



קומפוסט בוצה מקטין את מסיסות הבורן בתמיסת קרקע חווארית מבקעת הירדן*

המחקר בודק את ההשפעה האפשרית של עומסים כבדים של קומפוסט מבוצת שפכים כאמצעי להקטנת זמינות הבורן בקרקע, כשיתרונו הנוסף הוא שיפור מצב ההזנה של הקרקע

פיין פנחס¹, אפרים ציפילביץ², זיוה קופר³, אייל בן-נבט⁴

¹גמלאי המכון למדעי הקרקע המים והסביבה, מרכז וולקני²; mfinep@volcani.agri.gov.il; בקעת הירדן³; מעבדת שירות שדה, בקעת הירדן⁴; חברת קומפוסט-אור, אתר טובלן, בקעת הירדן.

תקציר

במעבדה, נדרשו 5 שטיפות יעילות של הקרקע החווארית להורדת ה-EC של תמיסת 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' (תך הקפדה על מניעת ניתרון כתוצאה מהשטיפה).

מבוא

הנטיעות החדשות של תמר בבקעת הירדן הנה בעיקרה על קרקעות חוואר יובשניות, שהנן מלוחות מאד, נתרניות ותכולה גבוהה מאד של בורן (Dan et al., 1981; יוטל, 1990). בורן הנו יסוד חיוני לצמחים אולם תחום הריכוזים בתמיסת הגידול הדרוש לגידולם האופטימלי הינו צר. כשריכוזו גבוה מסך הרעילות מופיעים סימני כלורוזה 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') בורן רעיל לגידולים חקלאיים רגישים, וגידולים עמידים מאוד יפגעו בריכוזים של 6-15 מ"ג/ל' (Eaton, 1944).

ריכוז הבורן בתמיסת הקרקע תלוי בריכוזו 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

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 ($25 \text{ mmol}^{05} \text{ SAR}$) 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 תכולות 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.

בתערובת עם הקרקע החווארית, הקומפוסט היווה מבלע לבורן שמקורו בקרקע, ונוכחותו הקטינה את ריכוזי הבורן בתמיסת הקרקע. השפעת הקומפוסט גדלה יחסית לעומס יישומו, וריכוז הבורן הממוצע במי-הנקז בעומס הקומפוסט המרבי (כ-80 מ"ק/ד') היה קטן בכ-60% בהשוואה לריכוז במי-הנקז מהקרקע עצמה. הסיבות לכך הן שתכולת הבורן בקומפוסט נמוכה בהשוואה לקרקע, אולם קיבול ספיחה שלו לבורן גבוה מאד ביחס לקרקעות.

*המחקר מומן ע"י חברת "קומפוסט אור", בקעת הירדן, אתר טובלן.





של קומפוסט הבוצה על קומפוסט האשפה הוא בתכולה ובזמינות הגבוהה של יסודות ההזנה (מאקרו ומיקרו) (פיין וחוב', 2014; Fine et al., 2020). בעבודות אלו גם הראינו כי אין לחשוש מקליטה בצמח של מתכות כבדות ויסודות רעילים אחרים בגידול על קומפוסט בוצה (לדוג', פיין וחוב', 2014-א', 2014-ב'; 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:

קרקע בתולה על חוואר הלשון (סולונצ'אק סילטי; 4% חרסית, 80% סילט, 16% חול) נדגמה בגאון הירדן, בשטח של מושב בקעות המיועד לנטיעה. הקרקע נדגמה מהשכבה 0-20 ס"מ, היא נכתשה קלות לגודל קטן מ-2 מ"מ. להשוואה, נבדק גם חול שהובא לבקעה עוד בשנות ה-90. קומפוסט הבוצה ששימש בניסוי יוצר במתקן קומפוסט-אור באתר טובלן בבקעה. תכולת יסודות בקרקע, בחול ובקומפוסט מוצגים בטבלה 1. 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.

