

מרוצצי ההרים

מאת: פרופ' יואב בשן, ד"ר אסתר פואנטה,
בלנקה רומרו, ד"ר צינג-יאן לי ולוס דה-בשן



הרים נולדים, גדלים ומתפרקים ככל דבר אחר בטבע הסובב אותנו. הבעיה היא, שלנו כבני אדם, אין תפיסה ויזואלית של "זמן גיאולוגי". ההר תמיד נשאר אותו ההר, כמו שכתבה המשוררת רחל, אודות ההרים הסובבים את הכנרת. זאת אכן האמת כל עוד לא הגיעו הכולדוזרים ושינו את הנוף.

אולם בבחה-קליפורניה במכסיקו, קיימים "כולדוזרים" טבעיים, המשנים את הנוף, בגדול, וזאת בזמננו אנו. נכון שהתהליך איטי, אבל אם נתבונן בקפידה, במשך תקופה ממושכת באותו הנוף, ההר או הגבעה, נבחין בשינויים. צבעם יתחלף מחום-צהוב-אפור אופייני למדבר, ליותר ירוק ולעתים אף יותר צבעוני.

בשלהי המאה שעברה חקרנו לוס אשתי ואני תופעת טבע (Decay of Cardon - Flat top) שהורסת בשיטתיות מפחיתה יערות של הקטוס הענק קרדון (ראה "צבר 11" 2004). רכב חקר המדבר שלנו מסוגל להגיע כמעט לכל מקום בבחה-קליפורניה, כל עוד המשתמש אינו אחראי לתשלום עבור התיקונים. ואכן הגענו לעומק המדבר, רחוק מכל דרך סלולה. באזור שכוח אל, שרק נהגי המרוצים של "Baja cross country" מגיעים אליו, הבחנו שהתופעה אותה אנו חוקרים נעלמה כמעט לחלוטין, ועימה נעלמה גם אדמת המדבר הטרשית. איזור נווה-המדבר של La purisima - San Isidro, קרוב לחוף האוקיינוס השקט, כ-400 ק"מ צפונה מלה-פאז, העיר הגדולה בה אנו עובדים, סבל בתקופות גיאולוגיות עתידיות (20-2 מיליון שנה) מפעילות געשית מוגברת. באזור של מאות קמ"ר כמעט ואין שום שטח אדמה פנוי, כל האזור מכוסה בשפכי לבה ענקיים, הרי געש כבויים בגדלים שונים (ממיניאטורות של מספר מטרים ועד להרים המתנשאים לגובה של אלפי מטרים). מובן שאין זה בדיוק המקום למדבר פורח, ואכן מרבית האזור ריק מצמחיה ונראה כמו פני הכוכב מאדים, כולל הצבע האדום כהה של הסלעים. הצמחיה העיקרית נמצאת במקומות הנמוכים, ואדיות וחלקם התחתון של גבעות הבנויות מדרדרת של אבנים געשיות גדולות וקטנות. אבל כמו שכתב הסופר Michael Crichton בספר "Jurassic Park" החיים מצאו להם דרך משלהם להמשיך ולהתקיים גם במקומות בלתי אפשריים כאלה.

להפתעתנו, צמחים של קטוס הקרדון הענק גדלו בתוך גושי סלע ענקיים, רוצצו אותם לשברים, ודחקו את השברים הצידה כדי לפנות מקום לגזע העצום של הקרדון. קטוסים אלה שגילים מוערך במאות שנים, הם ירוקים ובעלי ענפים צדדיים רבים ולא נראים כסובלים ממחסור כלשהו, למרות

תנאי הגידול הכמעט בלתי אפשריים להם הם חשופים. כאנלוגיה למקום ניתן לחשוב על שדה חקלאי שבו הקרקע היא אחד המקורות העיקריים לחיים, ולהפוך את התופעה ב-180°, זה בעצם מה שחווינו במדבר. מה שהוסיף ל"עונג" במחקר זה היו הטמפרטורות הגבוהות מאוד באביב המקומי והעובדה שלא היינו מצוידים כראוי לשהייה ממושכת במקום.

