



תכנית מחקר מקיפה בנושא:

## בחנית שימושים חקלאיים באפר פחם מרחף

מוגשת למנהלת אפר הפחם ע"י

פנחס פיין, אורי נחשון ושחר ברעם

המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מרכז וולקני

עמ'	תוכן העניינים	תקציר	
2		תקציר	1
2		סיכום הצעת המחקר והפיתוח והתקציב המבוקש	2
3		תכנית מחקר מפורטת	3
3	הערך החקלאי של במס"א והשפעתה על נגר וסחף בשדות חקלאיים	3-א	
3	הדברה של מחלות שוכנות-קרקע בגידול חסה	3-ב	
5	ההתנהגות הכימית של זרחן בבמס"א ובתערובות במס"א-קרקע	3-ג	
6	סילוק זרחן משפכי רפתות (מכון החליבה) באמצעות אפ"מ	3-ד	
7	העמסה (biofortification) של גידולי בוחן בסלן ומוליבדן	3-ה	
8		סקירה טכנו-מדעית	4
8	הערך החקלאי של במס"א והשפעתה על נגר וסחף בשדות חקלאיים	4-א	
8	השפעה על יבול גידולים חקלאיים	4-א-1	
9	תכולה של מתכות כבדות ויסודות בלתי רצויים אחרים	4-א-2	
11	השפעת אפ"מ על זמינות יסודות קורט חיוניים לגידולים	4-א-3	
11	בורון בקרקעות ביישום במס"א ואפ"מ	4-א-4	
12	דליפת יסודות קורט למי התהום ביישום במס"א ואפ"מ	4-א-5	
13	השפעה על תכונות פיסיקליות של קרקעות	4-א-6	
14	הדברה של מחלות שוכנות-קרקע	4-ב	
15	השפעת במס"א ואפ"מ על ההתנהגות הכימית של זרחן הבוצה והקרקע	4-ג	
16	סילוק זרחן משפכי רפתות באמצעות אפ"מ	4-ד	
17	biofortification בסלן ומוליבדן	4-ה	
17	סיכום סקירת הספרות והצגת תכנית העבודה	4-ו	
17		ספרות מצוטטת	5

## **1 תקציר**

אפר פחם מרחף (אפ"מ) משמש בתהליך פסטור בוצת השפד"ן (המוצר הנו בוצה מיוצבת בסיד ובאפ"מ או במס"א). הנהלת 'איגודן' הפסיקה את ייצור הבמס"א באוגוסט 2016 אך נאלצה לחדשו בינואר 2017, בהיקף המרבי שהמתקן מאפשר, עקב העיכוב המתמשך בהפעלת המעכלים האל-אווירניים החדשניים. האפשרות לטפל בבוצה באפ"מ ובסיד נבחנת בימים אלה ע"י הרשויות בבאר-שבע עקב התמוטטות המעכלים האל-אווירניים במט"ש. במס"א מוספת לקרקעות חקלאיות, וכמו לכל תוסף לקרקע, יש לה (ולאפ"מ) יתרונות וחסרונות פוטנציאליים, חקלאיים וסביבתיים. להערכתנו (הדס וחוב', 2016) התועלת (תוספת הכנסה לחקלאי משוקללת לדונם) עולה משמעותית על עלות נזקים אפשריים (כ-124 נא"ד לעומת כ-22 נא"ד, בהתאמה). במס"א מחליפה דישון כימי, מפחיתה מחלות צמחים שוכנות-קרקע, משפרת תכונות פיזיקליות של קרקעות בעייתיות ועוד. אפ"מ ובמס"א עשויים לשפר מאד את הקומפוסטציה של בוצות זבלים, ולספק לקרקע יסודות חיוניים לצמח (סידן, מגניון, גפרית) שנגרעו ממנה עקב המעבר להשקיה במים מותפלים. אפ"מ גם יכול לשמש לסילוק זרחן וחומר אורגני ממי-השפכים של רפתות. הנזק העיקרי מבמס"א הנו מהמוניטין השלילי של מרכיב האפ"מ בעיני הרגולטור, כפי שהדבר מתבטא בעיקר בייחוס של העמסת מתכות כבדות ויסודות רדיואקטיביים בקרקע מהבמס"א, אך גם בתוספת בורון וארסן מסיסים לקרקע, ובהקטנה זמינות הזרחן ויסודות קורט חיוניים.

מנהלת אפר הפחם החליטה לשמר ולשפר את היכולת המחקרית בתחום ייצור במס"א, שימושיה והשפעותיה הסביבתיות, בהקשר ליישומה (ויישום אפ"מ) בחקלאות. הצעת המחקר ליישום הנוכחית מיועדת להעמיק את הידע וההבנה של ההשפעות החקלאיות והסביבתיות הכרוכות ביישום במס"א ואפ"מ, ולהרחיב את הצע השימושים המועילים בהם. היא באה גם על רקע הפרישה של דר' פ' פיין לגמלאות והנכונות שלו לסייע ל-2 חוקרים צעירים להשתלב במחקר בתחום.

## **2 סיכום הצעת המחקר והפיתוח והתקציב המבוקש**

המחקר המוצע יעסוק בבחינה ובביסוס הידע על תועלות ונזקים אפשריים בתחומים שלהלן:

(א) הערך החקלאי של במס"א: זמינות בקרקע וקליטה בצמחי בוחן של יסודות עיקריים (חנקן, זרחן, אשלגן, סידן, מגניון וגופרית), יסודות קורט, אוקסיאניונים, מתכות כבדות ויסודות רדיואקטיביים, והשפעתה על מבנה הקרקע ועל רגישותה לסחף:

בחלק הראשון של נושא זה הגענו להשגים משמעותיים, ובמס"א הנה תחליף מבוקש לדשן כימי, וכל תפוקתה נצרכת ע"י חקלאים. נרצה להמשיך בבחינה רב-שנתית של הנושא.

השפעת במס"א על מבנה הקרקע ועל רגישותה להיווצרות נגר וסחף טרם נלמד.

(ב) הדברה של מחלות שוכנות-קרקע מקבוצת הפטריות (פוזריום אוקסיספורום בגידול חסה):

זהו נושא חדשני שפותח על-ידנו והגענו בו להשגים משמעותיים. הוא עדיין לא הבשיל לכדי יישום מסחרי, אך נראה כי הדבר הנו בהישג יד.

(ג) ההתנהגות הכימית של הזרחן בבמס"א עצמה ובקרקע:

עיקר ההתנגדות לשימוש בבמס"א מצד מדריכים חקלאיים היא החשש שהיא תקטין זמינות זרחן ויסודות קורט לגידולים בגלל ה-pH הגבוה מאד של התוסף. הנושא

נבדק בהרחבה בניסויי שדה רבים שביצענו ונמצא מופרך אולם יש לבסס את הידע בהבנת המנגונים המבטיחים את הזמינות של יסודות אלה.

(ד) סילוק זרחן וחומר אורגני משפכי משק החי באמצעות מסננים על בסיס אפ"מ, ומיחזור המסנן המשומש לטיוב קרקעות:

שימוש באפ"מ עשוי להפחית עלויות סילוק השפכים אולם יש את הייתכנות הטכנולוגית והסביבתית.

(ה) הגדלת התכולה של סלן ומוליבדן (biofortification) בצמחי מאכל (חיטה ותיירס) ומרעה (בקיה-תלתן) באמצעות אפ"מ ובמס"א כתחליפים ליישום של מלחי יסודות אלה;

נושא משמעותי בהזנת האדם ובע"ח, ונוגד את החשיבה המקובלת במשרד להגה"ס כי אפ"מ מזיק לסביבה. עם זאת, הגדלה בזמינות לצמח של סלן ומוליבדן מאפ"מ יכולה להשפיע גם על אוקסיאניונים אחרים, רצויים פחות (ארסן,בורון).

בכל הניסויים שיכללו צמחים תיבדק בהם תכולת המתכות הכבדות כחלק מהדיווח במסגרת "דרישות מסמך גרוטו". סקר נרחב של הממצאים שלנו עד כה על רקע הספרות הכללית בנושא מוצג בהמשך בפרק "סקירה טכנו-מדעית".

### 3) תכנית מחקר מפורטת

(3-א) הערך החקלאי של במס"א והשפעת במס"א ואפ"מ על נגר וסחף בשדות חקלאיים:

בשנים 2011-2015 בוצע ניסוי שדה ברבדים לבחינה השוואתית של זבלים שונים בהחלפת דשן כימי, ולבחינת ההשפעה על ההרכב הכימי של הצמחים והקרקע וההשפעה הסביבתית (פיין וחוב', 2014-א'; ראה הטיפולים בטבלה להלן).

**טבלה:** הטיפולים המקוריים בזבלים בניסוי השדה ברבדים בשנים 2011-2015. יישום הזבלים היה במנה שהוסיפה לקרקע 50 ק"ג חנקן כללי לדונם (המינון השנתי המרבי המותר) או מנה גדולה פי שלוש. הטיפול במנה הרגילה היה עם וללא תוספת חנקן בדשן במהלך עונת הגידול.

#	טיפול	דשן/זבל מנה ביסוד	דשן ראש	#	טיפול	דשן/זבל מנה ביסוד	דשן ראש
1	ללא דשן	ללא	ללא	9	בוצה מעוכלת	-	ללא
2	דשן יסוד בלבד	מסחרי	ללא	10	קומפ' בוצה	-	ללא
3	דשן ראש בלבד	ללא	מסחרי	11	במס"א	-	ללא
4	דישון מלא	מסחרי	מסחרי	12	קומפ' אשפה	-	ללא
5	בוצה מעוכלת	50 ק"ג N\ד	מסחרי	13	בוצה מעוכלת	150 ק"ג N\ד	ללא
6	קומפוסט בוצה	-	מסחרי	14	קומפ' בוצה	-	ללא
7	במס"א שפד"ן	-	מסחרי	15	במס"א	-	ללא
8	קומפ' אשפה	-	מסחרי	16	קומפ' אשפה	-	ללא

מוצע לחדש את הניסוי בחלק מהטיפולים (שאינן מואפלים) בדגש על בדיקה ארוכת טווח של ההשפעות הסביבתיות של במס"א. במס"א תינתן במנה המרבית המותרת (לפי 50 ק"ג חנקן כללי לדונם) ובכמות גדולה פי שלוש. בכל גידול במחזור תיבדק השפעת הבמס"א והאפ"מ על ההרכב הכימי של הצמחים ושל הקרקע. בנוסף, תיבדק השפעת התוספים על תכונות פיסיקליות של הקרקע (יציבות התלכידים ורגישות לנגר ולסחף) בהשוואה לבוצה מעוכלת (כגון, בוצת השפד"ן) ולטיפולי היקש ללא דשן כלל ועם דשן מלא (טיפולים 1, 4, 5, 7, 9, 11, שאינם מואפלים). היישום יהיה בכל שש החלקות הקיימות בכל אחד מהטיפולים ובהם ייבדקו המדדים הכימיים בצמח ובקרקע, כולל התכולה בצמחים של היסודות המנוטרים ורדיונוקלידים ורדיואקטיביות (באמצעות השירות הגיאולוגי והכור בשורק).

בדיקות נגר וסחף יבוצעו ב-4 מהחזרות. לשם כך, תוקמנה חלקות נגר בגודל של 3 מ"ר בערוגה המרכזית (מבין שלוש) ב-4 מהחלקות של הטיפולים הנבחרים. במהלך החורף לאחר כל סופת גשם, ימדדו שיעורי הנגר והסחף. דגימות נגר וסחף יאספו וייקבעו בהן ערכי ה-pH וה-EC, וריכוזי DOM, K, Na, Ca, Mg, צורוני הזרחן והחנקן וריכוזי יסודות קורט ומתכות כבדות בדגש על בורון וארסן. בסחף תיבדק תכולת חומר אורגני (כמדד לסחיפת הבוצה) ותכולת היסודות (סריקה ב-ICP לאחר עיכול הדוגמה בח' חנקתית). לפני ולאחר כל חורף יילקחו דוגמאות קרקע בלתי מופרות מן החלקות השונות לבחינת יציבות תלכידים (בשיטת HEMC; לוי, 2012) ותכונות הידראוליות ופיזיקליות בסיסיות של הקרקע.

