

# השפעת דריכת מטיילים על הקרקע והצמחייה בחניוני אורנים בכרמל

שי לוי\*, נעם גרינבאום\*\*, אמוץ דפני\*\*\* וגידי נאמן\*\*\*\*

\* החוג לניהול משאבי טבע וסביבה, אוניברסיטת חיפה

\*\* החוג לגאוגרפיה ולימודי סביבה, אוניברסיטת חיפה

\*\*\* החוג לביולוגיה סביבתית ואבולוציונית והמכון לאבולוציה, אוניברסיטת חיפה

\*\*\*\* החוג להוראת המדעים, אוניברסיטת חיפה והחוג לביולוגיה, מכללת אורנים

מחקר זה בדק את השפעת דריכת מטיילים על תכונות הקרקע, הצמחייה והקשרים ביניהם בשישה חניונים הנמצאים ביערות אורן ירושלים טבעי בכרמל. נערכו בדיקות פיסיקליות וכימיות לקרקע, הוגדר עושר מיני הצמחים ונבדקו מדדים אקו-פיזיולוגיים המלמדים על מצבם של עצי האורן הבוגרים. תוצאות המחקר מראות שבאזור הרמוס אחוז הקרקע החשופה היה גבוה, הקרקע היתה דחוסה יותר, חדירות המים לקרקע נמוכה יותר, ריכוז המינרלים גבוה והחומציות (pH) נמוכה יותר מאשר בשולי החניון. עושר מיני הצמחים היה נמוך יותר וכמעט לא נמצאו נבטי אורנים באזור הרמוס. עצי אורן שגדלו במרכז החניונים, סבלו מעקת מים חזקה יותר בקיץ לעומת עצים שגדלו מחוץ לחניונים, אולם לא נמצאה ירידה ביעילות מנגנון ההטמעה ובשפע העלים של האורנים בלב החניון. המחקר מראה כי שימוש מסיבי בחניון גורם לשינויים בקרקע הפוגעים בעצי האורן הבוגרים ובכושר התחדשותם בחניונים. לכן יש לאמץ מדיניות ממשק בר-קיימא שתבטיח את קיומם והתחדשותם של עצי האורן הטבעיים בחניוני המטיילים בכרמל.

*מילות מפתח:* השפעת מטיילים, חניוני מטיילים, כרמל, אורן ירושלים, רמיסה, נופשים, קרקע, צמחייה.

## מבוא

הדרישה הציבורית, בארץ ובעולם, לשטחים פתוחים וליערות הולכת וגדלה (קורמן 2000). ממדיה הקטנים של מדינת ישראל מעלים את ערכם וחשיבותם היחסיים של השטחים הפתוחים והיערות בה. למטיילים ולמבקרים הרבים בטבע יש השפעות אקולוגיות שונות, אולם מעט מאוד ידוע אודות ההשפעות ארוכות הטווח שלהן על המערכות הטבעיות (Kuss 1986). בכדי לתת מענה תכנוני לשימור מבוקר ובר-קיימא של שמורות ופארקים, זקוקים מנהלי יערות, שמורות חניונים וכדומה למידע מהימן על השפעות פעילות האדם על הסביבה (Cole 1995a; Monz et al. 2009).

השפעת מטיילים על המערכות האקולוגיות מתבטאת במגוון הפרעות: זיהום קרקע, שינוי תכונות הקרקע, פגיעה בעושר המינים ובכיסוי הצומח, זיהום מים, ופגיעה בהתנהגות בעלי חיים (Cole 1995b). במחקר זה נבדקה ההשפעה של המבקרים בחניונים הממוקמים ביערות אורן טבעי בכרמל על תכונות הקרקע, על מצבם של עצי האורן ועל עושר מיני הצמחים בחניונים. עומס המטיילים, עלול לפגוע בהמשך קיום עצי האורן הבוגרים ובכושר התחדשותם, ולגרום ל"כריתת הענף" עליו יושב החניון. מכאן חשיבות הידע אודות מצבו האקולוגי של כל חניון לשם קביעת מדיניות ממשק בר-קיימא של חניונים קולטי קהל בפארק הכרמל.

## קרקע

לדריכה של נופשים ומטיילים, בעיקר באזורי חניונים ושבילים, השפעה שלילית על תכונות הקרקע (Bhujju and Ohsawa 1998). הידוק הקרקע על ידי הדריכה, פוגע במבנה הקרקע אפילו לפני הסרת הכיסוי הצמחי והחומר האורגני (Jim 1987). הסרת שכבת הנשר מפני הקרקע גורמת לאידוי מוגבר הפוגע בכושר הצמיחה באותו מקום (Ashman and Puri 2001). הידוק הקרקע אופייני לפני הקרקע העליונים ותלוי במשך הדריכה ובעוצמתה, בשיעור הלחות, במבנה, במרקם, בצפיפות ובכמות החומר האורגני בקרקע (Kuss 1986) ומביא לפגיעה בחומרי המזון (נוטריינטים) בקרקע (Monz 2002). הנזק ארוך הטווח של הידוק הקרקע משפיע בעיקר על המקטע החרסיתי ולכן קרקעות חרסיתיות פגיעות יותר מאשר אחרות. כשהקרקע דחוסה, יש ירידה בנקבוביותה, דבר הגורם להפחתה בקיבול המים ובכושר החדירות, ירידה באחוז הלחות וירידה בזמינות מים ומינרלים לצמח הגורמים להגבלת ההתארכות השורשים (Kuss 1986). דחיסת הקרקע מקטינה את חלחול המים לקרקע וגורמת להגברת הנגר העילי ולחשיפת הקרקע לסחיפה.

## השפעה על הצומח

לתנועה, אפילו מעטה, של בני אדם בשטח עלולה להיות השפעה על הצומח הטבעי (קוטיאל ואחרים 1998; Rossi et al. 2009; Hamberg et al. 2010). הגורמים העיקריים המשפיעים על תגובת הצומח לדריכה הם מין הצמח ורגישותו לרמיסה, תכונות הקרקע, עוצמת הדריכה ומשך לחץ הרמיסה (Cole and Bayfield 1993; Kuss 1986). הצמחים העמידים במיוחד לדריכה באזורי נופש הינם מינים בעלי ניצני צמיחה בבסיס הצמח (כגון דגניים), פרחים קטנים ומוגנים, חלקי צמח נוקשים אך גמישים, עלים הצומחים ישר מהקרקע, גבעולים תת-קרקעיים ובעלי גושים שורשיים (Cole 1987; Kuss 1986; Rossi et al. 2009; Striker et al. 2011). צמחים עשבוניים נמצאו עמידים יותר לדריכה מאשר מעוצים (קוטיאל ואחרים 1998; Cole et al. 2000). הצמיחה העשבונית באזורים פתוחים עמידה יותר לדריכה מאשר צמיחה עשבונית תחת עצים (Marion and Cole 1996). בספרד למשל, באקלים ים-תיכוני יובשני, נמצא קשר מובהק בין מידת סחיפת הקרקע לבין הסרת הכיסוי הצמחי (Lopez-Bermudez et al. 1998).

חוקרים מסכימים על כך שירידה של מעל 50% בכיסוי הצומח נחשבת לפגיעה קשה בבית הגידול המצריכה שיקום ארוך טווח (Cole 1995a; Kuss 1986), אולם גם רמות נמוכות של דריכת מטיילים עלולות לגרום להסרת כיסוי הצומח, ירידה בעושר המינים וירידה בחדירות הקרקע (Cole 1987).

חשיפת שורשי עצים הבולטים מעל פני הקרקע הם תופעה אופיינית לחניוני מטיילים ומהווים סימן מובהק להסרת הקרקע, ולפגיעה בבריאותו של העץ (Leung and Marion 1999). קרקע מהודקת, גורמת לעיכוב בצמיחת שורשי הצמח ומגבילה את קליטת כמות המים בצמח ואת יסודות הזנה הדרושים לו (רימון 1991). לכן, ההצלחה בחידוש הצומח בחניונים תלויה קודם כל בהתפתחות השורשים (Yorks et al. 1997).