טבלה 1: הרכב כימי כללי של הקרקע החווארית מהבקעה, החול וקומפוסט הבוצה

*תקנות המים, 2004

מרכיב (היסודות במ"ג/ק"ג)	קרקע חווארית	חול מהבקעה	קומפוסט בוצה	ערך סף עליון*
EC (dS/m; 1:5)	6.74	0.13	6.77	
pH (1:5)	8.06	9.07	7.06	
OC (%)			29.6	
Total N (%)			2.5	
Boron (B)	89	<3	34	
Cadmium (Cd)	2.3	<2	<2	20
Chromium (Cr)	71	7.0	37	400
Copper (Cu)	29	4.7	220	600
Lead (Pb)	13	2.9	30	200
Molybdenum (Mo)	3.4	<1	4.8	
Nickel (Ni)	47	5.3	28	90
Phosphorus (P)	1,280	350	15,250	
Potassium (K)	8,560	680	4,560	
Sodium (Na)	6,000	210	1,990	
Zinc (Zn)	74	17	1,160	2500

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 לקרקע, 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 היסטרה (Connor Keren et al., 1994; Elrashidi and O, 1982)). שבחנו את התופעה במגוון קרקעות לא מצאו גורם קרקעי היכול להסביר זאת. בכל מקרה, המנגנונים שהוצעו להסביר את ההיסטרה 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 וכליאתו 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 בריכוזי במי ההשקיה מ-0.3 עד 40 מ"ג/ל' כשההשקיה הייתה במים תפלים יותר (1.8 ד"ס/מ'). אולם במליחות 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 יכולת 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 שיוויד את ריכוזו בתמיסת הקרקע. היתרון





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 בעומסים משקליים שווי ערך ל-0 עד 53 ט'ד' (עומס נפחי שווה ערך לעד 95 מ"ק"ד'). כל תערובת הוכנה ב-3 חזרות זהות. סה"כ הוכנו 30 תערובות קרקע\חול - קומפוסט. התערובות נארוזו 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- 1.6, 4 מיקרון), וכל מכלי הבוכנר הארוזים (ללא המשפך)

נשקלו לאחר אריזתם. כל אחת מ-30 המשפכים עם הקרקעות ותערובותיהן נשטפו 10 פעמים במים חסרי יונים. השטיפות היו אחת ל-3-4 ימים, ובין השטיפות הקרקעות הודגרו (כמעט ללא איבוד מים) בטמפ' של 30°C.

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"ק"ד' (4 עד 53 ט' חומר יבש לדונם). התערובות והקרקעות עצמן מוצו בעיסה רוויה כמקובל, אמוניום מוצה ב-1 M KCl זורחה - 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 והמגניון המומסים גבוהים מאד, מנת ספיחת הנתרן (ה-SAR) של הקרקע הנה גבוהה, כ-25 mmol^{0.5}. יישום קומפ' הבוצה בקרקע הקטין במידה מסוימת את הערכים של כל המדדים הללו, אך רק בעומסי היישום הגבוהים. בעומס המרבי (94 מ"ק"ד') 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 10-5 מתוספת המרכיב הזמין שלהם (טבלה 2).

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

טיפול	שומס היישום (טון/ד') ⁰	SP (%)	pH	EC (dS/m)	כלוריד (מא"ק/ל) ¹	נתרן (מא"ק/ל) ²	סידן+מגניון (מא"ק/ל) ³	SAR (mmol ^{0.5})
קרקע חווארית	0	62	7.7	41	22	242	191	25
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+ 86 מ"ק"ד' קומפ'	48	51	7.0	13.7	-	21.3	47	4.4

טיפול	שומס יישום (טון/ד') ⁰	B (מ"ג/ל) ¹	K (מא"ק/ל) ²	NH ₄ -N* (מ"ג/ק"ג) ³	PO ₄ -P* (מ"ג/ק"ג) ⁴	B כללי במדגם (מ"ג) ⁵	B מהקומפ' (מ% מכללי) ⁶
קרקע חווארית	0	10.1	8.3	14	10	17.8	0
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+ 86 מ"ק"ד' קומפ'	48	-	17.3	963	294	3.8	36

טיפול	שומס יישום (טון/ד') ⁰	תוספת N כללי עם הקומפוסט (ק"ג/ד') ¹	תוספת P כללי עם הקומפוסט (ק"ג/ד') ²	תוספת K כללי עם הקומפוסט (ק"ג/ד') ³
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

*ק"ג"ד' = (מ"ג"ק"ג)4; התוספת מחושבת ליסוד צרוף. לתחמוצת, יש לכפול את הזרחן הצרוף ב-2.3 (1 ק"ג P = 2.3 ק"ג P₂O₅) ואת האשלגן ב-1.2 (1 ק"ג K = 1.2 ק"ג K₂O).

