

ניר הר

מחלקת יער, מרחב צפון, קק"ל

אורי שני

המחלקה לקרקע ומים, הפקולטה לחקלאות, האוניברסיטה העברית בירושלים

יוסי ריוב

המכון למדעי הצמח וגנטיקה בחקלאות ע"ש רוברט ה. סמית, הפקולטה לחקלאות המזון ואיכות הסביבה, האוניברסיטה העברית בירושלים

מאמר זה עבר שיפוט עמיתים

ציטוט מומלץ

הר נ, שני א וריוב י. 2016. הדינמיקה של משק המים במערכת הסלע-קרקע-עץ ביער-פארק של אלון התבור ובחורש של אלון מצוי. *אקולוגיה וסביבה* 7(1): 52–64.



יער-פארק של אלון התבור ברמת מנשה | צילום: ניר הר

הדינמיקה של משק המים במערכת הסלע-קרקע-עץ ביער-פארק של אלון התבור ובחורש של אלון מצוי

28 במרץ, 2016

גיליון אביב 2016 / כרך 7(1)

[חזית המחקר](#)

על קצה המזלג

- שינוי האקלים החזוי יקשה על הישרדות עצים, כולל עצים מרכזיים בנוף, כגון מיני האלון הנפוצים בארץ – אלון התבור והאלון המצוי.
- יש צורך בהבנה מעמיקה של התפתחות תצורות הצומח בארץ ושל המכלול השלם של תהליכים במשק המים שבבסיסה של המערכת האקולוגית.
- במחקר נמצא הקשר בין תכונות הקרקע והסלע, תנועת המים מהסלע או מהקרקע לעץ, והשימוש במים בבתי הגידול של יער אלון התבור ושל חורש האלון המצוי.
- שינויים עונתיים ורב-שנתיים במאזן המים בבית הגידול נמצאו כגורם העיקרי המשפיע על התפוצה ועל ההתפתחות של שני מיני האלון בכלל, ועל התהוות פארק של אלון התבור וחורש אלון מצוי באזור אלונים-מנשה, בפרט.

המערכת

תקציר

מיפוי צומח וחקר סביבות הגידול של טיפוס צומח נערכים בארץ ובעולם. כאן נחקר נדבך נוסף. מטרת המחקר היו הבנת התהליכים והיחסים ההדדיים הפועלים בין רכיבי מערכת הסלע-קרקע-מים-צומח, מציאת שטפי המים ברכיבי המערכת ואף חישוב מאזן המים הכולל. המבנה המרחבי של מערכת הסלע-קרקע נלמד, נבדקו תכונות רכיביה, ותכולת הרטיבות נמדדה ברשת מדידות תלת-ממדית צפופה במשך ארבע שנים. בו-בזמן נמדדו הדיות ומתח המים של העצים. נמצא, שהגורמים העיקריים המשפיעים על תפוצת הצומח ועל פעילותו באזור אלונים-מנשה הם משק המים בכללותו והדינמיקה שלו במערכת הסלע-קרקע-עץ. עצי אלון התבור ביער הפארק בגבעות אלונים-מנשה גדלים בכיסי קרקע בסלעי קירטון. גשמי החורף מחלחלים בסלע באטיות ומצטברים בעומק של 1.5–3 מטר. באביב העץ קולט מים מכיס הקרקע. במהלך הקיץ נעים המים, שנאגרו בסלע הנקבובי, בתנועה נימית אל כיס הקרקע ואל השורשים. האלון המצוי, הגדל בחורש באותו אזור, מעמיק שורש בסדקים של קירטון רך. החלחול כאן מהיר ומעמיק יותר, והמים נקלטים ישירות מהסלע. הדיות באלון התבור מואץ מתחילת הבלבול במחצית פברואר ועד לתחילת מאי. מתח המים בקרקע ובעץ עולים, הפיוניות נסגרות חלקית בצהריים, קליטת המים פוחתת, והדיות מתייצב. מסוף יוני ובמהלך הקיץ פוחת הדיות, עד דעיכתו עם השלכת באמצע החורף. האלון המצוי ירוק-העד קולט מים בקצב נמוך בחורף, הקצב מואץ עד תחילת מאי, ומיד לאחר מכן חלה ירידה דרגתית עד החורף. בשנים שחונות הקליטה קטנה, ובשנים גשומות מתחדש מאגר המים בסלע, ומאפשר קליטה של מים בשנים השחונות העוקבות. על בסיס המחקר ניתן להעריך את מאזן המים של היערות והחורשים בארץ בהתאמה לתנאי הסביבה שהם מצויים בהם, ואת יכולת ההישרדות במצב של התייבשות עתידית בעקבות שינוי האקלים. בתי גידול על קירטון נקבובי מאפשרים עמידות גדולה יותר בתקופות יובש ארוכות.

מבוא

התאמתם של מיני צמחים לסביבתם נבחנה בעולם [45,35] ובארץ. נמצא קשר לגורמי אקלים [32,14], למפנה, למיקרו-אקלים [23,29,39] ולסודות חיוניים או מזיקים [24]. נמצאו התאמה של מינים וחברות צמחים לתצורות גאולוגיות ולשכבות הסלע [5,24]. התאמה של צמחי חורש ובתה לעומק הקרקע ולסדקי סלע [20,17], ותועדה חדירת שורשים של צמחי חורש לסדקי סלע קירטון [34].

הדיות (transpiration) ומתח המים של עצי חורש ויער טבעיים ונטועים נמדדו בעולם [35,28] ובארץ [41,36,26,14]. תואר מנגנון בקרה להפחתה של קליטת מים במצבי עקה, בעיקר במינים ים תיכוניים, באמצעות סגירת פיוניות והקטנת מוליכות המים בצינורות העצה [35,33,28]. שחורי [25] מדד את הרטיבות בקרקע והדיות בעצי יער וחורש בהשוואה לשטח ללא עצים, ומצא שעצים קולטים מים יותר מאשר הצומח הנמוך.

קליטת מים מסלע קירטון נמצאה בארץ אצל בני שיח הגדלים ישירות בתוך סדקי סלע [46], ואצל אורנים טבעיים ונטועים [18]. באנגליה תוארה תנועת מים מקירטון נקבובי אל הקרקע והצמחים לאחר תחילת ההתייבשות של הקרקע בגידולי שדה ללא השקיה, הגדלים בקרקע רדודה מעל קירטון [44,43,30]. הקירטון הוא סלע נקבובי רך, שנוצר משקיעה של מאובנים מיקרוסקופיים גירניים בים העמוק, שנקבובים מיקרוסקופיים-נימיים נותרו ביניהם [15]. כשהסלע נרטב, ההתנגדות נחלשת [2,15] ושורשים יכולים לחדור אליו בסדקי סלע צרים [34]. המוליכות ההידראולית של הקירטון נמוכה מאוד, וקבוע המוליכות בסלעי קירטון בארץ היא כ-0.2 מ"מ ליום [6,4]. עם זאת, מתח היניקה מגביר את שטף המים על פי חוק דרסי (ראו [נספח 1א](#)). המתח נוצר כתוצאה מהתייבשות הקרקע, הנגרמת בעיקר מקליטת מים על-ידי צמחים. נוצר מפל מתחים (הפרשי פוטנציאלים) שמניע את שטף המים מהסלע לקרקע ולשורשים [10,6]. גם תנועת המים בצינורות העצה בצמח מתאפשרת כתוצאה ממתח המים הנוצר בו בתהליך הדיות, וממפל המתחים מהעלים ועד השורשים והקרקע.

מטרות המחקר

- לימוד **שינויי הרטיבות ושטפי המים** בסלע, בקרקע ובצמח במהלך השנה בבתי הגידול של יער-הפארק של אלון התבור (*Quercus ithaburensis*) והחורש של האלון המצוי (*Quercus calliprinos*) באזור אלונים-מנשה, וחישוב חלקם היחסי של רכיבי מאזן המים בבתי הגידול.
- הבנת **ההליכים, היחסים ההדדיים והמערכת הדינמית**, הפועלים בין מרכיבי מערכת הסלע-קרקע-מים-צומח, והשפעתם על התפתחות תצורות הצומח ועל הגידול המיטבי של המינים העיקריים ביער ובחורש. גיבוש העקרונות של תנאי הגידול ביער ובחורש, שניתנים להשלכה לבתי גידול דומים באזור הים תיכוני בישראל, והבנת משמעות השפעתו של רצף שנים שחונות במצב של התייבשות אקלימית עתידית על הצומח.



