

מודל מבוסס מ"ג לחיזוי כיסוי הצומח המעוצה בשטחים מקוטעים טבעיים בנגב הצפוני

שירה מזור, טל סבוראי, פועה בר (קוטיאל), המחלקה לביאוגרפיה ופיתוח סביבתי, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב, באר-שבע
mazorsh@bgu.ac.il

תקציר

התנאים הא-ביוטיים של בית הגידול הם מהגורמים החשובים המשפיעים על חברות הצומח המתפתחות בו ועל המגוון שלהן. התרחבות שימושי הקרקע החקלאיים והצטמצמות השטחים הטבעיים בדרום שפלת יהודה עוררו את הצורך לבחון את גודלם של השטחים הטבעיים הנותרים המופיעים ככתמים בשטח החקלאי; את איכות בתי הגידול ואת התאמתם לקיום חברת הצומח המאפיינת את האזור. החברה השולטת בשטחים הטבעיים במרחב היא חברת בתת הספר של סירה קוצנית (*Sarcopoterium spinosum*) ושללהבית קצרת שיניים (*Phlomis brachyodon*), שהיא חברה עשירה ומגוונת. מטרת המחקר היא לבחון את השפעת זמינות המים ותכונותיהם הגיאומטריות של הכתמים הטבעיים כגורמים המגבילים את הצומח המעוצה. באזור המחקר פיזורים כ-60 כתמים בעלי תכונות מגוונות (גודל, צורה, טופוגרפיה). מטרת העבודה היא לפתח מודל החוזה את אחוז הכיסוי בבני שיח בכתמים בהתאם לגורמים המגבילים. באמצעות ניתוח תצלומי אוויר ושיטות מ"ג (מערכות מידע גאוגרפיות) הופקו שכבות המייצגות את כיסוי השיחים והסלעים בכתמים. אליהן נוספה שכבת DEM (Digital Elevation Model) המייצגת את התנאים הטופוגרפיים בכל כתם. פותח מודל לוגיקה עמומה (Fuzzy Logic) אשר חוזה את כיסוי הצומח המעוצה בכתמים לפי שלושה תסריטים שונים. התוצאות מצביעות על קשר בין משתני זמינות המים ומשתני הכתם, ובמיוחד הפנות, לאחוז כיסוי הצומח המעוצה בכתמים.

מילות מפתח (נוספות על מילות הכותרת): הטרוגניות, זמינות מים, חקלאות, כתמיות, סוקצסיה, סירה קוצנית, לוגיקה עמומה, צומח עשבוני

מבוא

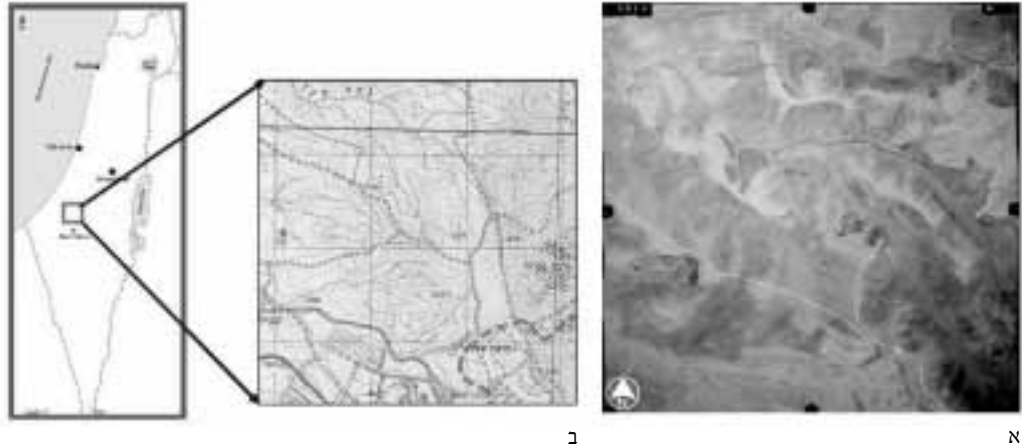
התפתחות החקלאות בישראל מאז קום המדינה גרמה לצמצום השטחים הפתוחים ולקיטועם. השפעת החקלאות מסתכמת לא רק בצמצום או באיבוד בתי גידול אלא גם בהשפעה על תכונותיהם של השטחים הנותרים (Fahrig 2003). איבוד או צמצום בתי גידול מלווים על פי רוב בירידה במגוון הביולוגי,

בשל פגיעה באזורי המחיה של מיני צמחים ובעלי חיים, ולעיתים בפלישה של מינים חדשים המתחרים במינים הטבעיים ודוחקים אותם (Zheng et al. 1997; Brososke et al. 1999). מגוון (Coppedge et al. 2001; Olf & Ritchie 2002). ביולוגי הוא מושג-על המאחד בתוכו את מכלול השונות הביוטית באזור מסוים (כגון מגוון גנטי ומגוון המינים) וכן את השונות הא-ביוטית, כגון מגוון בתי גידול (פרבולוצקי ופולק 2001). מקובל להניח שמגוון ביולוגי גבוה הוא ערובה למערכות אקולוגיות בנות קיימא, התומכות ומבטיחות גם את קיומן של מערכות אנושיות (ערים, חקלאות, יערות נטועים ועוד) (Costanza et al. 1997).