שטיפה של הקרקעות ותערובותיהן עם הקומפוסט:

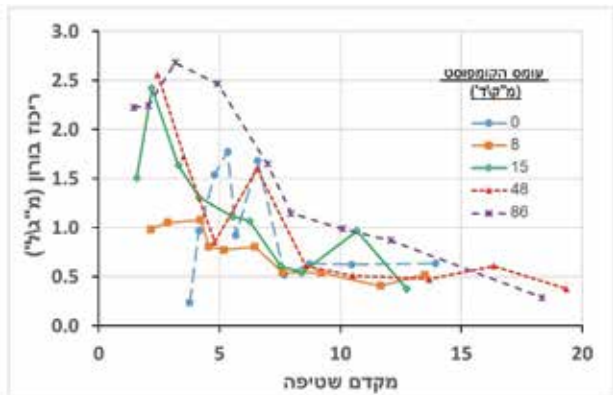
יישום קומפוסט הגדיל את תאחיזת המים בקרקע ובחול במתח 'קיבול שדה' ואת תכולת המים בעיסה הרוויה (ה-SP). בעומסי היישום המרביים ההגדלה בקרקע הייתה בכ-20% ובחול היא הייתה בכ-100%. ה-SP עלה בכ-10% ו-70%, בהתאמה (טבלה 2). לאחר כל אירוע הדגרה, נשטפה הקרקע בכל בוכנר בנפח מים של קיבול השדה באותו בוכנר (ובכל



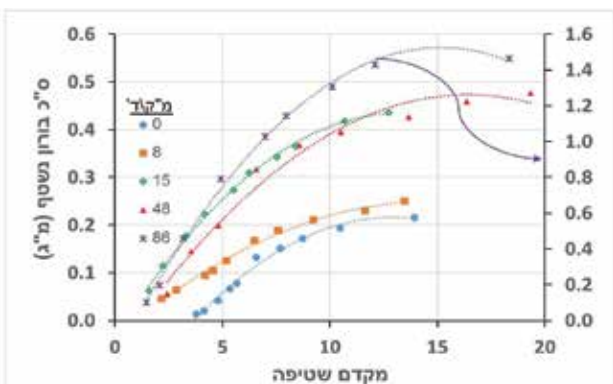


(כ-22 ק"ג\ד' בשכבת החריש) וכמותו במדגם שנארז בבוכנר (200 ג') הייתה כ-18 מ"ג. בשיטת העבודה, הוספת הקומפוסט הגדילה את תכולת הבורון במדגם (משפך קרקע) עד כ-20 מ"ג בעומס היישום הגבוה (94 מ"ק\ד') וחלקו של הבורון המוסף היה בין 0.7 ל-10% מכלל הבורון במדגם (טבלה 2). ריכוז הבורון המרבי במי-הנקז מהקרקע היה מעל 7 מ"ג\ל' (פי 7 מאשר בחול) בשיטת השלישית, והוא פחת בהמשך. בתערובות עם הקומפוסט, הריכוזים היו נמוכים באופן עקבי בהשוואה לקרקע עצמה (איור 3).

איור 1: ריכוזי בורון במי השטיפה מתערובות החול עם קומפוסט הבוצה כתלות בנפח מי השטיפה. מקדם השטיפה הוא היחס בין ס"כ המים שעברו דרך הקרקע לבין תכולת המים בקרקע בקיבול שדה. כל ערך הנו ממוצע של 3 חזרות.



איור 2: סך כל כמות הבורון שנשטפה מתערובות החול עם קומפוסט הבוצה כתלות בנפח מי השטיפה. מקדם השטיפה הוא כבאיור 3. כל ערך הנו ממוצע של 3 חזרות. יש לשים לב לכך שהכמות בעומס הגבוה מיוצגת ע"י האורדינטה הימנית.



סוג קרקע עלה עם העלייה בעומס יישום הקומפוסט). מקדם השטיפה של כל אחת מהתערובות מוגדר כאן כיחס בין כמות מי-הנקז לבין כמות המים בקרקע בקיבול שדה (כלומר, בתום היניקה). קיבול השדה של הקרקע נקבע ע"י תכונות הקרקע ועומס הקומפוסט. מקדם השטיפה המצטבר (עד אירוע שטיפה כלשהו) הוא היחס בין סך כל כמות מי הנקז (ממוצעת לטיפול) לבין תכולת המים (הממוצעת) בקיבול שדה בקרקעות\תערובות באותו טיפול. מקדם השטיפה המצטבר בסיום (לאחר 10 אירועי שטיפה) בטיפולי הקרקע היה בממוצע כ-11 ובטיפולי החול הוא היה כ-16. במילים אחרות, סך כל השטיפה המצטברת של טיפולי הקרקע (5 טיפולים כל אחד ב-3 חזרות, סה"כ 15 משפכי קרקע) הייתה בנפח מים גדול פי 11 בממוצע מתכולת המים בקיבול שדה.