האתר מרוחק ביותר מכל מקום ישוב, מלונות אינם נמצאים ואת הדלק למכוניות יש ל"ייבא" במיכלים מפני שתחנות הדלק לא הגיעו למחור זות אלה עד עצם היום הזה.

עברו עוד כמה שנים עד שהגענו לאתר שוב. הפעם באנו בעונת החורף הנוחה יחסית, היינו מצוידים היטב, ו"חרשנו" את הגבעות, ההרים והמצוקים, תרתי משמע.

הקקטוסים הענקיים שראינו שנה קודם לכן היו הפרטים הגדולים, שניתן להבחין בהם ממכונית נוסעת. אבל בכל האזור מצאנו אלפי קקטוסים צעירים הגדלים בתוך סלעים געשיים, ולא ניתן היה לעקור צמח ממקומו מבלי לרוצץ את סלעי הבזלת או

הגרניט בפטישים כבדים. עיסוק שבהחלט אינו מומלץ לאנשים לא חזקים.

חלק מהקקטוסים גדלו בגושי סלע ענקיים (בולדרים) וממש ביקעו את הסלע לשניים בעוד האחרים גדלו בסלעים קטנים וניתן היה להרים את כל הסלע ביד, יחד עם הקרדון הצעיר.

בעבודה מאומצת שברנו כמה סלעים ולקחנו דוגמאות למחקר באקלים היותר ממוזג במעבדה. מאחר ולא לקחנו מספיק דוגמאות נאלצנו לחזור שוב, הפעם בעונת הקיץ, טעות גסה. הטמפרטורות היו רגילות לעונה, 40°C ויותר בצל, ומי יודע כמה בשמש. אבל צל אין על גבעות הלבה. כמובן ניסינו למדוד את הטמפרטורה של הסלעים, אבל כמו בכל מדחום למדידת טמפרטורת האוויר גם זה שאנו הצטיידנו בו הסקאלה מגיעה עד 60°C והקריאה שקבלנו הייתה גבוהה מערך זה. "עזרה" נוספת היתה קרינת החום שפלטו הסלעים הלוחטים. הרגשנו שאנחנו בתוך

תנור לאפיית פיצה ואנחנו הפיצה. כדי לשבור סלעים בטמפרטורות אלו נדרשו ארבעה בחורים חזקים במיוחד, וגם הם לא נהנו. כמויות המים הגדולות ששתינו לא פיצו על האידוי. ולקינוח, צמיגי הרכב המדברי שחנה על הסלעים נמסו בחלקם והתפוצצו לאחר נסיעה קצרה. היחידים ששרדו ללא פגע היו צמחי הקרדון. דבר לא קרה להם, ולא אובחן שהם סובלים מפאת החום והקרינה הגבוהים במקום. התנאים הקיצוניים מאוד עברונו היו "תנאי הבית" עברום.

תנאי הגידול הבלתי אפשריים עוררו את השאלה: מה מעודד את הקקטוסים להתפשט ולגדול במקומות שצמחים אחרים אינם גדלים? כמובן מאליו נלקחה ההנחה שבמקום כזה אין תחרות עם צמחים אחרים על מקורות ומרחב - המקום ריק, ואין ריקנות בטבע.

תמיד יימצא צמח או בעל-חיים שיתאים את עצמו לתנאים המקומיים, קשים ככל שיהיו. בעוד האחרים קמלים, הם פורחים. למרות ההנחה האקולוגית המובנת מאליה, עדיין צמחים זקוקים לאור,

למינרלים ולמים כדי לגדול. אור יש באזור זה בשפע, מים צמחי הקרדון מסוגלים לגדול על כמויות מזעריות, ושנים שאין בהן גשם כלל הן רגילות בבחה-קליפורניה. אבל חייב להיות מקור לחנקן, זרחן ושאר מינרלים כדי שיתאפשר גידול של צמחים. בסלעים אין חנקן, שאר המינרלים החיוניים נמצאים בתרכובות שאינן זמינות לצמח. גם כמויות גדולות של אלומיניום, תחמוצות ברזל ומלח ביסול הנמצאים בסלעים אינם גורמים חיוביים לגידול צמחים. ואף על פי כן, הקקטוסים היו ירוקים וגדולים.