אחד הגורמים המשפיעים על ההרכב ומגוון המינים בחברה הוא הטרוגניות מרחבית. הטרוגניות מוגדרת כמידת המורכבות והשונות של תכונה במערכת, במרחב או בזמן (Li & Reynolds 1995). תכונה כזו יכולה להיות משתנה מרחבי רציף כמו שיפוע ופנות; או פיזור במרחב של אלמנטים בדידים, כגון סלעים ושיחים. ככל שגדלה הטרוגניות בית הגידול, גדלים על-פי-רוב העושר והמגוון בחברה (Svoray et al. 2005; Burnett et al. 1998; Honnay et al. 1999). בחלקים נרחבים של ישראל ובמיוחד בצפון הנגב נוצר פסיפס של שימושי קרקע חקלאיים וטבעיים, שבהם השטחים הטבעיים לכודים בלב השטחים המעובדים בצורת כתמים מקוטעים, כפי שניתן לראות בבירור בתצלום האוויר המופיע באיור 1. הכתמים הם שרידים של שטח טבעי רצוף אשר התקיים באזור, על-פי תצלומי אוויר, בשנות הארבעים. בתת הספר הים תיכונית מאפיינת את הכתמים ואת השטחים הטבעיים הסמוכים לשדות. חברת צומח זו מאפיינת את אזור המעבר שבין האזור הים תיכוני לאזור המדברי, ובשל כך היא מתאפיינת בעושר מינים גבוה (רמון וצויער 2002). בידודם של הכתמים ותכונות השטחים החקלאיים הכולאים אותם (matrix) משפיעים על הצומח הטבעי בתוכם. מערכת יחסי הגומלין ההדדית בין הכתמים לשטח החקלאי מושפעת גם משיטות העיבוד החקלאי המודרני, כגון חריש עמוק, הדברה ודישון.

בהכללה, משתנים אקלימיים וטופוגרפיים משפיעים על כמות המים הזמינים לצמח לאורך המדרון (Ridolfi et al. 2003). באזורים צחיחים למחצה יש למשתנים הטופוגרפיים ולתכסית המדרון חשיבות רבה, לעיתים יותר מאשר למשתנים אקלימיים כגון כמות המשקעים ותפרוסתם (Yair & Kossovsky)

איור 1:
א. תצלום אוויר של שטח המחקר
ב. מפת אזור המחקר



התאים הגבוהים, הקרובים לקו פרשת המים, יקבלו ערכי לחות נמוכים בהשוואה לתאים הקרובים לערוץ, ותאים בעלי שיפוע תלול יקבלו ערכי לחות נמוכים בהשוואה לתאים בעלי שיפוע מתון, בשל ההבדלים שיוצרת הטופוגרפיה בקצבי זרימת הנגר והחידור (Barling et al. 1994).

סלעים ואבנים משנים גם הם את משטר זרימת הנגר בסביבתם. הם מגבירים את קצב החידור וחילחול המים ויוצרים סביבם מיקרו-אקלים לח יותר, המאפשר קיום צומח רב-שנתי. לכן לאחוז כיסוי הסלעים יש השפעה על מידת הלחות בכתם (Pariante 2002; Poesen & Lavee 1994). נוסף לאחוז כיסוי הסלע נבחר דגם הפיזור של הסלעים כגורם המשפיע על התפרוסת המרחבית של כתמי הלחות. פיזור הסלעים על פני הכתם יכול להיות מבוסס באופן כמותי באמצעות שלושה דגמים: מקובץ, אקראי, אחיד. כאשר דגם פיזור הסלעים בכתם הוא אקראי או אחיד נוצרת תפרוסת אחידה יותר של זמינות המים בהשוואה לדגם המקובץ, אשר בשיעור זה של כיסוי סלע יתן אזורי לחות גדולים אך מועטים (Forman & Godron 1986).

השפעת תכונות הכתם

תכונות הכתמים משפיעות על המרכיבים הביוטיים שבהם. לכתם גדול יש הסתברות גבוהה יותר להכיל מספר רב של מיקרו בתי גידול בהשוואה לכתם קטן, ובכך לאפשר את קיומם של מינים רבים יותר, בעלי דרישות שונות של תנאי בית גידול (Debinski & Holt 2000). בעקבות הפרעה חלים שינויים בתכונות החברה האקולוגית ומתחילה סוקססיה שניונית, אשר מושפעת מהצמחים ומבעלי-החיים שנמצאו באתר לפני הפרעה. בתהליכים אלו, לגודל הכתם יש השפעה ניכרת על הרכב הצומח, כאשר בכתמים גדולים ניתן למצוא אחוז כיסוי גבוה יותר של צומח מעוצה בהשוואה לכתמים קטנים. סיבה אפשרית לכך היא שבכתמים גדולים יש שטח שוליים קטן ביחס לליבה, בהשוואה לכתמים קטנים, ולכן הם מושפעים פחות מחדירת הפרעות מן החוץ אל תוך הכתם (Yao et al. 1999).

2002). מבין המשתנים המשפיעים על זמינות המים לצמח בחרנו את מדד הלחות (wetness index, WI) כמייצג את השתנות זמינות המים לאורך המדרון, את פנות המדרון, את אחוז הכיסוי ואת דגם הפיזור המרחבי של הסלעים בכתם. מבין המשתנים הגיאומטריים נבחרו שטח הכתם ומדד הצורה, המבטא את קרבת הכתם לצורת עיגול.

השפעת משתנים עקיפים על זמינות המים

חלוקה לא אחידה של קרינת השמש גורמת להבדלים בשיעורי ההתאדות מפני הקרקע במדרונות שונים. ההתאדות במדרונות הדרומיים (בחצי הכדור הצפוני) גבוהה עד פי שלושה מאשר במדרונות בעלי פנות צפונית (Nevo 1997). מכאן שתכולת מים בקרקע במדרונות הפונים דרומה נמוכה בהשוואה לפנות הצפונית (Kutiel & Lavee 1999). בשל הבדלים אלו, באזורים היובשניים התנאים בפנות צפונית מתאימים יותר לקיומה של חברת צומח מעוצה (בני שיח, שיחים ועצים), אשר זקוק לתכולת לחות גבוהה יותר בקרקע כדי לשרוד בתקופת היובש בקיץ.

השוונות בכמות המים הזמינים לצמח לאורך המדרון היא גם פועל יוצא של מידת הלחות המצטברת בקרקע כתוצאה ממשטר נגר עילי ותחתית באזור מסוים. תפרוסת הלחות תלויה בין השאר בשני גורמים טופוגרפיים: שיפוע המדרון והמיקום לאורך המדרון. מדד הלחות (WI) הוא הביטוי המתמטי של שני גורמים אלו, והוא מבטא את פוטנציאל אגירת הלחות של כל תא במרחב (נוסחה 1). גודל התא תלוי במודל הגבהים הדיגיטלי (DEM) המהווה את הבסיס לשכבת פוטנציאל הלחות (Barling et al. 1994).

