

# ממחקר לממשק – שיחה עם משה שחק

גלעד אוסטרובסקי

אגף הייעור, קק"ל  
GiladO@kkl.org.il

עליו בהמשך. מאז אני עובד בשני התחומים במקביל: מצד אחד על התאוריה המדעית של מערכות צחיחות תומכות חיים, ומהצד השני על היישום המעשי לשיקום תפקודי של שטחים ממודברים עם קק"ל.

## תוכל לספר איך התחלת את המחקר, ולאילו תובנות

### הגעת?

כדי להבין מערכות אקולוגיות באזורים צחיחים יש להתבסס על שלוש מסגרות תאורטיות. התאוריה הראשונה נקראת **פעימה-עתודה**. ומתבססת על כך שבאזור צחיח לא יורד גשם ברציפות, אלא בפעימות. בהקשר זה יש לשאול כיצד פעימות הגשם הופכות לפעימות ולעתודות של לחות קרקע, ולאחר מכן כיצד פעימות לחות הקרקע הופכות לפעימות של ייצור ראשוני ושניוני. שאלה נוספת עוסקת בפעימות ובעתודות הקשורות למחזור היסודות, כלומר לתהליכי פירוק של נשר הצומח.

על סמך חקר אגני היקוות בנגב פיתחנו תאוריה נוספת שנקראת **מקור-מבלע**. מסגרת זו מתייחסת ליצירת כתמי קרקע מועשרים בלחות, הבולעים מי נגר. נמחיש זאת בדוגמה הבאה: אם הנגב היה כולו מישורי וכמות הגשם השנתית שיוורדת בו הייתה, נניח כמו בשדה בוקר, 90 מ"מ, הנגב היה מדבר שממה ללא צמחייה. צמחים לא היו יכולים לשרוד, כיוון שמי הגשם היו מתאדים מן הקרקע מייד לאחר חדירתם בגלל הקרינה החזקה. אבל המציאות שונה,

משה שחק נולד בישראל בשנת 1936 וגדל בתל אביב. בבית ספר התיכון למד בקיבוץ כפר מסריק, ולאחר מכן עבד שם כמורה וכמחנך. בשנת 1968 קיבל מלגה ללימודים בארה"ב ולמד שם לתואר שני. כשחזר לישראל בשנת 1969 עבר לגור במדרשת שדה בוקר, וחקר את האזור 40 שנה. הוא למד לדוקטורט באקולוגיה באוניברסיטה העברית בירושלים, ונשאר לחקור בנגב את הנושא המעניין אותו – כיצד מתקיימות מערכות תומכות בחיים בתנאים הקשים של המדבר. כיום הוא פרופ' אמריטוס באוניברסיטת בן-גוריון בנגב.

## איך הגעת לחקור את הנושא "מערכות תומכות חיים במדבר"?

זה היה הנושא שעניין אותי! הרי החיים ביבשה החלו במערכות מימיות, ולאט לאט התנחלו האורגניזמים ביבשה והגיעו עד לחזית הקשה ביותר: מערכות מדבריות מוגבלות במים. תהיתי כיצד במערכות יובשניות בנגב מתקיימת מערכת אקולוגית תומכת חיים. כעבור זמן, כשגיליתי את חוקיות המבנה והתפקוד הקשורים למערכת תומכת חיים במדבר, הבנתי שהמחקר המדעי הבסיסי והבנת התהליכים המקיימים מערכת אקולוגית בתנאי מגבלת מים, יכולים לסייע לקק"ל בתכנון ובביצוע של התערבות ממשקית. יצאתי קשר עם נחצה" (ד"ר מנחם זקס) שהיה בשעתו ראש אגף ייעור, וביצענו יחד את פרויקט הסוואניזציה, שארחיב

הסתבר שבאירועי גשם המקור למי נגר הם קרומי הקרקע הביולוגיים שנוצרים על ידי הציאנובקטריות. כדי להתפשט ולגדול הן צריכות להדביק את חלקיקי הקרקע ולהפוך אותם לקרום קרקע. התברר שהמבלעים באזורי קרקעות לס הם כתמי שיחים שצוברים תחתיהם אבק. האבק תורם להיווצרות תלוליות קרקע מתחת לחופות השיחים, שחוסמות את זרימת הנגר העילי ולמעשה "בולעות" אותו. "מהנדסי סביבה" הוא מושג נוסף שטבענו, שהפך למושג מרכזי באקולוגיה המודרנית. מהנדס סביבה מוגדר כמין ביולוגי היוצר, משנה או הורס באופן משמעותי את בית הגידול שבו הוא נמצא, ובעשותו כך, משנה את תפוצתם של אורגניזמים אחרים. למעשה אפשר לומר שבשטחי הלס המערכת האקולוגית מתפקדת בזכות שני מהנדסי הסביבה שמניתי: הציאנובקטריות המהנדסות קרומי קרקע המשמשים כמקור לנגר, והשיחים המהנדסים תלוליות המשמשות מבלע. ישנו מהנדס סביבה נוסף, ואתייחס אליו בהמשך.

