

תכולת מתכות כבדות בפרי הפלפל בהשפעת זיבול בקומפוסטים שונים

פנחס פיין, אנה בריוזקין – מנהל המחקר החקלאי
אפרים ציפילביץ', זיוה גלעד, אחיעם מאיר - מו"פ בקעת הירדן
דוד סילברמן - משרד החקלאות, שהמ
אורי אדלר - מועצת הצמחים

תקציר

נבחנה השפעת קומפוסטים של בוצה ושל זבל בקר (בעומס יישום השווה ל-40 מ"קד') על תכולת יסודות בפרי הפלפל. הקומפוסטים עורבבו בכל נפח הקרקע בערוגה או שהם הונחו בתעלות הזנה פתוחות לקרקע. היישום היה לקראת עונת הדיגום (אוגי-ספט' 2011) או לקראת העונה שקדמה לה (אוגי-ספט' 2010). ריכוזי יסודות בציפת הפרי ובזרעים נבדקו בפירות מקטיפים שבין ראשית ינואר לאמצע אפריל 2012. נבדקו היסודות המחויבים בניטור ע"י משרד הבריאות והם עופרת, קדמיום וארסן. כספית פטורה מבדיקה מאחר שריכוזיה בזבלים (ובצמחים) הנם אפסיים. ריכוזי עופרת וארסן בציפה ובזרעי הפלפל היו מתחת לסף הכימות בכל הטיפולים, וריכוזי קדמיום היו נמוכים כבסדר גודל מהריכוז המרבי המותר. הקומפוסטים אף הפחיתו את ריכוזי הקדמיום בזרעים לכמחצית ריכוזו בהיקש ללא קומפוסט. בנוסף, נבדקו עוד כ-20 יסודות אחרים. בממוצע לכל המדגמים מכל הטיפולים ובמהלך עונת הגידול כולה, הריכוז של מרביתם היה שונה במובהק בין הזרעים לציפה, חציים גבוה יותר בזרעים וחציים גבוה יותר בציפה. ערבוב קומפוסט הבוצה בקרקע או יישומו בתעלת הזנה והתיישנותו לא השפיעו על תכולת היסודות בפרי, והתיישנות הקומפוסט אף הפחיתה את הריכוז בזרעים של חמישה יסודות קורט. המסקנה הברורה היא כי ניתן להשתמש בקומפוסטים של בוצה וזבל בקר (כאלה שנבדקו במחקר) גם בעומסי יישום כבדים וכמדיום לתעלות הזנה, ללא כל חשש מקליטה של יסודות רעילים בפרי או מאי סדירות בקליטת יסודות קורט ויסודות אחרים.

מבוא

גידול פלפל מזני איכות ליצוא הוא גידול הירקות המרכזי בבקעת הירדן. היקף השטחים בעונה 2012/13 הינו כ-4500 דונם. רצון החקלאים להרחבת שטחי הגידול נתקל בבעיה של מחסור בקרקעות ראויות. בבקעת הירדן קיימות קרקעות עתירות גיר, בורון ומליחות המקשות על גידול פלפל. כמו כן בחלק מהקרקעות ישנה בעיה של שכבתיות שנובעת מכך שהקרקע נוצרה בחלקה מהתפתחות של קרקע מקומית (חוואר הלשון) ובחלקה היא תולדה של סחף מההר הגבוה. בקרקעות השכבתיות צפויה להיות בעיה בגידול פלפל שסובל מבעיות של עודפי מים כתוצאה מחוסר ניקוז. עקב כך, מזה שנים רבות מקובל בבקעת הירדן לגדל גידולים שרגישים לבעיות קרקע במצעים מנותקים (ציפילביץ' וחוב', 2013). גידול במצע מנותק מייקר את עלות התשתית ועלויות הגידול (יותר מים ודשן). בשנים האחרונות מונהגת גישה המעדיפה גידול בערוגות קבועות במינימום עיבודי קרקע בין העונות במגוון שיטות אגרוטכניות כמו גידול בתעלות הזנה לצורותיהן השונות (ציפילביץ' וחוב', 2012; 2015). טכניקת גידול זו או גידול בערוגות קבועות ללא עיבודי קרקע בין העונות עשויה לעזור בהרחבת השטחים ולהוזיל את עלויות הגידול. עם זאת יש חשש כי חלק ממצעי הגידול בתעלות הזנה כגון קומפוסט בוצה וקומפוסט אשפת ערים יהיו מקור למתכות כבדות ולמיקרו-מזהמים אורגניים בפרי (Basta et al., 2005). גידול בתעלות מצעים עלול גם לפגוע בכושר האחסנה של הפרי גם אם איכותו מיד לאחר הקטיף יכולה להיות טובה. נושא זה נבדק במקביל ע"י פליק וחוב' (2013).

מטרת חלק זה של המחקר הייתה לבחון את השפעת שיטות הגידול השונות על תכולת יסודות רעילים ואחרים בחלקי הפרי. מבחינת זמינות יסודות רעילים ואחרים, עומס היישום במצעים, כ-40 מ"קד', גבוה פי 10 בערך מהמקובל בשדות מסחריים (ומהמותר – 1.5 ט' חומר יבשוד' או 50 ק"ג N צרוףד'; הגה"ס, 2004). מאחר שהגידול משתרש ישירות בזבל, נמנעת אפשרות השיכוך של זמינות היסודות עקב קשירתם לחלקיקי הקרקע, יש חשש מעלייה בזמינותם וקליטתם בחלקי הצמח, אף עד לפגיעה אפשרית בגידול עקב זמינות יתר של יסודות חיוניים (כולל חנקן וזרחן, לדוג' Silber et al., 2002). בדיווח הנוכחי נתמקד בבחינת השפעה של שיטות הגידול השונות על תכולת יסודות רעילים ואחרים בחלקי הפרי. קומפוסט בוצה הנו זול ועשוי להתאים לזיבול גידולים שונים, וההנחה היא שה-GlobalGAP עשוי להתיר בעתיד את השימוש בו לגידולים למאכל אדם המשווקים באירופה, וכי לתוצאות הניסוי הנוכחי עשויה להיות השפעה על ההחלטה.