שטיפת בורון מתערובות חול - קומפוסט בוצה:

תכולת הבורון הכללי בחול הייתה 3 מ"ג\ק"ג וכמותו במדגם שנארז בבוכנר (200 ג') הייתה כ-0.6 מ"ג. ריכוזי הבורון במי-הנקז מייצגים את הריכוזים בתמיסת הקרקע. בחול עצמו הריכוזים היו כ-1 מ"ג\ל' ב-4 השטיפות הראשונות והם ירדו בהמשך (איור 1). הקומפוסט בעומס הנמוך הקטין את ריכוזי הבורון בתשטיפים בהשוואה לחול עצמו אך בעומסים הגבוהים יותר, ובעיקר העומס הגבוה ביותר (86 מ"ק\ד'), עלו ריכוזי הבורון. ריכוזי הבורון במי השטיפה מהחול עצמו ומהתערובות בעומס עד 48 מ"ק\ד' השתוו לאחר שטיפה השווה ל-6-7 נפחי מים קיבול שדה, ובעומס היישום המרבי נדרש לכך מקדם שטיפה כפול.

כמויות הבורון שנשטפו עלו עם העלייה בעומס יישום הקומפוסט ועם התמשכות השטיפה (איור 2). סך כל השטיפה בסיום הייתה בממוצע בין 0.22 ל-0.48 מ"ג בורון למשפך קרקע בעומסים השקולים עד 48 מ"ק\ד', ו-1.5 מ"ג בעומס המרבי (השקול ל-86 מ"ק\ד') בעומס זה כמות הבורון שנשטפה הייתה גדולה פי 35 מזו שהייתה בעומס 8 מ"ק\ד'. ההבדלים אלה בשיעור השטיפה של הבורון מעידים על כושר ספיחה מסוים של החול לבורון, ועל פריצתו בעומס הקומפוסט המרבי. כך, סך כל הדחת הבורון מהתערובות בתום תהליך השטיפה היה בין 7% מכלל הבורון שהיה בחול לכ-12% מזה שהיה בתערובות עד עומס 48 מ"ק\ד', בעומס המרבי נשטפו כ-32% מכלל הבורון שהיה בתערובת. נזכור, כי שטיפה רבה יותר של בורון מייצגת ריכוזים גבוהים יותר שלו בתמיסת הקרקע

שטיפת בורון מתערובות קרקע הבקעה - קומפוסט בוצה:

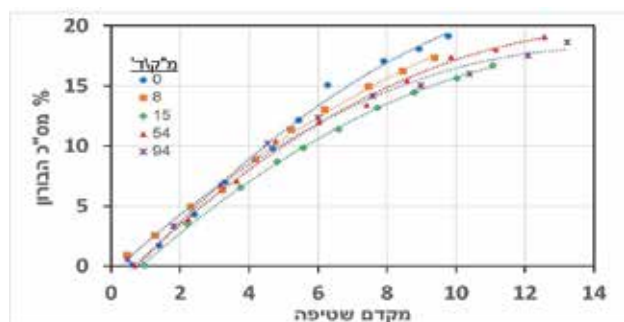
תכולת הבורון הכללי בקרקע מהבקעה היא 89 מ"ג\ק"ג





כמויות הבורון שנשטפו מתערובות הקרקע-קומפוסט היו קטנות מאלו שנשטפו מהקרקע עצמה (איור 4), וסך כל הבורון שנשטף (ממכל קרקע) לאחר העברת 10 נפחי מים בקיבול שדה (מקדם שטיפה 10) היה בין 3.6 מ"ג מהקרקע עצמה ל-2.6 מ"ג בעומסים השקולים ל-54 ול-94 מ"קד'. הדחת הבורון פחותה מתערובות קרקע-קומפוסט הייתה תוצאה של הקטנת ריכוזי הבורון בתמיסת הקרקע ע"י הקומפוסט. לאחר שטיפה במקדם שטיפה = 10, נשטפו כ-20% מכלל הבורון שהיה בקרקע וכ-15 - 18% בתערובות (איור 5).