כמה מהסלעים שעקרנו מלב הר הגעש והכילו צמחים צעירים נבחנו במעבדה הממוזגת. בסביבה של 25°C ניתן להבחין בפרטים. מתחת לכל צמח צעיר שגדל בתוך הסלע "נחצבה" מערה קטנה. השורשים של הצמח שגדל מעליה נראו תלויים באוויר כמו ב"אירופניקה" או דבוקים לדפנות ה"מערה". מעט מאוד אדמה הצטב-

בכל האזור מצאנו אלפי קקטוסים צעירים הגדלים בתוך סלעים געשיים





”קרדון” ברחבי הסלע

ספת מיצתה אין ספור מינרלים החיוניים לגידול הצמח מתוך הסלעים, וקבוצת פטריות העבירה את המינרלים ש”נחצבו” מהסלעים לתוך הצמח חים. בסך-הכל עבודת צוות מושלמת.

עם יד על הלב ניתן לומר שכל העולם המיקרו־ביו־כימי (להבדיל מגורמי מחלות) התחבר עם בשרשי הקרדון להבטיח את גידולו. עם “עוזרים” כאלה הדואגים לכל מחסורו, לא נראה שהקרדון זקוק למשאבי קרקע. הוא מסוגל לגדול בסלעים קרחים שכל משאביהם מנותבים אליו והמתחרים יכולים רק להביט מרחוק.

חיידקים בני מאות שנים

מהיכן הגיעו כל אוכלוסיות החיידקים הללו? הרי קשה להניח שהם נמצאים או מזדמנים בכל סלע שנפלט מהר הגעש לפני 20 מיליון שנה. מחקרנו בתקופה האחרונה מצביעים שקיימת מעין “סימביוזה” בין הקרדון לבין החיידקים והפטריות. לפי דעתנו המיקרואורגניזמים נמצאים בצמח הקרדון מזה עידן ועידנים. הם חיים בתוך הקקטוס שבעצמו חי מאות בשנים.

רה בתחתית ה”מערה”, אבל מרבית השורשים לא היו שם. סביבת האוויר היתה לחה מהאוויר המדברי היבש בחוץ והצמח שימש מעין “פקק” עילי שמנע התאידות מוגברת.

לקחנו כמה מהשורשים והסתכלנו עליהם במיקרוסקופ אלקטרוני. הופתענו ובגדול! השורשים היו מכוסים בשכבות עבות של חיידקים ופטריות שכיסו כל ממ”ר של שורש. לא ניתן היה לראות את פני השורש בגלל כמות המיקרואורגניזמים שגדלו עליו. התופעה הזכירה לנו מחלות צמחים אופייניות, אבל הקקטוסים לא נראו סובלים, להיפך.

בעבודת נמלים שנמשכה למעלה מחמש שנים, זיכתה את אסתר פואנטה בתואר ד”ר למדעי הסביבה, בודדה אסתר קבוצות מיקרואורגניזמים רבות, ומיני חיידקים שונים שתכרנה אחת משותפת לכולם: עבודת צוות, למרות שכל קבוצת מיקרואורגניזמים התמחתה בנושא שונה. היו חיידקים קושרי חנקן אטמוספרי, קבורות צות חיידקים אחרות המיסו סלעים, קבוצה אחת הפכה זרחן מינרלי לזרחן זמין לצמח, קבוצה נר-



שורשים חשופים
כתוצאה משבירת הסלע
על ידי ה"קרדון"

חשים שיטפונות במדבריות של בחה-קליפורניה והקרקה החדשה והמעטה נשטפת מה"מערות" שנחצבו ע"י הצמחים. הם כשלעצמם אינם נפגרים עים מפני שחייהם אינם תלויים ביצירת הקרקע, אולם קרקע זו מתאספת במקומות הנמוכים ובוואדיות ויוצרת איים של צמחיה מדברית אחרת שבתנאים רגילים לא היתה מסוגלת לגדול באזור. במלים אחרות, ללא קיומם של צמחי הקרדון, המייסדים, בסלעים קרוב לוודאי שכמות הצמחיה המדברית האחרת לא הייתה קיימת כלל ועיקר בממדים בהם היא מתקיימת היום, ובמדבר סונורה יש הרבה יותר צמחים מאשר בנגב.