מהלך המחקר ושיטות עבודה

מערך הטיפולים:

הגידול שנבחר היה פלפל (להלן). חלק הארי של הניסוי בוצע בתחנת צבי-מו"פ בקעת הירדן (בטבלה 1). טיפולים 3 ו-4 נבחנו בבתי רשת של מגדלים מסחריים. לא היו להם טיפולי היקש צמודים אולם מאחר שהגידול היה בתעלת הזנה ולא בקרקע הוא נבחן סטטיסטית עם יתר הטיפולים. חלק מהטיפולים בניסוי נמשך שנתיים (בעונות 2010/11 ו-2011/12), וחלקם רק בעונה השנייה, שהייתה העונה בה נבדקה תכולת היסודות בפירות. מתן קומפוסט ומועד יישומו מתייחסים רק לעונות לעיל, והעיבוד (תיחוח הקרקע במשתת לעומק 40-60 ס"מ) מתייחס לקיץ שבין עונות אלו. יסודות נבדקו בדרך כלל הן בציפה והן בזרעים, אך מחמת תקלה הם נבדקו רק בזרעים בטיפולים 3 ו-4. הקז"ב היה מ"קומפוסט שדה אליהו" וקומפ' הבוצה מ"קומפוסט אור" בטובלן. הקומפוסטים נדגמו ב-2011 לפני השתילה. הקומפ' הטריים נדגמו מהערמות לפני יישום, והקומפוסטים שכבר היו בתעלות ההזנה מהשנה הקודמת, נדגמו מתוך התעלות.

טבלה 1: הטיפולים במחקר (*צ - ציפה, ז' - זרעים)

מס' טיפול	מיקום	סוג קומפוסט	עומס (מ"קד')	יישום בעונה	אופן היישום	עיבודים בין העונות	כרב	איבר נבדק*
1) קרקע	מו"פ הבקעה	-	-	-	-	ללא	פלפל	ז / צ
2) מסחרי: 5 מ"קד' / שנה ב-3 שנים	מו"פ הבקעה	בקר	5	כל שנה	בקרקע	עיבוד	עגבניה	ז / צ
3) קז"ב, 40 מ"קד', תעלה, שנה ראשונה	מסחרי	בקר	40	נוכחית	בתעלה	-	פ' אורגני	ז
4) ק' בוצה, 40 מ"קד', תעלה, שנה ראשונה	מסחרי	בוצה	40	נוכחית	בתעלה	-	ק' בתולה	ז
5) ק' בוצה, 40 מ"קד', תעלה, שנה שנייה	מו"פ הבקעה	בוצה	40	קודמת	בתעלה	-	פלפל	ז / צ
6) ק' בוצה, 40 מ"קד' ערוגה, שנה שנייה, ללא עיבוד בין העונות	מו"פ הבקעה	בוצה	40	קודמת	בקרקע	ללא	פלפל	ז / צ
7) ק' בוצה, 40 מ"קד' ערוגה, שנה שנייה, עם עיבוד בין העונות	מו"פ הבקעה	בוצה	40	קודמת	בקרקע	עיבוד	פלפל	ז / צ

1. חלקה ותיקה, קיבלה 5 מ"קאד' קומפוסט זבל בקר (קז"ב) פעם ב- 2-3 שנים, לא לפני עונות 2010/11 ו- 2011/12, ללא עיבוד בין העונות (תחנת צבי - כרב פלפל);
2. "הטיפול המשקי": קומפוסט זבל בקר (קז"ב), 5 מ"קאד', מוצנע בקרקע מדי שנה בשלוש השנים שקדמו לניסוי (תחנת צבי - כרב עגבניה) ובשנתיים של הניסוי עצמו, עם עיבוד בין העונות כמקובל;
3. קז"ב, 40 מ"קאד', בתעלת הזנה שהוכנה לקראת עונת 2011/12 (גידול מסחרי, כרב פלפל);
4. קומפוסט בוצה, 40 מ"קאד', בתעלת הזנה שהוכנה לקראת עונת 2011/12 (גידול מסחרי בקרקע בתולה);
5. קומפוסט בוצה, 40 מ"קאד', בתעלת הזנה שהוכנה לקראת עונת 2010/11 (תחנת צבי - כרב פלפל);
6. קומפוסט בוצה, 40 מ"קאד', הצנעה בכל נפח הקרקע לקראת עונת 2010/11, ללא עיבוד בין העונות (תחנת צבי - כרב פלפל);
7. קומפוסט בוצה, 40 מ"קאד', הצנעה בכל נפח הקרקע לקראת עונת 2010/11, עם עיבוד בין העונות (תחנת צבי - כרב פלפל)

הקרקע ותעלות הקומפוסט

הקרקע בחלקות הניסוי הייתה סיינית-חרסיתית גירית, והיא נוצרה מסחף חרסיתי ואו רנדזיני מעורב בסחף חווארי מקומי. תכונות הקרקע מוצגות בטבלה 2, והן מאפיינות את הקרקע ב-2 אתרי הניסוי. ממדי תעלות הקומפוסט היו 40 ס"מ רוחב ו-20 ס"מ עומק.