איור 5: כמות הבורון שנשטפה מתערובות החול - קומפוסט הבוצה כאחוז מכלל הבורון בתערובת. מקדם השטיפה הוא כבאיור 3. כל ערך הנו ממוצע של 3 חזרות.



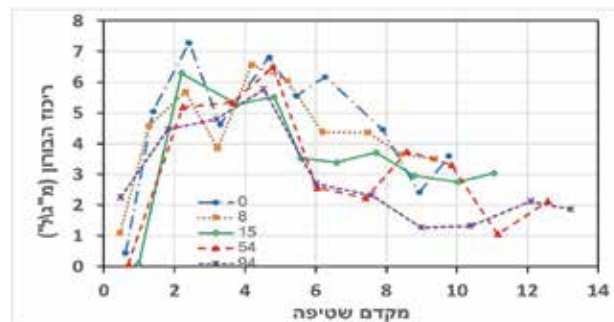
ה-pH וה-EC במי-הנקז מהחול והקרקע ומתערובותיהם:

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. בחול עצמו, ערכי ה-pH עלו במהלך השטיפות, מכ-7.5 לכ-8. בתערובות הקומפוסט ה-pH ירד ככל שהתקדמה השטיפה וביתר שאת בעומסים הגבוהים יותר, וערכיו ירדו מתחת ל-6.5. בכל תערובות הקרקע, ערכי ה-pH במי-הנקז היו קבועים יותר, ובמגמה של עלייה קלה מבערך 7.3-7.5 לכ-7.7-8.0.

ה-EC הנו משני ל-pH בהשפעתו על שיעור ועוצמת הספיחה של הבורון למרכיבי הקרקע. נתייחס כאן רק לקרקע. מליחות התשטיפים הייתה גבוהה מאד בהתחלה, בין 35 ל-40 ד"סמ' (איור 6), בדומה למליחות העיסה הרוויה (טבלה 2). הקומפוסט לא תרם מליחות לקרקע אלא אף הפחית אותה, וההפחתה הייתה ניכרת יותר בעומסי היישום הגבוהים יותר בעיקר באירועי השטיפה הראשונים (בדומה למה שנמדד בעיסה הרוויה, טבלה 2). הדבר נבע כנראה מהעלייה בנפחי

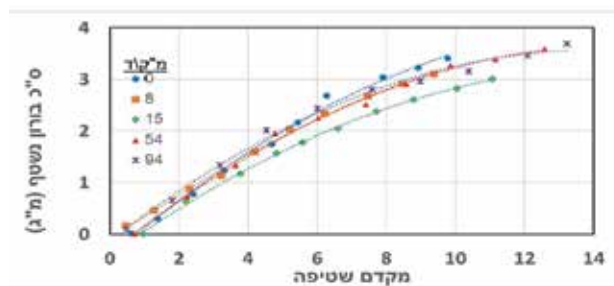
הדבר מומחש באיור 3b, בו מוצגים הריכוזים הממוצעים לכל אירועי השטיפה בכל אחד מחמשת הטיפולים. ניתן לראות כי הריכוז הממוצע בתשטיפים מהתערובות היה נמוך מהריכוז בתשטיפים מהקרקע עצמה, וכי הריכוז ירד ככל שעלה עומס היישום. לדוגמה, ריכוז הבורון הממוצע בתשטיפים מהקרקע היה 5.1 ± 1.5 מ"ג ב\ל' בעוד שמהתערובת בעומס 94 מ"קד' הוא היה 3.0 ± 1.6 מ"ג ב\ל'. חלק מהירידה בריכוז נבע מהעלייה בנפח מי השטיפה עקב ההגדלה בתכולת המים בקרקע בקרקע בקיבול שדה כתוצאה מיישום הקומפוסט.

איור 3: (a) ריכוזי בורון במי השטיפה מתערובות קרקע הבקעה עם קומפוסט הבוצה כתלות בנפח מי השטיפה. מקדם השטיפה הוא כבאיור 3. כל ערך הנו ממוצע של 3 חזרות. (b) ריכוזים ממוצעים של התשטיפים במהלך השטיפה כולה. הממוצעים (וסטיות תקן) בכל טיפול נכללים כל הריכוזים בכל השטיפות והחזרות חוץ מהשטיפה הראשונה.



