

בשורה טובה למגדלי תמרים בבקעה - ניסוי ראשון מסוגו בעולם שנערך בשנה האחרונה מצא כי שימוש בקומפוסט באדמות החאוואר משפר את איכות הקרקע כך שהופך קרקעות חאוואר לא מעובדות עד היום למעולות לנטיעת תמרים ובכך לאפשר הרחבת שטחי המטעים.

פיין פנחס¹, אפרים ציפילוביץ², זיוה קופר³, אייל בן-נבט⁴

¹גמלאי המכון למדעי הקרקע המים והסביבה, מרכז וולקני finep@volcani.agri.gov.il; ²מו"פ בקעת הירדן; ³מעבדת שירות שדה, בקעת הירדן; ⁴חברת קומפוסט-אור, בקעת הירדן.

קומפוסט בוצה מקטין את מסיסות הבורן בתמיסת קרקע חווארית

מבקעת הירדן

תקציר

תמר מג'הול הוא גידול מטע מרכזי בבקעת הירדן, שהרחבת היקפו בבקעה מתבצעת על קרקעות חוואר שוליות שנוצרו מחוואר הלשון. בדקנו את ההשפעה האפשרית של עומסים כבדים של קומפוסט מבוצת שפכים כאמצעי להקטנת זמינות הבורן בקרקע, כשיתרונו הנוסף הוא שיפור מצב ההזנה של הקרקע. הקרקע שנבדקה הייתה מלוחה מאד (EC כ-40 ד"ס/מ'), נתרנית (SAR 25 mmol0.5) ועתירת בורן (90 מ"ג/ק"ג). הבדיקה נעשתה במעבדה. קומפוסט עורבב בקרקע ביחסים השקולים ליישום 8 עד 94 מ"ק"ד' (4 עד 53 ט' חומר יבש לדונם). הקומפוסט הגדיל מאד את התכולות האמוניום, הזרחה הזמינה והאשלגן המומס, ובעומס המרבי ההגדלה בתכולת היסודות הצרופים (N, P, K) הייתה שקולה לכ-130, 70 ו-180 ק"ג/ד', בהתאמה. לשם השוואה נבדקו גם תערובות דומות בחול. התערובות נארזו במשפכי בוכנר ונשטפו 10 פעמים. לאחר שהייה מתאימה נשאבו עודפי המים במתח של כשליש אטמוספירה (לתכולת מים ב"קיבול שדה"). מנת מי השטיפה הייתה זהה לנפח המים בקרקע בקיבול שדה, והרכב מי הנקז מייצג את הרכב תמיסת הקרקע. במנה המרבית, הקומפוסט הכפיל את תכולת המים בקיבול שדה בחול, והגדיל אותה בכ-20% בקרקע החווארית. בתערובות החול, הקומפוסט היה המקור העיקרי לבורן בכלל עומסי היישום, והוא הגדיל את ריכוזי בתמיסת הקרקע ואת

דליפתו, שהגיעה עד בין פי 2.5 לפי 40 מהחול לבדו בעומסים השקולים ל-8 ול-86 מ"ק"ד'. לעומת זאת, בתערובות הקרקע החווארית, המקור העיקרי לבורן היה הקרקע עצמה, הקומפוסט היווה מבלע לבורן של הקרקע, ונוכחותו הקטינה את ריכוזי הבורן במי-הנקז (כלומר, בתמיסת הקרקע) בהשוואה לקרקע לבדה. השפעת הקומפוסט גדלה יחסית לעומס יישומו, וריכוז הבורן הממוצע

במי-הנקז בתכולת הקומפוסט המרבי היה קטן בכ-60% בהשוואה לריכוז במי-הנקז מהקרקע עצמה. הסיבה לכך היא שלקומפוסטים יש קיבול ספיחה גבוה מאד לבורן בהשוואה לקרקעות, ובנוסף, ריכוז הבורן בקומפוסט היה כשליש מריכוזו בקרקע.

נדרשו 5 שטיפות יעילות של הקרקע החווארית להורדת ה-EC של התמיסה ל-10 ד"ס/מ'. בתכולת מים בקיבול שדה של 35% ממשקל הקרקע בשכבה 0-40 ס"מ, כמות המים שתידרש לכל שטיפה היא כ-180 מ"ק"ד' (תוך הקפדה על מניעת ניתרון כתוצאה מהשטיפה).

לסיכום, יישום קומפוסט הבוצה, גם בשיעורים גבוהים (40 ואף 80 מ"ק"ד'), במטעי תמר (מטעים קיימים וחדשים כאחד) על קרקע חווארית עתירת בורן שנוצרה מחוואר הלשון עשוי להקטין את ריכוזי הבורן בתמיסת הקרקע באופן משמעותי בהשוואה לקרקע ללא קומפוסט. בנוסף לכך, הקומפוסט הנו מקור עשיר ליסודות הזנה וקורט מה שעשוי להוות יתרון בנטיעות חדשות על הקרקע החווארית.

מבוא

הנטיעות החדשות של תמר בבקעת הירדן הנה בעיקרה על קרקעות חוואר יובשניות, מלוחות מאד, נתרניות

תכולה גבוהה מאד של בורון (Dan et al., 1981; יוטל, 1990). בורון הנו יסוד חיוני לצמחים אולם תחום הריכוזים בתמיסת הגידול הדרוש לגידולם האופטימלי הינו צר. כשריכוזו גבוה מסך הרעילות מופיעים סימני כלורזה בקצות העלים, אשר בשלב מאוחר יותר הם מלווים בנשירת עלים ובמקרים קיצוניים זה מוביל לתמותת הצמחים (Stangoulis and Reid, 2002). בריכוזים עודפים בתמיסת הקרקע (מעל 1 מ"ג/ל) בורון רעיל לגידולים חקלאיים רגישים, וגידולים עמידים מאוד יפגעו בריכוזים של 6-15 מ"ג/ל (Eaton, 1944). ריכוז הבורון בתמיסת הקרקע תלוי בריכוז הכללי בקרקע, בהרכב מי ההשקיה ותמיסת הקרקע (ובעיקר pH הרכב קטיונים ומליחות. כך ה-pH הנו קריטי עם ספיחה מרבית ב-pH סביב 9, עקב השפעתו על הצורונים הכימיים של הבורון ועל התחרות על אתרי הספיחה בין יון הבוראט לבין ההידרוקסיל (Keren and Mezuman, 1981). הספיחה תלויה כמובן בתכולת מרכיבי קרקע סופחים ובמיוחד חרסית (בהתאם לסוגה), תחמוצות חופשיות, חומר אורגני וגיר (Keren and Bingham, 1985; Goldberg, 1997). הספיחה לחומר אורגני משמעותית יותר מהספיחה לחרסית סמקטיטית, ובתנאי קרקע נתונה, יישום קומפוסטים דלי-בורון מגדיל את ספיחת הבורון לקומפוסט, ומקטין את רעילותו לצמחים (ירמיהו, 1988; Yermiyahu et al., 1995; 2011; Sartaj and Fernandes, 2005). קצב השחרור של יון בוראט ספוח יכול להיות דומה לקצב ספיחתו או להיות איטי מאד (עד כ-3 סדרי גודל) בהשוואה אליו, תופעה הנקראת היסטורזה (Keren et al., 1994). Elrashidi and O'Connor (1982) שחננו את התופעה במגוון קרקעות לא מצאו גורם קרקעי היכול להסביר זאת. בכל מקרה, המנגנונים שהוצעו להסביר את ההיסטרזה כוללים חילוף ליגנדים בין יון הבוראט להידרוקסילים על פני השטח הסופחים (שהוזכרו לעיל), יצירת

