



27 לינואר 2016

עלות מול תועלת כלכלית של השימוש החקלאי באפר פחם מרחף –

חישוב כלכלי של השימוש החקלאי באפר בשילוב עם בוצה

¹אפרת הדס, ³אורי מינגלגרין, ²אשר איזנקוט, ³פנחס פיין

¹מנהלת ההשקעות בחקלאות

²שה"מ – שרות השדה

³מנהל המחקר החקלאי, מרכז וולקני, המכון למדעי הקרקע המים והסביבה

1. תקציר

בישראל מתקבלים כ- 1250 אלף טון בשנה של אפר משריפת פחם בתחנות החשמל (נכון ל-2013), מרביתו מופנית לתעשיית הבניין (1150 אלף טון), ומיעוטו לשימושים אחרים הכוללים תשתיות דרכים (כ- 60 אלף טון) וחקלאות (כ- 38 אלף טון). בחקלאות, אפר מרחף משמש לטיפול בבוצת השפד"ן המוספת לקרקע, ואפר תחתית משמש כתחליף לטוף במצעי גידול או כרפד במבנים לבעלי חיים. הבוצה המטופלת באפר פחם ובסיד (במס"א) מסופקת כיום חנים לחקלאים למעט הוצאות פזור והצנעה. להלן נטפל באפר מרחף בלבד ובעיקר בזה המוסף לקרקע עם במס"א. למוצר, כלכל תוסף חקלאי לקרקע, ישנם יתרונות חקלאיים וחסרונות סביבתיים פוטנציאליים. בחישובי עלות מול תועלת של השימוש באפר נאמדו על בסיס נתונים וחוות דעת מומחים התועלת המשוקללת לדונם (תוספת הכנסה לחקלאי) בכ- 124 ₪ והעלות המשוקללת בכ- 22 ₪. הערך לדונם של עלות או תועלת נתונים חושב על פי סוג הקרקע והגידול שעבורם התועלת או הנזק הספציפיים רלוונטים ולאחר מכן שוקלל הערך בהיקף הגידול וסוג הקרקע המטופלים בבמס"א ובהתחשב בכך שהשפעת האפר תלויה באופן הוספתו, בתכונות הקרקע, במשטר המים בקרקע (משקעים, מידת השקיה, תזמון ההשקיה) ובהרכב מי-ההשקיה. התועלות האפשריות הן: העלאת תאחיזת המים בקרקע (1 ₪), שיפור כללי של תכונותיה הפיזיקליות של הקרקע (27 ₪), העלאת טמפרטורת הקרקע (5 ₪), הפחתה בכמות מי-ההשקיה (5 ₪), החלפת דשן כימי (62 ₪), תוספת יסודות קורט (12 ₪), הקטנת השטיפה של יסודות דשן עיקריים (8 ₪) והפחתת גורמי מחלה צמחיים שוכני-קרקע (4 ₪). העלויות הפוטנציאליות הן: העלאת מליחות הקרקע (2 ₪), העלאת pH הקרקע (2 ₪), תוספת בורן (3 ₪) והקטנת זמינות זרחן ויסודות קורט (2 ₪). הגבלת חלופות גידול עד לאישור הרגולטורי של העדר סיכון מהצטברות מתכות כבדות שמקורן באפר הפחם בגידול כלשהו (6 ₪) והגבלת חלופות גידול עד לאישור הרגולטורי של העדר סיכון מהצטברות יסודות רדיואקטיביים שמקורם באפר הפחם בגידול כלשהו (כ- 7 - 13 ₪ לדונם כשהעלות בפועל היא 13 ₪ בניכוי 6 ₪, עלות איסור גידול אותם גידולים לתקופה מקבילה הנדרשת לבחינת הצטברות מתכות כבדות). שני מרכיבי העלות האחרונים נובעים מהגבלה זמנית של חלופות הגידול בשטחים המטופלים בבמס"א לגידולים שאושרו עלידי הרשויות וזאת עד למתן אישור לכל הגידולים, לרבות גידולי עלים. נדגיש כי האומדן המשוקלל של העלויות והתועלות מתייחס ל"קרקע מייצגת" שהינה מושג היפותטי, וכי ניתן להשיא את התועלות הנובעות מהשימוש החקלאי באפר על ידי הפנייתו



לשטחים חקלאיים מתאימים. באותה מידה, שימוש לקוי באפר ישיא את העלויות הכרוכות בשימוש בו.

*מנהלת ההשקעות בחקלאות
ג'שה"מ – שירות השדה
מנהל המחקר החקלאי, מרכז וולקני, המכון למדעי הקרקע המים והסביבה*

2. מבוא וסקירת ספרות

אפר פחם מרחף (להלן אפ"מ) הוא תוצר לוואי של שריפת פחם לייצור חשמל והוא משמש רובו לייצור חמרי בניה ולתשתיות ומקצתו לחקלאות. מרבית האפר הוא אפר מרחף ומיעוטו - אפר תחתית. לאפר התחתית ביקושים נרחבים וההיצע נמוך מהביקוש, ולפיכך, בעבודה זו, נתייחס בעיקר לאפר פחם המרחף ולשימושי (הקיימים והאפשריים) בחקלאות, שימושים שהם בעלי פוטנציאל גבוה להעלאת הפיריון בחקלאות ובפרט בשטחי הבעל.

שטחים נרחבים בישראל סובלים מבעיות איכות קרקע המגבילות את היבולים ופוגעות באיכותם. מחקרים בארץ ובעולם הוכיחו שניתן לשפר פוריות ומבנה של קרקעות באמצעות יישום אפר הפחם המרחף. אולם עם זאת, השימוש העיקרי של אפ"מ בחקלאות בישראל היום הוא בשילובו עם סיד לייצוב ולפסטור בוצות שפכים. יישום הבוצה שטופלה בסיד ובאפר (במס"א) בקרקעות חקלאיות מחליף תשומות דשן (פיין וחוב', 2014), משפר מבנה של קרקעות בעייתיות (פיין וחוב', 2007; לוי וחוב', 2013) ומפחית את המדבק בגורמי מחלה צמחיים בקרקע (יעיל בעיקר בקרקעות חוליות). יתרונות הטיפול בבוצה בסיד ובאפ"מ גלומים בתיעוש היעיל של התהליך ולפיכך בפשטותו ובהדירות תכונות התוצר, בעלותו הנמוכה, ובמיוחד ביכולתו לטפל במגוון רחב של סוגי בוצה, כולל בוצה בלתי-מטופלת, תוך ויתור על הצורך בייצוב אל-אווירי במתקן טיפול בשפכים (להלן מט"ש). ייצוב כזה הנו חיוני לבוצה המיועדת לקומפוסטציה ויישומו מכפיל את עלות הטיפול בשפכים. למעשה, איכות הבמס"א כתוסף חקלאי עולה ככל שפוחתת מידת הטיפול המוקדם בבוצה ממנה היא מיוצרת (פיין, 2006; פיין וחוב', 2014; פיין, 2015א'). חסרון הבמס"א הוא בכך שמרכיב הבוצה מהווה רק עד כ- 15% מהחומר היבש במוצר הסופי, וייצורו מחייב שימוש בתוספים יקרים יחסית (סיד). האפ"מ משמש לדילול הבוצה ולייעול הערבוב עם הסיד. ללא הוספת האפ"מ ייווצרו גושים והפסטור עלול שלא להיות מלא. יתרון חשוב של הבמס"א לחקלאים הוא שעלותה ממומנת ע"י המגזר העירוני (המבקש מסלול לסילוק הבוצה), וחלקו של היוגב בעלות אינה עולה בדרך כלל על עלות ההצנעה בקרקע, זאת בתנאים של העדר תחרות משמעותית בין החקלאים על הבמס"א. בסקירה שלהלן נציג יתרונות וחסרונות עיקריים שדווחו בספרות לגבי השימוש החקלאי באפ"מ ובפרט בשימוש החקלאי במשולב עם בוצה.

2.1 תועלות משימוש באפר פחם מרחף

הרכב הבמס"א ותכולת מזינים ויסודות קורט: התכולה של מזינים עיקריים בבמס"א ותכונות רלוונטיות אחרות (מהשנים 2011-2014) מוצגות בטבלה 1א' ו- ב', בהשוואה לבוצת השפד"ן ולאפר הפחם מהם היא מיוצרת, ובהשוואה לבוצת חיפה ולקומפוסט בוצה (העשוי בעיקר מבוצה זו).



הרכב הבמס"א הוא תוצר המיהול המשוקלל של שלושת מרכיביו (הסיד אינו מוצג והוא CaO כמעט נקי), ושל הריאקציות הכימיות ביניהם, ובהתאם, התכולה הכללית של המזינים העיקריים בבמס"א נמוכה בשיעור שבין פי 3 עד פי 9 ביחס לתכולתם בבוצת המקור. עם זאת, הזמינות הפוטנציאלית של החנקן האורגני דומה לזו שבבוצה (פיין וחוב', 2014; Topac et al., 2008). מסיסות הזרחה בריאגנט אולסן (P_{Olsen}) ומסיסות הזרחה במים (P_{H_2O}) הנם מדדים לזמינות הזרחן לגידולים חקלאיים והיחס P_{Olsen}/P_T (כאשר P_T הוא תכולת הזרחן הכללית) בבמס"א היה גבוה למדי (כ-15%), שני רק לבוצת השפד"ן עצמה (27%). המסיסות במים של הזרחן, לעומת זאת, הייתה נמוכה מאד בבמס"א,

טבלה 1-א': מרכיבים עיקריים בבמס"א, בחומרי המוצא שלה ובסוגי בוצה נפוצים אחרים (פיין, 2015א' ומידע שטרם פורסם).

מרכיב	יחידות	בוצת שפד"ן	אפר פחם מרחף (קולומביאני)	במס"א שפד"ן	בוצת חיפה	קומפוסט בוצה
עומס שווה ערך למנה של 50 ק"ג N לד'	מ"ק (לח) לד'	-	-	10.5	5.6	4.6
$C_{Organic}$	ק"ג טון יבש	392	11	80	387	222
N_{Total}	"-	64	0.5	7.0	63	21
P_{Total}	"-	13	0.6	3.6	22	13
K_{Total}	"-	5.7	5.5	5.5	2.2	5.9
N_T/P_T	יחס	3.9	0.7	2.9	2.9	1.4
N_T/K_T	יחס	12	0.08	6	18	4
P_{Olsen}/P_T	יחס	0.27	0.06	0.15	0.09	0.05
P_{H_2O}/P_{Olsen}	יחס	1.2	0.02	0.004	1.4	0.8
pH (H_2O 1:5)		5.76	11.6	12.5	6.5	6.7
EC (H_2O 1:5)	dS/m	5.9	3.0	2.6	7.8	6.6
מספר מדגמים		12	4	32	8	4

טבלה 1-ב': תכולת יסודות מנוטרים בבמס"א, בחומרי המוצא שלה ובסוגי בוצה נפוצים אחרים (פיין וחוב', 2015א')

יסוד (mg/kg)	בוצת שפד"ן ³	אפ"מ ³	במס"א שפד"ן ²	בוצת חיפה ²	קומפוסט בוצה ²	ערך סף עליון ¹	
						בוצה	ירקות עלים
As	2.6	27	13.3	2.2	2.4		5.0
B	42	270	332	57	70		
Cd	1.4	2.2	0.7	3.8	1.3	20	1.0
Cr	58	63	143	100	180	400	
Cu	163	53	43	470	300	600	
Hg	< 0.1	< 0.1	< 0.1			5	0.15
Mo	2.9	10	4.2	9.2	3.8		
Ni	46	60	42	100	58	90	
Pb	27	50	30	35	44	200	1.5
Se		3-26					
Zn	945	86	144	2,900	1,180	2500	

ערך סף עליון: בבוצה – תקנות המים, המשרד להגה"ס; ירקות עלים יבשים: שירות מזון ארצי במשרד הבריאות; ² מממצע הבדיקות שבוצעו במעבדה של פיין בשנים 2011-2014. ³ מייצג את כלל מדגמי 2012 (מקור: ליאור אבוקסיס, חב' דן-וירו).



רק 0.4% מ- P_{Olsen} (טבלה 1א'). Brandt וחבריו (2004) הראו כי שיעור המסיסות במים של זרחן בבוצת שפכים שניונית ירד מ-10.4% ל-0.2% לאחר טיפול בשיטת N-Viro (שיטת הכנת הבמס"א), והחיוב בכך מבחינתם היה בצמצום אפשרות סחיפות הזרחן שבבוצה והגעתו למים עיליים. הפחתה במסיסות הזרחן 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), והיתרון היה בהעלאת היחס N/P האפקטיבי בזבל. הסיבה להקטנה במסיסות הזרחן היא ה-pH הגבוה וריכוזי הסידן המסיס הגבוהים. לאחר הירידה ב-pH (המתרחשת בקרקע כמעט לאלתר), עולה שוב מסיסות הזרחן במים, ובניסויי המסה נמצא כי סך כל התמוססות הזרחן בבמס"א ובקומפוסט בוצה הייתה כ-35% מכלל הזרחן (פיין, לא פורסם). בדומה, הזמינות הפוטנציאלית לצמח של הזרחן (P_{Olsen}) מבמס"א ומקומפוסט בוצה שיושמו בקרקע חרסיתית בשדה במשך 3 שנים היו דומות מאד (פיין וחוב', 2014). ראוי לציון המוליכות החשמלית הנמוכה של מיצוי הבמס"א בהשוואה הן לחומרי המוצא והן לבוצות האחרות שנבדקו (טבלה 1א').

החלפת דשנים כימיים בשדה: בניסוי שדה שלוש-שנתי ברבדים נבחנה תרומת יסודות הזנה מהבמס"א לגד"ש, הן במהלך השנה לאחר היישום והן לטווח הארוך יותר (פיין וחוב', 2014; פורת וחוב', טרם פורסם). נבדקו יבולים, ההרכב הכימי של הצמחים והתפלגות יסודות ההזנה בקרקע בהשוואה לדישון המשקי (35 ק"ג N\ד' לשנה) ולזבלים אחרים (בוצה מעוכלת, קומפוסט בוצה, במס"א וקומפוסט אשפת ערים מופרדת). הזיבול היה בעומס שקול ל-50 ק"ג N כליל\ד' לשנה והוא ניתן במשך 3 שנים. הבוצות, והבמס"א בכללן, תרמו כ-20 ק"ג N\ד' לשנה, מנה השווה למרבית תשומת חנקן הדשן ביסוד במחזור תירס-חיטה. בכל הטיפולים נדרש גם דישון ראש (10 ק"ג N\ד') לקבלת יבול דומה להיקש המשקי. היישום, שהיה לפי עומס החנקן, הגדיל את ריכוזי הזרחן הזמין בקרקע, ובמיוחד בטיפול קומפוסט הבוצה (יחס N/P נמוך של 1.4, טבלה 1א'). בשל ריכוז האשלגן הנמוך בבוצות, אספקתו מועטה יחסית, וביישום לפי חנקן אספקת האשלגן פוחתת ככל שעולה יחס N_T/K_T בבוצה (טבלה 1א'). לאחר 3 שנות יישום במס"א במנה המרבית המותרת בתקנות (לפי 50 ק"ג N\ד'), עלתה תכולת הפחמן האורגני בשכבת החריש (בכ- 40-215 ק"ג C\ד') ושל החנקן האורגני (בכ- 6-35 ק"ג N\ד'). הזמינות הפוטנציאלית של החנקן האורגני למינרליזציה עלתה בכ- 8-10 ק"ג N\ד' ותכולת הזרחן הזמינה לצמח עלתה מ- 2-3 ק"ג P\ד' לכ- 7 ק"ג P\ד'. זמינות האשלגן בקרקע לא השתנתה.