**(3-ב) הדברה של מחלות שוכנות-קרקע (פוזריום אוקסיספורום לקטוקה) בגידול חסה:**

הנושא נבדק בקרקעות חוליות בצפון-מערב הנגב ובשרון ונמצא יעיל. הפעם ייבחר שדה הידוע כמאולח בפאתוגן בקרקע סיינית. לאימות תיבדק רמת המדבק בקרקע (על מצע Czapek סלקטיבי לפוזריום). טיפולי ההדברה יהיו בקיץ 2017. החלקות תהיינה בגודל כ-120 מ"ר כל אחת (1.93x3x20) ב-6 בלוקים, ופיזור הבמס"א יהיה ידני. טיפולי ההדברה יהיו כלהלן:

	טיפולים	במס"א ('ט/ד')	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ('ט/ד')	חיפוי פלסטיק
1	ביקורת ללא תוספת	-	-	-
2	ביקורת עם חיפוי פלסטיק	-	-	+
3	מסחרי (אדיגן)			
4	במס"א, אמוניום מינון נמוך, פלסטיק	pH	0.36	+
5	במס"א, אמוניום מינון גבוה, פלסטיק	pH	0.18	+
6	במס"א, ללא אמוניום, פלסטיק	pH	0	+

עומס הבמס"א בקרקע ייקבע בהתאם להשפעתה על ה-pH של הקרקע, והוא מוערך ב 5-9 טון/ד'. האמוניה, המרכיב הפעיל בהדברה, תינתן כאמון גופרתי. מייד לאחר היישום הקרקע תתוחח לעומק כ-20 ס"מ, מדגמים יילקחו במקדח מכל החלקות (מדגם מורכב בכל חלקה), והחלקות בטיפולים הרלוונטיים תחופינה ביריעות פלסטיק. חלקות עם וללא חיפוי תצויידנה ברשמי טמפרטורה שרגשיהם יוחדרו לעומק 15 ס"מ. לאחר שבוע יוסר הפלסטיק, והקרקע תדגם שוב. למדידת השפעת

הטיפולים על רמת המדבק בקרקע ועל מדדים כימיים. השתילה תהיה לאחר שטיפה מתאימה של הקרקע וירידה במוליכותה החשמלית. צמח הבוחן יהיה חסה מזן אייברג, ויהיה מעקב על מצב העשבייה, על הצימוח, ועל התפתחות מחלה בצמחים. בסיום יידגמו צמחים ליחידת שטח (הערכת יבול ומשקל צמח ממוצע, בריא וחולה) והצמחים ישמשו למדידה של תכולת יסודות כללית. במידת האפשר נחזור על הניסוי באותה חלקה בחורף 2017/18 לבדיקת ההשפעה השארית של הטיפול על חיוניות גורמי מחלה חורפיים ועל פוריות הקרקע. בקיץ 2018 יינתן טיפול חוזר באותה חלקה ויבדקו הפרמטרים לעיל כולל תכולת המתכות הכבדות בצמחים (במסגרת 'דרישות מסמך גרוטו').

### (ג-3) ההתנהגות הכימית של זרחן בבמס"א ובתערובות במס"א-קרקע:

הערכת ההתנהגות הכימית של הזרחן בבמס"א ובקרקע תבוצע במספר אופנים. (ג-3) מיצוי בריני עוקב: המיצוי יבוצע לפי Hedley וחוב' (1982). תיבדק במס"א טרייה ושל תערובותיה עם הקרקע מניסוי ההדברה או מניסוי הדגרה מבוקר במעבדה. תיבדקנה תערובות טריות וכאלו ששהו בקרקע במהלך הניסוי. מיצוי זה משתמש בריאגנטים שונים על מנת להמיס צורות זרחן ספציפיות, כאשר במהלך המיצוי נחשפת הבמס"א לממסים בעלי חוזק הולך ועולה שכל אחד מהם ימיס צורות ספציפיות אל תוך התמיסה, נמצא כי בשיטות אלו ניתן למצות יותר מ-80 אחוז מהזרחן הקיים בקרקע. שיטה זו משמשת להערכת זמינות הזרחן בבוצות ובזבלים שלבי המיצוי הנם כלהלן: שלב א': מוסיפים 30 מ"ל מים מזוקקים ושמים במטלטלת למשך 16 שעות, צנטריפוגה (12000 g) למשך 10 דקות- תקף לכל המיצויים להלן). הנוזל העליון יסונן במסנן  $0.45 \mu m$  (ניילון בסביבון מורכב על מזרק; תקף לכל המיצויים להלן) ויבדקו המוליכות החשמלית, החומציות, ריכוזי הפחמן המומס האורגני והלא-אורגני, ריכוז הזרחה (בריאקציית צבע) וריכוזי זרחן כללי, סידן, מגנין וגופרית (ב-ICP AES). ההנחה היא שגופרית זו הינה רובה ככולה גופרה. שלב ב': מוסיפים למבחנה 30 מ"ל מים מזוקקים עם ממברנה מחליפת אניונים בעלת שטח של  $6 \text{ cm}^2$  וטלטול למשך 16 שעות. לאחר מכן העברת הממברנה ל-20 מ"ל תמיסת HCl לטלטול נוסף של 16 שעות, לאחר סינון התמיסה בסביבון ניילון ובדיקת זרחה כנ"ל. בנוסף ייבדק זרחן כללי (לאחר עיכול בח' גופרתית מרוכזת) לקביעת הזרחן האורגני בתמיסה (תקף לכל המיצויים להלן). שלב ג': מיצוי המשקע ב-30 מ"ל תמיסת נתרן דו-פחמתי בריכוז 0.5 M, טלטול למשך 16 שעות, צנטריפוגציה, סינון התמיסה כנ"ל, ובדיקת זרחה וזרחן כולל. שלב ד': מיצוי המשקע ב-30 מ"ל תמיסת נתרן הידרוקסיד בריכוז 0.1 M, טלטול למשך 16 שעות, צנטריפוגציה, סינון התמיסה כנ"ל, ובדיקת זרחה וזרחן כולל. שלב ה': מיצוי המשקע ב-30 מ"ל חומצת מלח בריכוז 1 M בטלטול במשך 16 שעות, צנטריפוגציה, סינון התמיסה כנ"ל, ובדיקת זרחה וזרחן כולל. זרחן שאריתי הנו הפרש בין הזרחן הכללי הנבדק בדוגמה המקורית בעיכול בחומצה חנקתית מרוכזת במיקרוגל לבין סכום כמויות הזרחן שנמצאו במיצוי המבדיל.

הצורונים הכימיים השונים אשר ממומסים בשלב במיצוי הראשון (המסה במים מזוקקים) ישמשו להערכה של אופי מינרלי ההזרחן המצויים בבמס"א ותערובותיה השונות, והשתנותם כתלות בזמן. באמצעות התוכנה הגיאוכימית vminteq2A מחושבת האקטיביות של צורוני הזרחה והסידן בתמיסות, מהן מחושב קבוע מכפלת המסיסות (ה-Ion Activity Product), ונבדקת ההתאמה למסיסות של מינרלי הזרחן (לדוג' Fine and Mingelgrin, 1996).

### (3-ד') סילוק זרחן משפכי רפתות (מכון החליבה) באמצעות אפ"מ:

תבוצע סידרה של ניסויים לבחינת אצירת זרחן באמצעות מגע וריאקציה עם מרכיבי האפ"מ. הניסויים יהיו באצווה ובעמודות. בשלב ראשון ייבדקו מספר סוגי אפ"מ, וייבחרו אלה בהם עומס המזהמים ומסיסותם (לפי מיצוי ב-TCLP) תהיה נמוכה יחסית, ותכולת הסיד שלהם (בהנחה שזהו הגורם העיקרי בסילוק בזרחן) – גבוהה יחסית. הנחה נוספת היא שיהיה צורך לשפר את המוליכות ההידראולית של האפ"מ (כגון ע"י ערבובו באפר תחתית או בחול גס). המוליכות ההידראולית של תערובות האפ"מ תימדד במעבדה, ורק תערובות שמוליכותן תבטיח כי הן לא יוצפו במהלך העמסתן בשפכים, תשמשנה בניסויים בהמשך. כל טיפול יהיה ב-3 חזרות, ולכל תערובות ייבחן גם טיפול ביקורת ללא אפ"מ.

הניסויים באצווה יהיו בטילטול שעתיים עד 16 ש' של תערובות אפ"מ-חול עם שפכים בחוזק גדל (חוזק קרי עומס אורגני, עומס חנקן, עומס זרחן) ובדיקה של שיעור הקשירה (ספיחה ושקיעה) של צורוני הזרחן המוסף, והשחרור של יסודות שונים (בדגש על בורון וארסן). רק תערובות מוצלחות תיבדקנה בניסוי העמודות. אלו תורכבנה מצינורות PVC באורך 1 מטר ובקוטר 25 ס"מ אשר ימולאו בתערובות אפ"מ נבחרות. תיבחן יעילות התערובות בסילוק הזרחן במהלך הזרמתו במסנן. גורם ראשון שייבדק יהיה ריכוז הזרחן בתמיסה הנבדקת, והשני – סוג התמיסה הנבדקת. כך ייבדקו תמיסות נקיות (ב-3 ריכוזי זרחה: 10, 50, 100 מ"ג/ל במדיום של 0.01 M CaCl<sub>2</sub>), ושפכי רפת (בחוזק גדל). משתנים נוספים לסילוק הזרחן שייבדקו יהיו: (א) קצב ההזרמה: הזרמה רציפה או למקוטעין (עם הפוגות של שעתיים בין הזרמות עוקבות לעיכוב היווצרות תנאי חיזור ולשיפור המגע בין מולי השפכים לפני השטח הריאקטיביים); (ב) כמות התמיסה המוזרמת ((עשירית נפח נקבובים או נפח נקבובים שלם בכל הזרמה). ההזרמות יימשכו עד פריצת זרחן מהעמודה.

הזרמת התמיסות תהיה בראש כל עמודה באמצעות מערכת טפטוף. לאורך העמודות, במרחקים של 20 ס"מ יותקנו צינורות יניקה שיאפשרו איסוף עתי של מדגמי מים. במי הנקבובים ובמי הנקז ייבדקו ריכוזי הזרחה והזרחן הכללי (לחישוב מאזן זרחן) ויתר המרכיבים הדרושים להערכת אופי מינרלי הזרחן (סעיף 3-ג-2) בקולונה והשתנותם כתלות בהעמסת זרחן בעמודה, סוג הזרחן המוסף ועומק הדיגום בעמודה. בנוסף תיעשה סריקת מתכות כללית (בדגש על אוקסיאניונים ובעיקר בורון וארסן), ומדידות של הפחמן האורגני ושל צורוני החנקן במי הנקבובים ובמי הנקז במטרה לאמוד את פוטנציאל הסילוק של מרכיבי זיהום ממי השפכים מחד גיסא, ואת ההשפעה הסביבתית האפשרית

של סילוק שפכי הרפת בדרך זאת. בסיום הניסוי דוגמאות קרקע בנפחים מוגדרים יילקחו מכל העמודות במרווחים של 10 ס"מ. דוגמאות הקרקע ינוקזו ממי הנקבים בצנטרפוגה וריכוז הבורון במי הנקבים ובקרקע ייבחן גם כן לבחינת מידת הספיחה של הבורון לפאזה המוצקה בקרקעות השונות.