#### איך נוצרת תלולית כזו, ותוך כמה זמן היא נוצרת?

לוקח לתלולית עפר כ-300 שנה עד שהיא יכולה לתפקד כמבלע מפותח. יכול להיות שיגדל שיח חדש תוך תקופה קצרה, אבל הוא לא יתפקד כמבלע. כדי שהשיח יתפקד כמבלע צריכה להיווצר תחתיו תלולית עפר. הנחנו שהתלולית מצטברת בעקבות שקיעת אבק המגיע בעזרת הרוח. ההנחה הראשונית הייתה שבשל מבנה השיח שקיעת אבק תחתיו תהיה גדולה יותר מאשר על קרומי הקרקע, והתברר שההנחה שגויה. שקיעת האבק שווה בשיחים ובקרומים. מסתבר שתהליך יצירת תלולית העפר הוא כדלהלן: האבק שוקע על גבי הקרקע והשיחים בעיקר בקיץ, ויוצר שכבת אבק שעובייה כמילימטר. מדוע לוקח לאבק זמן רב עד שהוא מצטבר כערמה? הדבר תלוי בעוצמת הגשם הראשון. אם הגשם הראשון בחורף חלש, הציאנובקטריות בקרומי הקרקע גדלות ומדביקות את האבק, והוא נשאר במקומו. אבל אם הגשם הראשון יורד בקצב מהיר, האבק נע עם הנגר העילי מהקרומים לשיחים. מתחת לחופת השיחים מצטבר נגר עלים. הנגר מאט את זרימת הנגר, ומתחילה שקיעה של אבק, שעם השנים יוצרת את תלולית העפר. במקרה של קרקעות לס הקרומים הם המקור של הנגר, והשיחים הם המבלעים שמהנדסים את הקרקע מתחתיהם ליצירת תלוליות.

#### האם תוכל להסביר מהו פרויקט הסוואניזציה?

לכל התהליך של יצירת מקורות ומבלעים בצפון הנגב בקרקעות לס יש משמעות ממשקית. אין ספק שצפון הנגב עבר תהליכי מדבור, כלומר ירידה בכוריות ובמגוון הביולוגי, עקב כריתת הצומח המעוצה השיחני ורעייה בלתי מבוקרת. כדי לשקם את האזור קיימות שתי אפשרויות. הראשונה,

ובשדה בוקר מתקיימת מערכת אקולוגית עשירה. מתעוררת השאלה מה התהליך שהופך שממה למערכת אקולוגית עשירה. המחקרים הראו שהמים מתרכזים בכתמי קרקע מוגבלים בין הסלעים. כתמי הקרקע האלה בולעים את מי הנגר, נוסף על מי הגשמים, ושם מתפתחים חיים.

התאוריה השלישית נקראת **פעימה-עקה** (press-pulse), כלומר המערכת פועלת על פעימות מים בתקופה קצרה, וחשופה לעקה במשך תקופה ארוכה. שוב נשאלת השאלה – איך המים נשמרים? והתשובה נמצאת בתאוריות של **פעימה-עתודה ומקור-מבלע**.

לאחר שזיהינו את שלוש התאוריות, ערכנו מחקרים במשך כעשרים שנה ופרסמנו מאמרים רבים בכתבי עת אקדמיים. כעת ניתן לומר שהתאוריות מבוססות וניתן ליישמן ממשקית.

#### איך המערכת הזו פועלת בנגב?

במחקר ארוך טווח באגן ההיקוות ברכס חלוקים, שערכת עם פרופ' אהרון יאיר מהאוניברסיטה העברית בירושלים, מצאנו שלמבנה הגאומורפולוגי יש חשיבות ביצירת המקורות והמבלעים. כאשר יש מדרגת סלע, היא מהווה מקור לנגר, וכתם הקרקע שנמצא תחתיה מהווה מבלע למי הגשמים ולמי הנגר. יש לכך יתרון עצום, כי כך נוצרים במדבר כתמים מועשרים במים. ליחס בין גודל הסלע לכתם הקרקע יש חשיבות גדולה. בניגוד לדעה המקובלת, ברוב אירועי הגשם בנגב יורדת כמות גשם קטנה. לכן אם שטח הסלע, שהוא המקור לנגר, גדול, ולידו יש כתם קרקע קטן, מתקיימת מערכת של מקור-מבלע המנצלת כל כמות קטנה של גשם. גם שני מ"מ גשם יכולים להעשיר בלחות את כתם הקרקע. מצאנו שברוב אירועי הגשם בנגב, המים לא זורמים מהמדרון עד לאפיק, אלא מחלחים לכתמי הקרקע סמוך לסלעים. אם כך, כיצד גדלים צמחים באפיק? מצאנו שזה עובד על אותו עיקרון של סלע כמקור וקרקע באפיק כמבלע. מסתבר שמחשופי הסלע הגדולים במעלה הערוץ הם המקור למי הנגר באפיק, ולא המדרונות. מחשוף הסלע מאפשר את קיום המערכת האקולוגית העשירה באפיקים. בעקבות הממצאים האלה הגדרנו את החוקיות הכללית של יחסי מקור ומבלע בהר הנגב, הטוענת שיחס השטח בין סלע לקרקע הוא הגורם המרכזי לקיום מערכות אקולוגיות. ככל שיחס זה גדול יותר, כתם הקרקע מועשר במים רבים יותר, והפוריות שלו עולה.