קומפלקסים עם תחמוצות ברזל ואלומיניום המצויות בפני שטח אלה, וכן דיפוזיה של בורון אל תוך השריג הגבישי של מינרלי חרסית וכליאטו בתוכו (Goldberg, 1997). תמר הוא גידול מטע מרכזי בבקעת הירדן, שהיקפו הנוכחי הוא כ-30 אלף דונם, והוא עולה בהתמדה. מרבית המטעים מושקים במים מליחים ממאגר תירצה, שמוליכותם החשמלית (בממוצע עונתי) היא כ-5-6 ד"ס/מ'. הגם שתמר עמיד למליחות ולבורון, טריפלר וחוב' (2009) מצאו ירידה של כ-45% ביבול פרי מג'הול בגידול בליזימטרים, כשמליחות המים עלתה מ-1.8 ד"ס/מ' ל-4 ד"ס/מ', בהתאמה לירידה בטרנספירציה. ריכוזי הבורון בעלים עלו עם העלייה בריכוזו במי ההשקיה מ-0.3 עד 40 מ"ג/ל כשההשקיה הייתה במים תפלים יותר (1.8 ד"ס/מ'). אולם במליחיות עולות של מי ההשקיה והקטנה בקליטת המים, פחתה קליטת הבורון וירדו ריכוזיו בעלים. כך, השקיה במים התפלים יותר, תוספת של בורון בריכוז 2 מ"ג/ל הקטינה את יבול התמרים. לעומת זאת במי-השקיה במוליכות של 4 ד"ס/מ' ויותר, לריכוזי הבורון כשלעצמם (עד 40 מ"ג/ל' במי ההשקיה) הייתה השפעה קטנה על הריכוזים בעלים ועל היבול. הזמינות הגבוהה של קומפוסטים בבקעה, הן מבוצת שפכים והן מאשפת ערים, עשויה לעודד יישומם בעומסים גבוהים בקרקעות החוואריות כאמצעי להקטנת הזמינות לצמח של הבורון הקרקעי, וזאת משתי סיבות: (א) ריכוז הבורון בקומפוסטים נמוך משמעותית מהריכוז בקרקע; (ב) ספיחת בורון לקומפוסט גדולה במידה משמעותית מספיחתו לקרקע, מה שיוריד את ריכוזו בתמיסת הקרקע. ניתן לשער כי העלות הכוללת של יישום קומפוסט (גם בעומסים גבוהים) לא תהיה גבוהה מאחר שעלות ההובלה למרחקים הקצרים בבקעה הנה מזערית, וזאת העלות העיקרית של קומפוסטים אלה. היתרון של קומפוסט הבוצה על קומפוסט האשפה הוא בתכולה ובזמינות הגבוהה של יסודות ההזנה (מאקרו ומיקרו) (פיין וחוב', 2014; Fine et al., 2020).

ב. עבודות אלו גם הראינו כי אין לחשוש מקליטה בצמח של מתכות כבדות ויסודות רעילים אחרים בגידול על קומפוסט בוצה (לדוג', פיין וחוב', 2014-2014; פיין וחוב', 2020), וזאת גם כאשר הקרקע גדושה במתכות כבדות (עין-גל, 2014). לפיכך, מטרת העבודה הייתה לבחון את התנהגות הבורון בתמיסת קרקע חווארית מהבקעה, המיועדת לנטיעות חדשות של מג'הול, ואת השפעת קומפוסט בוצת השפכים על ריכוזי הבורון בתמיסת הקרקע.

חומרים ושיטות

הקרקעות וקומפוסט הבוצה:

נדגמה קרקע בתולה חווארית בגאון הירדן (הז'ור; מישור ההצפה של נהר הירדן) בשטח המיועד לנטיעה ע"י מושב בקעות. הקרקע נדגמה מהשכבה 0-20 ס"מ, היא נכתשה קלות כך שתעבור נפה בגודל חרירים של 2 מ"מ. לשם השוואה, נלקח חול מערימה ישנה של חול מילוי, שהובא לבקעה בשנות ה-90 ונועד לגידול פרחים. קומפוסט הבוצה ששימש בניסוי יוצר בפארק מיחזור אור, ע"י חברת קומפוסט אור בבקעה. תכולת יסודות בקרקע, בחול ובקומפוסט מוצגים בטבלה 1. הבדיקות בוצעו ע"י 'מעבדות בקטוכם' תל-אביב, בשיטות של ה- EPA (US-EPA 6010C In house procedure, based on EPA 3050). לענייננו, המליחות של קרקע הסילט החווארית דמתה מאד לזו של הקומפוסט אך תכולת הבורון בה כ-90 מ"ג/ק"ג, גבוהה כמעט פי 3 מאשר בקומפוסט, וגבוהה בהרבה מהערכים 4-30 מ"ג/ק"ג שדיווח יוטל (1990) לקרקעות בבקעה. בקרקע החווארית גם תכולות גיר וברזל גבוהות מאד יחסית (פי 5-10 מאשר בחול; פי 2 ויותר מאשר בקומפוסט) ושל מגניום, מנגן ולייתיום אך

יסוד (מ"ג/ק"ג)	קרקע חווארית	חול מהבקעה	קומפוסט בוצה
EC (dS/m; 1:5)	6.74	0.13	6.77
pH (1:5)	8.06	9.07	7.06
OC (%)	לא נבדק	לא נבדק	29.6
Total N (%)	לא נבדק	לא נבדק	2.5
Arsenic (As)	<5	<5	2.6
Barium (Ba)	105	27	350
Boron (B)	89	<3	34
Cadmium (Cd)	2.3	<2	<2
Calcium (Ca)	165,344	2,919	80,228
Chromium (Cr)	71	7.0	37
Cobalt (Co)	13	2.0	4.0
Copper (Cu)	29	4.7	223
Iron (Fe)	23,695	4,763	10,234
Lead (Pb)	13	2.9	30
Lithium (Li)	61	2.7	6.5
Magnesium (Mg)	22,245	762	6,651
Manganese (Mn)	1,726	100	211
Molybdenum (Mo)	3.4	<1	4.8
Nickel (Ni)	47	5.3	28
Phosphorus (P)	1,281	350	15,244
Potassium (K)	8,558	678	4,563
Sodium (Na)	5,999	208	1,990
Strontium (Sr)	287	17	228
Sulfur (S)	8,047	67	6,866
Vanadium (V)	67	8.5	16
Zinc (Zn)	74	17	1,157

טבלה 1: הרכב כימי כללי של הקרקע החווארית מהבקעה, החול וקומפוסט הבוצה 3678 תכולות נמוכות יחסית של זרחן ואבץ (בהשוואה לקומפוסט). מפתיעה תכולת הזרחן הגבוהה למדי בחול, שהיא כנראה תוצאה של שהייתו בקרבת חממות גידול במשך עשרות שנים. כפי שציינו לעיל, תכולות חרסית, תחמוצות ברזל חופשיות, חומר אורגני וגיר קובעות את מידת הספיחה של בורון לקרקע.

תערובות קרקע - קומפוסט הבוצה - אופן הכנתן והרכבן:

כל המדידות שידווחו להלן בוצעו במעבדת שירות השדה בבקעת הירדן ע"י זיוה קופר וצוותה.