השפעה על יבול גידולים חקלאיים: נבדק יישום במס"א במגוון רחב של גידולים כולל: תפוז"א, גזר, חסה, תירס, חיטה, בקיהלתן (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). בגידולי שדה, לעומת זאת, הייתה במספר מקרים בהם יושמה במס"א עלייה מובהקת ביבול ובאיכות התוצרת. לדוגמה, בניסוי שדה בתפוז"א בחוות הבשור היבול המשקלי של הפקעות ומספרן בטיפול הבמס"א (4.6 ט' ח"ד') היה גבוה בכ- 50% ובכ- 13%, בהתאמה, בהשוואה לטיפול



ההיקש, עם עלייה מובהקת בריכוזי היסודות החיוניים סידן, נחושת, זרחן, מוליבדן וסלן בפקעות. יבול ביומאסה של בקיהלתן (פלחה חרבה, משמר דוד, 2012) עלה כמעט פי 3 ובמידה שווה בקירוב ביישום 5 ו-15 מ"ק"ד (מ-100 ק"ג"ד לכ-275 ק"ג"ד), 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"ק"ד) 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"ק"ד) היבול היה נחות במובהק בהשוואה לטיפולי הבמס"א. בניסויי הדברה של מחלות צמחים שוכנות קרקע בגידול חסה הייתה לעיתים פחיתת 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 הצלחת ההדברה. בנוסף, הצמחים הבריאים בטיפולי הבמס"א (שבהם הוספה גם אמוניה) 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 (Wong et al., 1998; Kikuchi et al., 1999; Wang et al., 2003; Das et al., 2007; Rautaray et al., 2007; Yeledhalli et al., 2008). נציין שעבודה רבה בתחום זה נעשתה בהודו ובקרקעות חמוצות, וכי בחלק מהמחקרים חלקות הביקורת לא דושנו (או לא דושנו דיין). Swain וחבריו (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 בלשלוש עופות או זבל חצרות (Patil et al., 2005).

הפחתת גורמי מחלה צמחיים בקרקע: 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-קרקע (Fine et al., 2000; Gips et al., 2001ab; Fine et al., 2004, 2005; Ben-Yepphet et al., 2005; Oka et al., 2006ab; Oka et al., 2007; פיין וחוב', 2011; פיין,



2015). 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 (NH_4^+) לאמוניה (NH_3). שיווי המשקל תלוי ב-pH של תמיסת הקרקע ובטמפרטורה, כמתואר במשוואת הנדרסון-הסלבאך:

$$\text{Log} \{[\text{NH}_3(\text{g})]/[\text{NH}_4^+(\text{aq})]\} = \text{pH} - \text{pKa} \quad (1)$$

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°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°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 חנקן).

בשנים 2014 ו-2015 בוצעו מספר ניסויים בחיטוי קרקע בבמס"א ובאמוניה. 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 N ל'ד' 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 אינו ידוע. בשרון (כפר חיים), רמת הנגיעות של החסה בקשיוניה גדולה (עם וללא אמוניום) הייתה כ-80% בהיקש, ובטיפול במס"א + אמון גופרתי היא פחתה ל-50% (הבדל מובהק). בבשור (שדה ניצן) הנגיעות בפוזריום אוקסיספורום לקטוקה חיסלה לחלוטין את צמחי החסה בהיקש הלא מטופל בעוד שבטיפול ששילב כ-10 ט"ד' במס"א, אמון גופרתי (180 ק"ג/ד') וחימום פני הקרקע (בחיפוי פלסטיק) כ-90% מהצמחים היו בריאים לחלוטין. בנוסף, בכל הניסויים בהם נבדק הנושא, במס"א ואמון גופרתי הפחיתו מאד נביטת עשבייה (פיין, 2015).

מבנה ואיכות הקרקע: התכונות הפוצולניות של האפר המרחף ובמידת מה גם של במס"א משפרות תכונות פיסיקו-כימיות של קרקעות, ובעיקר משפרות את הנקבוביות, את תכולת המים בקיבול שדה ואת תכולת המים הזמינים של הקרקע (Fulekar and Dave, 1986; Pratt et al., 2007) מרקם אפ"מ הוא סילטי, ויישומו בקרקעות חוליות מגדיל את תאחיזת המים ומקטין את קצבי האינפילטרציה (Furr et al., 1977; Korcak, 1995; Nalbantoglu et al., 2001; Sanjay et al., 2002; Pathan et al., 2003; Veeresh et al., 2003; Grewai et al., 2001) 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 הגדיל את ריכוזי ה- B, Mo, As, Be, - Mg, Mn, Zn, Ba, Se בצמחים (השתילה - 8 חודשים לאחר היישום) והקטין את ריכוזי Cu, Mn, Mo בצמחים וריכוזי ה-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.

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 (Kolias et al., 2005; Brools et al., 2011). כך, יישום 20 ו-80 ט"אפ"מ בד' בניסוי שדה בקיבוץ רבדים מנע כמעט לחלוטין הסתדקות של קרקע חרסית-נתרנית והקטין את גודל הגושים הנוצרים בקרקע לאחר חריש ושידוד (פיין וחוב', 2013). לוי וחוב' (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 שלוש התוספים הגדילו את המוליכות ההידראולית בקרקעות החרסיתיות והסיינית והפחיתו אותה בחול (ראה גם: פיין, 2013).

Pathan et al. (2002) מצאו כי יישום אפ"מ סוג F, (דהיינו אפ"מ דל בסיד) לקרקע חולית (4.7 pH), 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 בלוי, דהיינו אפ"מ ששהה בערימה לאורך זמן, (pH 7.9 ו-5.6, 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 אובחן בתחילה שחרור זרחה מהאפ"מ עצמו (410 ו-90 מ"ג Olsen P לק"ג מאפ"מ טרי ובלוי, בהתאמה) אך בהמשך השטיפה נמדדה ספיחה נטו.



השפעה על תכולת החומר האורגני בקרקע: אפ"מ ובמס"א מכילים פחמן אורגני (טבלה 1), ויישומם בקרקע מגדיל את תכולתו בשכבת היישום, כתלות בעומס היישום ובתכולת הפחמן האורגני בהם. הפחמן האורגני באפ"מ הוא שאריות פחם שנותרו לאחר שריפתו בכבשני תחנת הכוח, והוא יציב מאד לפירוק מיקרוביאלי. לעומת זאת, מרבית הפחמן האורגני בבמס"א מקורו במרכיב הבוצה, והוא פריך במידה דומה לבוצה ממנו הוא יוצר (פיין וחוב', 2014).

זמינות יסודות קורט חיוניים: הוספת אפ"מ תורמת לקרקע ולצמח יסודות חיוניים, 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. Carlson and Adriano (1993) מצאו עלייה במסיסות מוליבדן וסלן לאחר הוספת אפ"מ לקרקע וייחסו זאת לתרומת התוסף ולעלייה ב-pH של הקרקע. 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 $55 \mu\text{g/day}$ והמנה המרבית הנסבלת (Tolerable Upper Intake Level), שאינה כרוכה בנזק בריאותי, היא $400 \mu\text{g/day}$. 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 (biofortification) בסיסיים, (כגון אורז, חיטה, תירס, קסאבה, תפוז"א ועוד) ובצמחי מרעה (כגון, אספסת) (Lyons et al., 2004; Bouis et al., 2011). האמצעי לכך הוא יישום מלחי סלן שונים בקרקע ולא על העלווה, אך אפשרי גם ביישום אפ"מ במצע הגידול (Mbagwu, 1983: 11.2 ט' אפ"מ ל' לתירס; Arthur et al., 1993: אספסת).

במרבית ניסויי השדה ובחלק מהתצפיות שביצענו במהלך 10 השנים האחרונות ביישום אפ"מ או במס"א בגידולים חקלאיים (פיין, 2013) נבדקה התכולה של יסודות הקורט והמתכות הכבדות בחלקים הנאכלים של הצמחים (ע"י אדם או בהמה; פרי ונוף). עומסי יישום הבמס"א נעו בין 8 ל-15 ט' ל' לשנה, והם נבדקו בהשוואה לטיפול היקש עם דישון מסחרי, לעיתים גם בהשוואה לקומפוסט בוצה, בוצה סוג ב', זבל בקר, קומפוסט זבל בקר וקומפוסט אשפת ערים. הגידולים שנבדקו היו גזר, תפוחי-אדמה (2 ניסויים; קרקע חול), חסה (4 ניסויי שדה בקרקע חול, ניסוי ליזימטרים עם 3 קרקעות), תירס (4 ניסויי שדה בקרקע חרסית, אחד מהם במשך 4 שנים עוקבות בדו-גידול תירס-חיטה), חיטה (3 ניסויי שדה, בחול ובחרסית, אחד לעיל במחזור עם תירס), בקיהלתלן (למספוא; קרקע רנדזינה בהירה). יישום אפ"מ נבדק ב-3 ניסויים (שניים בקרקע חרסית, אחד בחול). בכל הניסויים היו הריכוזים בצמחים של ברזל, אבץ, מנגן, נחושת, מוליבדן, בורן ויסודות נוספים בד"כ דומים בכל הטיפולים ובכל מקרה נמצאו הריכוזים בתחום הרגיל לצמחים והמותר לצמחי מאכל. בחלק ניכר מהניסויים, יישום במס"א העלה את ריכוזי המוליבדן בצמחים באופן מובהק בהשוואה להיקש המשקי (פיין וחוב', 2013; פיין, לא פורסם), כלהלן: בחיטה (רבדים, 2007; בני דרום, 2008), בתפוז"א (בשור, 2012), בבקיהלתלן (משמר דוד, 2012), בתירס (רבדים, 2012), בגזר (ניר אליהו,



(2013), ובחסה (עין הבשור, 2013, בית עזרא, 2014, כפר חיים, 2014). יסודות קורט נוספים שריכוזיהם עלו באופן מובהק בחלקות המטופלות בבמס"א בחלק מהגידולים לפחות היו סלן (חיטה, בני דרום; תפוז, תפוז"א, בשור: מ-0.06 ל-0.56 מ"ג/ק"ג) ונחושת (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 (ללא בוצה) 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). 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 בעלייה ביבול באותו שיעור).

קיבוע (אימוביליזציה) של מתכות כבדות בקרקע: בניסויי השדה שתוארו לעיל בהקשר לזמינות יסודות קורט מבמס"א ומאפ"מ, נמצא כי ריכוזי היסודות הרעילים קדמיום, עופרת וארסן בצמחי הבוחן היו בדרך כלל נמוכים מאד, לעיתים מתחת לסף הכימות, או שהם היו דומים לאלה בהיקש המסחרי, ותמיד הם היו מתחת לסף המותר למאכל אדם (שירות המזון הארצי). ריכוזי הכספית בבמס"א נמוכים מאד, ולכן בדיקתה בצמחי מאכל הגדלים עליה, אינה נדרשת ע"י השירות המזון הארצי. רק במקרה אחד, בו יושמה הכמות הגבוהה מאד של 30 ט"ד אפ"מ בחול דיונה בגידול חיטה (בני דרום, 2008; פיין וחוב, 2013), ריכוז העופרת בנוף היה 1.6 מ"ג/ק"ג, ערך שמעל לסף המותר. בטיפול אפ"מ ובמס"א באותו ניסוי, כל אחד בעומס 10 ט"ד, ריכוז העופרת היה כמו זה שבהיקש המשקי (וגבוה כשלעצמו: 1.1 מ"ג/ק"ג). 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; בקיהלתן, משמר דוד 2012: מ-0.26 ל-0.13 מ"ג/ק"ג - בעומס 15 ט"ד אך לא בעומס 5 ט"ד).

בדומה, Kumpiene וחוב' (2007) יישמו תערובות של אפ"מ וכבול (ביחס 1:1) בקרקע חמוצה ($pH = 4.1$; $CEC = 2.9 \text{ cmol kg}^{-1}$; תכולת חול = 86%) בעומס משקלי של 10%. מסיסות נחושת ועופרת פחתה מאד בהשוואה לקרקע עצמה, ופחתו גם קליטת יסודות אלו בצמחי בוחן והרעילות הכללית בקרקע לאוכלוסיה המיקרוביאלית. Xu et al., (2012) יישמו תערובת של בוצת שפכים (14%) ואפ"מ (6%) בקרקע בניסוי עציצים 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.



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. המחקרים 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 (Sheshadri et al., 2013). אחד המנגנונים החשובים הוא ככל הנראה כליאה של יסודות קורט אוקסיאניוניים (ארסן, בורון, כרום, ונדיום, סלניום, מוליבדן) בשריג הגבישי של ettringite, מינרל הנוצר תדיר במהלך המיום של אפ"מ (ושל צמנטים בכלל) כתוצאה מתגובה בין סידן אלומינט לסיידן גופרתי (Heebink and Hassett, 2001). מאחר שהיווצרות המינרל יכולה להימשך מס' ימים עד שבועות, המחקרים מציעים להניח זמן מתאים לשיווי משקל בקרקע לפני התחלה של שטיפה כדי למזער את אפשרות השטיפה של היסודות משכבת היישום.

ייעול תהליך הקומפוסטציה של בוצות וייצוב זבלים: Adriano et al. (1980) המליצו על קו-

קומפוסטציה של אפ"מ עם זבלים או בוצות. תוצאה צפויה אחת היא הפחתה במסיסות הזרחה בקומפוסט המשולב עקב שקיעת הזרחה בתרכובות סידן. התוצאה שביקשו להשיג היא הפחתת החשש מדליפת זרחה מקרקעות, גם בעומסים גבוהים של יישום זבל/בוצה בקרקע, (Topaç et al., 1998; Stout et al., 1999; Dao, 2008; Stout, 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 (אולסן) בתערובת והם הסבירו זאת בהמסה של זרחן האפ"מ כתוצאה מפעילות מיקרוביאלית. קו-קומפוסטציה של זבל בקר עם אפר מרחף לא השפיעה על זמינות הזרחה בקרקע בגידול שעורה, ולא פגמה בקליטתו בצמחים (Whalen, 2002). בדומה, יישום במס"א מידי שנה במשך 3 שנים בקרקע חרסיתית העלה מאד את תכולת הזרחה הזמינה לצמח (לפי מיצוי בראגנט אולסן), בקרקע (פיין וחוב', 2014). יישום בוצה ואפר פחם (תחתי ומרחף בשיעור משקלי של 8%) בקרקע הגדיל את זמינות החנקן בה, כנראה עקב הגדלת המוביליזציה והמינרליזציה של החנקן האורגני בקרקע אולי בגלל השפעה ממריצה על הפעילות המיקרוביאלית בקרקע (Stuczynski et al., 1998).