#### בנגב המערבי רוב הקרקעות הן קרקעות לס. האם

#### התאוריות תקפות גם לקרקעות האלה?

כדי לענות על השאלה הזו היינו צריכים לברר מה המקור לנגר, ומהו המבלע בקרקעות לס. במחקרים בפארק סירת שקד מצאנו שעל קרקעות הלס מתפתחים קרומי קרקע ביולוגיים על ידי ציאנובקטריות (כחוליות), המפרישות רב-סוכרים, שמלכדים את גרגרי הקרקע לקרום. בניסויים בשטח

לתת לשיחים להתחדש באופן טבעי, ואז התחדשות השיחים שיתפקדו כמבלע היא תהליך ארוך של מאות שנים; השנייה, ליצור מבלעים כגון ה"שיחים" שיוצרת קק"ל, שהם גומות מוארכות הנבנות לאורך קווי גובה וקוצרות את הנגר מהשטחים הטבעיים. נחצ'ה ואני באנו עם הרעיון שאם אנחנו רוצים להילחם במדבור בנגב, אנחנו צריכים להקים מערכות המבוססות על מקור טבעי (קרומי קרקע) ומבלעים מעשה ידי אדם. הואיל ובני האדם מסוגלים, כמהנדסי סביבה, לבנות מבלעים גדולים וחזקים, אפשר לשקם מערכות אקולוגיות ממודברות במהירות וליצור מערכות אקולוגיות חדשניות ומתפקדות באזורים מוגבלי מים, הכוללות מגוון עצים, שיחים ועשבונים, בדומה לסוואנה. שיתוף פעולה לביצוע הפרויקט החל בסוף שנות ה-70.

רעיון הסוואניזציה התפשט מעבר לגבולות ישראל, והזמינו אותי לסין, לצ'ילה ולמקומות נוספים כדי ללמוד את הרעיון לטעת עצים בשטחים ממדברים ליצירת מערכת אקולוגית דמוית סוואנה. גם בטבע ישנם מהנדסי סביבה היוצרים מבלעים על ידי גומות – הדורבנים.

#### מה מצאתם במחקר על הדורבנים כמהנדסי סביבה?

את תפקוד הדורבנים כמהנדסי סביבה חקרנו באגן ההיקוות ברכס חלוקים בהר הנגב. מדרונות האגן בנויים ממדרגות של מחשופי סלע יוצרי נגר ומכתמי קרקע בולעי הנגר שנמצאים מתחתיהם. לאורך המדרון רמת ההעשרה במים של כתמי הקרקע נקבעה על ידי היחס שבין שטח הסלע לשטח כתמי הקרקע, שגדלים בהם גאופיטים המשמשים מזון לדורבנים. כדי להיזון מגאופיטים על הדורבנים לחפור ולהוציא את הפקעת או הבצל מהקרקע. התוצאה ההנדסית היא יצירת גומות המתפקדות כמבלעים למים. בגומות אלה של חפירות הדורבנים "מתנחלים" צמחים שנהנים מרמת לחות קרקע גבוהה. לכן, חפירות הדורבנים הן איים של פוריות עם יצרנות ביולוגית גבוהה.

מבלי דעת, הנדוס מקור-מבלע של קק"ל הוא "הנדוס דורבני" של חפירת גומות המתפקדות כמבלעים לנגר. המבלעים משמשים לנטיעת עצים, ומגבירים את צמיחת השיחים והעשבונים. כיום אנו יודעים שגם היצורים בטבע וגם האדם יוצרים מערכות של מקור-מבלע כדי להעלות את הפוריות והמגוון של צמחים באזורים מוגבלי מים.

#### איך נוצרו כתמי הקרקע בהר הנגב?

זו שאלה חשובה, הואיל וכתמי הקרקע הם המבלעים למים המניעים את המערכת האקולוגית. בהר הנגב אין מספיק מים לגרום להתפוררות סלעים להיווצרות קרקע. מקור הקרקע הוא בשקיעת אבק והצטברותו לכתמי קרקע. בעקבות מחקרי רכס חלוקים הצלחנו לפענח את התהליכים יוצרי כתמי הקרקע. התהליך מזכיר את תהליך

#### האם להבנת המבנה והתפקוד של המערכות האקולוגיות

##### בנגב יש השלכות רחבות יותר?

כן! ברגע שאתה מבין כיצד מתפקדת המערכת האקולוגית, ועומדת לרשותך מסגרת עיונית המאחדת את המסגרות התאורטיות פעימה-עתודה, מקור-מבלע ופעימה-עקה, אפשר להציע דרכי ממשק המשתלבות עם החוקיות הטבעית של תפקוד המערכת האקולוגית. המסקנה העיקרית היא שכאשר המדע מפענח את תפקודי המערכת, ניתן לבצע שיקום תפקודי, כלומר להנדס את המערכת יחד עם מהנדסי הסביבה העיקריים – הציאנובוקטריות, השיחים והדורבנים. יעדי השיקום הם הפיכת מערכת ממדברת למערכת מתפקדת בעלת פוריות ומגוון גבוהים.

#### ומה קורה באזור בתנאים של שינוי האקלים?

שינוי האקלים מביא בעקבותיו תדירויות ועוצמות גדולות של בצורות בצירוף תדירות גבוהה יותר של גלי חום, אבל מדי פעם תישבר הבצורת, ויהיו גשמי ברכה שייצרו "עודפים" של מי גשמים. הפתרון הממשקי להתמודדות עם שינוי האקלים בהקשר הזה הוא הקמת מבלעים גדולים למי הנגר, שאפשר לאגור בהם עתודות מים בשנים גשומות, ובכך להבטיח את התקיימות המערכות האקולוגיות בעולם שנעשה יותר ויותר צחיח.