טבלה 2: ממוצע ממדי הקרקע (שכבה 0-20 ס"מ) בחלקות הדיגום

מדד	יחידות	"תחנת צבי"
קק"ח	מא"ק/100ג'	39
חול	% (w/w)	18
סילט	"	47
חרסית	"	35
מרקם	סיין חרסיתי סילטי	
SP	"	62
גיר כללי	"	60

יסודות בזבלים ובקרקע:

תכולת יסודות שונים בזבלים ובקרקע מוצגת בטבלה 3. הזבלים עמדו בתקן המחייב לריכוזים מרביים של מתכות מנוטרות בבוצות שפכים המיועדות ליישום חקלאי (חוק המים, 2004). בקומפוסטי הבוצה מ-2 השנים היו תכולות גבוהות יחסית של חנקן וזרחן, ושל כסף, קדמיום, נחושת ואבץ; בקז"ב היו יחסית יותר אשלגן ונתרן, ומליחותו הייתה גבוהה יחסית. ריכוזי הכספית בכל הזבלים היו אפסיים. הקרקע הייתה שונה למדי מהקומפוסטים האורגניים, עם תכולה גבוהה יחסית של בורון, ליתיום וונדיום וכן של ברזל, מנגן, סידן מגניון וגפרית. לעומתם, בקרקע הייתה תכולה נמוכה יחסית של נחושת ועופרת, ובמיוחד של אבץ.

ממשק הגידול:

גידול הפלפל בתחנת צבי מו"פ בקעת הירדן היה בחמ-רשת, והעונה הרלוונטית לבדיקת המתכות בפירות הייתה 2012/2011. הזן בכל הטיפולים היה קנון 7158 (זרעים גדרה), מועד השתילה - אמצע אוגוסט, והגידול נמשך כ-9 חודשים. המבנה כוסה ברשת חרקים 50 מש וברשת שחורה 40% צל. רשת הצל הוסרה באמצע ספטמבר 2011, ובסוף אוקטובר הוחלפה רשת החרקים בפוליאיתילן. בראשית פברואר 2012 כוסו המבנים שוב ברשת שחורה 40% צל עד סוף העונה. מנת המים השנתית הייתה כ-800 מ"קאד'. כל החלקות הושקו בכ-100 מ"קאד' במהלך השבועיים לפני השתילה כדי לשטוף את הקרקע (או הקומפוסט בתעלה) ממלחים.

בתחילת הגידול ניתנו השקיות לפי הצורך כדי להגיע לקליטה והתבססות של השתילים. החל מחודש אחרי השתילה ההשקיה ניתנה לפי מקדם של 70% מהתאדות מגיגית. בתחילת הניסוי הושקו כל הטיפולים ללא דשן. בנובמבר, בדיקות קרקע ועלים הראו כי רמות החנקן והאשלגן היו נמוכות מהרצוי, והוחל בדישון אחיד בדשן 8-0-8 לפי מ"ג N ל' עד לסיום.

טבלה 3 : הרכב הזבלים והקרקע (ריכוזים בחומר היבש)

מרכיב נבדק	יחידות	קומפוסט בוצה 2011	קומפוסט בוצה 2012	קומפוסט זבל בקר	קרקע	ערך מרבי	
						לבוצות ¹	לפלפלי ²
OC	%	19	20	17			
Total N	mg/kg	21,700	21,400	15,000			
C/N	יחס	11.4	10.7	8.8			
NH ₄ -N	mg/kg		3,290	445			
Total P	"	24,500	17,500	10,050	1,280		
P-PO ₄ (Olsen)	"		570	2,235			
P _{Olsen} /PT	יחס		0.03	0.22			
Total K	mg/kg	2,530	4,100	17,950	8,560		
K _(Olsen, 3 h)	"		1,500	2,170			
K _(Olsen) /TK	יחס		0.37	0.12			
pH (at 1: 5)			6.6	7.7	8.1		
EC (at 1: 5)	dS/m		7.1	15.6	6.74		
Cl	mg/kg		3,020	3,475			
Ag	"	5.1	5.0	0.3			
As	"	2.5	2	4	<5		5-16
B	"	53	60	36	89		
Ba	"	410	340	100	105		
Ca	"	96,600	90,600	122,250	350,165		
Cd	"	2.0	1.6	0.46	2.3	20	0.8
Co	"	8.2	6	5	13		
Cr	"	132	145	52	71	400	
Cu	"	395	340	96	29	600	
Fe	"	15,870	10,570	8,800	23,700		
Li	"	8.3	7	6	61		
Hg	"	nd	nd	nd ³	<1	5	0.15
Mg	"	11,500	10,500	11,000	22,250		
Mn	"	360	260	290	1,730		
Mo	"	3.1	4	2	3.4		
Na	"	760	1,650	5,700	6,000		
Ni	"	67	54	32	47	90	
Pb	"	67	44	10	13.5	200	0.8
S	"	6,330	7,200	6,750	8,050		
Sr	"	440	296	296	287		
Ti	"	190	87	165	806		
V	"	30	23	22	67		
Zn	"	1,775	1,300	310	74	2,500	

¹תקנות המים (הגה"ס, 2004); ²תקנות משרד הבריאות-שרות מזון ארצי (2016). ביסודות להם ניתן ערך רק לפרי הלח, הערך המרבי חושב לפי תכולת מוצקים של כ-6% בציפת הפרי. לארסן ציינו שני ערכים, הערך הנמוך הנו לפי הרשום בתקן ל"פירות וירקות מיובשים כולל פטריות, צמחי מאכל וצמחי תבלין", והערך הגבוה חושב לפי הרשום בתקן ל"פירות וירקות - כולל פטריות, צמחי מאכל וצמחי תבלין" לחים (1 מ"ג/ק"ג חומר לח) ובהתחשב בתכולת המוצקים בציפת פרי הפלפל. ³לא נמדד.

בקרת מצב הצמחים ומדידות יבול:

אורך חלקות הניסוי היה 10 מ' ב-4 חזרות, ואורך חלקת דיגום פרי בתוכן היה 3 מ' ערוגה (2 שורות צמחים). כל הפירות בחלקות הדיגום נקטפו במהלך עונת הגידול וסה"כ בוצעו 14 קטיפים. הפירות נשקלו, מכל קטיפי שני נלקח מדגם מייצג מכל אחת מהחזרות. סה"כ היו 30-40 מדגמי פרי בכל טיפול, 4-6 פירות בכל מדגם. הפירות שנדגמו בתחנת צבי פורקו, לזרעים ולציפת הפרי, ואלה נבדקו בנפרד. מדגמי צמח יובשו בתנור (60 מ"צ במשך כשבוע), נטחנו, ומדגם במשקל 0.5 ג' עוכל במלואו בחומצה חנקתית מרוכזת רותחת, נמהל לנפח, ובנוזל בוצעה סריקת מתכות באמצעות ICP-AES.