### (3-ה') העמסה (biofortification) של גידולי בוחן בסלן ומוליבדן:

נשתמש (בהתאמות נחוצות) במערך המיני-ליזימטרים בחממה בוולקני בדומה לזה שהוכן לניסוי הגידול/שטיפה של במס"א ואפ"מ לשם בחינה סביבתית של ניצול אפר פחם ביישומים חקלאיים כחלק מפרויקט במסגרת LEAF (Leaching Environmental Assessment Framework). המיני-ליזימטרים יכילו תערובות אפ"מ ובמס"א בחול דיונה (ממנו הקליטה בצמחים צפויה להיות מרבית). נשתמש באפ"מ ממספר מקורות בהתאם לריכוזי הסלן והמוליבדן בהם. נבחן את קליטת היסודות בשני גידולים: חסה (גידול עלים מהיר צמיחה ורב קליטה) וחיטה (כמייצגת של מזון בסיסי). נבדוק את ההשפעה של מקור האפר ועומס יישומו בתערובותיו עם חול על: (א) התפתחות ויבול הצמחים, (ב) התכולה של יסודות קורט רצויים ובלתי רצויים בצמחים (בחיטה נפריד בין הנוף לגרמים).

### 4 סיכום התועלת במחקרים המוצעים

המחקרים המוצעים מכסים טווח רחב של אפשרויות לשימוש חקלאי באפ"מ ובמס"א, החורגים מיישום נרחב בשדה ומתמקדים יותר בנישוח ממוקדות. למחקרים אלה שתי מטרות עיקריות: (א) שימור היכולת המחקרית בתחום השימושים החקלאיים באפ"מ, ו-(ב) ביסוס והרחבת הידע על תועלות ונזקים אפשריים בשימוש באפ"מ ובמס"א. לאפ"מ ולבמס"א יש יתרונות וחסרונות פוטנציאליים, חקלאיים וסביבתיים, ולהערכתנו התועלת עולה משמעותית על הנזק האפשרי. התרומות הידועות הן בעיקר ממרכיב הבוצה בבמס"א והנזק העיקרי הוא מה'מוניטין' הגרוע של האפ"מ. אולם במחקר המוצע אנו מציעים לבחון תועלות ישירות מהאפ"מ ולא דווקא בשילוב עם בוצת שפכים, הגם שזה השימוש המועיל העיקרי.

התועלת העיקרת היא מהבמס"א, בהחלפת דישון כימי, בהגדלת יעילות השימוש בחנקן ובהפחתת מחלות שוכנות קרקע. עם זאת, שיפור תכונות פיזיקליות של הקרקע (כולל שיפור תכונות תאחיזת מים בקרקע ומוליכותה למים) ותוספת יסודות קורט חיוניים לתזונת האדם הן התועלות הנגרמות במידה רבה ע"י מרכיב האפ"מ בבמס"א, וסילוק אפשרי של זרחן (וחומר אורגני) משפכי רפתות וחזיריות, ממי-הקולחים וממי-נגר משדות חקלאיים הנה תרומת האפ"מ עצמו. תועלת נוספת מהאפ"מ היא בשיפור מובהק של הקומפוסטציה של בוצות וזבלים (וזאת ללא קשר לתהליך ה-N-Viro). הנזקים העיקריים המיוחסים לאפ"מ הם בהעמסת הקרקע (ומי-נקז) בבורון ובארסן, הפחתה בזמינות זרחן ויסודות קורט חיוניים לצמח, והעמסת הקרקע במתכות כבדות וברדיונוקלידים. ישנם פערי ידע משמעותיים בהקשר לתועלות ולנזקים הכרוכים ביישום אפ"מ ואפ"מ כבמס"א ומטרת המחקר המוצע היא לגשר על חלק מפערים אלה.

#### 4 סקירה טכנו-מדעית

להלן נסקור תחומים בהם יישום במס"א (ואפ"מ) בחקלאות עשוי להוות יתרון או לגרום נזק, תוך התמקדות בנושאים העיקריים שצוינו לעיל.

(4-א) הערך החקלאי של במס"א, השפעתה הסביבתית, והשפעתה על נגר וסחף בשדות חקלאיים  
(4-א-1) השפעה על יבול גידולים חקלאיים: יישום במס"א נבדק במגוון רחב של גידולים כולל: תפוז"א, גזר, חסה, תירס, חיטה, בקיהלתלן (פיין וחוב', 2013; 2014; 2015). בגידולי שלחין לא הייתה לבמס"א בדרך כלל השפעה על היבולים בהשוואה לדישון תקין. כלומר, הזיבול האורגני אמנם מחליף חלק מתשומות הדשן הכימי, אך יש להניח שהוא לא יגדיל את היבול כאשר הדישון הנו תקין (בכמות ובזמן). עם זאת, במספר ניסויי שדה בהם יושמה במס"א הייתה עלייה מובהקת ביבול ובאיכות התוצרת. לדוגמה, בניסוי שדה בתפוז"א בחוות הבשור היבול המשקלי של הפקעות ומספרן בטיפולי הבמס"א (4.6 ט' ח"לד') היה גבוה בכ-50% ובכ-13%, בהתאמה, בהשוואה לטיפולי ההיקש, עם עלייה מובהקת בריכוזי היסודות החיוניים סידן, נחושת, זרחן, מוליבדן וסלן בפקעות. יבול ביומאסה של בקיהלתלן (פלחה חרבה, משמר דוד, 2012) עלה כמעט פי 3 ובמידה שווה בקירוב ביישום 5 ו-15 מ"קד' (מ-100 ק"גד' לכ-275 ק"גד') עם עלייה מובהקת בריכוזי אשלגן, זרחן ומוליבדן בצמחים. בחורף 2014/15, שהיה גשום במיוחד, בוצעו שני ניסויים בהם נבדקה ההשפעה של יישום זבלים שונים ובהם במס"א על יבולי חיטה בהשוואה לדישון כימי משקי (בוסק וריצקר באזור חלץ; בן-דוד וחוב' באזור בארי; דיווח בכנס מגדלים בקיבוץ ארז, ספט' 2015), שניהם על קרקע חול. טיפולי הבמס"א בכל אחד מ-2 הניסויים הניבו את היבולים הגבוהים ביותר. בניסוי בחלץ, תוספת היבול בטיפולי הבמס"א (5 ו-20 מ"קד') הייתה 50%-76% בהשוואה להיקש המשקי. ההסבר היה ששטיפת הדשן החנקני בגשמים העזים של ראשית החורף הותירה את הטיפול המשקי ללא חנקן זמין, שבטיפולי הבמס"א סופק באופן הדרגתי כתוצאה ממינרליזציה של החנקן האורגני הבוצתי. גם בטיפולי קומפוסט הבוצה (3 ו-9 מ"קד') היבול היה נחות במובהק בהשוואה לטיפולי הבמס"א. בניסויי הדברה של מחלות צמחים שוכנות קרקע בגידול חסה הייתה לעיתים פחיתה ביבול בחלקות בהן הוספה הבמס"א עקב המלחה חנקנית שלא נשטפה במועד. אולם בחלק מהניסויים (כגון, כפר חיים ושדה ניצן; פיין, 2015-ב') הייתה עלייה מובהקת ביבול עקב שטיפה מספקת של הקרקע קודם לשטילה, וכמובן - עקב הצלחת ההדברה. יתרה מזאת, הצמחים הבריאים בטיפולי ההדברה היו גדולים במידה ניכרת מהצמחים הבריאים בטיפולי היקש ללא במס"א.

יישום בוצה מיוצבת בסיד ובאפר העלה את יבוליהם של מספר רב של גידולים, ביניהם אורז, חיטה, שעורה, במיה, חמניות ומספוא, בעיקר הודות למרכיבי הדשן בבמס"א ובפרט חנקן, זרחן ואשלגן. נציין שעבודה רבה בתחום זה נעשתה בהודו ובקרקעות חמוצות, וכי בחלק מהמחקרים חלקות הביקורת לא דושנו (או לא דושנו דיין). Swain וחובריו (2004) הראו כי יישום במס"א בהודו בחלקה בה גודלו אורז ואחריו אגוזי אדמה איפשר להפחית את הדישון הכימי לכמחצית המנה המקובלת.



Das et al. (2007) מצאו עלייה משמעותית ביבול גידולי מספוא על קרקעות אדומות להן הוסף אפ"מ מעורבב בלשלת עופות או זבל חצרות (Patil et al., 2005).

(2-א-4) תכולה של מתכות כבדות ויסודות בלתי רצויים אחרים: יסודות המבנה (Ca, Ti, Fe, Al, Si), (Na, K) בתחמוצותיהם וחומר אורגני שאריתי מהווים כ-99% מכלל המשקל היבש של האפ"מ. ריכוזי שבעה היסודות המנוטרים (ע"י המשרד להגה"ס בהקשר ליישום בוצות שפכים בקרקעות חקלאיות) הנם בתחום המותר ליישום, הן בבמס"א והן באפ"מ. ככלל, קרקעות סדימנטריות (כגון אלו שבארץ) דלות יחסית ביסודות קורט ובמתכות כבדות, ותכולתם עולה עם העלייה בתכולת החרסית בקרקע McGrath (1995). במס"א ובאפ"מ מתאפיינים בזמינות של יסודות המוכלים בהם עצמם ובהשפעתם האפשרית על זמינות יסודות המצויים בקרקע. Kumpiene וחוב' (2007) יישמו תערובות של אפ"מ וכבול (ביחס 1:1) בקרקע חמוצה ( $\text{pH} = 4.1$ ;  $\text{CEC} = 2.9 \text{ cmol kg}^{-1}$ ; 86% חול) בעומס משקלי של 10%. מסיסות נחושת ועופרת פחתה ב-2-3 סדרי גודל בהשוואה לקרקע עצמה, ופחתו גם קליטת יסודות אלו בכ-20 צמחי בוחן בליזימטרים בשדה והרעילות לאוכלוסיה המיקרוביאלית בקרקע. Xu et al., (2012) יישמו תערובת של בוצת שפכים (14%) ואפ"מ (6%) בקרקע בניסוי עיצים עם עשב מנילה כצמח בוחן. עלייה בתכולת האפ"מ בתערובת הקטינה את ריכוזי הנחושת, ניקל, מנגן, אבץ ואנטימון בצמחים אך הגדילה את ריכוזי העופרת והונדיום. יסודות אחרים (כולל ארסן וקדמיום) לא הושפעו. יישום 4 ט' אפ"מ בד' בקרקעות שחורות ואדומות בהודו בגידול חימצה, תירס, חמניות ואגוזי אדמה, העלה את תכולת המתכות הכבדות בהן במידה מסוימת אך תכולה זו נותרה מתחת לרמה המותרת (Yeledhalli et al., 2008a-c). שימוש נכון באפ"מ מנע שטיפה של מתכות כבדות מתחת לבית השורשים (Heebink and Hassett, 2001). בניסוי שנערך בהודו, נמצא ששילוב של אפ"מ עם בוצה הקטין את זמינות המתכות הכבדות כתוצאה מהיווצרות צורונים שאינם זמינים לצמח (Su and Wong, 2004). בניסוי אחר, בגידול צמחי תירס על אדמות חומציות, דווח כי התקבלה הפחתה של תכולת מתכות כבדות בצמחים כתוצאה מיישום אפ"מ (Jiang et al. 1999). בדומה, Sajwan et al. (2003) שבחנו יישום אפ"מ בעומס הגבוה של 56 טון (יבש) בד' בקרקע במדשאה (centipede grass: *Eremochloa ophioides*) הסיקו שלא צפויה הרעה באיכות הקרקע גם בטווח הארוך או בעיה של דליפת יסודות קורט. אפ"מ ותוצרי לוואי אחרים של שריפת פחם שימשו לניטרול ומניעת דליפה של מתכות מפסולת מכרות (Ciccu et al., 2001). ה-pH של פסולות אלו הוא בד"כ חומצי, והן יכולות להכיל ריכוזים גבוהים של מתכות כבדות מסיסות. המחברים ייחסו את הקיבוע שנצפה להיווצרות ושקיעה של פאזות מינרליות חדשות (כגון, זיאוליטים, קרבונאטים ואוקסידים והידרוקסידים של ברזל ומנגן), ולספיחה על שטחי הפנים שנוספו לקרקע ושנוצרו בה (Kumpiene et al., 2007; Sheshadri et al., 2013). אחד המנגנונים החשובים הוא ככל הנראה כליאה של יסודות קורט אוקסיאניוניים (ארסן, בורון, כרום, ונדיום, סלניום, מוליבדן) בשריג הגבישי של etteringite, מינרל הנוצר תדיר במהלך המיום של אפ"מ (ושל צמנטים בכלל) כתוצאה מתגובה בין סידן אלומינט לסידן גופרתי (Heebink and Hassett,

(2001). מאחר שהיווצרות המינרל יכולה להימשך מס' ימים עד שבועות, המחברים מציעים להניח זמן מתאים לשינוי משקל בקרקע לפני התחלה של שטיפתה כדי למזער את אפשרות השטיפה של היסודות משכבת היישום.