## מדדים אקו-פיזיולוגיים

להשפעת הדריכה חשיבות מברעת על הצמחים מאחר ועומס המטיילים משפיע לרעה על פוטנציאל המים, על כושר ההטמעה וכסות העלים של העץ, והוא עלול להשפיע גם על הצמיחה וייצור הזרעים שלהם, ובמקרים קיצוניים אף לגרום למותם. המצב הפיזיולוגי של העצים ומספר הנבטים יכולים להוות מדד

להשפעה ארוכת הטווח של הדריכה על שרידות העצים וכושר ההתחדשות שלהם. פגיעה בעצים הינה חצייה של "קו אדום" מבחינת המשך קיומו ארוך הטווח של חניון במקום מסויים והשימוש בו.

**פוטנציאל מים טרום-שחר** – מהווה מדד לפוטנציאל המים בקרקע בית השורשים של הצמח. על סמך ניסיון מצטבר נקבע כי פוטנציאל מים של כ-15 אטמוספירות נחשב ל"נקודת כמישה" לצמחים רבים. בנקודת הכמישה אין הצמח מסוגל לספוג מים מהקרקע ולכן חלה כמישה מתמדת של הצמח מעבר לנקודה זו. למרות זאת, צמחים לא מעטים מותאמים לתנאי יובש והם מסוגלים לצמוח ולהתפתח גם בקרקעות בהם פוטנציאל המים נמוך מ-15 אטמוספירות (להב ואחרים 1999).

**הפלאורסנציה של הכלורופיל** – מקובלת כמדד ליעילותו של מנגנון ההטמעה בצמח וקיימת התאמה ברורה בין עוצמת הפלאורסנציה ליכולת ההטמעה (Figueroa et al. 1997). לכן היא משמשת להערכת ההשפעות השליליות של תנאי עקה סביבתיים כמו: יובש, שינויי טמפרטורה קיצוניים וזיהום באטמוספירה, על יכולת ההטמעה של הצמח. במחקר לבחינת אקוטיפים של *אודן הגלעין* לעמידות לעקת יובש בשיטה מהירה נמצא כי מדד הפלאורסנציה של הכלורופיל (FV/FM) היה טוב לבדיקת יעילות המערכת הפוטוסינטטית וקצב קליטת המים המבטא את קצב הטרנספירציה (מדמוני ואחרים 2003).

**שטח העלים היחסי (LAI)** – שטח היטל הצמרת על הקרקע מקובל כמדד לבדיקת כמות העלווה על העץ. מדד זה נקבע על ידי השוואת מידת קרינת השמש בצל מתחת לעץ יחסית לקרינה בשמש ישירה. הצל של צמרת העצים גורמת להעלאת אחוז הלחות, ויצירת מיקרו-אקלים קריר יותר תחתיה. בשל הצל וחיפוי הקרקע בעלים שנשרו מהעץ, הצפיפות ועושר מיני הצמחים מתחת לחופת העץ נמוכים מאשר מחוץ לה. עקב רידה ברמת הקרינה המגיעה אל הקרקע מתרבים צמחים חובבי צל ולחות, שהם רגישים יותר לדריכה. צמחייה הגדלה בצל של עצי יער בתחתית עמקים, נמצאה רגישה לדריכה פי 20 מאשר צמחייה בערבות עשב ואזורי אחו (Kuss 1986).

## מטרות המחקר

בשנים האחרונות היתה התרשמות שעצי אורן הנמצאים בחניונים עמוסים במטיילים סובלים מעקה וחלקם מתים. מחקר זה ביקש לבדוק את ההשפעה של דריכת מבקרים בחניונים ביערות אורן בפארק הכרמל לפי מדדים שונים של הקרקע והצומח ובנוסף לכך, למצוא מדדי קרקע וצומח היכולים לשמש כמדדים למצבו האקולוגי של החניון, וקריטריון כמותי לתכנית ממשק בר-קיימא של חניוני מטיילים בכרמל.

## איזור המחקר

הכרמל הינו בלוק טקטוני מורם המתנשא לגובה של עד 546 מ'. המסלע מורכב מסלעים קרבונטיים מהקנומן והטורון הכוללים דולומיט, גיר, קירטון, חוואר ומעט טוף וולקני. הקרקעות בעיקר טרה רוסה על גבי הגיר והדולומיט ורנדזינות – חמות או בהירות על גבי הנארי, קירטון, החוואר והטוף. האקלים הינו ים-תיכוני מובהק – חורף גשום בן 5-6 חודשים בשנה וקיץ שחון וחס הנמשך 6-7 חודשים. כמות הגשם השנתית הממוצעת בתחנה של אוניברסיטת חיפה עומדת על כ-700 מ"מ/שנה. הטמפרטורה הממוצעת בחורף – 11.2°C ובקיץ 23.8°C. הלחות הממוצעת השנתית היא 71% והיא גבוהה יותר בקיץ מאשר בחורף. האידיוי הפוטנציאלי השנתי בכרמל הוא 1,500-1,600 מ"מ/שנה. הצומח הטבעי בכרמל הוא ברובו חורש (maquie)

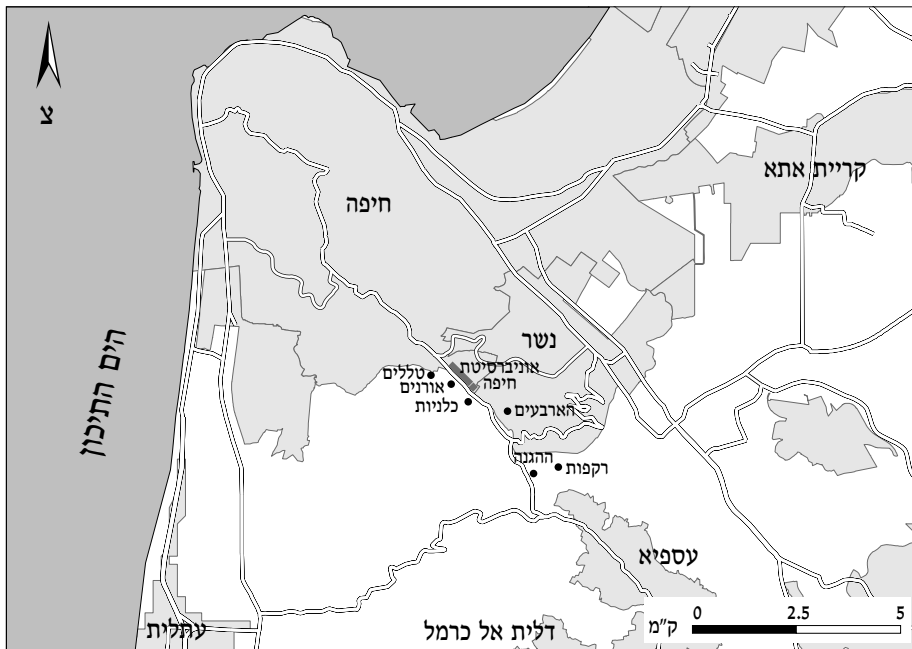
ויער ים-תיכוניים. היער הינו ברובו של אורן ירושלים טבעי המופיע בכרמל ומהווה תופעה ייחודית בנופי הצומח של הארץ. תת-היער הדליל כולל בעיקר את אלת המסטיק, הלוטם והקידה השעירה.

**אתרי המחקר**

למחקר נבחרו שישה חניונים הפעילים למעלה מעשר שנים ונתונים לעומס מבקרים רב יחסית. החניונים נמצאים בחורשות טבעיות של אורן ירושלים בכרמל הגבוה והם באחריות תפעולית של רשות הטבע והגנים אתרי המחקר נמצאים בחניוני הכרמל בקרבת אוניברסיטת חיפה ובגובה טופוגרפי של 470-520 מ' (אזור 1, טבלה 1).