ניתוח סטטיסטי

נעשה באמצעות תוכנת jmp. התייחסנו לחלקות בטיפולים 1-7 כאל חלקות באקראי, כשההיקש לכולם הם טיפולים 1 (קרקע ללא קומפוסט) ו-2 (טיפול מסחרי ב-5 מ"קד'שנה קומפי זבל בקר), הגם שחלק מהטיפולים (3 ו-4) בוצעו בבתי רשת מסחריות. מובהקות סטטיסטית נבדקה ב-ANOVA ובמבחן רב-תחומי Tukey-Kramer HSD ברמה של $\alpha < 0.05$. בכל המדדים שנבדקו, ואשר מוצגים בטבלאות ובאיורים, העדר כל אות ליד הממוצע או הופעה של אותה אות מציין כי ההבדל בין הממוצעים של הטיפולים לא היה מובהק סטטיסטית. הריכוז הממוצע של יסוד בטיפול ובמועד בדיקה כלשהם חושב על-פי התוצאות של 4 החזרות בטיפול (בכל חזרה נבדקו 4-6 פירות). הריכוז הממוצע של יסוד בכל הטיפולים במועד בדיקה כלשהו חושב על-פי התוצאות של כל החזרות שהיו במועד זה, והריכוז הממוצע של יסוד בטיפול בכל מועדי הדיגום חושב על-פי התוצאות של כל החזרות שהיו במהלך הגידול בטיפול זה, והריכוז הממוצע של יסוד בכל הטיפולים יחד בכל מועדי הדיגום חושב על-פי התוצאות של כל החזרות שהיו במהלך המחקר.

תוצאות

הריכוזים הממוצעים של היסודות בכל אחד משני אברי הפרי, עבור כל מועדי הדיגום בטיפולים 1-7 מוצגים בטבלה 4.

ריכוזי יסודות רעילים בפרי הפלפל:

כאמור, הפלפל גודל על קומפ' בוצה ועל קז"ב, בעומסי יישום בין 5 (העומס המסחרי) ל-40 מ"קד' (טבלה 1). העומס הגבוה ניתן בתעלת הזנה או בערבוב בכל נפח הקרקע בערוגה. ריכוזי עופרת וארסן בציפת הפרי ובזרעים, בכל הטיפולים, היו מתחת לסף הגילוי של שיטת הבדיקה (0.5 ו-0.3 מ"גק"ג ח"י, בהתאמה) (טבלה 4). בטיפולים 1-7 ריכוזי קדמיום היו גבוהים יותר בזרעים (0.18 ± 0.02 מ"גק"ג ח"י; ממוצע וטעות תקן) מאשר בציפת הפרי (0.12 ± 0.02 מ"גק"ג).

טבלה 4 : תכולת יסודות בציפת פרי הפלפל ובזרעים בכל המדגמים מהניסויים ב"תחנת צבי" ובגידול המסחרי בקומפוסטים¹.

Element (mg/kg d.w.)	זרעים		ציפת הפרי		Prob > F	²DL	²QL	ערך מרבי מותר ⁴
	Avg	SEM	Avg	SEM				
Ag	³BDL					0.06		
Al	6 b	1	59 a	9	<0.0001			
As	BDL					0.28	0.84	5-16
B	30	4	33	5				
Ba	1.1	0.1	1	0.1				
Ca	760 b	90	1,550 a	220	<0.0001			
Cd	0.18 a	0.02	0.12 b	0.02	<0.01			0.8
Co	0.47 a	0.05	0.35 b	0.05	<0.06			
Cr	0.31 b	0.04	0.54 a	0.08	<0.001			
Cu	22 a	3	13 b	2	<0.0001			
Fe	76	9	72	10				
K	12,500 b	1,500	43,400 a	6,100	<0.0001			
Li	0.14 b	0.02	0.49 a	0.07	<0.0001			
Mg	5,200 a	600	2,600 b	360	<0.0001			
Mn	39 a	5	22 b	3	<0.0001			
Mo	0.57 b	0.07	0.89 a	0.12	<0.0001			
Na	75 b	9	190 a	30	<0.0001			
Ni	1.1 b	0.1	1.9 a	0.3	<0.0001			
P	10,800 a	1,255	4,900 b	689	<0.0001			
Pb	BDL					0.06	1.4	0.8
S	4,115 a	478	3,162 b	443	<0.0001			
Se	BDL							
Si	-		-					
Sr	5 b	1	6 a	1	<0.01			
Ti	0.13 b	0.02	0.39 a	0.05	<0.01			
V	0.07	0.01	0.06	0.01				
Zn	55 a	6	32 b	4	<0.0001			

¹ בניסוי ב"תחנת צבי" נבדק ריכוז היסודות ב-6 מועדי דיגום במהלך 2012. בניסוי בתומר נבדקה רק ציפת הפרי ב-8 מועדי דיגום במהלך העונה. ב-2 האתרים היו 4 חזרות בכל טיפול, ובכל חזרה נבדקו 4-6 פלפלים. ²DL-סף הגילוי, BDL-מתחת לסף הגילוי, QL-סף הכימות; ³ בדאה הערה 2 טבלה 3.

ריכוזי יסודות חינוכיים ואחרים בפרי הפלפל:

מבין היסודות האחרים שנבדקו, ריכוז 8 מהם (זרחן, מגניון, גפרית, אבץ, מנגן, נחושת וקובלט) היה גבוה יותר (במובהק) בזרעים מאשר בציפה, וריכוז 10 מהיסודות (אשלגן, סידן, מוליבדן, ניקל, נתרן, אלומיניום, סטרונציום, כרום, ליתיום וטיטניום) היה גבוה יותר במובהק בציפה מאשר בזרעים (טבלה 4). ריכוזי בורון, ברזל, בריום וונדיום היו דומים בשני אברי הפרי.