#### כיצד גיליתם את השפעת הבצורות על המערכת

##### האקולוגית?

כשהתחלנו את המחקר ירדו בפארק סיירת שקד כ-200



מראה כללי של תחנת המחקר בפארק סיירת שקד, אפריל 2023  
באדיבות eLTER H2020, אגף הייעור, קק"ל



לקיחת דגימות קרקע ונשר כחלק ממחקר שמבוצע בתחנה במטרה להבין את תפקיד הנשר בהתפתחות המערכת האקולוגית,  
אפריל 2023  
באדיבות eLTER H2020, אגף הייעור, קק"ל

ליוויין שהראו שהמערכת הטבעית קרסה, אולם מערכת עם מבלעים של הסוואניזציה לא קרסה. כלומר, אם מתכננים להתמודד עם שינוי אקלים המלווה באינטנסיביות של בצורות, צריך להקים את מערכת המבלעים כנגד קריסת המערכת. קריסה של מערכת אקולוגית פירושה שחל בה שינוי דרסטי במבנה ובתפקוד. משק המים, מארג המזון, מערכת הסחף, המבנה הנוכחי ותפקודו – כולם משתנים.

### איך הדבר מתבטא במערכת האקולוגית של הלס?

במקרה שלנו במערכת האקולוגית של הלס, קריסת המערכת השיחית גרמה לשינויים במערכת בשני מסלולים: מסלול המדבור של הפיכה למערכת קרומית עם פוריות ומגוון נמוכים במדרונות, שארחיב עליה בהמשך, או מסלול של הפיכת המערכת לעשבונית. כאשר המעבר הוא למערכת עשבונית, הייצור הראשוני והמגוון הביולוגי עדיין גבוהים. יתרון נוסף הוא שהעשבוניים עמידים יותר ליובש משיחים. החיסרון של השיחים הוא שהם רב-שנתיים, וכאשר יש קיץ ארוך ובצורת, הם זקוקים למבלע גדול מאוד של מים כדי לשרוד. לכן, מבחינת עצים ושיחים במדבר, כלומר צמחים מעוצים, יש חשיבות הישרדותית לשורשים עמוקים, של מטר אחד לפחות, שיגיעו לעתודות המים בקרקע.

התחדשות שיחים במדבר היא תהליך שעשוי לארוך עשרות ומאות שנים. צמח רב-שנתי מפיץ את הזרע שלו ונובט עם בוא הגשם. אולם אם לא יורדים מספיק גשמים שיוצרים עתודות מי קרקע, לאחר הנביטה הנבט לא יצליח לשרוד בקיץ הארוך, וימות בשל מחסור בעתודות מים. בניגוד לכך, העשבוניים, שהם חד-שנתיים, מתחדשים בקלות מעתודות הזרעים בעונת הגשמים. אם יורדים גשמים מועטים, הזרע החד-שנתי ינבוט, יגדל מעט ויגיע לפריחה ולעשיית זרעים, שיבטיחו את קיומו כעתודה לקראת עונת הגשמים הבאה. אם ירד גשם רב, העשבונני יגדל בהתאם ויפיק זרעים רבים. בשני המקרים של קיצוניות בכמויות הגשם יהיו זרעים שיופצו וימתו בעונת היובש בקרקע לעונת הגשמים הבאה. מי בכל זאת יכול לזרז את התחדשות השיחים במדבר? הדורבנים, כמהנדסי סביבה. אם דורבן חופר גומה, וזרע של שיח נופל לתוכה, יש לזרע עתודות של מים להתבססות. אולם בשל האופן האקראי שזרע מגיע בו לגומה של דורבן, תהליך ההתחדשות עשוי לקחת שנים רבות.

### אמרת שיכולה להתרחש קריסה של המערכת האקולוגית השיחית, אולם בסופו של דבר העשבוניים יפצו את המערכת על ידי יצירת ביומסה גבוהה ומגוון ביולוגי, תוכל להסביר?

התמותה של השיחים והקריסה של מבלעי התולוליות שהונדסו, גורמת בטווח קצר (של כשמונה שנים) להשתלטות קרומי קרקע ביולוגיים ובטווח ארוך יותר ליציאה מהקריסה

מ"מ גשם בשנה, כיום יורדים בו כ-150 מ"מ. יש ירידה גדולה בכמות המשקעים. נוסף על הירידה ארוכת הטווח בכמות המשקעים, החל משנת 2003 היה רצף של חמש שנות בצורת. בשנת 2008, לאחר שנות הבצורת, באתי לתחנת LTER סירת שקד וצפיתי באגן היקוות שלא ניטעו בו עצים, והמערכת האקולוגית השיחית תפקדה בהתאם לחוקים שצוינו לעיל. הבחנתי בתופעה של תמותה רבה של שיחים. במקום שיחים ירוקים שהיו מפוזרים בשטח שנים רבות, ראיתי כתמים לבנים. כל שיח מת השאיר חותם של גודלו בצורת כתם לבן. מסתבר שהכתמים הלבנים הם חלזונות שחיו על גבי השיחים שמתו. כאשר החלזונות מתים, קונכייתם הלבנה נופלת על הקרקע מתחת לחופת השיח. במשך השנים מצטברות הקונכיות לכתם המותאם לגודלו של השיח שחיו עליו. לכן, ברגע שהשיח מת ניתן לדעת בדיוק את מיקומו ואת גודל ההיטל שלו על הקרקע. צילמנו ממוטס את התופעה הרחבה של תמותת השיחים וחותרים הקונכיות, וניתחנו אותה. הניתוח הביא אותנו לתובנה שאפילו שיח מדבר העמידים ליובש עשויים להיכחד, אם יתקיימו התחזיות של גידול בתדירות הבצורות בשל שינוי האקלים. מצאנו שכאשר יחול שינוי אקלים שיתבטא בעוצמת הבצורות, יש סיכוי לתמותה של שיחים.

