

השפעת השינוי בשימושי קרקע משטחי בור ליער נטע אדם על המבנה והתכונות ההידראוליות של הקרקע בתנאי אקלים שונים בישראל

מני בן-חור^{1*}, חיים טנאו¹, מרכוס לאדו², לאה לייב¹ ואסף ענבר¹

¹ המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מרכז וולקני

² הפקולטה למדעים, אוניברסיטת לה קרונה, ספרד

* meni@volcani.agri.gov.il

תקציר

5.5%, שהספיקה לייצב את מבנה הקרקע לרמת ייצוב של קרקע היער, שהכילה 8.1% חומר אורגני. כתוצאה מכך, לשינוי בשימוש הקרקע משטח בור ליער באזור זה לא הייתה השפעה על ערכי המוליכות ההידראולית של הקרקע. ייצוב במבנה הקרקע באזורים באר שבע ויתיר נבע בעיקר מהתנגדות לכוחות המיגוג, שנובעים מהרטבה מהירה של הקרקע.

מילות מפתח: יציבות תלכידים, מוליכות הידראולית, חומר אורגני, ערכי דיספרסיה, ערכי תפיחה, ערכי מיגוג, קוטר ממוצע משוקלל, מנת ספיחת הנתרון.

מבוא

בתקופה האחרונה מתרחש בעולם תהליך מואץ של בירוא יערות והפיכתם לשטחי חקלאות או לאזורים אורבניים, במיוחד באפריקה ובדרום אמריקה. לדוגמה, כ-3.4 מיליון קמ"ר של שטחי יער או סוואנה באזורים צחיחים וצחיחים למחצה באפריקה בוראו לשטחים חקלאיים או לשטחי מרעה, כאשר תהליך זה גורם לדלדול (soil degradation) מואץ של הקרקע (Shabtai et al., 2014; Tsegaye et al., 2010). בישראל, לעומת זאת, משנות החמישים של המאה הקודמת, חלה פעילות מוגברת של נטיעת יערות, כאשר היקף השטח הנטוע בסוף המאה הקודמת עמד על כ-800,000 דונם, שניטעו ברובם בשטחי בור, שכללו קרקעות לא ראויות לעיבוד חקלאי (קפלן, 2008).

היער מהווה מערכת אקולוגית דינמית, כאשר לשינוי בשימושי הקרקע משטחי בור ליער יכולה להיות השפעה משמעותית מבחינה אקולוגית וסביבתית (אסם, 2014). לדוגמה Grunzweig וחוב' (2007) מצאו, שנטיעת יער יתיר העלתה במשך 35 שנה את צבירת הפחמן האורגני בקרקע ל-1,760 ק"ג/דונם, כאשר קיבוע נטו כללי של הפחמן ביער יתיר הוא כ-230 ק"ג/דונם לשנה לעומת ערך קיבוע ממוצע של 200 ק"ג/דונם לשנה ביערות מחטניים באירופה (Rotenberg & Yakir, 2010). הבדלים אלה בקיבוע הפחמן

משנות ה-50 של המאה הקודמת חלה בישראל פעילות מוגברת של נטיעת יערות, שניטעו ברובם בשטחי בור, שכללו קרקעות לא ראויות לעיבוד חקלאי. למרות המחקר הרב יחסית, שנעשה עד כה, בנושא השפעת השינוי משטחי בור ליער על היבטים אקולוגיים וסביבתיים, הרי שהשפעה זו על המבנה והמוליכות ההידראולית של הקרקע בתנאי אקלים שונים בארץ, לא נלמדה מספיק. מטרת המחקר הנוכחי היא: (1) לבחון את השפעת השינוי בשימוש קרקע משטחי בור ליער על המבנה והמוליכות ההידראולית של הקרקע בתנאי אקלים שונים בדרום הארץ; (2) ללמוד את המנגנונים הגורמים לשינויים אלה. לצורך המחקר, קרקעות גיריות מופרות נדגמו מהיער ומשטח בור הסמוך ליער, משלושה אזורים, שבהם ממוקמים יערות בוגרים: (1) יער באר שבע; (2) יער יתיר; (3) יער מלאכים, כאשר כמות הגשם הממוצעת הרב-שנתית באזורים אלה היא 170, 283 ו-360 מ"מ/שנה, בהתאמה. בקרקעות השונות נמדדו תכולת חומר אורגני כללי, ערכי מוליכות חשמלית ונתרון, יציבות תלכידים כנגד כוחות מיגוג (Slaking), תפיחה ודיספרסיה ומוליכות הידראולית ברויה בתנאי מעבדה. שינוי בשימוש הקרקע משטחי בור ליער גרם באזורים שונים לעלייה ביציבות מבנה הקרקע, ועל ידי כך לעלייה משמעותית בערכי המוליכות ההידראולית שלה. מגמות אלו הושפעו מתנאי האקלים ובמיוחד ממוצע הגשם הרב-שנתי באזור. שיפור במבנה הקרקע ובמוליכות ההידראולית שלה ביער נבע בעיקר מהעלייה בתכולת החומר האורגני בשכבת הקרקע העליונה, כתוצאה מעלים וממחטים שנשרו מנוף העצים על פני הקרקע. באזורים באר שבע ויתיר, שבהם ממוצע הגשם הרב-שנתי הוא 190 ו-283 מ"מ/שנה, חלה עלייה מובהקת בתכולת החומר האורגני בקרקע ל-1.4% ול-3.1%, בהתאמה. כתוצאה מכך חלה גם עלייה במוליכות ההידראולית של הקרקעות ביערות באזורים אלה. לעומת זאת, באזור מלאכים, שבו ממוצע הגשם הרב-שנתי הוא 360 מ"מ/שנה, תכולת החומר האורגני בקרקע בשטחי הבור הייתה

עקב תנועה מהירה של המים ולחץ של אוויר כלוא בתלכיד הגורמים למיגוג התלכידים (Le Bissonnais, 1997); (3) תפיחה הנובעת מירידה בפוטנציאל האלקטרו-כימי בתמיסה בתווך בין חלקיקי חרסית סמוכים, הגורמת לחדירת מים לתווך זה ולהתרחקות ביניהם וכתוצאה מכך לתפיחת הקרקע ולהקטנה בנפח הנקבובים המוליכים מים (Shainberg & Letey, 1984); (4) דיספרסיה כימית של החרסית הנובעת מירידה בריכוז האלקטרוליטים (יונים חופשיים) בתמיסת הקרקע אל מתחת לערך הפלוקולציה וגורמת להתפרקות של צברי החרסית (van Olphen, 1977). דיספרסיה זו של החרסית גורמת להרס של מבנה הקרקע ולאטימת הנקבובים עם חלקי החרסית, שעברו דיספרסיה (Shainberg & Letey, 1984).

שטחי בור באזורים צחיחים וצחיחים למחצה בדרום הארץ מאופיינים בצומח עשבוני עונתי עם כתמים דלילים של שיחים רב-שנתיים ובקרקעות בעלות תכולת חומר אורגני נמוכה יחסית ותכונות הידראוליות ירודות (רביקוביץ, 1992) – גורמים המאיצים את תהליכי הנגר, הסחף והידלדלות הקרקע באזורים אלה (Ben-Hur, 2008). לעומת זאת, הפיכת שטחי בור ליער נטע אדם עשויה לשנות את התכונות הכימיות, הפיסיקליות והביולוגיות של הקרקע, ועל ידי כך להשפיע על המבנה והתכונות ההידראוליות שלה. מטרת המחקר הנוכחי הן לבחון את השפעת השינוי בשימושי קרקע משטחי בור ליער נטע אדם על המבנה והמוליכות ההידראולית של הקרקע בתנאי אקלים שונים בדרום הארץ, וללמוד את המנגנונים הגורמים לשינויים אלה.