עוצמה מצטברת

האם קקטוס הקרדון הוא היחיד המסוגל לה-תמודד עם גושי הבזלת הנוקשים? הנושא הטריד אותנו במיוחד מפני שכל מחקר מדעי שנעשה במרחקים עלותו גבוהה ולא כולם מוכנים להשקיע משאבים רק כדי ללמוד כיצד נוצרת קרקע

במדבר. חיפשנו אתר קרוב יותר למרכז המחקר שלנו. לתדהמתנו התברר שתופעת הקקטוסים בתוך סלעים היא תופעה רגילה במדבר סונורה, שלהפתעתנו לא נחקרה כלל, למרות שהמקום מיושב ע"י אירופאים למעלה מ-500 שנה.

ניקח לדוגמה את ההר שממול לאחד ממלונות הפאר של העיר לה-פאז.

אם מסתכלים על ההר שגובהו כ-100 מטר ברור שההר מתפורר ונופל על אזור בתי המלון ולתוך הים. ואומנם אחרי כל סופה לצוות המלון יש מה לנקות ולתקן. אם מתקרבים, וצריך להתקרב מאוד מאוד, ניתן להבחין שכל הסלעים מאוכל-סים בצמחי קקטוס קטנים מהמין *Mamillaria fraileana* (ממילריה גמדית), שגדלים בכל סדק אפשרי והם שוברים את הסלע לחתיכות קטנות.

נכון שפעילותו של הצמח הבודד (כ-5 ס"מ גובהו וכ-2 ס"מ עוביו) קטנה, אולם כאשר קיי-

בעונת הפריחה וחסנת הפירות החיידקים עוברים לתוכי הזרעים. הפירות המתוקים שמהווים אטרקציה מיוחדת לעטלפים ולציפורים נאכלים בעונת היובש. אולם הזרעים אינם מעוכלים ומפוזרים באקראי לכל מקום אליו מגיעים המעורפפים. מאחר וכמות הזרעים גדולה מאוד, מספר זרעים שנפלו לסדקים זעירים שנוצרו בצורה טבעית בסלעים בעונת הגשמים נבטו. אוכלרסיות החיידקים והפטריות עברו מהזרע לשרשים ולקיר הסלע הקרוב. משם הדרך קצרה מאוד להמסת הסלעים ולסיפוק צרכי הקקטוס. מה תרומתו של הצמח ל"סימביוזה"? תרכובות פחמן שהכרחיות לגידול החיידקים. ככל הנראה כל המשתתפים נהנים וצמחי הקרדון יכולים לגדול במקומות שצמחים אחרים יכולים רק לחלום.

אם תרומתם של מיקרואורגניזמים היתה רק לגידול מספר מיני קקטוסים, יתכן שלא היינו מתעכבים לחקור את התופעה ביסודיות. ראייה מקפת יותר של התופעה מראה את חשיבותה.

בראש וראשונה יצירת קרקע חדשה במימד זמן קצר.

קרקע היא אוצר טבע למרבית צמחי הבר וכפי שהוסבר, קרקע איננה מיצרן מצוי באזורים רבים, דבר שמקשה על הצמחים. באזור הוולקני שאנו חוקרים לדוגמה, אם נמתין לתהליכי בליה טבעית ליצירת קרקע (רוח, גשם, חום-קור מים-קרח) נצטרך לחכות מאות אלפי ועד

מיליוני שנים. ואכן באזורים רבים של שפכים געשיים במדבר שנוצרו לפני מיליוני שנים, קשה למצוא ולו עץ בודד.