גור אלון התבור בגבעת חציר על סלעי הנארי הבולטים על פני השטח / צילום: ניר הר

חשיבות המחקר

במאמר מתוארת מערכת משולבת של סלע-קרקע-מים-עץ הפועלת כמערכת דינמית המשפיעה על כל מרכיביה ומושפעת מהם הדדית, כתוצאה משילוב התכונות הפיזיקליות והמבניות של מערכת הסלע-קרקע והתכונות האנטומיות-מורפולוגיות-פיזיולוגיות של העצים. מתקבל הסבר מקיף של התאמת הצומח לבית גידולו, הנותן כלים להבנה של בתי גידול נוספים ולהערכה של תגובת המערכת למצבים של שינויי אקלים אפשריים. ככל הידוע, לא נערך מחקר משולב מעין זה במערכות של צומח טבעי בעולם.

הר [10,6] חקר גדילה של עצי אלון התבור בכיסי קרקע בקירטון, ומצא שמשק המים במערכת זו משפיע על הקיום ועל ההתפתחות של העצים במידה גדולה בהרבה מאשר גורם ההזנה, שנבחן גם הוא. בהמשך לכך, נעשה מיפוי השוואתי של תפוצת הצומח באזור אלונים-מנשה בהתאמה לתפוצת המסלע תוך כדי לימוד ותיאור של בתי הגידול [12,7]. משק המים נלמד ביער אלון התבור ובחורש של אלון מצוי, שהם תצורות הצומח הבולטות באזור. משק המים במערכת הסלע-קרקע-עץ נתן בסיס להבנת קיומם של העצים באותם בתי גידול, והיבט זה מוצג במאמר הנוכחי.

שטח המחקר

גבעות אלונים ורמת מנשה נמצאות בתחום הקער הגאולוגי (הסינקלינה) של אלונים-מנשה [12,7]. הצומח כולל את כל תצורות הצומח, מעשבונים ועד יער-פארק וחורש. מערך המסלע שייך ברובו לחבורה גאולוגית אחת. המערך כולל מגמות של שינויי

מסלע הדרגתיים לצד מעברים חדים שיוצרים קווי שבר, וכך מתאפשרת השוואה בין טיפוסי צומח ובתי גידול שונים באותו מיקום בתנאי אקלים אחידים בקירוב. האזור מתאפיין בגבעות נמוכות עד גובה של 400 מטר. טווח המשקעים באזור הוא 550–650 מ"מ בשנה^[7], וחלק ניכר מהם הופך לנגר עילי הזורם לערוצים כתוצאה מהחלחול המועט בסלעי הקירטון^[3,13].

ער-הפארק של אלון התבור הוא תצורת הצומח הבולטת באזור^[19,7,1]. הוא גדל על גבעות קירטוניות של תצורות עדולם ותמרת (חבורת עבדת, אאוקן תחתון-תיכון) המכוסות בנארי, עם קרקע רנדזינה חומה רדודה וכיסי קרקע פזורים שעומקם עד 1.5 מטר^[12,7,6]. שורשי העצים נמצאים רק בכיסי הקרקע. החורש של האלון המצוי גדל באזור זה על קירטון רך ונקבובי יותר (תצורת מראשה, אאוקן תיכון). שורשי האלון המצוי ומלווייו חודרים לסדקי סלע צרים עד לעומק של מספר מטרים^[38,7], וכך הם יכולים לנצל את הממד האנכי של הסלע וליצור חורש צפוף.

שיטות

לימוד, ותיאור של תת-הקרקע

נעשו במאות חציבות בצדי דרכים ובאתרי בנייה בתחומי היער והחורש באמצעות רישום וצילומים. בתחנות המדידה נעשתה סריקה צפופה שתי וערב באמצעות מכ"ם חודר קרקע (GPR דגם Sir-10 של חברת GSSI, USA) עם אנטנות בתדרים של 300 ו-500 מגה-רץ. פענוח הסריקות נעשה באמצעות היישומים הגאופיזיים Focus-ו-pg2 (פרדיים, הרצליה). על בסיס הסריקות ובעזרת המאפיינים של גלעיני הסלע שהוצאו בקידוחים וצילומי וידאו שבוצעו בתוכם, נעשתה הדמיה של מבנה תת-הקרקע בתחנות המדידה.



צילוח אלון מצוי בגליל / צילום: ניר הר

תחנות המדידה

שתי תחנות המדידה הראשיות הוקמו ביער-הפארק של אלון התבור באלון הגליל ובחורש של אלון מצוי בתמרת. לאחר לימוד מערכת תת-הקרקע בתחנות המדידה כמתואר לעיל, נערכו בהן 75 קידוחים בקוטר של 2 אינצ'ים בכל אחת, במרווחים של 2X2 מטר לעומקים של 4–8 מטר. מרבית הקידוחים נעשו בשיטת הקשה באמצעות מכונת קידוח זחלילית קלה בעלת מגדל קידוח

מתקפל (שיכול לעבור דרך החורש), שמונעת בלחץ אוויר. חלק מהקידוחים נעשה כקידוחי גלעין, עם מכשיר קידוח חשמלי המצויד במקדח חלול בעל שפת יהלום בקוטר של 3 אינצ'ים. הקידוחים דופנו בצינורות פיו-סי. נוסף על תחנות אלה, היו עוד שש תחנות משנה שפעלו בתקופות מסוימות במהלך המחקר.

מדידות הריביות והטמפרטורה של הסלע והקרקע בקידוחים

בכל הקידוחים נערכו אחת לחודש מדידות במשך ארבע שנים במרווחי עומק של 25 ס"מ באמצעות מפזר ניטרונים (Troxler 4301 עם מקור רדיואקטיבי של Am-Be241, Troxler, USA). בכל מועד מדידה התקבל שריג תלת-ממדי של נתונים בכ-1,500 נקודות דגימה בכל תחנה ראשית. נוסף על כך, בארבעה קידוחים בכל תחנה הוצבו בלוקי גבס (Watermark, Cambel, USA) להדמיית רטיבות ומתח מים וחיישני טמפרטורה (צמד-חומני של חוטי נחושת וקונסטנטן – thermocouples) בעומקים של 20 ו-40 ס"מ ו-1, 2, 3 ו-4 מטר בתוך יציקות גבס. היציקות נעשו בקידוח והופרדו בקטעי בטון, כך שהיו בשיווי משקל עם מתח המים ועם הטמפרטורה של הקרקע והסלע. נערך רישום רציף של המדידות במשך ארבע שנים (2001–2004) באמצעות אוגר נתונים (Campbell, USA) בעל מפצל רב-ערוצי. מדידות של רטיבות וטמפרטורה בעומק של 20 ס"מ נערכו במשך 11 שנים (1994–2004) (תחילת התקופה נדונה בפרסומים קודמים [6,10]).

נוסף על כך, נערכו בקידוחים מדידות של רטיבות ונתונים גאופיזיים עם מכ"ם אנטנות בור (Pulse EKKO, 100 Borehole Antennas (Sensors and Software, Canada).

מדידות מטאורולוגיות

בשתי התחנות הראשיות נמדדו כמות הגשם, עוצמת הרוח, קרינת השמש, הטמפרטורות ולחות האוויר באמצעות מכשירים וחיישנים ייעודיים, שנרשמו באופן רציף באותו אוגר נתונים. בחלק מהתקופה נמדדו ברציפות גם טמפרטורות העלים באמצעות צמד-חומני.