חומרים ושיטות

אזורי דיגום ותכונות הקרקע

הקרקעות שנבחנו בעבודה הנוכחית היו קרקעות גיריות, שנדגמו משלושה אזורים שונים בדרום הארץ, שבהם ממוקמים יערות אורן בוגרים או אזורים עם עצי אורן בתוך יער מעורב: (1) יער באר שבע, הממוקם צפונית לבאר שבע ומזרחית לכביש 40 (ייקרא להלן אזור באר שבע); (2) יער יתיר, הממוקם באזור יתיר (ייקרא להלן אזור יתיר) ו-(3) יער מלאכים, הממוקם מזרחית לקריית גת (ייקרא להלן אזור מלאכים). כמות הגשם הממוצעת הרב-שנתית באזורים באר שבע, יתיר ומלאכים היא 170, 283 ו-360 מ"מ/שנה, בהתאמה. בכל אזור, דגימות קרקע מופרות נלקחו מתחת לחופת העצים ביער במרחק כ-0.5 מ' מגזע העץ (ייקראו להלן דגימות מתוך היער) ומאזור בור הסמוך ליער בשטח חשוף בין שיחים או בני שיח, הגדלים באופן טבעי באזורים אלה (ייקראו להלן דגימות משטח בור). דגימות הקרקע בכל האזורים, מתוך היער ומשטחי הבור נלקחו מעומקים של 0-5, 5-10, ו-10-25 ס"מ, לאחר שהנשר או העשבייה הוסרו מעל פני הקרקע. דגימות הקרקע יובשו ליובש אוויר ונכתשו ידנית,

ביער יתיר, לעומת היערות באירופה, נובעים מתנאי היובש הייחודיים השוררים באזור יער יתיר המקטינים את שחרור הפחמן מהקרקע לאטמוספירה. בעבודות אחרות (Smith & Johnson, 2003; Jackson et al., 2002) נמצא, שהתפשטות יערות בשטחי בור או בשטחי מרעה גרמה לירידה בצבירת הפחמן בקרקע באזורים עם ממוצע משקעים שנתי בין 660 ל-1,070 מ"מ, לעומת עלייה בצבירת הפחמן באזורים צחיחים עם ממוצע משקעים שנתי קטן מ-350 מ"מ. השפעה אקולוגית נוספת של היער נמצאה במחקרם של לבנוני (2005) ושל עמית (2009), שבהם נמצא שמתקיים מגוון רחב יחסית של מיני חי וצומח ביערות מחטניים בשפלת יהודה ובספר המדבר.

ליער השפעה גם על מאזן המים והחלוקה שלו במרחב (Raz-Yaseef et al., 2010), כאשר לגורמים אלה חשיבות מיוחדת באזורים צחיחים וצחיחים למחצה. ביער יתיר נמצא, כי בשנה מטאורולוגית ממוצעת, כ-95% מכמות הגשם היורדת ביער חוזרת לאטמוספירה כתוצאה מאידוי-דיות (evapotranspiration), כאשר כ-40% ממי הגשמים מתאדים ישירות מהקרקע (Raz-Yaseef et al., 2010; Raz-Yaseef et al., 2012; Ungar et al., 2013). בן-חור וחוב' (2010) מצאו, שחיפוי הקרקע על ידי נוף העצים הקטין באופן משמעותי את שיעורי הנגר והסחף במטע במהלך סופות הגשם. Farley וחוב' (2005) מצאו, שמעבר משטחי חקלאות לשטחי יער בבריטניה גרם לשפילת מי התהום באזור עד לפגיעה ביכולת שאיבת המים ואספקתם לתושבים, שנבעה מצריכת מים מוגברת של עצי היער ממי התהום. ערכי הדיות מהצמח והאידי ממהקרקע מושפעים מהמאזן בין דרישות אטמוספיריות לבין תכולת המים בקרקע והמוליכות ההידראולית שלה, התלויות במבנה הקרקע. למרות המחקר הרב יחסית, שנעשה עד כה, בנושא השפעת השינוי בשימושי הקרקע משטחי בור ליער על היבטים אקולוגיים וסביבתיים, הרי שהשפעה זו על המבנה והמוליכות ההידראולית של הקרקע, בתנאי אקלים שונים בארץ, לא נלמדה מספיק.

מבנה הקרקע מושפע משני גורמים עיקריים (Ben-Hur et al., 2009): (1) סידור של חלקיקי הקרקע במרחב המשפיע על התפלגות גודל הנקבובים, הפתלתלות והקישוריות (Connectivity) שלהם; (2) יציבות המבנה של הקרקע, המהווה את יכולת הקרקע לשמור על המבנה שלה כנגד כוחות הרס חיצוניים ופנים-קרקעיים. ארבעה כוחות עיקריים עלולים לגרום להרס מבנה הקרקע במהלך הרטבתה ושיטיפתה ממלחים: (1) מכות טיפות הגשם, הגורמות להרס מכאני של תלכיד הקרקע כתוצאה מהאנרגיה הקינטית שלהן (Agassi, 1981; Morin et al., 1981; et al., 1981); (2) כוחות מיגוג (Slaking), כאשר מיגוג הוא תהליך של שבירת תלכיד קרקע למיקרו-תלכידים, כתוצאה מהרטבתם המהירה. הרטבה מהירה זו של הקרקע גורמת לתפיחה לא אחידה שלה, לשחרור חום

SAR		EC, dS/m		אנליזה מכנית % Mechanical composition						מיקום האזור Location
				sand חול		silt סילט		clay חרסית		
שטח בור Virgin land	מתוך היער In forest	שטח בור Virgin land	מתוך היער In forest	שטח בור Virgin land	מתוך היער In forest	שטח בור Virgin land	מתוך היער In forest	שטח בור Virgin land	בתוך היער In forest	
0.94	1.03	0.7	1.7	62	70	20	12	18	18	באר שבע Beer Sheva
0.91	0.52	1.2	1.7	30	68	48	12	22	20	יתיר Yatir
0.32	0.32	1.9	1.7	23	38	43	28	34	34	מלאכים Malachim

טבלה 1: אנליזה מכנית וערכי מוליכות חשמלית (EC) ומנת ספיחת הנתרן (SAR) במיצוי עיסה רוויה של הקרקעות שנלמדו מאזורים שונים.
Table 1: Mechanical composition, electrical conductivity (EC), and Na exchangeable ratio (SAR) in saturated soil paste of the studied soils.

גשם). במהלך שטיפת הקרקע מלמעלה למטה בתמיסת המלח ובמי הגשם, התשטוף שהתנקז מתחתית עמודת הקרקע נאסף במקטעים בפרקי זמן מדודים על ידי אוסף מקטעים. נפחי המקטעים של התשטוף נמדדו, והמוליכות ההידראולית של הקרקע חושבה על ידי נוסחת דארסי. בנוסף לכך, ערכי המוליכות החשמלית (EC) וה-pH נמדדו בכל המקטעים של מי התשטוף, כדי לקבוע את איכותם, כאשר ערכי ה-pH לא השתנו באופן מובהק במהלך השטיפה ולא בין דגימות הקרקע השונות וערכם נע בין 7.7 ל-8.1.

