

התכונות ההידרולוגיות של הסלע המשפיעות על התפתחות הצומח הטבעי ברמת הנדיב

מני בן-חור, המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מרכז וולקני, בית דגן
meni@volcani.agri.gov.il

תקציר

הידע הקיים על היכולת של סלעים לספק מים לצמח ולהוות בית גידול לצמחים הוא מוגבל. מטרת עבודה זו היתה ללמוד את השפעת התכונות הפיסיקליות וההידראוליות של הסלע על התפתחות הצומח הטבעי. הסלעים חולקו לשלושה סוגים: סלע קשה, סלע רך וסלע נקבובי. דיגמות נלקחו מהחלק הפנימי של כל סוג סלע, ונקבעו התכונות הפיסיקליות שלהן ותכולת השורשים בהן. בסלע הקשה, הנקבובי והרך, הצפיפות הגושית היתה 2.24, 1.43 ו-1.27 גרם/סמ"ק, בהתאמה, ואחוז נפח הנקבובים היה 17%, 47.1% ו-52.9%, בהתאמה. ערכי החדירות, כושר אגירת מים בסלע וזמינותם לצמח היו הגבוהים ביותר בסלע הרך והנמוכים ביותר בסלע הקשה. שני סוגי נקבובים עיקריים נמצאו בסלע הרך ובסלע הנקבובי: (1) מקרר-נקבובים – סדקים דקים שנוצרו מבלייה של הסלע והם מחזיקים מים במתח > 4 אטמוספרות; (2) מיקרר-נקבובים, שנוצרים בהתגבשות של המינרלים בסלע, והם בעלי כושר תאחיזה רב, < 15 אטמוספרות. בסלע הקשה נמצאו רק מיקרר-נקבובים. ברמת הנדיב נמצא, שהתפתחות השורשים באזור סלעי נעשית על פי שני מודלים עיקריים: (1) התפתחות שורשים בתוך כלל נפח הסלע, כאשר שיעור התפתחותם נקבע על פי מצב המים וחומרי הזנה שבו. מודל זה אופייני בסלעים בעלי חוזק מכני קטן, כגון חוואר וחוואר טופי; (2) התפתחות שורשים בסדקים גדולים ובחללים קארסטיים האופייניים לסלעים קשים, כגון גיר ודולומיט. במקרה זה, התפתחות השורשים מוגבלת לחללים אלו.

קרקע רדודה, שבדרך כלל אינה מספיקה להתפתחות מערכת שורשים מפותחת. באזורים אלו נמצאו יחסי גומלין בין שורשי הצמחים והמערכת קרקע/סלע (הר, 1998; כהן ושרבני, 1964; קפלן, 1989; רבינוביץ-ריון, 1979, 1986; Schiller et al., 2007). בעבודות שנעשו במקומות אחרים בעולם עם מסלע שונה נמצא, שהסלע מהווה מקור מים חשוב להתפתחות הצומח באזור (Jones & Graham, 1993; Sternberg et al., 1996; Zwieniecki & Newton, 1995). למרות חשיבות הסלע בהתפתחות הצומח במערכות טבעיות, הידע הקיים על היכולת של סלעים שונים לספק מים וחומרי הזנה לצמח ולהוות בית גידול לצמחים, הוא מוגבל.

רמת הנדיב נמצאת בקצהו הדרומי של רכס הכרמל מדרום לזכרון יעקב, ומשתרעת על פני כ-4,500 דונם בגובה של כ-120 מטר מעל פני הים. המסלע ברמת הנדיב הוא בעיקרו מחבורת יהודה, והוא כולל סלעי גיר ודולומיט (בר, 1988). בנוסף על כך, קרבת רמת הנדיב לים הקדום הביאה לנוכחות גופי ריפים (שוניות) של מאובנים, ואילו התפרצויות געשיות הביאו ליצירת עדשות של טוף. כתוצאה מכך, נוצרו באזור זה גיר שוניתי וטוף חווארי, שהם נפוצים ברמת הנדיב ואף בכרמל ופחות בשאר חלקי הארץ (גיר, קשר אישי). סקר הצומח הטבעי ברמת הנדיב הראה, שבאזורים מסוימים הצומח אינו מפותח ומאופיין בצמחים עשבוניים ושיחים, בעוד שבאזורים אחרים הצומח הוא עצים מפותחים, כגון בר-זית ואלון מצוי (קפלן, 1989), על אף שהאקלים בכל אזור רמת הנדיב הוא אחיד עם רמת משקעים שנתית ממוצעת של 600 מ"מ.

על פי סקרים גיאולוגיים והידרולוגיים (קשאי, 1966; בר, 1988) נמצא, שאזור רמת הנדיב מאופיין בבלייה קארסטית חריפה שיצרה חללים קארסטיים בחתך הסלע. חללים אלו יכולים להעביר את מי הגשמים מהר יחסית לעבר אקוויפר חבורת יהודה. שאיבת יתר של אקוויפר זה בעשורים האחרונים גרמה לירידה במפלס מי התהום. התייבשות עין שוני ועין חנינה, הנמצאים למרגלותיה המערביים והדרומיים של רמת הנדיב, וכן המלחת מעיינות תמסח (בר, 1974) מורים שמפלס מי התהום באזור רמת הנדיב הוא כמה מטרים מעל

מילות מפתח (נוספות על מילות הכותרת): התפתחות שורשים, חללים קארסטיים, נקבובים, סלעי גיר, ערכי חדור, פוטנציאל מים.

מבוא

מרבית החורש הטבעי בארץ גדל באזורים הרריים בעלי מסלע גירי (קרבונטי) מסוגים שונים, שעליהם מתפתחת

כאשר: D_s – הצפיפות האמיתית של הסלע (צפיפות המינרלים בסלע ללא נקבובים וחללים), כאשר ערך של 2.7 גרם/סמ"ק נבחר כערך ממוצע של הצפיפות האמיתית של שלושת סוגי הסלע שנבחנו.