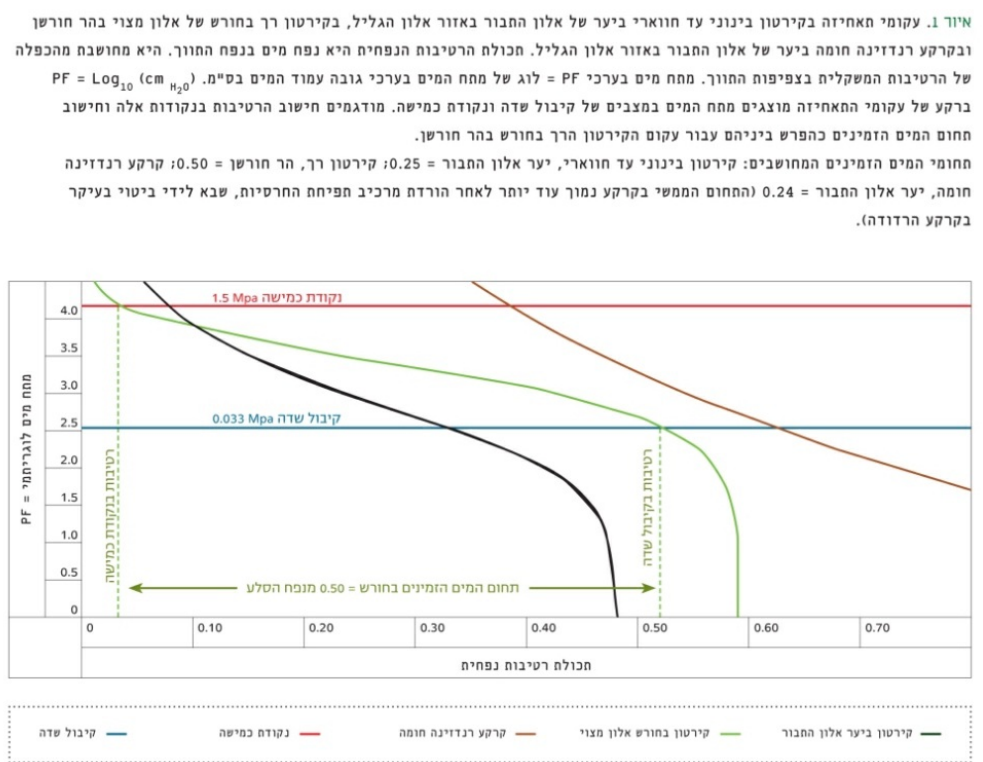


ורש אלון מצוי הגדל על גבי סלע קירטון רך של תצורת מראשה המכוסה נארי, בגבעות חורשן | צילום: ניר הר

יול מערכות המדידה ואפיון תכונות הסלע והקרקע

לאחר סיום המדידות הוגדר שטח בין ארבעה קידוחים (2X2 מטר) שנערכו בו מדידות מפורטות נוספות באמצעות מפזר הניטרונים, מכ"ם אנטנות הבור והמכ"ם חודר הקרקע (GPR). לאחר מכן נחצב בור באותו מקום באמצעות מחפרון לעומק 3.5 מטר. הסלע נדגם בצמידות לנקודות המדידה, ומבנה חתך הסלע-קרקע תואר בפירוט. הריכוזיות בדגימות נמדדה במעבדה באמצעות תנור ייבוש^[16]. כיול מפזר הניטרונים נעשה באמצעות שונות משותפת (covariance) של נתוני הריכוזיות בסלע בעזרת נתונים של משרעת הגלים של מכ"ם אנטנת הבור. בלוקי הגבס כוילו בנפרד בעזרת קרקע ברמות שונות של ריכוזיות וטמפרטורה. המכ"ם חודר הקרקע כויל בהשוואה למבנה חתך הקרקע-סלע ותכונותיו.

ל בסיס הדגימות עבור הכיול ודגימות של קרקע וסלע ממקומות נוספים, הוכנו עקומי תאחיזה (איור 1) באמצעות תא לחץ^[16] והיישום הממוחשב RETC^[42]. נבדקה צפיפות הסלע בשיטת הרגב^[16], ונבדקו ההרכב הכימי ואחוז השארית הבלתי מסיסה^[7]. קצב החידור בסלע נקבע על-ידי הצפת בור הכיול במים ומדידה של קצב הירידה של מפלס המים.



איור 1

עקומי תאחיזה בקירטון בינוני עד חווארי ביער של אלון החבור באזור אלון הגליל, בקירטון רך בחורש של אלון מצוי בהר חורשן ובקרקע רנדזינה חומה ביער של אלון החבור באזור אלון הגליל. תכולת הריכוזיות הנפחית היא נפח מים בנפח התווך. היא מחושבת מהכפלה של הריכוזיות המשקלית בצפיפות התווך. מתח מים בערכי $PF = \text{Log}_{10} (\text{cm H}_2\text{O})$ = לוג של מתח המים בערכי גובה עמוד המים בס"מ. מודגמים חישוב הריכוזיות בנקודות אלה וחישוב תחום המים הזמינים כהפרש ביניהם עבור עקום הקירטון הרך בחורש בהר חורשן.

תחומי המים הזמינים המחושבים: קירטון בינוני עד חווארי, יער אלון החבור = 0.25; קירטון רך, הר חורשן = 0.50; קרקע רנדזינה חומה, יער אלון החבור = 0.24 (התחום הממשי בקרקע נמוך עוד יותר לאחר הורדת מרכיב תפיחת החרסיות, שבא לידי ביטוי בעיקר בקרקע הרדודה).

מדידות פיזיולוגיות בעצים

מתח המים בעלים נמדד באמצעות תא לחץ (ארי, כפר חרוב) במספר מועדים לאורך היום במספר ימים לאורך השנה, קצב הדיות נמדד באופן רציף לאורך מספר שבועות בכמה תקופות בשיטת פולס החום [27], ומוליכות הנוף חושבה מחלוקה של נתוני הדיות בגירעון הלחץ באדי המים (VPD – Vapour Pressure Deficit) (ראו [נספח 1ב, ג1](#)). הדיות בעלים ומוליכות הפיוניות נמדדו באמצעות פורומטר (LI-1600, Licor, USA). נוסף על כך, נערך מעקב אחר השלכת, שהוערכה כאחוז העלווה הירוקה שנותרה במועדים שונים, ונעשתה הערכה של כמות הבלוטים.

מאזן המים

הקליטה חושבה מנתוני המדידות בעצים ומהמדידה בתת-הקרקע. החלחול חושב מהמדידות בתת-הקרקע. האידוי-דיות חושב על פי מודלים של ^[8] FAO על בסיס הנתונים המטאורולוגיים והעיתוי של לבלוב האלונים ושל צימוח העשבוניים. נגר עילי הוא היתרה אחרי הפחתת כל הרכיבים הללו מכמות המשקעים.

תוצאות

טמפרטורות האוויר, הסלע והקרקע

טמפרטורת האוויר נעה בין מינימום של 5 מעלות צלזיוס בינואר עד מקסימום של 35 מעלות ביולי. טמפרטורות המינימום והמקסימום של תת-הקרקע חלות מאוחר יותר, וככל שמעמיקים בקרקע ובסלע הן מתונות יותר, והתנודות שלהן קטנות יותר. בעומק של 1.5 מטר, שהוא עומק השורשים של אלון התבור, תנודת הטמפרטורה השנתית הייתה כ-8 מעלות (17–25 מעלות). בעומק של 4 מטר, עומק השורשים העיקריים של אלון מצוי, התנודה השנתית הייתה כ-3 מעלות בלבד, המינימום היה 19.5 מעלות ביוני, והמקסימום הגיע ל-22.5 מעלות באוקטובר-דצמבר. כלומר, קרירות יחסית בתחילת הקיץ וחמימות יחסית בחורף.

מבנה מערכת הסלע והקרקע, תכונותיה ותהליכים החלים בה

צפיפות ונקבוביות

קיימים הבדלים בתכונות הסלע שנגרמו כתוצאה משינויים בעומק הים במרחב ובזמן בעת היווצרותו [6, 7, 12, 15, 22]. צפיפות הקירטון הבינוני ביער אלון התבור היא 1.4–1.8 גרם לסמ"ק, ונקבוביותו היא כ-40%. בחורש של האלון המצוי קירטון לבן רך, שצפיפותו נמוכה והוא נקבובי יותר (ראו להלן). בשטחים העשבוניים הסלע מורכב מקירטון קשה עד אבן גיר בצפיפות של כ-2 גרם לסמ"ק.

מוליכות הידראולית ושטף מים

קבוע המוליכות ההידראולית (K) של הסלע בסביבת יער אלון התבור נמוך מאוד, כ-0.2 מ"מ ליום. הפרשי הפוטנציאלים הנוצרים בין סלע הנמצא בקיבול שדה לשורשים הנמצאים בקרקע מתייבשת, מאיצים את השטף, אולם גם כך תנועת המים בסלע לאורך מטר אחד עשויה להימשך מספר חודשים. התנועה האטית מאפשרת לעץ לנצל באופן הדרגתי את המים האגורים בסלע במהלך כל עונת הקיץ.