השפעת השינוי בשימושי הקרקע משטחי בור ליער נטוע על יציבות התלכידים כנגד כוחות מיגוג, דיספרסיה ותפיחה נקבעה בקרקעות מהאזורים השונים, שנדגמו מהשכבה 0-5 ס"מ מתוך היער ומשטחי הבור בשיטה שפותחה על ידי Ben-Hur וחוב' (2009). פירוט מתומצת של השיטה מובא להלן:

ערכי המיגוג: 5 ג' של תלכידים יבשים בגודל 2-4 ס"מ הורטבו באופן מהיר על ידי הכנסתם למיכל עם מים מזוקקים, ו-5 ג' של תלכידים יבשים בגודל 2-4 ס"מ מאותה דגימה הורטבו באופן איטי בתנאי וקום. לאחר ההרטבה המהירה והאיטית של התלכידים, הם טולטלו בעדינות במיכל עם אתנול, ולאחר מכן נופו בעדינות דרך מערכת נפות בגדלים שונים. כל מקטע קרקע בנפות השונות יובש בתנור ב-105 מ"צ ונשקל בנפרד. קוטר ממוצע משוקלל (MWD) של התלכידים לאחר ההרטבה המהירה והאיטית והניפווי שלהם חושב לכל דגימת קרקע על פי נוסחה [1]:

$$MWD = \sum_{i=1}^7 \bar{x}_i w_i \quad [1]$$

כאשר w_i הוא משקל המקטע של התלכידים בקבוצת גודל i עם ממוצע קוטר x_i .

כאשר חלק מכל דגימה נופה דרך נפה של 4 מ"מ וחלק אחר דרך נפה של 2 מ"מ. בדגימות משכבת הקרקע 0-5 ס"מ לאחר הניפווי שלהן דרך נפה של 2 מ"מ נקבעה אנליזה מכנית וערכי מנת ספיחת הנתרן (SAR) במיצוי עיסה (טבלה 1). מדידות של האנליזה המכנית נעשו בשיטת ההידרומטר (Day, 1956), וערכי ה-SAR חושבו לאחר שהריכוזים במיצוי עיסה רוויה של Ca+Mg נמדדו בשיטת הטיטרציה וריכוז ה-Na במכשיר פוטומטר להבה. בנוסף לכך, תכולה של חומר אורגני כללי נמדדה בכל דגימות הקרקע מהעומקים 0-5, 5-10, ו-10-25 לאחר ניפוויים דרך נפה של 2 מ"מ בשיטה הרטובה (Allison, 1965).

מדידת מוליכות ההידראולית

מדידת ערכי המוליכות ההידראולית ברוויה (K_s) נעשתה בדגימות הקרקע מהאזורים השונים, שנדגמו מהשכבה 0-5 ס"מ מתוך היער ומשטחי הבור הסמוכים לו. מדידות אלו נעשו כדלקמן: 120 גר' (יבש תנור) של קרקע מנופה דרך נפה של 2 מ"מ מכל דגימה נארזו בזהירות בעמודת פלסטיק בקוטר 5 ס"מ על שכבה בעובי 2 ס"מ של חול גס וחסר מלחים, כאשר עובי שכבת הקרקע בעמודה היה 5 ס"מ והצפיפות הגושית שלה הייתה 1.22 גר'/סמ"ק. כל עמודת קרקע הורטבה מלמטה בקצב של 35 מ"מ/שעה בתמיסה כלורידית (תיקרא להלן מים מליחים) עם ריכוז מלחים כללי של 50 מא"ק/ל' (מיליאקווילנט בליטר) ו-SAR התואם ל-SAR במיצוי עיסה רוויה של דגימת הקרקע. הרטבת הקרקע בתמיסה זו מאפשרת להרוות את הקרקע ללא דיספרסיה כימית של החרסית ועם מינימום תפיחה (Keren & Ben-Hur, 2003). לאחר הרוויית הקרקע, כיוון הזרימה של המים המליחים הוחלף מלמעלה למטה, והקרקע נשטפה בעמוד הידראולי קבוע בכ-3 נפחי נקבובים של מים מליחים ומיד לאחר מכן בכ-8 נפחי נקבובים של תמיסה מסוננתת ממים מזוקקים לקבלת איכות של מי הגשם (תיקרא להלן מי

תוצאות ודיון

ערכי מוליכות הידראולית ברוויה של דגימות הקרקע מהאזורים השונים, שנדגמו מתוך היער ומשטח הבור, כתלות בנפח התשטיפ עם שטיפת הקרקע במים מליחים ולאחר מכן במי גשם מובאים באיור 1. באזורי באר שבע ויתיר, ערכי ה- K_s של הקרקעות שנדגמו מתוך היער היו גבוהים באופן

ערך המיגוג (SLV) של כל דגימת קרקע חושב על פי נוסחה [2]:

$$SLV = \frac{MWD_s}{MWD_f} \quad [2]$$

כאשר MWD_s ו- MWD_f הם קוטר ממוצע משוקלל של התלכידים לאחר הרטבה איטית ומהירה, בהתאמה.

ערכי התפיחה: ערכים אלה של דגימות הקרקע השונות נמדדו על ידי כך, ש-60 תלכידים יבשים בגודל 2-4 ס"מ מכל דגימת קרקע הונחו ב-3 צלחת פטרי, 20 תלכידים לצלחת. התלכידים בצלחות הפטרי נסרקו בסורק לקביעת שטח הבבואה (image) שכל תלכיד יצר, ונפח התלכידים חושב על ידי תוכנת מחשב (University of Texas – UTHSCSA Health Science Center, San Antonio, Texas), על פי שטח הבבואה שנמדד ובהנחה שהתלכידים הם כדוריים. לאחר סריקת התלכידים הם הורטבו באופן איטי בתנאי וקום למשך 24 שעות, ולאחר מכן נסרקו שוב ונפחם חושב כפי שחושב נפח התלכידים היבשים. ערך התפיחה (SWV) של כל דגימת קרקע חושב על פי נוסחה [3]:

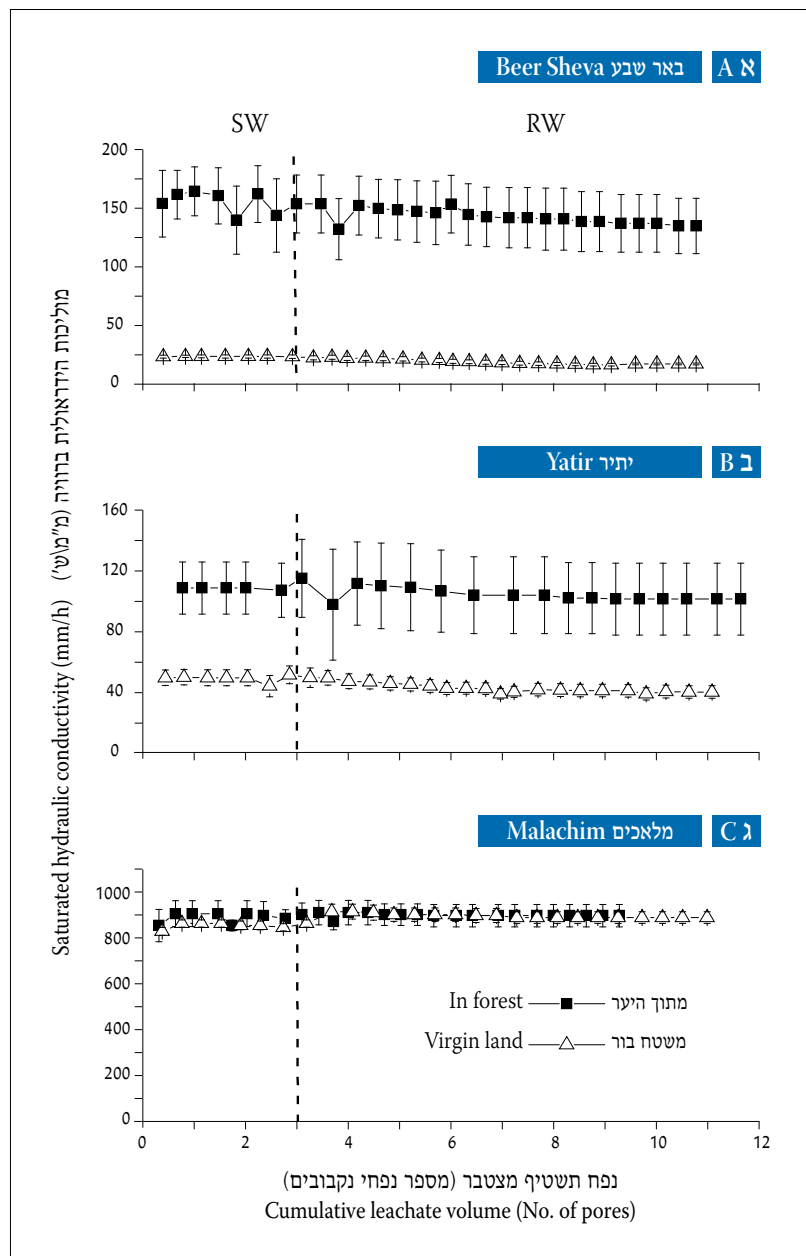
$$SWV = \frac{\sum_{i=1}^n (I_{wi} - I_{di}) / I_{di}}{n} \quad [3]$$