השפעת סוג הזבל על תכולת היסודות בפרי:

נבחנה ההשפעה של טיפולי קומפ'י זבל הבקר (טיפולים 2 ו-3) בהשוואה לאלה של טיפולי קומפ'י הבוצה (4-7) ובהשוואה להיקש ללא כל תוספת (טיפול 1). בטיפולי קומפוסט הבוצה נבדקו ריכוזי היסודות בציפת הפרי בשלושה מארבעת הטיפולים, ובזרעים הם נבדקו ב-4 הטיפולים, כולם בעומס 40 מ"קד'. בטיפולי הקז"ב, הנתונים בציפה הם רק מטיפול 2 (5 מ"קד' לשנה כל שנה), מאחר שעקב תקלה, הציפה בפירות מטיפול 3 (40 מ"ק קז"ב) בתעלת הזנה) לא נבדקה.

בטבלה 5 ניתן לראות כי ריכוזי 7-8 יסודות בציפה ובזרעים נבדלו באופן מובהק בין טיפולי קומפוסט אחד לפחות לבין ההיקש ללא זבל. שני הקומפוסטים הגדילו את ריכוזי הזרחן והאבץ בציפה ובזרעים (אבץ בציפה רק בקומפ'י הבוצה, ובזרעים - על גבול המובהקות), והגדילו את ריכוזי המוליבדן והמגניון בזרעים. בהיקש, ריכוזי בורון ובריום בזרעים וליתיום בזרעים ובציפה היו גבוהים במובהק בהשוואה לאחד מטיפולי הזבל או לשניהם. הזבלים לא השפיעו על ריכוזי הקדמיום בציפת הפרי, אולם ריכוזיו בזרעים היו נמוכים באופן מובהק בטיפולי זבל הבקר והבוצה (כ-0.15 מ"ג/ק"ג) בהשוואה לטיפול ההיקש ללא זבל (0.36 מ"ג/ק"ג).

השפעה טיפולי קומפוסט הבוצה על תכולת היסודות בחלקי הפרי:

להלן נבחן באופן פרטני כיצד השפיעו הטיפולים השונים בקומפוסט הבוצה (כולם בעומס 40 מ"קד') על ריכוזי היסודות בציפה ובזרעים (טבלה 6). ראשית, מוצגת ההשפעה של עיבוד הקרקע בין העונות כאשר הקומפוסט הוצנע כולו בשכבת הקרקע העליונה בערוגה. זו נבחנה בטיפולים 6 (ללא עיבוד) ו-7 (עם עיבוד), שהועמדו לקראת עונת 2010/11, שקדמה לעונת הדיגום. עיבוד הקרקע בין העונות הגדיל באופן מובהק סטטיסטית את הריכוזים בציפה של 6 יסודות (אבץ, אלומיניום, גפרית, ליתיום, מוליבדן וניקל), והקטין באופן מובהק סטטיסטית את הריכוזים בזרעים של 2 יסודות (ליתיום ונתרן) (טבלה 6-א').

קומפוסט הבוצה יושם בתעלות הזנה לקראת עונת 2010/11 (טיפול 5) ולקראת עונת 2011/12 (טיפול 4). ריכוזי ליתיום, מנגן, נחושת, ניקל וקובלט בזרעי הפירות בטיפול 4 היו גבוהים מאשר בטיפול 5 (טבלה 6-ב'). עקב תקלה בטיפול 4 לא נבדקו ריכוזי היסודות בציפת הפרי.

השוואה נוספת הנה בין יישום הקומפוסט בתעלת הזנה (טיפול 5) לבין יישומו בערבוב מלא בקרקע בערוגה (טיפול 6). היישום היה ב-2010, בעונה שקדמה לעונת דיגום הפירות, וללא עיבודים הקרקע בין העונות. ניתן לראות (טבלה 6-ג'), כי בגידול על קומפ'י הבוצה שעורבב עם הקרקע בערוגה ריכוזי הנחושת, הבריום והסטרונציום בזרעים היו גבוהים יותר מאשר בגידול על בוצה בתעלת ההזנה. לעומת זאת, בציפת הפרי ריכוזי כל היסודות היו דומים ב-2 הטיפולים.

טבלה 5: השפעת סוג הזבל על ריכוז היסודות בציפת פרי הפלפל ובזרעים בטיפולי קז"ב, קומפ' בוצה והיקש ללא תוספת. ממוצע של כל המדגמים מהניסויים ב"תחנת צבי" ובגידול המסחרי. מוצגים רק יסודות בהם נמצא הבדל מובהק בין הטיפולים. דירוג הטיפולים נעשה במבחן תחום מרובה Tukey-Kramer HSD.

יסוד	ללא תוספת	קומפ' בוצה	קז"ב	Prob > F
ציפת הפרי				
Co	0.45 a	0.23 b	0.49 a	<0.0001
Li	1.30 a	1.00 b	0.73 c	<0.0001
Mo	0.6 b	1.0 a	1.0 a	<0.05
Na	139 b	217 a	185 ab	<0.05
P	3,902 b	5,498 a	4,917 a	<0.001
Sr	7 ab	5 b	9 a	<0.001
Zn	26 b	38 a	27 b	<0.001
זרעים				
B	38 a	27 b	32 ab	<0.01
Ba	1.84 a	0.85 b	1.19 b	<0.0001
Cd	0.36 a	0.14 b	0.16 b	<0.0001
Li	1.19 a	1.01 ab	0.86 b	<0.01
Mg	4,793 b	5,303 a	5,277 a	<0.01
Mo	0.22 c	0.55 b	0.83 a	<0.0001
P	9,538 b	11,204 a	10,793 a	<0.0001
Zn	50 b	57 a	52 b	<0.05