זמינות המים בסלע ובקרקע

הנקבובים הנימיים בסלע הקירטון דומים בקירוב בגודלם, ומתח מים מתון מאפשר קליטה של מרבית מי הגשם שנאגרו בסלע. הקירטון הנקבובי ביותר נמצא בחורש של אלון מצוי בהר חורשן, עם צפיפות של 1.2 גרם לסמ"ק ונקבוביות של 58% (ראו [איור 1](#)). ברוויה (מתח=0) הוא מכיל 58% מים (אחוז נפח). מים עודפים מחלחלים לעומק, והסלע מגיע לשיווי משקל של קיבול שדה בריביות של 53%. כשמתח המים השלילי גדל ל-(-1.5) מגה-פסקל, שמוגדר לרוב כנקודת הכמישה, נשארת בסלע רטיבות של 3%. לפיכך, תחום המים הזמינים שבין קיבול שדה ונקודת הכמישה הוא כ-50% מנפח הסלע. ביער של אלון התבור, שהקירטון נקבובי בו פחות והמרקם אחיד פחות, תחום המים הזמינים קטן יותר. ברנדזינה החומה החרסיתית שמעל הקירטון, הרטיבות גבוהה מהרטיבות בסלע בכל מתח נתון. בקיבול שדה הקרקע מכילה 62% רטיבות, אולם בנקודת הכמישה היא עדיין מכילה 38% מים שהצמח מתקשה לנצלם, ותחום המים הזמינים שלה הוא 24% בלבד.

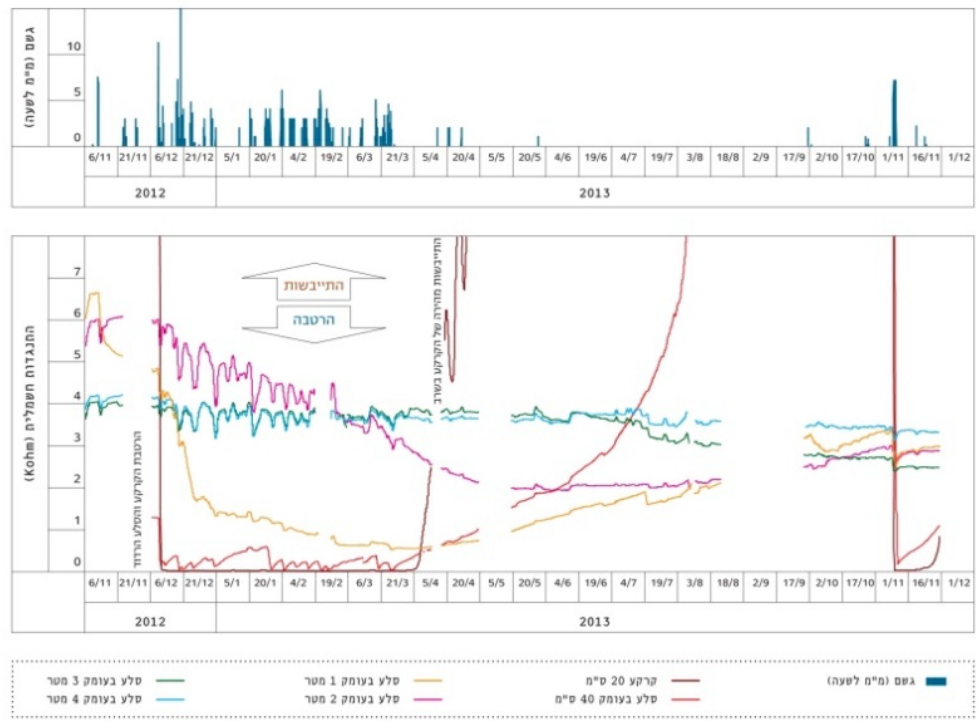
רטיבות הסלע והקרקע

מהלך רטיבות רציף

ערכי ההתנגדות החשמלית של הסלע והקרקע (ההתנגדות עולה כשהרטיבות יורדת), מוצגים באיור 2 בקרקע (20 ס"מ) ובחמישה עומקים בסלע (40 ס"מ, 1, 2, 3 ו-4 מטר). נמצא, שככל שמעמיקים, תנודות הרטיבות קטנות. הקרקע הרדודה נרטבת מיד בגשם הראשון ומתייבשת באופן מואץ לאחר הגשמים המשמעותיים האחרונים, כשגשמי האביב הקצרים רק מאטים את התייבשותה. הסלע בעומק של 40 ס"מ מתנהג באופן דומה, אולם לאט יותר. הסלע בעומק של 1 מטר נרטב בהדרגה במהלך החורף, ומתייבש בהדרגה במהלך הקיץ. בעומק של 2 מטר, ההרטבה וההתייבשות מתונות יותר. בעומקים של 3-4 מטר השינוי מועט. שיא הרטיבות בעומקים אלה (ההתנגדות הנמוכה) חל בסתיו עד תחילת החורף, והוא תולדה של מי החלחול של החורף הקודם שמגיעים לעומק זה באיחור של קרוב לשנה (חלחול של 3-4 מטר בכ-10 חדשים).

איור 2. התנגדות חשמלית בבלוקי גבס ביער אלון התבור באלון הגליל ב-2003, בקרקע ובחמישה עומקי סלע וגשם שעתי, המוצגת על אותו ציר זמן

ההתנגדות גבוהה יותר ככל כשרטיבות הקרקע נמוכה יותר. הקרקע נרטבה מידית עם הגשם המשמעותי הראשון, והתייבשה בשרב הראשון עם תום הגשמים. ניכר שככל שהשכבה עמוקה יותר, ההרטבה וההתייבשות אטיות יותר. הרטיבות בעומק הייתה יציבה, וחלחול מי הגשם הגיע לשם באיחור של כמעט שנה. החורף הראשון חל כשנה לאחר סיומה של תקופת בצורת ארוכה, והתנגדות הסלע הייתה גבוהה (רטיבות נמוכה יחסית). בעקבות הגשמים הרבים של שנת 2003, החורף של 2003/2004 החל בהתנגדות נמוכה יותר (רטיבות גבוהה).



איור 2

התנגדות חשמלית בבלוקי גבס ביער אלון התבור באלון הגליל ב-2003, בקרקע ובחמישה עומקי סלע וגשם שעתי, המוצגת על אותו ציר זמן

ההתנגדות גבוהה יותר ככל כשרטיבות הקרקע נמוכה יותר. הקרקע נרטבה מידית עם הגשם המשמעותי הראשון, והתייבשה בשרב הראשון עם תום הגשמים. ניכר שככל שהשכבה עמוקה יותר, ההרטבה וההתייבשות אטיות יותר. הרטיבות בעומק הייתה יציבה, וחלחול מי הגשם הגיע לשם באיחור של כמעט שנה. החורף הראשון חל כשנה לאחר סיומה של תקופת בצורת ארוכה, והתנגדות הסלע הייתה גבוהה (רטיבות נמוכה יחסית). בעקבות הגשמים הרבים של שנת 2003, החורף של 2003/2004 החל בהתנגדות נמוכה יותר (רטיבות גבוהה).