לסיכום: היתרונות העיקריים מהוספת במס"א לקרקע חקלאית שהתקבלו במחקרים, מתבטאים בתוספת יסודות דשן גולמי (חנקן, זרחן ואשלגן) לצמח הזמינים בקצב מבוקר, תוספת יסודות קורט, עליה של תכולת החומר האורגני בקרקע, יצירת תלכידים בקרקע והגדלת יציבותם, הפחתת מחלות, ושיפור התכונות הפיסיקליות של קרקעות. בעבודה זו ננסה לתאר יתרונות אלו במונחים כמותיים.

2.2 חסרונות פוטנציאליים בשימוש באפ"מ

יישום אפר עם או ללא בוצה כרוך בסיכונים הפוטנציאליים שלהלן:

מתכות כבדות: למרות האמור לעיל (למשל בסעיף העוסק בקיבוע (אימוביליזציה) של מתכות כבדות בקרקע), החשש העיקרי של הרשויות ביישום אפ"מ בחקלאות הוא מהצטברות של מתכות רעילות (כולל Cd, Cu, Zn, Ni, Cr, As, Pb; טבלה 1-ב') בסביבה ובגידולים (ראה Barmen et al. 1999; Zgorelec et al., 2008 שבחנו שאריות מתכות באתרים ששימשו כאתרי סילוק לאפר). מחקרים רבים הראו שהסכנות הנובעות מהצטברות מתכות אינן משמעותיות (לדוגמא, Sakai et al., 2004; פיין וחוב', 2013; פיין, 2015-ב') וכי ניתן ליישם אפ"מ ובמס"א בקרקעות חקלאיות גם בעומס גבוה בלי שינוי משמעותי בתכולת המתכות הכבדות בקרקע או בגידול החקלאי, וזאת כתלות בהרכבי הקרקע והבמס"א (ראה פיין וחוב', 2013). 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., 2008). 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.

דליפת יסודות קורט למי התהום: סיכון נוסף שנבדק הוא חדירה של מזהמים למי תהום. בבחינת השפעת ההוספה לקרקע של שילוב של אפר עם פרש רפתות לא התגלו ממצאים שהצביעו על סכנה ממשית, למשל (Mukhtar et al. (2008).

בשנים 2011-2013 נבחנה השפעת יישום חוזר של במס"א ובוצות אחרות על תכולת יסודות קורט ומתכות כבדות בצמחי חסה ועל ריכוזיהם במי-הנקז (פיין וחוב', 2014 ב', ג'). נבדקו גם כהיקש צמחים שגודלו ללא תוסף וצמחים שגודלו על בוצה מעוכלת או קומפוסט בוצה. היישום היה ב-3 קרקעות (חול, קרקע לסית וקרקע חרסיתית), בליזימטרים בנפח 220 ל'. הבוצות יושמו מחדש באביב של כל אחת מ-3 השנים בהצנעה ב-15 הס"מ העליונים של הקרקע. המינון היה לפי עומס חנקן השקול ל-50 ק"ג N כלילי\ד'שנה, ובקרקע החרסיתית הבמס"א יושמה גם בשיעור שקול ל-150 ק"ג N\ד'שנה. היישום המצטבר של הבמס"א היה 20-60 ט' חומר יבש\ד'. ההשקיה הייתה במי-קולחים או במים שפירים. הגידול היה ב-2 אביבים וב-2 חורפים לסירוגין, ותכולת היסודות בצמחים ובמי הנקז נבדקה ב-4 עונות הגידול. הריכוזים בצמחים של ארסן, קדמיום ועופרת היו נמוכים מאד בד"כ, וההבדלים בכל היסודות שנבדקו בין הטיפולים השונים בכל קרקע בנפרד היו בד"כ לא מובהקים סטטיסטית. בחול הייתה זמינות גבוהה יחסית של קדמיום, ותוספת הבמס"א (כמו גם קומפוסט הבוצה) הורידה (מובהק סטטיסטית באחת העונות) את ריכוזיו בצמחים. הבמס"א הגדילה את ריכוזי המוליבדן והבורון בצמחים שגודלו בחול, אך אלה נותרו בתחום התקין. הריכוזים במי-הנקז של



מרבית היסודות היו נמוכים מאד, בד"כ מתחת לסף הרגישות (שהיה כ- $1 \mu\text{g/l}$) ורק ריכוז הבורון היה גבוה יותר בתשטיפים מהקרקע המועמסת בבמס"א בהשוואה ליתר הטיפולים. התוצאות הראו בבירור כי בהרכב הנוכחי של הבמס"א (והבוצות האחרות), אין לצפות לריכוזים חריגים של כל יסודות הקורט והמתכות הכבדות בצמחים או לדליפה שלהם (לבד מבורון) מתחת לבית השורשים גם בעומסים כבדים.

רעילות בורון: ריכוזי בורון באפ"מ ובבמס"א הנם גבוהים יחסית לריכוזים בבוצות וזבלים אחרים (טבלה 1-ב'; פיין וחוב', 2015-א'). בורון הנו יסוד קורט חיוני, אולם הוא אינו חסר בקרקעות ארצנו ובמי-ההשקיה, ויישום במס"א עלול לגרום לעודפים בו העלולים להיות רעילים לגידולים רגישים לבורון. עם זאת, אם קיימת בעיה היא תהיה לטווח זמן קצר בלבד מאחר שהבורון מסיס במים, בעיקר ב-pH בסיסי, והוא נשטף בנקל מהקרקע (Keramidas et al., 1985; Keren and Bingham, 2006; Jankowski et al., 2001; Manoharan et al., 2010) ונחשב כקטלן ל-5 אפ"מ פחם אוסטרליים, שה-pH שלהם נע בין 3.1 ל-10.8. המרכיב המסיס של הבורון באפ"מים הבסיסיים יותר ($\text{pH} > 5$) היה 5-10% מהבורון הכללי. האפרים נבחנו ב-4 קרקעות חומציות בניסויי עציצים ועמודות (באורך 0.3 ו-1 מ') ובעומסים של עד 62.5 ט"ד' (ערבוב ב-5 וב-10 ס"מ העליונים, בהתאמה). רק העומס המרבי גרם להצטברות בורון ברמה טוקסית בעלים ולפגיעה ביבול. המסקנה הייתה שיישום אפ"מים אלה בעומס קטן מ-4 ט"ד' לא יגרום לשינוי בתכולת הבורון בקרקעות שנבדקו, ולא יגרום לקליטת יתר של בורון בעלי הקנולה.

העלאת pH הקרקע: התגובה המובהקת ביותר של הוספת אפ"מ בסיסי (רק אפרים כאלה מצויים בישראל) לקרקע היא העלאת ה-pH (Seshadri et al., 2013). בהתאם, אפ"מ (ותוצרי שריפת פחם אחרים) משמש רבות להעלאת ה-pH של קרקעות חמוצות (Korcak, 1994; Logan and Burnham, 1994). מידת העלייה ב-pH תלויה בתכונות הקרקע (למשל, כושר הבופר שלה התלוי בתכולת החרסית והגיר), בתכונות התוסף ובעומס היישום.

בקרקעות נייטרליות, העלאת ה-pH עלולה לגרום לירידה במסיסות וזמינות לצמח של זרחן ויסודות קורט קטיוניים (בעיקר ברזל), ולהפרת מבנה הקרקע. עם זאת, התופעות הללו לא נצפו בניסוי כלשהו שבוצע בישראל. ההסבר לכך הוא שהאפ"מים בארץ הם אמנם בסיסיים אך תכולת הסיד החופשי בהם נמוכה (אפ"מ סוג F), ולפיכך השפעתם על ה-pH של הקרקע אינה משמעותית בעומסי יישום סבירים. כך, יישום 15 ט"ד' אפ"מ בקרקע חרסיתית ברבדים לא גרם כל בעיה בנביטה של תירס למרות שהזריעה הייתה יומיים לאחר הצנעת האפר. לא הייתה פגיעה בקליטת יסודות (זרחן וקורט) בצמחים, ולא הייתה הרעה ביציבות התלכידים בקרקע (פיין, 2013, פרק 5; לוי וחוב', 2013). גם יישום 20 ו-80 ט"ד' באותה קרקע לא גרם כל בעיה, להיפך – חל שיפור ניכר במבנה הקרקע (כפי שהוזכר לעיל). ערך ה-pH של במס"א גבוה מזה של אפ"מ בגלל תוספת הסיד בהכנתה, וכושר הבופר שלה גבוה אף הוא (פיין, תוצאות לא מדווחות). למרות זאת, pH הקרקע חוזר לערכו שלפני היישום תוך שעות או ימים ספורים (בהתאם למרקם הקרקע ולעומס היישום) לאחר הרטבת הקרקע,



כתוצאה מקרבונציה של עודפי ההידרוקסיל עם פחמן דו חמצני (פד"ח) שמקורו במינרליזציה של הפחמן האורגני הבוצתי (Ben-Yephet et al., 2005; פיין, 2015-ב').

בקרקות המכילות גיר (שהן מרבית קרקעות ארצנו), אין לצפות לשינוי משמעותי בכימיה של תמיסת הקרקע בשלב שלאחר ההתייבבות המחודשת של ה-pH. אין גם לצפות לשינוי משמעותי בין ה-pH של הקרקע לפני היישום ל-pH שלאחריו, הואיל והפחמות הנוצרות תוך ניטרול עודפי ההידרוקסיל הזמינים הן בשיווי משקל עם הפד"ח שבאטמוספירת הקרקע בדומה לפחמות האנדוגניות וה-pH בתמיסה בשיווי משקל עם גיר הוא 8.4 בקירוב. תיאורטית, בקרקעות חסרות גיר השינוי עקב יישום אפר או במס"א עשוי להיות מהותי עקב הסטת ערך ה-pH של הקרקע לכזה המצוי בשיווי משקל עם גיר ולפיכך יכול האפ"מ לשמש לטיוב קרקעות חמוצות. כאמור, תופעות אלו לא נצפו על ידינו בקרקעות ישראל (לדוגמא - פיין, 2015-ב').

עליית מליחות הקרקע: קיימים אפ"מים מלוחים שיישומם בשדה עלול לגרום נזק לגידולים חקלאיים. לדוגמה, Manoharan וחוב' (2010), שבדקו השפעת בורן על צימוח ויבול זרעים בקנולה כתלות בעומס היישום של 11 אפ"מים שונים באוסטרליה, מצאו כי המליחות של אחד מהם הייתה הגורם הבעייתי העיקרי. אפ"מ ובמס"א בישראל (טבלה 1) אינם מלוחים יחסית (כנ"ל ביוון: Matsi & Keramidas, 1999), ובכל מקרה הבמס"א מלוחה פחות מבוצות אחרות (כולל בוצת המוצא לבמס"א) או מזבלי בע"ח. עם זאת, נראה כי מליחות הקרקע לאחר יישום במס"א (למטרות הדברה של מחלות שוכנות קרקע), גרמה לעיתים לעיכוב הצימוח ולפיכך יש לברר מהם המומסים גורמי המליחות בבמס"א. כלורידים וסולפטים אינם נתרמים ע"י הבוצה מאחר שהם נשטפים ע"י מי-הקולחים בתהליך הטיהור, כלורידים גם אינם מצויים באפ"מ אך סולפטים יכולים להימצא בו (ריכוזם לא נבדק). להערכתנו ועל פי מדידות שביצענו, המרכיב העיקרי התורם למליחות לאחר היישום בקרקע הן חנקות הנוצרות לאחר המינרליזציה של החנקן האורגני של מרכיב הבוצה. זו הייתה גם מסקנתם של Veeresh et al. (2003).

3. עקרונות החישוב הכלכלי

בצד היתרונות הכלכליים לשימוש בבמס"א, קיימות עלויות סביבתיות כמו למשל, עלות מניעת המלחת הקרקע. כמו כן עדיין לא הושלם תהליך האישור הרגולטורי (באחריות משרד הבריאות) לשימוש בבמס"א לגידול גידולים מסוימים ועד אשר יתקבל אישור זה קיימת עלות הנובעת מהגבלת חלופות הגידול. החישובים שלהלן ייתחסו להיבטים שונים של השימוש החקלאי באפר אך יושם דגש על הערכת העלויות מול התועלות הכרוכות בשימוש החקלאי בבמס"א – דהיינו שילוב האפ"מ עם בוצת שפכים וסיד כתוסף לקרקע.

החישוב הכלכלי נשען על תחשיב שיאפשר להציג בפני מקבלי ההחלטות והחקלאים את העלויות מול התועלות הנובעות משימוש באפ"מ במונחים כספיים של הכנסה והוצאה לדונם. אפ"מ הוא תוצר לוואי של ייצור החשמל ולפיכך עלות הייצור שלו היא מרכיב בעלות החשמל. מחיר שוק לאפ"מ נובע



מיתרונות השימוש באפר לצרכן (שימוש בתעשייה, בניין או חקלאות), עלות ההובלה, עלות הפיזור ומידת הנדירות (מחיר צל). לפיכך, כשהביקוש לאפ"מ גבוה, מחירו עולה וכשאינן ביקוש, חברת החשמל תצטרך לשלם עבור סילוקו. לצד ההכנסות והעלויות הישירות המוטלות על הצרכנים - התעשייה או החקלאות, יש להביא בחשבון את מידת ההשפעה הסביבתית (תועלת ונזק), ככל שהיא קיימת, הנובעת מהשימוש במוצר. אמידה של עלויות סביבתיות (כמו גם של תועלות סביבתיות) קשורה בעיקר לכשלי שוק. אלו נובעים מכך שחלק מההשפעות הסביבתיות של שימוש במוצר אינן נלקחות בחשבון במחיר השוק שלו ובדרך כלל קשה לאמוד את ערכן הכלכלי. בחרנו לאמוד עלויות מול תועלות אלו בצורה של תחשיב חקלאי. תחשיב זה הוא כלי כלכלי-חקלאי יישומי מקובל לבדיקת כלכליות של גידול חקלאי. שיטה זו סוכמת הכנסות מול הוצאות ליחידת ייצור של דונם אחד. הרעיון העומד מאחורי השיטה הוא זהות הנחות לגבי כלל הגידולים, מחירים זהים לתשומות של עבודה, מים, טכנולוגיות, דשן וכו'. השקעות חד פעמיות הנעשות בתחילת הגידול כמו בניית בית אריזה, רכישת ציוד וכו' מפוזרות על פני כל תקופת השימוש בתשלומים שנתיים (PMT) באופן דומה לשיטה החשבונאית של פחת הנהוגה בחישוב תשלומי המיסים. שיטת חישוב זו מאפשרת לחקלאים ולממשלה השוואה של כדאיות כלכלית של גידולים שונים. חסרונה בכך שהיא אינה נכנסת לכל הפרטים הנוגעים לתנאים מקומיים (מחיר מקומי, קרקע באזור או איכות המים שבו). כאמור, המודל לחישוב שאומץ במחקר זה מחשב את העלות הסביבתית באמצעות תחשיב המקובל לבדיקת כדאיות גידול חקלאי כאשר העלויות מול התועלות הסביבתיות של יישום אפ"מ כמרכיב בבמס"א מוצגות במונחים של תחשיבי הכנסות והוצאות לדונם לשנה. ההנחה היא כי יישום במס"א בשדה נתון יבוצע אחת ל- 5 שנים בעוד שתועלות מסוימות ממנו יוגבלו רק למשך השנה הראשונה והשנייה (למשל תרומת הדשן) ואחרות תמשכנה לאורך כל התקופה. ההוצאות חושבו בשיטה הדומה לשיטת חישוב ההשקעות, דהיינו בתשלומים שנתיים עם שער ריבית קבוע, לתקופה הנהוגה בין שני יישומי במס"א – כלומר 5 שנים.

