i>	+	
	חיטחב מרפד	<i>Reptadeonella violacea</i>	+	
	נקצולית	<i>Schizoporella sanguinea</i>	+	+
סרטנים	זירון אדום רגל	<i>Clibanarius erythropus</i>	+	
	שישן דו-דן	<i>Pachygrapsus transversus</i>	+	+
	קפצן מצוי	<i>Palaemon elegans</i>	+	
	שיט וודד	<i>Portunus pelagicus</i>	+	*
	סלען זיפני	<i>Eriphia verrucosa</i>	+	

				בלוט הנמלים	בלוטים ים
	+			<i>Balanus amphitrite</i>	
	+			<i>Balanus reticulatus</i>	
	+			<i>Chthamalus stellatus</i>	
	*			<i>Cerithium scabridum</i>	חלזונות
	*			<i>Hexaplex (Murex) trunculus</i>	
	+			<i>Patella caerulea</i>	
	+			<i>Vermetus rugulosus</i>	
	*			<i>Aglaophenia pluma</i>	צורבים
	+			<i>Halocordyle distichia</i>	
	*			<i>Chromodoris annulata</i>	חשופיות
	+			<i>Hermodice carunculata</i>	זכוכיתיות
	+			<i>Dasychone lucullana</i>	נרתיקניות
	+			<i>Serpula vermicularis</i>	סלילוניות
	+			<i>Spirorbis marioni</i>	
	+			<i>Calcaronea sp.</i>	ספוג גירני
	*			<i>Crambe crambe</i>	ספוג כתום
	+			<i>Spirastrella cunctatrix</i>	ספיראסטרון קרומי
	+			<i>Botrylloides schlosseri</i>	אצטלנים
	+			<i>Didemnum sp.</i>	
	+			<i>Herdmania momus</i>	הרדמניה מומוס
	*			<i>Microcosmus sp.</i>	אצטלן זוטי
	+			<i>Phallusia nigra</i>	נאדן שחור

**טבלה 2.** סיכום מספר המינים בקטגוריות השונות מין פולש - בוורוד, מין מקומי - בתכלת, מין שמקורו לא ידוע (cryptogenic) - בירוק. הנחונים על בית הגידול הטבעי מבוססים על נחונים מהספרות [1] ועל חצפיות.

סטטוס	אנטיפרים אקולוגיים	אנטיפרים רגילים
מין מקומי	21	5
מין פולש	12	10
מין ממקור לא ידוע	3	
סך הכול	36	15
יחס פולש/מקומי	0.57	2.00

**מקורות**

[1] פרקול-פינקל ש וסלע ע. 2013. הגברת הערך הביולוגי ואקולוגי של תשתיות חופיות - הקטנת טביעת הרגל האקולוגית של תשתיות ימיות באמצעות בנייה מבטון תומך התיישבות ביולוגית - דוח שנתי מסכם של חברת אקונקריט טק בע"מ. תל-אביב.

[2] Chapman MG and Underwood AJ. 2011. Evaluation of ecological engineering of "armoured" shorelines to improve their value as habitat. *Journal of Experimental Marine*

אף על פי שתחום ההשבחה האקולוגית של תשתיות ים וחוף נמצא עדיין בחיתוליו, ניכרת עלייה במודעות לחשיבות הנושא בארץ ובעולם. לנוכח התחזיות לעלייה משמעותית בצפיפות האוכלוסין בקווי החוף, ותופעות עולמיות של שינוי האקלים, כמו עליית מפלס פני הים ותכיפותן של סערות וסופות, גובר הצורך ביישום הידע שנצבר בנושא בשנים האחרונות.