קרקע וחול, כל אחד במשקל קבוע של 200 גרם, עורבבו עם קומפוסט במשקלים שונים (0-72 גרם\200 ג' קרקע). הקרקע והקומפוסט היו ביובש אוויר אבל המשקלים שנלקח בפועל תוקן לפי תכולת המשקל היבש ב-105 מעלות צל'. עומסי היישום המשקליים של הקומפוסט בקרקע ובחול היו שווים ערך ל-0 עד 53 ט'ד', סה"כ 5 עומסי ערבוב בכל קרקע. בפועל, הערבוב היה בהנחה שהקרקע מייצגת את שכבת החריש (0-20 ס"מ) וכי צפיפותה הנפחית היא 1.25 ק"ג/ליטר. מכאן שמשקל שכבת החריש

הוא 250 טון (יבש תנור)\ד', וכל אחוז אחד ממשקל הקרקע שווה ל-2.5 טון. ובמקרה הנדון, אחוז אחד ממשקל הקרקע הוא 2 ג', ואיך זיל גמור. העומס הנפחי של הקומפוסט היה שווה ערך ל-0 עד 95 מ"ק\ד', והמעבר

מעומס משקלי לעומס נפחי היה לפי הצפיפות נפחית של הקומפוסט (שנמדדה בנפרד), כל תערובת הוכנה ב-3 חזרות, וכל אחת מהן נשקלה בנפרד, כך שכל החזרות הכילו כמות זהה של קרקע ושל קומפוסט. סה"כ הוכנו 30 תערובות קרקע\חול - קומפוסט. התערובות נארזו במשפכי בוכנר מפרקיים (אותם ניתן להפריד לשניים, מכל ומשפך) בנפח 400 מ"ל. על תחתית הבוכנר ומעל תערובת הקרקע הארוזה בו הונח נייר סינון עשוי סיבי זכוכית (GF-4, 1.6 מיקרון), וכל מכלי הבוכנר הארוזים (ללא המשפך) נשקלו לאחר אריזתם. כל אחד מ-30 הקרקעות ותערובותיהן נשטפו 10 פעמים במים חסרי יונים לפי הפרוטוקול שלהלן.

פרוטוקולי השטיפה ובדיקות של התערובות

•מהלך השטיפה:

•כל השטיפות היו במים חסרי יונים; •הרטבה ראשונה: התערובות היבשות הורטבו באיטיות ובהדרגה מלמטה ע"י טבילה של מכל הקרקע במכל גדול יותר, אליו הוספו מים בהדרגה כך שחלה הרטבה קפילארית של הקרקע בבוכנר. לאחר שהקרקע הורוותה, המתנו שעתיים עד לשטיפה.

•שטיפה ראשונה: המשפך חובר לבוכנר, וזה הוצמד לבקבוק יניקה. לאחר גמר הניקוז החופשי הופעלה יניקה במתח של כשליש אטמוספירה, וזאת נמשכה עד גמר ההתנקזות (תמונה 1). שארית המים במכל ההרטבה הוספה למי-היניקה, ונמדד הנפח הכולל של מים אלה (בשקילה).

•הבוכנר (ללא המשפך) נשקל לאחר גמר הניקוז, וחושבה תכולת המים בתערובת ביחס ליובש תנור.

•הבוכנרים כוסו ברדיד אלומיניום כדי לצמצם

אידי, והונחו למשך 2-3 ימים בטמפ' החדר עד לשטיפה הבאה.

•כל השטיפות הבאות (סה"כ 9 שטיפות נוספות) בוצעו כלהלן:

•הבוכנר נשקל (ללא משפך ולא כיסוי);

•חושב הפסד המים באידי;

•הבוכנר חובר למשפך, והוסיפו מים בכמות שהיא סכום כמות המים שהייתה בקרקע לאחר היניקה והכמות שנתאדה. הוספת המים הייתה בהזלפה קלה על פני נייר הסינון החופה על הקרקע;

•הבוכנר הונח על כנו למשך שעתיים להגעה ל"שיווי משקל";

•עודף המים הרוחק ביניקה כדלעיל;

•כמות מי הנקז נמדדה. המטרה הייתה שהיא תהיה דומה לכמות המים האצורה בקרקע. במידה שהיה הבדל משמעותי ביניהן, כמות המים בשטיפה הבאה שונתה בהתאם.

•מי הנקז מכל בוכנר נשמרו לבדיקה, והתהליך חזר על עצמו.

•בדיקות בקרקע ובתערובות (בשיטות כמקובל במעבדות שירות שדה. בורן נבדק ב- ICP-AES):

הרכב מכאני (בקרקע בלבד), CEC (קרקע בלבד), ריכוז זרחה במיצי דו-פחמה; ריכוז חנקה ואמון במיצי 1M KCl, תכולת בורן כללית לאחר עיכול בחומצה חנקתית מרוכזת; מיצי העיסה הרוויה (בכל התערובות) לבדיקה של:

•SP

•EC, pH, כלוריד

•ריכוזי קטיונים (סידן, מגניזיום, נתרן, אשלגן) ו-SAR,

•ריכוזי זרחה וחנקה

•בורן

•בדיקות במי הנקז (בכל שטיפה בנפרד):



נפח (לפי משקל), pH, EC, כלוריד, בורון, זרחה, חנקה
תמונה 1: דוגמה למשפך בוכנר, בקבוק יניקה ומשאבת ואקום. במקרה זה, המשפך עשוי חרס ואינו מפרקי.

תוצאות

הרכב מיצוי הקרקע בתערובות קרקע - קומפוסט הבוצה ובקרקעות עצמן:

הוכנו עשרה ההרכבים של תערובות קרקע-קומפוסט בוצה, בעומס קומפוסט שקול ל- 8 עד 94 מ"קד' (4 עד 53 ט' חומר יבש לדונם). התערובות והקרקעות עצמן מוצו בעיסה רוויה כמקובל, אמוניום מוצה ב- 1 M KCl וזרחה - בנתרן דו-פחמתי. הבדיקות הכימיות נעשו בשיטות המקובלות. התוצאות מוצגות בטבלה 2.

הקרקע הסילטית מהבקעה, המיועדת לנטיעת תמרים (טבלה 2), הנה מלוחה מאד (EC כ-40 ד"ס\מ'), והמליחות מאופיינת בריכוזי נתרן גבוהים (כ-240 מא"ק\ל') ובריכוזי כלוריד גבוהים אך נמוכים יחסית לנתרן (כ-20 מא"ק\ל'). סביר להניח כי סולפט (לא נבדק) הוא האניון העיקרי בקרקע. הגם שריכוזי הסיידן והמגנין המומסים גבוהים מאד, מנת

ספיחת הנתרן (ה-SAR) של הקרקע הנה גבוהה, כ-25 mmol0.5. יישום קומפ' הבוצה בקרקע הקטין במידה מסוימת את הערכים של כל המדדים הללו, אך רק בעומסי היישום הגבוהים. בעומס המרבי (94 מ"קד') ה- pH ירד מעט (עד 0.4 יחידה) ותכולת המים ברוויה (SP) עלתה בכ-10%. ריכוז הבורון במיצוי העיסה הרוויה היה כ-10 מ"ג\ל', ועומס קומפוסט הבוצה הגבוה הגדיל אותו בכ-40%, זאת למרות שהתכולה הכללית של בורון בתערובת הייתה נמוכה מתכולתו בקרקע עצמה. ריכוזי האמוניום, הזרחה (במיצוי אולסן) והאשלגן המומס עלו עם העלייה בעומס היישום, עד לתכולות השקולות לכ-130, 70 ו-180 ק"ג\ד', בהתאמה, בעומסי היישום המרביים. התוספת הכללית של יסודות אלה עם הקומפוסט הייתה גבוהה פי 5-10 מתוספת המרכיב הזמין שלהם (טבלה 2).