נדגיש כי באשר לעלויות סביבתיות קיימים שני סוגים של אי בהירות: ראשית, האם רשימת היתרונות והחסרונות ביישום האפר היא אכן שלמה? שנית, קיימות גישות שונות לחישוב הערך הכלכלי של הנזקים והיתרונות הסביבתיים. בשיטה שאומצה, הוערכו היתרונות או החסרונות בעזרת התייעצות עם אגרונומים מומחים והערכותיהם תורגמו למונחים של שקל לדונם בנוהל של תחשיב כלכלי.

4. השימוש באפר פחם בישראל – סקירה כללית

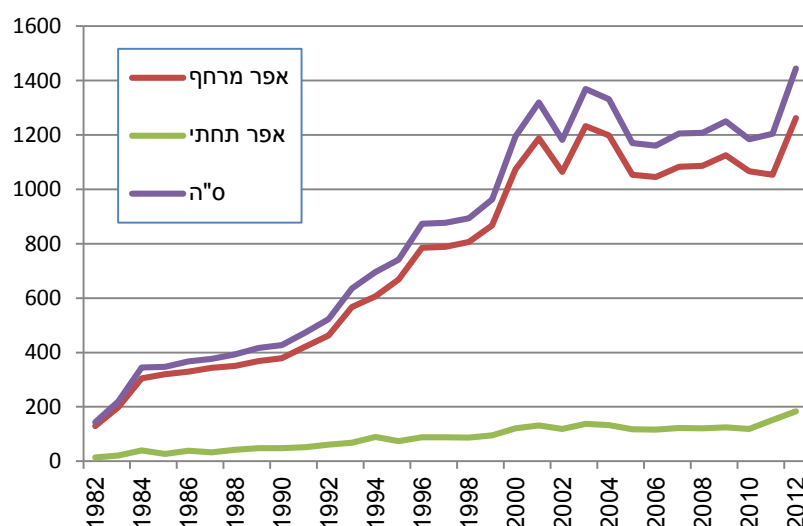
בפרק זה נציג סקירה כללית על התפתחות השימוש באפר פחם בישראל, השימושים הקיימים ותחזית שימוש לפי מוצרים עד לשנת 2026 שהוכנה ע"י מנהלת אפר הפחם. פרק זה משמש כבסיס להבנה של מגוון האפשרויות להפניית האפר לשימושים שונים.

4.1 התפתחות השימוש באפ"מ: רוב החשמל בעולם מיוצר בתחנות כוח אלקטרומכניות המופעלות על ידי דלק פוסילי, כגון תוצרי זיקוק נפט, גז טבעי או פחם. בישראל ייצרו חשמל בעיקר מפחם ולאחרונה חל מעבר חלקי לשימוש בגז, אך הליך זה נתקל בקשיים בעיקר בגלל ההסכמים מול

המדינות המספקות והתדיינות שלא הסתיימה מול החברות הזכייניות על אופן ניהול תגליות הגז בים התיכון. בכל מקרה, על פי מדיניות עדכנית של משרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים, מרכיב הפחם בייצור החשמל לא יפחת מ-40%. תוצר לוואי של שריפת הפחם בתהליך ייצור החשמל הוא אפר, חלקו בגודל חלקיקים גדול מזה של חול (כ-10%) ורובו (כ-90%) במרקם אבקתי (אפ"מ). בשנים עברו פינו לים כמות גדולה מהאפר שנוצר וביתרתו הוקמה סוללה סביב תחנת הכח אורות רבין. החל מ-1982 מנוצל האפ"מ לשימושים שונים, בעיקר כתוסף למלט ובטון. באיור 1 מוצגת התפתחות ייצור אפר הפחם בארץ לאורך השנים. חשוב לציין כי האפר, רובו ככולו אינו משמש לחקלאות ויעדי השימוש מוצגים בטבלה 2. בעוד שבתחילת שנת 1982 נעשה שימוש בפחות מ-200 אלף טון הרי שבשנת 2012 כבר יוצרו ונוצלו כ-1400 אלפי טון אפר (איור 1).

איור 1: התפתחות עם הזמן של הייצור הכולל של אפר פחם

**התפתחות ייצור אפר הפחם 1982-2012
(אלפי טון חומר יבש)**



מקור: אתר מנהלת אפר הפחם, 10 אפריל 2013, http://www.coal-ash.co.il/tab_prod.html

4.2 שימושים באפר פחם: כמויות היצע (דהיינו ייצור) מול ביקוש אפר פחם מוצגות בטבלה 2. סך השימושים באפר פחם בשנת 2013 עמד על 1,250 אלפי טון מתוכם 1,054 אלף טון אפ"מ ו-197 אלף טון אפר תחתית. בשנת 2013 עמד הייצור על 1,190 אלף טון אפ"מ ו-197 אלף טון אפר תחתית (אתר מנהלת אפר הפחם, 2014).



טבלה 2: שימושים באפר פחם (אלפי טון)

שנה		2013
שימושים	מרחף	תחתי
מלט	537	108
בטון	486	0
מוצרי בטון	9	13
בלוקים
תשתיות	0	60
חקלאות	0	16
ייצוב בוצות	22	0
תעשייה	0	0
ביקוש קיים/חזוי	1054	197
ייצור	1190	197

מקור: מנהלת אפר הפחם 20.1.14 - http://www.coal-ash.co.il/forecast_hebrew.html
שנת 2013 שימושים בפועל.

5. שימושי אפר פחם המקובלים היום בחקלאות

בחקלאות משתמשים הן באפ"מ הן באפר התחתית. אפר תחתית משמש בעיקר כמצע גידול במשתלות ובחממות או/ו כרפד לבעלי חיים ואפ"מ משמש בעיקר בייצוב בוצת שפכים כהכנה לשימוש בה כתוסף לקרקע. להלן מוצגת תמצית ממצאי מחקרים על שימושים מקובלים באפר הנוגעים לגידולים המתאימים לישראל, הערכה כללית ראשונית על כמויות אפשריות לשימוש חקלאי ומחירי המכירה הנהוגים היום בארץ.

5.1 מצע מנותק לגידול צמחים: ניתן להשתמש באפר פחם תחתית מנופה (גודל גרגר עד כ - 8 מ"מ) בתערובת עם קומפוסטים ממקורות שונים ובלעדיהם כמצע מנותק לגידול צמחים. למצע יחס אויר מים רצוי, מוליכות ותאחיזת המים הנדרשים, ניקיון ממחלות ועשבי בר ויציבות במרקם (אתר מנהלת אפר הפחם, על סמך סדרת מחקרים של הפקולטה לחקלאות החל משנת 1980).

5.2 רפד דק לבעלי חיים: באפר תחתית משתמשים גם כרפד לבעלי חיים. הסכנות הפוטנציאליות משימוש זה באפר הפחם שנחקרו, כללו העברת מחלות מהרפד לבעלי החיים או לאדם דרך מוצרים מן החי והעברת מתכות כבדות ומזהמים אחרים ולהלן הממצאים:

מניעת מחלות בבעלי החיים - בניסויים שנעשו ע"י שרות ההדרכה במשרד החקלאות (יוסלביץ, אתר מנהלת אפר הפחם, 2014) נבחן ניצול אפר תחתית כתחליף לרפד נסורת בלול פטם, רביה כבדה ולול מטילות. התוצאות הראשוניות היו טובות בכל הנוגע לתפוקה, בריאות ורמת מזיקים, כלומר לא נצפה נזק בתחומים אלו. בעיה שדווחה הייתה התרוממות אבק במחצית הראשונה של מחזור הפטם. בלול מטילות נראה כי האפר תורם להקטנת חלחול של תשטיפי המזהמים אל הקרקע, לעליה בספיגת הנוזלים ולהפחתת ריכוזי הניטרטים והכלורידים.



סיכונים בריאותיים לבני האדם - בבדיקות שנעשו בפרות ובתרנגולות שרבעו על רפד אפר פחם (קרן, כץ, אתר מנהלת אפר הפחם, 2014), נבדקו ריכוזי מתכות ויסודות רדיואקטיביים בחלב, ברקמות של פרות ובתרנגולות. הריכוזים שהתקבלו היו נמוכים מהערכים המרביים המותרים על פי דרישות רשות המזון במשרד הבריאות. נבדקה גם הימצאות באפר של מזהמים אורגניים לרבות דיאוקסינים ופוראנים, חומרים הידועים כרעילים ומסרטנים. אולם, רק ריכוז זניח של חומרים אלו נמצא באפר הפחם ובהתאם, ממצאי הבדיקות הראו כי ריכוז המזהמים הללו בחלב פרות שרבעו על רפד האפר אינו חורג מהתכולה המותרת בתקן האירופאי המחמיר ומכאן שאינו מהווה סיכון בריאותי כלשהו.

5.3 ייצוב בוצת שפכים: שימוש מקובל באפר הפחם המרחף הוא לייצוב בוצה. בוצת שפכים עירונית (Municipal Sewage Sludge) היא מוצר לוואי מתהליך הטיהור במתקנים לטיהור שפכים (מט"ש). הבוצה מורכבת בעיקר מחומר אורגני, אך מכילה גם רמות קורט של מתכות כבדות וחיידקים גורמי מחלות. הבוצה מופרדת ממתקן הטיהור במצב נוזלי ועוברת לפני סילוקה תהליכי הסמכה, סחיטה וייצוב. הייצוב, לאמור – הקטנת ריכוז החומרים האורגנים הנדיפים ותכולת הפתוגנים, מתבצע באחת מכמה שיטות, לרבות תהליך איכול אנאירובי או אירובי. ניתן לייצר בוצה באיכות טובה (כלומר בוצה שריכוז החומרים המזיקים והפתוגנים בה עומד בתקן הנדרש) והמתאימה לשימוש חקלאי, בעזרת תוספים בסיסיים הגורמים לעליה ב - pH ולהתחממות לטמפרטורת פיסטור המשמידה את הפתוגנים יחד עם הוספת מלאנים המגדילים את תכולת המוצקים ויוצרים מרקם פריך ונוח לפיזור בשדה. בוצה מיוצבת ניתנת לשימוש כתוסף קרקע המהווה מקור דשן משום שהיא עשירה בחומר אורגני וביסודות הזנה לצמחים.

בעקבות הנחיית המשרד להגנת הסביבה להפסיק את הזרמת בוצת השפכים של מט"ש השפד"ן לים, נבחן תהליך המנצל אפ"מ בתערובת עם סיד לייצוב הבוצה בטכנולוגיית N-Viro (מסינג, 2000). תוצר תהליך זה הוא הבמס"א. בטכנולוגיית ה - N-Viro נעשה שימוש בתוספים אלקליים לחיטוי הבוצה מפתוגנים כדוגמת חיידקים, פטריות וזרעי עשבים רעים ע"י פיסטור הנובע הן מהעלאת הטמפרטורה והן מהעלאת רמת ה - pH. שיטת ה - N-Viro מביאה את הבוצה לרמת האיכות בוצה סוג א' המותרת לשימוש כתוסף לקרקע בגידולי מאכל לבני אדם. בבדיקות מעבדה שנערכו בצמחים שגודלו על תערובות אפ"מ ובוצה לא נתגלו חריגות מהמותר בריכוזי המתכות הכבדות וכל התערובות עמדו בדרישות בוצה סוג א'.

6. ביקוש והיצע לאפ"מ בחקלאות

בפרק זה נסקור את פוטנציאל הביקוש לאפר בחקלאות בהתייחס לסוג השימוש האפשרי ומחירי השוק בהם מסופק אפר הפחם המרחף היום (בעיקר לתעשייה). מדובר בחישוב כללי בלבד המיועד להערכת פוטנציאל השימוש. בטבלה 3, מוצגות הערכות ביקוש לאפ"מ בחקלאות, בהנחה של העדר מגבלה רגולטרית לכל שימוש



חקלאי שהוא. הפוטנציאל לשימוש אפשרי מוצג על פי יעדי ביקוש. כפי שניתן לראות, הביקוש השנתי הפוטנציאלי לשימוש בחקלאות הן לאפר התחתית (117 אלף טון), והן לאפר המרחף (1,140 אלף טון) עולים על היצע האפר הזמין (ייצור לעומת שימושים שאינם חקלאיים) דהיום (טבלה 2), כך שלמעשה אין מגבלת ביקוש לשימוש באפר אם יוסרו אותם מכשולים רגולטוריים שעדיין קיימים היום.

כאמור, גם בחישוב השמרני המסוכם בטבלה 3, פוטנציאל הביקוש עולה על ההיצע. אפר תחתית משמש היום כתחליף לטוף בעיקר במצעים מנותקים לגידול פרחים וירקות ושימושי האפר המרחף הם בעיקר לייצוב בוצה. קיים פוטנציאל רב לשימוש באפר כמצע לגידול בתעלות ולייצוב קרקע, למשל כתוסף מייצב לקרקעות קירטוניות (כגון קרקעות באזור מנשה). פוטנציאל הביקוש השנתי לאפר הפחם מחושב על ידי הכפלה של כמות האפר המיטבית המיושמת לדונם במספר הדונמים שאליהם מתייחס היישום וחלוקה במספר השנים בין יישום ליישום.