**טבלה 1:** מיקום, שנת ההקמה, השטח (בדונם), המסלע, הקרקע והצומח האופייני לחניוני המחקר

החניון	נ.צ.	שנה	שטח	סלע	קרקע	צומח אופייני
כלניות (CMP1)	1520/2404	1970	19.8	קירטון קשה	רנדזינה חומה	אורן ירושלים ורחבי עלים
אורנים (CMP2)	1520/2404	1990	10.1	קירטון	רנדזינה חומה	אורן ירושלים ורחבי עלים
טללים (CMP3)	1516/2408	1970	17.7	קירטון קשה	רנדזינה חומה	אורן ירושלים ורחבי עלים
הארבעים (CMP4)	1529/2400	1990	26.6	קירטון קשה	רגוסול גירי	אורן ירושלים ורחבי עלים
ההגנה (CMP5)	1538/2388	1970	9.9	קירטון חווארי	רנדזינה חומה	אורן ירושלים ורחבי עלים
רקפות (CMP6)	1542/2389	1974	18.6	קירטון	רנדזינה חומה	אורן ירושלים וברוטיה ורחבי עלים



**איור 1:** מיקום החניונים על רכס הכרמל

## שיטות המחקר

לבדיקת השפעת המטיילים על הקרקע והצומח הוגדרו בכל חניון שלושה תת-אזורים:

1. **האזור הרמוס (דרוך):** אזור השולחנות המהווים את מרכז החניון ומוקדי הפעילות בו. באזור זה מרבית הקרקע חשופה ואין כמעט צמחים למעט עצי האורן חשופי שורשים.
2. **אזור הביניים:** בשולי האזור הרמוס, או "איי צומח" בתוך האזור המופרע ביותר.
3. **אזור ביקורת:** סמוך לחניון, אך מחוץ לתחום השפעתו.

## בדיקות הקרקע

1. בכל אופק קרקע נדגם ונבדק הרכבו הכימי והפיזיקלי במעבדת קרקע של משרד החקלאות. הבדיקות כללו: מרקם, מוליכות חשמלית (EC), רמת ה-pH (ערך הגבה), אחוז רוויה, חומר אורגני, חנקן ( $\text{NO}_3^-$ ), אמון ( $\text{NH}_4^+$ ), זרחה ( $\text{PO}_4^{+++}$ ), גיר כללי (קרבונט  $\text{CO}_3^+$ ).
2. דחיסות הקרקע וחדירותה נבדקו בשדה על ידי פנטרומטר; בדיקת הידרופוביות בוצעה בשדה על ידי מבחן הטיפה הבודדת ובדיקת לחות הקרקע נעשתה במעבדה באוניברסיטת חיפה.

## הצומח

סקר של מיני הצמחים נערך באביב, העונה בה פורחים מרבית המינים שניתנים להגדרה. בכל אחד מהחניונים בכל אחד משלושת האזורים סומן ריבוע דגימה בגודל 30 מ"ר והוגדרו בו מיני הצמחים. עושר המינים נבדק במרץ 2002 ובמרץ 2003. אחוז הכיסוי של מיני הצמחים העיקריים נבדק במרץ-אפריל 2002 לאורך 10 חתכים באורך של 30 מ' שנמתחו בצורה אקראית בכל חניון בכל אזור. במקום בו קיימים מספר קומות חופפות של צמחים, עשבוניים, שיחים ועצים עשוי אחוז הכיסוי להיות מעל 100%.

## חשיפת שורשים

חשיפת שורשים נחשבת כמדד חשוב לנזק הנגרם מהדריכה. לכן נסקרו העצים למידת חשיפת השורשים. עץ נחשב כחשוף שורשים כאשר אורך השורש החשוף מחוץ לקרקע היה מעל 15 ס"מ.

## מדדים אקו-פיזיולוגיים

בכל חניון נבחרו וסומנו עצי *אורן ירושלים* (*Pinus halepensis*) שהחלק התחתון של הנוף שלהם היה נמוך מ-5 מטר ובהם נבדקו המדדים הבאים: פוטנציאל מים טרום שחר, מדד הפלואורסנציה של הכלורופיל (FV) (FM) ושטח העלים היחסי (LAI).

## ניתוח הנתונים

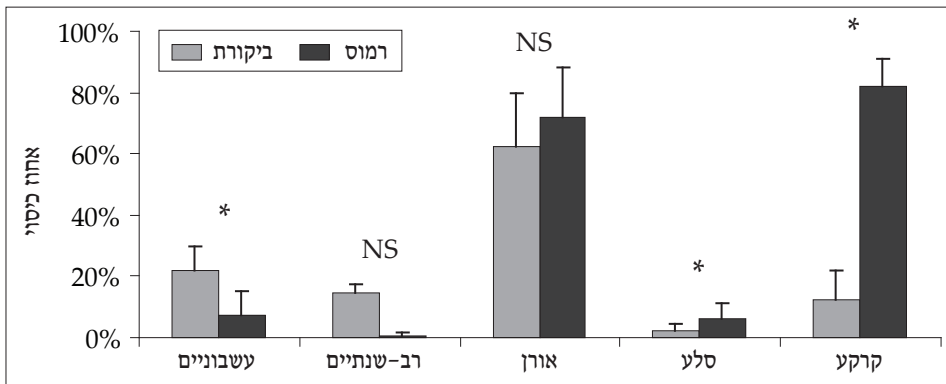
כדי לנתח את הקשר בין הגורמים הסביבתיים ומדדי המבקרים, הקרקע והצמחים, נעשתה אנליזה רב-משתנית באמצעות התכנה CANOCO-4 (Canonical Ordination for Community Ecology) שפותחה במקור לאנליזה של חברות צומח (Braak and Smilauer 1998). בעזרת שיטת אורדינציה מיוחדת

זו, המכונה Multivariate direct gradient analysis, המסתמכת בו זמנית על הנתונים של כל התצפיות והגורמים הסביבתיים, ניתן למצוא את הקשר בין תפוצה של מינים או נתונים ביוטיים אחרים לבין הסביבה. התוכנה מאפשרת גם את דירוג משתני הסביבה על פי מידת התרומה שלהם להסברת השונות שבנתונים הנבדקים ואת המובהקות הסטטיסטית שלהם. כמו כן בוחנת התכנה את מידת המובהקות הסטטיסטית של האורדינציה הסופית. משום שהנתונים הסביבתיים (חניונים ואזורים) אינם משתנים כמותיים אלא נומינליים, ומכיוון שהמשתנים הסביבתיים הכמותיים (תכונות הקרקע) מייצגים רק משתנה סביבתי קצר יחסית (נמוך מ-2 יחידות סטיית תקן על ציר האורדינציה) נעשה שימוש באופציה RDA (Redundancy analysis) של תכנת ה-CANOCO. ככל שאורך ההיטל של קו המייצג מדד מסויים על ציר האורדינציה האופקי (הראשי) וקרבתו גדולים יותר, כך גדלה השפעתו היחסית. כך גם לגבי ציר האורדינציה המשני (האנכי).

**תוצאות**

**אחוז כיסוי**

באזור הרמוס בלב החניון, היה אחוז הכיסוי של כל הצמחים הרב-שנתיים והחד-שנתיים נמוך יותר, אולם אחוז הקרקע החשופה היה גבוה יותר מאשר באזור הביקורת מחוץ להשפעת החניון. לעומת זאת לא נמצא הבדל באחוז הכיסוי של האורנים ושל הסלע החשוף בין האזורים (איור 2).



איור 2: אחוז הממוצע של קרקע חשופה, סלע חשוף ואחוז הכיסוי הצמחי באזור הרמוס והביקורת של כל החניונים. הקווים מעל העמודות מציינים סטיית תקן. \* מציינת הבדל מובהק, NS מציינת שאין הבדל מובהק על פי מבחן t.