תערובות חול - קומפוסט הבוצה שיקפו במידה רבה את תכונות הקומפוסט עצמו. בעומס היישום הגבוה (86 מ"קד') ה- pH ירד ביותר מיחידה וכן ירדו ריכוזי הכלוריד (הייתה תקלה במדידתו). התכולה של כל יתר המדדים עלתה בשיעור



ניכר, כולל ה-SP (בכ-80%), המליחות, ריכוזי הנתרן, הסיידן+מגניון, ה-SAR והבורון. במיוחד עלו ריכוזי האמוניום, הזרחה (במיצוי אולסן) והאשלגן המומס, אף יותר מכפי שעלו בקרקע הסילטית. טבלה 2: מרכיבים כימיים בתערובות הקרקע והחול עם קומפוסט הבוצה. המיצויים נעשו בעיסה הרוויה (SP). בנוסף, אמוניום נבדק במיצוי ב-1 M KCl, הזרחה מוצה בדו-פחמה (ריאגנט אולסן) וההרכב מכאני נבדק בשיטת ההידרומטר. התוצאות הן ממוצעים של 2 חזרות. הבורון הכללי במדגם חושב לפי התכולה שלו במרכיביו (טבלה 1): הקרקע או החול בתוספת קומפוסט הבוצה שעורבבה בהם.

הרטבה ושיטה של הקרקעות ותערובותיהן עם הקומפוסט:

הן ממוצעים של 2 חזרות. הבורון הכללי במדגם חושב לפי התכולה שלו במרכיביו (טבלה 1): הקרקע או החול בתוספת קומפוסט הבורון הכללי בתערובות חושבה

מנתוני טבלה 1, ובהתאם לתרומות היחסיות של הקרקע (200 ג') ושל כמויות הקומפוסט שהוספו לה בכל אחד מהטיפולים. חישוב ריכוז הבורון בחול היווה בעיה, מאחר שתכולתו הכללית הייתה קטנה מסף הבדיקה (> 3 מ"ג\ק"ג) אך במיצוי העיסה הרוויה היה בורון מסיס (0.6 מ"ג\ק"ג). לפיכך, תכולת הבורון בחול נלקחה כשווה ל-3 מ"ג\ק"ג. טבלה 2: מרכיבים כימיים בתערובות הקרקע והחול עם קומפוסט הבוצה. המיצויים נעשו בעיסה הרוויה (SP). בנוסף, אמוניום נבדק במיצוי ב-1 M KCl, הזרחה מוצה בדו-פחמה (ריאגנט אולסן) וההרכב מכאני נבדק בשיטת ההידרומטר. התוצאות הן ממוצעים של 2 חזרות. הבורון הכללי במדגם חושב לפי התכולה שלו במרכיביו (טבלה 1): הקרקע או החול בתוספת קומפוסט הבורון הכללי בתערובות חושבה לתרומות היחסיות של 1, ובהתאם לתרומות היחסיות של הקרקע (200 ג') ושל כמויות הקומפוסט שהוספו לה בכל אחד מהטיפולים.

טבלה 2: מרכיבים כימיים בתערובות הקרקע והחול עם קומפוסט הבוצה.

המיצויים נעשו בעיסה הרוויה (SP). בנוסף, אמוניום נבדק במיצוי ב-1 M KCl, הזרחה מוצה בדו-פחמה (ריאגנט אולסן) וההרכב מכאני נבדק בשיטת ההידרומטר. התוצאות הן ממוצעים של 2 חזרות. הבורון הכללי במדגם חושב לפי התכולה שלו במרכיביו (טבלה 1): הקרקע או החול בתוספת קומפוסט הבוצה שעורבבה בהם.

טיפול	עומס היישום (טון/ד')	SP (%)	pH	EC (dS/m)	כלוריד (מא"ק/ל')	נתרן (מא"ק/ל')	סיידן+מגניון (מא"ק/ל')	SAR (mmol ^{0.5})
קרקע חווארית	0	62	7.7	41	22	242	191	25
קרקע + 8 מ"ק"ד' קומפ'	4	62	7.5	40	20	229	161	25
קרקע + 15 מ"ק"ד' קומפ'	9	64	7.5	39	18	188	144	22
קרקע + 55 מ"ק"ד' קומפ'	31	64	7.4	35	16	190	135	23
קרקע + 94 מ"ק"ד' קומפ'	53	69	7.3	34	15	173	131	21
חול	0	28	8.3	0.8	3.5	1.3	22	0.4
חול+ 8 מ"ק"ד' קומפ'	4	29	8.0	2.5	1.4	0.9	22	0.3
חול+ 15 מ"ק"ד' קומפ'	9	31	7.5	3.9	1.2	1.9	26	0.5

חול+ 48 מ"ק"ד' קומפ'	27	44	7.0	9.4	-	12.9	36	3.1
חול+ 86 מ"ק"ד' קומפ'	48	51	7.0	13.7	-	21.3	47	4.4

קרקע סילטית	הרכב מכאני של הקרקע החווארית (ב-% משקל)		
	חול	סילט	חרסית
	15.8	80.6	3.6

המשך טבלה 2

טיפול	עומס יישום (טון/ד')	B (מ"ג/ל')	K (מא"ק/ל')	NH ₄ -N* (מ"ג/ק"ג)	PO ₄ -P* (מ"ג/ק"ג)	B כללי במדגם (מ"ג)	B מהקומפ' (מ"ג/ק"ג)
קרקע חווארית	0	10.1	8.3	14	10	17.8	0
קרקע + 8 מ"ק"ד' קומפ	4	9.0	8.9	129	26	17.9	0.7
קרקע + 15 מ"ק"ד' קומפ	9	9.9	9.5	191	74	18.0	1.4
קרקע + 55 מ"ק"ד' קומפ	31	11.6	13.2	519	100	18.8	5.2
קרקע + 94 מ"ק"ד' קומפ	53	14.0	17.6	540	267	19.8	9.9
חול	0	0.6	1.6	12	21	3.0	0
חול+ 8 מ"ק"ד' קומפ'	4	1.3	3.5	124	56	3.0	3.9
חול+ 15 מ"ק"ד' קומפ'	9	2.6	5.1	183	86	3.1	7.5
חול+ 48 מ"ק"ד' קומפ'	27	-	12.4	668	210	3.2	22
חול+ 86 מ"ק"ד' קומפ'	48	-	17.3	963	294	3.8	36

$$* \text{ק"ג"ד} = (\text{מ"ג"ק"ג}) \cdot 4$$

טיפול	עומס יישום (טון/ד')	תוספת N כללי עם הקומפוסט (ק"ג/ד')	תוספת P כללי עם הקומפוסט (ק"ג/ד')	תוספת K כללי עם הקומפוסט (ק"ג/ד')
קרקע + 8 מ"ק"ד' קומפ	4	110	67	20
קרקע + 15 מ"ק"ד' קומפ	9	215	131	39
קרקע + 55 מ"ק"ד' קומפ	31	763	465	139
קרקע + 94 מ"ק"ד' קומפ	53	1323	807	241
חול+ 8 מ"ק"ד' קומפ'	4	109	66	20
חול+ 15 מ"ק"ד' קומפ'	9	213	130	39
חול+ 48 מ"ק"ד' קומפ'	27	668	407	122
חול+ 86 מ"ק"ד' קומפ'	48	1206	735	220

הרטבה ושיטה של הקרקעות ותערובותיהן עם הקומפוסט:

כאמור, הקרקעות ותערובותיהן הודגרו במשך 2-3 ימים בבוכנרים בטמפ' החדר בתכולת מים של 'קיבול שדה'. תכולת מים זו היא כמות המים שנותרה בקרקע לאחר הפעלת ניקה. יישום קומפוסט הגדיל את תאחיזת המים בקרקע ובחול, ובעומסי היישום המרביים, ההגדלה בקרקע הייתה בכ-20% ובחול היא הייתה בכ-100%. השפעת הקומפוסט על תאחיזת המים ב'קיבול שדה' הייתה גדולה במעט מהשפעתו על תכולת המים ברוויה

טבלה 2: מרכיבים כימיים בתערובות הקרקע והחול עם קומפוסט הבוצה. המיצויים נעשו בעיסה הרוויה (SP). בנוסף, אמוניום נבדק במיצוי ב-M KCl 1, הזרחה מוצה ב-דו-פחמה (ריאגנט אולסן) וההרכב מכאני נבדק בשיטת ההידרומטר. התוצאות הן ממוצעים של 2 חזרות. הבורון הכללי במדגם חושב לפי התכולה שלו במרכיביו (טבלה 1): הקרקע או החול בתוספת קומפוסט תכולת הבוצה שעורבבה בהם.