טבלה 3: פוטנציאל ביקוש לשימושים הקשורים לחקלאות

השימוש	כמות אפר (טון לדונם)	שנים בין יישום ליישום	מספר דונמים 2013 ¹	ביקוש שנתי בטונות
אפר תחתית				
מצע תחתית למשתלות	33	10	1,131	3,732
מצעים מנותקים לירקות	55	10	9,000	49,500
מצעים מנותקים לפרחים	88	10	6,000	52,800
מצע מנקז כתחליף למקטע הגס	100	10	1,100	11,000
ס"ה ביקוש פוטנציאלי לאפר תחתית				117,032
אפר מרחף				
אפר בבמס"א המוספת ²	1	5	450,000	90,000
מצע גידול בתעלות עם בוצה ³	20	10	10,000	20,000
ייצוב שטחים רגישים לסחיפה עם בוצה ⁴	90	15	140,000	840,000
ייצוב קרקעות קירטוניות עם בוצה ⁵	95	10	20,000	190,000
ס"ה ביקוש פוטנציאלי לאפר מרחף				1,140,000

הסברים לטבלה 3

- ¹ שטחי גידולים לפי דוחי חקלאים למשרד החקלאות ב- 2013.
- ² שטחים המתאימים לתוספת במס"א לפי שטחי חיטה בבעל בנגב.
- ³ שיטת הגידול בתעלות עם טוף מקובלת היום במנגו אבל נבדקת גם בגידולים אחרים, מוצע לבחון גידול באפר תחתית כתחליף לטוף.
- ⁴ שטחים לייצוב בשדה עם בוצה הוערכו על פי חישוב שטחי ג"ש בסכנת סחיפה חמורה בעמק יזרעאל ובגליל התחתון (הדס וחוב' 2009).
- ⁵ תוספת לקרקע קירטונית כדוגמת הקרקע באזור מנשה.

פוטנציאל הביקוש החקלאי עולה בהרבה על היצע האפר שאינו מנוצל לשימושים אחרים, אך המגבלה העתידית העיקרית היא המחיר הצפוי. אפ"מ הוא תוצר לוואי שעל חברת החשמל למצוא לו

שוק או לסלקו. לפיכך, הנחת היסוד היא כי המחיר בחצר היצרן הוא אפס. בטבלה 4 מובאות העלויות הידועות היום להובלה. מחירי ההובלה לשדה החקלאי נעים בין 0 שקלים, (שמשמעותו כי לצורך השימוש נדרשת נכונות החקלאי להשתמש בלבד), ועד 70 שקלים לטון עלות הובלה ל - 50 ק"מ. המחיר של 70 ₪ לטון גבוה מהרווח הידוע לדונם בגידולי שדה בבעל ובמיוחד באזור הנגב, ולכן יש להניח שעבור גידולי השדה בשטח פתוח בבעל לא יירכש האפר במחיר זה. יחד עם זאת בשל החובה המוטלת על השפד"ן לפנות את הבוצה יש להניח כי עלות ההובלה תועמס בחלקה הגדול על הספק ולא על החקלאי.

טבלה 4: מחירי מכירה הנהוגים היום לאפר פחם

הערות	המשלם	מחיר (שקל למ"ק) ³	מחיר (שקל לטון) ³	
<u>אפר פחם מרחף</u>				
עלות ייצור אפ"מ ¹	חברת חשמל	0	0	
חלופת אפס- סילוק לים ²	חברת חשמל	40	36	
חלופה 1 אחסון ביניים ⁴	חברת חשמל	50	45	
מחיר מכירה ליצרני בטון ⁵	יצרן הבטון או המלט	71	62	
<u>אפר תחתית</u>				
עלות ייצור אפר פחם תחתית	חברת חשמל	0	0	
חלופת אפס- סילוק לים	חברת חשמל	40	30	
חלופה 1 אחסון ביניים	חברת חשמל	50	37	
מקטע גס ⁶	המשווק	60	36	
מקטע דק ⁷	החקלאי	54	45	

הסברים לטבלה 4

- עלויות ייצור אפ"מ מתומחרות במחיר אפס (ללא עלות), כי האפר הוא תוצר לוואי לייצור חשמל, כלומר חומרי הגלם והוצאות התפעול מוטלות על ייצרן החשמל.
- חלופת "האפס" לסילוק האפר היא סילוק לים - במקרה זה העלות היא הוצאות ההובלה של 10-15 דולר לטון, אך בפועל בישראל וברוב מדינות העולם אין היתר לסילוק לים. במקרה של הצטברות עודפים תיושם חלופת אחסון הביניים.
- ההנחה היא שבאפ"מ 1 טון שווה לכ - 1.15 מ"ק ושבאפר תחתית 1 טון שווה ל 1.33 מ"ק.
- אחסון ביניים - כיום מקובל לאחסן אפר עד חודש או חודשיים בשנה. בשנת 2013 אחסנו כ- 50,000 טון של אפר מרחף בעלות אחסון חד פעמית של 50 ₪ לטון. לפי עמרי לולב, מנכ"ל מנהלת אפר הפחם בישראל, בשנים האחרונות לא היה שימוש לחלופה זו בשל עודף ביקוש. בהצטברות הקטנה של אפ"מ שנאספת לעיתים מהממגורות בסופי השבוע נעשה שימוש חוזר לייצור קלינקר.
- מחיר מכירה של אפ"מ ליצרני הבטון נאמדת 25 עד 27 שקל לטון, עלות ההובלה חלה גם היא על יצרני הבטון ונאמדת בין 30 ל- 60 ₪ לטון תלוי במרחקי ההובלה.
- המקטע הגס המשמש כתשתית בדומה לטוף, עלותו למשווק 60 ₪ לטון והמשווק מוכר לחקלאי או למשתלה ב- 150 ₪ לטון. באשקלון פועלת נפה המפרידה את אפר התחתית למקטע גס ומקטע דק. במקטע הגס 1 טון שווה לכ - 1.66 מ"ק.
- המקטע הדק מיועד היום למוצרי בניה ורפד לפרות. כאשר הוא משמש כרפד עלותו כ- 45 שקל למ"ק, למוצרי בניה מגיע עד 65 ₪ למ"ק. במקטע הדק 1 טון שווה לכ - 1.20 מ"ק.

7. נתונים הנוגעים לחישובי עלות/תועלת של שימושי האפר בחקלאות

7.1 שימוש באפר פחם בתעלות הזנה בבתי צמיחה: אפ"מ בשילוב עם בוצה משמש למילוי תעלות הזנה שמשמשות כמצע לגידולים חקלאיים ולשימושים דומים אחרים. בטבלה 5 מוצגת עלות האפר המרחף כמרכיב בתערובת עם בוצה ועלות אפר תחתית במחירי השוק של 50-60 ₪ למ"ק, לעומת קומפוסט בקר, 80 ₪ למ"ק, וטוף שמחירו נע סביב 190 ₪ למ"ק. מחירי האפר המוצגים הם, כאמור, מחירי שוק ובתנאים של עודפי אפר ניתן יהיה להתמקח על העלות לחקלאי. לצורך השוואה, מחיר השוק של קומפוסט בוצה הוא כ- 40 ₪ למ"ק.

טבלה 5: עלויות (כולל הובלה) למטרות מילוי בשטחי חקלאות (₪/מ"ק מחירי 2014)

סוגי אפר	עלות טוף ¹	עלות קומפוסט זבל בקר ¹	עלות במס"א	עלות אפר
אפר פחם תחתי				
מצע תחתי למשתלות	190	80	לא רלוונטי	60
מצע מנותק בירקות ופרחים	190	80	לא רלוונטי	60
אפ"מ				
טיוב קרקע	לא רלוונטי	80	50	לא רלוונטי
ייצוב שטחים רגישים לסחיפה	לא רלוונטי	80	50	לא רלוונטי
מצע לניקוז (תעלות)	190	80	50	לא רלוונטי

¹. מחירי טוף וקומפוסט הם מחירי שוק מקובלים, כולל הובלה לנגב (הטוף מיוצר בגולן).

7.2 שימוש באפ"מ כתחליף דשן בחקלאות: השימוש העיקרי של אפ"מ בחקלאות הוא כמרכיב בבמס"א. בפרק זה מוצגת השוואה כלכלית בין תוספים אורגניים לבין דשנים כימיים. טבלה 6 מציגה צריכה ממוצעת של דשן בגידולים שונים ועלות הדישון הממוצעת לדונם. צריכת הדשנים היא לפי תחשיבי שה"מ. עלות ליחידת דשן (התחמוצות של P ו-K) לפי מחיר השוק של דשנים כימיים לאחר הנחה על כמות, מותאם ליחידות החנקן, אשלגן, זרחן המצויות בתרכובותיהם. כצפוי, העלות הגבוהה ביותר לדישון היא של ירקות החממה - 1,481 ₪ לדונם והעלות הנמוכה ביותר היא בגידולי השדה בבעל - 77 ₪ לדונם. סביר כי על אף העלות הגבוהה של הדישון בחממות, לא יהיה בהן שימוש משמעותי בבמס"א, בין השאר בגלל מרחקי ההובלה לרכזי החממות העיקריים, למשל בבקעה ובערבה. לעומת זאת, במס"א מחליפה כבר היום דשן בגידולי השדה והבקוש עולה בהרבה על ההיצע.

בטבלה 7 מוצגת תכולת יסודות ההזנה העיקריים בזבלים אורגניים שונים ששימושם מקובל בחקלאות ישראל. בזבלים האורגניים שמקורם מפרש בעלי חיים אחוז החנקן הוא הגבוה ביותר וכלל שמוסיפים יותר אפר, אחוז החנקן וכמוהו גם אחוזי האשלגן והזרחן פוחתים. הזמינות לצמח של יסודות ההזנה פחותה מהמרב האפשרי בכל הזבלים האורגניים מכיוון שיישום הזבל האורגני מתבצע בתחילת עונת הגידול ולא לפי צרכי הגידול לאורך השנה.



טבלה 6: יישום ממוצע של דשנים לדונם לשנה (ק"ג/ד' יחידות דשן)

ענף חקלאי	שטח (ד') ¹	חנקן	זרחן	אשלגן	עלות ² (ש"ד')
ירקות שטח פתוח	533,400	33	8	37	408
ירקות חממה	79,300	116	32	142	1481
פרחים בחממה	18,400	64	12	53	704
פרחים בשטח פתוח	22,300	21	7	10	223
גידולי שדה בהשקיה	481,600	18	4	9	182
גידולי שדה בבעל	1,213,000	8	3	0	77
ממוצע/ס"ה ארצי	2,348,000	20	4	17	223

¹הדס וחובריה, 2013

²מחירי שוק המקובלים בשנת 2013 ליחידות דשנים כימיים היו :

מחיר יחידת חנקן (N) 7.19 שקל לק"ג

מחיר יחידת זרחן (P) 5.79 שקל לק"ג

מחיר יחידת אשלגן (K) 3.24 שקל לק"ג

טבלה 7: תכולת יסודות דשן בזבלים אורגניים שונים¹ (אחוז על בסיס משקל יבש)

סוג הזבל	חנקן	זרחן	אשלגן
במס"א	0.7	0.36	0.55
קומפ' אשפת ערים	1.4	0.5	0.6
בוצת שפכים	2.7	1.5	0.6
זבל הודים	4.0	1.8	2.7
זבל עופות	3.8	1.3	2.0
זבל רפת	1.9	0.9	1.8
כופתיות	3.9	3.2	6.1
מפרדה	1.9	0.6	1.2
קומפוסט זבל בקר	1.7	0.9	1.9

¹תכולת יסודות הזנה לפי בן הגיא וחוב' (2012). נתוני הבמס"א מטבלה 1 לעיל.

בניגוד לדשנים שכל אחד מהם ניתן ליישום בנפרד לפי תצרוכת הצמח, זיבול אורגני מוסיף בעת ובעונה אחת את כל תכולת הזבל, בהתאם להרכבו, שאינו מאוזן עם תצרוכת הגידול. כתוצאה מכך, עלול להווצר עודף במרכיב כלשהו וחסר באחר. יישום זבלים בגד"ש מדי שנה לפי עומס השקול להוספת 50 ק"ג N/ד' לשנה (העומס המרבי המותר ליישום בוצות שפכים) לא הספיק לאורך זמן לצרכי תירס מספוא וחיטה בדו-גידול, והיבולים פחתו משנה לשנה (פיין וחוב', 2014). הכמות המקובלת של במס"א המוספת לדונם היא 5 מ"ק (כ-3.5 ט' חומר יבש; כמחצית הכמות המרבית המותרת להוספה לשנה במגבלות החנקן) בהוספה בודדת בגידולי שדה ואין מקובלת הוספה מידי שנה.



בטבלה 8 מוצגת דרישה פוטנציאלית לבמס"א בארץ, לו היו די בוצה ואפ"מ זמינים ואם במס"א הייתה משמשת כתחליף לדשן כימי. מהיותה בוצה סוג א', ניתן לכאורה ליישם במס"א בכל גידולי השדה בישראל, ולשם כך היו נדרשים כ-2.4 מיליון טון אפ"מ/שנה, כמות הגדולה בהרבה מזו הקיימת או המתוכננת לשימוש בייצוב בוצות או בחקלאות בכלל (190-170 אלף טון; טבלה 2). לפיכך, ברור כי המגבלה העיקרית של שיווק אפ"מ לשימוש חקלאי אינה גודל השוק הפוטנציאלי הקיים בחקלאות.

טבלה 8: ביקוש פוטנציאלי לבמס"א ולמרכיביה* בגידולי שדה (לפי 5 מ"ק/ד'שנה**)

	היקף שטח (דונם)	דרישה פוטנציאלית לבמס"א (אלפי טון)	מזה בוצה (אלפי טון ח"י)	מזה אפ"מ (אלפי טון)
גידולי שדה בהשקיה	481,600	1,700	383	1,149
גידולי שדה בבעל	1,213,000	4,250	965	2,895
סך כולל	1,694,600	5,950	1,348	4,044

* על פי הנחה של יחסי משקל לפי חומר יבש, 23% בוצה (בבוצה 18-20% מוצקים על פי משקל), 68% אפר, 8% סיד.

** 5 מ"ק לדונם הם שווי ערך ל-3.5 טון חומר יבש לדונם.

8. חישוב עלות מול תועלת של יישום אפר פחם בחקלאות

ערכה העיקרי של הבמס"א בחקלאות הוא כתחליף דשן וכמטייב קרקע. כיום מקובל שלבמס"א אין עלות בראש השטח, והעלויות לחקלאי הן של הפיזור וההצנעה בלבד מה שעושה את השימוש בבמס"א לכדאי ביותר (פיין, 2015). מבקרי השימוש החקלאי בבמס"א מעלים אפשרות של השלכות בלתי רצויות לטווח הארוך על הקרקע החקלאית. אולם, בעוד שקיים מספר רב של ממצאים המעידים על התועלת לחקלאות ביישום במס"א, אין ממצאים המעידים על סיכון פוטנציאלי לטווח הקצר או הארוך של שימוש חקלאי מושכל בתוסף זה.