תכולת הרטיבות המשקלית (W_g) בסלע בטיפולים השונים נקבעה בשיטה הגרבימטרית לאחר ייבוש דגימות הסלע בתנור ב-105 מ"צ, ותכולת הרטיבות הנפחית (W_v) חושבה על פי נוסחה [3]

$$W_v = W_g D_b \quad [3]$$

תאחיזת מים בסלע

דגימות סלע שנדגמו משלושת סוגי הסלע נכתשו ונופו לגודל חלקיקים בתחום בין 0.8 ל-2 מ"מ. הדגימות הכתושות הונחו על פלטת לחץ מתאימה, הורו במים למשך 24 שעות, ולאחר מכן הופעלו עליהן לחצים שונים מ-0.1 ל-15 אטמוספרות למשך 48 שעות. עם גמר הפעלת הלחץ, הדגימות נשקלו, הונחו בתנור בטמפרטורה של 105 מ"צ למשך 24 שעות ונשקלו שוב. תכולת הרטיבות המשקלית והנפחית חושבו בדגימות הסלע השונות בכל לחץ נתון. מדידות אלו נעשו בשלוש חזרות.

מליחות תמיסת שיווי המשקל

שלוש דגימות (שלוש חזרות) מכל סוג סלע במשקל של כ-50 גרם לכל דגימה הוטבלו במים מזוקקים בכמות כפולה ממשקלם. מוליכות חשמלית (EC) של המים, שבהם הוטבלו דגימות הסלע, נמדדו לאחר 1, 48 ו-168 שעות.

ערכי החידור של הסלעים השונים

ערכי החידור של סוגי הסלע השונים נמדדו בשדה בשיטת הטבעת ובעומד מים קבוע. באזורים שונים ברמת הנדיב נבחרו סלעים, שני סלעים לכל סוג סלע, החשופים לאטמוספירה עם פני שטח אופקיים, במידת האפשר, וללא סדקים נראים לעין רגילה. כל סלע שנבחר היה בגודל של $1 < m^2$ וגובה של < 0.5 מטר מעל פני הקרקע, כאשר שכבת הסלע העליונה בעובי של 1 ס"מ בקירוב הוסרה מפני הסלע האופקיים, על מנת להסיר גורמים חיצוניים שנקשרו לפני הסלע. על פני הסלע המוחלקים הונחה טבעת ברזל בקוטר של 20 ס"מ, כאשר המרווח בין פני הסלע ודופן הטבעת נאטם בסיליקון, על מנת למנוע דליפת מים מפנים הטבעת החוצה. לאחר האטימה, הוכנסו מים לתוך הטבעת בגובה של 10 ס"מ מעל פני הסלע, ועומד מים זה נשאר קבוע על ידי בקבוק Marriot. פני הטבעת העליונים כוסו בנייר אלומיניום, כדי למנוע איבוד מים כתוצאה מהתאדות. כמות המים שחלחלה לתוך הסלע מתוך הטבעת הושלמה על ידי בקבוק Marriot ונרשמה בזמנים שונים. מדידות אלו נעשו בשני סלעים (שתי חזרות) לכל סוג סלע, כאשר בחזרה אחת המדידות נעשו בשלושה תאריכים שונים ובחזרה השנייה רק בתאריך אחד.

פני הים ואינו יכול לשמש כספק מים לצומח הגדל ברמת הנדיב. רבינוביץ-וין (1979, 1986); הר (1998); ו-Herr et al. (1999) מצאו, שלסוג ולתכונות הסלע השפעה ניכרת על התפתחות וסוג הצומח באזורים שונים בארץ. לכן הועלתה השערה, שהשוונות בהתפתחות הצומח הטבעי ברמת הנדיב נובעת בעיקר מהשוונות בסוגי הסלע באזור. מטרת המחקר היתה ללמוד את השפעת התכונות הפיסיקליות וההידראוליות של סוגי סלע שונים ברמת הנדיב על התפתחות הצומח הטבעי באזור.

חומרים ושיטות

בעבודה מקדימה נמצא, שניתן לחלק את הסלעים העיקריים ברמת הנדיב מבחינה פיסיקלית (חוזק הסלע והנקבוביות שלו) לשלושה סוגים עיקריים: (1) סלע קשה – שאינו ניתן לשבירה באופן ידני, והוא בעל נקבוביות קטנות מאוד. סוג סלע זה כולל את סלעי הקלציט (הגיר) והדולומיט הקשה; (2) סלע רך – שניתן לפוררו ביד בקלות יחסית, והוא כולל את מגוון סלעי החוואר והחוואר הטופי; (3) סלע נקבובי – סלע קשה שאינו ניתן לשבירה באופן ידני, אבל מכיל כמות של נקבוביות גדולה יחסית הניתנת להבחנה בעין רגילה. סוג זה כולל בעיקר את הסלע הקלקריניטי. לשם קביעת צפיפות גושית, אחוז נפח נקבובים, תאחיזת מים בסלע ומליחות תמיסת שיווי המשקל של שלושת סוגי הסלע הללו, נדגמו דגימות סלע של 50 גרם לערך לכל דגימה, שנלקחו מהחלק הפנימי של שלושת סוגי הסלע שנבחרו מאזורים שונים ברמת הנדיב, ואוחסנו בחדר יבש. דגימות סלע אלו היו נקיות משורשים, מחומר אורגני אחר ומקרקע; בדגימות מהסלע הקשה לא היו סדקים שנראו בעין רגילה. אופן המדידה של המדדים שנקבעו בשלושת סוגי הסלע השונים מפורט בהמשך.