(SP), שהעלייה הממוצעת בה, הייתה בהתאמה, כ-10% וכ-70% (טבלה 2). יכול להיות שהדבר נבע ממתח יניקה בלתי מספיק ולא אחיד במהלך ההדגרה. לאחר כל אירוע ההדגרה, נשטפה הקרקע בכל בוכנר בנפח מים שהיה אמור להיות שווה לתכולת המים שנותרה בו בתום היניקה הקודמת. נפח מי השטיפה עלה עם העלייה בעומס יישום הקומפוסט, הן בחול והן בקרקע בחול הוא מ-27 מ"ל בוכנר בחול עצמו ל-100 מ"ל בוכנר בעומס הקומפוסט הגבוה (פי 3.7), ובקרקע העלייה הייתה מ-60 ל-130 מ"ל בוכנר (פי 2.2). כל ערך של תכולת מים בקרקע הוא ממוצע של 30 מדידות: 10 שטיפות ב-3 חזרות כל אחת. מידת השטיפה של הקרקעות במים מבוטאת במקדם שטיפה, המוגדר כאן כיחס בין כמות מי הנקז לבין כמות המים האצורה בקרקע (כאמור, כמות המים לאחר היניקה). 'קיבול השדה' של הקרקע נקבע ע"י סוג הקרקע ועומס הקומפוסט, ומקדם השטיפה אמור להיות קבוע במהלך השטיפות העוקבות. שינוי בעומד ההשקיה או בתכולת המים בקיבול שדה יביא לשינוי מתאים במקדם השטיפה. מוצגים שני מדדים לכל סוג קרקע. האחד, הוא מקדם השטיפה הממוצע בכל אירוע שטיפה לכל 15 הבוכנרים בחמשת הטיפולים באותה קרקע (סימנים מלאים וקווים רציפים). ניתן לראות כי מקדם השטיפה הממוצע בכל אחד ממועדי השטיפה בטיפולי הקרקע החווארית היה קבוע למדי בין 1.1 ל-1.3, מה שמעיד כי השטיפה בטיפולי הקרקע הייתה אחידה למדי במהלך הניסוי. לעומת זאת, בתערובות החול מקדם השטיפה הממוצע עלה בהדרגה מ-0.6 בממוצע בשטיפה השנייה ל-3.3 בממוצע בשטיפה העשירית, מה שמעיד שהשטיפה של תערובות החול הלכה והתגברה במהלך הניסוי. המדד השני הוא מקדם השטיפה המצטבר. מקדם זה חושב מסך כל כמות מי הנקז מכל אחד מהבוכנרים עד אירוע שטיפה כלשהו מחולק בתכולת המים הממוצעת בקיבול שדה באותו בוכנר, בממוצע ל-15 הבוכנרים

בכל אחד מסוגי הקרקע (סימנים ריקים, קווים מקווים). הערכים המרביים של מקדם השטיפה המצטבר (לאחר 10 אירועי שטיפה) היו בממוצע 11.2 בטיפולי הקרקע ו-15.6 בטיפולי החול. במילים אחרות, סך כל השטיפה של טיפולי הקרקע הייתה בנפח מים הגדול פי כ-11 בממוצע מתכולת המים בקיבול שדה, וטיפולי החול נשטפו בנפחים הגדולים פי כ-16 בממוצע מתכולת המים בקיבול שדה.

שטיפת בורן מתערובות חול - קומפוסט בוצה:

תכולת הבורן הכללי בחול היא 3 מ"ג/ק"ג, והקומפוסט הגדיל אותה ב-4% בעומס היישום הנמוך (8 מ"ק"ד) וב-36% בעומס הגבוה (86 מ"ק"ד) (טבלה 2). ריכוזי הבורן במי השטיפה מהחול עצמו היו כ-1 מ"ג/ל' ב-4 השטיפות הראשונות והם ירדו בהמשך הקומפוסט בעומס הנמוך הקטין את ריכוזי הבורן בתשטיפים בהשוואה לחול עצמו אך בעומסים הגבוהים יותר, ובעיקר העומס הגבוה ביותר, הוא העלה אותם. שטיפה במקדם של כ-6-7 (כזכור, מקדם שטיפה הוא נפח מצטבר של מי השטיפה מחולק בקיבול המים הממוצע של הקרקע) השתוו ריכוזי הבורן במי השטיפה מהחול עצמו ומהתערובות בעומס עד 48 מ"ק"ד'. בעומס היישום המרבי הפחתה של ריכוזי הבורן לרמה זו חלה רק לאחר מקדם שטיפה כפול. נציין כי מחמת תקלה לא נמדד הבורן במי השטיפה הראשונה של שני העומסים הגבוהים יותר.

העלייה בנפח מי השטיפה עם העלייה בעומס יישום הקומפוסט משפיעה בהכרח על ריכוזי הבורן. לפיכך, ייצוג נכון יותר של השפעת עומס קומפוסט הבוצה על שטיפת בורן מהחול ומתערובותיו הוא של כמויות הבורן שנשטפו. אלו עלו עם העלייה בעומס יישום הקומפוסט (וכמובן עם התמשכות השטיפה) (איור 4), וסך כל השטיפה בסיום (למכל קרקע) בכל טיפול הייתה בממוצע בין 0.22 ל-0.48 מ"ג בורן בעומסים עד 48 מ"ק"ד', ו-1.5 מ"ג בעומס המרבי. עומס

יישום הקומפוסט לא השפיע באופן אדיטיבי על הדחת הבורון. כך, הכמויות שהודחו בשטיפה בעומסים 15 ו-48 מ"ק"ד' היו דומות מאד. לעומת זאת, סך כל ההדחה נטו של הבורון (מהקומפוסט בלבד, בהפחתת ההדחה מהחול עצמו) בעומס 86 מ"ק"ד' הייתה פי 35 מזו שהייתה בעומס 8 מ"ק"ד'. ההבדלים אלה בשיעור השטיפה של הבורון מעידים ככל הנראה על כושר ספיחה מסוים של החול.

סך כל הדחת הבורון מהתערובות בתום תהליך השטיפה היה בין 7% בחול לכ-12% בתערובות עד עומס 48 מ"ק"ד' (איור 5). בעומס השקול ל-86 מ"ק"ד' שיעור השטיפה היה כ-32% מכלל הבורון שהיה בתערובת. למעשה, ההגדלה בשטיפת בורון מהתערובות דומה למדי לשיעור התוספת שלו מהקומפוסט (בין 4% בעומס של 8 מ"ק"ד' ל-36% בעומס 86 מ"ק"ד'; טבלה 2). החישוב היה בהנחה ששטיפת הבורון מהחול עצמו לא הושפעה גם כאשר נוכח קומפוסט בתערובת. לשם החישוב, הדליפה מהחול חושבה עבור מקדמי השטיפה בכל אחת מהתערובות לפי מדדי עקום המתאם לכמות הבורון המצטברת שנשטפה מהחול.