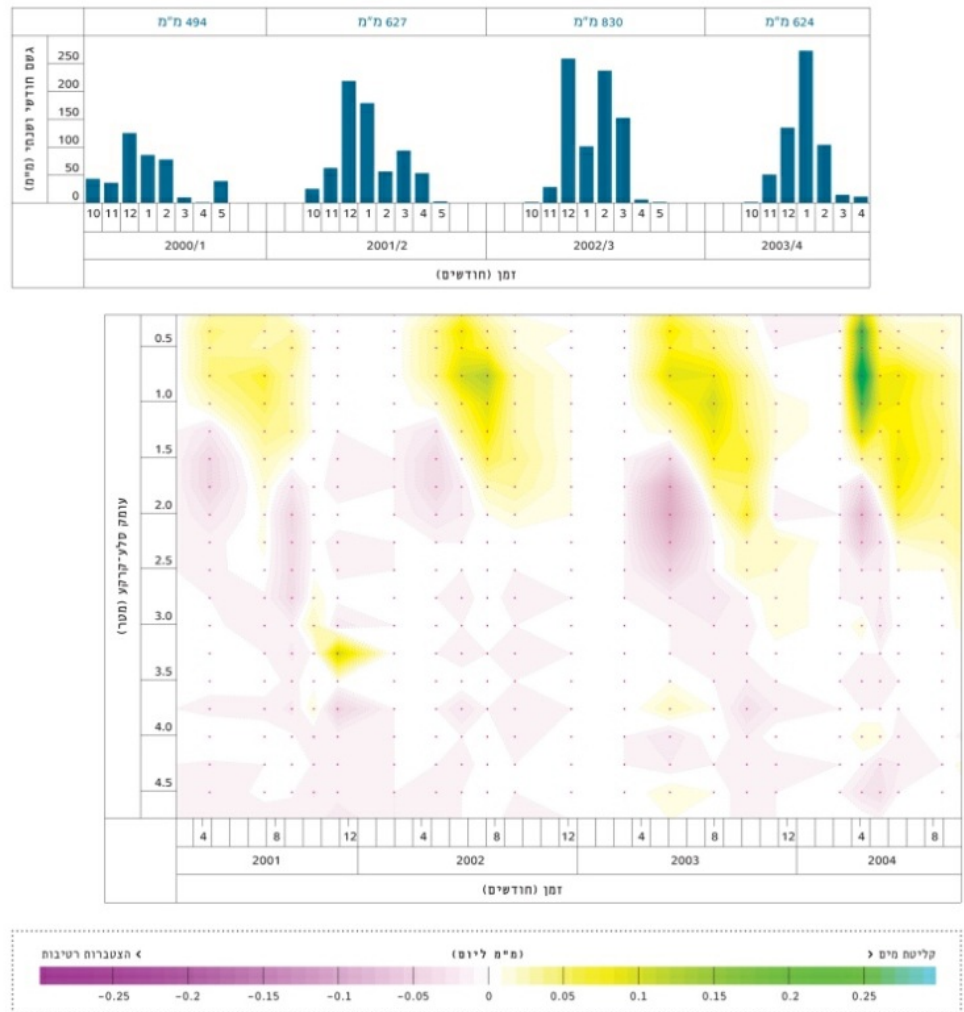
מגמות רב-שנתיות של אגירה וקליטה

תקופת האביב-קיץ של 2001 הייתה אחרונה ברצף של שנים יבשות (86% מהממוצע) (איור 3). 2002 הייתה גשומה יחסית (109%), 2003 גשומה במיוחד (144%) ו-2004 הייתה גשומה גם כן (108%). ביער אלון התבור הצטברה רטיבות בעיקר בחודשים אפריל-אוגוסט, בדרך כלל בין העומקים 120-220 ס"מ. ב-2003 הגיעה ההצטברות עד לעומק של 3 מטר, והייתה רבה יותר. ניתן לראות, שהגשם שירד בתחילת החורף חלחל באיטיות, והגיע לעומק ההצטברות כעבור כחצי שנה. הקליטה התחילה סמוך לפני השטח, גשמי האביב חלחלו עד לעומק של 50-100 ס"מ, ונקלטו תוך זמן קצר. בהמשך העמיקה הקליטה תוך הפחתת עוצמתה עד הסתיו. עומק הקליטה ועוצמתה תאמו את מידת ההצטברות שקדמה לה. ב-2004 ההצטברות המשיכה על בסיס גשמי השנה הקודמת, ובאביב חלה קליטת מים גבוהה במיוחד (איור 2 ואיור 3).

בחורש של האלון המצוי דגם האגירה והקליטה היה שונה. כאן המים חלחלו במהירות לעומק, הצטברו בכל החתך, והקליטה נעשתה במספר אופקים. גם כאן, השנה הגשומה במיוחד של 2003 התבטאה בהצטברות רבה של רטיבות בחתך הסלע.

איור 3. שינויי הרטיבות בעומק הסלע במהלך ארבע שנים בהתאמה לכמויות הגשם החודשיות והשנתיים ביער של אלון התבור באלון הגליל קווי המתאר מבטאים שינויי רטיבות במרווחים של 0.01 מ"מ ליום. גוונים הסגולים מציינים עלייה (הצטברות) ברטיבות, בערכים של מ"מ ליום ממקטעי עומק של 25 ס"מ. הגוונים הצהובים-ירוקים מציינים הפחתת רטיבות, כלומר קליטה על-ידי השורשים. הנקודות הסגולות הן נקודות הדגימה בעומק ובזמן.

כמויות הגשם ושינויי הרטיבות בסלע מוצגים על אותו ציר זמן. ניכר שהצטברות המים גדלה ומעמיקה ככל שכמות הגשם גדלה, וקליטת המים גדלה ומעמיקה בהתאמה. הצטברות הרטיבות בשנה גשומה במיוחד (2003) מאפשרת קליטת מים רבה בשנה שאחריה (2004).



איור 3

שינויי הרטיבות בעומק הסלע במהלך ארבע שנים בהתאמה לכמויות הגשם החודשיות והשנתיים ביער של אלון התבור באלון הגליל קווי המתאר מבטאים שינויי רטיבות במרווחים של 0.01 מ"מ ליום. גוונים הסגולים מציינים עלייה

(הצטברות) ברטיבות, בערכים של מ"מ ליום ממקטעי עומק של 25 ס"מ. הגוונים הצהובים-ירוקים מציינים הפחתת רטיבות, כלומר קליטה על-ידי השורשים. הנקודות הסגולות הן נקודות הדגימה בעומק ובזמן.

כמויות הגשם ושינויי הרטיבות בסלע מוצגים על אותו ציר זמן. ניכר שהצטברות המים גדלה ומעמיקה ככל שכמות הגשם גדלה, וקליטת המים גדלה ומעמיקה בהתאמה. הצטברות הרטיבות בשנה גשומה במיוחד (2003) מאפשרת קליטת מים רבה בשנה שאחריה (2004).

תנועת המים מהסלע לכיסי הקרקע

שורשי אלון התבור קלטו מים מתוך הרטיבות שהצטברה בסלע עד לעומק של 3 מטר, אולם השורשים של מין זה מגיעים לכיסי הקרקע רק עד לעומק של כ-1.5 מטר. כלומר, השורשים קולטים מים הנמצאים בסלע ממרחק של 1–2 מטר מהם (נספח 3). מפל הפוטנציאלים בין השורשים והסלע שמתחתם (מ-2) מגה-פסקל בסוף הקיץ ל-(-0.033) מגה-פסקל בקיבול שדה) מניע שטף מים אטי מהסלע אל כיסי הקרקע והשורשים.

תמונת הרטיבות המרחבית

מדידות הרטיבות שנערכו במערכת הקידוחים בשתי חלקות המחקר נתנו תמונה ארבע-ממדית – שני ממדי שטח, ממד עומק וממד זמן – של שינויי הרטיבות במהלך ארבע שנים. הצגת נתוני הרטיבות הנמוכים ביותר שהתקבלו בכל נקודה בנפח הסלע נותנת תמונת רקע שמשקפת הבדלים בתכונות הסלע בין הקידוחים (ראו נספח 4). העצים שהתבססו בסביבה זו התאימו את עצמם לתנאי השטח.

הדיות של עצי האלון

מהלך יומי של דיות ומוליכות הנוף

עם זריחת השמש הפיוניות נפתחות והעץ מתחיל לדיית. בו בזמן, עולה הגירעון בלחץ אדי המים (VPD) המניע את התהליך, ועוצמת הדיות עולה עד לשיא בצהריים (נספח 5). במצבי שרב עולה הגירעון, אבל הדיות מווסת כתוצאה מהפחתת מוליכות הנוף עקב המגבלות של קליטת מים מהקרקע, הפחתת ההולכה בעצה וסגירת הפיוניות כמנגנון בקרה [28, 33, 35]. במהלך הקיץ עולה הגירעון, מתחי המים עולים, ומוליכות הנוף פוחתת בהתאמה. קיים הבדל בבקרה של פרטים שונים. עצים "חסכניים" נשארים עם כמות מים רבה יותר במערכת הסלע-קרקע-עץ, ויכולים להמשיך לדיית באופן יציב יותר במהלך העונה.

המהלך העונתי של הדיות

אלון התבור נמצא בשלכת ובתרדמה בסוף החורף. במחצית פברואר בקירוב מתחיל לבלוב, המגיע לעלווה מלאה באפריל. באותו זמן, עולה גם גירעון הלחץ באדי המים, וקליטת המים על-ידי העצים גדלה בקצב מואץ התואם פונקציה מעריכית. מצאנו כי הדיות בשטח היער הגיע בתחילת מאי לשיא של כ-1.3 מ"מ ליום (איור 4), שהתבטא בכ-100 ליטר לעץ ליום (13 עצים לדונם בממוצע). במאי-יוני התייצבה הקליטה כתוצאה ממנגנון הוויסות, ובמהלך הקיץ חלה ירידה, עד לדעיכה באמצע החורף בזמן השלכת המלאה. בבתי גידול נחותים ובשנים שחונות, התחילה הירידה בקליטה מיד לאחר השיא בתחילת מאי.