צפיפות גושית, אחוז נפח נקבובים ותכולת רטיבות

דגימות של שלושת סוגי הסלע שנבחנו יובשו בתנור בטמפרטורה של 105 מ"צ למשך 24 שעות ונשקלו שוב. לאחר הייבוש, הדגימות צופו בפרפין ונשקלו בתוך מים. הנפח הכולל (נפח המוצקים והנקבובים) של כל דגימת סלע נקבע על פי חוק ארכימדס, והצפיפות הגושית (D_b) של הדגימה חושבה על פי נוסחה [1]

$$D_b = \frac{M}{V_t} \quad [1]$$

כאשר: M – משקל דגימת הסלע לאחר ייבוש ב-105 מ"צ; V_t – הנפח הכולל של דגימת הסלע כולל נקבובים.

אחוז נפח הנקבובים (N) מכלל נפח דגימת הסלע חושב על פי נוסחה [2]

$$N = \left(1 - \frac{D_b}{D_s}\right) 100 \quad [2]$$

טבלה 1: נוסחאות קווי המתאם של עקומי הכיול לקביעת תכולת שורשים בסוגי הסלע השונים, כאשר X הינו תכולת השורשים בסלע ו-Y מהווה את איבודי המשקל לאחר ייבוש

Table 1: Regression lines of the calibration curves for root content in different rocks

סוג סלע Rock type	נוסחאות קווי המתאם Equations of the regression lines
סלע קשה Hard rock	$Y = 0.34 + 0.08X$
סלע נקבובי Porous rock	$Y = 0.09 + 0.08X$
סלע רך Soft rock	$Y = 0.42 + 0.08X$

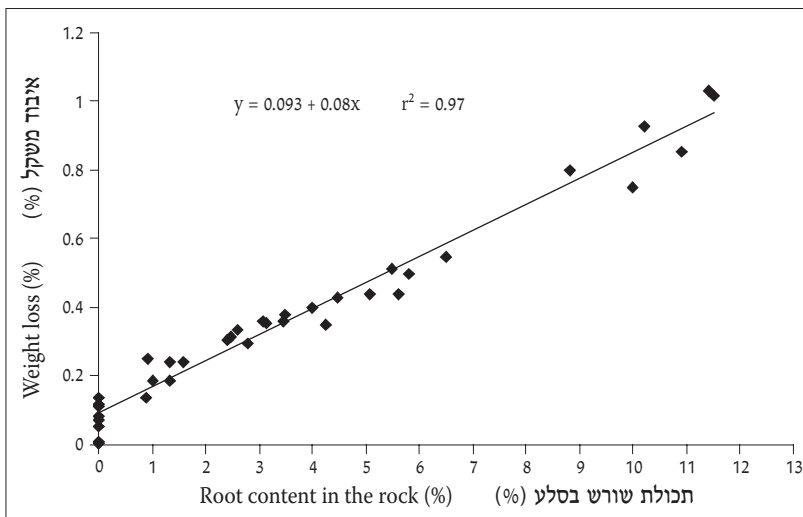
שמפורט למעלה, ותכולת השורשים בהן חושבה מעקומי הכיול המתארים את הקשר שבין איבודי המשקל ותכולת השורשים בסלע (טבלה 1). מכיוון שרוב החומר האורגני הנמצא בסלעים הוא שורשים, שיטת קביעת תכולת השורשים בדגימת הסלע בעזרת עקומי הכיול היא סבירה.

תוצאות ודיון

את החללים בסוגי הסלע השונים ניתן לחלק לשני סוגים עיקריים: (1) נקבובים נימיים הנוצרים עם התגבשות המינרלים בסלע או כתוצאה משבירה קלה יחסית (בלייה) שלו; (2) חללים גדולים בגודל של מעל מספר סנטימטרים, הכוללים סדקים גדולים הנוצרים משבירה מסיבית של הסלע, וחללים קארסטיים הנוצרים מהמסה של מינרלים מסיסים יחסית. חללים גדולים אלו אופייניים בעיקר בסלעים הקשים. בעבודה הנוכחית, בקביעת התכונות הפיסיקליות של סוגי הסלע השונים, נלקחו דגימות סלע שלא הכילו חללים גדולים.

איור 1: עקום כיול לתכולת שורשים בסלע הנקבובי

Fig. 1: Calibration curve for root content in porous rock



תכולת רטיבות בסלעים בשדה

באזור בגודל של כדונם ברמת הנדיב, שבו גדלים עצי אלה ארץ ישראלית ואלון מצוי, נבחרו שלושה סלעים (שלוש חזרות) מכל סוג סלע. הסלעים היו חשופים לאטמוספירה עם פני שטח אופקיים יחסית וללא סדקים נראים לעין רגילה. מכל סלע נלקחה דגימה במשקל של כ-50 גרם מעומק של 2-10 ס"מ מפני הסלע. דיגום הסלעים נעשה יומיים לאחר סופת גשם של 25 מ"מ, כאשר כלל הגשם שירד מתחילת עונת הגשמים באזור היה 350 מ"מ. מיד לאחר הדיגום, דגימות הסלע הוכנסו לקופסאות אטומות על מנת למנוע התאדות, נלקחו למעבדה ונקבעה בהם תכולת הרטיבות לאחר ייבושם למשך 24 שעות בתנור בטמפרטורה של 105 מ"צ.