התרומה נטו של הקומפוסט בלבד לבורון הנשטף מהתערובות מוצגת כיחס בין הבורון שמקורו בקומפוסט לבין הבורון שמקורו בחול עצמו. החישוב נעשה ע"י הפחתה של כמות הבורון שנשטפה מהחול מהכמות שנשטפה מתערובות הקומפוסט. יחס שווה ל-1 משמעו שכמות הבורון שנשטפה מהקומפוסט בתערובת שווה לכמות שנשטפה מהחול בתערובת. ניתן לראות כי תרומת הקומפוסט לבורון שנשטף הייתה גדולה מזו של החול בכל עומסי היישום.

בעומס השקול ל-8 מ"ק"ד', הקומפוסט שחרר בורון בתחילה אך לאחר שטיפה בכ-4 נפחי נקבובים כמויות הבורון שהומסו ודלפו ממנו היו קטנות מאד ביחס לכמויות שמקורן היה בחול (יחס > 1 ; . ב-2 העומסים הגבוהים יותר (15 ו-48 מ"ק"ד') התרומה מהקומפוסט לבורון הנשטף נותרה גבוהה, והשתוותה לזו

של החול (יחס $\square 1$) רק לאחר העברה כ-8 וכ-16 נפחי נקבובים, בהתאמה. בעומס השקול ל-86 מ"ק"ד', הקומפוסט המשיך להיות המקור העיקרי לבורון מומס, וגם לאחר שטיפה ב-16 נפחי נקבובים כמויות הבורון שנשטפו ממנו היו גדולות פי 6 מאשר מהחול עצמו.

שטיפת בורון מתערובות קרקע הבקעה - קומפוסט בוצה:

תכולת הבורון הכללי בקרקע הבקעה היא 89 מ"ג"ק"ג וכמותו במדגם שנארז בבוכנר (200 ג') הייתה כ-18 מ"ג. הוספת הקומפוסט הגדילה את תכולת הבורון במדגם עד כ-20 מ"ג בעומס היישום הגבוה (94 מ"ק"ד') וחלקו של הבורון המוסף היה בין 0.7 ל-10% מכלל הבורון במדגם (טבלה 2).

ריכוזי הבורון במי השטיפה מהקרקע ומתערובותיה עם הקומפוסט היו

משמעותית מאלה שנשטפו מתערובות החול. הריכוז המרבי בשטיפה מהקרקע עצמה היה מעל 7 מ"ג"ל" בשטיפה השלישית, והריכוזים פחתו בהמשך. בתערובות הקומפוסט הריכוזים היו נמוכים באופן עקבי בהשוואה לקרקע עצמה. הדבר מומחש באיור 7, בו מוצגים הריכוזים הממוצעים לכל אירועי השטיפה בכל אחד מהטיפולים. ניתן לראות כי הריכוז הממוצע בתשטיפים מהתערובות היה נמוך מהריכוז בתשטיפים מהקרקע עצמה, וכי הריכוז ירד ככל שעלה עומס היישום. לדוגמה, ריכוז הבורון הממוצע

בתשטיפים מהקרקע היה 5.1 ± 1.5 מ"ג B\l' בעוד שמהתערובת בעומס 94 מ"ק"ד' הוא היה 3.0 ± 1.6 מ"ג B\l'. חלק מהירידה בריכוז נבע מהעלייה בנפח מי השטיפה עקב ההגדלה בתכולת המים בקרקע בקיבול שדה כתוצאה מיישום הקומפוסט (איור 1).

כאמור לעיל, העלייה בנפח מי השטיפה עם העלייה בעומס יישום הקומפוסט השפיעה על ריכוזי הבורון. לפיכך, כמויות הבורון שנשטפו מהתערובות הן מדד מהימן יותר לשטיפתו. למרות שניתן היה לצפות לעלייה בכמויות הבורון הנשטפות עם עלייה בעומס יישום הקומפוסט (כדלעיל) בפועל

טיפה מתערובות החול והקרקע במהלך 10 אירוני השטיפה. היה הבדל ברור בין החול לבין תערובותיו עם הקומפוסט: בעוד שבחול עצמו ערכי ה-pH היו במגמת עלייה במהלך השטיפות, מבערך 7.5 לכ-8, בתערובות הקומפוסט המגמה הייתה הפוכה ותלויה בעומס היישום. ה-pH ירד ככל שהתקדמה השטיפה וביתר שאת בעומסים הגבוהים יותר עד ערכים מתחת ל-6.5. נציין כי קווי המגמה באיור 11 הם התאמה לוגריתמית ואינם בהכרח הטובים ביותר (בכל זאת, הטובים ביותר שתוכנת אקסל מסוגלת לו). בתערובות הקרקע, ערכי ה-pH בתמיסות השטיפה היו קבועים הרבה יותר, וכולו היו במגמה של עלייה קלה מבערך 7.3-7.5 לכ- 7.7-8.0 (עד כמה שהמתאמים הלינאריים מייצגים את הממוצעים במהלך השטיפות). ה-EC של תמיסות השטיפה מ-2 סוגי התערובות: ה-EC הנו משני ל-pH בהשפעתו על שיעור ועוצמת הספיחה של הבורון למרכיבי הקרקע, ובכל זאת יש עניין רב בהשפעה עליו של הקומפוסט ושל השטיפה החוזרת בגלל המליחות הגבוהה מאד של הקרקע החווארית מהבקעה שכנראה מעולם לא עובדה. נתחיל בחול ובתערובותיו. מליחות העיסה הרוויה הייתה נמוכה (0.8 ד"ס/מ'; טבלה 2) ומליחות תמיסות השטיפה הראשונות הייתה כ-5 ד"ס/מ' (איור 13). ההבדל הנו כפול מהצפוי מאחר שנפח המיצוי (ה-SP) גדול רק פי 3 מנפח תמיסת השטיפה. יכול להיות שההגעה לשיווי משקל בבוכנרים הייתה מלאה יותר בגלל משך הזמן הארוך בהרבה (כיומיים לעומת שעה אחת) בין ההרטבה ליניקת המים. בכל מקרה, ניתן לראות עוד כי הקומפוסט לא הגדיל את מליחות תערובותיו במידה משמעותית למרות שמליחות תערובותיו, כפי שנמדדה במיצוי עיסה רוויה, הייתה גבוהה יותר במידה ניכרת. מליחות תשטיפי הקרקע הראשונים הייתה

המצב היה שונה, ומהתערובות נשטף פחות בורון מאשר מהקרקע עצמה (איור 8), וסך כל הבורון שנשטף (למכל קרקע) ב-10 נפחי נק' בובים היה בין 3.6 מ"ג מהקרקע עצמה ל-2.6 מ"ג בעומסים השקולים ל-54 ול-94 מ"קד'. ברור לפיכך, כי יישום הקומפוסט בקרקע הבקעה הקטין משמעותית את הדחת הבורון ממנה עם מי השטיפה מה שנבע כמובן מהקטנת הריכוזים והכמויות של הבורון בתמיסת הקרקע. בדומה, שיעור השטיפה המרבי של הבורון לאחר העברה של 10 נפחי נקבובים היה כ-20% מכלל הבורון שהיה בקרקע הבקעה וכ-16-18 אחוז בתערובות (איור 9). לא הייתה מגמה מובהקת בהשפעה של עומס היישום אך כולם הפחיתו את כמויות הבורון שנשטפו. באיור 10 מוצג היחס בין ההפרש בין כמות הבורון שנשטפה ממרכיב הקומפוסט בתערובת לבין הכמות שנשטפה ממרכיב הקרקע בתערובת. כשערך היחס = 1, אזי מרכיב הקומפוסט תורם אותה כמות בורון לנקז כמו מרכיב הקרקע. כשהערך = 0, אזי כמויות הבורון הנשטפות מהקומפוסט ומהקרקע הן זהות. כשהערך שלילי, אזי הקומפוסט סט מעכב דליפת בורון מהקרקע. ניתן לראות כי לאחר העברת נפח נקבובים אחד עד שלושה כמות הבורון שנשטפה ממרכיב הקומפוסט יורדה מתחת לכמות שנשטפה מהקרקע עצמה (יחס > 1). בעומסי קומפוסט השקולים ל-8 ול-15 מ"קד' הקומפוסט עיכב שטיפת בורון מהקרקע (היחס > 0) כבר לאחר 3 ו-5 נפחי נקבובים. בשני העומסים הגבוהים, התרומה נטו מהקומפוסט כמעט התאפסה (יחס \square 0) לאחר העברת כ-10 נפחי נקבובים.