קקטוסים כמו הקרדון, שגדלים אומנם לאט יחסית, אבל בקנה מידה של זמן גידול של עץ, ומסוגלים לשבור סלעים, תרומתם ליצירת קרקע עשויה להיות משמעותית ביותר.

ואכן בתחתית כל "מערות" מצאנו כמות קטנה של קרקע שנוצרה ע"י פעילות הצמח ושותפיו, המיקרואורגניזמים. לעיתים, וגם זה קורה אחת לכמה שנים, מתר-





מילדות קטנות
נאחזות בסלע



מים עד 100 צמחים למ"ר, ההר אינו מסוגל לעמוד בפני העוצמה המצטברת של אוכלוסיית הקקטוסים ופשוט נשבר ומתפורר.

צמחי הממילריה מתמזגים עם צבעי הסלעים ולעתים קשה להבחין בהם עד שממש דורכים עליהם. אולם בעונת הפריחה המאופיינת בכתרים ורודים ובעת חניטת הפרי (אדום-אש) לא ניתן להחמיצם. המקומיים נוהגים לאסוף את הפירות המתוקים ולאוכלם כממתק.

הקרדון הענק והממילריה הגמדית הם לעת עתה המינים היחידים של קק-טוסים הגדלים בצורה מסיבית ישירות על הסלעים. אולם מספר מינים אחרים של קקטוסים כמו *Echinocereus*, *Opuntia cholla* ו-*Ferocactus sp.* מסוגלים אף הם לשבור סלעים. למרות זאת, נראה לנו שתרומתם קטנה יחסית מפני שמספר הפרטים שבחרו בסלע כמקום גידול קטן (הם גדלים הרבה יותר טוב בקרקעות) יחסית לקרדון ול-ממילריה.

למרות שעצי המדבר מעדיפים קרקע עת לגידול, הרי שני סוגי עצים, תאנת המדבר (*Ficus palmeri*) שחוצבת גושי סלע של מספר מטרים מעוקבים מצוקים, ועץ הפיל (*Pachycormus discolor*) שמרוצץ בזלת לשברים קטנים נמצאו אף הם על ידנו (אולם הם סיפור אחר, באותו נושא).

ממילריה מבשילה פירות בין הסלעים

מדבריות בחה-קליפורניה נהרסים לאט לאט

מסיבות כלכליות. חקלאות (כושלת בעיקרה), גידול אוכלוסיה (בלתי נמנע), ובורות של המקור מיים (הקקטוסים הם עשבים שוטים, גדולים ודוקרניים ש"מפריעים" לבקר לרעות בשלווה). בתוך שנים מעטות הפכו השטחים שבוראו מהקקטוסים למדבר שממה, שמזכיר תמונות מהירח. האבק שנוצר פוגע קשות

בבריאות התושבים, במיוחד ילדים. מאחר וכל שכבת הקרקע העליונה נעלמה ברוחות העזות שנושבות, נעלמו עמה גם כל המיקרו-

בתוך שנים מעטות הפכו השטחים שבוראו מהקקטוסים למדבר שממה, שמזכיר תמונות מהירח



מחקר שימושי

נכון שמחקר בסיסי בהיות החיים יכול להיות מרתק, מלהיב וחשוב, אבל לרובינו, העובדים בארץ מתפתחת כמכסיקו, המחקר צריך להניב גם פירות שימושיים, לטובת התושבים המ-

קומיים. התברר לנו שהחידקים שגילינו במדבר הם מכרה זהב אפשרי. וכל זאת מדוע? לשם כך נחוץ מעט הסבר סביבתי.



הקרדון
רגע לפני
"שבירה"

רומרו בדוקטורט ממשך. את החיידקים שהם בודדו מזרעי ושושי הקקטוסים הם ביקטרו לצמחים צעירים מאוד של קרדון וממילריה גי-דלו את הצמחים באבקת סלעים במשך שנה, ללא תוספת של דישון כלשהו.