בבדיקות העלות-תועלת נלקחו בחשבון השימוש החקלאי בבמס"א והשפעותיו האפשריות על הסביבה הן בטווח הקצר והן בטווח הארוך. הניתוח הכלכלי, מוצג, כאמור, במונחים של "תחשיב גידול חקלאי לדונם", שיטה המאפשרת חישוב תחת אותן הנחות הן של התועלות והן של העלויות. נתונים לתחשיב אומצו מתוצאותיהן של עבודות המחקר הרלוונטיות (נתונים מהארץ נלקחו בעיקר מעבודותיהם של פיין וחוב' 2014, 2015 ועוד) ומסכומי ראיונות עם האגרונומים מר אברהם זילברמן ומר אשר איזנקוט משרות ההדרכה והמקצוע במשרד החקלאות, מר עמוס עובדיה אגרונום פרטי, ומר אריה בוסק ממגדלי דרום יהודה.

בביצוע החישובים נלקחו בחשבון ההנחות הבאות:



1. אפ"מ מיושם כמרכיב של במס"א במנה שאינה גבוהה מזו המותרת על פי חוק (עד 50 ק"ג N כליל'ד' לשנה שהם כ-10 מ"ק במס"אד');
2. לצורך התחשיב הונח יישום בשטח נתון אחת ל-5 שנים (הגם שאין סיבה שהיישום לא ייעשה כל שנה, סביר להניח שלא תתבצע הוספה חוזרת באותו שדה מידי שנה);
3. הכנסות והוצאות מחושבות לדונם לשנה. הכנסות או הוצאות המתמשכות על פני מספר שנים חושבו על פי כללים חשבונאים רגילים של פריסת העלות ל-5 שנים בריבית היוון (פריסת תשלומים כזו מוגדרת במונחים כלכליים כ - "PMT");
4. הערכת ההוצאות וההכנסות היא בשקלים על פי ממוצע המחירים ב-2014. שער הריבית להיוון - 7%, לפי ריבית השוק המקובלת להשקעות חקלאיות.
5. לכל תועלת או נזק נקבע שיעור חשיפה (או שיעור סיכון בהתאמה) שהוא שיעור החשיפה לתועלת או לנזק אשר עלול להיגרם עקב שימוש נתון בבמס"א. במקרים בהם שיעור החשיפה אינו ידוע, הונח שיעור חשיפה השווה ליחס שבין גודל השטח לו מיוחסים התועלת או הנזק הרלוונטי לכלל השטחים המיועדים ליישום הבמס"א. במקרים שבהם קיים מידע המאפשר אומדן קרוב יותר, אומץ שיעור חשיפה לפי הבנת המחקרים בהסתמך על המלצות האגרונומים שהוזכרו לעיל.

טבלה 9 מסכמת את ניתוח העלות-תועלת של שימוש ארוך-טווח (לדורות) בבמס"א בחקלאות. הטבלה מתארת סיכום של נזקים פוטנציאליים מול תועלות לדונם. צורת החישוב של כל פריט בטבלה מתוארת בהרחבה בהמשך. הטבלה מציגה רשימה כללית של תועלות ונזקים וכאמור, מכיוון שחלקם מתייחס רק לשטחים או אזורים מסוימים, ערכם מנורמל לפי מקדם סיכון (או חשיפה) המוערך על פי ההיקף היחסי של השטח אליו מתייחס הפריט מתוך סך כל הקרקעות המיועדות ליישום במס"א או לפי סיכויי ההתממשות של אירוע נזק או תועלת נתון.

טבלה 9: תועלות ועלויות משוקללות של יישום במס"א בקרקע חקלאית (ש'אד' במחירי 2014)¹

תועלות	ש'אד' (+)	עלויות	ש'אד' (-)
העלאת תכולת המים בקרקע	1	העלאת מליחות הקרקע	2
הפחתה בכמות מי-השקיה	5	תוספת בורון	3
שיפור תכונות פיזיקליות	27	העלאת pH הקרקע	2
העלאת טמפרטורה בקרקע	5	צמצום חלופות גידול במהלך ניטור להוכחת העדר הצטברות מתכות כבדות ²	6
החלפת דשן כימי	62	הקטנת זמינות זרחן ויסודות קורט	2
הקטנת שטיפה חומרי דשן	8	צמצום חלופות גידול במהלך ניטור להוכחת העדר פעילות רדיואקטיבית ²	7
הפחתת גורמי-מחלה	4		
תוספת יסודות קורט זמינים	12		
ס"ה תועלת משוקללת	124	ס"ה עלות משוקללת	22

¹ ערכי התועלת והעלות המובאים בטבלה הם ערכים משוקללים על פי מקדם החשיפה, הנקבע על פי החלק מכלל הקרקעות המטופלות בבמס"א שעלות או תועלת נתונים מתייחסים אליו ו/או על פי סיכויי ההתרחשות של אירוע נזק או תועלת. כל פריט בטבלה יכול לקבל ערך שונה, גבוה או נמוך יותר במקרה נתון, בהתאם לאזור, לקרקע או לגידול.

² למרות שהוכח במדידות חוזרות ונשנות ומעל לכל ספק כי אין סכנה של הצטברות יסודות רעילים או רדיונוקלידים ביבולים הנאספים מקרקע המועשרת באפ"מ או במס"א, מבוצע ניטור על פי דרישות רגולטוריות של משרד הבריאות, שנועד לוודא לפני מתן אישורו לשיווק תוצרת חקלאית של גידולים בשדה בו הוספה במס"א שעדיין לא קיבלו את אישורו, שאין נזק לבריאות הצבור או הסביבה כתוצאה מיישום הבמס"א. הדרישה הרגולטורית לבדיקת נוכחות יסודות רעילים (ראה סעיף 8.2.3) מחייבת אי גידול גידולי עלים לתקופה של 3 שנים בעלות של 6 ש"ל לדונם לשנה. מכיוון שקיימת חפיפה בתקופת האיסור של שווק אותו סוג גידול לצורך בדיקת יסודות רעילים ולצורך בדיקת רדיונוקלידים, למרות שעלות הוכחת היעדר רדיונוקלידים היא 13 ש"ל לשנה (סעיף 8.2.6), תוספת העלות נטו להוכחת היעדר הרדיונוקלידים היא 7 ש"ל לדונם לשנה.

8.1 תועלות של יישום אפ"מ

החישוב הכלכלי של התועלות או הנזקים היכולים לנבוע משימוש באפ"מ מתייחס ליישום האפ"מ בשילוב עם בוצה (כבמס"א). החישובים הכלכליים בוצעו לפי נוסחאות היסוד בחישובים פיננסיים לחישוב היוון הוצאות והכנסות מתקופות זמן שונות לפי שער ריבית הכולל את הריבית במשק וריבית על הסיכון החקלאי המקובלת בחקלאות בגובה של 7%. על בסיס ההנחה שהפיזור נעשה בשדה נתון אחת ל-5 שנים, תקופת הזמן לחישובי ההון היא, בדרך כלל, 5 שנים.

8.1.1 העלאת תכולת המים בקרקע (WI)

אפ"מ יכול לשפר את תכונותיה של קרקע חולית על ידי הגדלת תאחיזת המים שלה וע"י ייצובה בפני סחיפת רוח. כתוצאה מכך, תוספת האפר עשויה להעלות יבולים. הונח כי תוספת היבול עקב העלאת תכולת המים בקרקע בגידול כלשהו, דומה להבדל ביבול בין אזורים בעלי כמות משקעים שונה. הערכנו שתרומת יישום אפר (בבמס"א) לטווח הארוך תהיה הכפלה בתכולת המים בקיבול שדה (מכ-2.5% לכ-5%; בר-טל, 2009), והגדלה של תכולת המים הזמינים בשכבת היישום בקרקע (20 ס"מ עליונים) בכ-6 מ"מ. מקובל שתרומת הגשם ליבול גרגרים מעל קו הבצורת (200 מ"מ/שנה) היא 1 ק"ג/מ"מ (בתנאי דיסון תקין), ולפיכך העלייה הצפויה ביבול הגרעינים היא כ-6 ק"ג/ד', שהם כ-3% שיוני מההכנסה הנקיה. לפיכך,

$$WI = YR * RE * (0.2) \quad (2)$$

כאשר ה- Yield Rate (YR), שיעור השוני ביבול, הוא 3% מהיתרה השנתית הממוצעת לדונם (RE). החישוב ליתרה שנתית נעשה לפי יתרה לרווח מקובלת בחיטה של כ-180 ש"ד, ו-3% ממנה הם 5 ש"ד. כיוון שהטיוב מתאים לקרקע חולית בלבד, המהווה בהערכה גסה כ-20% מהשטח שבו מתוכננת כיום הוספת במס"א, מקדם החשיפה נלקח כ-0.2 והתועלת המשוקללת בשטח היא לפיכך 1 ש"ל לדונם.

8.1.2 הפחתה בתצרוכת מי השקיה (Q)



העלאה של תאחיזת המים בקרקע בתוספת אפ"מ מאפשרת חיסכון במי ההשקיה. לצרכי כימות כספי, הונח שעומד ההשקיה הכללי הוא 400 מ"ק/ד'עונה, וכי המרכיב הרלוונטי לחיסכון הוא כ-100 מ"ק, הניתנים בהמטרה למילוי עומד, להנבטה ולביסוס הגידול. כמו כן, כתוצאה מעלייה בתאחיזת המים יש צורך בהשקיה פחותה לאחר אירועי גשם. הערכנו כי בשטחי חול ניתן לחסוך (S) כ-10 מ"ק/ד'. בעלות (P) של 1.5 ש"מ/מ"ק, ערך הפחתת כמות מי ההשקיה הוא:

$$Q = S * P \quad (3)$$

סך החישוב מכאן הינו $15 = 1.5 * 10$ ש"ח.

ס"כ השטח המושקה מתוך פוטנציאל השטחים המיועדים לתוספת במס"א הוא כשליש, ומכאן שמקדם החשיפה הוא 0.3 ולפיכך התועלת המשוקללת ליחידת שטח מייצגת היא 5 ש"ד'.

8.1.3 שיפור תכונותיה הפיזיקליות של הקרקע (TL)

כושר המילוט של אפ"מ מעודד יצירת רגבים בקרקע לס (בנגוד להיווצרות קרומים מונעי חדירת מים) וקרומים מייצבים כנגד סחף רוח בחול (בר-טל, 2009). לפיכך, הוספת במס"א מביאה להפחתת נזקי סחף רוח בחול או נגר בקרקע לסית, ולשפור האוורור וחדירות למים בקרקע לס. הוספת במס"א תביא להפחתת נגר גם בקרקעות כבדות (כתוצאה משפור המבנה). באזור החלוציות בנגב נצפתה אחת לכמה שנים תופעה של כיסוי השדות בחול (אתר מנהלת אפר הפחם: צעדי, 2014) או לחילופין, הסעת החול מתוך השדה, ובכל מקרה, התוצאה דומה, היינו ירידה חדה ביבול. הוערך ע"י המומחים איתם התייעצנו (ראה סעיף 8 לעיל) כי מקרים כאלה קורים בתדירות של אחת ל-15 שנה (F). מכיוון שבמרבית השטחים החשופים לסכנה זו מגדלים תפוחי אדמה וירקות אחרים, אזי החישוב נעשה לגידול זה. הכנסה נקיה ממוצעת רב שנתית מקובלת לתפוחי אדמה וגידולי חורף בכלל בישראל היא 500 ש"ח לדונם (גל, 2012) (RE) וכאמור, שעור הריבית המקובלת במשק להשקעות חקלאיות היא 7% (Rate). בהנחה שהאפ"מ בבמס"א יהיה יעיל בדומה לאפ"מ נקי שנבחן במחקרים שצוטטו לעיל, אזי התועלת משיפור המבנה (TL) היא:

$$TL = PMT(Rate, F, RE) = 55 \quad (4)$$

מניעת נגר וסחף (הן סחף רוח והן סחף מים) מתייחסת למגוון רחב של קרקעות ואולם מאחר שהדוגמאות לעיל (ועיקר התועלת הצפויה) היו בחול ובלס, נתייחס רק אליהם, ולפיכך מקדם החשיפה נלקח כ-0.5 והתועלת המשוקללת בשטח מוערכת ב-27 ש"ח לדונם.

8.1.4 העלאת טמפרטורת הקרקע (T)

יישום אפ"מ או במס"א בקרקע בהירה (חול, לס) יגרום למופע כהה יותר שלה ולכן להקטנת האלבידו (החזר האור) ולחימום פני הקרקע. העלאת טמפרטורת הקרקע עשויה להועיל לגידולי חורף כתוצאה מזירוז נביטה והצצה, הפחתת רקבונות והפחתת הנזק בתנאי קרה. ההנחה היא שתדירות אירועי קרה היא אחת ל-5 שנים (F). היתרונות העיקריים הם לירקות חורף (כגון, תפוז"א) שם היתרה לרווח



לדונם היא כ-500 (RE), וההערכה היא שהאפ"מ יעלה את טמפרטורת פני הקרקע בחורף. מאחר שההשפעה על הטמפרטורה אינה ידועה ולפיכך גם ההשפעה על היבול, נלקח ערך מזערי של 8% מניעה של פחיתה ביבול בארוע קרה (Y) ושער ריבית של 7% (Rate). החישוב הוא:

$$T = PMT(Rate, F, RE \cdot Y) = 10 \quad (5)$$

כאמור, שטחי החול והלס בישראל מצויים ברובם בדרום הארץ וכוללים כמחצית השטח שבו מתוכננת כיום הוספת במס"א ולפיכך מקדם החשיפה נלקח כ-0.5 והתועלת המשוקללת בשטח מוערכת ב-5 נה לדונם.

יש לציין כי הגדלת האלבדו עלולה להעלות את טמפרטורת הקרקע גם בקיץ, תופעה שאינה רצויה, אולם ההנחה היא שהנזק בקיץ יהיה קטן יחסית בגלל קצב הגידול המהיר בקיץ וכיסוי פני הקרקע בעלווה. צינור תפוא"א בקיץ נעשה בכל מקרה וע"כ ההנחה היא שלאפ"מ לא תהיה השפעה משמעותית.

8.1.5 תרומת הדשן

3.5 טון במס"א מחליפים כ-15 ק"ג לדונם חנקן, 4 ק"ג לדונם זרחן, ו-14 טון לדונם אשלגן. בשנה שניה עדיין יש זמינות ברמה נמוכה יותר של כ-7 ק"ג לדונם חנקן, 4 ק"ג לדונם זרחן, ו-4 טון לדונם אשלגן (ראה טבלה 7, ובהנחה של זמינות חנקן 60% שנה א' ו-30% שנה ב', זמינות זרחן 30% שנה א' וגם 30% שנה ב' ואשלגן 80% שנה א' ו-20% שנה ב'). לפיכך, התחשיב בנוי על סכימה של הערכים המצטברים ל-5 שנים (שער ריבית 7%) ופריסה למחיר ממוצע לשנה. התרומה הדישונית המתקבלת לשנה היא 62 ש"ד. מקדם החשיפה שווה ל-1 שכן התרומה מתייחסת לכלל השטחים המטופלים בבמס"א ולפיכך התועלת המשוקללת בשטח נשארת 62 נה לדונם.