ה-pH של תמיסות השטיפה מ-2 סוגי התערובות:

ל-pH יש חשיבות רבה בקביעת שיעור ועוצמת הספיחה של הבורון למרכיבי הקרקע ועל כן יש עניין רב בהשפעה עליו של הקומפוסט ושל השטיפה החוזרת. איורים 11 ו-12 מציגים את ה-pH של תמיסות הש-

2011) והן בגלל הפוטנציאל של שיפור התכונות הפיסיקו-כימיות (פיין וחוב', 2007; בן-חור וחוב', 2012) וההזנתיות (פיין וחוב', 2014; וראה טבלה 2) של הקרקע.

בדיקת ההתנהגות של תערובות קומפוסט הבוצה בחול מאפשרת לנו ללמוד על השפעת הקומפוסט על התנהגות הבורון במהלך השטיפה. הדבר נובע מכך שספיחת בורן לחול הנה קטנה יחסית, ובגלל שתכולת הבורון בחול הייתה כעשירית מתכולתו בקומפוסט. בעומס היישום המרבי (השקול ל-86 מ"ק"ד) הקומפוסט הגדיל את תכולת הבורון בחול מ-3 מ"ג"ק"ג לכמעט 5 מ"ג"ק"ג. השפעת הקומפוסט על החול בלטה בכל המרכיבים הכימיים שנבדקו.

כך, הקומפוסט הגדיל את מליחות העיסה הרוויה מ-0.8 ל-14 ד"ס"מ', הוריד את ה-pH מ-8.3 ל-7 (ועקב כך הקטין עוד את ספיחת הבורון; Keren et al., 1981), והגדיל ביותר את תכולות החנקן והזרחן הזמינים (בכמויות השקולות לכ-250 ק"ג N\ד' ולכ-75 ק"ג P\ד') ואת תכולת המרכיבים הכלליים שלהם (בערך פי 10 יותר מהנ"ל). חשוב עוד, שיישום הקומפוסט הגדיל את תכולת המים בקיבול שדה ב-30 עד 370% בעומסי יישום השקולים ל-

8 ול-86 מ"ק"ד'. ניתן להניח כי כמות המים הזמינים בחול (כמות המים בקרקע בין מתח קיבול שדה למתח נקודת כמישה) גדלה באופן פרופורציונאלי.

במהלך 10 השטיפות שנעשו החול עצמו איבד כ-7% מכמות הבורון שהייתה בו. הדחת בורון מהקומפוסט בתערובות עם מי השטיפה הייתה בין 37% (בעומס השקול ל-48 מ"ק"ד')

לכ-80% (ביתר עומסי היישום) מתכולתו בקומפוסט. בדרך כלל, מרבית הדליפה של בורון מהקומפוסט אירעה כבר בשטיפה הראשונה. שטיפת התערובות הייתה מלווה בירידה חדה במוליכות החשמלית של תמיסותיהן, ובירידה נוספת ב-pH; שני תהליכים המקטינים את ספיחת הבורון לקרקע.

בעוד שהירידה ב-EC הייתה דומה בחול ובתערובות השונות, בחול עצמו לא הייתה

גבוהה מאד, בין 35 ל-40 ד"ס"מ' (איור 14), ודומה מאד למליחות העיסה הרוויה (טבלה 2). צפוי היה, כבמקרה החול, כי היא תהיה גבוהה יותר ממליחות העיסה הרוויה אולם נראה כי הרכב המלחים המסיסים הוא שגרם לכך. כלומר, כשהמליחות היא כלורידית או ניטראטית ניתן לצפות לשינויים לינאריים במליחות כתוצאה ממהיול אולם כשהמליחות היא בחלקה קרבונאטית ו\או גיבסית, יחס כזה לא יתקיים, ודאי לא במלואו. מאחר שהרכב המלחים המסיסים לא נקבע במלואו, לא במיצוי העיסה הרוויה ולא בתשטיפים, קשה לדעת מה הייתה הסיבה להעדר ההשפעה של נפח המיצוי (בגבולות שנבדקו) על המליחות. מה שחשוב יותר לענייננו הוא שהקומפוסט לא תרם מליחות לקרקע אלא אף הפחית אותה וכי ההפחתה במליחות הייתה ניכרת יותר בעומסי היישום הגבוהים יותר בעיקר באירועי השטיפה הראשונים (בדומה למה שנמדד בעיסה הרוויה, טבלה 2). ההבדל היה אמנם ניכר אבל הוא היה קטן מכדי להיות משמעותי מבחינת תהליכי הסיפחה של בורון בקרקע. הדבר נבע כנראה מהעלייה בנפחי השטיפה עם העלייה בעומס היישום (איור 1), והמהיול הנוסף של המלחים בתשטיפים.

דין

העניין העיקרי במחקר הנוכחי הוא לבחון את ההשפעה של קומפוסט בוצה על מסיסות הבורון בקרקע חווארית ארידית מהזור בבקעת הירדן המיועדת לנטיעת תמרים. המדד למסיסות הבורון הוא שטיפתו מהמכלים (הבוכנרים) עם החול או הקרקע ותערובותיהם עם הקומפוסט, והריכוזים במי-הנקז והכמויות שנשטפו ייצגו את הכמות שניתנו להמסה במצעים השונים.

קרקע הבקעה שנבדקה הייתה מלווה מאד (כ-40 ד"ס"מ' במיצוי העיסה הרוויה),

נתרנית מאד (SAR = 25 mmol0.5) עם תכולת בורון גבוהה מאד, הן כללית (כ-90 מ"ג"ק"ג) והן במיצוי העיסה (10 מ"ג"ל). יש עניין רב ביישום קומפוסט בשיעורים גבוהים בגלל האפשרות שהקומפוסט ימתן את זמינות הבורון לצמח (Yermiyahu et al.,

ירידה ב-pH (ואולי הוא אף עלה) אך בתערובות הייתה ירידה משמעותית ב-pH מכ- 7.5-8 לכ- 6-6.5, והיא התגברה בעומסי היישום הגבוהים.