מ"קד'

איור 4: סך כל כמות הבורון שנשטפה מתערובות הקרקע עם קומפוסט הבוצה כתלות בנפח מי השטיפה. מקדם השטיפה הוא כבאיור 3. כל ערך הנו ממוצע של 3 חזרות.





2). העבודה נועדה לבדוק חשש שמא יישום קומפוסט הבוצה (או אחר) יגרום לעלייה בזמינות הבורון בקרקע בה זמינותו גבוהה מלכתחילה.

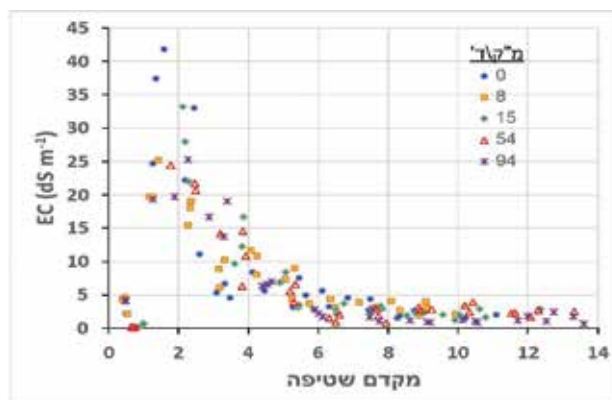
ככלל, כשהבורון בקרקע הנו מעבר לקיבול הספיחה של שלה, עודף בורון מומס יישטף עם מי-הנקז. עם הירידה בריכוזיו בתמיסת הקרקע, תקטן גם דליפתו, והבורון הדולף ימצא בשיווי משקל עם הבורון הספוח. תערובות החול-קומפוסט הדגימו זאת. ספיחת בורון לחול הנה קטנה מאד (לא נמדד), ותכולתו בחול הייתה כעשירית מתכולתו בקומפוסט. בתערובות חול-קומפוסט, הבורון שמקורו בקומפוסט היה מעתה בשיווי משקל עם ריכוזי בורון נמוכים בתמיסת הקרקע (הדגרה ושטיפה במים מזוקקים), הוא השתחרר מאתרי ספיחה בקומפוסט, ונשטף בתערובות החול-קומפוסט. ככל שעלה עומס היישום עלה גם ריכוז הבורון בתמיסת הקרקע ובמי-הנקז, וגדלו הכמויות שנשטפו. למעשה בשלבים הראשונים של השטיפה, החול עדיין ספח די בורון שמקורו בקומפוסט וריכוזי הבורון היו נמוכים בדומה לאלו שהיו בחול המסה ושחרור מאתרי ספיחה נמשכו עד הגעה לשווי משקל מחדש עם קיבול הספיחה של המערכת (קומפוסט + חול). הירידה ב-pH ובמוליכות החשמלית של תמיסת שיווי המשקל בתערובות החול גרמו לירידה בספיחה ולהגדלת הריכוזים בתמיסת הקרקע ובמי-הנקז.

בקרקע הסולונצ'אק החווארי המצב היה שונה מאד. תכולת הבורון בקרקע ובתערובותיה הייתה גדולה פי 30 בערך מאשר בחול, וגם הריכוזים והכמויות במי הנקז בשלבים הראשונים של ההמסה והשטיפה היו גדולים עד פי 20 בערך מאשר בחול ובתערובותיו. אולם בניגוד לתערובות החול, בתערובות עם הקרקע החווארית, הקומפוסט הקטין את ריכוזי הבורון במי-הנקז ואת ס"כ דליפתו בהשוואה לקרקע לבדה, והריכוזים במי-הנקז פחתו ככל שעלה עומס יישום הקומפוסט (ואתו עלה קיבול הספיחה). כך, ריכוז הבורון הממוצע (לכל המדגמים מכל השטיפות לבד מהראשונה) במי-הנקז ירד מ-5.1 מ"ג/ל' בקרקע עצמה ל-3.0 מ"ג/ל' במי-הנקז בעומס היישום המרבי. ברור לפיכך שהקומפוסט היווה מבלע לבורון שהיה בקרקע מלכתחילה.