### האם אתם יכולים לחזות אילו שינויים יתרחשו במערכת האקולוגית עם שינוי האקלים?

שאלנו, מהם השינויים שיחולו במבנה ובתפקוד של אגני היקוות בנגב אם יתגשמו תחזיות שינוי האקלים בנושא הבצורות, וחקרנו את העניין במערכת האקולוגית באגן היקוות של סירת שקד. הנחנו שתמותת השיחים תביא להתפשטות קרומי קרקע הביולוגיים שייצרו יותר נגר במדרונות שיגיע לאפיקים, דבר שיביא בהכרח לשינוי ביחסי חלוקת מי הגשמים בין המדרון לאפיק, והשערותנו אומתה. בדקנו בסיוע הידרולוגים את זרימת המים באפיק, והעמדנו תחנה הידרולוגית לניטור זרימת המים באפיק במשך 15 שנה מתחילת המחקר. כאשר המערכת האקולוגית במדרון הייתה מערכת שיחית, לא נרשמה זרימה באפיק. אולם 15 שנים לאחר התמותה הנרחבת של השיחים החלה זרימת מים באפיק. מה השתנה? הבצורות גרמו לתמותת השיחים ולהרס התולוליות שמתחתיהם, שהיוו מבלע לנגר. כאשר נהרסו המבלעים, החלה זרימה מהמדרון לערוץ לאחר אירועי גשם.

כשיש עקה בשטח טבעי, כלומר כשיש תדירות גבוהה של בצורות וגלי חום, המביאה לתמותת שיחים, כל האגן היקוות מתחיל להתנהג בצורה שונה מבחינת משק המים. שינוי במשק המים מביא בעקבותיו שינוי במבנה ובתפקוד של המערכת האקולוגית. השטח הפך ממערכת אקולוגית שיחית למערכת אקולוגית עשבונית, ובשלב הביניים השטח היה מכוסה בקרומי קרקע ביולוגיים. התהליך תועד בצילומי

מהמדרונות לאפיקים. התוצאה תהיה ירידה בפוריות ובמגוון הביולוגי של המדרונות, ועלייה שלהם באפיקים. לא ברור אם הפעילות הביולוגית באפיק תפצה על האובדן במדרון.

ב. המדרון ישתקם למערכת עשבונית בעזרת החומר האורגני והנשר. התוצאה תהיה החלפת חברת הצומח, שכנראה תביא לשיקום מלא של המערכת האקולוגית. מערכת הסוואניזציה יכולה אף היא לנוע בשני מסלולים:

א. תמותת העצים, הואיל והמבלעים מעשה ידי אדם אינם גדולים דיים להשאיר עתודות מים לתקופות בצורת ארוכה.

ב. התערבות ממשקית לקיימות המערכת על ידי הגדלת המבלעים להבטחת עתודות מי קרקע לתקופות ארוכות של יובש.

### לנוכח המסקנות הללו, כיצד ניתן לחולל שיקום תפקודי של מערכות שייפגעו מבצורות חמורות בנגב?

לדעתי יש להבחין בין הר הנגב הסלעי לבין צפון הנגב עם קרקעות הלס. אם תהיה תמותת שיחים רחבה בהר הנגב, עקב בצורות, וכמות הגשמים הממוצעת תקטן בד בבד עם עלייה בעוצמות אירועי הגשם, תחול זרימת מי נגר גבוהה מהמדרונות לאפיקים. הדרך היחידה לשקם את הר הנגב לאחר קריסה של מערכות אקולוגיות היא להשלים עם הירידה בפוריות ובמגוון הביולוגי במדרונות ולהתרכז באפיקים. המשמעות השיקומית היא לבנות טרסות באפיקי הנחלים. הטרסות במשטר של זרימות מהמדרונות יהוו מבלע למי הנגר עם עתודות מים בקרקע, ויתרמו לפיתוח מערכות אקולוגיות עשירות שיפצו על הדרדרון של המערכות במדרונות. המערכות האקולוגיות הפוריות בטרסות ישמשו מקור מזון חלופי לבעלי חיים בטבע ולבעלי חיים מבויתים.

במערכות הלס קיימות שתי אפשרויות להתמודדות עם שינוי האקלים על ידי שיקום תפקודי. א. לבנות מבלעים גדולים יותר במדרונות. ב. לבנות טרסות באפיקים. שני הפתרונות פשוטים מאוד. כאן יש לברר מהי הדרך הטובה מבין השתיים. אם יוצרים מבלעים במדרונות, פחות מי נגר יגיעו לאפיקים, והטרסות עלולות לא לתפקד. בנושא זה חשוב לבצע מחקרים כדי לברר ברמת אגן ההיקוות מהי הדרך הנכונה לשיקום תפקודי בתנאי אקלים קיצוניים.