8.1.6 הקטנת השטיפה של חומרי הדשן

ההנחה היא שהשטיפה היא רק של חנקן מינרלי וכי מרכיבי הדשן האחרים אינם נשטפים. השחרור האיטי של חנקן מזבל, מאט את שטיפתו מהקרקע בהשוואה לדשן מינרלי, וניתן להניח כי יישטפו כ-25% מהחנקן המינרלי הנוצר ממינרליזציה של החנקן האורגני (מחצית ממידת השטיפה של דשן מסחרי הזמין לשטיפה מרגע הוספתו לקרקע). ביישום של 3.5 ט"ד\שנה (שהם כ-28 ק"ג N כללי) יוספו לקרקע כ-14 ק"ג חנקן מינרלי ממינרליזציה של החנקן האורגני במהלך השנה (פיין, 2014), ממנו יישטפו כ-3.5 ק"ג N\ד. בהשוואה לכך, ההנחה היא שלו הוסף החנקן כדשן חנקן מינרלי, הייתה השטיפה כ-50% מהחנקן המוסף (7 ק"ג\ד). המינרליזציה של החנקן האורגני הנותר תוסיף עוד כ-7 ק"ג\ד חנקן מינרלי בשנה השנייה (זמין במלואו, ומחליף 7 ק"ג\ד דשן ממנו כ-1.5 ק"ג\ד יישטפו מהקרקע), והתוספת בשנים הבאות יכולה להיחשב לזניחה. במחיר לק"ג לפי טבלה 6, כמות ההפחתה של חנקן נשטף היא כ-5 ק"ג\ד שערכם 36 נה. נציין, כי במדידות שנעשו בשדות מסחריים

(למשל, א' בוסק 2015, תצפית לפידות ופ' פיין 2015, ניסוי רבדים, דו"חות בהכנה) שטיפת החנקן מבמס"א הייתה קטנה מאד יחסית לשטיפת חנקן הדשן ולכן ההערכה דלעיל היא שמרנית. מאחר שמניעת שטיפה של חנקן נכונה הן לשטחי בעל והן לשלחין, מקדם החשיפה הוא 1 ולפיכך התועלת הפרוסה על 5 שנים היא 8 ₪ לדונם.

8.1.7 הפחתת גורמי מחלה צמחיים שוכני קרקע (Phyto-pathogens) ועשבייה

יישום במס"א (+ אמוניה) באדמות קלות עשוי להפחית מאד את רמת המדבק של גורמי מחלה שוכני קרקע שונים (נבדק לגבי גורמים חיידקיים, פטרייתיים ונמטודות), וכן להפחית את רמת העשבייה. הערכות המומחים על פי הממצאים היו כי ניתן לחסוך עבור גידולים חד-שנתיים בשטח פתוח חלק מעלות חיטוי הקרקע. מאחר שהנושא מצוי עדיין בשלבי מחקר, הנחנו לשם הזהירות כי החיסכון האפשרי בהדברת גורמי מחלה ועשבייה הוא 50 ₪/ד' בלבד בשנת הפיזור (בהנחה לצרכי החישוב של פיזור אחד ל-5 שנים). לפיכך, בחישוב לפי פריסה של החיסכון לשנות הפיזור (5 שנים, 7% ריבית), התוספת היא 12 ₪/ד' לשנה. מונח כי בשטחי הבעל לא ייעשה שימוש בבמס"א למטרת הפחתת גורמי מחלה ולפיכך אומץ הערך 0.3 כמקדם החשיפה והתועלת המשוקללת בשטח היא 4 ₪ לדונם.

8.1.8 תוספת יסודות קורט לצמח ולאדם

הוספת במס"א תורמת לתכולת יסודות חיוניים להזנת צמחים (למשל Mo), האדם ובע"ח (כמו Se, Cr) והיא אמצעי להעלאת התכולה של יסודות חיוניים לאדם במוצרי מזון בסיסיים (כגון אורז, חיטה, תירס, קסאבה, תפוז"א ועוד) ובצמחי מרעה (כגון, אספסת). בטיפול במס"א נצפתה זמינות תקינה של כל יסודות הקורט (ברזל, אבץ, מנגן, נחושת, מוליבדן) במגוון גידולים. יש להדגיש כי התרומה מיוחסת לבוצה, לאפר וליחסי הגומלין ביניהם ולא לאפר בלבד. עלות יישום יסודות קורט לטיפול אחד מוערכת בכ-20 ש"ח/ד', ולפי דעת המומחים איתם התייעצנו (ראה סעיף 8 לעיל) מקובלים 3 טיפולים להוספת יסודות הקורט בגידולי ירקות. בגידולי שדה אחרים לא נהוג להוסיף יסודות אלה. תצפיות של מחברי מסמך זה בגד"ש הראו תגובה להעלאת זמינות יסודות חיוניים להזנת צמחים ביישום במס"א גם לאחר 5 שנים. עם זאת, מאחר שהנושא לא נבדק באופן מסודר בגידולים אינטנסיביים, אנו מניחים שהזמינות בגידולים אלה הנה לשנת היישום בלבד. לכן נקבע הערך לתוספת יסודות הקורט בגידולים אינטנסיביים של 60 ש"ח/ד' על בסיס יישום אחד ל-5 שנים, שהוא בפריסה לפי אחוזי ריבית (7%, 5 שנים) שווה 14 ₪/ד' לשנה. בגד"ש הערך הנחסך בשנה הראשונה הוערך ב-20 ש"ח/ד' וב-4 השנים הבאות הוא פוחת לכשני שלישים ממנו (בדומה לזרחן: פיין, 2015), כלומר 11 ₪/ד' לשנה. מונח כי מדובר על יתרון לכלל השטחים המטופלים בבמס"א. היקף הגידול האינטנסיבי הוא כרבע מכלל השטח המעובד ולפיכך התועלת המשוקללת בשטח היא כ-12 ₪/ד' (לפי 0.25×14) ועוד 11×0.75 .



8.2 עלויות הכרוכות בשמוש החקלאי של אפ"מ

8.2.1 העלאת מליחות הקרקע

אחת הטענות הרווחות בדבר העלויות הסביבתיות הכרוכות בהוספת אפר פחם לקרקע היא העלאת מליחות הקרקע כתוצאה מיישום האפר יחד עם הבוצה. אולם, תכולת המלחים באפ"מ אינה גבוהה, וודאי לא בהשוואה לזבלים אחרים (למשל, קומפוסט בוצה, קומפוסט זבל בקר, זבל בקר; ראה טבלה 1-א'), ועל כן אין סיכון ממשי לפגיעה בצמח, וודאי לא בעומס היישום המותר בתקנות (פיין וחוב', 2014). מאידך גיסא, ממשק בלתי מתאים, כמו שילוב של יישום מאוחר מידי של במס"א עם תיחוח קל (במקום ערבוב בשכבת החריש) ובעיקר בקרקעות יובשניות בגידולי בעל או בזריעה לפני הגשם, עלולים לגרום להמלחה (ברובה חנקנית אך גם סולפטית) של פני הקרקע כתוצאה מפזור במס"א, ולפגיעה בגידולים רגישים.

חישוב נזקי ההמלחה נעשה על בסיס הערכת כמות המלחים שתתווסף לקרקע לאחר יישום הבמס"א ועלות סילוק המלח.

נתונים לחישוב כמות המלחים המיושמת עם הבמס"א:

1. מדידות מליחות קרקע הראו שבמס"א העלתה את המוליכות החשמלית (EC) של מיצוי הקרקע בכ- 0.2 dS/m (נמדד באביב כשנה לאחר ההוספה, ניסויי שדה פיין 2013).
2. כל יחידת EC שקולה לכ- 640 מ"ג NaCl לליטר.
3. מדידת ה-EC נעשתה בעיסה רוויה. כמות הנזלים לעיסה רוויה מוערכת בכ- $50\% (w/w)$.
4. הבמס"א מוצנעת בשכבת חריש בעובי 20 ס"מ שמשקלה הוא כ- 240 טון/דונם .
5. כמות מלח לדונם שתתווסף היא 15.4 ק"ג לדונם (מכפלה של הסעיפים 1-4 לעיל).

$$0.2 * 0.640 * 0.5 * 240 = 15.36$$

חישוב עלות סילוק המלח:

6. עלות התפלה של מים מליחים במתקן של 6 מ"ק לשעה היא 3.17 ₪ למ"ק (הדס, בן גל, טרפזר ודג בהכנה, 2015).
7. מונח כי ההתפלה היא של מים בעלי $EC = 4 \text{ dS/m}$.
8. התפלת מלח ב-EC לעיל תעלה 1.24 ₪ לק"ג מלח, לפי החישוב כלהלן:
 $3.17 / (4 * 0.640) = 1.24$
9. ס"ה עלות מלח שמתווספת אחת ל-5 שנים הינה 18.9 ₪ לדונם (כמות המלח 15.36 ק"ג מוכפלת במחיר 1.24 ₪ לק"ג).
10. עלות זו 18.9 ₪ במונחים שנתיים לפי 5 שנים, ריבית השוק 7% תיתן עלות שנתי של 4.6 ₪'ד' ומעוגל 5 ₪'ד'.

מונח כי העלות השנתית מתייחסת רק לשטחי הבעל המטופלים בבמס"א ולכן מקדם החשיפה הוא 0.5 (טבלה 6) והעלות השנתית המשוקללת היא 2 ₪'ד'. יש בהערכה זו משום החמרה בעלות הואיל ויישום בממשק נכון לא יגרום לנזק בעונת היישום, ובכל מקרה אין נזק בשנים העוקבות עקב שטיפה במי גשם שתפחית את כמות המלחים בקרקע, וכן משום שהמלחה חנקנית פוחתת עם הזמן בעקבות טרנספורמציות ביולוגיות וקליטה והמלחה סולפטית פוחתת גם כתוצאה משקיעת מלחים קשי תמס.

8.2.2 העלאת ערך ה-pH של הקרקע



תוספת במס"א מעלה את pH הקרקע, כשמידת העלייה תלויה בתכונות הבמס"א והקרקע ובעומס היישום. אולם, העלייה ב-pH הנה זמנית, ולכן יכולה להיות לה השפעה שלילית רק לימים ספורים וכל עוד הקרקע הנה יבשה. דהיינו, נזק מעליה ב-pH עלול להתרחש רק במידה וממשק הוספת הבמס"א איננו נכון. נזק אפשרי מהעלאת ה-pH ולו זמנית יכול להיות עקב פגיעה במבנה הקרקע (למשל אם יהיה עיבוד בכלים מכאניים בתקופה הקצרה בה ה-pH עדיין לא פחת) או פגיעה ישירה בנביטה ועקב כך ביבול הצמחי (למשל כתוצאה מזריעה סמוכה מידי למועד פזור הבמס"א). מחברי מסמך זה מניחים כי פגיעה כזאת (דהיינו אימוץ ממשק לא נכון של הוספת במס"א), עלולה להתרחש לכל היותר ב-10% משטחי הבעל (שיעור החשיפה 0.1), ובמקרה כזה שיעור הפגיעה יהיה כ-20% מהיבול. יתרה לדונם מקובלת לגידולי מספוא בבעל היא כ-400 ש"ט (גל וסולומון, 2014), לפיכך החישוב יעשה לפי פריסת העלות (5 שנים, 7% ריבית) המחושבת לפי המכפלה של יתרה לדונם של 400 ש"ט כפול אחוז החשיפה 10% כפול אחוז הנזק (20%) וס"ה 2 ש"ט לדונם.

כנזכר לעיל, יישום במס"א בכל עומס מגדיל את זמינות הזרחן בקרקע בצורה פרופורציונאלית לכמות שהוספה ובהתאם לתכונות הבמס"א והקרקע (לדוגמא פיין וחוב', 2014; פיין וחוב', 2015). יתרה מזאת, העלאה מכוונת (אך זמנית) של ערך ה-pH של הקרקע מנוצלת כחלק ממנגנון ההדברה של מחלות צמחים שוכנות קרקע באמצעות במס"א ואמוניה (למשל, סעיף 8.1.7 לעיל).

8.2.3 מתכות כבדות ויסודות רעילים אחרים (HM)

כל היסודות המנוטרים על ידי רשות המזון של משרד הבריאות מצויים בבמס"א בריכוזים הנמוכים במידה משמעותית מהתקן לבוצות (טבלה 1), ולפיכך אין ולא צריך להיות חשש מפני צבירה של מתכות כבדות בגידולים חקלאיים שגודלו בשטחים שטופלו בבמס"א. סקרנו לעיל את הקליטה של קדמיום עופרת ויסודות אחרים בצמחי מאכל ומספוא שגדלו על במס"א, והראינו כי הריכוזים היו בד"כ נמוכים מאוד, ותמיד נמוכים מהערך העליון המותר לצמחי מאכל. על מנת להוכיח את עובדת העדר סיכון לאדם ולסביבה, דורש משרד הבריאות ניטור לתקופה של מספר שנים של אותם גידולים חקלאיים ששיווקם לצרכי מאכל לאחר גידול על קרקע מטופלת בבמס"א עדיין לא אושר. מונח כי בדיקות שכאלו תעשינה מעת לעת ככל שיתווספו גידולי מאכל שחקלאים ירצו לגדל בשטחים שלהם תוסף הבמס"א וכי במהלך הבדיקה יאסר שיווק הגידולים הנבחנו. כך ייגרם נזק זמני לחקלאי בגין צמצום חלופות הגידול. כדוגמא נבחר התרחיש של איסור זמני של גידול ירקות עלים. צמצום מגוון גידולי הירקות הוערך בהפסד הכנסה של 200 ש"ט לדונם לשנה (תחשיבים רב שנתיים, שה"מ לירקות, ממוצע עלים לעומת שורש) ומונח כי יאסר שיווק התוצרת לתקופה של 3 שנים, בשעור חשיפה של 5% מכלל השטח המטופל בבמס"א. בפריסה של העלות ל-5 שנים ב-7% ריבית, ההוצאה המוערכת היא כ-6 ש"ט לשנה.