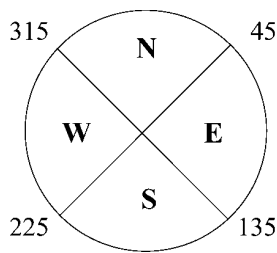
$$WI = Ln \left[\frac{As}{\tan \beta} \right] \quad (1)$$

As בנוסחה הוא השטח המתנקז לתא שטח מסוים ו-B מייצג את זווית שיפוע המדרון של התא

שיטות

עיבוד תצלומי אוויר ויצירת DEM

שטח המחקר צולם מן האוויר בספטמבר 2003, בפירוט של 12.5 סנטימטר לפיקסל ובחפיה של 60%. התצלומים עברו תיקון גיאומטרי באמצעות תוכנת OrthoBASE PRO תוך שימוש ב-24 נקודות בקרה שנדגמו בשטח באמצעות GPS ברמת דיוק של תת-מטר. תוכנה זו מאפשרת יצירת מודל סטריאוסקופי של השטח החופף בתצלומים והפקת שכבת DEM (= שריג גבהים דיגיטלי). מודל הטריאנגולציה שחושב לצורך התיקון הגיאומטרי שימש אותנו ליצירת DEM באזורי החפיה של תצלומי האוויר. המודל הוא ברזולוציה גבוהה של 3 מטרים לפיקסל לעומת רזולוציה של 25 מטר לפיקסל ב-DEM, הזמין כיום ברמה הארצית (Hall & Cleave 1999). מתוך שכבת הגבהים הופקו שכבות המשתנים הטופוגרפיים פנות המדרון ומדד לחות הקרקע (Barling et al. 1994). פנות המדרון חושבה במעלות לכל תא ולאחר מכן חולק בסיס הנתונים לארבע גזרות פנות (איור 2) וחושבה הפנות השכיחה לכל כתם.



איור 2: פנות בחלוקה לארבע גזרות

התכונות הגיאומטריות של הכתמים

תיחום גבולותיהם של כל הכתמים נעשה מתצלומי האוויר המפוענחים. מידת הדמיון של צורת הכתם לעיגול חושבה באמצעות מדד הצורה (Schumaker 1996), המבטא את מידת המורכבות של צורת הכתם ביחס לעיגול (נוסחה 2). ככל שהכתם שונה יותר מעיגול (הצורה הקומפקטית ביותר), כך עולה מורכבותו. ערכי המדד S נעים מ-1 עד אינסוף, כאשר 1 מעיד על צורת עיגול וככל שהצורה מורכבת יותר המדד שואף לאינסוף.

$$S_i = \frac{P_i}{2\sqrt{\pi \times a_i}} \quad (2)$$

P_i מבטא את היקף הכתם ו- a_i את שטחו

מיון כיסויי קרקע

נעשה מיון מונחה אוטומטי של כיסוי הקרקע לארבע קבוצות: קרקע, בני שיח, עשבונים וסלע. עבור כל כתם חושב אחוז כיסוי הסלע ואחוז כיסוי בני השיח. בדיקה של איכות המיון

הכתמים מושפעים גם מסביבתם החקלאית ונתונים להשפעות הפעילויות החקלאיות החודרות מהשוליים (המטריקס) (Marshall & Moonen 2002). במקרים רבים הרכב הצומח, העושר והמגוון בתוך הכתם משתנים ככל שמתרחקים מן השוליים אל תוך הליבה (de Blois et al. 2002). נוסף לגודלו, הקומפקטיות של הכתם משפיעה על "אפקט השוליים": ככל שצורת הכתם קרובה יותר לעיגול (הצורה הקומפקטית ביותר), כך קטן יותר אזור השוליים ביחס לליבה, ולהפך (Collinge & Palmer 2002). לכן ככל שעולה מספר הכתמים הפזורים במרחב, גדל אפקט השוליים על היבטיו השונים (הרכב ומגוון).

באזור המחקר שלנו הרכב הצומח בשוליים שונה באופן מובהק מזה של הליבה, וכולל אחוזים גבוהים של דגניים כגון שיבולת שועל נפוצה (*Avena sterilis*) (ננואיצה ובר וקוטיאלו 2004), המושפעים מדישון והדברה.

מטרת המחקר

מטרת מחקר זה היא לפתח מודל מרחבי אשר יחזה את שיעור כיסוי הצומח המעוצה בכתמים. המודל מבוסס על חיזוי התנאים הסביבתיים האופטימליים הדרושים לקיום חברת צומח זו. באזורים צחיחים למחצה התחרות בין המינים מקורה במשאב המגביל, שהוא המים (Noy-Meir 1973). כיוון שכך מתמקד המודל במשתנים העקיפים המשפיעים על השונות המרחבית של כמות המים הזמינים לצמח. יחד עם זאת, אין להתעלם מהאפשרות שבנוף מקוטע יש לתכונות הכתמים (גודל, צורה) השפעה מכרעת על חברת הצומח הקיימת. מסיבה זו המודל מתחשב גם בתכונות הכתמים, ובמיוחד במאפייניו הגיאומטריים. המודל פותח תוך שילוב עקרונות של לוגיקה עמומה בסביבת מערכות מידע גיאוגרפיות, ומתבסס על ניתוח תצלומי אוויר של שטח המחקר אשר צולמו בקיץ 2003, ועל שריג גבהים דיגיטלי (DEM – Digital Elevation Model). המודל שפותח יושם באזור המצוי בתחומי השטח החקלאי שמצפון לקיבוץ דביר שבנגב הצפוני (נ"צ 594000, 183000). גבולות אזור המחקר היו: מצפון – נחל מגדלית, בדרום – קיבוץ דביר, במזרח – חורבת מגדיל ויער להב, ומסילת הרכבת במערב.

נבחרו כ-60 כתמים אשר שטחם נע בין דונם אחד ל-80 דונם. הטופוגרפיה מתאפיינת בגבעות מתונות בטווח גבהים של 262-300 מ' מעל פני הים. חברת הצומח השלטת היא בתת הספר הים תיכונית של סירה קוצנית (*Sarcopoterium spinosum*) ושלהבית קצרת שיניים (*Phlomis brachyodon*). זוהי חברה עשירה במינים ממוצא ים תיכוני ואירנו-טוראני, אזור המאופיין גם בעושר מינים וגם במגוון מינים גבוהים וכן ברגישות סביבתית אקולוגית גבוהה מאוד, הנובעת מלחצי פיתוח שקיימים באזור ומהשפעות הפעילות החקלאית על הכתמים. יש חשיבות רבה לשימור המערכות האקולוגיות בו (רמון וצוער 2002).