טבלה 6: השפעות של טיפולי קומפוסט הבוצה על תכולת יסודות בפרי הפלפל

Element (mg/kg)	זרעים			ציפת הפרי		
	(א) השפעת עיבוד בין העונות : ללא (#6), עם (#7)					
	#6	#7	Prob > F	#6	#7	Prob > F
Al				98a	32b	<0.01
Li	0.11b	0.88a	<0.05	0.44a	0.27b	<0.05
Mo				1.2a	0.8b	<0.05
Na	62b	88a	<0.05			
Ni				2.6a	1.3b	<0.05
S				3,370a	2,740b	<0.05
Zn				1.21a	0.83b	<0.05
(ב) השפעת משך השהייה של קומפ' הבוצה בערוגה : עונה ראשונה (#4) לעומת עונה שנייה (#5)						
	#4	#5	Prob > F			
Co	1.6a	0.2b	<0.001			
Cu	232a	17b	<0.01			
Li	0.20a	0.11b	<0.001			
Mn	53a	38b	<0.001			
Ni	23a	17b	<0.01			
(ג) השפעת צורת היישום של קומפ' הבוצה : תעלה (#5) לעומת ערוגה (#6)						
	#5	#6	Prob > F			
Ba	0.7b	1.2a	<0.01			
Cu	19b	22a	<0.05			
Sr	2.6b	5.0a	<0.01			

המחקר הנוכחי היה חלק ממחקר רחב יותר על שימוש בקומפוסטים כאמצעי להפחתת עיבודי קרקע בבתי צמיחה פלפל ושימוש בו כמצע חלופי לקרקע (ציפילביץ', 2012). המטרה העיקרית בחלק זה של המחקר הייתה לבחון האם יישום קומפוסט בוצת שפכים בעומסים גבוהים (40 מ"קד') למטרה זאת יגרום לצבירת יתר של יסודות רעילים (עופרת, קדמיום, ארסן) ויסודות אחרים בפרי. במחקר נבדקה גם השפעת קומפוסט זבל בקר. יישום הזבלים היה בערבוב בקרקע בערוגה או כמילוי של תעלות הזנה. תעלות הזנה מהוות תחליף לקרקע, באזורים של קרקע זיבורית, והן מייצרות את הצורך בעיבוד הקרקע בין העונות. הייחוד של תעלות ההזנה מבחינת יעילות הקליטה הוא בכך שמרבית שורשי הצמחים נמצאים בקומפוסט עצמו (ציפילביץ', 2012), ומקובל להניח כי התכולה והזמינות של מרבית היסודות, כולל יסודות רעילים, הזנה ואחרים, תהיה גבוהה מאשר בקרקע עצמה ואף תגדל עם הזמן עקב התפרקות החומר האורגני (McBride, 1995). לעומת זאת, ערבוב של קומפוסט הבוצה עם קרקע (בקרקע החרסיתית של הבקעה יותר מאשר בקרקעות החול בערבה) מאפשר ספיחה של המתכות ושקיעתן, והקטנה משמעותית של זמינותן לצמח. טיפולי ההיקש כללו גידול בקרקע עצמה, והשפעה של הימנעות מעיבוד הקרקע בין עונות גידול.

הטיפולים העיקריים במחקר הנוכחי היו (א) סוג הקומפוסט (בוצה או קז"ב), (ב) אופן יישומו (בקרקע או בתעלה), (ג) משך שהייה של קומפוסט הבוצה בתעלה (טרי או משנה קודמת), ו-(ד) עיבוד בין העונות עם קומפוסט מוצנע בקרקע. כאמור, בחלק זה של המחקר בחנו את ההשפעה של הטיפולים רק על תכולת יסודות בחלקי הפרי. ההשפעות בהיבטים אחרים נדונו ע"י פליק וחוב' (2013) וציפילביץ' וחוב' (2012; 2013; 2015). הואיל ומגוון הטיפולים כולו לא ניתן היה לבדיקה בתחנת "צבי" עצמה, חלק מהטיפולים בוצעו בשטחים מסחריים. אלה היו: טיפול 3 (40 מ"קד' קז"ב בתעלות הזנה), טיפול 4 (40 מ"קד' קומפוסט בוצה בתעלות הזנה). הפיצול עלול להוות קושי בהשוואה בין תוצאות הטיפולים. עם זאת, בגידול בתעלות הזנה, השורשים מצויים בקומפוסט עצמו (ציפילביץ' וחוב', 2012). בנוסף, הפלפל בכל הניסויים היה מאותו זן, וממשק הגידול היה דומה. לפיכך הנחנו כי ניתן להשוות את תוצאות עבור טיפולים שבוצעו בתעלות הזנה גם בין אתרי ניסוי שונים. פירות נדגמו במהלך העונה כולה, ותכולת היסודות נבדקה בנפרד בציפת הפרי ובזרעים. הייתה השתנות עונתית בריכוזים במרבית היסודות, אולם הנתונים שהוצגו כאן הם הממוצעים של כל החזרות מכל הדיגומים במהלך העונה בכל אחד מהטיפולים. באופן חד-משמעי, הזבלים לא היוו מקור ליסודות הרעילים, וכספית אף פטורה מבדיקה מלכתחילה מאחר שריכוזיה בזבלים (ובצמחים) הנם אפסיים. ריכוזי ארסן ועופרת היו תמיד מתחת לסף הגילוי (שהנו כשלעצמו נמוך בכ- 1-2 סדרי גודל מהריכוז המרבי המותר בפלפל). ריכוזי קדמיום בחלקי הפרי בגידול על קומפ' הבוצה ועל הקז"ב (ממוצעים לכל החזרות בטיפולים בתחנת 'צבי') היו דומים או אף נמוכים מהריכוזים בגידול בממשק המסחרי (5 מ"ק קומפ' זבל בקר בקרקע כל שנה) או בהשוואה לגידול על קרקע ללא זבל כלל (טבלה 4). הריכוז בציפת הפרי (0.12 מ"ג/ק"ג) היה דומה בכל הטיפולים, ונמוך משמעותית מערך המרבי המותר בפלפל (0.8 מ"ג/ק"ג ח"י). לעומת זאת, הריכוז בזרעים של טיפולי קומפ' הבוצה (0.14 מ"ג/ק"ג) היה פחות ממחצית הריכוז בטיפול ההיקש בקרקע ללא זיבול (0.36 מ"ג/ק"ג; מובהק סטטיסטית; טבלה 5). לפיכך, המחקר הראה באופן ברור וחד-משמעי כי אין כל סיכון של קליטת יסודות רעילים בפרי הפלפל (ציפה וזרעים) בגידול על קומפוסט בוצה, גם כאשר בגידול ישיר בקומפוסט הנקי בתעלות הזנה.