8.2.4 תוספת בורון (B)



יישום במס"א בעומס 3.5 ט' ח"לד' מוסיף כ-1 ק"ג בורון לדונם (טבלה 1-ב'). כאמור, לא נמצאה בארץ הצטברות בורון בגידולים על קרקעות שיושמה בהם במס"א, ועל פי הערכות מודל לא צפויה עלייה בריכוזי בורון במי התהום כתוצאה מיישום אפ"מ בקרקע (קרן, 2000, וראה פרק 2.1, בסעיף "זמינות יסודות קורט חיוניים"). גם בצמחי בוחן לא נצפתה עלייה בריכוז הבורון (גד"ש, כולל ירקות עלים). נזק מבורון עלול להיגרם בגידולים רגישים ולפיכך, יישום במס"א עלול להביא להקטנת מגוון הגידולים הזמין לשטח בו בוצע היישום. חישוב הנזק הצפוי נעשה בהנחה כי ההפסד שייגרם כתוצאה מהמגבלה במגוון הגידולים כמתואר לעיל הוא 200 ₪ לשנה. הנזק הוערך ל-2 שנים בלבד היות והבורון נשטף בקלות מהקרקע. אומץ שיעור חשיפה שמרני הנובע מהוספת במס"א לגידולים רגישים במיוחד (5%).

$$B = NPV(Rate, Npear, RE) * Exposure \quad (6)$$

Npear = מספר שנים שבהן נמשך הנזק: 2;

Exposure = שיעור חשיפה: 5%

RE = 200 ₪ לשנה

Rate = שיעור ריבית: 7%

$$B = NPV(7\%, 2, 200) * 0.05 = 3 \quad (7)$$

8.2.5 הקטנת הזמינות של יסודות קורט

נבחנה האפשרות שיישום במס"א יקטין את זמינות הזרחן ויסודות הקורט בקרקע. כפי שראינו לעיל, לא קרה הדבר בניסויים הרבים שבוצעו עד כה. רק בניסוי אחד הייתה ירידה בריכוז הברזל ובשני ניסויים בריכוז המנגן בגידול על במס"א, וזאת בתנאים של העדר דישהן ביסודות קורט. מדובר לפיכך רק בתנאים בהם לא היה דישהן ביסודות קורט, ויש להביא זאת בחשבון בהערכת ההשפעה האפשרית של במס"א על גידולים. מאחר שמלאי היסודות בקרקע רק גדל בהוספת במס"א, להערכתנו די יהיה בהוספת כלאנט (כגון EDTA) בכמות מספיקה (10 מ"ג/ל בכ-150 מ"ק מ"י-השקיה) לגידולים רגישים למחסור ברזל (כגון, אגוזי אדמה) על מנת להבטיח מניעת כל נזק אפשרי מהקטנת זמינות יסודות קורט. הכמות הנדרשת היא 1.5 ק"ג כלאנט שעלותה כ-45 ₪. לשם החמרה, הסיכוי לאירוע מחסור הוא 10% מכלל גידולי הירקות (שליש מכלל השטח שתיושם בו במס"א), והוא יימשך 5 שנים לאחר היישום. לפיכך, מקדם החשיפה הוא 3% והנזק מוערך ב-2 ₪/ד'שנה.

8.2.6 רדיונוקלידים (MON)

במדידות חוזרות ונשנות הוכח מעל לכל ספק כי אין סכנה של הצטברות רדיונוקלידים ביבולים הנאספים מקרקע המועשרת באפ"מ או במס"א (לדוגמה, קור, 2002; קור, 2010; חקין 2013; כ"ץ ושוורץ, 2013). למרות זאת מחייבים הגופים הרגולטוריים (דהיינו משרד הבריאות), ניטור לנוכחות רדיונוקלידים בגידולים שגודלו בשטח שהוספה לו במס"א ושעדיין לא אושרו לשווק משדות שטופלו



בבמס"א. תקופת הניטור היא מספר שנים ומטרתו היא להוכיח העדר סכון לאדם ולסביבה מצריכת התוצרת.

החישוב : מונח כי בדיקות תבוצענה מעת לעת לכשיצורפו גדולים חדשים מסויימים (כדוגמת ירקות עלים) למגוון הגדולים שחקלאים ירצו לנצל במס"א לגידולם. מונח כי בתקופת הבדיקה יאסר שיווק הגידול הנבחן. צמצום מגוון גידולי הירקות הוערך בהפסד הכנסה של 200 ₪ לדונם לשנה (תחשיבים רב שנתיים, שה"מ לירקות, ממוצע עלים לעומת שורש) , מונח כי יאסר שיווק ירקות עלים לתקופה של 7 שנים (הנחת תקופה ממושכת יותר לבחינת רדיונוקלידים [7 שנים] מתקופת הבחינה של יסודות רעילים [5 שנים] ביבול, מבטאת את הערכת המחברים כי הרגולטור עשוי לנקוט משנה זהירות, גם אם אין בכך כל צורך, בכל הנוגע לקליטת רדיונוקלידים ביבול בטווח הארוך כתוצאה מהצטבר במס"א בקרקע לאחר פיזורים חוזרים ונשנים. הנחה זו הנה בנגוד לחוות הדעת המקצועית של מומחים מתחום הקרינה הרדיואקטיבית), באחוז חשיפה של 5% מסך כל השטח המטופל בבמס"א. בפריסה של העלות ל-5 שנים ב-7% ריבית, ההוצאה המוערכת היא 13 ₪\ד'שנה. אולם, מכיוון שהדרישה הרגולטורית לבדיקת נוכחות יסודות רעילים (ראה סעיף 8.2.3) מחייבת המנעות מגידול גידולי עלים לתקופה מוגבלת ובעלות של 6 ₪ לדונם לשנה, ותקופה זו חופפת את התקופה הנדרשת להוכחת העדרות רדיונוקלידים, תוספת העלות נטו להוכחת העדרות רדיונוקלידים בתוצרת החקלאית היא 7 ₪ לדונם לשנה.

9. סיכום

בקרקות חקלאיות רבות נרשמו בעיות של פוריות נמוכה בשל כשלים כגון דישון לקוי, תאחיזת מים נמוכה או בעיות הכרוכות בנתרון לרבות נגר וסחף. באמצעות יישום זבל בכלל ובמס"א בפרט ניתן להפחית במידה רבה את הנזקים הנגרמים כתוצאה מכשלים אלו, ובעלות מתאימה, יישום הבמס"א עשוי לשפר מאד את הרווחיות בגד"ש ואפילו בשטחי עידית (פיין, 2015-ב'). השאלות העיקריות הכרוכות ביישום תוספים מכילי אפר הן: מה תהינה ההשפעות קצרות- וארוכות-הטווח של יישום האפר על הגידול, על הקרקע ועל הסביבה, והאם היישום כדאי לחקלאי מבחינה כלכלית. לשימוש בבמס"א בחקלאות יתרונות רבים, לרבות החלפת תשומות דשן כימי, שחרור איטי של יסודות הדשן, שיפור תכונות פיזיקליות וכימיות של קרקעות הלוקות בבעיות פוריות והדברת עשבייה וגורמי מחלה שוכני קרקע. השימוש בבמס"א תורם לרווחיות ולקיימות של המשק החקלאי, לאיכות הסביבה ולמגזר העירוני (למשל כאמצעי לשימוש חוזר של בוצות שפכים). התרומה לסביבה היא בין היתר במניעת פליטות אמוניה וגזי חממה המתרחשות במהלך הקומפוסטציה של בוצות, צמצום הכרייה של משאבים מתכלים (דלק פוסילי המנוצל במהלך ייצור הדשן המסחרי, מחצבי זרחן ואשלגן ועוד), קיום עקרון המחזור והאפשרות להפחית את השימוש בחומרי הדברה. בהקשר לתרומה למגזר העירוני ראוי לציון צמצום העלויות הדראסטי הגלום בכך שבשיטת N-Viro ניתן לפסטר גם בוצות



גולמיות שלא עברו כל ייצוב מוקדם, מה שאינו אפשרי בקומפוסטציה קונבנציונאלית (פיין, 2006; פיין, 2015-א').

ממצאים רבים מהארץ והעולם מראים כי יישום מושכל של אפ"מ משולב בבוצה לא יגרום לשינוי משמעותי (וודאי לא להרעה), בתכונות הפיסיקליות של הקרקע, וכי השינויים בהרכב הכימי של הקרקע לא יהיו ניכרים ולא יהיו משמעותיים מבחינת תפקודה התקין של הקרקע כמצע לגידול צמחים (ולבטח לא יפגעו בתפקודה זה).

בהערכת העלויות והתועלות המוגשת בעבודה זו אומצו הנחות שמרניות תוך החמרה שהביאה להכללה בחשבון העלויות גם נזקים שסיכויי התממשותם זניחים. בשקלול העלויות הובא בחשבון גם החשש מנזקים ארוכי-טווח לקרקע כתוצאה מהשימוש באפ"מ אשר לא נחזו מראש (למרות שהידע והנסיון שנצבר במהלך השנים בכל הנוגע לפזור במס"א בקרקע חקלאית הוכיחו שסבירות נזקים שכאלו זניחה). כך למשל הובאו בחשבון נזקי המלחה, למרות שתוספת המומסים היא ברובה של חנקות וסולפטים ששטיפה, טרנספומציות ביוטיות, קליטה ושקיעה יפחיתו מאד את תכולתם בתמיסת הקרקע לאורך זמן. השימוש המסחרי בבמס"א והניסויים שבוצעו בשדות המועשרים בה מזה למעלה מ-4 שנים מוכיחים עד כמה נמוכה הסבירות של נזקים ארוכי טווח כתוצאה מהוספת הבמס"א לקרקע. למרות האמור לעיל, חייב להתבצע מעקב לאורך זמן אחר שטחים המטופלים בבמס"א, כמקובל לגבי כל תוסף שהשימוש בו חדש יחסית וזאת על מנת לאשש את המסקנות שהוסקו עד כה, גם אם רבות ההוכחות שחשש לנזק ארוך טווח אין לו על מה להסתמך וכי הסבירות להתממשות אפסית. הביקוש בקרב החקלאים לבמס"א גבוה בשל תועלתה, בעיקר כספק יסודות דשן בשחרור איטי, והביקוש הולך וגובר גם לאחר 4 שנות יישום הבמס"א בהיקף העולה על 15% מכלל בוצת השפד"ן ולאחר כ-15 שנות יישום האקוסויל ממט"ש בית-שמש, שהוא תוצר דומה לבמס"א, אם גם נחות מהבמס"א באיכותו. הניתוח הכלכלי בדו"ח זה מראה בהתאם, שערך התועלות עולה בהרבה על זה של העלויות, למרות הגישה המחמירה לתועלות והמרחיבה לעלויות שננקטה בחישוב.

10. ספרות

- בן הגיא נורית, משה ברנר, 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. 2008. שימוש באפ"מ מרחף לשיפור תכונות של קרקעות שוליות בישראל, עבודת גמר למוסמך, האוניברסיטה העברית, מאי 2008.
- ברוקנטל משה, אופטימיזציה של השימוש בבוצות שפכים בגד"ש, דו"ח לתכנית מחקר מספר 11-0705-301, לשנים 2011 – 2012, המכון לקרקע ומים, מינהל המחקר החקלאי, 2013.
- 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.
- הדס אפרת, יורם טור ציון, אשר איזנקוט, רמי זידנברג, מניעת סחף קרקע- עלות מול תועלת, ניר ותלם, ירחון לנושאי גידולי שדה מיכון והנדסה חקלאית בחקלאות, גיליון מספר 13, ינואר 2009.
- הדס אפרת, צפריר גרינהורט, ציפי פרידקין, ניהול תוצרי הלואי בחקלאות ישראל והגדלת כושר הטיפול במשאביהם, מסמך עזר לקביעת מדיניות והערכת עלויות ראשוניות, משרד החקלאות ופיתוח הכפר, נובמבר 2013.
- חן יונה, צילה אביעד ואורי מגדל, בדיקת תכולת מתכות בחלקים הנאכלים של ירקות וצמחי תבלין, הפקולטה למדעי המזון והסביבה, אוניברסיטה עברית 2004.
- חקין ג'. 2013. קליטת רדיונוקלידים בתוצרת חקלאית – מסמך עמדה (ג' חקין, ראש שטח בטיחות קרינה, הועדה לאנרגיה אטומית, ממ"ג, יבנה).
- כ"ץ, ג', וא' שוורץ. 2013. סקר מתכות ורדיונוקלידים בגידולים עם דשן DAN-VIRO: דו"ח ממצאי האנליזות-חוות דעת מקצועית. הוגש למנהלת אפר הפחם ולמשרד הבריאות. 21 עמ'.
- 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
- 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 פ', 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
- פיין פנחס, אריה בוסק, אנה בריוזקין, אסרה רבאח, ייעוד במס"א ליישום חקלאי – מעקב אגרונומי וסביבתי, טיוב קרקע רנדזינה בהירה בממשק פלחה חרבה ע"י יישום במ"ס ובמס"א, וההשפעה על יבול בקיה-תלתן ועל תכולת היסודות בצמחים, מכון וולקני מרץ 2013.
- 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): 35-27.
- 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.
- פנחס פיין, דני קורצמן, דורית שרגיל, עידו ניצן, אנה בריוזקין, 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, אריה בוסק, יגב קילמן, אנה בריוזקין, שוש סוריאנו, רבקה רוזנברג, 2013. יישום אפ"מ מרחף לשיפור תכונות פסיקו-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
- פיין פנחס, דני קורצמן, אשר ברטל, זאב גרסטל, אחמד, גיא לוי, אדי סטרין, אשר איזנקוט, אריה בוסק...??
פיין פ', 2015-א'. הערכת כדאיות של יישום זבלים כתחליף דשן בגד"ש, ניר ותלם עמ' 21-26, מאי 2015.
- פיין פ', 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, 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, מינהל המחקר החקלאי. 5 עמ'.
- פיין פנחס, רבקה רוזנברג, דינה גולדשטיין, גיא לוי, 2007. טיוב קרקע נתרנית בעזרת בוצות שפכים. גן שדה ומשק, אפריל 2007 עמ' 30-26.
- 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).
- קרן 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.
- קרן רמי, אורי מינגלגרין, פנחס פיין, ישראל ברוקנטל, התאמת אפ"מ לשימוש כמצע ריפוד ברפת, המכון למדעי הקרקע והסביבה מרכז וולקני מינהל 2000.
- קרן רמי, הערכת שיחורור בורן ויסודות אחרים מאפ"מ ותנועתם למי תהום, המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מרכז וולקני לחקר החקלאות 2000.
- שירות המזון הארצי במשרד הבריאות -
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.
- 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.
- Ciccu, R., Ghiani, R. Peretti, A. Serici, A. Zucca. 2001. Heavy Metal Immobilisation Using Fly Ash in Soils Contaminated by Mine Activity. International Ash Utilisation Symposium www.flyash.info.



- 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.
- 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.
- 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.
- 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>.
- 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, 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).
- 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.
- 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.
- 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.; Chawade, 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.
- 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- ???
- 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.
- 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].
- 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.
- 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. . 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. (Jan. 2004) NAL Call #: TD169 .E54; ISSN: 0160-4120.
- 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.; 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.
- Swain, D. K.; Mittra, 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.
- 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.; Prakash, S. S.; and Ravi, M. V., 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.(2008). NAL Call #: S471.I42K37; ISSN: 0972-1061.
- Yeledhalli, N. A.; Ravi, M. V.; and Prakash, S. S. 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. (2008) NAL Call #: TD172.E5; ISSN: 0970-0420.
- Yeledhalli, N. A. and Ravi, M. V. 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. (2008); ISSN: 0973-4775.
- Zgorelec, Zeljka; Basic, Ferdo; Kisic, 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.