תכולת שורשים בסלע

מכיוון שלא היה ניתן להפריד באופן מכני ומלא את השורשים מדגימות הסלע, קביעת תכולת השורשים בסלע בעבודה הנוכחית נעשתה בעקיפין בשיטת השרפה. בשיטת זו, דגימות סלע במשקל של כ-50 גרם לכל דגימה, שנדגמו מהחלק הפנימי של שלושת סוגי הסלע שנלמדו, שימשו לקביעת עקום כיול לתכולת שורשים בסלע. דגימות סלע אלו לא הכילו שורשים, חומר אורגני אחר וקרקע. דגימות הסלע יובשו ב-105 מ"צ למשך 24 שעות ומשקלם היבש נקבע. לאחר הייבוש, הוספו לדגימות הסלע כמויות ידועות ושוונות (כולל 0, סלע ללא שורשים) של שורשי צמחים, שנאספו מרמת הנדיב ויובשו ב-60 מ"צ. דגימות הסלע יחד עם השורשים יובשו שוב ב-400 מ"צ למשך 24 שעות ומשקלם נקבע שוב. לקביעת עקום כיול לתכולת שורשים בסלע, איבודי המשקל של דגימות הסלע עם תוספות השורשים השונות לאחר ייבושן בטמפרטורות בין 105 לבין 400 מ"צ, נקבעו כאחוז ממשקל הסלע ב-400 מ"צ והוצגו על ציר ה-Y. לעומת זאת, משקל השורשים שהוספו לסלע כאחוז ממשקל הסלע הוצגו על ציר ה-X, ועקום הכיול חושב כקו מתאם (רגרסיה) ליניארי בין ערכי ה-Y וה-X. דוגמה לעקום כיול בסלע הנקבובי מובאת באיור 1, ונוסחאות המתאם של עקומי הכיול עבור שלושת סוגי הסלע השונים מוצגות בטבלה 1. ערכי החותך על ציר ה-Y בנוסחאות המתאם מהוות את איבודי המשקל בסלעים ללא שורשים, שנבעו מאיבוד מים שלא יצאו מהסלע לאחר ייבושם ב-105 מ"צ ומשרפת פחמות.

לקביעת תכולת השורשים בסלעים השונים מרמת הנדיב, נלקחו דגימות סלע מסלעים באזורים שונים שבהם גדל חורש טבעי. דגימות הסלע שנלקחו היו במרחקים ובעומקים שונים באופן אקראי: בסלע הרך נלקחו 16 דגימות ובסלעים הקשה והנקבובי, עקב הקושי בדגימה, נלקחו 5 דגימות בלבד מכל סוג סלע. לא נלקחו דגימות סלע מדפנות של סדקים גדולים ושל חללים קארסטיים. בדגימות הסלע נקבעו איבודי המשקל לאחר ייבושן בטמפרטורות בין 105 לבין 400 מ"צ, כפי

טבלה 2: תכונות פיסיקליות ותכולת הרטיבות בשדה של סוגי הסלע שנלמדו
Table 2: Physical properties and water content of the studied rocks

סוג סלע Rock type	צפיפות גושית Bulk density גרם/סמ"ק g/cm^3	נפח נקבובים Total Porosity %	תכולת רטיבות בסלע בשדה Water content in the rock	
			רטיבות משקלית Gravimetric water content %	רטיבות נפחית Volumetric water content %
סלע קשה Hard rock	2.24	17	$0.58^* \pm 0.14$	1.3 ± 0.31
סלע נקבובי Porous rock	1.43	47.1	7.9 ± 0.79	11.2 ± 1.13
סלע רך Soft rock	1.27	52.9	21.3 ± 7.9	27.1 ± 10

* ערכים \pm סטיית התקן * Numbers following \pm are standard deviation

התאחיזה המתקיים בין מולקולות המים ודפנות הנקבובים בסלע. ככל שמתח המים (התאחיזה) בסלע גדול יותר, הצמח צריך להשקיע אנרגיה גדולה יותר על מנת להוציא את המים מהסלע ולקלוט אותם.

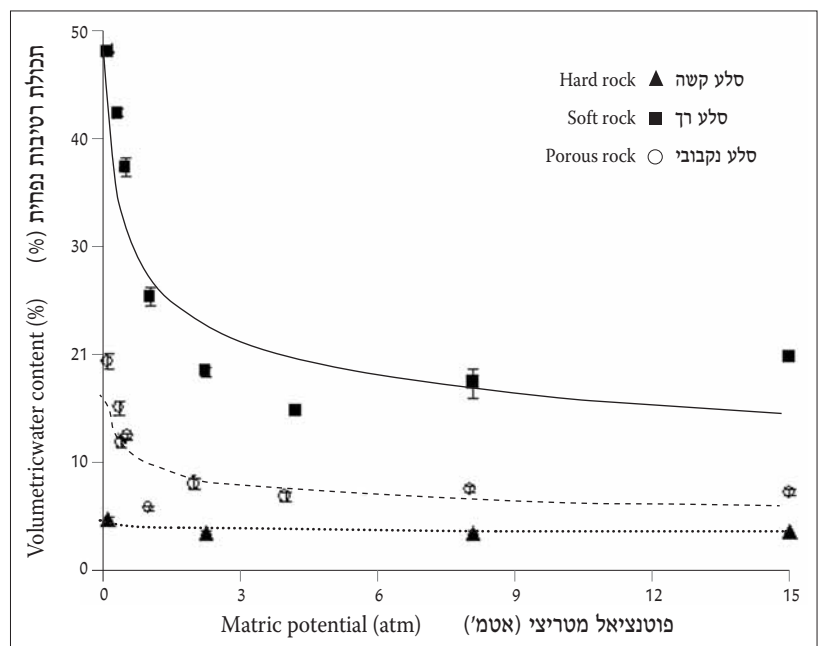
עקומי תאחיזה של מים בשלושת סוגי הסלע השונים מוצגים באיור 2. באיור זה מוצגת תכולת הרטיבות הנפחית בסלע כתלות בפוטנציאל המים שבו, כאשר ערכי הפוטנציאל מובאים כערכי מתח (פוטנציאל מטריצי). לכל ערך פוטנציאל מים נתון. תכולת הרטיבות הגבוהה ביותר היתה בסלע הרך, והנמוכה ביותר בסלע הקשה (איור 2). ערכי תכולת הרטיבות בסלע הרך ובסלע הנקבובי ירדו באופן מעריכי (אקספוננציאלי) עם העלייה במתח המים עד התייצבותם על ערך מינימלי וקבוע של 17.1% ו-7.0%, בהתאמה, בפוטנציאל מים של 4 אטמוספרות לערך (איור 2). לעומת זאת, בסלע הקשה, ערכי תכולת הרטיבות היו נמוכים כ-3.7%, ולא השתנו עם העלייה במתח המים (איור 2). אי השינוי בתכולת הרטיבות בסלע הרך והנקבובי עם העלייה במתח המים מעל 4 אטמוספרות מורה, שהמים בסלע בערכי הרטיבות המינימליים מוחזקים במתח הגדול מ-15 אטמוספרות, וזמינותם לצמח היא מועטה ביותר. מכאן, שקיימים שני סוגי נקבובים עיקריים בסלעים אלו: (1) מקרו-נקבובים – נקבובים המחזיקים מים במתח >4 אטמוספרות. נקבובים אלו הם כנראה סדקים קטנים שנוצרו משבירה קלה (בלייה) של הסלע; (2) מיקרו-נקבובים – נקבובים בעלי כושר תאחיזה רב (<15 אטמוספרות), שנוצרו, כנראה, תוך כדי התגבשות המינרלים בסלע. בסלע הקשה לעומת זאת, קיימים רק מיקרו-נקבובים.