**עושר המינים**

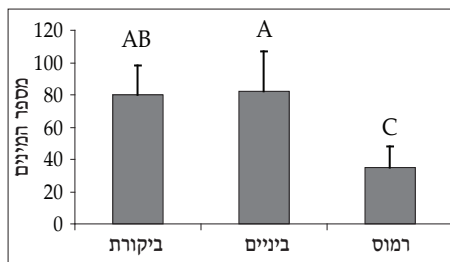
סקר הצמחייה נערך באביב 2002 וב-2003. עושר המינים המוצג בתוצאות הוא סך כל המינים שנמצאים בשתי העונות באזורים השונים בחניונים. עושר המינים הממוצע באזורים השונים מראה כי האזור הרמוס הוא הדל ביותר במינים, פחות ממחצית מאשר באזורי הביניים והביקורת שהם בעל עושר המינים הגבוה ביותר (איור 3). במבחן שונות חד-כיווני נמצאה השפעה מובהקת של האזור על עושר המינים ואחוז השונות המוסברת של המודל היא 55.6%. מכלל 247 המינים שנכללו במבחן רק 19 מינים, שהם 7.7%, הראו

קשר לאזור הרמוס. כל המינים שהראו קשר לאזור הרמוס למעט *אוזן יושלים*, הם עשבוניים, 13 מינים מאופיינים כמינים של צידי דרכים ומעוזבות ורק 5 אינם מאופיינים מקומות מופרעים.

#### הקשר בין מדדי הקרקע לבין החניונים והאזורים

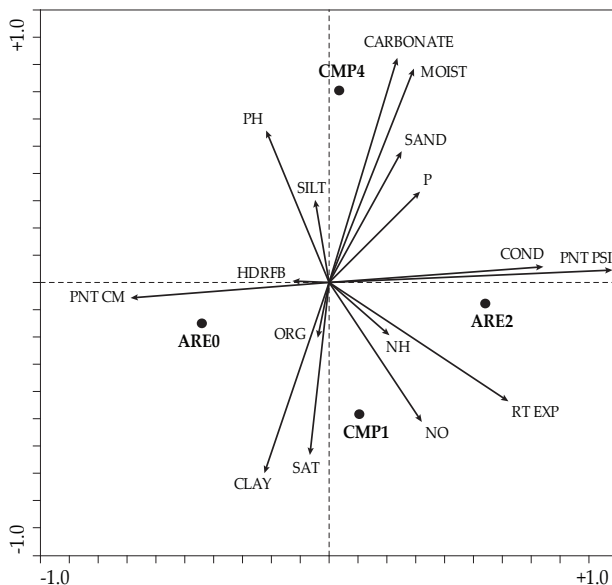
הקשר בין מדדי הקרקע כמשתנים תלויים והחניונים והאזורים כמשתנים בלתי-תלויים, המוגדרים כתנאי סביבה מוצגים בגרף האורדינציה (איור 4). מבין כל משתני הסביבה נכנסו באופן מובהק למבחן האזורים הרמוסים (ARE2), אזורי

הביקורת (ERE0), חניון הארבעים (CMP4) וחניון כלניות (CMP1). האזורים - ביקורת (ARE0) ורמוס (ARE2) - מהווים את המרכיבים עיקריים בציר האורדינציה הראשי (האופקי) משום שההיטל שלהם על הציר הוא הארוך ביותר. כלומר, הם המשפיעים העיקריים על מדדי הקרקע. ציר האורדינציה המשני (האנכי) מושפע בעיקר מההבדלים שבין החניונים - הארבעים (CMP4) וכלניות (CMP1) - המייצגים את הקיצוניים שבין החניונים.



איור 3: עושר המינים הממוצע (n=6) באזור הביקורת, הביניים ובאזור הרמוס בחניונים. הקו מעל העמודות מציין את סטיית התקן. עמודות עם אותיות זהות אינן נבדלות באופן מובהק (Tukey  $P > 0.05$ ).

אחוז הגיר (CARBONATE)  
אחוז החרסית (CLAY)  
מוליכות חשמלית (COND)  
הידרופוביות (HDRFB)  
אחוז הלחות בקרקע (MOIST)  
אמון (NH)  
חנקן (NO)  
אחוז החומר האורגני (ORG)  
זרחן (P)  
ערך הגבה (PH)  
חדירות (PNT CM)  
דחיסות (PNT PSI)  
חשיפת שורשים (RT EXP)  
אחוז החול (SAND)  
אחוז הסילט (SILT)  
אחוז המים ברוויה (SAT)

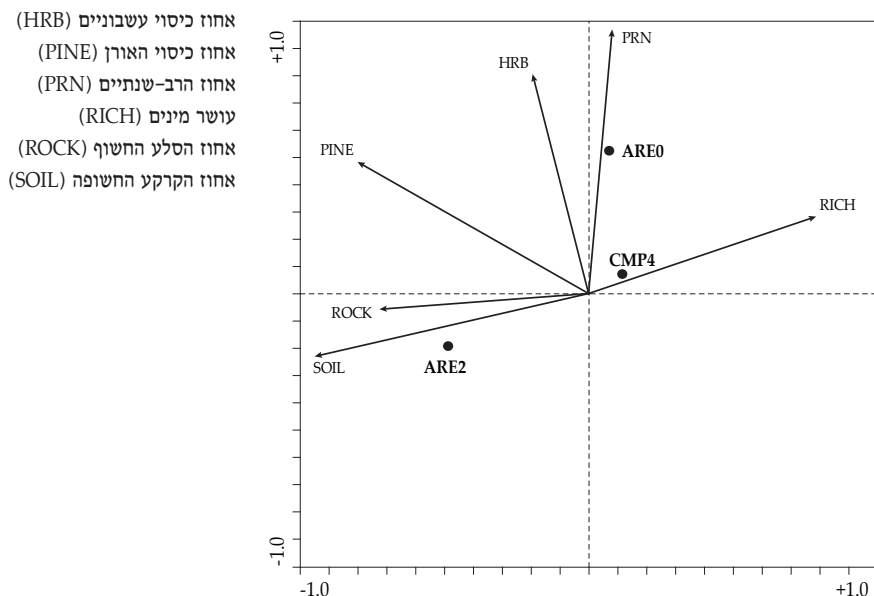


איור 4: אורדינציה (RDA, CANOCO) בין האזורים דרך (ARE2) וביקורת (ARE0) והחניונים כלניות (CMP1) וארבעים (CMP4) לבין משתני הקרקע. הציר הראשי, האופקי של האורדינציה נמצא מובהק (Eigenvalue 0.750,  $F=38.904$ ,  $P=0.005$ ), וכך גם כל האורדינציה ( $F=19.896$ ,  $P=0.005$ ). האורדינציה מסבירה 82% מהשונות של נתוני הקרקע ו-95% מהקשרים שבין נתוני הקרקע לנתוני החניונים והאזורים

דחיסות הקרקע (PNT PSI), המוליכות החשמלית שלה (COND) ואחוז העצים בעלי שורשים חשופים (RT EXP) קרובים למיקום של האזור הרמוס (ERE2) (איור 4), כלומר באזור הרמוס הקרקע דחוסה מאוד ובעלת מוליכות חשמלית גבוהה ואחוז העצים בעלי שורשים חשופים גבוה. חדירות הקרקע (PNT CM) קרובה באורדינציה למיקומו של אזור הביקורת (ERE0), כלומר באזורי הביקורת הקרקע בעלת דחיסות נמוכה ובעלת חדירות גבוהה. ריכוזי החנקן (NO), הזרחן (P) והאמון (NH) נמצאים כולם בצד הימני של גרף האורדינציה יחד עם האזור הרמוס (ERE2), כלומר ריכוזם גבוה יותר באזור הרמוס. כל שאר משתני הקרקע מושפעים יותר מהחניון ופחות מהאזורים בחניון. הקרקע בחניון כלניות (CMP1) היא חרסיתית עם אחוז מים ברוויה וריכוז חנקן גבוהים. לעומתה, הקרקע בחניון הארבעים מכילה הרבה גיר, אחוז הלחות החול והסילט גבוהים וגם רמת ה-pH גבוהה יותר (איור 4).