### האם החוקיות של תגובת מערכות אקולוגיות כאשר האזור נעשה צחיח יותר תקפה גם באקלים ים תיכוני ובאקלים צחיח קיצוני ברמת משקעים נמוכה מאוד?

בישראל כל המערכות האקולוגיות מוגבלות מים. בעבר היו מחלקים את ישראל לפי חברות צומח: ים תיכוני, ערבה, מדבר צחיח; כלומר השתמשו בתצורת הצומח כאינדיקטור

על ידי צימוח של עשבוניים על המדרון. קריסת תולדות המבלע נובעת מתמותת השיח שהגן על התולדות מסחף על ידי חופתו. כאשר השיח מת, התולדות נהרסת מאנגריית הגשמים, והנגר העילי סוחף את הקרקע של התולדות לערוץ. בשלב הראשון יתפתח קרום קרקע ביולוגי במקום תולדות השיח. התוצאה תהיה דליפת נגר מהמדרון והתנקזות המים באפיק. אם המערכת תישאר בשלב זה, כאשר יתרחש שינוי אקלים תהיה ירידה בפוריות ובמגוון במדרון, שתפוצה על ידי עלייה בפוריות ובמגוון של האפיק. אולם יש אפשרות לתרחיש נוסף, והוא שהעשבוניים ידחקו את קרומי הקרקע ויפצו על קריסת המערכת השיחית.

### מהו המנגנון המסביר את הופעת העשבוניים?

מתחת לשיחים הצטברו חומר אורגני ונשר רב שנשאר על גבי התולדות לאחר מות השיח. הגשם והנגר מפזרים את החומר האורגני בצורת פסים לרוחב המדרון. פסי החומר האורגני והנשר מכסים את קרומי הקרקע הביולוגיים. הציאנובקטריות, המרכיב הביולוגי המרכזי של קרומי הקרקע, זקוקות לאור לביצוע פוטוסינתיזה כדי לשרוד, ולכן כיסוי קרומי הקרקע בחומר אורגני ובנשר גורם לתמותה שלהן. התוצאה היא שקרום הקרקע, שמונע התבססות עשבוניים, מתפורר ומאפשר התנחלות עשבוניים. זרעים של עשבוניים, שהגיעו מעשבוניים במערכת השיחית וגדלו על גבי התולדות, מופצים במדרון. הזרעים שנתקלים בפסי החומר האורגני השומר על רטיבות נובטים, גדלים ומייצרים זרעים, ונשר העלים שלהם מאפשר לעשבוניים להמשיך ולפורר את קרומי הקרקע, ולהפוך את המערכת הקרומית הממודברת למערכת עשבונית.

רק לאחר שגילינו את תהליך הפיכתה של מערכת קרומית לעשבונית, הבנו את החשיבות העצומה של החומר האורגני והנשר לשיקום מערכות אקולוגיות בנגב. כיום אנחנו מבינים שגם בשטחי הסוואניזציה של קק"ל יש להתחשב בחומר האורגני ובנשר בתהליכי השיקום. **ניח שבשל החורבן בעקבות המלחמה יתכנסו שטחי הנגב המערבי בקרומים. אם רוצים לשקם למערכות הכוללות עשבוניים, צריך להביא חומר אורגני לפזר על הקרומים, וממשק החומר האורגני יוביל להתחדשות העשבוניים.** עדיין לא חקרנו את המשמעות של החומר האורגני, שנוצר על ידי העצים, לשיקום שטחים ממודברים. לפי דעתי, זה נושא חשוב מאוד

### מהן המסקנות?

שינוי אקלים דרסטי מבחינת עוצמה ורצף של בצורות יביא לתמותת מעוצים (שיחים ועצים). בעקבות תמותת המעוצים המערכת הטבעית עשויה לנוע במספר מסלולים:

א. המדרון ימודבר ויכוסה בקרומי קרקע ביולוגיים. במקרה זה כמיות עצומות של מי נגר וסחף קרקע יזרמו

## אתה בוודאי זוכר, שהייתה ביקורת כנגד קק"ל על חלק מפעולות הייעור שעשתה בנגב. כיצד אתה, כאיש מדע, תופס את מקומך בוויכוח הציבורי, שבמהותו הוא מעבר למדע?

אני יכול לספר לך שתבעו את קק"ל בבג"ץ, בראשות הנשיאה חיות, על השיקום התפקודי בנגב. לדיון בנושא ביקשו ממני לכתוב חוות דעת. את חוות הדעת אני מרחיב כעת למאמר מדעי שעיקרו יחסי אדם-טבע במאה ה-21. במאמר אני מציין שיש להביא בחשבון ביחסי אדם-טבע שאנחנו נמצאים בתקופה שנקראת אנתרופוקן. בתקופה זו האדם מעורב ברוב המערכות האקולוגיות על פני כדור הארץ, בניגוד לתקופות קודמות, כאשר היה חלק מהמערכת האקולוגית עצמה.

מבחינה היסטורית לפני המהפכה החקלאית, לפני כ-15 אלף שנה, כל המערכות האקולוגיות התארגנו מעצמן ויצרו מערכת אקולוגית מתפקדת. בתקופה זו האדם היה כמו הציפור – מלקט מזון, וכמו האריה – צייד.