מכאן, שאת המים בסלע הרך ובסלע הנקבובי אפשר לחלק לשני חלקים עיקריים: (1) מים זמינים לצמח – מים האחוזים בסלע במתח קטן מ-4 אטמוספרות. בהנחה שעיקר המים האחוזים במתח >0.3 אטמוספרות הם לא זמינים לצמח עקב התנזותם המהירה מהסלע, תכולת הרטיבות הזמינה לצמח על בסיס נפחי בסלע הרך ובסלע הנקבובי היו: 27.7% ו-8.3%,

ערכי הצפיפות הגושית ואחוז נפח הנקבובים של שלושת סוגי הסלע, שנדגמו מרמת הנדיב, מוצגים בטבלה 2. כצפוי, הסלע הקשה היה הצפוף ביותר, והסלע הרך – הפחות צפוף. אחוז נפח הנקבובים בסלע הרך היה הגדול ביותר (52.9%) והנמוך ביותר (17%) בסלע הקשה (טבלה 2). קיבול המים ברוויה בסלע תלוי בנפח הנקבובים בו, ומכאן, שהגיר הרך הוא בעל היכולת הגדולה ביותר לאגור מים בתוכו, והסלע הקשה הוא בעל יכולת הקיבול הנמוכה ביותר. אולם, היכולת של הסלע לשמש כבית גידול לצמח תלויה לא רק בכמות המים הנאגרת בסלע, כי אם גם בפוטנציאל המים שבו. פוטנציאל המים בנקבובים נימיים הוא שלילי (מתח), והוא נובע מכוח

איור 2: תכולת רטיבות כתלות בפוטנציאל מטריצי בשלושת סוגי הסלע שנלמדו (הקווים האנכים מהווים את סטיית התקן)

Fig. 2: Water content as a function of the matric potential in the three studied rocks (bars indicate standard deviation)



גדולים או חללים, ונעים דרכם במהירות יחסית לעבר מי התהום. לעומת זאת, בשדה עם מחשופים של סלע רך, עקב ערכי החידור הגבוהים יותר של סלע זה בהשוואה לעוצמות הגשמים באזור רמת הנדיב, רוב מי הגשמים חודרים לפנים הסלע וחלק גדול מהם נאגר בו ויכולים לשמש מקור מים לצמח. בסלע הנקבובי, ערכי החידור של סלע זה נמוכים ממרבית עוצמות הגשם באזור רמת הנדיב, ולכן חלק ממי הגשמים חודר ונאגר בתוך גוף הסלע, והשאר ניגרים כנגר עילי על פני הסלע.

התאמתו של הסלע לשמש כבית גידול לצמחים יכולה להיות מושפעת גם ממליחות המים הנאגרים בסלע כתוצאה ממסילותו. ערכי ה-EC של המים, שהיו במגע עם סוגי הסלע השונים כתלות בזמן, מוצגים באיור 4. בשלושת סוגי הסלע היתה עלייה מסוימת במליחות המים עם הגדלת זמן המגע משעה ל-48 שעות, כאשר הגדלה נוספת של זמן המגע ל-165 שעות לא שינתה באופן מובהק את מליחות המים (איור 4). מכאן, שריכוז האלקטרוליטים בתמיסה לאחר 48 שעות מגע עם סוגי הסלע השונים, הוא ריכוז שיווי המשקל. ערכי ה-EC לאחר 48 שעות מגע או יותר בסלע הרך ובסלע הנקבובי היו גבוהים יותר מאשר בסלע הקשה, אולם ההבדלים לא היו

בהתאמה (איור 2); (2) מים ברמת זמינות מועטה מאוד לצמח - מים האחוזים בסלע במתח גדול מ-15 אטמוספרות, שיכולת הצמח לקלוט אותם מהסלע היא מוגבלת. בסלע הקשה, כל תכולת המים שבו היא ברמת זמינות נמוכה מאוד לצמח (איור 2).