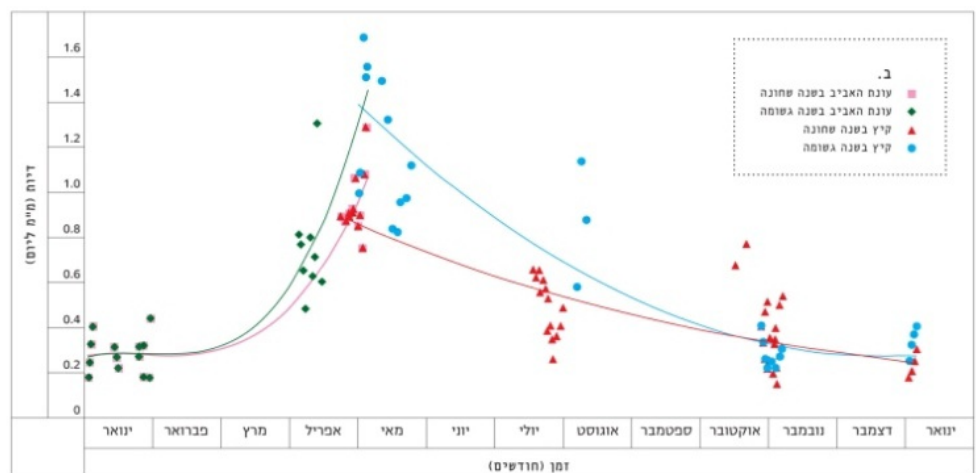
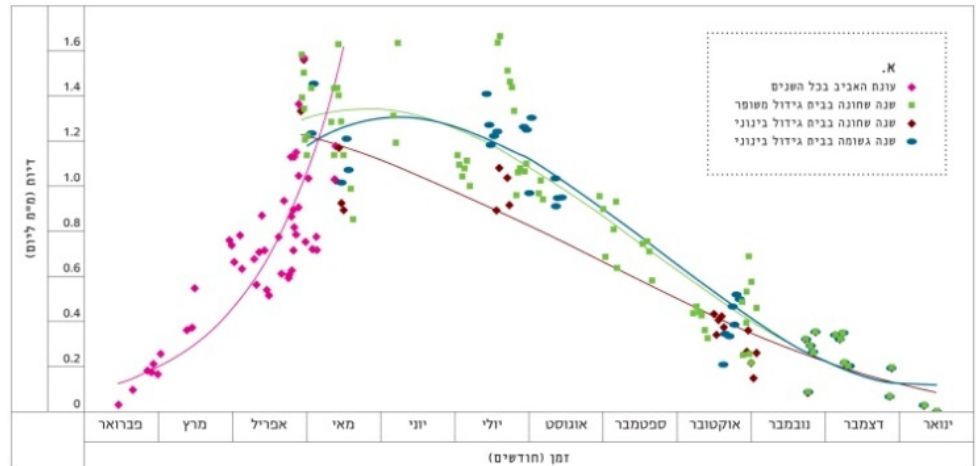
האלון המצוי ירוק-העד מדיית גם בחורף, אך בעוצמה נמוכה, ובאביב מואצת קליטת המים. גם כאן העלייה נבלמה בתחילת מאי, אולם במין זה הירידה בקליטה התחילה מיד ללא התייצבות. ההבדל בין השנים מתבטא בשיא הקליטה: כ-1.35 מ"מ ליום בשנים גשומות ו-0.85 מ"מ ליום בשנים שחונות.

איור 4. מודלים של המהלך העונתי של הדיות

מוצגות רגרסיות לפי עונות, רמת הגשם השנתית ובתי גידול. נבחרו הפונקציות בעלות המתאמים הגבוהים ביותר, וכולן התקבלו במובהקות גבוהה. שנים 1996 ו-2001 הוגדרו כשנים שחונות, 2003 כשנה גשומה, ו-2002 כשנה בינונית, שנחשבה צורפה הן לשנים השחונות הן לשנה הגשומה. כל נקודת נתונים היא על פי מדידה של שמונה עצים ביום אחד.

א. יער אלון החבור – תחנה אג הוגדרה כבית גידול משופר לאור המדידות, ואג 2 כבית גידול בינוני. באביב בכל השנים הייתה עלייה מהירה. בתחילת מאי התהליך נבלם. בבית גידול משופר ובשנה גשומה חלה התייצבות לפני הירידה בדיות. בשנה שחונה בבית גידול בינוני הירידה מתחילה מיד.

ב. חורש האלון המצוי – ההבדל בין השנים הגשומות והשחונות ניכר כבר באביב, ומתחילת מאי חלה ירידה מקדימה בדיות.



איור 4

מודלים של המהלך העונתי של הדיות

מוצגות רגרסיות לפי עונות, רמת הגשם השנתית ובתי גידול. נבחרו הפונקציות בעלות המתאמים הגבוהים ביותר, וכולן התקבלו במובהקות גבוהה. שנים 1996 ו-2001 הוגדרו כשנים שחונות, 2003 כשנה גשומה, ו-2002 כשנה בינונית, שנחשבה צורפה הן לשנים השחונות הן לשנה הגשומה. כל נקודת נתונים היא על פי מדידה של שמונה עצים ביום אחד.

א. יער אלון החבור – תחנה אג הוגדרה כבית גידול משופר לאור המדידות, ואג 2 כבית גידול בינוני. באביב בכל השנים הייתה עלייה מהירה. בתחילת מאי התהליך נבלם. בבית גידול משופר ובשנה גשומה חלה התייצבות לפני הירידה בדיות. בשנה שחונה בבית גידול בינוני הירידה מתחילה מיד.

ב. חורש האלון המצוי – ההבדל בין השנים הגשומות והשחונות ניכר כבר באביב, ומתחילת מאי חלה ירידה מקדימה בדיות.

דיון

הגורם המשמעותי ביותר הקובע את תכונות בתי הגידול הוא מבנה מערכת הסלע-קרקע ותכונותיו ההידראוליות, הנובעים

מנקבוביות הסלע, מקשיותו ומהיחס בין הסלע והקרקע. כאמור, עצי אלון התבור גדלים על כיסי קרקע בקירטון בינוני, והשורשים נמצאים בקרקע בלבד. עצי האלון המצוי באזור זה גדלים על קירטון רך ונקבובי עם קרקע מעטה, והשורשים חודרים ישירות לסדקי סלע צרים.

ביער אלון התבור אין בתחילת החורף צומח תת-יער משמעותי שיקלוט את מי הגשם, והמים מחלחלים באטיות בסלע ומגיעים עד לעומק של כ-2 מטר לאחר כחצי שנה (נספח 6). קליטת המים על-ידי העצים מתחילה עם תחילת הבלבוב באמצע פברואר, ומואצת עד תחילת מאי. גשמי האביב ממשיכים להרטיב את הקרקע, אולם, הצומח העשבוני בעונה זו קולט חלק ניכר מהרטיבות ומייבש את הקרקע העליונה. בסוף האביב עולה מתח המים בקרקע, ומתחילה תנועת מים מהסלע אל הקרקע ואל השורשים. מוליכות העץ פוחתת בעיקר בצהריים ובמצבי שרב. כתוצאה מכך, קצב הדיות היומי מתייצב בתחילת הקיץ, ולאחר מכן הוא פוחת בהדרגה. באותו זמן המים מגיעים אל שורשי העצים ממרחק גדול יותר בסלע. מי הגשם שהגיעו בקיץ לעומק של 2-3 מטר נעים באטיות אל כיסי הקרקע והשורשים. מתח המים בעץ עולה בהדרגה, ובסתיו מתחילה שלכת, המשמשת גם היא מנגנון בקרה, שמאפשר את הפחתת כמות המים שהעץ קולט. בבתי גידול יובשניים ובשנים יבשות מתחילים מנגנונים אלה של הפחתת הקליטה ושל השלכת לפעול מוקדם יותר.

בחורש של האלון המצוי ירוק-העד מחלחלים מי הגשם בסדקים לעומק, שם נמצאים גם השורשים הקולטים מים ישירות מהסלע. ההתחממות והצימוח האביבי מאיצים גם כן את הקליטה עד תחילת מאי, אולם במין זה היא פוחתת מיד לאחר מכן. האלון המצוי מנצל את הממד האנכי וקולט מים מעומק הסלע, אבל צפיפות עצי האלון המצוי ומלוויו בחורש גורמת לתחרות על משאבי המים, להפחתה מהירה של תכולת המים בסלע ולהפחתה של יכולת הקליטה ממנו במהלך הקיץ.