כאשר n הוא מספר התלכידים ו- I_{wi} ו- I_{di} הם נפח מחושב של התלכיד i לאחר ולפני הרטבתו, בהתאמה. הדיספרסיה של דגימות הקרקע השונות נקבעה בשיטת Gupta וחוב' (1984), וערך הדיספרסיה (DV) לכל דגימת קרקע חושב על פי נוסחה [4]:

$$DV = \frac{M_d}{M_t} \times 100 \quad [4]$$

כאשר M_d הוא משקל החרסית שעברה דיספרסיה מדגימה של 2 ג' קרקע שטולטל במים מזוקקים, ו- M_t הוא משקל כולל של החרסית בדגימה של 2 ג' קרקע.

כל המדידות שמפורטות למעלה נעשו בשלוש חזרות, ומבחן המובהקות להבדלים בין ערכים ממוצעים של המדדים השונים נעשה בהסתברות, כאשר $\alpha = 0.05$. ערכי מיגוג גבוהים מערך 1 משמעותם, שהתלכידים רגישים להתפוררות כתוצאה מכוחות המיגוג, וככול שערכי המיגוג, התפיחה והדיספרסיה היו גבוהים יותר – רגישות התלכידים להתפוררות כתוצאה מכוחות המיגוג, התפיחה והדיספרסיה היא רבה יותר, בהתאמה.



איור 1: ערכי מוליכות הידראולית ברוויה של דגימות הקרקע מהאזורים באר שבע, יתיר ומלאכים, שנדגמו מתוך היער ומשטח הבור כתלות בנפח התשטיפ עם שטיפת הקרקעות במים מליחים (SW) ולאחר מכן במי גשם (RW) כתלות בנפח התשטיפ. הקווים האנכיים מציינים שני ערכי שגיאות תקן מהממוצע.

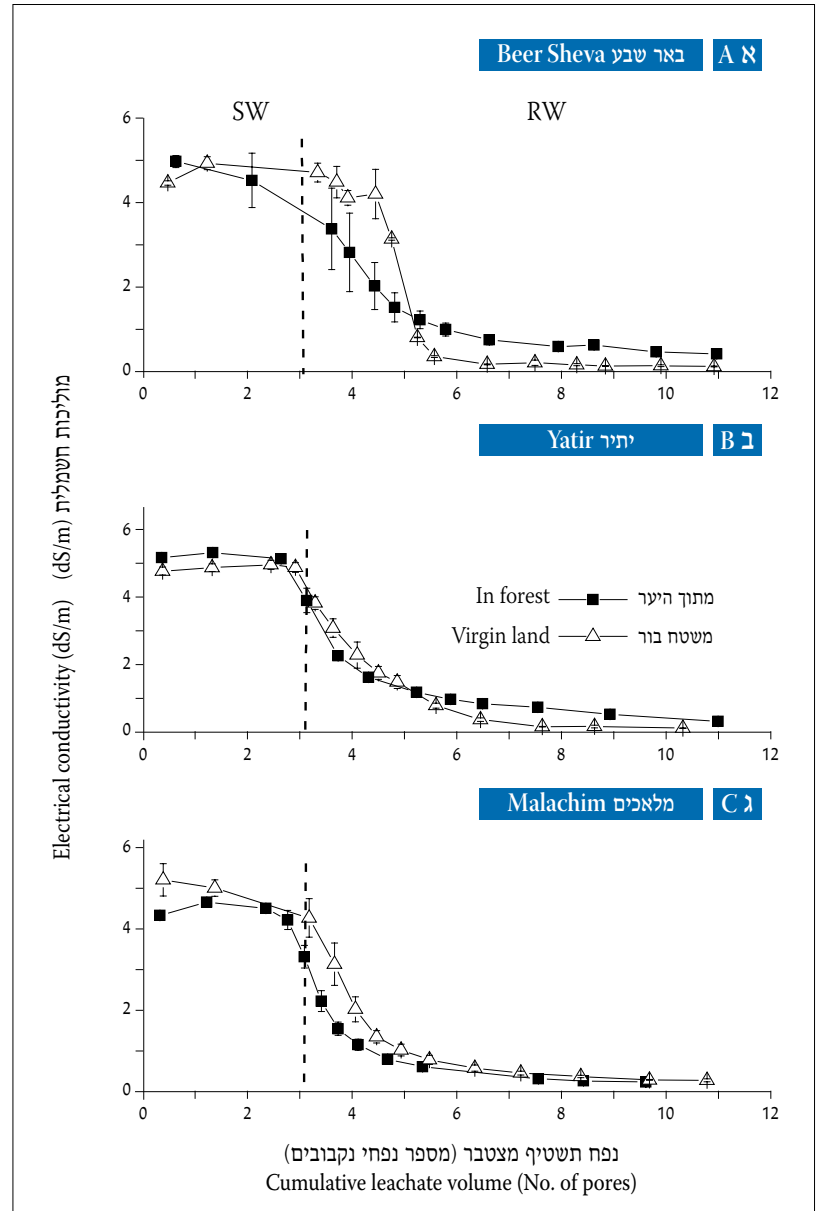
Fig. 1: Saturated hydraulic conductivity values of the forest and virgin soils from Beer Sheva, Yatir, and Malachim regions as functions of the cumulative leachate volume of saline water (SW) and rainwater (RW). The vertical bars represent 2 standard errors.

נמצאו הבדלים מובהקים בערכי ה- K_s בין הדגימות שנדגמו מתוך היער לבין אלו שנדגמו משטח הבור, כאשר ערכים אלה היו גבוהים (890-916 מ"מ/מ"שעה) מאשר הערכים שהתקבלו בקרקעות שנדגמו מהאזורים בארבע שנים (איור 1). מכיוון שערכי ה- K_s של הקרקעות השונות נקבעו בעמודות קרקע מופרות בעלות צפיפות גושת דומה של 1.22 ג'ס/מ"ק, סביר להניח שהשינויים ב- K_s בין הקרקעות ושימושי הקרקע השונים ואיכות מי השטיפה (מים מליחים או מי גשם) (איור 1) נבעו בעיקר משינוי במבנה הקרקע עם הרטבתה ושיטיפתה באיכויות המים השונות.