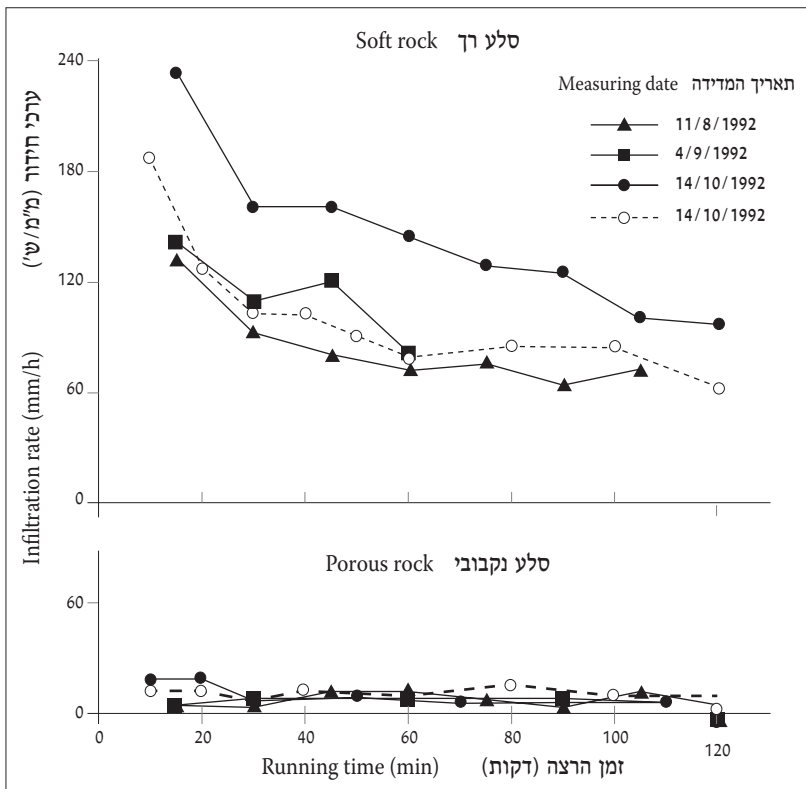
ערכי החידור של הסלע הנקבובי והסלע הרך כתלות בזמן מוצגים באיור 3. ערכי החידור בסלע הקשה היו נמוכים מאוד, כ-0.1 מ"מ/שעה, ולכן אינם מוצגים באיור. ערכי החידור של הסלע הנקבובי היו נמוכים מאשר בסלע הרך (איור 3), והם נעו בין 232 ל-63 מ"מ/שעה בסלע הרך לבין 18 ל-4 מ"מ/שעה בסלע הנקבובי. ערכי החידור של הסלע הנקבובי היו נמוכים למרות הנקבובים הרבים שבו, הנראים לעין. קיימת, כנראה, אי-רציפות בין הנקבובים בסלע הנקבובי שהפחיתה את ערכי החידור שלו.

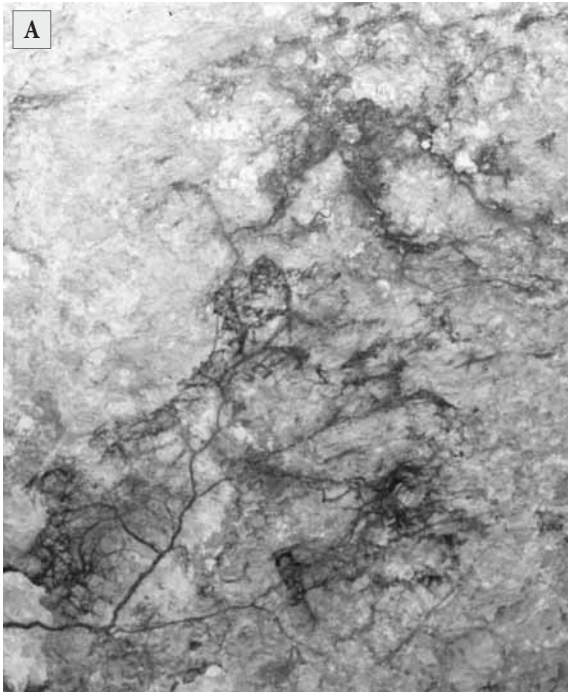
בסלע הרך, בשתי החזרות ובמועדי המדידה השונים, ערכי החידור היו גבוהים בתחילת ההרצה, וירדו באופן מעריכי עם הזמן עד להגעה לערכים קבועים בקירוב (איור 3). ירידה זו בערכי החידור במהלך ההרצה נבעה מהקטנה בגרדיאנט ההידראולי עם התקדמות חזית ההרטבה בסלע. כאשר חזית ההרטבה נמצאת מספיק רחוק מאזור החדרת המים לסלע, הגרדיאנט המטריצי שואף לאפס, וערכי החידור שואפים לערך קבוע השווה בקירוב למוליכות ההידראולית ברוויה של גוף הסלע. מכאן ניתן לקבוע, שערכי המוליכות ההידראולית ברוויה של הסלע הרך נעו בין 63 ל-96 מ"מ/שעה בקירוב. ערכי מוליכות ההידראולית אלו הם גבוהים יחסית ומתאימים לקרקעות מנוקזות ובעלות כושר הולכה גבוה יחסית. בסלע הנקבובי, לעומת זאת, ערכי החידור השתנו במעט עם הזמן, וערכי החידור הקבועים שהתקבלו היו בין 4 ל-8 מ"מ/שעה (איור 3).

ערכי תכולת הרטיבות המשקלית והנפחית בשלושת סוגי הסלע השונים, שנמדדו בשדה יומיים לאחר סופת גשם של 25 מ"מ באזור רמת הנדיב, מובאים בטבלה 2. תכולת הרטיבות בסלע הרך היתה הגבוהה ביותר ובסלע הקשה הנמוכה ביותר (טבלה 2). הבדלים אלו בתכולת הרטיבות בשלושת סוגי הסלע נבעו, כנראה, מההבדלים בערכי החידור (איור 3), בנפח הנקבובים הכולל (טבלה 2) ובהתפלגות גודלם בסלעים אלו. החדירות הגבוהה ואחוז נפח הנקבובים הגדול בסלע הרך אפשרו חדירה רבה יחסית של מי גשמים ואגירתם בסלע זה. לעומת זאת, בסלע הנקבובי והקשה, החדירות הנמוכה יחסית שלהם ואחוז נפח הנקבובים הקטן הקטינו את חדירת מי הגשמים לתוך גוף הסלע ואת כמות המים שנאגרה בהם.

