

חידת מעגלי הפיות



מדוע צמחים באזורים צחיחים נוטים להסתדר בתבניות מרחביות מסודרות? / אמיר רוזנבלט

עיגולי פיות הם תופעת צומח מרתקת שנצפתה בצפון מערב נמיביה לפני שנים רבות. אלה הם עיגולים של קרקע חולית חשופה במשטחי ערבה, שקוטרם הממוצע הוא כשבעה מטרים ואשר מסתדרים בתבניות עיגולים מסודרות על פני מישורים רחבי ממדים. כיצד עיגולים אלה נוצרים? וכיצד הם יודעים להסתדר בצורה מסודרת כל כך? אלו הן שאלות שהעסיקו חובבי טבע ומדענים כאחד במשך שנים ארוכות. על אף המאמץ המחקרי הרב שהוקדש להבנת התופעה, ההסברים שניתנו לה

עדיין שנויים במחלוקת. לפי הסבר אחד, העיגולים נוצרים בעקבות פעילות של טרמיטים, אשר נמצאו בקרקעית כל עיגול, ואשר מכרסמים בשורשים של נבטים ומונעים את גידולם. לפי הסבר שני ומאוחר יותר, העיגולים הם תוצאה של מגבלת מים באזורים צחיחים וארגון עצמי במרחב המפצה על המחסור במים. הפיזי מתאפשר על ידי ארגון עצמי של הצומח בתבנית של כתמי צומח וכתמי קרקע חשופה. כתמי הקרקע משמשים כעין אגן להספקת מים לכתמי הצומח, וזאת באמצעות מנגנונים שונים של תנועת מים. ההסבר השני מבוסס על התורה המתמטית של ארגון עצמי בתבניות מרחביות, שאחד מעמודי התווך שעליהם היא נשענת הוא אלן טיורינג (Turing), המתמטיקאי שפיצח את קוד האניגמה במלחמת העולם השנייה. תורה זאת עוסקת ביצירה של תבניות מרחביות כתופעה של שבירת סימטריה, שהביטוי המתמטי שלה הוא אי יציבות של מצב הומוגני והתפתחותו למצב בעל מבנה מרחבי. דוגמאות

פתרונות נומריים של מודל מתמטי המתארים את השינויים המורפולוגיים שחלים בתבניות צומח לאורך מכל הגשם. ככל שכמות המשקעים יורדת, תוספת המים הנדרשת לכתמי הצומח על מנת לשרוד גדלה. תוספת זאת מסופקת על ידי תנועת מים מכתמי הקרקע החשופה אל כתמי הצומח.

לתבניות כאלו הן עננים המסתדרים בצורת פסים, אבן בזלת שהתמצקה מלִּבָּה בתבנית משושים או פסי הזברה. אם עיגולי הפיות הם אכן תופעה של שבירת סימטריה המונעת על ידי מחסור במים אפשר לצפות למצוא עיגולי פיות גם באזורים צחיחים אחרים בעולם. במאמר שהתפרסם לאחרונה בכתב העת PNAS אכן מרווחים החוקרים על הגילוי של תבניות עיגולי פיות מסודרות באזור פילִפִּרה שבאוסטרליה, אזור צחיח שבו נמצאו גם תבניות צומח אחרות שתורת התבניות חוזה (ראו תמונה). במאמר מתואר מחקר המבוסס על עבודות שדה וחישה מרחוק, ומחקר תיאורטי המבוסס על מודל מתמטי ותורת התבניות. את המחקר האמפירי הוביל ד"ר סטפן גצין (Getzin) ממרכז הלמהולץ למחקר סביבתי שבגרמניה ואת המחקר התיאורטי הוביל פרופ' אהוד מירון מאוניברסיטת בן גוריון. למחקר שותפים החוקרים ד"ר חזי יצחק ופרופ' יצחק קטרה ותלמידי המחקר יובל צלניק ועומר צוק מאוניברסיטת בן-גוריון. ממצאי המחקר העיקריים הם: א. לא נמצא