ברור לכולם שבהווה הביוספירה שונה. יש כיום מעט מאוד מערכות אקולוגיות שמתארגנות מעצמן, מערכות שנקראות "טבע". על רוב המערכות האקולוגיות האדם כופה את צורת ההתארגנות ואת התפקוד. במונחים מדעיים התופעה מוגדרת כארגון מוכתב (imposed organization).

בפרויקט הסוואניזציה בנגב, למשל, אנחנו בהתחלה כופים על המערכת האקולוגית את המבלעים מעשה ידי אדם. אולם בהמשך היא מתארגנת מעצמה על ידי השיחים העשבונים ובעלי החיים שמתנחלים בה. רוב המערכות האקולוגיות על פני כדור הארץ הן כיום מערכות שיש עליהן 'כפייה' מבנית ותפקודית של האדם. לפיכך, כיום מערכת אקולוגית טבעית כמעט ואינה קיימת. בשל ההיסטוריה הארוכה של השפעת האדם באזור ישראל – בני האדם כרתו, שרפו, ורעו – כל המערכות האקולוגיות בישראל הן תוצאה של ארגון עצמי וארגון מוכתב על ידי האדם.

כאשר רשות הטבע והגנים מאפשרת לחלק מהמערכות להתארגן בעצמן מחדש, היא יוצרת שמורות טבע. אבל גם כאן יש החלטה אנושית לכפות על הטבע להתארגן בעצמו, לאחר שהיה תחת כפיית אדם שנים רבות. יש מי שמכנה מערכות כאלה מערכות אקולוגיות חדשניות (novel ecosystems), כלומר מערכות שהתארגנו בעצמן לאחר התערבות האדם. אני חושב שהסוואניזציה בנגב היא דוגמה למערכת אקולוגית חדשנית כזו. האדם יכול להחליט לגבי צורת הארגון והתפקוד של המערכות האקולוגיות שבסביבתו. הוא יכול להחליט שהוא רוצה בסביבתו מערכות שמתארגנות מעצמן, אבל בכל מקרה הארגון לא יהיה מה שהיה פעם, כי האדם השפיע עליהן בעבר. למשל, במערכות של יער רחב עלים בארצות הברית, באו החלוצים, כרתו את היערות, והפכו אותם לשטחי מרעה. כשהתגלה המערב, נתנו לעצים לחזור ולגדול ולמערכת להתארגן בעצמה, אבל

למובילות המערכת האקולוגית למים. מאחר ששינוי האקלים פירושו שינוי במשטר אספקת המים למערכת האקולוגית, אפשר, להבנתנו, למיין את המערכות האקולוגיות לפי תלותן במקור המים. בהתאם לכך, חילקנו את ישראל לשלוש מערכות עיקריות:

א. **מערכות תלויות גשם**, שמתפקדות מגשם ישיר בלבד, ומובילות על ידי פעימות הגשם, כמו יער ביריה בצפון; ב. **מערכות תלויות נגר**, שמתפקדות על ידי פעימות גשם ונגר, ומובילות על ידי קשרי מקור ומבלע ביניהן, כמו פארק סירת שקד;

ג. **מערכות תלויות שיטפונות**, שמתפקדות על ידי פעימות של שיטפונות, ומובילות על ידי קשרי מקור ומבלע של גשם ונגר, כגון שיטים באפיק נחל גוונים במכתש רמון.

שינוי האקלים יכול לגרום לתזוזה מרחבית של המערכות הללו, בייחוד באזורי הגבול בין המערכות. למשל, בגלל עלייה בתדירות ובעוצמה של בצורות ישתנו חלק מהמערכות שהיו תלויות גשם למערכות תלויות נגר, ובמקרה זה יש לשנות את ממשק היערות בהתאם. אם מתכוננים להתמודדות עם שינוי האקלים, אנשי ממשק צריכים לשים לב לתזוזה המרחבית של מקור המים ככוח המניע והמגביל את המבנה והתפקוד של המערכת האקולוגית, הואיל ותחזית המודלים האקלימיים היא שכל האזורים מוגבלי המים ילכו וייעשו יבשים יותר. תהליך ההתמודדות עם שינוי האקלים בישראל דורש ראשית להגדיר את מיקומה של המערכת על מפל התלות בגשם, בנגר או בשיטפונות. אם המערכת תלויה גשם, יש להעריך אם כמות הגשם החזויה והתבנית שלה מספיקות כדי להחזיק אותה. אם כן, אין צורך לעשות שום דבר. לעומת זאת, אם היא עשויה לעבור ממערכת תלויה גשם למערכת תלויה נגר, צריך להתייחס אליה אחרת, כמערכת של מקור-מבלע. אם מערכת תלויה נגר עשויה להפוך למערכת תלויה שיטפונות, צריך לשנות את ההתייחסות ולעבור מממשק מדרוני לממשק אפיקי.

## האם שינוי האקלים והתמעטות המשקעים יכולים לגרום

### לכך שהסביבה לא תתמוך בהתפתחות עצים?

כן, אבל ניתן להתגבר על כך ממשקית על ידי הגדרת המערכת בהתאם לתלותה בזרימת המים. למשל, דרומית לשדה בוקר, שם יש מערכת תלויה נגר, גם אם נרצה לשתול עצים בתנאים של בצורות קשות, הם לא ישרדו במדרונות, אבל בהחלט ישרדו בערוץ עם ממשק טרסות. כדי לבצע את פעולות הממשק צריך לראות היכן נמצא האגן, איך הוא בנוי, ואת עוצמת המקור והמבלע. כיום קל מאוד לקבל את הנתונים על ידי צילום מרחפנים. החיבור בין הטכנולוגיה המודרנית ותורות מדעיות לגבי מבנה ותפקוד של אזורים מוגבלי מים, לבין הידע שצברנו, יכול לעזור לממשק מושכל, לפי דעתי, גם בחשיבה לטווח ארוך הנוגעת לטיפול במערכות אקולוגיות שחייבות להתמודד עם שינוי האקלים.