בר-טל וחוב' (2009) יישמו אפ"מ בחול במטרה לשפר את תכונותיו הפיסיקליות (להלן). בניסוי במדמה גשם (בעומס משקלי 2%-15%) אובחנה דליפה של ניקל, כרום, עופרת, בריום וסלן בריכוזים שעלו על תקן מי השתיה. לאחר הוספת חוזרת של אפ"מ (בעומס משקלי של 2%) ריכוזי חלק מהיסודות חרגו מתקן מי השתיה (גופרית, סלן וכרום). יש לציין כי הניסויים במדמה גשם בוצעו בשכבת קרקע דקה (בעובי של כ-3 ס"מ) בחול דיונה שהונחה על מצע אגרגט אינרטי (בעובי כ-1 ס"מ), ולא היה תווך קרקעי שיכול היה למנוע דליפה של היסודות המשתחררים מהאפר. במהלך השנים האחרונות ביצענו מעל 10 ניסויי שדה בבמס"א ובאפ"מ. נבדק מגוון גידולים (חסה, תפוז, גזר, אגוזי-אדמה, חמצה, בקיה-תלתן, תירס, חיטה) בד"כ ביישום חד-פעמי אך גם ביישום חוזר (4 עונות רצופות) בעומסים שבין 5 ל-10 ט' במס"א (פיין וחוב', 2013; 2015-א', ב') ובעומסי אפ"מ חריגים (15, 20 ו-80 ט'ד'). הגידול היה בבעל או בהשקיה במים שפירים או במי-קולחים. ביבול צמחי הבוחן נבדקו ריכוזי היסודות השונים (הזנה וקורט, מתכות כבדות, אוקסיאניונים, לעיתים גם רדיונוקלידים). ריכוזי כספית בבמס"א נמוכים מאד, ולכן בדיקתה בצמחי מאכל הגדלים עליה, אינה נדרשת ע"י משרד הבריאות. בכל המקרים נמצא כי ריכוזי היסודות המנוטרים (קדמיום, עופרת וארסן) בצמחי הבוחן היו נמוכים מהסף המותר למאכל אדם (שירות המזון הארצי), ולעיתים אף נמוכים מסף הכימות. בד"כ הריכוזים דמו לאלה שבצמחי הביקורת. במקרה אחד, בו יושמו 30 ט'ד' אפ"מ בחול דיונה בגידול חיטה (ניסוי בני דרום ב-2008; פיין וחוב', 2013), ריכוז העופרת בנוף היה 1.6 מ"ג/ק"ג, גבוה מהסף המותר. אולם ריכוז העופרת בהיקש המשקי היה גבוה כשלעצמו: 1.1 מ"ג/ק"ג, ובטיפולי אפ"מ ובמס"א בעומס 10 ט'ד' ריכוז העופרת היו כבהיקש. בשני ניסויים אחרים, בהם היה הבדל מובהק בריכוז העופרת בצמחים בין טיפולי במס"א להיקש, היה הריכוז בנוכחות הבמס"א נמוך יותר (חסה, כפר חיים 2014; בקיה/תלתן, משמר דוד 2012: מ-0.26 ל-0.13 מ"ג/ק"ג - בעומס 15 ט'ד' אך לא בעומס 5 ט'ד').

(4-א-3) השפעת אפ"מ על זמינות יסודות קורט חיוניים לגידולים: יישום אפ"מ תורם יסודות חיוניים לקרקע ולצמח, כולל יסודות קורט זמינים לצמח. Tiwari וחוב' (2008) הראו בניסויי הדגרה עלייה בזמינות אבץ, ברזל ומנגן לאחר יישום אפ"מ, אך לאחר זמן חלה ירידה במסיסות יסודות אלו. הם ייחסו את השינויים לפעילות מיקרוביאלית בקרקע. במרבית ניסויי השדה ובחלק מהתצפיות שביצענו במהלך 10 השנים האחרונות ביישום אפ"מ או במס"א בגידולים חקלאיים (לעיל) נבדקה התכולה של יסודות הקורט והמתכות הכבדות בחלקים הנאכלים של הצמחים (ע"י אדם או בהמה; פרי ונוף). בכל הניסויים היו הריכוזים בצמחים של ברזל, אבץ, מנגן, נחושת, מוליבדן, בורן ויסודות נוספים בד"כ דומים בכל הטיפולים ובכל מקרה נמצאו הרכוזים בתחום הרגיל לצמחים והמותר לצמחי מאכל.

כאמור, בחלק ניכר מהניסויים, יישום במס"א העלה את ריכוזי המוליבדן בצמחים באופן מובהק בהשוואה להיקש המשקי ולעיתים גם בסלן (חיטה, בני דרום; תפוז, א, בשור; מ-0.06 ל-0.56 מ"ג ק"ג) ובנחושת (תפוז, א, בשור). ריכוזי מנגן ואבץ (גרגרי תירס, רבדים) לא הושפעו בד"כ, במקרה אחד הם עלו ובשני ירדו בטיפול במס"א. מעניין לציין כי ריכוזי הבורון בצמח, בכל הגידולים שנבחנו, לא הושפעו כלל בטיפול במס"א גם בעומסים הגבוהים יותר.

יישום אפ"מ נבחן בניסיון לטייב קרקע חרסית-נתרנית ברבדים. עומסי היישום היו 20 ו-80 ט"ד' (ב-2005) ו-15 ט"ד' (ב-2007) (פיין וחוב', 2013-א'). צמח הבוחן בעונת היישום היה תירס, ונמצאה עלייה בנוף בריכוזי המוליבדן (מ-0.9 ל-1.8 מ"ג/ק"ג בשני עומסי היישום בניסוי הראשון, ומ-1.7 ל-3.2 מ"ג/ק"ג בשני) ובריכוזי הבורון (מ-36 ל-50 מ"ג/ק"ג בראשון, ומ-65 ל-140 בשני). בטיפול בעומס הגבוה מאד של 80 ט"ד', עלה ריכוזי הכרום בקלחים (מ-1.6 ל-3.1 מ"ג/ק"ג; יסוד חיוני לבע"ח). בטיפול זה, בשנה השלישית לאחר היישום, ריכוז המוליבדן בזרעי חמצה היה 12 מ"ג/ק"ג (בהשוואה ל-7 מ"ג/ק"ג בהיקש), וריכוזי נחושת ואבץ היו נמוכים מבהיקש ב-15% (מה שיכול להיות מוסבר בקילטה דומה אך במיהול ביבול שעלה באותו שיעור).

(4-א-4) בורון בקרקעות ביישום במס"א ואפ"מ: ריכוזי בורון באפ"מ גבוהים יחסית לריכוזיו בקרקעות ובזבלים. בורון הנו יסוד קורט חיוני, אולם בד"כ הוא אינו חסר בקרקעות ארצנו ובמי-ההשקיה, ויישום במס"א (ואפ"מ) עלול לגרום לעודפים ואף לרעילות בגידולים רגישים. הבעיה תהיה קצרת טווח מאחר שהבורון נשטף בנקל מהקרקע (Keren and Bingham, 1985; Jankowski et al., 2006; Matsi and Keramidias, 2001). Manoharan וחוב' (2010) בדקו תגובת קנולה ל-5 סוגי אפ"מ אוסטרליים, שה-pH שלהם נע בין 3.1 ל-10.8. המרכיב המסיס של הבורון באפ"מים הבסיסיים יותר ( $pH > 5$ ) היה 5-10% מהבורון הכללי. האפרים יושמו ב-4 קרקעות חומציות בעצצים ובעמודות (באורך 0.3 ו-1 מ') בעומסים עד 62.5 ט"ד' (ערבוב ב-5 וב-10 ס"מ העליונים, בהתאמה). רק העומס המרבי גרם להצטברות בורון ברמה טוקסית בעלים של צמחי הבוחן ולפגיעה ביבול. יישום כל האפ"מים בעומס קטן מ-4 ט"ד' לא גרם לשינוי בתכולת הבורון בקרקעות שנבדקו ולקליטת יתר של בורון בעלי הקנולה.

השפעת יישום חוזר, שנה אחר שנה, של במס"א על ריכוזי יסודות קורט ומתכות כבדות בצמחי חסה ובמי-נקז נבחנה במהלך השנים 2011-2013 (פיין וחוב', 2014). הבדיקה הייתה בליזימטרים בנפח 220 ל"ב-3 קרקעות (חול, קרקע לסית וקרקע חרסיתית). במס"א הוצנעה ב-15 הס"מ העליונים של הקרקע באביב של כל אחת מ-3 השנים במינון שקול ל-50 ק"ג N כליל'שנה, ובקרקע החרסיתית גם במינון גבוה פי שלוש. היישום המצטבר הגיע ל-20-60 ט' חומר יבש' ש-80% ממנו היה אפ"מ. עומס אפ"מ (כבמס"א) שנתי של כ-5 ט"ד' במצע חול הגדיל במובהק את ריכוז הבורון בצמחי חסה, אך רק כשההשקיה הייתה במים שפירים ורק ב-2 עונות הקיץ (שגם היו מיד לאחר היישום). במצע חול מושקה במי-קולחים ובגידול ב-2 הקרקעות האחרות (סיין וחרסית) לא היה הבדל מובהק בריכוז הבורון בצמחים בין טיפול הבמס"א להיקש (כולל ביישום בעומס גבוה שנתי של כ-15 ט')

אפ"מ"אד' (בחרסית). העדר השפעה של יישום אפ"מ (כבמס"א) על ריכוז בורון בצמחי בוחן התקבל גם בניסויי השדה הרבים במגוון גידולים (חסה, תפוז"א, גזר, אגוזי-אדמה, חמצה, בקיה-תלתן, תירס, חיטה) שהזכרנו לעיל. הגידול היה בקרקעות חול וחרסית, ביישום במס"א חד-פעמי או אף ביישום חוזר 4 עונות רצופות בעומסים שנתיים שבין 5 ל-10 ט' במס"אד' (פיין וחוב', 2015), בבעל או בהשקיה במים שפירים או במי-קולחים.

(4-א-5) דליפת יסודות קורט למי התהום ביישום במס"א ואפ"מ: בחוות דעת שהוגשה למנהלת אפר הפחם ולמשרד הבריאות ב-2013 העריך פרופ' רמי קרן ז"ל כי הריכוז הממוצע של היסודות המנוטרים (ארסן, קדמיום, עופרת, כספית) ושל יסודות אחרים בתמיסת הקרקע ביישום אפ"מ ובמס"א בחקלאות יהיה נמוך מריכוזם המותר במי שתייה, וכי אין חשש לדליפתם למי-תהום (לבד מקרקע חול). לדעתו, יישום במס"א בעומסים ובתכיפות המתוכננים לא יגרום לזיהום מי תהום ומקורות מים.

אישוש לכך ראינו בניסוי הליזימטרים שהוזכר לעיל (פיין וחוב', 2014). בין היתר יושמה בו במס"א ב-3 קרקעות בשיעור המרבי המותר ובקרקע אחת גם פי 3 ממנו, והיישום חזר מדי שנה במשך 3 שנים. תכולת היסודות במי-הנקז (ובצמחים) נבדקה במהלך 4 עונות גידול עוקבות (2 אביבים ו-2 חורפים). הריכוזים של Pb, Cd ו-As במי-הנקז בכל אחת מ-4 העונות היו נמוכים מאד, הרבה מתחת לריכוז המרבי המותר במי שתייה ובדרך כלל על סף הגילוי. מכל היסודות, בורון היה היסוד היחיד שריכוזו במי הנקז היו גבוהים במובהק בהשוואה להיקש. במס"א אף הורידה (מובהק סטטיסטית באחת העונות) את ריכוזי הקדמיום בצמחים. הריכוזים בצמחים של יסודות מנוטרים אחרים (Ni, Cr, Cu, Zn) היו תקינים. במס"א הגדילה את ריכוזי המוליבדן והבורון בצמחים שגודלו בחול, אך אלה נותרו בתחום התקין. התוצאות הראו בבירור כי אפ"מ (כבמס"א), גם בעומס גבוה, לא הגדיל את ריכוזי היסודות המנוטרים בצמחים ובמי-הנקז מתחת לבית השורשים.