### הקשר בין מדדי הצומח בחניונים ובאזורי החניון השונים

הקשר בין מדדי הצומח כמשתנים תלויים המוגדרים כמינים, לבין החניונים והאזורים בחניון כמשתנים בלתי-תלויים המוגדרים כתנאי סביבה, מוצגים בגרף האורדינציה (איור 5). האזור הרמוס (ARE2), אזור הביקורת (ERE0) וחניון הארבעים (CMP4) הם משתני הסביבה היחידים שנכנסו באופן מובהק ( $P < 0.05$ ) לאנליזה. האזור הרמוס (ARE2) הוא המשפיע העיקרי על מדדי הצומח. ציר האורדינציה המשני (האנכי) מושפע בעיקר מאזור הביקורת (ERE0), חניון הארבעים (CMP4) נכנס אמנם לבדיקה אבל מיקומו הקרוב למוצא הצירים מעיד על כך שהשפעתו על שניהם קטנה (איור 5).



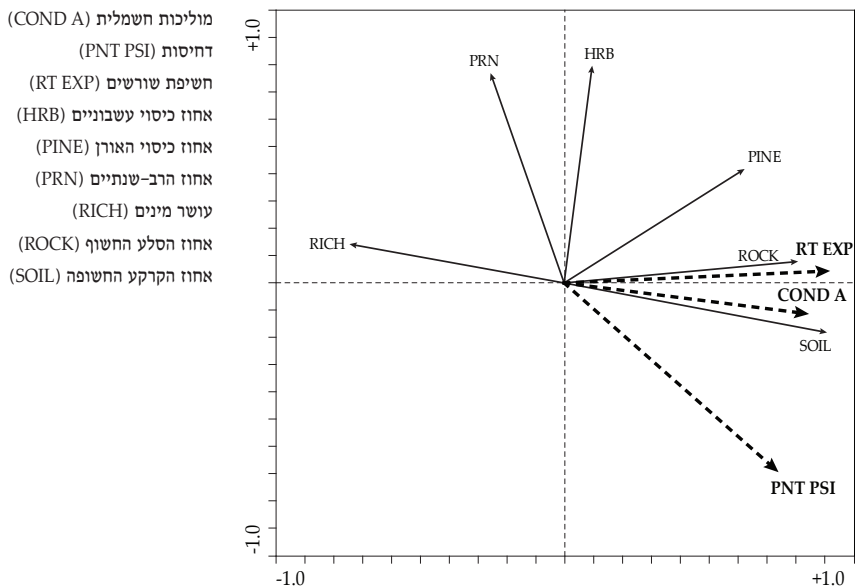
איור 5: אורדינציה (RDA, CANOCO) בין האזורים דרוך (ARE2) וביקורת (ERE0) וחניון הארבעים (CMP4), לבין משתני הקרקע והצומח. הציר הראשי (האופקי) של האורדינציה נמצא מובהק ( $F=33.347$ , Eigenvalue 0.704,  $P=0.005$ ), וכך גם כל האורדינציה ( $F=34.814$ ,  $P=0.005$ ). האורדינציה מסבירה 86% מהשונות של נתוני הצומח ו-97% מהקשרים שבין נתוני הצומח לנתוני החניונים והאזורים



אחוז הקרקע החשופה (SOIL) ואחוז הסלע החשוף (ROCK) ממוקמים סמוך לאזור הרמוס (ARE2), כלומר האזור הרמוס מאופיין באחוזים גבוהים של קרקע וסלע חשופים, ולעומת זאת עושר מיני הצמחים ממוקם בדיוק בכיוון ההפוך, כלומר הוא דל באזור זה. אחוז הכיסוי של הרב-שנתיים המעוצים (PRN) והעשבוניים (HRB) ממוקם סמוך לאזור הביקורת (ARE0) כלומר אזור זה מאופיין בכיסוי גבוה של צמחים רב-שנתיים ועשבוניים. אחוז הכיסוי של האורן (PINE) ממוקם בין שני הצירים ובין שני האזורים, לכן נראה שהוא אינו מושפע מאזורי החניון השונים וגם לחניונים השפעה דומה על אחוז כיסוי האורנים (איור 5).

### הקשר בין מדדי הצומח ומדדי הקרקע

הקשר בין מדדי הצומח כמשתנים תלויים המוגדרים כמינים, לבין מדדי קרקע כמשתנים בלתי תלויים המוגדרים כתנאי סביבה, מוצג בגרף האורדינציה (איור 6). מבין כל משתני הסביבה נכנסו באופן מובהק לאנליזה ( $P < 0.05$ ) רק חשיפת שורשים (RT EXP), מוליכות חשמלית (COND A), ודחיסות (PNT PSI). מבין משתני הקרקע (מסומנים בחצים עבים), המדדים החשובים הם חשיפת השורשים והמוליכות החשמלית והם מסבירים בצורה הטובה ביותר את משתני הצומח. דחיסות הקרקע היא הגורם המשפיע העיקרי על הציר האנכי של האורדינציה. סלע חשוף וקרקע חשופה, חשיפת שורשים ומוליכות חשמלית קשורים לעושר מינים נמוך. אחוז העשבוניים והרב-שנתיים מושפעים פחות ממדדי הקרקע. לעומת זאת, חשיפת שורשים ומוליכות חשמלית גבוהים קשורים לעושר מינים (RICH) נמוך שכן הוא ממוקם בכיוון ההפוך. כלומר עושר המינים יהיה נמוך במקום בו המוליכות החשמלית בקרקע גבוהה ושורשי האורנים חשופים. אחוז הכיסוי של העשבוניים ושל הרב-שנתיים מושפע פחות ממדדי הקרקע ויהיה גבוה בכל מקום בו תהיה הקרקע חדירה יותר (איור 6).

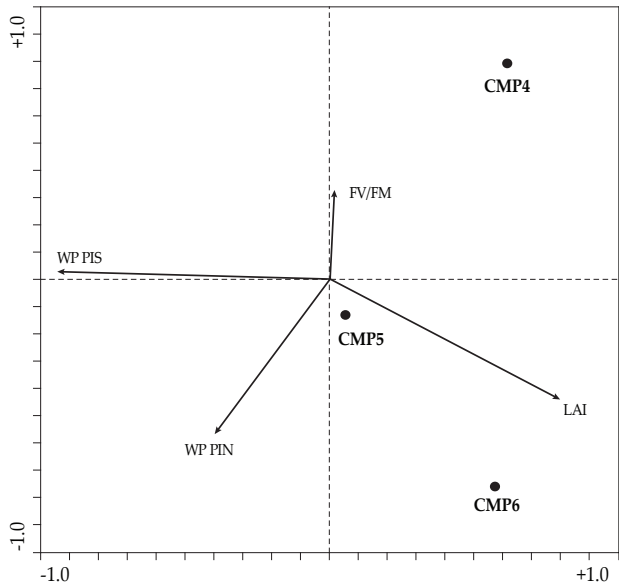


איור 6: אורדינציה (RDA, CANOCO) בין משתני הקרקע לבין מדדי הצומח. הציר הראשי (אופקי) של האורדינציה נמצא מובהק (Eigenvalue 0.612,  $F=22.11$ ,  $P=0.005$ ), וכך גם כל האורדינציה ( $F=12.778$ ,  $P=0.005$ ). האורדינציה מסבירה 72% מהשונות של נתוני הצומח ו-98% מהקשרים שבין נתוני הצומח לנתוני החניונים

### הקשר בין המדדים הפיזיולוגיים לבין החניונים והאזורים

הקשר בין המדדים הפיזיולוגיים כמשתנים תלויים מוגדרים כמינים, לבין החניונים והאזורים כמשתנים בלתי-תלויים המוגדרים כתנאי סביבה, מוצג בגרף האורדינציה (איור 7). מבין כל משתני הסביבה נכנסו באופן מובהק לבדיקה ( $P < 0.05$ ) רק חניון הארבעים (CMP4), ההגנה (CAMP5) וחניון הרקפות (CMP6) ולאזורי החניון לא היתה השפעה מובהקת על האורדינציה. החניונים הארבעים וההגנה מהווים מרכיב עיקרי בציר האורדינציה האופקי, והם המשפיעים העיקריים על המדדים הפיזיולוגיים. שני החניונים הללו משפיעים גם על ציר האורדינציה האנכי. חניון ההגנה (CMP5) נלקח אמנם בחשבון אבל מיקומו הקרוב למוצא הצירים מעיד על כך שהשפעתו על שניהם קטנה. היות ולניתוח נכנסו רק החניונים עצמם ולא האזורים בתוך חניון, נראה כי המדדים הפיזיולוגיים מושפעים מההבדלים בין החניונים ולא מהאזורים, כלומר אינם מושפעים מדריכת המטיילים (איור 7).

