

אפרת הדס

מנהלת ההשקעות בחקלאות,
המשרד החקלאות ופיתוח הכפר

אשר איזנקוט

שירות השדה, שה"מ, משרד
החקלאות ופיתוח הכפר

אורי מינגלגרין

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

פנחס פיין

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

מאמר זה עבר שיפוט עמיתים

ציטוט מומלץ

הדס א, איזנקוט א, מינגלגרין א ופיין
פ. 2018. עלות-תועלת כלכלית של
השימוש החקלאי בבוצה מטופלת
בסיד ובאפר פחם מרחף. *אקולוגיה
וסביבה* 9(1): 40–49.



טיפול באפר פחם תחתית בתחנת הכוח רוטנברג | צילום: מנהלת אפר הפחם

עלות-תועלת כלכלית של השימוש החקלאי בבוצה מטופלת בסיד ובאפר פחם מרחף

חזית המחקר

גיליון אביב 2018 / כרך 9(1)

3 במאי, 2018

על קצה המזלג

- כ-10% מהפחם בתהליך ייצור החשמל אינו נשרף. לתוצר הלוואי, אפר פחם מרחף, פוטנציאל לזיהום אוויר ומי תהום.
- יש למצוא שימושים בטוחים ומועילים לאפר הפחם כחומר גלם משני. בארץ הוא משמש בעיקר בתשתיות בנייה ודרכים, ומיעוטו כתוסף לקרקעות חקלאיות, כבוצת שפכים מטופלת בסיד ובאפר פחם (במס"א).
- השימוש בחומרים אלה בחקלאות יוצר חשש מהשלכות שליליות על הסביבה ועל החקלאות. עיקר החשש הוא מנוקדים לצומח בשל תכולה גבוהה של בורון, זמינות גבוהה של מתכות כבדות וזמינות נמוכה של זרחן ויסודות קורט.
- המחקר מצטרף למחקרים רבים המזימים חשש זה, ואף מראה כי התועלת משימוש בבמס"א בגידולי שדה גדולה מהעלות הכרוכה בשימוש.
- המעבר לשריפת גז טבעי בתחנות הכוח גורם להקטנת מצאי אפר הפחם בישראל, ולדרישה לייבוא לארץ. אישור היבוא מחדד את הצורך לבחון את בטיחות אופני השימוש השונים באפר ואת תועלתם.

תקציר

בשנת 2015 נוצרו בישראל כ-1.25 מיליון טונות אפר משריפת פחם לייצור חשמל. מרבית האפר הוא אפר פחם מרחף דק-גרגיר, המסולק בסיון גזי הפליטה בדרכם לארובות, ומיעוטו הוא אפר פחם גס-גרגיר הנערם בתחתית המבערים. אף על פי שבשנים האחרונות קיים עודף ביקוש לאפר פחם לשימושים שונים ובהם החקלאות, המשרד להגנת הסביבה העלה תהיות על היתרונות והחסרונות של השימוש החקלאי באפר. מכיון שהועלתה הטענה כי הנזק עולה על התועלת, הוחלט לבדוק זאת בצורה מפורטת. להלן נעסוק באפר פחם מרחף המוסף לקרקע כמרכיב בבוצה המטופלת בסיד ובאפר פחם (במס"א). במס"א מסופקת כיום כמעט חנים לחקלאים, ולשימוש בה יש יתרונות וחסרונות פוטנציאליים, חקלאיים וסביבתיים כאחד. ביצענו חישובי עלות מול תועלת של השימוש החקלאי באפר פחם מרחף על בסיס נתונים וחזות דעת מומחים. החישובים בוצעו עבור קרקעות וגידולים רלוונטיים בשקלול היקף הגידול ובהתחשב בתנאי הקרקע, הגידול והסביבה. התועלת המשוקללת לדונם לשנה (תוספת הכנסה לחקלאי) נאמדה ב-115 ש"ח, והעלות המשוקללת לדונם לשנה ב-46 ש"ח. התועלת האפשרית תלויה בשימוש: החלפת דשן כימי (59 ש"ח לדונם), תוספת יסודות קורט (12 ש"ח לדונם), הפחתה בתצרוכת מי השקיה (5 ש"ח לדונם), הקטנת השטיפה של יסודות דשן עיקריים (7 ש"ח לדונם), הפחתת פתוגנים שוכני קרקע, הפוגעים בצמחים (4 ש"ח לדונם), שיפור תכונות פיזיקליות של הקרקע (27 ש"ח לדונם) ועלייה בתאחיזת המים בקרקע (1 ש"ח לדונם). העלויות הפוטנציאליות הן: הוצאות פיזור והצנעה (18 ש"ח לדונם), העלאת מליחות הקרקע (2 ש"ח לדונם), העלאת ערך ההגבה (pH) של הקרקע (2 ש"ח לדונם), תוספת בורון (3 ש"ח לדונם), הקטנת זמינות זרחן ויסודות קורט שמקורם בקרקע (2 ש"ח לדונם) והגבלת חלופות גידול עד לאישור המאסדר (הרגולטור) לגבי היעדר סיכון מהטברות מתכות כבדות ומפעילות רדיואקטיבית בגידול כלשהו (6 ו-13 ש"ח לדונם, בהתאמה). יודגש כי האומדן המשוקלל של העלות והתועלת מתייחס ל"קרקע מייצגת" שהיא מושג היפותטי, וכי ניתן להפיק את מרב התועלת הנובעת מהשימוש החקלאי באפר על-ידי הפנייתו לשטחים החקלאיים המתאימים ביותר. באופן דומה, שימוש לקוי באפר יגדיל את העלויות הכרוכות בשימוש בו. ייחודו של מחקר זה מתרכז בשני היבטים עיקריים: ראשית, בנייתו המעיד כי התועלת הכלכלית בשימוש החקלאי באפר הפחם בהיותו תוסף לבוצה עולה בהרבה על העלות הכרוכה בשימוש זה, ושנית, בהדגמת התאמתו של המודל שבעזרתו נעשו חישובי העלות-תועלת לביצוע הבחינה הכלכלית המדווחת במחקר זה. מודל זה הוא כלי לחישוב ההשפעה הכלכלית והסביבתית של שימוש בתוצרי לוואי של תהליך תעשייתי שיכולים לשמש תחליף למשאבים מתכלים.