טבלה 1: מטריצת בלבול של מיון כיסוי הקרקע

מיין (%)	מיון (%)			מיין (%)
	ר-ב-שנתי מעוצה	חד-שנתי	קרקע	
ר-ב-שנתי מעוצה	78	22	0	0
חד-שנתי	14	75	0	11
קרקע	0	2	95	3
סלעים ואבנים	0	0	6	94

טבלה 2: המשתנים והמשקל שנתנו להם בתסריט השלישי של המודל

כתמים גדולים (מעל 16 דונם)				כתמים קטנים ובינוניים (עד 16 דונם)			
פנות צפונית/מערבית	משקל	פנות דרומית/מזרחית	משקל	פנות צפונית/מערבית	משקל	פנות דרומית/מזרחית	משקל
דגם פיזור הסלעים	3	שטח	5	מדד לחות	5		
אחוז כיסוי סלע	3	מדד לחות ממוצע	4	אחוז כיסוי סלע	4		
שטח	2	אחוז כיסוי סלע	3	דגם פיזור הסלעים	4		
מדד לחות ממוצע	1	דגם פיזור הסלעים	3	מדד לחות ממוצע	3		
מדד הצורה פנות	1	מדד הצורה פנות	2	שטח פנות	2		
	1		1	שטח פנות	1		

בהתאם לגודלו של הכתם ולפנות השכיחה בו. לכל משתנה ניתנה חשיבות שונה, בהנחה שבכתמים בעלי גודל ופנות שונים חלים תהליכים אקולוגיים שונים. חשיבותו של כל משתנה התבטאה במשקל שניתן לו במודל (טבלה 2). ערך הסף של 16 דונם, המבחין בין כתמים גדולים לכתמים בינוניים וקטנים, נקבע על סמך מחקר שנערך בכתמים על-ידי נגואיצה ובר (קותיאל) (2004). הם מצאו כי מידת הדמיון של הצומח בכתם לצומח הטבעי הקיים בשמורת הטבע הסמוכה לכתמים, תלויה במידה רבה בשטח הכתם. כתמים בעלי שטח הקטן מ-16 דונם מאופיינים בשליטה של מינים עשבוניים, במיוחד דגניים כגון מלעניאל מצוי (*Stipa capensis*) ושיבולת שועל נפוצה (*Avena sterilis*). בכתמים אשר שטחם גדול מ-16 דונם נמצאו אחוזי כיסוי שונים של צומח רב-שנתי, עד לאחוזי כיסוי הדומים לשטח הטבעי הסמוך.

בתסריט הראשון המודל התייחס לכתמים כאל קבוצה אחת. ארבעת המשתנים המשפיעים על זמינות המים (אחוז כיסוי הסלע, דגם פיזור, מדד הלחות ופנות המדרון) דורגו במקום גבוה יותר מגודל הכתם וצורתו. בתסריט השני חולקו הכתמים לשתי קבוצות על-פי גודלם. המשתנה אשר קיבל את החשיבות הגבוהה ביותר בקבוצת הכתמים הקטנים הוא צורת הכתם, בשל ההשפעה הגדולה יותר שיש למטריקס עליו (Yao et al. 1999) ואילו לשטח הכתם ניתנה חשיבות פחותה. בקבוצת

נערכה מול פענוח ויזואלי של תצלומי האויר. לצורך הבדיקה נבחרו באופן אקראי 150 פיקסלים המיצגים את הקבוצות השונות (סה"כ 600 פיקסלים); הפענוח הויזואלי של כל פיקסל הושווה לתוצאות המיון באמצעות "מטריצת הבלבול" (confusion matrix) (טבלה 1). מטריצה זו מתארת את אחוז הפיקסלים מכל קבוצה אשר סווג לכל אחת מן הקבוצות. לאחר ביצוע המיון חושבו מתוך שכבת כיסויי הקרקע אחוז כיסוי בני השיח ואחוז הכיסוי הסלעי והאבני בכל כתם.

חישוב דגם הפיזור

כדי למדוד את דגם הפיזור של הסלעים הומרה השכבה המייצגת את כיסוי הסלע במיון לשכבה נקודתית, כך שכל סלע – ללא קשר לגודלו – יוצג על-ידי נקודה אחת. דגם הפיזור של הסלעים והאבנים נקבע על-ידי מדד "השכן הקרוב". מדד זה משווה בין הערך הצפוי לערך המדוד של ממוצע המרחקים בין כל אלמנט לשכן הקרוב אליו ביותר, תוך הנחת פיזור אקראי. ערכי המדד הם בטווח 0-2.149, כאשר 0 מעיד על דגם מקובץ, 1 על דגם פיזור אקראי ו-2.149 על דגם סדיר (DeMeres 2000).

עקרונות המודל

פותח מודל מרחבי מבוסס-תהליך המורכב ממספר תסריטים,

שהיא מובנת על-ידי המומחה (Burrough & McDonell 2000). סקירה רחבה על לוגיקה עמומה נמצאת במאמרו של Robinson (2003).

דוגמה טובה ליתרון של השימוש בפונקציית השייכות ניתן למצוא במחקרם של Svoray & Nathan (2004). במחקרם פותח מודל להערכת מידת ההתאמה של כל תא-שטח להתבססות אורן ירושלים (*Pinus halepensis*). אחד המשתנים המשפיעים על הסיכוי של זרע להתבסס הוא טריפה; ההסתברות שזרע ייטרף פוחתת והולכת ככל שמתרחקים מן העץ, משום שהטורפים נמשכים לקרבתו. לכן פונקציית השייכות תבטא את סיכויי הזרע "לחמוק" מטריפה כתלות במרחקו מן העץ. האתרים הקרובים לעץ יקבלו ציוני שייכות נמוכים (קרובים יותר ל-0) ואילו אתרים רחוקים מהעץ יקבלו ציוני שייכות גבוהים (קרובים ל-1). בצורה כזו נוצר מרחב המבטא באופן רציף את סיכויי ההתבססות של הזרע כפונקציה של אי-טריפה, בתלות במרחקו מהעץ. קיימות פונקציות שייכות מסוגים שונים, ובמקרה שתואר לעיל הפונקציה שנבחרה לתאר את המשתנה היא פונקציה לא-ליניארית מסוג S.