- [7] Johnson M. 2010. Designing the edge - Creating a living urban shore at Harlem River Park. New York: NYC Parks & Recreation and Metropolitan Waterfront Alliance.
- [8] Naylor LA, Venn O, Coombes MA, et al. 2011. Including ecological enhancements in the planning, design and construction of hard coastal structures: A process guide. Report to the Environment Agency (PID 110461). University of Exeter.
- [9] Perkol-Finkel S and Sella I. 2014. Ecologically active concrete for coastal and marine infrastructure: Innovative matrices and designs. [www.tinyurl.com/ICE-EcologicallyActiveConcrete](http://www.tinyurl.com/ICE-EcologicallyActiveConcrete). In press.
- [10] Rilov G, Yahel G, and Shefer D. 2013. Forming the basis for marine reserves along the Israeli Mediterranean coast to conserve biodiversity of an ecosystem in peril. A report for the Israel Nature and Parks Authority. Haifa: National Institute of Oceanography, Israel Oceanographic and Limnological Research.
- Biology and Ecology* 400(1-2): 302-313.
- [3] Dugan JE, Airolidi L, Chapmanet MG, et al. 2011. Estuarine and coastal structures: Environmental effects. A focus on shore and nearshore structures. In: Wolanski E, Elliott M, and Dugan JE (Eds). Treatise on estuarine and coastal science: 8. Human-induced problems (uses and abuses): Elsevier New York: Elsevier.
- [4] Dyson KL. 2009. Habitat enhancing marine structures: Creating habitat in urban waters (Master of marine affairs thesis). University of Washington.
- [5] Goff M. 2010. Evaluating habitat enhancements of an urban intertidal seawall: Ecological responses and management implications (MSc thesis). University of Washington.
- [6] Firth LB, Thompson RC, Abbiati M, et al. 2014. Between a rock and a hard place: Environmental and engineering considerations when designing flood defense structures. *Coastal Engineering*. [www.dx.doi.org/10.1016/j.coasteng.2013.10.015](http://www.dx.doi.org/10.1016/j.coasteng.2013.10.015). In press.



התפלת מי ים חיונית לאבטחת אספקת המים של ישראל, אך השפעתה על הסביבה הימית רחוקה מלהיות ברורה. כיום, מחצית מהמים לצריכה ביתית ותעשייתית בישראל מקורם בים התיכון. ארבעה מתקני התפלה ממוקמים לאורך החוף ופועלים בשיטת האוסמוזה ההפוכה: אשקלון (120 מלמק"ש [מיליון מ"ק בשנה]), פלמחים (90 מלמק"ש לאחר סיום הרחבת המפעל), שורק (150 מלמק"ש) וחדרה (127 מלמק"ש). שני האחרונים הם הגדולים מסוגם בעולם. מתקן נוסף באשדוד נמצא בשלבי הקמה מתקדמים, ובגליל המערבי מתוכנן מפעל נוסף. המתקנים שואבים מים במרחק של ק"מ אחד מהחוף. המפעלים אשקלון וחדרה מזרימים את הרכז על קו החוף במקביל או לאחר מיהול במי קירור של תחנות הכוח, והמפעלים פלמחים ושורק מזרימים את הרכז דרך מוצא ימי במרחק של 0.9 ו-1.9 ק"מ מהחוף, בהתאמה. יעילות התהליך היא כ-50%, משמע, כמות מי הים הנשאבים כפולה מכמות מי המוצר המותפלים, ולרכז מליחות כפולה ממליחות מי הים. הרכז מכיל גם חומרים נלווים, כימיקלים המשמשים בתהליך ההתפלה כגון מקרישים (coagulants), מעכבי שיקוע (anti-scalants), שאריות מלחים מנטרול חומצות ובסיסים המשמשים לניקוי הממברנות, וחומרים להתאמת ערך ההגבה (pH).

התפלת מי ים היא תחום דינמי, המתפתח ומשתנה במהירות, בשל פיתוחים טכנולוגיים שהפכו את התהליך לכדאי כלכלית, ולנוכח הגידול בביקוש למים בעקבות גידול האוכלוסייה ושינויים בהרגלי הצריכה. מספר המאמרים המדעיים המתארים בצורה

## התפלה והסביבה הימית - עתיד בר-קיימא?

נורית קרס\*, אפרת שהם-פרידר ובלה גליל  
חקר ימים ואגמים לישראל, המכון הלאומי לאוקיאנוגרפיה  
[nurit@ocean.org.il](mailto:nurit@ocean.org.il)\*



פתח צינור שאיבת מי הים במתקן ההתפלה בחדרה  
| צילום: חגי נתיב