הפלורסנציה של הכלורופיל באורנים (FV/FM)  
 שטח העלים היחסי באורנים (LAI)  
 פוטנציאל מים באורנים (WP PIN)  
 פוטנציאל מים באלות מסטיק (WP PIS).

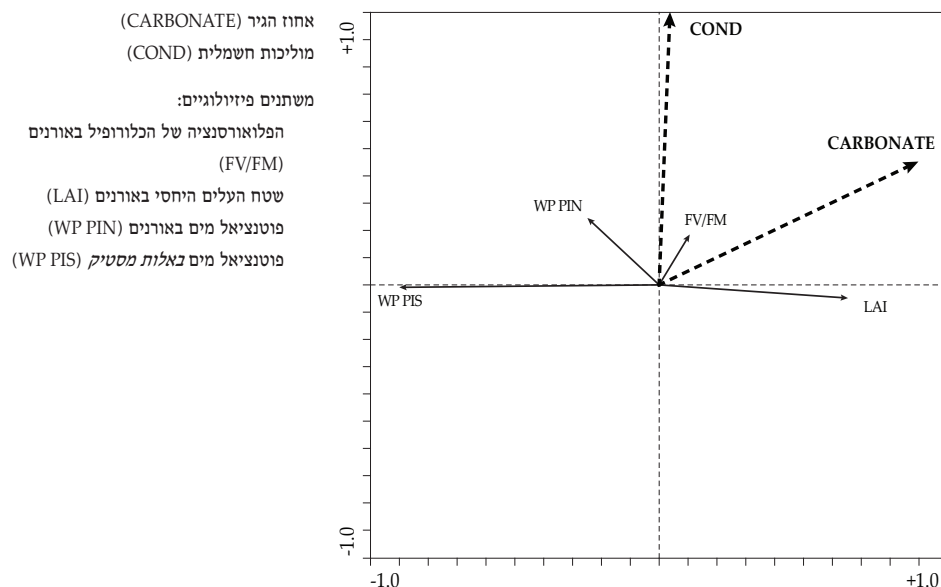


איור 7: אורדינציה (RDA, CANOCO) בין חניון הארבעים (CMP4), חניון ההגנה (CMP5) וחניון רקפות (CMP6) לבין המשתנים הפיזיולוגיים. הציר הראשי (אופקי) של האורדינציה נמצא מובהק (Eigenvalue 0.807,  $F=33.349$ ), הציר השני (אנכי) של האורדינציה נמצא מובהק ( $F=14.672$ ,  $P=0.005$ ), וכך גם כל האורדינציה ( $P=0.005$ ). האורדינציה מסבירה 84% מהשונות של נתוני המדדים הפיזיולוגיים ו-100% מהקשרים שבין הנתונים הפיזיולוגיים לבין נתוני החניונים.

### הקשר בין המדדים הפיזיולוגיים לבין מדדי הקרקע

הקשר בין המדדים הפיזיולוגיים כמשתנים תלויים, מוגדרים כמינים, לבין מדדי קרקע כמשתנים בלתי תלויים, מוגדרים כתנאי סביבה, מוצג בגרף האורדינציה (RDA, CANOCO) (איור 8). אחוז הרוויה (SAT), הגיר בקרקע (CARBONATE) והמוליכות החשמלית (COND) הם משתני הסביבה היחידים שנכנסו באופן מובהק ( $P < 0.05$ ) לציר האורדינציה. הגיר בקרקע (CARBONATE) הוא הגורם העיקרי בציר האורדינציה

האופקי והמוליכות החשמלית מהווה את המרכיב העיקרי בציר המשני. נמצא ששטח העלים היחסי של האורנים מושפע בעיקר מאחוז הגיר בקרקע. כמו כן יש נטייה לפוטנציאל המים טרום שחר להיות גבוה יותר בקרקע גירנית (שכן מדד זה מיוצג בערכים שליליים). דבר זה נכון עוד יותר לגבי שיחי *אלת המסטיק*: כלומר משק המים שלהם טוב יותר בקרקעות המכילות הרבה גיר חופשי. כמו כן, קיים קשר בין יעילות מנגנון ההטמעה של האורנים על פי מדד ה-FV/FM לבין הגיר הקרקע, שכן מדד זה נמצא בכיוון דומה כמו שטח העלים היחסי. לעומת זאת נראה כי למוליכות חשמלית גבוהה אין השפעה על המשתנים הפיזיולוגיים.



**איור 8:** אורדינציה (RDA, על פי תוכנת CANOCO) בין אחוז הגיר ומוליכות חשמלית לבין משתנים פיזיולוגיים, הציר הראשי (אופקי) של האורדינציה נמצא מובהק ( $Eigenvalue = 0.719, F=23.084, P=0.005$ ), וכך גם כל האורדינציה ( $F=11.942, P=0.005$ ). האורדינציה מסבירה 73% מהשונות של נתוני הצומח ו-100% מהקשרים שבין נתוני הצומח למדדי הקרקע.

## דיון

### הקרקע

תוצאות המחקר מראות כי הקרקע באזור הרמוס היא הדחוסה ביותר ובאזור הביקורת היא אינה דחוסה. באזור הרמוס נמצאה שכבה גירנית דחוסה ומרובדת בעובי של מילימטרים בודדים על גבי אופק A. לשם ההשוואה, ביפן נמצא כי קושי פני הקרקע באזורים הדרוכים היה פי 12 מאשר באזורי הביקורת (Bhuj) (and Ohsawa 1998). העלייה בדחיסות הקרקע היא תוצאה ישירה של הלחץ המכני שמפעילים המבקרים על הקרקע. Kuss (1986) טען כי ישנה השפעה רבה ללחץ חיצוני כתוצאה מדריכת מטיילים, ובחניונים מסוימים אף מכלי רכב. בעונת החורף, בה החרסיות בקרקע תופחות, פעילות מטיילים ונופשים בחניונים גורמת לקרקע נזק גדול בהרבה מאשר בעונה היבשה. בדומה למחקר הנוכחי, בחניוני מטיילים בעלי לחץ

מבקרים גבוה בגרנד-קניון בארה"ב, נמצא כי חדירות הקרקע, נמצאת ביחס הפוך לדחיסות ובאזורי הביקורת היתה גבוהה ביותר מפי שלושה מאשר באזור הרמוס (Cole 1986). הידוק הקרקע מתבטא בהגדלת הצפיפות הנפחית של הקרקע, בהפחתת כושר החדירה והזרימה של מים ואויר ובהגברת קשיות הקרקע המעכבת הצצת נבטים וצמיחת שורשים. ההידוק איננו מתרחש במידה שווה בכל נפח הקרקע, אלא בשכבה אופקית של פני הקרקע (רימון 1991). צביקל ואחרים (2001) מצאו כי כתוצאה מהדריכה נוצרת שכבת קרקע דחוסה והידרופובית.

דרגת המוליכות החשמלית בקרקע מצביעה על רמת המלחים המסיסים והיא גבוהה באזור הרמוס. כלומר, פעילויות המטיילים גורמות באופן ישיר להעלאת רמת המלחים המסיסים בקרקע אולם עדיין אין הקרקעות מלוחות.