פונקציות השייכות של המשתנים במחקר זה מפורטות בטבלה 3 עבור ערכים $\alpha \leq X \leq \beta$, כאשר α ו- β מייצגות את ערכי המינימום והמקסימום של כל משתנה בהתאמה. למשל, במשוואה הליניארית המבטאת את צורת הכתם, x מבטא את ערך מדד הצורה של הכתם, a תקבל את ערך מדד הצורה של הכתם העגול ביותר באזור המחקר, ואילו β תקבל את ערך המדד של הכתם בעל הצורה המורכבת ביותר, כך מקבל כל כתם ערך בין 0 ל-1 בהתאם לצורתו.

במחקר זה הציון הסופי שמקבל כל כתם הוא פונקציית שייכות מאוחדת (joint membership function, JMF), שיכולה להיות כל פעולה של איחוד, חיתוך וכדומה בין הקבוצות כדי ליצור ציון אחד המבטא את מידת התאמתו של כל כתם לחברת צומח מעוצה. λ היא מקדם המבטא את מידת חשיבותו של המשתנה ה- i בתסריט, בהשוואה למשתנים האחרים. ציון ההתאמה הסופי של הכתם, שהוא סכום ציוני השייכות של כל משתנה בכתם (המוכפלים במקדם שיקלולו λ) מחולק בסכום כל המקדמים, מוצג בנוסחה 3.

(3)

$$JMF = \frac{\lambda_1 mf_1 + \lambda_2 mf_2 + \dots + \lambda_n mf_n}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}$$

תוצאות ודיון

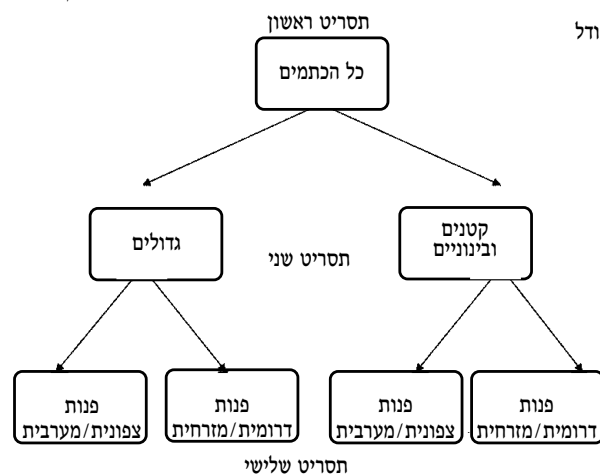
מחקר זה מציע מודל המתאר את השונות בכיסוי צומח מעוצה (שיחים ובני שיח) בכתמים אקולוגיים באזור צחיח למחצה. הנחת המחקר של המודל היתה, כי השונות בפריסה המרחבית של המים הזמינים לצמח ותכונות הכתמים הם המשפיעים על כיסוי הצומח ועל צורת החיים (מעוצים מול עשבוניים) השולטת

הכתמים הגדולים המשתנים החשובים ביותר שהוגדרו היו אחוז כיסוי הסלע ופיזורו ושטח הכתם. בתסריט השלישי, הכתמים חולקו בנוסף לגודל גם על-פי הפנות השכיחה. העקרונות שהנחו אותנו מבוססים על כך שזמינות המים לצמח במפנים דרומיים-מזרחיים תהיה נמוכה בהשוואה למפנים צפוניים-מערביים, ולכן שם לגורמים הנוספים המשפיעים על כמות המים הזמינים לצמח (סלעיות, שיפוע המדרון), תהיה חשיבות גדולה יותר מאשר בכתמים בעלי פנות צפונית-מערבית. מאפייני השטח והצורה של הכתם יהיו בעלי חשיבות גדולה יותר בכתמים קטנים ובינוניים מאשר בכתמים גדולים. באופן זה מבטאת המורכבות המאפיינת תהליכים אקולוגיים. נוסף לכך, לכל אחד מהתסריטים שהוזכרו לעיל פותחו שני תסריטים חלופיים, שבהם דורגו המשתנים בסדר שונה. בשלב הסופי עמדו לרשותנו תשעה תסריטים: שלושה עיקריים וששה המבטאים היפותזות חלופיות. איור 3 מציג את החלוקה לקבוצות בשלושת התסריטים.

מודל לוגיקה עמומה (Fuzzy Logic)

לוגיקה עמומה היא תיאוריה במתמטיקה פורמלית, המאפשרת פתרון חד-משמעי של בעיות שבהן חסר מידע, או שהמורכבות שבהן רבה. השימוש בלוגיקה עמומה נפוץ היום במחקרים רבים באקולוגיה ובגיאוגרפיה בשל יכולתה של השיטה להתמודד עם נתונים מרובי משמעויות ועם יחסים מורכבים בין המשתנים (Robinson 2003). בניגוד למודלים דטרמיניסטיים, המודלים המבוססים על לוגיקה עמומה מביאים בחשבון את אי-הוודאות האינהרנטית הקיימת בתיאור הטבע ובחלוקתו לקבוצות, ובסופו של דבר השייך הסופי לקבוצות נעשה על-פי שיקול דעת החוקר ולא בתהליך אוטומטי מובנה ומוגדר. שימוש בלוגיקה עמומה מאפשר להסיק מסקנות בהיגיון פשוט, להגדיר ולמפות בצורה מפורשת ומורכבת מאפיינים סביבתיים. יתרונו הגדול של המודל נעוץ בגמישות הרבה שלו וביכולתו לכמת מידע מילולי. בשלב הראשון בפיתוח המודל מותאמת לכל אחד מהמשתנים פונקציית שייכות (membership function), אשר מתארת את השפעת המשתנה על התופעה הנחקרת כפי