Pathan et al. (2002) מצאו כי יישום אפ"מ סוג F, (דהיינו אפ"מ דל בתחמוצות) לקרקע חולית (pH 4.7), הגדיל את ספיחת החנקה, האמוניום והזרחה, ועיכב את שטיפתם בעמודות קרקע (5%-20% יחס משקלי בתערובת). אפ"מ טרי הגדיל את הספיחה במידה רבה יותר מאפ"מ מיושן ששהה בערימה לאורך זמן (pH 5.6-7.9, בהתאמה). שעורי הספיחה בנוכחות אפ"מ טרי, אפ"מ בלוי ובחול ללא תוספת אפ"מ היו: 90%, 28%, ו-14%, בהתאמה, אך לעומת זאת, השחרור היה איטי יותר מהאפ"מ הבלוי. בעמודות הקרקע אובחן בתחילה שחרור זרחה מהאפ"מ עצמו (410 ו-90 מ"ג P אולסן/ק"ג מאפ"מ טרי ובלוי, בהתאמה) אך בהמשך השטיפה נמדדה ספיחה נטו.

(4-א-6) השפעה על תכונות פיסיקליות של קרקעות: התכונות הפוצולניות של האפר המרחף ובמידת מה גם של במס"א משפרים תכונות פיסיקו-כימיות של קרקעות, ובעיקר משפרות את הנקבוביות, את תכולת המים בקיבול שדה ואת תכולת המים הזמינים של הקרקע (Fulekar and Dave, 1986 and Pratt et al., 2007). מרקם אפ"מ הוא סילטי, ויישומו בקרקעות חוליות עשוי להגדיל את

תאחיזת המים, להקטין את קצב חידור המים ולהגדיל את זמינות המים לצמח (Furr et al., 1977, Grewai .Korcak, 1995). ייחסו עליה ביבול החיטה בכ-30% בשדה לו הוספה במס"א לעלייה בתכולת הרטיבות של הקרקע ובזמינות יסודות הזנה ממקור אורגני. Jacobs וחוב' (1991), אשר יישמו אפ"מ בעומס 45 ו-180 ט"ד' ב-2 קרקעות חוליות והצניעו אותו לעומק 76 ס"מ, מצאו עלייה של 25 ו-70% בתכולת המים בקרקע ועלייה ביבולי תירס, אותה הם ייחסו לעלייה בתכולת המים הזמינים בקרקע. בדומה, Adriano and Weber (2001) יישמו אפ"מ טרי בעומסים בין 28 ל-112 ט"ד' בקרקע סיינית-סילטית בגידול דשא, ומצאו עלייה בתכולת המים בקיבול שדה ובתכולת המים הזמינים. יישום האפר בקרקע גם הגדיל את ריכוזי ה- B, Mo, As, Be, Se, Ba בצמחים (השתילה - 8 חודשים לאחר היישום), הקטין את ריכוזי Mg, Mn, Zn, ולא השפיע על ריכוזי היסודות האחרים שנבדקו. עם הזמן עלו ריכוזי Cu, Mn, Mo בצמחים וריכוזי B וה- Se פחתו. בר-טל וחוב' (2009), הראו כי אפ"מ יכול לתרום לטיוב קרקעות שוליות, למשל ע"י שיפור תאחיזת המים של קרקע חול דיונה וייצובה מפני סופות רוח. ניסויים במערכת הדמיית גשם ובמנהרת רוח הראו שתוספת משקלית בתחום שבין 2%-15% של אפ"מ לחול דיונה הגדילה את תאחיזת המים במידה משמעותית (עד פי 8 בהשוואה לביקורת) והפחיתה במידה משמעותית את סחף הרוח בחול המועשר באפר המרחף. חול ללא אפר מרחף נסחף ברוח כבר במהירות רוח של 9 מ'/שנ' בעוד שחול מטופל באפר מרחף החל להיסחף באופן משמעותי רק במהירות של 26 מ'/שנ'. ניסויים במדמה גשם בקרקע לסית הראו כי יישום אפ"מ החליש מאד את חוזק הקרום, ובכך אפשר עלייה של פי 2.5 בקצב חידור המים בקרקע הלס. הוספה חוזרת של אפר בשיעור נמוך (2 – 2.5 אחוז) לקרקע (לאחר הריסה מכוונת של התלכידים שנוצרו בה), הקטינה משמעותית את קצב חידור המים שהתקבל כתוצאה מהוספת המנה הראשונה של האפר, מה שמצביע על אפקט מצטבר של יישום הדרגתי של אפר מרחף וכי ניתן לשמר את ההשפעה החיובית של האפר לאורך זמן. תוספת אפר בכמות ראשונית השקולה ל- 10 טון לדונם ולאחר מכן הוספה שנתית של כ- 2 טון אפר לדונם הביאה לשיפור תאחיזת המים בקרקע. יישום אפ"מ בקרקעות חרסיתיות גורם ל'הרזיה' שלהן, דהיינו משפר את מוליכותן ההידראולית, מגדיל את יציבותן לעיבוד מכאני, ומפחית את הפלסטיות שלהן ואת הסתדקותן בעת שהן מתייבשות (Brooks et al., 2011; Koliass et al., 2005). כך, יישום 20 ו-80 ט' אפ"מ'ד' בניסוי שדה בקיבוץ רבדים מנע כמעט לחלוטין הסתדקות של קרקע חרסית-נתרנית והקטין את גודל הגושים שנוצרו בקרקע לאחר חריש ושידוד (פיין וחוב', 2013). לוי (2012) בדקו בניסוי עציצים השפעת במס"א, קומפוסט בוצה ובוצה סוג ב' בעומסי יישום שקולים ל-50 ול-500 ק"ג N לדונם על יציבות תלכידים ב-3 קרקעות בעלות מרקם שונה מאד (חול, סיין וחרסית). הבמס"א הגדילה את יציבות התלכידים בקרקע בכ-50%, בעוד שיתר הבוצות לא השפיעו כלל על יציבות התלכידים או שהן העלו אותה באופן מתון מאד. כל שלושת התוספים הגדילו את המוליכות ההידראולית בקרקעות החרסיתיות והסיינית והפחיתו אותה בחול. למכלול התהליכים של ייצוב תלכידים בקרקע, מניעת היווצרות קרום בפני השטח של הקרקע והגברת תהליכי חידור הגשם אל תוך

הקרקה יש השפעה מרסנת על תהליכי נגר וסחף, המהווים כיום את אחד מגורמי איבוד הקרקע המשמעותיים בסביבה החקלאית.

#### (ב-4) הדברה של מחלות שוכנות-קרקה:

ראיות להפחתה של גורמי מחלה כתוצאה מיישום ישיר של אפ"מ התקבלו במספר מחקרים למשל, Konstantinou et al. (2000), ו - Phirke et al. (2002). מחקר נוסף אף הראה אפשרות להרחקה של חרקים שפשטו על גידולי האורז והירקות Sankari et al. (2007). הפחתה של פתוגנים התקבלה במחקר של Jiang et al. (1999) בגידול צמחי תירס על אדמות חומציות וגם בניסוי שעסק בשימוש באפר המרחף כתוסף לצמחי נוי Chen et al. (2003). שילוב של במס"א ואמוניה או מלחי אמוניום שימש אותנו להדברה ישירה של מחלות שוכנות-קרקה (ראה סיכום וסקירה אצל פיין, 2015-ב'). הגורם הביוצידי הוא אמוניה גזית, ותרומת הבמס"א היא הן כמקור לאמוניה והן בהעלאה חולפת של ה-pH בקרקע. ב-pH גבוה עולה חלקה היחסי של האמוניה הגזית בשיווי המשקל שבין יון האמוניום ( $\text{NH}_4^+$ ) לאמוניה ( $\text{NH}_3$ ). שיווי המשקל תלוי ב-pH של תמיסת הקרקע ובטמפרטורה, כמתואר במשוואת הנדרסון-הסלבאך:

$$\text{Log} \left\{ \frac{[\text{NH}_3(\text{g})]}{[\text{NH}_4^+(\text{aq})]} \right\} = \text{pH} - \text{pKa}$$

העבודות של פיין וחובריו יוחדו בכך שבהן הוסט שיווי המשקל בקרקע להעדפת אמוניה גזית בשני אופנים: (א) העלאת ה-pH לערך בו ה-pH גדול מה-pKa ביחידה לוגריתמית אחת לפחות. ב- $25^\circ\text{C}$  ה- $\text{pKa} = 9.25$  וב- $\text{pH} = 10.25$  ריכוז האמוניה יהיה גבוה פי 10 מריכוז האמוניום; (ב) חימום הקרקע (בחיפוי פלסטיק): מאחר שה-pKa יורד עם עלייה בטמפרטורה, (ב- $50^\circ\text{C}$  הוא 8.54). ניתן לתמרן עם שלושת גורמים - ריכוז אמוניה כללי, ה-pH והטמפרטורה - להשאת ריכוז האמוניה הגזית בקרקע. חשוב לציין שמכיוון שספיחת אמוניה לקרקע (בעיקר לחרסית ולחומר האורגני) מקטינה מאד את ריכוזה באווירת הקרקע, רק בקרקעות חוליות יחסית ניתן להגיע לריכוז אפקטיבי של אמוניה חופשית ביישום סביר. לאחר החיטוי ולפני זריעה (או שתילה) של הגידול החקלאי, יש להקפיד כי האמוניה תסולק מהקרקע ותישטף המליחות העודפת (הנוצרת בעיקר עקב הצטברות חנקה). בשנים 2014 ו- 2015 בוצעו מספר ניסויים בחיטוי קרקע בבמס"א ובאמוניה (פיין, 2015-ב'). שלושה בחבל הבשור (באגוזי אדמה ובחסה) ואחד בשרון בחסה. הטיפולים בקרקע שיועדה לגידול אגוזי אדמה בוצעו באוגוסט 2014 כהכנה לזריעת 2015. בטיפולים אלו הוזרקו 50 ק"ג אמוניה  $\text{N}\text{d}$  לקרקע ללא במס"א ובשילוב עם במס"א בעומס 7.5 ט'ד'. בטיפול הכולל במס"א נמצאה ירידה מובהקת ביותר ( $p < 0.001$  מ-34% ל-12%) בנגיעות ביבלת התרמילים, אך גם עלייה בתופעת ה"רשת" (מ-30% ל-50% מהתרמילים;  $p < 0.05$ ) שהגורם לה נמצא בבדיקה (כנראה עקב עידוד ההתרבות של חיידקים גרם-חיוביים; עומר פרנקל בע"פ). בשרון (כפר חיים), רמת הנגיעות של החסה בקשיוניה גדולה (עם וללא אמוניום) הייתה כ-80% בהיקש, ובטיפול במס"א + אמון גופרתי היא פחתה לכ-50% (הבדל מובהק). בבשור (שדה ניצן) הנגיעות בפוזריום אוקסיפורום לקטוקה

חיסלה לחלוטין את צמחי החסה בהיקש הלא-מטופל בעוד שבטיפול ששילב אמון גופרתי (180 ק"ג/ד') וחימום פני הקרקע (בחיפוי פלסטיק) (עם במס"א ובלעדיה) גורם המחלה בקרקע הודבר כמעט לחלוטין, וכ-90% מהצמחים היו בריאים לחלוטין. בניסוי זה יישום במס"א (כ-10 ט'ד') לא שיפר את מצב הצמחים. להערכתנו, בניסוי זה היה חיטוי מלא של הקרקע גם ללא הבמס"א. עם זאת, אפקט החיטוי (הפחתת ה-big vain) והשפעת הבמס"א על הצימוח של חסה בעונת החורף העוקבת, היו מובהקים. עוד ראינו כי במס"א ואמון גופרתי הפחיתו מאד נביטת עשבייה זרה (פיין, 2015-ב').