מתוצאות התכונות הפיסיקליות של הסלעים שנבחנו (טבלה 2 ואיורים 2 ו-3) ניתן להסיק, שבמהלך סופת גשם באזור עם מחשופים של סלע קשה, מרבית הגשם אינו חודר לגוף הסלע, עקב ערכי החידור הנמוכים מאוד שלו. במקרה זה, מי הגשמים זורמים כנגר עילי על פני הסלע לעבר סדקים

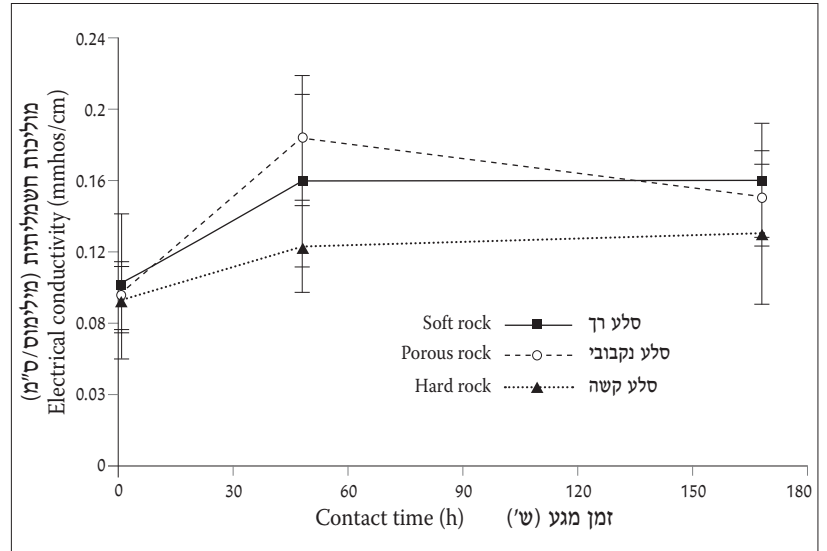
איור 3: ערכי חידור של הסלע הרך והסלע הנקבובי בשלושה תאריכים שונים בחזרה הראשונה (קו רציף) ובתאריך אחד בחזרה השנייה (קו מקווקו) כתלות בזמן ההרצה
Fig. 3: Infiltration rate of the soft rock and porous rock in three dates for the 1st replicate (solid line) and in one date for the 2nd replicate (dashed line) as a function of the running time





איור 4: ערכי המוליכות החשמלית בתמיסה עם הסלע הרך, הנקבובי והקשה וקשה כולות בזמן המגע (הקווים האנכים מהווים את סטיית התקן)

Fig. 4: Electrical conductivity values of the solution with the soft, porous and hard rock as a function of the contact time (bars indicate standard deviation)



איור 5: התפתחות שורשים בסלע רך (A) ובחלל קארסטי ובסדקים בסלע קשה (B)

Fig. 5: Root development in soft rock (A) and in karstic sinkhole and cracks in hard rock (B)

מובהקים (איור 4). ערכי ה-EC בסלעים ובזמני המגע השונים היו נמוכים, > 0.16 מילימוס/ס"מ, כלומר מתחת לסף הפגיעה האוסמוטית של מרבית הצמחים היס-תיכוניים.

התפתחות שורשים בסלע מותנית בשני תנאים הכרחיים: (1) הימצאות מים זמינים לצמח; (2) יכולת השורש להתגבר על החוזק המכני של הסלע. במדידות של תכולת השורשים בסוגי הסלע השונים, שנדגמו מאזורים שונים ברמת הנדיב המכוסים בחורש טבעי, לא נמצאו שורשים בכל הדגימות שנאספו מהסלע הנקבובי ומהסלע הקשה, בעוד שבדגימות של הסלע הרך, משקל השורשים (אחוז ממשקל הסלע) נע בין 1.3% ל-15.9%, עם ערך ממוצע של 7.1%.

נראה, שהחוזק המכני הרב של הסלע הקשה לא אפשר את חדירת השורשים לתוך הסלע, ואילו בסלע הנקבובי המכיל נקבובים רבים יחסית, חוסר הרציפות בין הנקבובים ואי-יכולת השורשים לעבור בתוך החומר הסלעי הקשה יחסית שבין הנקבובים מנעו את התפתחותם בסלע. לעומת זאת, בסלע הרך, החוזק המכני הלא רב שלו, יחד עם תכולת הרטיבות הגדולה והזמינה יחסית שנאגרת בו (טבלה 2 ואיור 2), אפשרו, כנראה, את חדירת השורשים ואת התפתחותם בו. כמות השורשים הממוצעת הגדולה יחסית בסלע הרך, 7.1% ממשקל הסלע, מורה על כך, שסלע זה יכול להוות בית גידול נוח לשורשים.

מהתכונות הפיסיקליות של סוגי הסלע השונים ברמת הנדיב ומתצפיות שנעשו באזור נמצא, שניתן לחלק את התפתחות השורשים באזור סלעי לשני מודלים עיקריים: (1) התפתחות שורשים בתוך גוף הסלע – במודל זה, חדירת השורשים אפשרית לתוך גוף הסלע (איור 5A), והתפתחותם