ערכי המוליכות החשמלית (EC) של מי התשטיפ מהעמודות עם דגימות הקרקע מהאזורים בארבע שנים, יתיר ומלאכים, שנדגמו מתוך היער ומשטחי הבור, כתלות בנפח התשטיפ במהלך השטיפה במים מליחים ולאחר מכן במי גשם, מובאים באיור 2, כאשר ערכים אלה שווים בקירוב לערכי ה-EC בתמיסת הקרקע בזמן שטיפתן. ערכי ה-EC במי התשטיפ בכל עמודות הקרקע במהלך השטיפה במים מליחים היו גבוהים וקרובים ל-5.0 dS/m. לעומת זאת, עם שטיפת הקרקעות במי גשם, חלה ירידה חדה בערכי ה-EC במי התשטיפ עד להגעתם לערכים במצב תמידי, שנעו בין 0.11 ל-0.41 dS/m, ערכים הגבוהים מערכי ה-EC של מי הגשם (2×10^{-3} dS/m) ששטפו את הקרקעות. ערכים גבוהים אלו של ה-EC במצב תמידי (איור 2) במי התשטיפ התקבלו כתוצאה מהמסה מתמשכת של הגיר בקרקעות השונות, שהעלתה את ריכוז האלקטרוליטים בתמיסת הקרקע.

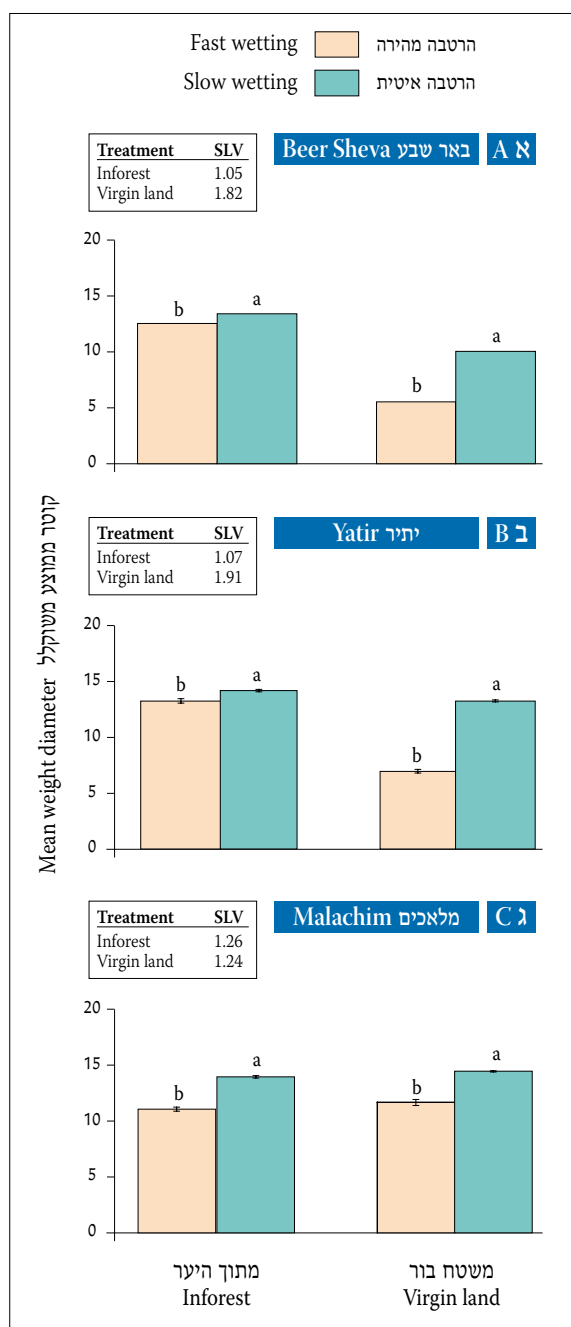
ערכי ה-EC הגבוהים (~5 dS/m) בתמיסת הקרקע של הקרקעות השונות עם שטיפתן במים מליחים (איור 2) מנעו את הדיספרסיה הכימית של החרסית והקטינו באופן ניכר את התפיחה של הקרקע (Shainberg & Letey, 1984). לכן מנגנונים אלה אינם יכולים להסביר את ההבדלים הגדולים בערכי ה- K_s בין דגימות הקרקע מתוך היער לאלה ממשטחי הבור באזורים בארבע שנים ויתיר במהלך שטיפתן במים מליחים (איורים 1א' ו-1ב'). המנגנון שיכול להסביר את ההבדלים האלה בערכי ה- K_s הוא פירור תלכידים של הקרקע עם הרטבתם כתוצאה מכוחות המיגוג. הערכים של קוטר ממוצע משוקלל (MWD) של התלכידים בדגימות הקרקע, שנדגמו מתוך היער או משטחי הבור באזור בארבע שנים, יתיר ומלאכים לאחר הרטבתן המהירה או האיטית וערכי המיגוג שלהם, כפי שחושבו מנוסחאות [1] ו-[2], בהתאמה, מובאים באיור 3. ההבדלים בין ערכי ה-MWD לאחר הרטבה מהירה בהשוואה להרטבה איטית של דגימות הקרקע, שנדגמו מתוך היער באזור בארבע שנים ויתיר, היו קטנים וערכי המיגוג שחושבו מערכים אלה היו קרובים לערך 1 (איורים 3א' ו-3ב'). דבר זה מורה על כך, שהתלכידים בדגימות קרקע אלה היו יציבים כנגד כוחות המיגוג. לעומת זאת, ערכי ה-MWD של דגימות הקרקע שנדגמו משטחי הבור באותם אזורים היו גבוהים

מובהק מאשר אלה שנדגמו משטחי הבור במהלך השטיפה בשני סוגי המים, כאשר הבדלים אלו היו גדולים יותר בקרקע מאזור בארבע שנים מאשר מיתיר. ערכי ה- K_s של הקרקעות מאזור בארבע שנים היו בתחום של 135-152 מ"מ/ש' בדגימות מתוך היער לעומת 17.1-23.5 מ"מ/ש' בדגימות משטחי הבור (איור 1א'), ומאזור יתיר היו בתחום של 101.2-114 מ"מ/ש' בדגימות מתוך היער לעומת 39.8-51.1 מ"מ/ש' בדגימות משטחי הבור (איור 1ב'). באזור מלאכים, לעומת זאת, לא



איור 2: ערכי מוליכות חשמלית בתשטיפ מדגימות הקרקע מהאזורים בארבע שנים, יתיר ומלאכים, שנדגמו מתוך היער ומשטחי הבור כתלות בנפח התשטיפ עם שטיפתם במים מליחים (SW) ולאחר מכן במי גשם (RW) כתלות בנפח התשטיפ. הקווים האנכיים מציינים שני ערכי שגיאות תקן מהממוצע.

Fig. 2: Electrical conductivity values of the forest and virgin soils from Beer Sheva, Yatir, and Malachim regions as functions of the cumulative leachate volume of saline water (SW) and rainwater (RW). The vertical bars represent 2 standard errors.



איור 3: ערכים של קוטר ממוצע משוקלל (MWD) של התלכידים בדגימות הקרקע שנדגמו מתוך היער או משטחי הבור באזור באר שבע, יתיר ומלאכים לאחר הרטבתן המהירה או האיטית וערכי המיגוג (SLV) שלהם. קווים אנכיים בראש העמודות מציינים שני ערכי שגיאות תקן מהממוצע, ואותיות שונות בראש העמודות מציינות הבדלים מובהקים בין ערכי ה-MWD של התלכידים לאחר הרטבה איטית או מהירה בכל שימוש קרקע ואזור.

Fig. 3: Mean diameter values of aggregates of the forest and virgin soils from Beer Sheva, Yatir, and Malachim regions after fast and slow wetting and their slaking values (SLV). The vertical bars at the top of the columns represent two standard error values, and different letters at the top of the columns indicate significant differences between the wetting rates for each land use and region.