ריכוז הזרחן החנקן והאמון הראו נטייה לרמות גבוהות באזור הרמוס כלומר, יש סימנים לכך שתוספת המינרלים הללו היא תוצאה של פעילות המבקרים בחניונים. שילוב כל המינרלים בא לידי ביטוי במוליכות החשמלית הגבוהה של הקרקע באזור הרמוס. העלייה בזרחן ובמינרלים חנקניים מוסברת על ידי פסולת והפרשות של המבקרים בחניונים. באזורים הדרוכים, לא מתאפשר לאמון להפוך לחנקה עקב חוסר אויר ורמות חמצן נמוכות (Kuss 1986).

באזור הרמוס רמת הגיר הכללי גדולה יותר עקב צמצום השטיפה לקרקע מחד, ומאידך כתוצאה מתוספת אבק שמקורו בשחיקה פיזית של הסלעים החשופים בחניון.

מקורו של החומר האורגני הוא חיצוני, מנשר עלים ובעלי חיים (להב ואחרים 1999), ולכן צפוי היה ריכוז להיות נמוך באזור הרמוס וגבוה יותר מחוץ לחניון. למרות זאת, לא נמצא במחקר הנוכחי קשר חזק בינו לבין האזורים השונים בניגוד לצפוי שכן באזור הרמוס הקרקע חשופה כתוצאה מפעילות המבקרים, וגירוף השטח על ידי רשות הטבע והגנים כחלק מהניקיון המבוצע בחניונים. Kuss (1986) מצא כי כתוצאה מהדריכה ישנה ירידה באחוז החומר האורגני בקרקע. גם ברמת הנדיב בקרקעות טרה רוסה נמצאה ירידה בחומר האורגני באזורים הדרוכים (צביקל ואחרים 2001).

הלחות בקרקע צפויה להיות גבוהה באזור הביקורת ונמוכה באזור הרמוס, כפי שמצא Cole (1986) באתרי מחנאות בגרנד-קניון שבארה"ב. לעומת זאת, התוצאות מראות שמיקום החניון השפיע על הלחות יותר מאשר האזור בחניון. גם בנחל תבור בקרקעות רנדזינה טופיות לא נמצאה ירידה באחוז הלחות בשבילים עקב המירקם החולי הגס של קרקעות אלה (הדר 2000).

### הצמח והצמחייה

כתוצאה ישירה מדריכת המטיילים, אחוז הקרקע החשופה באזור הרמוס הוא הגבוה ביותר ואחוז הכיסוי הצמחי באזור הביקורת מחוץ לחניון היה גבוה יותר מזה שבחניון עצמו. דריכה על ידי מטיילים גורמת לקרקע להיות דחוסה וקשה דבר המצמצם את אחוז הנביטה (רימון 1991; Alessa and Earnhart 2000). העשבונים הם הרגישים ביותר לדריכה, אפילו מועטה (Roovers et al. 2004; Ketchledg 1985). יתרה מזו, צמחים צעירים רגישים לדריכה וכתוצאה מכך אחוז הכיסוי של הצמחים העשבוניים והרב-שנתיים נמוך יותר באזור הרמוס מאשר באזור הביקורת והביניים. גם בנחל תבור נמצאה ירידה באחוז הכיסוי בשבילים

כתוצאה מהפרעה חוזרת ונשנית (הדר 2000). תוצאות דומות של ירידה באחוז הכיסוי כתוצאה מהפרעה חוזרת ונשנית במרכזי חניונים תוארה גם במקומות אחרים (Rossi et al. 2009; Hamberg et al. 2010; Kuss 1986; Cole 1995a)

במקום בו יש הרבה צמחים צפוי גם עושר המינים להיות גבוה. גם במחקר הנוכחי נמצא שהאזור הרמוס בחניונים, בעל שיעור כיסוי נמוך של הצמחיה (למעט אורנים) וגם עושר המינים היה דל. תופעה דומה של ירידה במספר המינים עם עלייה בקומפקטיות של הקרקע נמצאה גם במקומות אחרים (Kuss 1986). תופעה ידועה היא שבמקומות בהם החורש הים תיכוני יוצר כסות רציפה וצפופה מספר המינים בו יורד (שמידע 1985). שתי תופעות אלו יכולות להסביר את הממצאים שעושר המינים הגבוה נמצא דווקא באזור הביניים.

השפעת הדריכה אינה מצטמצמת לירידה באחוז הכיסוי ובעושר המינים באזור הרמוס של החניון, אלא גם משפיעה על צורות החיים ואופי המינים באזור זה. רק כ-10% מכלל המינים יכולים להיחשב כמאפיינים של האזור הרמוס. כל המינים האלו הם מינים עשבוניים ומרביתם חד-שנתיים. הנתונים והספרות מלמדים ש-72% מכלל המינים המאפיינים את האזור הרמוס הם מינים הידועים כמינים של צידי דרכים, מעזבות ומקומות מופרעים (פינברון-דותן ודנין 1991); מינים מטיפוס זה נפוצים בעיקר במקומות בהם ריכוזי הזרחן ובעיקר החנקן בקרקע גבוהים, כמו שנמצא באזור הרמוס. רק 28% מתוכם הם מינים המאפיינים את החורש הבלתי מופרע בכרמל. המינים החד-שנתיים פעילים במשך עונה קצרה יחסית וכנראה מצליחים להשלים את מחזור חייהם במקומות מוגנים מרגלי המבקרים כמו צמוד מאוד לעצים ולשיחי אלת המסטיק היוצרים "איים" ירוקים בלב האזור הרמוס. המינים הרב-שנתיים הם בעלי ניצן התחדשות צמוד לפני הקרקע וידועים כעמידים במיוחד לדריכה (Kuss 1986; Cole 1995a), כמו סיסנית הבולבוסין בה משתמשים גם כצמח "דשא" בארצות צפונית.

### מדדים אקו-פיזיולוגיים

כאמור, אחת הסיבות לקיום המחקר היו "תצפיות" שעצי אורן בחניונים ותיקים סובלים מעקה וחלקם מתים. התוצאות אכן הראו שעצי אורן שגדלו באזור הרמוס סבלו מעקת מים חזקה יותר בקיץ לעומת עצים שגדלו באזור הביקורת, אולם לא נמצאה השפעה של חשיפת השורשים על עקת מים. כמו כן שני המדדים הפיזיולוגיים האחרים, מידת הפלואורסנציה של הכלורופיל והשטח היחסי של העלים היו שונים בין החניונים השונים אך לא הראו הבדלים בין אזורי החניון השונים כלומר, לא נמצא קשר בין עקת המים של העצים ליעילות ההטמעה שלהם ולא לשטח העלים היחסי. יש לציין שבבדיקה לא נדגמו עצים שהיה נראה בעליל שמצבם גרוע וגם לא עצים גדולים מאוד שלא ניתן היה לקחת מהם ענפי דיגמה. לכן, יש צורך בהזירות רבה במסקנות. יש בחניונים עצים הסובלים ואף מתים אבל העצים הצעירים יותר באותו מקום, למרות פוטנציאל המים הנמוך באזור הרמוס בקיץ, אינם מראים סימני עקה הקשורים בהטמעה ואינם מאבדים את המחטים כתוצאה מיובש. יש כנראה גורם אחר להתיבשות של חלק מהעצים הבוגרים ויכולות להיות סיבות שונות כגון מחלה, מזיקים או זקנה.

### סיכום ומסקנות

השפעת לחץ המבקרים בחניון נבדקה על ידי השוואה בין אזורי הביקורת והאזור הרמוס בחניונים. באזור הרמוס, נמצאה השפעה על מרבית המדדים של מבנה הקרקע וההרכב המינרלי שלה, למעט אחוז החומר

האורגני בקרקע ואחוז המים ברוויה. דריכת מטיילים משפיעה באופן ישיר על הצמחים כך שבאזור הרמוס יש אחוז גבוה של קרקע חשופה ולכן אחוז כיסוי ועושר מינים נמוך וכולל צמחים שמרביתם עשבוניים חד-שנתיים הנפוצים במקומות מופרעים על ידי האדם. הדריכה השפיעה באופן שלילי גם על משק המים של עצי האורן, אולם לא נמצאה השפעה מובהקת על אחוז כיסוי העלים ועל הפלואורסנציה של הכלורופיל כמדד ליעילות ההטמעה. לסיכום, המבקרים בחניונים אכן פוגעים בקרקע ובצומח, אך לא כל המדדים שנבדקו יכולים להצביע על פגיעה זו.