לקומפוסטים קיבול ספיחה גבוה מאד לבורון, גבוה פי 5 ביחס לחרסיות סמקטיטיות) ירמיהו, 1988; Yermiyahu et al., 1995; 2011; Sartaj and Fernandes, 2005). הגם שהדבר לא נבדק ישירות בעבודה הנוכחית, סביר מאד להניח כי הקומפוסט הגדיל את קיבול הספיחה לבורון הן בתערובותיו עם החול, בהן הוא היה המאטרקס הסופח העיקרי, והן בתערובותיו עם הקרקע החווארית. עם זאת,

המים בקרקע (ומי-הנקז) עם העלייה בעומס היישום, והמיהול הנוסף של המלחים בתשטיפים. הירידה במליחות הייתה חדה אולם הדבר מאפיין את יעילות השטיפה במעבדה ואין לצפות לכך בשדה. בכל מקרה, מליחות הסולונצ'אק הסילטי מהבקעה גבוהה מאד והמדגם שבידנו מייצג קטע במשרעת הרחבה של מליחות של קרקעות הזור (ראה Dan et al., 1981). עם זאת, יישום נכון של קומפוסט עשוי לשפר את המוליכות ההידראולית של הקרקע ובכך את יכולת הדחת המלחים ממנה.

איור 6: ה-EC בתשטיפים מתערובות קרקע הבקעה וקומפוסט הבוצה. מקדם השטיפה הוא כבאיור 3. מוצגים הערכים של 3 החזרות בכל טיפול ואירוע שטיפה.



דיון

העניין העיקרי במחקר הנוכחי הוא לבחון את ההשפעה של קומפוסט בוצה על מסיסות הבורון בקרקע בתולה שנוצרה מחוואר הלשון בבקעת הירדן, והמיועדת לנטיעת תמרים. המדד למסיסות הבורון הוא ריכוזו במי-הנקז ממשפכים (בוכנרים) עם הקרקע (או חול) ותערובותיה עם הקומפוסט. הריכוזים במי-הנקז והכמויות שנשטפו ייצגו את תמיסת הקרקע.

קרקע שנבדקה הנה סולונצ'אק סילטי, מלוחה מאד (כ-40 ד"ס/מ' במיצוי העיסה הרוויה) ונתרנית מאד (SAR = 25 mmol^{0.5}), 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 השיפור הצפוי בתכונות הפיסיקו-כימיות של הקרקע (פיין וחוב, 2007; בן-חור וחוב, 2012) ובהזנת הצמח (פיין וחוב, 2014; וראה טבלה





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 תהיה 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).

רשימת ספרות

טריפלר אפי, יחזקאל מועלם, זהבה יהודה, אורי שני, אלון בן-גל (2009). בחינת התגובה של תמרים מזן 'מג'הול' לריכוזים שונים של מלח ובורון. עלון הנוטע כרך 63 עמ'.
 יוטל ירון (1990). שטיפת בורון וכלוריד בקרקע בקעת הירדן כתלות בקצב חידור המים. עבודת גמר מוגשת לפקולטה לחקלאות של האוניברסיטה העברית בירושלים לשם קבלת תואר "מוסמך למדעי החקלאות". 120 ע"מ.
 עין-גל עוז. 2014. שיקום סדימנטים מזוהמים במתכות כבדות באמצעות האצת קליטתן בעצים עמידים ובתנאי שקיה גירעונית. עבודת-גמר מוגשת לפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה, האוניברסיטה העברית בירושלים.
 פיין פנחס, אריה בוסק, אנה בריוזקין, אירית לבקוביץ', שוש סוריאנו, מנחם אליה, אשר אזנקוט, גלעד אוסטרובסקי, יגב קילמן. 2014-א'. הערכת איכות בוצות ואשפה עירונית כתחליפי דשן כימי בגד"ש. ניר ותלם 56 (דצמבר): (27-201435).
 פיין פנחס, דני קורצמן, דורית שרגיל, עידו ניצן, אנה בריוזקין, שוש סוריאנו, אירית לבקוביץ'. 2014-ב'. תגובת צמחי חסה ליישום חוזר של בוצות שפכים בצורות ייצוב שונות: צימוח ותכולת יסודות הזנה, קורט ומתכות כבדות בצמחים ובמי-הנקז. הכינוס השנתי ה-42 של האגודה הישראלית לאקולוגיה ולמדעי הסביבה. 16-18 בספטמבר 2014, אוניב' בר-אילן רמת גן.
 פיין פנחס, אנה בריוזקין, אפרים ציפלבץ', זיוה גלעד, אחיעם מאיר, דוד סילברמן ואורי אדלר. 2020. תכולת מתכות כבדות בפרי הפלפל בהשפעת זיבול בקומפוסטים שונים. מבזק ירקות-שדה וירק, 332: 65-59.