באופן מובהק לאחר הרטבה מהירה מאשר הרטבה איטית, וערכי המיגוג שלהם היו גבוהים, 1.83 ו-1.91, בהתאמה (איורים 3א' ו-3ב'). מכאן, שהמבנה של הקרקעות משטחי הבור הוא פחות יציב ורגיש יותר להרס כתוצאה מכוחות המיגוג מאשר הקרקעות מתוך היער. תוצאות אלו תואמות לפחיתה המובהקת בערכי ה- K_s של הקרקעות, שנדגמו משטחי הבור לעומת אלו שנדגמו מתוך היער באזור באר שבע ויתיר (איורים 1א' ו-1ב'). באזור מלאכים, ערכי ה-MWD של הדגימות שנדגמו מתוך היער או משטחי הבור היו גבוהים באופן מובהק לאחר הרטבה מהירה מאשר לאחר הרטבה איטית (איור 3ג), ולכן דגימות אלו רגישות להרס המבנה שלהן עקב כוחות המיגוג. אולם, ערכי המיגוג של הדגימות מתוך היער או משטחי הבור היו דומים, 1.26 ו-1.24, בהתאמה. מכאן, שהרגישות של דגימות אלו להרס מבנה כתוצאה מכוחות המיגוג הייתה דומה, ולכן, כנראה, ערכי ה- K_s שלהן היו דומים (איור 3ג').

ההבדלים ביציבות המבנה של הקרקעות השונות שנדגמו מתוך היער או משטחי הבור באזורים השונים כנגד כוחות המיגוג עשויים לנבוע מהתכולה השונה של החומר האורגני הכללי בקרקעות אלו, כאשר החומר האורגני בקרקע מהווה, בדרך כלל, חומר מתלכד בין חלקיקי הקרקע המונע את התפוררות התלכידים כנגד כוחות ההרס הנובעים מהרטבה ומתנועה של המים בקרקע (Lado et al., 2004). תכולת החומר האורגני הכללי בקרקעות, שנדגמו מתוך היער ומשטחי הבור באזורים באר שבע, יתיר ומלאכים כתלות בעומק הקרקע, מובאים באיור 4. תכולת החומר האורגני הכללי בקרקע הייתה הנמוכה ביותר (0.5%-1.4%) באזור באר שבע, בינונית (1.5%-3.1%) ביתיר והגבוהה ביותר (3.1%-8.1%) במלאכים. סביר מאוד להניח, שהבדלים אלה בתכולת החומר האורגני הכללי בקרקע מהאזורים השונים נבעו בעיקר מהשינוי בכמויות הגשם, כאשר ממוצע הגשם הרב-שנתי באזור באר שבע, יתיר ומלאכים הוא 283, 190 ו-360 מ"מ/שנה, בהתאמה. בשטחי הבור באזור מלאכים, הצמחייה של השיחים הייתה רבה וצפופה יותר באופן משמעותי מאשר באזורים באר שבע ויתיר. זאת, בגלל כמות הגשם השנתית הגבוהה יחסית באזור זה, שגרמה לתכולה משמעותית (3.8%-5.5%) של חומר אורגני בקרקע בשטחי הבור.

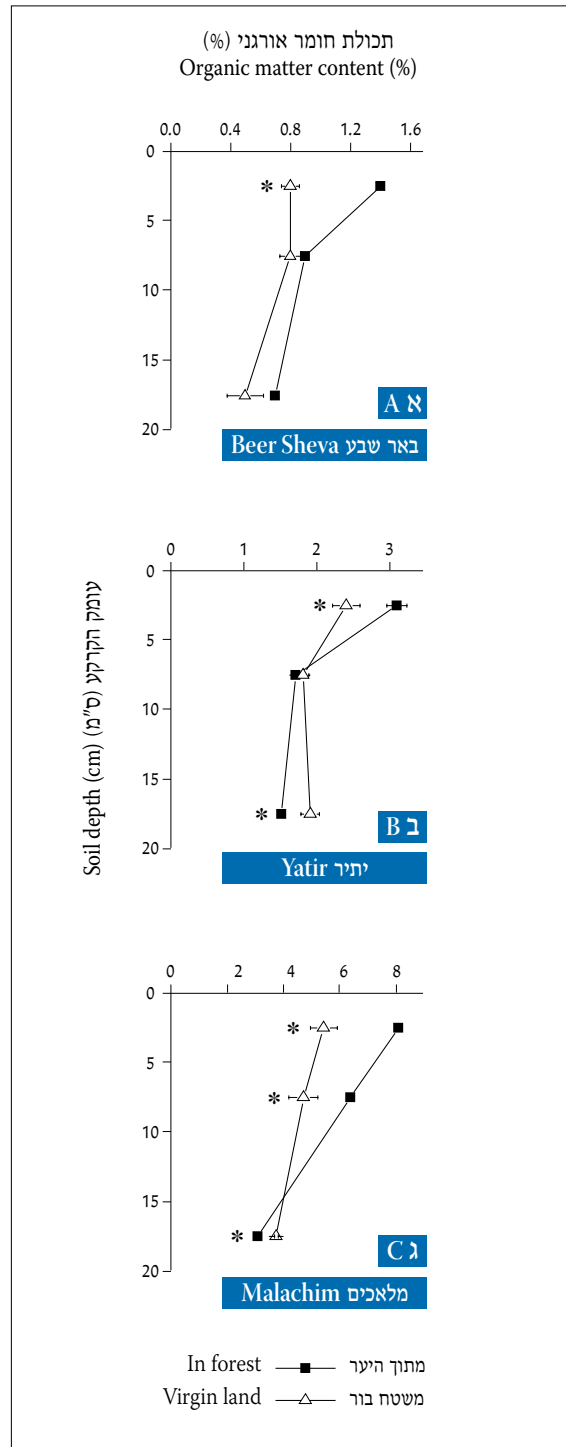
באזורים באר שבע ויתיר, תכולת החומר האורגני בשכבת הקרקע העליונה (0-5 ס"מ) הייתה גבוהה באופן מובהק בדגימות מתוך היער מאשר אלה משטחי הבור, כאשר בשאר העומקים הבדלים אלה היו קטנים ורובם לא מובהקים. תוצאות אלו מרמזות על כך, שתכולת החומר האורגני הגבוהה יותר בדגימות מתוך היער באזורים באר שבע ויתיר נבעה בעיקר מהנשר שנשר מנוף עצי היער על פני הקרקע. באזור מלאכים תכולת החומר האורגני בדגימות מתוך היער

הייתה גבוהה באופן מובהק מאשר בדגימות משטחי הבור עד לעומק של 10 ס"מ לפחות. במקרה זה, נשר העצים והפעילות הביולוגית המוגברת בדגימות מתוך היער היו הגורמים העיקריים לעלייה המובהקת בתכולת החומר האורגני עד לעומק של 10 ס"מ.