נמצאה התאמה בין נתוני הקליטה השנתיים שנמדדו במערכת הסלע-קרקע ובין נתוני הדיות בעץ. במאזן הכולל ביער-הפארק של אלון התבור נקלטו בממוצע במהלך המחקר 221 מ"מ ($\pm 8\%$) בין בתי הגידול והשנים). בחורש של האלון המצוי נקלטו 174 מ"מ ($\pm 13\%$). הקליטה אצל אלון התבור היא 38% מממוצע המשקעים הרב-שנתי, 37% הם אידוי-דיות (evapotranspiration) של תת-היער העשבוני, 24% זרמו בנגר עילי לערוצים ו-0.7% (4 מ"מ) בלבד חלחלו למי תהום. תוצאות הנגר והחלחול תואמים סביבות קירטון [13,3]. בניתוח אחר של חלק מהתוצאות [38] התקבלו ערכי דיות מעט גבוהים יותר.

מוליכות הידראולית בסדר גודל דומה לזה שהתקבלה במחקר הנוכחי בסלעי קירטון נמצאה גם ברמת חובב מאותה חבורה גאולוגית (חבורת עבדת, אאוקן), ותוארה מערכת של חלחול בסדקי הסלע, הכוללת מעבר של המים לגוף הסלע ולאחר מכן תנועת מים אטית בסלע [4]. השערות על תרומת הקירטון לצמחי סלעים ולעצים בארץ הועלו בעבר [2,46], אולם הן נבדקו רק חלקית. מדידות רטיבות בעומק ובזמן בסלעי קירטון נעשו במחקרים שנערכו באנגליה [30,43,44], ותוארה מערכת הכוללת חלחול בחורף, ולאחריו תנועת מים מהסלע לשורשים בגידולי שדה בלתי מושקים.

זשק המים של עצי יער בתנאי סביבה שונים נחקר בעולם [35,28], ואף הוצגו מודלים של דיות בד בבד עם התייבשות הדרגתית של הקרקע [40]. בארץ הוצג מהלך הדיות של מספר מינים שנבדלו בכמות ובעיתוי של קליטת המים והצימוח [26]. ביער יתיר הוגדרו מספר טיפוסים עצים של אורן ירושלים המבצעים דיות בהתאם לתכונותיהם המורפולוגיות, האנטומיות והפיזיולוגיות [36]. בדומה לתיאור של אסטרטגיות שונות של עצי האלון במחקר הנוכחי (נספח 5). באורנים ביתר נמצאה התאמה בין מהלך הדיות לבין שינויי הרטיבות בשכבת הקרקע שמרבית השורשים מרוכזים בה [37]. בחורש אלון מצוי בכרמל [25] נמצאו שינויי רטיבות בעומק ובזמן בתת-הקרקע, שתאמו בקירוב את הדיות ואת השינוי במשקעים. ממוצעי הדיות של החורש בכרמל [25] וברמת הנדיב [26] היו גבוהים מאלה שנמצאו במחקר הנוכחי.

המדידה המפורטת הזו שנערכה באותו זמן במערכת הסלע-קרקע ובעצים, אפשרה הן הבנה טובה יותר של תכונות בתי הגידול הן השלכה של העקרונות לבתי גידול נוספים במקומות אחרים. לדוגמה, בבית הגידול של חורש של אלון מצוי על סלעים קשים של חבורת יהודה בשדרת ההר המרכזית, קיים משק מים יציב, שהעצים קולטים בו מים מכיסי קרקע במערכות קרסטיות (נספח 7). עם זאת, היו בו התייבשויות של עצים לאחר רצף של שנות בצורת [21], כיוון שלא הייתה להם עתודה של מים בנקבובי סלע. כהמשך למחקר הנוכחי נעשתה סדרה של סקרי מיפוי, ונערכו חקר של סלע-קרקע-צומח ותיאור של בתי גידול שונים כהכנה לתכנון נטיעות, תוך שימור הצומח הטבעי על בסיס התובנות של המחקר הנוכחי [8,9]. כמו כן, בדומה לממצאים שהוצגו כאן, נמצא שבסביבה של קירטון לא חלה התייבשות אורנים ביער יתיר לאחר רצף שנות בצורת [36,31], והאוכלוסיות היחידות של אירוס הגלבע (*Iris haynei*) שנשארו יציבות ולא קרסו באותו תקופה, היו בבית גידול של קירטון נקבובי התורם מים [11].

על בסיס הנתונים העקרוניים שהותו כאן ניתן להעריך את מידת העמידות של הצומח בבתי גידול שונים בתנאי התייבשות בעקבות שינוי אקלים עתידי. מנגנוני הבקרה של מיני הצמחים יאפשרו הישרדות בתקופות בצורת ארוכות, בד בבד עם תנועת מים מעומק רב יותר בסלע קירטון. אפשר להעריך אילו בתי גידול ואוכלוסיות ייפגעו ראשונים עם התפתחות תהליך של יובש מתמשך.

לסיכום, מבנה מערכת הסלע-קרקע ותכונותיה מאפשרים משק מים משופר של הצומח המותאם לאותה סביבה, שמשפיע על מערכת משולבת בסביבת הגידול ומושפע ממנה. בבתי גידול אחרים באזור הים תיכוני הדינמיקה ומאזן המים יהיו שונים, אולם העקרונות שהותו כאן יכולים לשמש בסיס להערכת משק המים בהווה ובעתיד בהתאם לתכונות מערכת הסלע-קרקע.

תודות

למשרד המדע ולקק"ל על מימון ציוד ופעילות. לפרופ' גבי שילר על העבודה המשותפת ועל השימוש במקשור למדידות פיזיולוגיות. לד"ר איציק מקובסקי וללב קופמן על העבודה המשותפת ועל השימוש במקשור גאופיזי וניתוח תוצאותיו, לד"ר ניר עצמון על השימוש במפזר ניטרונים, לד"ר שבתאי כהן ולפרופ' אמנון שוורץ על סיוע בעיבוד נתונים פיזיולוגיים, ולעוד רבים וטובים שסייעו בעבודה ובעצה.



זורש אלון מצוי בגבעות חורשן | צילום: ניר הר

מקורות

1. אלוני ר. 1968. צומח הגליל התחתון (עבודת גמר לתואר מוסמך). ירושלים: האוניברסיטה העברית בירושלים.
2. בן-חור מ. 2008. התכונות ההידרולוגיות של הסלע המשפיעות על התפתחות הצומח הטבעי ברמת הנדיב. *יער* 10: 25–31.
3. גבירצמן ח. 2002. משאבי המים בישראל. ירושלים: יד בן צבי.
4. דהן ע. 1993. תנועת מים ומומסים דרך תווח קרטוני בלתי רווי בחבורת עבדת, רמת חובב (עבודת גמר לתואר מוסמך). רחובות: האוניברסיטה העברית בירושלים.
5. דנין א. 1970. מונוגרפיה פיטוסוציולוגית-אקולוגית של הנגב הצפוני (עבודה לקבלת תואר דוקטור). ירושלים: האוניברסיטה העברית בירושלים.
6. הר נ. 1998. מסלע וקרקע כגורם אקולוגי של תפוצה והתפתחות ביער אלון התבור באזור אלונים-שפרעם (עבודת גמר לתואר מוסמך). רחובות: האוניברסיטה העברית בירושלים.
7. הר נ. 2008. מבנה מערכת הקרקע והסלע והדינמיקה של המים בבית הגידול כגורמים אקולוגיים עיקריים בתפוצת אלון התבור והאלון המצוי באזור אלונים מנשה (עבודה לקבלת תואר דוקטור). רחובות: האוניברסיטה העברית בירושלים.
8. הר נ. 2010. בתי גידול של צומח טבעי בגליל התחתון והמערבי – הבנת המערכות האקולוגיות תוך מחקר וסקרי קרקע-צומח משולבים מפורטים. כנס האגודה הישראלית לאקולוגיה ולמדעי הסביבה, 22–21 ביוני 2010, באר שבע.
9. הר נ. 2015. [סקרי קרקע צומח בתי גידול](#).
10. הר נ, זינגר א, ריוב י ושש א. 2000. מסלע וקרקע כגורם אקולוגי ביער אלון התבור באזור אלונים-שפרעם. *אקולוגיה וסביבה* 6(1): 25–42.
11. הר נ וסגל ב. 2014. [קרקע-סלע-יער ותנודות במשקעים בהכוננת הדינמיקה של אוכלוסיות אירוס הגלבוע](#). הוועידה השנתית למדע ולסביבה. 16–18 בספטמבר, 2014.
12. הר נ, ריוב י ושני א. 2015. מערך הצומח באזור אלונים-מנשה בהתאמה למבנה המרחבי של מערכת הסלע-קרקע ותכונות בית הגידול. *אקולוגיה וסביבה* 6(1): 40–52.
13. השירות ההידרולוגי. 2012. שנתון הידרולוגי לישראל. הקדמה ונתוני זרימה בנחלים ומאגרים בתחום הניקוז המערבי.
14. זהרי מ. 1959. גאובוטניקה, מהדורה שנייה. מרחביה: ספריית הפועלים.
15. חייטי ג. 1975. הגאולוגיה ההנדסית של מספר קרטונים בישראל (עבודה לקבלת תואר דוקטור). חיפה: הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל.
16. חן י, ענבר י וברק פ. 1991. שיטות לבדיקת קרקעות. רחובות: האוניברסיטה העברית בירושלים.
17. חריף י. 1974. התפתחות מרכיבי הגריגה והחורש הראשיים בשנתם הראשונה וחשיבותה בקביעת הטורים הסוקסציוניים בהרי יהודה (עבודה לקבלת תואר דוקטור). ירושלים: האוניברסיטה העברית בירושלים.
18. חת ד. 1968. גורמים אקולוגיים מכריעים בייעור אורן ברוטיה (עבודה לקבלת תואר דוקטור).