איור 3: תסריטי המודל



טבלה 3: פונקציות השייכות של המשתנים במודל

משתנה	פונקציה	נוסחה
דגם הפיזור של סלעים	ליניארית	$\frac{x-\alpha}{\beta-\alpha}$
פנות מדרון שכיחה	ליניארית	$\frac{x-\alpha}{\beta-\alpha}$
מדד לחות ממוצע	סיגמואיד	$\cos^2\left(\left(\frac{x-\alpha}{\beta-\alpha}\right)\left(\frac{\pi}{2}\right)\right)$
שטח הכתם	סיגמואיד	$\cos^2\left(\left(\frac{x-\alpha}{\beta-\alpha}\right)\left(\frac{\pi}{2}\right)\right)$
צורת הכתם	ליניארית	$\frac{x-\alpha}{\beta-\alpha}$
אחוז כיסוי הסלע	ליניארית	$\frac{x-\alpha}{\beta-\alpha}$

התסריט השני

בתסריט זה התבצעה חלוקה של הכתמים לפי גודלם והתקבל במבחן הרגרסיה ערך r^2 פחות מ-0.3 ללא מובהקות סטטיסטית. העובדה שחלוקת הכתמים לשתי קבוצות גודל הניבה שיפור בתוצאות מצביעה על כך שגודל הכתם אכן משפיע על התהליכים המתרחשים בו, כפי הנראה דרך הגדלת חשיבותו של "אפקט השוליים".

לגודל הכתם יש השפעה על המינים המאכלסים אותו בתהליכי סוקצסיה שניונית (Yao et al., 1999) ועל מידת השפעתו של המטריקס על הכתם (Yao et al., 1999; Debinski & Holt 2000). בכתמים ששטחם קטן, גודל ליבת הכתם קטן אף הוא, כך שחברת השוליים היא שמאפיינת את הכתם כולו. במקרה שלנו, חברת השוליים היא חברת צומח עשבוני, לעומת הליבה של בתת הספר (נגואיצה ובר [קותיאל] 2004). על כן לגודל הכתם יש השפעה על מידת כיסוי הצומח המעוצה בו.

התסריט השלישי

בתסריט השלישי, אשר התחשב בהשפעת גודל הכתם ובפנות המדרון, התקבל במבחן הרגרסיה ערך r^2 של 0.56 עם מובהקות סטטיסטית. באיור 5 ניתן לראות את ציוני ההתאמה של הכתמים לכיסוי צומח מעוצה באזור המחקר, כפי שהתקבלו בהרצת המודל. תסריט זה מבטא בצורה הטובה ביותר את המורכבות של תהליכים אקולוגיים בסביבה כתמית ומסביר את רוב השונות בכיסוי הצומח המעוצה בכתמים. התוצאות שהתקבלו משני התסריטים הראשונים מעידות על חשיבותם הרבה של גודל הכתם והפנות ועל השפעתם על תהליכים אקולוגיים בכתמים.

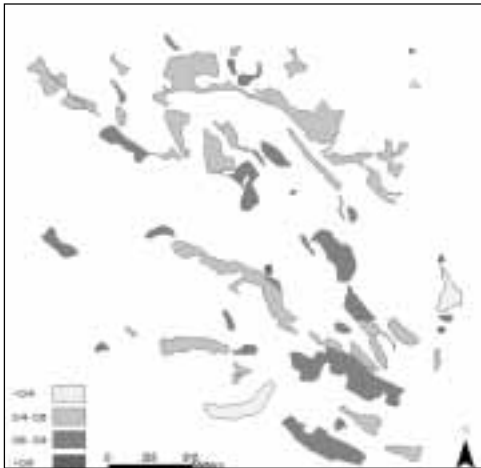
חשיבות הפנות נעוצה בהבדלי לחות הקרקע בין פנות צפונית לדרומית, המתבטאת בהבדלים בכיסוי הצומח ובהרכב בין

בהם. לצורך כך פותחו שלוש היפותזות שונות אשר בוטאו בשלושה תסריטים, שבהם לכל משתנה ניתנו מקדמים שונים. ההיפותזות התבססו על השפעת גודל הכתם והפנות השכיחה בו על מידת השפעתם של המשתנים המשתתפים במודל. לשם הערכת כיסוי הצומח המעוצה בכתמים בוצע מיון מונחה של תצלומי אוויר. על-פי תוצאות עיבוד תצלומי האוויר, אחוז כיסוי הצומח הרב-שנתי בכתמים נע בין 2% ל-57%, באיור 4 ניתן לראות את אחוזי כיסוי הצומח המעוצה בכתמים, בחלוקה ל-5 רמות כיסוי. מפה זו היא תוצאה של המיון המונחה. הכתמים המיוצגים על ידי הצבעים הכהים הם בעלי אחוז הכיסוי הגבוה יותר. אחוז כיסוי הסלעים והאבנים בכתמים לא עלה על 16% ולרוב עמד על אחוזים מעטים. פיזור הסלעים והאבנים בכתמים נטה מִדְגָם מקובץ לאקראי עם ערכים הנעים בין 0.28 ל-0.79.

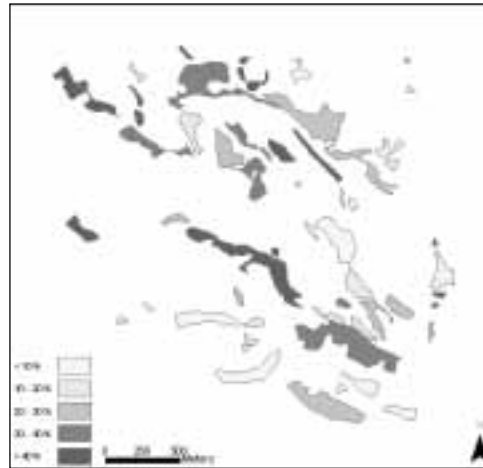
לאחר הרצת כל תסריט קיבל כל כתם ציון, המבטא את מידת התאמתו לקיום צומח מעוצה בכתמים. ציוני הכתמים נעים בין 0 לכתם הפחות מתאים עד 1 לכתם המתאים ביותר. במבחני רגרסיה נבדק הקשר בין ציונו של כל כתם לאחוז הכיסוי של הצומח המעוצה בפועל, כפי שהתקבל ממיון תצלומי האוויר.