יש חשיבות רבה לביסוס נושא ההדברה באמצעות במס"א ואמוניה. יש לכך חשיבות מעשית רבה בעידוד השימוש בבמס"א בחקלאות מתקדמת, בהפחתת השימוש בחומרי הדברה, ובאפשרות של היות ההדברה אמצעי להתגבר על התנגדות ה-GlobalGAP לשימוש בבוצות בגידול צמחי מאכל המיוצאים לאירופה.

#### (4-ג) השפעת במס"א ואפ"מ על ההתנהגות הכימית של זרחן הבוצה והקרקע:

קיבול הספיחה של אפ"מ לזרחה הנו גבוה מאד (מעל 6 ג' P\ק"ג, ולמעשה המדידה לא הושלמה), והוספת האפ"מ לקרקע ניטרלית (pH 6.7 מניו-זילנד) הקטינה מאד את ריכוזי הזרחה המסיסה במים ואת הזרחן הזמין פוטנציאלית (לפי אולסן) במידה שהייתה תלויה בעומס היישום (שהיה 0.25%-5% ממשקל התערובת) (McDowell, 2004). התופעה נבעה הן מספיחה של הזרחה והן משקיעתה בתרכובות קשות תמס של סידן-זרחן, זאת למרות שה-pH של הקרקע כמעט לא השתנה, ולעיתים אף נמדדה בו ירידה משמעותית. McDowell (2005), שהיה מודאג מהגעה של מתכות כבדות (As, Cd, Pb, Se) למי-נגר משדות מרעה שטופלו באפ"מ, הגביל את עומס היישום ל-12.5 ק"ג/ד' ולקרקעות עם pH>6.

Adriano et al. (1980) המליצו על קו-קומפוסטציה של זבלים או בוצות עם אפ"מ במטרה להפחית דליפת זרחה מקרקעות גם בעומסים גבוהים של יישום זבל/בוצה בקרקע זאת עקב הקטנת מסיסות הזרחה בקומפוסט המשולב עקב שקיעתה בתרכובות סידן. בדומה, Brandt וחבוריו (2004) הראו כי מסיסות הזרחן במים בבוצת שפכים ירדה מאד לאחר טיפול בה בשיטת N-Viro (מ-10.4% ל-0.2% מכלל הזרחן), והחיוב בכך היה בצמצום ההגעה של הזרחן לנגר ולמים עיליים. הפחתה במסיסות הזרחה במים לאחר ערבוב אפ"מ סידי (Class C) בזבל בע"ח קודם יישומו בקרקע הודגמה גם ע"י Dao et al. (1999) ו-Seshadri et al. (2013). ייתרון נוסף היה בהעלאת היחס N/P האפקטיבי בזבל לערך קרוב יותר לערך הדרוש לצמחים. עם זאת, לאחר שלב העלייה ב-pH הקרקע, הוא יורד במהירות (Ben-Yephet et al., 2004) וניתן להניח כי מסיסות הזרחה במים תחזור ותעלה. Stout וחוב' (2000) הדגימו הפחתה של 20%-40% בהופעת זרחה במי-נגר כתוצאה מיישום בשדה של תוצרי שריפת פחם (2% ממשקל שכבת הקרקע 0-5 ס"מ), וקשרו זאת לעלייה ב-pH של הקרקע. עם זאת, Vincini et al. (1994) שהוסיפו אפ"מ לזבל חזיריות (1.24% מוצקים) בשיעור 10%-20% (w/v) מצאו עלייה בתכולת הזרחה "הזמינה לצמח" (לפי אולסן) בתערובת, והם הסבירו

זאת בהמסה של זרחן האפ"מ כתוצאה משיפור הפעילות המיקרוביאלית. קו-קומפוסט של זבל בקר עם אפ"מ לא השפיע על זמינות הזרחה בקרקע, ולא פגמה בקליטתו בשעורה (Whalen, 2002). בדומה, יישום במס"א מידי שנה במשך 3 שנים בקרקע חרסיתית העלה מאד את ריכוז הזרחה הזמינה לצמח (אולסן) בקרקע (פיין וחוב, 2015-א'), הגם שריכוז הזרחה המסיסה במים כמעט לא הושפע.

#### (ד-4) סילוק זרחן משפכי רפתות באמצעות אפ"מ:

רפתות מייצרות שפכים באיכויות, שהזרמתם למט"ש תגרום לעומסים גדולים על תהליכי הטיפול עם אפשרות לאי-עמידה בתקנות "ועדת ענבר" למי-קולחים לשימוש חקלאי, ואף לקריסת התהליך במט"ש. עקב כך, הרפתות מחויבות לטפל בשפכים באתרן, ולחילופין, אם יעדיפו להזרימן למט"ש ותאגיד המים יאשר זאת, יושתו עליהם עלויות כבדות בגין עלויות הטיפול הנוספות שתהיינה למט"ש לצורך עמידה בתקנות מי-הקולחים. תכולת המזהמים הרלוונטיים בשפכי רפת (במוצע) היא COD: 4,600 מ"ג/ל (מותר עד 800), TSS: 2,000 מ"ג/ל (מותר עד 400), חנקן: 450 מ"ג/ל (מותר עד 50), זרחן: 90 מ"ג/ל (מותר עד 15 מ"ג/ל) (גל, 2014). הזרמה למערכת הביוב של שפכים שאחד מהמרכיבים לעיל עולה הערך המרבי המותר מחייבת אישור מראש של תאגיד המים, והיא כרוכה בתשלום משמעותי התלוי בערכים המצויים בפועל (5-6 טון/מ"ק בערכים הממוצעים דלעיל). Ugurlu and Salman (1998) הראו כי ניתן לסלק כ-99% מהזרחן המצוי במים שונים ע"י סינון דרך עמודות אפ"מ (Type C) והסילוק היה עקב יצירת משקעים קשי-תמס של הזרחה עם הסידן המסיס וספיחת הזרחה לקלציט. Grubb וחוב (2000) הראו יעילות גבוהה של סילוק זרחה (100% עד 70% בריכוזי זרחה של 50 ו-100 מ"ג/ל, בהתאמה) גם לאחר הזרמה של 85 נפחי נקבובים דרך עמודת האפ"מ. האפ"מ במקרה זה היה Type F עם כ-CaO בשיעור משקלי שווה ל-1%. הם ייחסו את סילוק הזרחן ליצירת משקעים קשי-תמס שלו עם ברזל ואלומיניום. Cheung and Venkitachalam (2000) השתמשו בעמודות אפ"מ לסילוק יעיל של זרחן ממי-קולחים אל-אווירניים. Li וחוב (2006) שיפעלו אפ"מ ע"י שטיפתו בחומצה מלחית (0.25 M) וקלייתו ב-750 מ"צ (במשך שעתיים) אך יעילות סילוק הזרחה (בהעברה דרך עמודות ב- pH=7) הייתה רק כ-50% מכלל הזרחה בריכוזי זרחה של כ-8 מ"ג/ל.

להערכתנו, סינון בשיטה מתאימה עשוי להרחיק לא רק זרחן משפכי הרפת אלא גם חלק משמעותי של העומס האורגני (המבוטא כ-COD) ושל כלל המוצקים המרחפים (ה-TSS) המצויים בשפכי רפתות תוך חיסכון בעלויות סילוק השפכים. בנוסף, האפ"מ שיועמס בזרחן ובחומר האורגני יכול לשמש תוסף לטיוב קרקעות. ההסתייגות העיקרית מהשימוש באפ"מ גולמי למטרה זאת הוא מעבר של יסודות הקורט (ובעיקר בורן וארסן) ממנו למי התסנין.



#### (ה-4) biofortification בסלן ומוליבדן:

סלן הוא יסוד קורט חיוני בהזנת האדם (ובע"ח בכלל), והוא קשור לתפקוד התקין של בלוטת המגן ומערכת החיסון, כאנטיאוקסידנט וכנוגד סרטן (Fairweather-Tait et al., 2001). המנה היומית המומלצת (RDA) היא  $55 \mu\text{g}/\text{day}$  (המנה המרבית הנסבלת (Tolerable Upper Intake Level), שאינה כרוכה בנזק בריאותי, היא  $400 \mu\text{g}/\text{day}$ ). זמינות סלן לאוכלוסייה הנה בד"כ נמוכה מרמתו המיטבית, בעיקר באזורים בהם מתגוררות אוכלוסיות עניות יותר ולא באזורים בעלי קרקעות עניות בסלן, ונעשה מאמץ להגדיל את ריכוזיו בצמחי מאכל בסיסיים (כגון אורז, חיטה, תירס, קסאבה, תפ"א ועוד) ובצמחי מרעה (כגון, אספסת) כדי לשפר את תזונת האוכלוסייה (biofortification) (Bouis et al., 2011; Lyons et al., 2004). מוליבדן וכרום הם יסודות נוספים החיוניים לתזונת האדם ואשר מנתם במזון נמוכה בהשוואה למנה הרצויה. האמצעי הנפוץ להעלאת התכולה בגידולים הוא יישום מלחים שונים (מקובל לגבי סלן) בקרקע ולא על העלווה, אך אפשרי גם ביישום אפ"מ במצע הגידול. Carlson and Adriano (1993) מצאו עלייה במסיסות מוליבדן וסלן לאחר הוספת אפ"מ לקרקע וייחסו זאת לתרומת התוסף ולעלייה ב-pH של הקרקע. תוצאות דומות התקבלו ע"י Mbagwu (1983; 11.2 ט' אפ"מ ל'תירס) ו-Arthur et al. (1993) (אספסת).

בחלק ניכר מהניסויים שבצענו ביישום במס"א בגידולים שונים נמצאה עלייה מובהקת בריכוזי מוליבדן בצמחים (פיין וחוב', 2013; פיין, 2015-ב'). אלה כללו חיטה (רבדים, 2007; בני דרום, 2008), תפ"א (בשור, 2012), בקיהלתלתן (משמר דוד, 2012), תירס (רבדים, 2012), גזר (ניר אליהו, 2013), וחסה (עין הבשור, 2013, בית עזרא, 2014, כפר חיים, 2014). בחלק מהגידולים הייתה עלייה משמעותית (ומובהקת) גם בריכוזי סלן (חיטה, בני דרום; תפ"א, בשור) וכרום (תירס; נמצא ביישום כבד מאד של אפ"מ בשדה).

#### (ו-4) סיכום סקירת הספרות והצגת תכנית העבודה:

הצגנו לעיל 5 תחומים בשימוש במס"א ובאפ"מ שהמשך מחקר בהם עשוי לקדם את הידע ואת השימושים תוך הבאת תועלת לכל המגזרים המעורבים (העיר - כיצרון, החקלאי - כמשתמש, הסביבה - למחזור וקיימות) ולצרכני התוצרת החקלאית בארץ ובחו"ל. השאלות העיקריות הכרוכות ביישום במס"א (ואפ"מ) הן: מה תהינה ההשפעות קצרות- וארוכות-הטווח של היישום על הקרקע, על הסביבה ועל פוטנציאל הגידולים, והאם היישום כדאי לכל המגזרים המעורבים בכך (או לחלקם?). שימוש במס"א מסייע גם בצמצום הכרייה של משאבים מתכלים (דלק פוסילי, מחצבי זרחן, אשלגן ויסודות קורט חיוניים). ישנם נושאים נוספים שלא התייחסנו אליהם, ואשר ניתן יהיה לבדוק אותם תוך ביצוע המטלות העיקריות, כגון השפעה על תכונות פיזיקוכימיות של קרקעות, שיפור הקומפוסטציה של בוצות שפכים וזבלי משק החי (הפחתת הפליטות של אמוניה וגזי חממה), ועוד.

## 5 ספרות מצוטטת

בן הגיא נורית, משה ברונר, מיכאל רביב, רעיה וולקן, אשר איזנקוט, אפיון חומרים אורגניים לחקלאות, עידכון סדרות נתונים 1992 עד 2009, פנימי נווה יער, מינהל המחקר, 2012.