תכולת החומר האורגני הנמוכות בדגימות הקרקע משטחי הבור באזורים באר שבע ויתיר (0.8%-1.5%, איורים א' ו-ב') גרמו כנראה למבנה לא יציב עם ערכי מיגוג של K_s נמוכים (1.82 ו-1.91, בהתאמה (איורים א' ו-ב')) ולערכי K_s נמוכים (איורים א' ו-ב'). עלייה בתכולת החומר האורגני בדגימות מתוך היער ל-1.4% באזור באר שבע ול-3.1% באזור יתיר (איורים א' ו-ב') ייצבה את המבנה של קרקעות אלו ועל ידי כך הקטינה את הרס התלכידים שלהן כתוצאה מכוחות המיגוג עם הרטבתן ושמרה על ערכי K_s גבוהים (איורים א' ו-ב'). תוצאות דומות התקבלו בעבודתם של Lado וחוב' (2004), שמצאו כי עלייה בתכולת חומר אורגני כללי בקרקעות מספרד מ-2.3% ל-3.5% הגדילה את יציבות תלכיד הקרקע, מנעה את התמוגגותם והעלתה את ערכי K_s שלהן. לעומת זאת, באזור מלאכים, למרות ההבדל המובהק בתכולת החומר האורגני בשכבת הקרקע 0-10 ס"מ בין הדגימות מתוך היער לעומת אלו משטחי הבור (איור ג'), לא נמצאו הבדלים מובהקים בערכי ה- K_s של הדגימות (איור ג'). כנראה, שתכולת החומר האורגני הגבוהה (5.5%) בשכבת הקרקע העליונה משטחי הבור באזור זה הספיקה לייצב את מבנה הקרקע לרמת ייצוב של הדגימות מתוך היער, שהכילו 8.1% חומר אורגני.

למרות הירידה החדה בערכי ה-EC בתמיסת הקרקע בקרקעות השונות, עם המעבר משטיפתם במים מליחים למי גשם (איור 2), הפחיתה בערכי ה- K_s שלהן הייתה מתונה (איור 1). הירידה בערכי ה- K_s לאחר שטיפה בכ-8 נפחי נקבובים של מי גשם לעומת ערכי ה- K_s בשטיפה עם מים מליחים של הדגימות מתוך היער או משטחי הבור הייתה 11%-27.2%, בהתאמה, בקרקעות מאזור באר שבע, 11.4%-22.11%, בהתאמה, בקרקעות מאזור יתיר ו-1%-2.8%, בהתאמה, באזור מלאכים (איור 1). ירידה זו במוליכות ההידראולית של הקרקעות השונות עם שטיפתן במי גשם יכולה לנבוע משני גורמים עיקריים (Keren & Ben-Hur, 1984; Shainberg & Letey, 2003):

(1) דיספרסיה כימית של החרסית בקרקע הגורמת לפירור התלכידים ולאטימת הנקבובים המוליכים מים. ערכי ה-EC במצב תמידי שהתקבלו לקראת סוף השטיפה של הקרקעות השונות במי הגשם היו גבוהים מערכי הפלוקולציה של החרסית בקרקעות אלו עם רמת הניתרון הנמוכה שלהן (ערכי $SAR > 1.03$, טבלה 1) (Oster et al., 1977; van Olphen, 1980), ולכן הדיספרסיה הכימית של החרסית במקרה זה נמנעה. עם זאת, ערכי הדיספרסיה



איור 4: תכולת חומר אורגני כללי בקרקעות שנדגמו מתוך היער ומשטחי הבור באזורים באר שבע, יתיר ומלאכים כתלות בעומק הקרקע. קווים אופקיים מציינים שני ערכי שגיאות תקן מהממוצע, ו- $*$ מציינת הבדל מובהק בין תכולת החומר האורגני בשכבת הקרקע שנדגמה מתוך היער לעומת השכבה שנדגמה משטח הבור בכל אזור.

Fig. 4: Organic matter content in the forest and virgin soils from Beer Sheva, Yatir, and Malachim regions as functions of the soil depth. The lateral bars near the symbols represent 2 standard errors, and * indicates significant differences between the land uses for each soil depth and region.

Location מיקום	In forest בתוך היער %	Virgin land שטח בור %
Beer Sheva באר שבע	30.6 b	65.2 a
Yatir יתיר	16.3 b	36.6 a
Malachim מלאכים	12.1 a	16.3 a

טבלה 2: ערכי דיספרסיה של הקרקעות שנדגמו מתוך היער ומשטחי הבור באזורים השונים. אותיות שונות ליד המספרים בכל שורה מציינות הבדלים מובהקים בין הדגימות מתוך היער לבין הדגימות משטחי הבור.

Table 2: Dispersion values of the soil samples that were sampled from the forest and the virgin land.

Different letters near the numbers indicate significant differences between the land uses in each region.

2. שיפור במבנה הקרקע ובמוליכות ההידראולית שלה ביער נבע בעיקר מהעלייה בתכולת החומר האורגני בשכבת הקרקע העליונה כתוצאה מעלים וממחטים שנשרו מנוף העצים על פני הקרקע. באזורים באר שבע ויתיר, שבהם ממוצע הגשם הרב-שנתי הוא 190 ו-283 מ"מ/שנה, חלה עלייה מובהקת בתכולת החומר האורגני בקרקע ל-1.4% ו-3.1%, בהתאמה, וכתוצאה מכך גם לעלייה במוליכות ההידראולית של הקרקעות ביער. לעומת זאת, באזור מלאכים, שבו ממוצע הגשם הרב-שנתי הוא 360 מ"מ/שנה, תכולת החומר האורגני בקרקע בשטחי הבור הייתה 5.5%, שהספיקה לייצב את מבנה הקרקע לרמת ייצוב של קרקע היער, שהכילה 8.1% חומר אורגני. כתוצאה מכך, שינוי בשימוש הקרקע משטח בור ליער באזור זה לא השפיע על ערכי המוליכות ההידראולית של הקרקע.

3. ייצוב במבנה הקרקע באזורים שבהם ממוצע הגשם הרב-שנתי היה $283 > \text{מ"מ/שנה}$ נבע בעיקר מהתנגדות לכוחות המיגוג, שנובעים מהרטבה מהירה של הקרקע.

4. העבודה הנוכחית נעשתה בדגימות מופרות שנלקחו משטחי בור ויער והמדידות נעשו בתנאי מעבדה. לכן, מחקר נוסף בנושא דרוש בתנאי שדה בקרקעות לא מופרות.

מקורות

- אסם, י. (2014). סוגיות עיקריות בחקר היערות המחטניים של ישראל – סיכום ארבעים שנות מחקר (1972–2012), חלק ב': הבנת התהליכים הטבעיים המתרחשים ביער ומעבר לניהול היער כמערכת אקולוגית רב תכליתית. אקולוגיה וסביבה, 4: 421–430.
- בן-חור, מ., גסר, ג., לייב, ל., טנאו, ח., מרקיס, כ. ואסולין, ש. (2010). השפעת תכסית צמחית ושימושי קרקע על נגר עילי וסחף קרקע בשטחים פתוחים במישור החוף. הנדסת מים, 71: 34–39.
- לבנוני, ט. (2005). מגוון המינים ביערות אורנים נטועים בהשוואה לחורש טבעי בשפלת יהודה. עבודת גמר לתואר מוסמך, אוניברסיטת תל-אביב.

שנמדדו בעבודה הנוכחית וחושבו על פי נוסחה [4] בקרקעות מהאזורים באר שבע ויתיר בדגימות משטחי הבור היו גבוהים באופן מובהק מאשר אלה מתוך היער, כאשר באזור מלאכים, ערכי הדיספרסיה היו נמוכים וההבדלים בין הערכים שהתקבלו בדגימות מתוך היער ומשטחי הבור היו לא מובהקים (טבלה 2). כנראה, שערכי הדיספרסיה הגבוהים יותר בדגימות משטח הבור לעומת הדגימות מתוך היער באזורים באר שבע ויתיר נבעו מדיספרסיה מכנית של החרסית בקרקע, שנבעה מתכולה נמוכה יותר של חומר אורגני בדגימות משטחי הבור מאשר בדגימות מתוך היער (איורים 4א' ו-4ב'). הדיספרסיה המכנית של החרסית בקרקע נגרמת מהרס תלכדי חרסית כתוצאה מכוחות המיגוג עם ההרטבה המהירה של הקרקע ואינה מושפעת מריכוז האלקטרוליטים בתמיסה. מכאן, שערכי הדיספרסיה הגבוהים יותר בדגימות משטחי הבור מאשר מתוך היער באזורים באר שבע ויתיר, כפי שנמצאו בעבודה זו (טבלה 2), היו כנראה גורם נוסף לערכי ה- K_s הנמוכים יותר בדגימות משטחי הבור, לעומת הדגימות מתוך היער במהלך שטיפת הקרקע במים מליחים ומי גשם (איורים 1א' ו-1ב'). ערכי הדיספרסיה בדגימות הקרקע משטחי הבור באזור באר שבע היו גבוהים יותר באופן מובהק (65.2%) מאשר באזור יתיר (36.6%) (טבלה 2). הבדלים אלה בערכי הדיספרסיה היו, כנראה, הגורם להבדלים הגדולים יותר בערכי ה- K_s בין הדגימות מתוך היער לדגימות משטחי הבור באזור באר שבע מאשר באזור יתיר (איורים 1א' ו-1ב').