Camacho-Cristóbal JJ, Rexach J, González-Fontes A (2008). Boron in plants: deficiency and toxicity. *J Integr Plant Biol*, 50(10):1247-1255.

Dan, J., R. Gerson, H. Koyumdjisky, and D.H. Yaalon. 1981. Aridic soils of Israel : properties, genesis, and management. International Conference on Aridic Soils (1981, Jerusalem). Published by Division of Scientific Publications, ARO, Volcani Center, Bet Dagan, Israel.

בתערובות החול, הקומפוסט היה גם המקור הכמעט בלבדי לבורון, ודליפתו ארעה עקב השינויים שחלו בהרכב תמיסת הקרקע במהלך השטיפות. השינויים העיקריים היו ירידה בריכוזי הבורון בתמיסת הקרקע, ירידה ב-pH (ומעבר ליתר דומיננטיות של הצורון הלא-מיון והפחות נספח של הבורון), וירידה בעוצמה היונית גרמו להמסתו ולשחרורו מאתרי ספיחה בשיווי משקל מחודש.

בתערובות הקרקע, הקרקע היא שהייתה המקור העיקרי לבורון ולא הקומפוסט, אולם הקומפוסט הגדיל את קיבול הספיחה של תערובת הקרקע-קומפוסט לבורון מעבר לקיבול של הקרקע עצמה (שהייתה סילטית עם מקטע חרסיתי מזערי). גם ה-pH בתמיסת תערובות הקרקע נשאר קבוע, ואתו 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 ככל הנראה לא ביותר. כתוצאה מכך, ריכוזי הבורון בתמיסת הקרקע בנוכחות קומפוסט ירדו ככל שעלה עומס יישום הקומפוסט, ועם הירידה בריכוזים בתמיסת הקרקע ירדו גם הריכוזים והכמויות במי-הנקז.

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 שצינו 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 הפחמימיני (בדומה לממצאי של ה-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) זרחה כמעט אינה נספחת והיא לא תתחרה בבורון על אתרי ספיחה.

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





boron from landfill leachate by peat and the effect of environmental factors. *Journal of Environmental Engineering Science* 4, 19-28.

Stangoulis, J.C.R. and Reid, R.J. 2002. Boron toxicity in plant and animals. In: *Boron in Plant and Animal Nutrition* (H.E. Goldbach, B. Rerkasem, M.A.Wimmer, P.H. Brown and R.W. Bell, eds), pp. 227-241. Kluwer Academic Publishers, New York, USA.

Su Lin Lim, Leong Hwee Lee, Ta Yeong Wa (2016) Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 111, Part A, 262-278

Yermiyahu Uri, Alon Ben-Gal and Rami Keren. 2011. Boron, Chapter 6.1, pp216-245 in Guy J. Levy, Pinchas Fine and Asher Bar-Tal (Eds.) *Treated Wastewater in Agriculture*, Blackwell Publishing

Yermiyahu, U. R. Keren, and Y. Chen. 1995. Boron Sorption by Soil in the Presence of Composted Organic Matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:405-409.

Special publication no. 190. 353 pages.

Dugger WM, Gauch HG (1953). The Role of Boron in the Translocation of Sucrose. *Plant Physiol.* 28(3):457-466.

Eaton, F.M. 1944. Deficiency, toxicity, and accumulation of boron in plants. *J. Agric. Agric. Res.* 69:237-277.

Elrashidi, M.A. and O'Connor, G.A. (1982) Boron sorption and desorption in soils. *Soil Science Society of America Journal* 46, 27-31.

Goldberg, S. 1997. Reaction of boron with soils. *Plant Soil* 193, 35-48.

Keren, R. Bingham, F.T (1986). Boron in water, soils, and plants. *Journal Article* (1) p. 229-276

Keren, R., Grossl, P.R. and Sparks, D.L. (1994) Equilibrium and kinetics of borate adsorption-desorption on pyrophyllite in aqueous suspensions. *Soil Science Society of America Journal* 58, 1116-1122.

Mezuman, U. and Keren, R. 1981. Boron adsorption by soils using a phenomenological adsorption equation. *Soil Science Society of America Journal* 45, 722-726.

Sartaj, M. and Fernandes, L. (2005) Adsorption of