בר-טל שי, אורי מינגלגרין, פנחס פיין ורמי קרן. 2009. שימוש באפר פחם מרחף לשיפור תכונות של קרקעות חקלאיות. דו"ח סופי למנהלת אפר הפחם (עבודת גמר לתואר מוסמך האוניברסיטה העברית, מאי 2008). הוצ' המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מרכז וולקני, מינהל המחקר החקלאי. 85 עמ'.

גל ברכה, אבי סלומון, תחשיבים לגידולי שדה, משרד החקלאות ופיתוח הכפר, נובמבר 2014

גל ברכה, ג'מאל מדלאג, תחשיבים בגידול ירקות, משרד החקלאות ופיתוח הכפר, אוגוסט 2012.

גל הראל. 2014. שפכי רפתות - איכויות, תעריפים וכללי שפכי מפעלים (עמדת רשות המים). משק הבקר והחלב 369, ע' 15-17, אפריל 2014

הדס אפרת, אשר איזנקוט, אורי מינגלגרין, ופנחס פיין. 2016. עלות - תועלת כלכלית של השימוש החקלאי בבוצה מטופלת בסיד ובאפר פחם מרחף. דו"ח למנהלת אפר הפחם. הוצ' משרד החקלאות, 38 עמ'.  
[http://www.coal-ash.co.il/docs/CostBenefitCoalAshInAgri\\_Jan2016.pdf](http://www.coal-ash.co.il/docs/CostBenefitCoalAshInAgri_Jan2016.pdf)

לוי גיא, פנחס פיין, אריה בוסק, יגב קילמן, דינה גולדשטיין, אנה בריוזקין, שושי סוריאנו, רבקה רוזנברג. 2013. טיוב קרקע חרסית-נתרנית באמצעות במס"א, אפר פחם, וקומפוסט בוצה. פיין פ' 2013 (עורך), "ייעוד במס"א ליישום חקלאי - מעקב אגרונומי וסביבתי", צביר דוחות מוגש למנהלת אפר הפחם:  
[http://www.coal-ash.co.il/docs/Pinchas\\_Fine\\_2013\\_full.pdf](http://www.coal-ash.co.il/docs/Pinchas_Fine_2013_full.pdf)

לוי תמר. 2012. שיפור תכונות כימיות, ביולוגיות ופיסיקליות של קרקעות נתרניות באמצעות בוצות סוג א'. עבודה לתואר מוסמך למדעים מוגשת לפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה, האוניברסיטה העברית בירושלים.

מסינג אריה, סילוק בוצות ממתקני טיפול עירוני בשפכים, מים והשקייה גיליון 405, עמ' 19-23 יולי 2000.

פורת מיה. 2015. השפעת יישום ארוך-טווח של בוצות שפכים בקרקע על הזמינות הפוטנציאלית של חנקן וזרחן לגידולי שדה: הערכה באמצעות ניסויי הדגרה במעבדה. פרויקט מסכם בהנחיית פנחס פיין, אנה בריוזקין, שושי סוריאנו וכפיר בן-הרוש לתואר בהנדסה כימית, המחלקה להנדסה כימית, המכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון, אשדוד. 70 עמ'.

פיין פנחס. 2013. ייעוד במס"א ליישום חקלאי - מעקב אגרונומי וסביבתי. צביר דוחות מוגש למנהלת אפר הפחם:  
[http://www.coal-ash.co.il/docs/Pinchas\\_Fine\\_2013\\_full.pdf](http://www.coal-ash.co.il/docs/Pinchas_Fine_2013_full.pdf)

פיין פנחס. 2014. השפעת במס"א על מדדי צמיחה, על הקרקע ועל הסביבה - תמצית ממצאי מחקרים. מסמך עמדה למדען הראשי במשרד להגה"ס ולמנהלת אפר הפחם. המחלקה לכימיה של הקרקע, מכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי. 5 עמ'.

פיין פנחס, 2015-א'. הערכת כדאיות של יישום זבלים כתחליף דשן בגד"ש, ניר ותלם 59 עמ' 21-26, מאי 2015.

פיין פנחס. 2015-ב'. השפעת בוצה מטופלת בסיד ואפר פחם (במס"א) על ההרכב הכימי של צמחי בוחן ועל נגיעותם במחלות שוכנות קרקע, ניסויים בצפון-מערב הנגב, בדרום מישור החוף ובשרון בשנים 2011-2014. דוח למנהלת אפר הפחם, המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי, ת"ד 6, בית דגן. 70 עמ'.

פיין פנחס, אריה בוסק, אנה בריוזקין, אסרה רבאח. 2013-א'. ייעוד במס"א ליישום חקלאי - מעקב אגרונומי וסביבתי, טיוב קרקע רנדזינה בהירה בממשק פלחה חרבה ע"י יישום במס"א ובמס"א, וההשפעה על יבול בקיה-תלתן ועל תכולת היסודות בצמחים, מכון וולקני מרץ 2013.

פיין פנחס, אריה בוסק, יגב קילמן, אנה בריוזקין, שושי סוריאנו, רבקה רוזנברג. 2013-ב'. יישום אפ"מ מרחף לשיפור תכונות פיסיקו-כימיות של קרקע חרסית נתרנית ברבדים - תוצאות של שלוש שנות גידול. דו"ח למנהלת אפר הפחם במסגרת המחקר: "ייעוד במס"א ליישום חקלאי - מעקב אגרונומי וסביבתי".  
[http://www.coal-ash.co.il/docs/Pinchas\\_Fine\\_2013\\_full.pdf](http://www.coal-ash.co.il/docs/Pinchas_Fine_2013_full.pdf)

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 2014): 27-35.

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, אוניברסיטת בר-אילן רמת גן.
- פיין פנחס, דני קורצמן, דורית שרגיל, עידו ניצן, אנה בריזקיין, שוש סוריאנו, אירית לבקוביץ. 2014-ג'. תגובת צמחי חסה ליישום חוזר של בוצות שפכים בצורות ייצוב שונות: צימוח ותכולת יסודות הזנה, קורט ומתכות כבדות בצמחים ובמי-הנקז. חלק מדו"ח לתכנית מחקר מספר 12-0705-301 לשנים 2011 – 2013 בנושא: אופטימיזציה של השימוש בבוצות שפכים בגד"ש. הוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות. הוצ' המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, 24 עמ'.
- פיין פנחס, רבקה רוזנברג, דינה גולדשטיין, גיא לוי. 2007. טיוב קרקע נתרנית בעזרת בוצות שפכים. *גן שדה ומשק*, אפריל 2007 עמ' 26-30
- קור ז'אן, הערכת החשיפה לקרינה מייננת בשימושי אפר הפחם בחקלאות, שטח בטיחות קרינה, המרכז למחקר גרעיני נחלק שורק 2002.
- קור ז'אן. 2010. חשיפה לקרינה מבמס"א – מסמך עמדה (ז' קור, ראש תחום הגנה מקרינה, הועדה לאנרגיה אטומית, ממ"ג, יבנה).
- קורן רמי ולודמילה צחנסקי, אפ"מ תחתי לשימוש כמצע ריפוד לעופות- אספקטים סביבתיים דו"ח סופי מוגש למנהלת אפ"מ, המכון למדעי הקרקע והסביבה מרכז וולקני מינהל המחקר, ספטמבר, 2012.
- קורן רמי, אורי מינגלרין, פנחס פיין, ישראל ברוקנטל, התאמת אפ"מ לשימוש כמצע ריפוד ברפת, המכון למדעי הקרקע והסביבה מרכז וולקני מינהל 2000.
- קורן רמי, הערכת שיחרור בורון ויסודות אחרים מאפ"מ ותנועתם למי תהום, המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מרכז וולקני לחקר החקלאות 2000.
- שירות המזון הארצי במשרד הבריאות -  
[www.health.gov.il/http://www.health.gov.il/UnitsOffice/HD/PH/FCS/Documents/Regulations/Reg\\_01022007.pdf](http://www.health.gov.il/UnitsOffice/HD/PH/FCS/Documents/Regulations/Reg_01022007.pdf)
- Adriano, D. C. and Weber, J. T. 2001. Influence of fly ash on soil physical properties and turfgrass establishment. *J. Environ. Qual.* 30:596–601.
- Ajaya Srivastava and Chhonkar, P. K., . Amelioration of coal mine spoils through fly ash application as liming material, *Journal of Scientific and Industrial Research* 59(4): 309-313. (2000) *NAL Call #:* 475 J82; ISSN: 0022-4456
- Arthur, M.A., Rubin, G., Woodbury, P.B. and Weinstein, I.H. 1993. Gypsum amendment to soil can reduce selenium uptake by alfalfa grown in the presence of coal fly ash. *Plant Soil* 148:83-90.
- Barman, S. C.; Kisku, G. C.; and Bhargava, S. K., Accumulation of heavy metals in vegetables, pulse and wheat grown in fly ash amended soil, *Journal of Environmental Biology* 20(1): 15-18. (1999) *NAL Call #:* QH540.J65 ; ISSN: 0254-8704
- Ben-Yephet et al., 2004
- Bouis, Howarth E.; Hotz, Christine; McClafferty, Bonnie; et al., 2011. Biofortification: A new tool to reduce micronutrient malnutrition. *Food and Nutrition Bulletin*, 32(1), Supplement: S, Pages: S31-S40.
- Brandt, R. C., H. A. Elliott, and G. A. O'Connor. 2004. Water-Extractable Phosphorus in Biosolids: Implications for Land-Based Recycling. *Water Environment Research*, 76(2):121-129. <http://www.jstor.org/stable/25045757>
- Brooks, R., F.F. Udoeyo, K.V. Takalapelli. 2011. Geotechnical properties of problem soils stabilized with fly ash and limestone dust in Philadelphia. *J. Mater. Civ. Eng.*, 23 (2011), pp. 711s st.
- Chen, Jianjun and Li, Yuncong, Amendment of fly ash to container substrates for ornamental plant production. In: *Coal Combustion Byproducts and Environmental Issues*, June 15-19, 2003 .
- Cheung, K. C. and T. H. Venkitachalam (2000). Improving phosphate removal of sand infiltration system using alkaline fly ash. *Chemosphere* 41(1–2): 243-249.