התסריט הראשון

בתסריט הראשון, שבו לא נעשתה חלוקה של הכתמים לקבוצות גודל ופנות, התקבל במבחן הרגרסיה ערך r^2 פחות מ-0.2. תוצאה זו מעידה שכאשר הכתמים שונים כל-כך בתכונותיהם, יש להביא בחשבון שלתכונות הכתמים כמו גודל, צורה ופנות המדרון יש השפעה על התהליכים המתרחשים בהם (Fahrig 2003; Debinski & Holt 2000). כתמים גדולים שונים מכתמים קטנים, ולפנות יש השפעה על הרכב הצומח במדרון.



איור 5: מפת ציוני התאמת הכתמים לכיסוי שיחים על פי התסריט השלישי



איור 4: מפת אחוזי כיסוי צומח מעוצה בכתמים על בסיס מיון מונחה של תצלומי האוויר

כלשהו. הרצת התסריטים החלופיים לא הניבה תוצאות מובהקות באף אחד מהתסריטים המוצעים, כלומר ההיפותזות אשר עמדו בבסיסם אינן עדיפות על ההיפותזות אשר עמדו בבסיס התסריטים המקוריים.

מסקנות

פותח מודל המשלב מ"ג עם עקרונות לוגיקה עמומה, כדי לתאר את השונות בהרכב הצומח בכתמים הלכודים בשטחים חקלאים מעובדים. תוצאות המודל הראו כי שילוב בין המשתנים המשפיעים על כמות המים הזמינים לצמח, יחד עם המשתנים הגיאומטריים של הכתמים, הביא לתוצאות המבטאות היטב את השונות בכיסוי הצומח בכתמים, אם כי לא הסבירו את כל השונות. התסריטים השונים של המודל הראו כי הגורמים המשפיעים על הפיזור המרחבי של המים הזמינים לצמח מהווים גורם חשוב, המשפיע על מידת התבססותו והישרדותו של צומח מעוצה בכתמים. גם לגודל הכתם יש השפעה על התהליכים המתרחשים בו, בעיקר בהקשר של השפעת פעולות העיבוד החקלאי על הכתמים הקטנים לעומת הגדולים. הצלחתו של התסריט השלישי, אשר התחשב גם בפנות הכתם, נכונה במיוחד בכתמים בעלי פנות דרומית-מזרחית, שבהם שוררים תנאי מיקרו-אקלים יובשניים יותר. בכתמים בעלי פנות צפונית-מערבית, לעומתם, משתני הצורה הם המשפיעים יותר על הצומח.

מחקר זה מדגיש את העובדה כי לא די באיתור המשתנים השונים המשפיעים על המערכת, אלא יש חשיבות רבה להבנת יחסי הגומלין בין המשתנים בתוך המערכת, שלא היה ניתן להבינם ללא שימוש במערכות מידע גיאוגרפיות אשר מבטאות את האלמנטים המרחביים במודל.

הפנויות – במיוחד באזורים צחיחים למחצה, שם מדרונות הפונים צפונה מכילים אחוז גבוה יותר של צומח מעוצה (Kutiel et al. 1998; Shoshany 2002). גודל הכתם משפיע גם הוא: כתמים בעלי שטח גדול מכילים מספר רב יותר של מיקרו-בתי-גידול ויכולים לאכלס מספר גדול יותר של מינים (Debinski & Holt 2000). מכאן, שאין להתעלם מן ההשפעות של תכונות אלו על חברת הצומח, ובלתי אפשרי ליצור מודל המבטא את השונות בכיסוי הצומח בכתמים מבלי להתחשב בהבדלים בתכונות הכתמים.

שלב הנביטה וההתבססות של הזרעים מושפע בעיקר מהשונות של זמינות המים, מתוך הידוע לנו על התנאים להתבססות שיחים באזורים צחיחים למחצה (Veenendaal et al. 1996). הדגם המרחבי של מים זמינים, הנובע משונות מרחבית של תכונות הקרקע, הוא בעל השפעה מכרעת על שלב ההתבססות (Veenendaal et al. 1996; Maestre & Cortina 2002). מתוצאות המודל עולה כי בכתמים בעלי פנות צפונית יותר ופיזור אקראי יותר של לחות, מתקיימים תנאים המתאימים להתבססות שיחים. כמו-כן, כפי שעלה מהתסריט השני, כתמים גדולים יותר מכילים כיסוי גבוה יותר של שיחים.

תסריטים חלופיים

כזכור, לכל אחד משלושת התסריטים המוצעים נכתבו שני תסריטים נוספים, המהווים חלופה להיפותזות המוצעות. התסריט החלופי הראשון התבסס על היפותזה הפוכה לזו העיקרית, כגון מתן חשיבות גבוהה יותר למשתני הטופוגרפיה (הפנות ואינדקס הלחות) בהשוואה למשתני התכסית (אחוז כיסוי הסלע ודגם הפיזור). התסריט החלופי השני הציג היפותזה ניטרלית, שבה חשיבות המשתנים אינה מבוססת על הגיון

לתוך המודל ואולי אף יוביל למסקנות אודות הממשק הרצוי באזור המחקר.

הבעת תודה

המחברים מודים לקרן נקודת ח"ן על מימון המחקר.

השינויים שעבר כל כתם בגודלו ובצורתו, מידת היציבות שלו לאורך השנים (כלומר, האם עבר קיטוע או לא) והזמן שבו נוצר, כולם משפיעים על תהליכים אקולוגיים, ויש מקום לכלול אותם במודל. החלק הבלתי מוסבר של השונות יכול לנבוע מכך שהמודל לא התחשב בשינויים שעברו הכתמים לאורך השנים. מכאן, שהמשך העבודה יכול הכנסת משתנים אלו