כלל האורגניזמים ותפקוד המערכת האקולוגית, התחזק והופץ המושג מגוון ביולוגי. לאקולוגים הייתה הצלחה גדולה בהטמעה של המושג הזה ושל הקשר החיובי וההכרחי בין המגוון הביולוגי לבין תפקודי המערכת האקולוגית. הם העלו את המודעות לכך שיש לשמור על המגוון הביולוגי על פני כדור הארץ כמרכיב מרכזי בשמירת טבע. לאחר מכן, אנשי מדעי כדור הארץ טבעו את המונח Geodiversity שמתייחס למגוון הגאולוגי, הגאומורפולוגי והפדולוגי. מצאנו שקיים קשר חזק בין Geodiversity והמגוון הביולוגי באגן ההיקוות של שדה בוקר. אולם בתקופת האנתרופוקן יש להתחשב גם במגוון האנושי (Humandiversity), המשפיע רבות על המבנה והתפקוד של מערכות אקולוגיות. אני כותב כעת מאמר המחבר בין שלושת סוגי המגוון.

הטענה המרכזית במאמר היא שבתקופה שלנו צריך לבחון גם כיצד המגוון האנושי כלומר המגוון הכלכלי, החברתי והתרבותי, משפיע על תפקודי המערכת האקולוגית. לדוגמה, הקמה ותפעול של הסוואניזציה כמערכת האקולוגית בנגב בנויה על שלושת סוגי המגוון. היא מתייחסת למרכיב ה-Geodiversity, כלומר למבנה הגאומורפולוגי של אגן ההיקוות ולסוגי הקרקעות המצויים בו. כמו כן, היא מביאה בחשבון את המגוון הביולוגי שלו. המבנה והתפקוד של המערכת מנוהלים על ידי תפיסה חברתית מסוימת של לוחמה במדבור (Humandiversity), שבאה לידי ביטוי בפרייקט המכוון את המבנה והתפקוד של המערכת האקולוגית בהתאם להשקפת עולם זו.

לסיכום, ההשקפה שלנו בנושא מערכות אקולוגיות באנתרופוקן חייבת להשתנות. עלינו לברר לגבי כל מערכת אקולוגית כיצד שלושת סוגי המגוון קובעים את המבנה והתפקוד שלה כמערכת תומכת חיים.

המערכת כבר השתנתה ולא חזרה להיות מה שהייתה. למעשה האדם מחליט אילו מערכות הוא רוצה שיהיו בסביבתו. האם אנחנו רוצים לתת לטבע להתארגן בעצמו? כן ולא, כי יש בעיה – הטבע לא "שומר" על הטבע, כי בטבע יש תחרות, והחזק מנצח. למעשה, הטבע אינו שומר על מגוון מינים. אז גם שומרי הטבע מתערבים בטבע לשמירה על המגוון הביולוגי. זו ההשקפה שלי, ולהבנתי תוך פרק זמן כולם יגיעו לתובנה הזו, כי זהו עולמנו כיום. אני בעד שיהיו מקומות שהמערכת תתארגן מעצמה, ונכנה אותם בשם "שמורות טבע". למשל, על פי מחקר שעשינו בחורש ים תיכוני, אם לא נטפל בו, הצמחייה המעוצה תקטין את מגוון המינים של תת-היער ותהיה מגוונת פחות.

באחד המחקרים כרתנו עצים ושיחים לאורך מפל הגשם, מעבדת ועד הר מירון. ראינו שכאשר כורתים את העצים, מגוון המינים העשבוניים גדל. יפה מאוד שאנשים התעוררו, שאכן צריך מערכות שמתארגנות מעצמן, או כפי שקוראים לכך כיום – שמירת טבע. אולם, לנוכח הממצאים המדעיים ותקופת האנתרופוקן צריך לאמץ פרדיגמה רחבה יותר על שימור ושיקום של מערכות אקולוגיות בשטחים הפתוחים.

**מה שאתה מגדיר כטבע שמתארגן מעצמו, לא בהכרח זהה למושג של שמירת טבע, כי המטרה המרכזית בשמירת הטבע היא שמירת המגוון הביולוגי. האם בתקופת האנתרופוקן יש להרחיב את גישת שמירת המגוון הביולוגי?**

שמירת טבע החלה בשמירה על בעלי חיים גדולים ועל נופים ייחודיים. אבל מערכת אקולוגית מורכבת ברובה מיצורים קטנים, והם אלה שמוציאים לפועל את רוב תפקודי המערכת האקולוגית. בעקבות מחקרים שהראו קשר בין



תאים אקולוגיים (בירוק) שנבנו כדי לבחון את השפעת הנשר וכתמי החלזונות על השתנות המערכת האקולוגית בעקבות מותם של שיחים. פארק סירת שקד, אפריל 2023. ימין - תקריב, שמאל - מבט מרחוק באדיבות eLTER H2020, אגף הייעור, קק"ל