המסקנה מחלק זה של הניסוי היא שהקומפוסט היווה מקור נוסף לבורון מסיס, ושיעור דליפתו עלה ככל שעלה עומס היישום. כל עוד היה עודף בורון במערכת, מעבר לקיבול הספיחה של התערובת (מצע + קומפוסט), בורון מומס נשטף עם המים. עם הירידה בריכוזי הבורון המסיס, תקטן מאד דליפתו והיא תהיה בעיקר של בורון מומס הנמצא בשיווי משקל עם הבורון הספוח. במקרה הנוכחי, מאחר שקיבול הספיחה של החול הנו נמוך מאד, השטיפה של

הקרקע גרמה להמסת בורון ולשטיפתו עד הגיעו לשווי משקל מחודש עם קיבול הספיחה של המערכת (קומפוסט + חול). התפרקות החומר האורגני בתערובת, והירידה ב-pH ובמוליכות החשמלית של תמיסת הקרקע (כפי שנמדד בתערובות החול) יכולות לגרום לירידה בספיחה ולהגדלת הריכוזים בתמיסת הקרקע ובמי-הנקז.

תכולת הבורון בקרקע החווארית מהבקעה ובתערובותיה עם קומפוסט הבוצה הייתה גדולה עד פי 30 בערך מאשר בחול ובתערובותיו, וגם ריכוזיו במי הנקז בראשית השטיפה, וסך כל דליפתו במהלכה היו גדולים עד פי 20 בערך. עם זאת, בעוד שבתערובות החול, הקומפוסט הגדיל את דליפת הבורון (וכמובן את ריכוזיו בתמיסת הקרקע) בכל עומסי היישום (ובמידה המרבית בין פי 2.5 עד פי 40 בעומסים השקולים ל-8 ול-86 מ"ק"ד), בתערובותיו עם הקרקע החווארית הקומפוסט הקטין את דליפת הבורון במי-הנקז בהשוואה לדליפה מהקרקע לבדה. הקטנת הדליפה התבטאה קודם כל בהקטנת הריכוז במי-הנקז (וכמובן, בתמיסת הקרקע) במידה שגדלה עם העלייה בעומס היישום. כך, ריכוז הממוצע (לכל המדגמים מכל השטיפות לכד מהראשונה)

של 5.1 מ"ג"ל" במי-הנקז מהקרקע עצמה ל-3.0 מ"ג"ל" במי-הנקז בעומס היישום המרבי. ניתן לפיכך להסיק כי הקומפוסט היווה מבלע לבורון שהיה בקרקע.

לפני שנדון בסיבה לכך שהקומפוסט היווה מבלע לבורון בתערובותיו עם הקרקע אך לעומת זאת היווה מקור לבורון בתערובותיו עם החול נזכיר כי הקומפוסט הגדיל את נפח המים בקרקע בקיבול שדה באופן ישר לעומס שלו בתערובת ב-2 המצעים. הגדלת נפח המים בקרקע (עד קרוב לפי 2 בעומס המרבי) תמהל את הבורון המומס ותקטין את ריכוזיו בהתאם. אולם נראה כי למיהול כשלעצמו הייתה השפעה משנית עם ריכוזי הבורון בתמיסת הקרקע, שהרי קיבול המים בתערובות החול-קומפוסט עלה עד כמעט פי 5 בהשוואה לחול עצמו, אבל ריכוזי הבורון במי-הנקז דווקא עלו בהשפעת הקומפוסט.

לקומפוסטים קיבול ספיחה גבוה מאד לבורון, גבוה פי 5 ביחס לחרסיות סמקטיטיות, ובהתאם גם ביחס לקרקעות שזוהי החרסית הדומיננטית בהן (Yermiyahu et al., 1995). הגם שהדבר לא נבדק ישירות בעבודה הנוכחית, ברור לפיכך שהקומפוסט הגדיל את קיבול הספיחה לבורון הן בתערובותיו עם החול, בהן הוא היה המאטריקס הסופח העיקרי, והן בתערובותיו עם הקרקע החווארית. בתערובות החול, הקומפוסט היה גם מקור הבורון, ודליפתו ארעה עקב השינויים שחלו בהרכב תמיסת הקרקע במהלך השטיפות. הירידה בריכוזיו שלו, הירידה ב-pH (ומעבר לדומיננטיות יתר של הדוצה הלא מיוננת של הבורון), והירידה בעוצמה היונית גרמו להמסתו ולשחרורו מאתרי ספיחה בשיווי משקל מחודש.

בתערובות הקרקע, הקרקע היא שהייתה המקור העיקרי לבורון. ההבדל העיקרי בין תערובות הקרקע לבין תערובות החול הוא שריכוז הבורון הממוצע בתמיסת של תערובות הקרקע (לפי מי הנקז) היה גבוה פי 4 מאשר באלו של החול. גם ה-pH בתמיסת תערובות הקרקע נשאר קבוע, ואיתו התפלגות הצורונים הכימיים של הבורון.

לפיכך, הייתה העדפה לספיחה של בורון קרקעי על הקומפוסט. ההקטנה המשמעותית מאד במליחות תמיסת הקרקע (מ-40 עד פחות מ-2 ד"ס\מ') ודאי הקטינה את הספיחה אך איננו יודעים עד כמה. בכל מקרה, מסקנתנו היא שהקומפוסט אמנם היווה מקור נוסף לבורון מסיס אולם בתערובות הקרקע, נוכחותו הייתה משמעותית הרבה יותר בהעלאת קיבול הספיחה של המערכת. כפי שציינו לעיל, התפרקות החומר האורגני בתערובת עם הזמן יכולה להקטין את קיבול הספיחה ולהגדיל את ריכוזי הבורון בתמיסת הקרקע ובמי-הנקז. עם זאת, מאחר שספיחת בורון לחומר אורגני נחשבת להיות בחילוף ליגנדים עם שירים קרבוקסיליים והידרוקסיליים סביר להניח כי זו רק תגדל גם לאחר פירוק נוסף של השלד הפחמימני (בדומה לממצאיו של הס, 2002), לגבי עלייה בספיחה של מתכות כבדות ככל שמתגבר פירוק החומר האורגני). בשלב זה גם לא ראינו עדויות (ואף לא חיפשונו) לתחרות של זרחה בבורון על אתרי ספיחה. ריכוזי הזרחן והזרחה בתערובות קרקע-קומפוסט יכולים להיות גבוהים מאד, אולם ב-pH של תמיסת הקרקע (<8) הזרחה אינה נוטה להיספח אלא לשקוע ולכן היא לא תתחרה בבורון על אתרי

ספיחה (כפי שאכן נמצא בדיעבד). ככל שאנו דנים ביישום קומפוסט הבוצה בשיעורים גבוהים (40 ואף 80 מ"ק\ד') במטעי תמר (מטעים קיימים וחדשים כאחד) על קרקע חווארית לסית עתירת בורון ברור מתוצאות המחקר הנוכחי כי הקומפוסט מקטין את ריכוזי הבורון בתמיסת הקרקע בהשוואה לקרקע עצמה, וכי הוא מהווה מקור בלתי נדלה ליסודות ההזנה עיקריים וכנראה גם ליסודות קורט. לבדיקת הזמינות של יסודות ההזנה לא ניתנה לכך קדימות במחקר הנוכחי, וראוי כי הדבר ייעשה בעיקר לאור האפשרות כי עודפים עלולים ליצור בעיית איכות בפרי. אין לכך כל עדות, ובכל מקרה זה אינו רלוונטי בנטיעות חדשות. נציין כי במערכת שנבדקה נדרשו 5 שטיפות להורדת ה-EC של תמיסת הקרקע החווארית ל-10 ד"ס\מ'. במטע יעילות השטיפה נמוכה בהרבה. בכל מקרה, בתכולת מים בקיבול שדה של 35% ממשקל הקרקע בשכבה 0-40 ס"מ, כמות המים שתידרש לכל שטיפה היא כ-180 מ"ק\ד'. במהלך השטיפות יש להקפיד על מניעת ניתרון הקרקע כתוצאה משטיפה מועדפת של סידן (אולי חשש מופרז בקרקע חווארית ועתירת גיר).