- Ciccu, R., Ghiani, R. Peretti, A. Serci, A. Zucca. 2001. Heavy Metal Immobilisation Using Fly Ash in Soils Contaminated by Mine Activity. International Ash Utilisation Symposium [www.flyash.info](http://www.flyash.info)
- Clark, R. B.; Zeto, S. K.; Ritchey, K. D.; and Baligar, V. C. Boron accumulation by maize grown in acidic soil amended with coal combustion products. Clark, R. B.; Zeto, S. K.; Ritchey, K. D.; and Baligar, V. C. 78(2): 179-185. (1999); ISSN: 00162361 [FUELA]
- Das, S. K.; Bhatt, R. K.; Yadava, R. B.; Suresh, G.; Kareemulla, K.; Rai, A. K.; Mojumder, A. B.; Pathak, P. S.; Singh, D. K.; and Singh, M. K.. Effect of fly ash application on forage productivity, nutrient content and physiology of sorghum-cowpea intercrops. Range Management and Agroforestry 28(2B): 406-408.(2007); ISSN: 0971-2070
- Fairweather-Tait, Susan J.; Bao, Yongping; Broadley, Martin R.; et al. 2001. Selenium in Human Health and Disease. *Antioxid. Redox Signal.* 14:1337-1383.
- Fine, P., and U. Mingelgrin. 1996. Release of phosphorus from waste-activated sludge. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:505-511.
- Grewal, K. S.; Yadav, P. S.; Mehta, S. C.; and Oswal, M. C., Direct and residual effect of flyash application to soil on crop yields and soil properties. *Crop Research Hisar* 21(1): 60-65. (2001) NAL Call #: SB4.C66 ; ISSN: 0970-4884
- Grubb, Dennis G., María S. Guimaraes, and Rodrigo Valencia. 2000. Phosphate immobilization using an acidic type F fly ash. *Journal of Hazardous Materials* 76(2-3): 217-236.
- Hedley, M.J., Stewart, J. W.B. and Chauhan, B.S. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46(5):970-976
- Heebink, L.V., Hassett, D.J., 2001. Coal Fly ash trace elements mobility in soil stabilisation. In: Proceedings of the International Ash Utilisation Symposium, Centre for Applied Energy Research, University of Kentucky, Paper No. # 64, Fly Ash Library Home: <http://www.flyash.info>.
- Holmgren, G.G.S., M.W., Meyer, R.L., Chaney, and R.B., Daniels, 1993. Cadmium, Lead, Zinc, Copper and Nickel in agricultural soils of the United States of America. *J. Environ. Qual.* 22: 335-348.
- Jacobs, L.W., A.E. Erickson, W.R. Berti, and B.M. MacKellar. 1991. Improving crop yield potentials of coarse textured soils with fly ash amendments. In Proc. 9th Int. Ash Use Symp. Vol. 3. EPRI GS-7162. Am. Coal Ash Assoc., Alexandria, VA.
- Jankowski, J., C.R. Ward, D. French, S. Groves. 2006. Mobility of trace elements from selected Australian fly ashes and its potential impact on aquatic ecosystems. *Fuel*, 85:243l, 85
- Jiang, R. F.; Yang, C. G.; Su, D. C.; and Wong, J. W. C, Coal fly ash and lime stabilized biosolids as an ameliorant for boron deficient acidic soils. *Environmental Technology* 20(6): 645-649. (1999) NAL Call #: TD1.E59; ISSN: 0959-3330
- Keren R, Bingham FT (1985) Boron in water, soils, and plants. *Advances in Soil Science*, 1: 230-276.
- Kikuchi, Ryunosuke, Application of coal ash to environmental improvement: Transformation into zeolite, potassium fertilizer, and fgd absorbent. *Resources, Conservation and Recycling* 27(4): 333-346.(1999) NAL Call #: TP156.R38R47; ISSN: 0921-3449
- Kolias, S., V.K. Rogopoulou, A. Karahalios. 2005. Stabilisation of clayey soils with high calcium flyash and cement. *Cement Concr. Compos.*, 27: 301-313.
- Konstantinou, I. K. and Albanis, T. A., Adsorption-desorption studies of selected herbicides in soil-fly ash mixtures. *Journal of agricultural and food chemistry* 48(10): 4780-4790. (Oct. 2000), NAL Call #: 381 J8223 ; ISSN: 0021-8561 [JAFCAU]

- Korcak, R.F. 1995. Utilization of coal combustion by-products in agriculture and horticulture. D.L. Karlen, R.J. Wright, W.O. Kemper (Eds.), *Agriculture Utilization of Urban and Industrial By-products*, ASA Special Publication No 58. ASA, CSSA, SSSA, Madison, Wisconsin, pp. 107–130
- Kumpiene Jurate, Anders Lagerkvist, Christian Maurice. 2007. Stabilization of Pb- and Cu-contaminated soil using coal fly ash and peat. *Environmental Pollution*, 145:365-373.
- Kumpiene, J., Solvita Ore, A. Lagerkvist, C. Maurice. 2007. Stabilization of Pb- and Cu-contaminated soil using coal fly ash and peat. *Environ. Pollut.*, 145:365–373.
- Leekie, J.O., M.M. Benjamin, H.A. Kaufman, S. Atman. 1980. Adsorption/Co-precipitation of Trace Elements from Water with Iron Oxy-hydroxides. Electric Power Research Institute, Palo Alto, California (1980)
- Li, Y., C. Liu, et al. 2006. Phosphate removal from aqueous solutions using raw and activated red mud and fly ash. *Journal of Hazardous Materials* 137(1): 374-383.
- Logan, T.J., and J.C. Burnham. 1994. The alkaline stabilization with accelerated drying process (N-Viro): An advanced technology to convert sewage sludge into a soil product. D.L. Karlen, R.J. Wright, W.O. Kemper (Eds.), *Agriculture Utilization of Urban and Industrial By-products*, ASA Special Publication No 58. ASA, CSSA, SSSA, Madison, Wisconsin, pp. 209-223.
- Lyons, Graham H., Jim Lewis, Michelle F. Lorimer, Robert E. Holloway, Dot M. Brace, James C. R. Stangoulis, and Robin D. Graham. 2004. High-selenium wheat: Agronomic biofortification strategies to improve human nutrition. *Food, Agriculture & Environment* 2: 171-178.
- Manoharan V, Yunusa IAM, Loganathan P, Lawrie R, Murray BR, Skilbeck CG, Eamus D. 2010. Boron contents and solubility in Australian fly ashes and its uptake by canola (*Brassica napus* L.) from the ash-amended soils. *Soil Research* 48, 480–487.
- Matsi, T. and Keramidas, V. Z.,. 2001. Alkaline fly ash effects on boron sorption and desorption in soils, *Soil Science Society of America Journal* 65:1101-1108.
- Matsi, T. and V. Z. Keramidas. 1999. Fly ash application on two acid soils and its effect on soil salinity, pH, B, P and on ryegrass growth and composition. *Environmental Pollution* 104(1): 107-112.
- McDowell R. W. 2004 The effectiveness of industrial by-products to stop phosphorous loss from a Pallic soil. *Soil Research* 42:755–761
- McGrath, S.P., 1995. Chromium and Nickel. *In* B.J. Alloway (Ed.) *Heavy Metals in Soils* (2<sup>nd</sup> ed.). Chapman & Hall, London.
- Mukhtar, S.; Sadaka, S. S.; Kenimer, A. L.; Rahman, S.; and Mathis, J. G, Acidic and alkaline bottom ash and composted manure blends as a soil amendment, *Bioresource Technology* 99(13): 5891-5900. (2008)
- Nalbantoglu, Z. and Tuncer, E. R. Compressibility and hydraulic conductivity of a chemically treated expansive clay. *Canadian Geotechnical Journal* 38(1): 154-160. (2001);ISSN: 0008-3674
- Panuccio, M.R., F. Crea, A. Sorgona, G. Cacco. 2008. Adsorption of nutrients and cadmium by different minerals: experimental studies and modeling. *J. Environ. Manage.*, 88:890–898.
- Patil, P. V.; Chalwade, P. B.; Solanke, A. S.; and Kulkarni, V. K. Effect of fly ash and FYM on nutrient uptake and yield of onion. *Journal of Soils and Crops* 15(1): 187-192. (2005); ISSN:0971-2836
- Phirke, N. V.; Chincholkar, S. B.; Yadav, K. R.; and Kothari, R. M. Applicability of fly-ash, phosphate solubilizing microbes and mycorrhizae for sustainable productivity of banana. *Biotechnology of Microbes and Sustainable Utilization*: 161-165. (2002)

- Sajwan, K. S.; Paramasivam, S.; Alva, A. K.; Adriano, D. C.; and Hooda, P. S. Assessing the feasibility of land application of fly ash, sewage sludge and their mixtures. *Advances in Environmental Research* 8(1): 77-91. (2003); ISSN: 1093-0191.
- Sakai, Y.; Matsumoto, S.; and Sadakata, M., Alkali soil reclamation with flue gas desulfurization gypsum in China and assessment of metal content in corn grains, *Soil and Sediment Contamination* 13(1): 65-80. (2004) NAL Call #: TD878 .J68; ISSN: 1058-8337
- Sankari, S. A. and Narayanasamy, P. Bio-efficacy of flyash-based herbal pesticides against pests of rice and vegetables. *Current Science* 92(6): 811-816. (2007); ISSN: 0011-
- Schlossberg, Maxim J.; Waltz, F. Clint Jr; and Miller, William P. Amelioration of soil acidity with class c fly ash: A field study, In: *Coal Combustion Byproducts and Environmental Issues*. Uppsala, Sweden, Spring Street, New York, NY 10013: Springer; pp. 190-233
- Schumann, A. W. and Sumner, M. E., Chemical evaluation of nutrient supply from fly ash biosolids mixtures. *Soil Science Society of America Journal* 64(1): 419-426. (Jan. 2000-Feb. 2000)NAL Call #: 56.9 So3; ISSN: 0361-5995 [SSSJD4]
- Seshadri, B., N. S. Bolan, et al. 2013. *Clean Coal Technology Combustion Products. Properties, Agricultural and Environmental Applications, and Risk Management. Advances in Agronomy*. 119: 309-370.
- Stout, W.L., A.N. Sharpley, and H.B. Pionke. 1998. Reducing soil phosphorus solubility with coal combustion by-products. *J. Environ. Qual.*, 27:111
- Stout, W.L., A.N. Sharpley, J. Landa. 2000. Effectiveness of coal combustion by-products in controlling phosphorus export from soils. *J. Environ. Qual.*, 29:1239
- Su, D. C. and Wong, J. W. 2004. Chemical speciation and phytoavailability of Zn, Cu, Ni and Cd in soil amended with fly ash-stabilized sewage sludge. *Environment International* 29(7): 895-900.
- Subramoniam, S. R. and Chandrasekaran, A. 2005. Chemical properties of lateritic soil and yield of rice as influenced by addition of fly ash. *International Rice Research Notes* 30(1): 35-37. NAL Call #: SB191.R5I6; ISSN: 0117-4185
- Swain, D. K.; Mitra, B. N.; and Ghosh, B. C., Effect of fly ash alone or in combination with organic material and mineral fertiliser on crop yield and economics of rice-peanut cropping system. *Fertiliser News* 49(5): 51-55. (2004) NAL Call #: 57.8 F4123; ISSN: 0015-0266
- Swain, D. K.; Rautaray, S. K.; and Ghosh, B. C. Alkaline coal fly ash amendments are recommended for improving rice-peanut crops. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B, Plant Soil Science* 57(3): 201-211. (2007) NAL Call #: 11 Ac82 ; ISSN: 0906-4710
- Ugurlu, A. and B. Salman (1998). "Phosphorus removal by fly ash." *Environment International* 24(8): 911-918.
- Veeresh, H.; Tripathy, S.; Chaudhuri, D.; Ghosh, B. C.; Hart, B. R.; and Powell, M. A. 2003. Changes in physical and chemical properties of three soil types in India as a result of amendment with fly ash and sewage sludge. *Environmental Geology* 43(5): 513-520.
- Wang Zhaofeng and Feng Yongju, *Advances in studies in effects of fine coal ash on agricultural crops*, *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science edition)* 34(1): 152-156. (Mar. 2003); ISSN: 1000-2324.
- Wong, J. W. C.; Jiang, R. F.; and Su, D. C. 1998. The accumulation of boron in *Agropyron elongatum* grown in coal fly ash and sewage sludge mixture, *Water, Air and Soil Pollution* 106(1/2): 137-147, NAL Call #: TD172 .W36; ISSN: 0049-6979
- Xu, J. Q., R. L. Yu, et al. (2012). "Effects of municipal sewage sludge stabilized by fly ash on the growth of Manilagrass and transfer of heavy metals." *Journal of Hazardous Materials* 217-218: 58-66.

- Yeledhalli, N. A. and Ravi, M. V. 2008c. Effect of co-application of fly ash and sewage sludge on growth, yield of okra (*Abelmoschus esculentus* L.) and some soil properties Asian Journal of Soil Science 3(1): 71-75.
- Yeledhalli, N. A.; Prakash, S. S.; and Ravi, M. V., 2008a. Concentration of heavy elements and radionuclides in crops grown on coal fly ash amended red and blacksoils. Karnataka Journal of Agricultural Sciences 21(1): 125-127.
- Yeledhalli, N. A.; Ravi, M. V.; and Prakash, S. S. 2008b. Crop response to SLASH (mixture of sewage sludge and fly ash) and on soil properties of red and black soils as influenced by soil texture and fertility. Environment and Ecology 26(2A): 934-942.
- Zgorelec, Zeljka; Basic, Ferdo; Kistic, Ivica; Wenzel, Walter W; and Custovic, Hamid, 2008. Arsenic and nickel enrichment coefficients for crops growing on coal ash . Cereal Research Communications 36 (Suppl. S, Part 2): 1219-1222.