התוצאה אינה מפתיעה, שכן עופרת וקדמיום (ויסודות קטיוניים אחרים) יוצרים משקעים קשי-תמס מאד עם זרחות וסולפידים המצויים בשפע בזבלים, כך שגם אם תכולתם הכללית יכולה להיות גבוהה, מסיסותם וזמינותם לצמח תהיה נמוכה מאד בעיקר כשה-pH של המדיום הנו בסיסי (Basta et al., 2005; Lindsay, 2001; Hass et al., 2011). המסיסות של ארסן, ושל יסודות אוקסיאניוניים אחרים (כגון בורון, מוליבדן, כרום, סלן, קובלט) עולה עם העלייה ב-pH, אולם אלה נספחים בחוזקה לפני שטח של אוקסידים של ברזל, מנגן ואלומיניום (Lombi et al., 2002; Brinton and O'Connor, 2000) המצויים אף הם בקומפוסטים, בבוצות ובקרקע (טבלה 4), וכן לחומר האורגני המוצק והמומס (Yermiyahu et al., 2001; Kot et al., 2012). ישנן גם השפעות

ייחודיות על הקליטה, כמו עיכוב קליטת קדמיום ע"י אבץ, עיכוב ספציפי של קליטת ארסן בשורשי הצמח ע"י זרחה, עיכוב קליטת ליתיום ע"י אשלגן, ועיכוב קליטת מוליבדן ע"י גופרה. כל אלה מתרחשים בגלל הדמיון הכימי בין המרכיבים בזוגות, בגלל העודף הגדול בריכוז של היון הדומיננטי, ובגלל העדר מנגנוני קליטה ספציפית ליון הבלתי חיוני מבין השניים.

בדומה לממצאים שלנו, Ozores-Hampton et al. (2005) לא מצאו שינוי בריכוזי יסודות (קדמיום, נחושת, עופרת, ניקל) בציפת פרי פלפל שגודל בקרקע חולית שקיבלה תוספים אורגניים שונים במהלך 9 שנים רצופות (מהן 4 שנים של יישום בוצה בעומסי 4-5 ט"ד). זאת למרות שהייתה עלייה בריכוזיהם בקרקע. יתרה מזאת, Baldantoni et al. (2010) מצאו ירידה בריכוזי קדמיום בפרי עגבניה ובחלקים וגטיביים של בצל ושומר שגדלו בחלקות שקיבלו קומפוסט אשפת ערים במשך 7-9 שנים בהשוואה להיקש ללא זיבול. בנוסף הייתה ירידה גם בריכוזי אבץ, מנגן, ברזל ונחושת. במקרה אחד, ריכוזי קדמיום בפרי העגבנייה בטיפול ללא דשן לאחר 7 שנים היה גבוה פי 9 מהריכוז המרבי המותר ע"פ תקנות הקהילה האירופית (EU Regulations no. 488/2014). הסיבות העיקריות לירידה דווקא בריכוזי מתכות קטיוניות בחלקי הצמח בהשפעת זיבול מתמשך בהשוואה להיקש ללא זיבול היא (א) תכולה נמוכה יחסית של היסודות הללו בזבלים, (ב) השפעת מרכיבי הקרקע (כגון חרסית ו-pH) על זמינות היסודות באמצעות ספיחה ושקיעה, (ג) השפעת הזבל עצמו כגורם המשכך את זמינות המתכות הללו בקרקע, הן באותם מנגנונים דלעיל והן עקב הגדלה של מספר האתרים הסופחים וצפיפותם עקב פירוק החומר האורגני (Basta et al., 2005; Brown et al., 1998). המנגנון האחרון נוגד מנגנון אחר, המקובל גם הוא בספרות, כי פירוק הקומפוסט יגרום לשחרור של מתכות ולהעלאת זמינותן לצמח (McBride, 1995). נראה כי למנגנון האחרון לא הייתה השפעה במערכת הנבדקת, אם בכלל יש לכך משמעות בזבלים שהנם דלים יחסית במתכות (Basta et al., 2005). כך לדוגמה, הס (2002) בחן את זמינות המתכות הכבדות מבוצת חיפה במהלך 3 שנות הדגרה ב-7 קרקעות, והראה כי למרות שתכולת החומר האורגני בקרקעות ובבוצה עצמה ירדה בכ- 30%-50% הזמינות הפוטנציאלית לצמח של המתכות הללו פחתה והלכה. כך גם יישום קומפי' הבוצה בתעלת ההזנה במשך שנה (טיפול 5) התבטא בהקטנת הריכוז בזרעים של 5 יסודות קורט בהשוואה לגידול על קומפי' בוצה טרי (טיפול 4; טבלה 6-ב). הדבר יכול אולי להעיד על הקטנת הזמינות של יסודות אלה בבוצה למרות ההתפרקות הרבה יותר של המרכיב האורגני. בדומה, ניתן היה להניח כי יישום 40 מ"קד' קומפי' בוצה בתעלת הזנה יגדיל קליטת יסודות בחלקי הפרי בהשוואה ליישום הקומפוסט בקרקע. בפועל, לאופן היישום של הקומפוסט הייתה השפעה מזערית, ויישום בתעלה הגדיל את הריכוז בזרעים של 3 יסודות בלבד (טבלה 6-ג).