והתוצאה? קשה להבחין בין צמחים שבוקטרו לצמחי ביקורת שדושונו בדישון מלא. לעומת זאת ההבדל בין צמחים מבוקטרים לאילו שאינם מבוקטרים הוא כמו בין יום ולילה. הצמחים הלא מבוקטרים כמעט מתו ושרדו ב"חירוק שיניים". קרוב לוודאי שחיידקים אלו "יככבו" בעתיד בפרויקטים של ייעור המדבר בבחה-קליפורניה ובדרום ארה"ב.

רציתם לראות הרים מתפוררים? התאזרו קצת בסבלנות. סמכו על הצמחים הצעירים שהחלו לגדול בסדקי הסלעים וקחו תמונה בודדת אחת לכמה חודשים. כאשר תהיינה לכם מספיק תמונות לוידיאו קצר, קרוב לוודאי שגם הסלע המקורי, מהתמונה הראשונה, שינה את חזותו באופן שקשה לזהותו. וכל זה קורה בשנים ספורות, בעוד שללא הצמחים ועוזריהם... אנא חיזרו בעוד כמיליון שנה.

אורגניזמים המועילים שחיים בה. על מנת למתן את הזיהום באבק הגורם לאסטמה ומחלות אחרות של כלי הנשימה, יש צורך לייער מחדש את האזורים ההרוסים. אולם הצמחים אינם מסוגלים לגדול בקרקעות ההרוסות בהעדף המיקרואורגניזמים איתם הם גדלים באופן טבעי.

לכן יש צורך להוסיפם בשילוב עם תהליך הייעור. פעולה זו נקראת "ביקטור". מאחר והקרקעות העמוקות שנותרו דלות בחומר אורגני ובמינרלים, החיידקים המוספים בתהליך הביקטור נחשפים לתנאי שרידות קשים שרובם אינם עומדים בהם, והתוצאה: רובם מתים.

היכן ניתן למצוא חיידקים מועילים ששורדים בתנאים קשים, בלתי אפשריים? בשורשי הקקטוסים הגדלים בסלעים. תנאים גרועים יותר לגידול קשה למצוא. אם הם שרדו שם, ופעילים לטובת הצמחים יתכן שהם יכולים לשמש גם כחיידקים לביקטור לייעור מחדש של מדבריות, ולסייע בכך למניעת תופעות של אירוזיה וזיהום אוויר. אפשרי ושווה לנסות.

ואכן זה בדיוק מה שעשתה אסתר פואנטה בעבודת הדוקטורט שלה ועושה עכשיו בלנקה

אודות הכותבים:

<http://tinyurl.com/2wzhhbx> הם מדענים בקבוצה למיקרוביולוגיה סביבתית של המכון למחקר ביולוגי של מדינת דרום קליפורניה, בלה-פאז, מכסיקו (CIBNOR). ושירות היערות של מחלקת החקלאות של ארה"ב (USDA-Forest Service, Dr. C. Y. Li) במדינת אורגון, ארה"ב.

לקריאה נוספת של מאמרים בנושא:

בשן י., ודה-בשן ל., 2004. הגדול מכולם. הקרדון הענק מבחה-קליפורניה, מכסיקו. צבר 11: עמ' 18-25 **Available at:** <http://tinyurl.com/323dk7>

Bashan, Y., Li, C.Y., Moreno, M., Lebsky, V.K. and de-Bashan, L.E. 2002. Primary colonization of volcanic rocks by plants in arid Baja California, Mexico. *Plant Biology* 4: 392-402. **Available at:** <http://tinyurl.com/3xpl9#>

Puente, M.E., Bashan, Y., Li, C.Y., and Lebsky, V.K. 2004. Microbial populations and activities in the rhizoplane of rock-weathering desert plants, I. Root colonization and weathering of igneous rocks. *Plant Biology* 6: 629-642 **Available at:** <http://tinyurl.com/39ke2#>

Puente, M.E., Li, C.Y., and Bashan, Y. 2004. Microbial populations and activities in the rhizoplane of rock-weathering desert plants, II. Growth promotion of cactus seedling. *Plant Biology* 6: 643-650 **Available at:** <http://tinyurl.com/2v43lj>