## תודות

מחקר זה נתמך על ידי קרן דורותי והנק שוסהיים למחקר אקולוגי בכרמל, מלגה מקרן משפחת פרנקל, מלגה מקרן עמיתי קק"ל באוניברסיטת חיפה ומענק מחקר של רשות הטבע והגנים. תודתי ליובא גרטמן על העזרה בהגדרת מיני הצמחים, לד"ר גבי שילר תודה מיוחדת על עזרתו בתכנון החלק הממשקי, לעובדי רשות הטבע והגנים כרמל: נפתלי גדליהו, אלי, רפיק, סמי, אילן, נתן ושאר צוות כרמל, לאורלי חזן-לוי, רן לוי, טל לוי, צחי יובל, אילן פלטיין, מג'די פראג', עודד הראל, רחלי איבקר, אורן אופנהיים, עזרא כהן, כנרת אייזנברג, רז סלמור ומתנאל גבז, שנתנו כתף והפכו את מלאכת איסוף הנתונים למלאכה מהנה.

## מקורות

הדו, ח' 2000. *השפעת מטיילים ורכבי שטח על המערכת האקולוגית בשמורת נחל תבור*. עבודת גמר לקבלת התואר מוסמך, המחלקה לגאוגרפיה, אוניברסיטת בר-אילן.

להב, נ', מ' שנקר וי' חן. 1999. *יסודות מדע הקרקע, המחלקה למדעי הקרקע*. האוניברסיטה העברית, ירושלים.

מדמוני, ע', י' קפולניק, ר' אהרון, ע' בן-משה, ד' ברנד, א' שוורץ ונ' עצמון. 2003. בחינת אקוטיפים של אורן הגלעין לעמידות לעקת יובש בשיטה מהירה 1. מקורות טבעיים סביב אגן הים התיכון. *יער*, 3, 29-24.

פיינברון-דותן, נ' וא' דנין. 1981. *המגדיר לצמחי בר בארץ ישראל*. כנה, ירושלים.

צביקל, ש', פ' קותיאל וי' ז'לב. 2001. השפעת פעילות נופשים ברמת הנדיב על תכונות הקרקע. *אקולוגיה וסביבה*, 6, 273-284.

קורמן, א' 2000. *נופש ביערות הקק"ל היבטים של היצע וביקוש*. עבודת גמר לתואר מוסמך, החוג לגאוגרפיה ולימודי סביבה, אוניברסיטת חיפה.

קותיאל, פ', א' גלילי, ע' כץ וש' אפשטיין. 1998. ההשפעה של פעילות מבקרים על כיסוי הצומח בשבילים. *אקולוגיה וסביבה*, 4, 227-232.

רימון, ד' 1991. *פודיות הקרקע*. הוצאת המחבר, רמת השרון.

שמידע, א' 1985. עושר המינים והאבולוציה של הצמחים החד-שנתיים בחורש הים תיכוני. *לוחם*, 18, 57-68.

Alessa, L., and C. G. Earnhart. 2000. Effects of soil compaction on root and root hair morphology: implication for campsite rehabilitation. *USDA Forest Service Proceeding RMRS-P-15*, 5, 99-104.

Ashman, M. R., and G. Puri. 2001. *Essential Soil Science – A Clear and Concise Introduction to Soil Science*. Blackwell Science, UK.

- Bhujju, D. R., and M. Ohsawa. 1998. Effects of nature trails on ground vegetation and under story colonization of patchy remnant forest in an urban domain. *Biological Conservation*, 85, 123-135.
- Braak ter, C. J. F., and P. Šmilauer. 1998. *Reference Manual and User's Guide for CANOCO*. (V4), Microcomputer Power, Ithaca, NY.
- Cole, D. N. 1986. Recreational impact on backcountry campsites in Grand Canyon National Park, Arizona, USA. *Environmental Management*, 10, 651-659.
- Cole, D. N. 1987. Effect of three seasons of experimental trampling on five mountain forest communities and a grassland in Western Montana, USA. *Biological Conservation*, 40, 219-244.
- Cole, D. N. 1995a. Experimental trampling of vegetation: 1. Relationship between trampling intensity and vegetation response. *Journal of Applied Ecology*, 32(1), 203-214.
- Cole, D. N. 1995b. Experimental trampling of vegetation: 2. Predictors of resistance and resilience. *Journal of Applied Ecology*, 32, 215-224.
- Cole, D. N., and N. G. Bayfield. 1993. Recreational trampling of vegetation: standard experimental procedures. *Biological Conservation*, 63, 209-215.
- Figuroa, M. E., L. Fernandez-Baco, T. Luqe, and A. J. Davy. 1997. *Chlorophyll florescence, stress and survival in populations of Mediterranean grassland species*. Opulus Press Uppsala. Sweden.
- Hamberg, L., M. Malmivaara-Lamsa, S. Lehvavirta, R. B. O'Hara, and D. J. Kotze. 2010. Quantifying the effects of trampling and habitat edges on forest understory vegetation – a field experiment. *Journal of Environmental Management*, 91, 1811-1820.
- Jim, C. Y. 1987. Trampling impacts of recreationists on picnic sites in Hong Kong Country Park. *Environmental Conservation*, 14, 117-127.
- Ketchledge, E. H., R. E. Leonard, N. A. Richards, P. F. Craul, and A. R. Eschner. 1985. *Rehabilitation of alpine vegetation in the Adirondack Mountains of New York State*. Research Paper NE-553, USDA Forest Experiment Station, Broomall, PA
- Kuss, F. R. 1986. A review of major factors influencing plant responses to Recreation Impacts. *Environmental Management*, 10(5), 637-650.
- Kutiél, P., E. Eden, and Y. Zhevelev. 2000. Effect of experimental trampling and off-road motorcycle traffic on soil and vegetation of stabilized coastal dunes, Israel. *Environmental Conservation*, 27, 14-23.
- Leung, Y. F., and J. L. Marion. 1999. The influence of sampling interval on the accuracy of trail impact assessment. *Landscape and Urban Planning*, 43, 167-179.
- Lopez-Bermudez, F., A. Romero-Diaz, J. Matinez-Fernandez, and J. Matinez-Fernandez. 1998. Vegetation and soil erosion under a semi-arid Mediterranean climate: A case study from Murcia (Spain). *Geomorphology*, 24, 51-58.
- Marion, J. L., and D. N. Cole. 1996. Spatial and temporal variation on soil and vegetation impacts on campsites. *Ecological Applications*, 6(2), 520-530.

- Monz, C. A. 2002. The responses of tow arctic tundra plant communities to human trampling disturbance. *Journal of Environmental Management*, 64(2), 207-217.
- Monz, C.A., D. N. Cole, Y. F. Leung, and J. L. Marion. 2009. Sustaining visitors use in protected area: Future opportunities in recreation ecology research based on the USA experience. *Environment Management*, 45, 551-562.
- Roovers, P., K. Verheyen, M. Hermy, and H. Gulinck. 2004. Experimental trampling and vegetation recovery in some forest and heathland communities. *Applied Vegetation Science*, 7, 111-118.
- Rossi, G., G. Parolo, and T. Ulian. 2009. Human trampling as a threat factor for the conservation of peripheral plant population. *Plant Biosystems*, 147, 104-113.
- Striker, G. G., F. P. O. Mollard, A. A. Grimoldi, R. J. C. León, and P. Insausti. 2011. Trampling enhances the dominance of graminoids over forbs in flooded grassland mesocosms. *Applied Vegetation Science*, 14, 95-106.
- Yorks, T. P., N. E. West, R. J. Mueller, and S. D. Warren. 1997. Toleration of traffic by vegetation: life form conclusion and summery extracts from a comprehensive database. *Environment Management*, 21(1), 121-131.