(2) תפיחת הקרקע הגורמת להצרה של הנקבובים המוליכים מים בקרקע. תפיחה זו גדלה ככול שריכוז האלקטרוליטים בתמיסת הקרקע יורד וערכי הנתרון של הקרקע עולים. ערכי התפיחה שנמדדו בעבודה הנוכחית וחושבו מנוסחה [3] היו נמוכים יחסית, ולא נמצאה מגמה מובהקת בינם לבין ערכי ה- K_s של דגימות הקרקע השונות (תוצאות לא מוצגות). כנראה, שערכי הנתרון הנמוכים בקרקעות שנמדדו (טבלה 1) גרמו לירידה המתונה בערכי ה- K_s עם שטיפתן במי הגשם (איור 1) ולחוסר המגמה שנמצאה בין ערכי התפיחה לערכי ה- K_s .

סיכום ומסקנות

1. השפעת השינוי בשימוש הקרקע משטחי בור ליער על יציבות מבנה הקרקע והמוליכות ההידראולית שלה בדרום הארץ הושפעה מתנאי האקלים, ובמיוחד ממוצע הגשם הרב-שנתי באזור. שינוי זה גרם לעלייה מובהקת ביציבות מבנה הקרקע ובמוליכות ההידראולית שלה באזורים באר שבע ויתיר ולחוסר השפעה באזור מלאכים.

- hydraulic conductivity. *Aust. J. Soil Res.*, 41: 979–989.
- Lado, M., Paz, A. & Ben-Hur, M. (2004). Organic matter and aggregate-size interactions in saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68: 234–242.
- Le Bissonnais, Y. & Arrouay, D. (1997). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *European Journal of Soil Science*, 48: 39–48.
- Morin, J., Benyamini, Y. & Michaeli, A. (1981). The effect of raindrop impact on the dynamics of soil surface crusting and water movement in the profile. *J. Hydrol.*, 52: 321–335.
- Oster, J.D., Shainberg, I. & Wood, J.D. (1980). Flocculation value and gel structure of Na/Ca montmorillonite and illite suspension. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 955–959.
- Raz-Yaseef, N., Rotenberg, E. & Yakir, D. (2010). Effect of spatial variation in soil evaporation caused by tree shading on water flux partitioning in a semi-arid pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150: 454–462.
- Raz-Yaseef, N., Yakir, D., Schiller, G. & Cohen, S. (2012). Dynamic of evapotranspiration partitioning in a semi-arid forest as affected by temporal rainfall patterns. *Agricultural and Forest Meteorology*, 157: 77–85.
- Rotenberg, E. & Yakir, D. (2010). Contribution of semi-arid forest to the climate system. *Science*, 327:451–454.
- Shabtai, I.A., Shenker, M., Edeto, W.L., Warburg, A. & Ben-Hur, M. (2014). Effect of land use on structure and hydraulic properties of Vertisol containing a sodic horizon in northern Ethiopia. *Soil & Tillage Research*, 136:19–27. DOI: 10.1016/j.still.2013.09.007
- Shainberg, I. & Letey, J. (1984). Response of soils to saline and sodic conditions. *Hilgardia*, 52: 1–57.
- Smith, D.L. & Johnson, I.C. (2003). Expansion of *Juniperus virginiana* L. in the Great Plains: Changes in soil organic carbon dynamics. *Global Biogeochem. Cy.*, 17, 1062.
- Tsegaye, D., Moe, S.R., Vedeld, P. & Aynekulu, E. (2010). Land-use/cover dynamics in Northern Afar rangelands, Ethiopia. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 139: 174–180.
- Ungar, E.D., Rotenberg, E. & Cohen, S. 2013. Transpiration and annual water balance of Aleppo pine in a semi-arid region: Implications for forest management. *Forest Ecology and Management*, 298:39–51.
- van Olphen, H. (1977). *An Introduction to Clay Colloid Chemistry* (2nd ed.). New York: Interscience publishing.
- עמית, ת. (2009). השפעת גורמים ביוטיים ואביוטיים על הביומסה ועושר המינים של צומח שיחי ועשבוני ביערות מחטניים בספר המדבר. עבודת גמר לתואר מוסמך, הפקולטה לחקלאות, האוניברסיטה העברית. קפלן, מ. (2008). תכנית מתאר ארצית ליער ולייעור, תמ"א 22. מסמך מדיניות.
- רביקוביץ, ש. (1992). קרקעות ישראל: התהוותן, טבען ותכונותיהן. הוצאת הקיבוץ המאוחד .
- Agassi, M., Shainberg, I. & Morin, J. (1981). Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crust formation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45: 848–851.
- Allison, L.E. (1965). Organic carbon. In: Black, C.A., Evans, D.D., White, J.L., Ensminger, L.E., Clark, F.E. (Eds.), *Methods of soil analysis, Part 2: Chemical and microbiological properties (agronomy)* (pp. 1367–1378). Madison, WI: American Society of Agronomy, Inc.
- Ben-Hur, M. (2008). Seal formation effects on soil infiltration and runoff in arid and semiarid regions under rainfall and sprinkler irrigation conditions. In: Zereini, F., Jaeschke, W. (Eds.), *Climatic Changes and Water Resources in the Middle East and in North Africa* (pp. 429–452). Berlin Heidelberg: Springer-Verlang .
- Ben-Hur, M., Yolcu, G., Uysal, H., Lado, M. & Paz, A. (2009). Soil structure changes: aggregate size and soil texture effects on hydraulic conductivity under different saline and sodic conditions. *Aust. J. Soil Res.*, 47: 688–696.
- Day, P.R. (1956). Report of the Committee on Physical Analyses, 1954–1955. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 20: 167–169.
- Farley K.A., Jobbagy, E.G. & Jackson, R.B. (2005). Effects of afforestation on water yield: A global synthesis with implications for policy. *Glob Change Biol.*, 11: 1565–1576.
- Grunzweig, J.M., Gelfand, I., Fried, Y. & Yakir, D. (2007). Biogeochemical factors contributing to enhanced carbon storage following afforestation of a semi-arid shrubland. *Biogeosciences*, 4: 891–904.
- Gupta, R.K. & Verma, S.K. (1984). Influence of soil ESP and electrolyte concentration of permeating water on hydraulic properties of a Vertisol. *Z. Pflanz. Bodenkunde*, 147: 77–84.
- Jackson, R.B., Banner, J.L., Jobbagy, E.G. Pockman, W.T. & Wall, D.H. (2002). Ecosystem carbon loss with woody plant invasion of grasslands. *Nature*, 418: 623–626.
- Keren, R. & Ben-Hur, M. (2003). Interaction effects of clay swelling and dispersion and CaCO₃ content on saturated