- בר, י'. (1988). הגיאולוגיה של רמת הנדיב. דו"ח מחקר מס' 1. החברה להגנת הטבע ויד הנדיב.
- הר, נ'. (1998). מסלע וקרקע כגורם אקולוגי של תפוצה והתפתחות ביער אלון התבור באזור אלונים-שפרעם. עבודת גמר לתואר מוסמך, הפקולטה לחקלאות ברחובות, האוניברסיטה העברית בירושלים.
- כהן, ע' ושרבני, נ'. (1964). ניצול המים על ידי גפנים מתוך קירטון. כתבים י"ד: 225-231.
- קפלן, מ'. (1989). קרקעות רמת הנדיב. דו"ח מחקר מס' 2. החברה להגנת הטבע ויד הנדיב.
- רבינוביץ' וין, א'. (1979). סלע המצע כגורם הקובע את תכונות הקרקע והרכב חברות הצמחים בגליל. עבודת דוקטורט, המחלקה לבוטניקה, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- רבינוביץ' וין, א'. (1986). סלע-קרקע-צומח בגליל. הוצאת הקיבוץ המאוחד ורשות שמורות הטבע.
- קשא, א'. (1966). הגיאולוגיה של הכרמל המזרחי והדרום מערבי. עבודת דוקטורט, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- Jones, D.P. & Graham, R.C. (1993). Water-holding characteristic of weathered granitic rock in chaparral and forest ecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 256-261.
- Herr N., Singer, A., Rivov, Y. & Sass, E. (1999). *Rock and soil as an ecological factor in Quercus ithaburensis forest in Alonim-Shfaram region*. Israel Society for Ecology and Environmental Quality Sciences, 7th international conference, Jerusalem. Scientific program and abstract, p. 38.
- Schiller, G., Cohen, S., Unger, E.D., Moshe, Y. & Herr, N. (2007). Estimating water use of sclerophyllous species under East-Mediterranean climate. III. Tabor oak forest sap flow distribution and transpiration. *Forest Ecology & Management*. 238: 147-155.
- Sternberg, P.H., Anderson, M.A., Graham, R.C., Beyers, J.L. & Tice, K.R. (1996). Root distribution and seasonal water status in weathered granitic bedrock under chaparral. *Geoderma*. 72: 89-98
- Zwieniecki, M.A. & Newton M. (1995). Root growing in rock fissures: Their morphological adoption. *Plant and Soil*. 172: 181-187.

מפתח מונחים

- אקוויפר - שכבה או יחידת סלע תת-קרקעית המכילה או מוליכה מים.
- גיר - סלע משקע משובכ הבנוי בעיקר מהמינרל קלציט (CaCO_3).
- גרדיאנט הידראולי - גרדיאנט הנוצר מהפרשי פוטנציאלי מים בנקודות שונות במרחב והגורם לתנועתם.
- דולומיט - סלע משקע הבנוי בעיקר מהמינרל דולומיט (Ca, MgCO_3).
- חוואר - סלע הבנוי בחלקו הגדול מחרסית ובחלקו האחר ממינרלים קרבונטיים.
- טוף - סלע וולקני הבנוי בעיקר מחלקיקי אפר (זכוכית) וולקנית.
- פוטנציאל מטריצי - פוטנציאל מים בתווך נקבובי הנובע מכוחות תאחיה בין מולקולות המים ודופן הנקבובים.
- קארסט - שם כולל לתופעות בלייה של סלעים שמקורן בהמסה של מינרלים על-ידי מי גשם או מי תהום.
- קירטון - סלע משקע ימי רך יחסית הבנוי בעיקר משלדים גיריים של בעלי חיים מיקרוסקופיים.
- קלקרניט - סלע משקע גירי עם מרקם חולי.

בסלע תיקבע בעיקר על פי מצב המים וחומרי ההזנה בו. מודל זה של התפתחות שורשים אופייני בסלעים בעלי חוזק מכני קטן יחסית, כגון חוואר, חוואר טופי וקירטון; (2) התפתחות שורשים בסדקים גדולים ובחללים קארסטיים האופייניים לסלעים קשים, כגון גיר ודולומיט. חללים אלו יכולים להתמלא בחלקיקי סלע וקרקע הנסחפים לתוכם (5B). במקרה זה, התפתחות השורשים מוגבלת לחללים אלו (איור 5B), ומידת התפתחות הצומח תלויה ביכולת של החלל להוות מקור של מים וחומרי הזנה המספיקים להתפתחות הצומח.

רבינוביץ' וין (1986) ו-Heer et al. (1999) קבעו, שבאזורים עם קרקע רדודה המתפתחת על סלע תשתית, הצמחים מפתחים שורשים בקרקע הרדודה ובכיסוי קרקע המוקפים בסלע, ואין חדירה והתפתחות שורשים משמעותית בתוך גוף הסלע. רבינוביץ' וין (1986) קבעה, שהשפעת סוג סלע התשתית על התפתחות הצומח נובעת בעיקר מהשפעתו על התכונות הכימיות וההידראוליות של הקרקע המתפתחת ממנו. לעומת זאת, Heer et al. (1999) מצאו, שיחסי הגומלין שבין הצמח ומערכת קרקע/סלע נובעים גם מההבדלים בקיבול ובתאחיזת המים בסוגי הסלע השונים ומהיכולת שלהם להעביר את המים שנאגרו בהם לקרקע שבה נמצאים מרבית השורשים. במאמר הנוכחי נמצא, שהשפעת סוג סלע התשתית על הצומח נובעת גם מהתכונות הפיסיקליות וההידראוליות של הסלע, המשפיעות על יכולתו של הצמח לפתח שורשים בתוך הסלע ולקלוט את המים הנאגרים בו. במקרה זה, סלע תשתית רך יכול לשמש כבית גידול לצמח, נוסף לקרקע.

קפלן (1989) מצא, שאזור הגבול שבין הסלע הגירי לבין הטוף החווארי ברמת הנדיב מאופיין בעצים מפותחים הגדלים באזור הטוף החווארי. התפתחות זו של העצים ניתנת להסבר בכך, שמי הגשמים היוורדים על משטחי סלע הגיר אינם חודרים לתוך הסלע, עקב ערך החידור הנמוך מאוד שלו. מים אלה ניגרים על פני משטחי הסלע לעבר מחשופי הטוף החווארי, חודרים אליו ונאגרים בו. כתוצאה מכך, החוואר הטופי אוגר מים ממי גשמים היוורדים עליו וגם ממי הנגר הניגרים אליו מסלע הגיר. כמות מים זו, הנאגרת בסלע החווארי, יחד עם יכולת השורשים לחדור ולהתפתח בתוכו, מאפשרים גדילת עצים גדולים ומפותחים באזורים אלו.

הבעת תודה

עבודת מחקר זו מומנה על ידי פרויקט רמת הנדיב המשותף ליד הנדיב ולחברה להגנת הטבע.

מקורות

- בר, י'. (1974). חקר מנגוני המלחה במעיינות התנינים. דו"ח תה"ל 01/74/36.