רחובות: האוניברסיטה העברית בירושלים

19. להב ח, רמון א, נזרי ג והלר א. 2005. [סקר רמת מנשה](#). מכון דשא, החברה להגנת הטבע: סקרי טבע ונוף.
20. ליטבק (ליטב) מ. 1962. מחקר פיטוסוציולוגי ואקולוגי בחברות הבתה של הרי יהודה, עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית בירושלים.
21. סבר נ ונאמן ג. 2008. התייבשות והתאוששות של עצי אלון מצוי בישראל לאחר רצף של שנות בצורת. *יער* **10**: 10-16.
22. פולישוק ב. 1995. תכונות גיאולוגיות וגיאומכניות של הקירטון ויישומן למבנים תת-קרקעיים (עבודה לקבלת תואר דוקטור). תל-אביב: אוניברסיטת תל-אביב.
23. קופר א. 2011. תנאי קרינה ביער מחטני נטוע והשפעתם על התפתחות ותפקוד אלון התבור (עבודת גמר לתואר מוסמך). ירושלים: האוניברסיטה העברית בירושלים.
24. רבינוביץ-וין א. 1986. סלע-קרקע-צומח בגליל. הקיבוץ המאוחד ורשות שמורות הטבע.
25. שחורי ע. 1966. אבפוטרגנספירציה בשטחי חורש, אורן ומרעה באזור קרסטי בכרמל (עבודה לקבלת תואר דוקטור). רחובות: האוניברסיטה העברית בירושלים.
26. שילר ג, אונגר י"ד וכהן י. 2001. ידיעת הדיות כגורם מכון בממשק אקוסיסטמה ים תיכונית – מקרה רמת הנדיב. *אקולוגיה וסביבה* **6**(4-3): 170-177.
27. Cohen Y, Fuchs M, and Green GC. 1981. Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant Cell Environment* **4**: 391-397.
28. David TS, et al. 2004. Constrain on transpiration from an evergreen oak tree in southern Portugal. *Agriculture and Forest Meteorology* **122**: 193-205.
29. Finkel M, Fragman O, and Nevo E. 2001. Biodiversity and interslope divergence of vascular plants caused by sharp microclimatic differences at "Evolution Canyon II", Lower Nahal Keziv, Upper Galilee, Israel. *Israel Journal of Plant Sciences* **49**(4): 285-296.
30. Gregory PJ. 1989. Depletion and movement of water beneath cereal crops grown on a shallow soil overlying chalk. *Journal of Soil Science* **40**: 513-523.
31. Herr N, Preisler Y, Rotenberg E, and Greenbaum N. 2014. Subsoil properties as the main factors in drying and mortality of *Pinus halepensis* at the Yatir forest, northern Negev, Israel. In: Coll L et al. (Eds). 5th International Conference on Mediterranean Pines (medPINE5), Solsona 2014. Book of Abstracts.
32. Kadmon R and Danin A. 1999. Distribution of plant species in Israel in relation to spatial variation in rainfall. *Journal of Vegetation Science* **10**: 421-432.
33. Klein T, Cohen S, Buchmann N, and Yakir D. 2011. Hydraulic adjustments underlying drought resistance of *Pinus halepensis*. *Tree Physiology* **31**: 637-648.
34. Oppenheimer HR. 1957. Further observations on root penetrating into rocks and their structure. *Bulletin of Research Council Israel* **6D**: 18-31.
35. Pereira JS and Chaves MM. 1992. Plant water deficits in Mediterranean ecosystems.

- In: Davies WJ (Ed). Water deficits, plant responses from cell to community. Environmental plant biology series. UK: Bios Scientific Publishers.
36. Preisler Y. 2014. Processes underlying tree mortality in semi-arid Aleppo pine forest following consecutive drought years (MSc thesis). Rehovot: The Hebrew University of Jerusalem.
 37. Raz Yaseef N. 2008. Partitining the evapotranspiration flux of the Yatir semi arid forest (PhD dissertation). Rehovot: Weizmann Institute of Science.
 38. Schiler G, Ungar ED, Cohen S, and Herr N. 2010. Water use by Tabor and Kermes oaks growing in their respective habitats in the lower Galilee region of Israel. *Forest Ecology and Management* **259**: 1018-1024.
 39. Sternberg M and Shoshany M. 2001. Influence of slope aspect on Mediterranean woody formations: Comparison of a semiarid and an arid site in Israel. *Ecological Research* **16**: 335-345.
 40. Tardieu L, Bruckler L, and Laffolie F, 1992. Root clumping may affect the root water potential and the resistance to soil-root water transport. *Plant and Soil* **140**: 291-301.
 41. Tatarinov F, Preisler Y, Rohatin S, and Yakir D. 2014. Transpiration patterns of Aleppo pine trees reflect spatial surface heterogeneity and seasonal drought avoidance. In: Coll L et al. (Eds). 5th International Conference on Mediterranean Pines (medPINE5), Solsona 2014. Book of Abstracts.
 42. Van Genuchten MT, Simunek J, Leij FJ, and Sejna M. 2000. RETC Ver. 6.0. US Salinity Lab. USDA, ARS Riverside, CA.
 43. Wellings SR. 1984. Recharge of the upper chalk aquifer at a site in Hampshire, England. *Journal of Hydrology* **69**: 259-273.
 44. Wellings SR and Bell JP. 1980. Movement of water and nitrate in the unsaturated zone of upper chalk near Winchester, Hunts, England. *Journal of Hydrology* **48**: 1119-1136.
 45. Zohary M. 1973. Geobotanical foundations of the Middle East. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag.[46] Zohary M and Orshansky G. 1951. Ecological studies on lithophites. *Palestine Journal of Botany (Jerusalem)* **2**: 120-129.

נספחים (זמינים באתר)

נספח 1. פונקציות
הידרולוגיות
ומטאורולוגיות

[להורדה](#)

ספח 2. התנגדות חשמלית (kOhm) בבלוקי גבס בששה עומקים: 0.2 מ' בקרקע, 0.4-4.0 מ' בסלע וגשם שעתי (מ"מ) בשנים 2003 ו-2004.

[להורדה](#)

נספח 3. הדגמה של הצטברות וקליטת מים בסלע במהלך השנים 2002 ו-2003 ותנועת המים אל השורשים של אלון התבור הקולטים את המים

[להורדה](#)

נספח 4. הרטיבות המזערית בחתכי רוחב דו ממדיים בתחנה אג 2 ביער של אלון התבור באלון הגליל והגדרת טיפוסי השטח.

[להורדה](#)

נספח 5. הדיות, מוליכות הנוף ומתח העלווה לאורך השנה בשני עצים של אלון התבור בעלי מהלך פיסיולוגי שונה בהתאמה לגרעון הרטיבות באוויר ולקרינת השמש בשנת 1996

[להורדה](#)

נספח 6. סכימה של הדינמיקה של משק המים בבית הגידול של

**אלון התבור: השינויים
בעומק ובזמן של
קליטת המים, חלחול
ואידוי-דיות**

[להורדה](#)

**נספח 7.השוואת בתי
גידול באזור הים
תיכוני**

[להורדה](#)