מקורות

- נגואיצה, ד' ובר (קותיאל), פ' 2004. "איים בים של חיטה" – השפעת קיטוע על הצומח הטבעי בכתמים בשטחים החקלאיים בדרום שפלת יהודה, בתוך: אשל י' (עורך): מחקרי יהודה ושומרון, הקובץ ה-13, אריאל: המכללה האקדמית יהודה ושומרון, 429-440
- פרבולוצקי, א' ופולק, ג' 2001. אקולוגיה – התיאוריה והמציאות הישראלית, ירושלים: כרטא רמון, א' וצוער, א' 2002. סקר להב. יחידת הסקרים: החברה להגנת הטבע
- Barling, R.D., Moore, I.D. & Grayson, R.B. 1994. A quasi dynamic wetness index for characterizing the spatial distribution of zones of surface saturation and soil water content. *Water Resources Research*, 30, 1029-1044
- Brosfokske, K.D., Chen, J., Crow, T.R. & Saunders, S.C. 1999. Vegetation responses to landscape structure at multiple scales across a Northern Wisconsin, USA, pine barrens landscape. *Plant Ecology*, 143, 203-218
- Burnett, M.R., August, P.V., Brown, J.H. & Killingback, K.T. 1998. The influence of geomorphological heterogeneity on biodiversity II - a patch-scale perspective. *Conservation Biology*, 12: 363-370
- Burrough, P.A. & McDonnell, R.A. 2000. *Principles of Geographical Information Systems*. New York: Oxford University Press
- Collinge, S.K. & Palmer, T.M. 2002. The influences of patch shape and boundary contrast on insect response to fragmentation in California grasslands. *Landscape Ecology*, 17, 647-656
- Coppedge, B.R., Engle, D.M., Fuhlendorf, S.D., Masters, R.E. & Mark, S. 2001. Landscape cover type and pattern dynamics in fragmented southern Great Plains grasslands, USA. *Landscape Ecology*, 16: 677-690
- Costanza, R., d'Arge, R., deGroot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P. & vandenBelt, M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 253-260
- de Blois, S., Domon, G., & Bouchard, A. 2002. Landscape issues in plant ecology. *Ecography*, 25, 244-256
- Debinski, D.M. & Holt, R.D. 2000. A survey and overview of habitat fragmentation experiments. *Conservation Biology*, 14, 342-355
- DeMeres, M.N. 2000. *Fundamentals of Geographic Information Systems*. New-York: John Wiley & Sons.
- Fahrig, L. 2003. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 34, 487-515
- Forman, R.T.T. & Godron, M. 1986. *Landscape Ecology*. New York: Wiley
- Hall, J.K. & Cleave, R.L. 1999. The DTM project. *Geographical Survey of Israel*. Jerusalem
- Honnay, O., Hermy, M. & Coppin, P. 1999. Effects of area, age and diversity of forest patches in Belgium on plant species richness, and implications for conservation and reforestation. *Biological Conservation*, 87, 73-84
- Kutiel, P. & Lavee, H. 1999. Effect of slope aspect on soil and vegetation properties along an aridity transect. *Israel Journal of Plant Sciences*, 47, 169-178
- Kutiel, P., Lavee, H. & Ackermann, O. 1998. Spatial distribution of soil surface coverage on north and south facing hillslopes along a Mediterranean to extreme arid climatic gradient. *Geomorphology*, 23, 245-256
- Li, H. & Reynolds, J.F. 1995. On definition and quantification of heterogeneity. *Oikos*, 73, 280-284.
- Maestre, F.T. & Cortina, J. 2002. Spatial patterns of surface soil properties and vegetation in a Mediterranean semi-arid steppe. *Plant and Soil*, 241, 279-291

- Marshall, E.J.P. & Moonen, A.C. 2002. Field margins in northern Europe: their functions and interactions with agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 89, 5-21
- Nevo, E. 1997. Evolution in action across phylogeny, caused by Microclimatic stresses at "Evolution canyon". *Theoretical Population Biology*, 52, 231-243
- Noy-Meir, I. 1973. Desert ecosystems: environment and resources. *Annual review of Ecology and Systematics*, 4, 25-51
- Oloff, H. & Ritchie, M.E 2002. Fragmented nature: consequences for biodiversity. *Landscape and Urban Planning*, 58, 83-92
- Pariente, S. 2002. Spatial patterns of soil moisture as affected by shrubs, in different climatic conditions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 73, 237-251
- Poesen, J. & Lavee, H. 1994. Rock fragments in top soils – significance and processes. *Catena*, 23(1-2), 1-28
- Ridolfi, L., D'Odorico, P., Porporato, A. & Rodriguez-Iturbe, I. 2003. Stochastic soil moisture dynamics along a hillslope. *Journal of Hydrology*, 272, 264-275
- Robinson, V.B. 2003. A perspective on the fundamentals of fuzzy sets and their use in Geographic Information Systems. *Transactions in GIS*, 7, 3-30
- Schumaker, N. H. 1996. Using Landscape Indices to Predict Habitat Connectivity. *Ecology*, 77, 1210-1225.
- Shoshany, M. 2002. Landscape fragmentation and soil cover changes on south- and north-facing slopes during ecosystems recovery: an analysis from multi-date air photographs. *Geomorphology*, 45, 3-20
- Svoray, T., & Nathan, R. 2004. Dynamic modeling of the effects of water, temperature and light on tree population spread. In: P. Atkinson, G. Foody, S. Darby & F. Wu, Eds *GeoDynamics*, London: CRC Press. 125-137
- Svoray, T., Bar (Kutiel), P., & Bannet, T., 2005, Urban land-use allocation in a Mediterranean Ecotone: Habitat Heterogeneity Model incorporated in a GIS using multi-criteria mechanism. *Landscape and Urban Planning*, 72, 337-351
- Veenendaal, E.M., Ernst, W.H.O. & Modise, G.S. 1996. Effect of seasonal rainfall pattern on seedling emergence and establishment of grasses in a savanna in south-eastern Botswana. *Journal of Arid Environments*, 32, 305-317
- Yair, A. & Kossovsky, A. 2002. Climate and surface properties: Hydrological response of small arid and semi-arid watersheds. *Geomorphology*, 42, 43-57
- Yao, J., Holt, R.D., Rich, P.M. & Marshall, W.S. 1999. Woody plant colonization in an experimentally fragmented landscape, *Ecography*, 22, 715-728
- Zheng, D., Wallin, D.O. & Hao, Z. 1997. Rates and patterns of landscape change between 1972 and 1988 in the Changbai Mountain area of China and North Korea, *Landscape Ecology* 12, 241-254