עיגולי פיות באזור פילבריה שבאוסטרליה. קוטרם הממוצע של העיגולים הוא כארבעה מטרים
 (תמונה באדיבות קווין סנדרס (Kevin Sanders))

תוספת המים הנדרשת גדלה ומחייבת את הגדלת יחס שטח הקרקע החשופה לשטח הקרקע המכוסה בצומח. הגדלה זאת נעשית על ידי שינויים מורפולוגיים בתבנית הצומח מתבנית עיגולים לתבנית פסים ומתבנית פסים לתבנית נקודות כפי שניתן להבחין בתמונה 2. לתבנית מרחביות משמעותיות תפקודיות נוספות: על ידי הגדלת המגוון הנופי הן מספקות גומחות גידול מועדפות למינים ביולוגיים שונים ובכך מגדילות את המגוון הביולוגי ואת יציבות המערכת האקולוגית; המגוון האפשרי של תבניות מרחביות פותח למערכת ערוצי תגובה נוספים לשינויים סביבתיים, כמו בצורות, ובכך יכול לתת תהליכי מדבור. שאלות בתחום המחקר בתפר שבין אקולוגיה מרחבית ותורת התבניות נידונות בספרו של פרופ' מירון Nonlinear Physics of Ecosystems שראה אור ב־2015 בהוצאת CRC.

הפיות בקרקע החולית של נמיביה נוצרים ממשב חיוכי שונה בין גידול צומח ותנועת המים אליו - תנועת המים היא תת קרקעית במקום על קרקעית - ולמרות זאת מתקבלות אותן תבניות. זוהי הדגמה של עיקרון של אוניברסליות חשוב של תורת התבניות, שלפיו התבניות מוכתבות על ידי סוג אי היציבות שהמצב ההומוגני עובר, ללא תלות במשב החיוכי שמייצר את אי היציבות. אנליזה מתמטית של המודל אכן הראתה שהמשוברים החיוכיים השונים בשתי המערכות האקולוגיות מייצרים אותה אי יציבות - "אי יציבות טיורינג", המכונה על שם אלן טיורינג שגילה אותה לראשונה. ממצאים אלו מבססים עוד יותר את הישימות של תורת התבניות למערכות אקולוגיות. במערכות חיים לתבניות מרחביות עשויות להיות גם משמעותיות תפקודיות. משמעות תפקודית אחת של תבניות כדוגמת עיגולי הפיות היא שרידות המערכת האקולוגית בתנאי יובש - עיגולים אלו מספקים מקור מים נוסף המאפשר לצומח לשרוד. יתר על כן, ככל שהמחסור במים חריף יותר,

מתאם בין עיגולי הפיות לטרמיטים. ב. נמצאו התאמות מרשימות בין תבניות עיגולי הפיות באוסטרליה ובנמיביה ובין התבניות באוסטרליה לבין תבניות המודל המתמטי. ג. הקרקע בעיגולי הפיות שבאוסטרליה מכוסה בקרום קשיח המקטין את קצב חלחול המים אל תוך הקרקע ויוצר נגר עילי אל הצומח. תנועת מים זאת ממריצה את גידול הצמחים במקום שצפיפותו גבוהה ומדכאת את הצומח במקום שצפיפותו נמוכה. ד. ניסוח מתמטי של מנגנון משוב חיוכי זה במשוואות המודל מייצר אי יציבות בכיסוי הצומח ואת התפתחותו לתבנית שבה כל עיגול מוקף בממוצע בשישה עיגולים שכנים. ממצאים אלו מהווים נדבך חשוב נוסף בהבנת עיגולי הפיות כתופעה של ארגון עצמי או שבירת סימטריה. נדבך זה מתווסף למחקר קודם של פרופ' מירון, בשיתוף עם ד"ר גולן בל ותלמיד המחקר יובל צלניק, אשר עסק בתופעות דינמיות של "לידה" ו"תמותה" של עיגולי פיות בנמיביה, ואשר פורסם אף הוא בכתב העת PNAS ב־2015. על פי המודל, עיגולי