בממוצע לכל הדיגומים, ריכוזי תשעה מהיסודות שנבדקו היה גבוה יותר בציפת הפרי מאשר בזרעים (כולל סידן, אשלגן, מוליבדן, נתרן, כרום וניקל), ריכוזי שמונה אחרים היה גבוה יותר בזרעים (נחושת, מגניון, מנגן, זרחן, גפרית, אבץ, קדמיום וקובלט), וריכוזי שלושה יסודות היה דומה ב-2 האיברים (בורון, ברזל וונדיום) (טבלה 4). היישום הכבד של קומפי' הבוצה וואו הקז"ב השפיע באופן מובהק סטטיסטית על הריכוזים בחלקי הפרי של 10 יסודות בהשוואה לטיפול ההיקש ללא זבל. מחד גיסא, הזבלים גרמו לירידה בריכוזי הליתיום, הקובלט והסטרונציום בציפה, ולירידה בריכוזי הליתיום, הבורון והבריום (וכאמור גם הקדמיום) בזרעים (טבלה 5). מאידך גיסא, הם גרמו לעלייה בריכוזי הזרחן, המגניון, האבץ והמוליבדן בזרעים. העלייה בריכוזים בפרי של יסודות חיוניים הנה צפויה בגלל העלייה בזמינותם במצע הגידול, אולם פחות צפויה, לכאורה, הייתה הירידה בריכוזי יסודות כגון בורון וליתיום. הירידה בריכוז הבורון בטיפול הזבל האורגני בהשוואה לגידול בקרקע יכולה להיות מוסברת גם בכך שריכוזו בקרקע היה גבוה מאשר במצע הגידול (טבלה 3) וזאת בנוסף למנגנונים שהוזכרו לעיל. קליטת ליתיום מעוכבת ע"י אשלגן, הנמצא בעודף רב בקומפוסטים, מה שיכול להסביר את הירידה בריכוזיו בפירות בטיפול הזיבול.

לבסוף, עיבוד הקרקע בין עונות הגידול יוצר מצע שתילה אחיד ונוח, ומשפר את יעילות ההדברה של מחלות ומזיקים שוכני קרקע. אחת המטרות המשניות של המחקר הייתה לבחון האם יישום כבד (40 מ"קד') של קומפוסט בוצה בערבוב בכל נפח הקרקע בערוגה מייתר את העיבוד, ובמסגרת הנוכחית נבדקה ההשפעה רק על

- Baldantoni, D., A. Leone, P. Iovieno, L. Morra, M. Zaccardelli, and A. Alfani. 2010. Total and available soil trace element concentrations in two Mediterranean agricultural systems treated with municipal waste compost or conventional mineral fertilizers. *Chemosphere*, 80(9): 1006-1013.
- Basta, N.T., J. A. Ryan, and R. L. Chaney. 2005. Trace Element Chemistry in Residual-Treated Soil: Key Concepts and Metal Bioavailability. *J. Environ. Qual.* 34: 49–63.
- Brinton, S.R., and G.A. O'Connor. 2000. Factors affecting molybdenum sorption in soils: Potential biosolids effects. *Soil Crop Sci. Soc. Florida Proc.* 59: 117–123 (cited by Basta et al., 2005).
- Brown, S.L., R.L. Chaney, J.S. Angle, and J.A. Ryan. 1998. The phytotoxicity of cadmium to lettuce in long-term biosolids-amended soils. *J. Environ. Qual.* 27: 1071–1078.
- EU No 488/2014: Commission Regulation of 12 May 2014 amending Regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels of cadmium in foodstuffs.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A32014R0488>
- Hass, A., U. Mingelgrin and P. Fine. 2010. Chapter 7. Heavy Metals in Soils Irrigated with Wastewater, pp 247-285 in Guy J. Levy, Pinchas Fine, and Asher Bar-Tal (Eds.) *Treated Wastewater in Agriculture: Use and Impacts on the Soil Environment and Crops*. Blackwell Publishing Ltd.
- Kot F. S., Farran R., Kochva M., Shaviv A. 2012. Boron in humus and inorganic components of Hamra and Grumosol soils irrigated with reclaimed wastewater. *Soil Research* 50: 30-43.
- Lindsay, W.L. 2001. *Chemical equilibria in soils*. The Blackburn Press, Caldwell, NJ.
- Lombi, E., F. Zhao, G. Zhang, B. Sun, W. Fitz, H. Zhang, and S.P. McGrath. 2002. In situ fixation of metals in soils using bauxite residue: Chemical assessment. *Environ. Pollut.* 118: 435–443.
- McBride, M.B. 1995. Toxic Metal Accumulation from Agricultural Use of Sludge: Are USEPA Regulations Protective? *Journal of Environmental Quality*, 24: 5-18
 DOI: 10.2134/jeq1995.00472425002400010002x
- Ozores-Hampton, M., P.A. Stansly and T.A. Obreza. 2005. Heavy metal accumulation in a sandy soil and in pepper fruit following long-term application of organic amendments. *Compost Science & Utilization*, 13(1): 60-64.
- Silber Avner, Jaacov Ben-Jaacov, Alexander Ackerman, Asher Bar-Tal, Irit Levkovitch, Tania Matsevitz-Yosef, Dvora Swartzberg, Josef Riov and David Granot. 2002. Interrelationship between phosphorus toxicity and sugar metabolism in *Verticordia plumosa* L. *Plant and Soil* 245: 249–260, 2002.
- Yermiyahu, U., R. Keren, and Y. Chen 2001 Effect of Composted Organic Matter on Boron Uptake by Plants. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1436–1441.