מבוא

אפר פחם מרחף הוא תוצר לוואי של שריפת פחם לייצור חשמל. מרבית האפר הוא אפר מרחף ומיעוטו – אפר תחתית. האפר משמש ברובו לייצור חומרי בנייה ולשתיות ומקצתו לחקלאות. השימוש באפר לחקלאות או למטרות אחרות הוא בחזקת הפיכה של מטרד פוטנציאלי למשאב.

במחקר זה נתייחס בעיקר לאפר פחם מרחף ולשימושו (הקיימים והאפשריים) בחקלאות. אפר פחם מרחף משמש בחקלאות ישראל בעיקר לפסטור בוצת שפכים בשילוב עם סיד. לפי החוק הישראלי ניתן לפזר על קרקעות בוצה סוג א' בלבד. פסטור הוא שיטה המשתמשת בחימום כדי להפחית את עומס הפתוגנים בבוצה, והוא אחד מהטיפוליים המקובלים להעלאת רמת הבוצה לסוג א' כנדרש בחוק.

הסיד הוא כ-10% ממשקל הבוצה, והתמוססותו מחממת את הבוצה ליותר מ-70°C והופכת אותה לבסיסית יותר (ערך ההגבה [pH] מעל 12). אפר הפחם המרחף (ביחס 1:1) הופך את הבוצה לתרחיף ומאפשר מגע הדוק בינה לבין הסיד. פיזור בוצה מטופלת בסיד ובאפר (במס"א) בקרקעות חקלאיות מחליף תשומות דשן^[14], משפר מבנה של קרקעות בעייתיות^[11,12,29] ומפחית את כמות הפתוגנים השוכנים בקרקעות חוליות^[4,15]. פסטור בוצה באמצעות אפר פחם מרחף וסיד הוא פשוט, וניתן להשתמש בו גם בבוצות בלתי מטופלות^[31]. במהלך הטיפול בבוצה בתהליך של קומפוסטציה חלה הפחתה בריכוזם של חומרים נדיפים ושל חומרים המנוצלים על-ידי מיקרואורגניזמים. מכיוון שההפחתה חלה לפני פיזור הבוצה בקרקע, היא מוגדרת כ"הפחתה מוקדמת". עקב תופעה זו אובדים חומרים מזינים הנדרשים לגידול, כדוגמת חנקן, ויש להוסיפם כדשן כימי.

קומפוסטציה מחייבת הפחתה מוקדמת ויקרה של המוצקים הנדיפים, למשל באמצעות עיכול אל-אווירני (דני פלודה, מידע בע"פ, 2014). למעשה, ערך הבמס"א לחקלאות עולה ככל שפוחתת מידת הטיפול המוקדם בבוצה [20,14]. החיסרון העיקרי של הבמס"א הוא בכך שמרכיב הבוצה הוא רק כ-50% מהמוצר הסופי (עד כ-15% מהחומר היבש), ונפח המוצר הסופי גדול מנפח הבוצה הגולמית (הגם שצפיפותו פוחתת מאוד). יתרון חשוב של הבמס"א לחקלאים הוא שעלויה ממומנת על-ידי המגזר העירוני (הנהנה מצידו מסילוק זול יחסית של הבוצה), והעלות לחקלאי כיום היא בעיקר עלות ההצנעה בקרקע.

לשימוש באפר ערך סביבתי רב כמרכיב בבמס"א. השימוש באפר תורם לסביבה במניעה של פליטת אמוניה וגזי חממה המתרחשת במהלך הקומפוסטציה של בוצות וייצור דשנים כימיים, בצמצום כריית משאבים מתכלים (דלק מחצבים המשמש בייצור הדשן המסחרי, מחצבי זרחן, אשלגן ויסודות קורט), באפשרות להפחית שימוש בחומרי הדברה ובקיום עקרון המחזור תוך הפחתת הצורך בהטמנה בשטחי ציבור המצויים במשורה.

מרבית החשמל בישראל מיוצר כיום דרך שריפת פחם. אפר פחם הנוצר בתהליך הייצור הוא משאב פוטנציאלי, אולם אם לא ייעשה בו שימוש, ייהפך למטרד. מן הראוי להפיק את מרב הערך הכלכלי והסביבתי הטמון באפר הפחם, והשימוש החקלאי בו הוא אחד מהשימושים שיאפשרו את ניצול התועלת הטמונה באפר. מחקר זה מתרכז בחישוב עלות מול תועלת לחקלאי של שימוש באפר פחם באמצעות ניצולו לייצוב בוצה בנוכחות סיד.



יצבור פחם מוכן לשריפה בתחנת הכוח אורות רבין בחדרה / צילום: אילן מלסטר

שיטות החישוב הכלכלי

המתודולוגיה להערכת העלות והתועלת לחקלאי של השימוש באפר הפחם המוצגת במחקר זה מבוססת על פירוט סוגי התועלת מחד גיסא והעלויות מאידך גיסא, ומודדת אותם במונחים נומינליים. כך ניתן לסכום אותן ולהשוות את סך העלות לסך התועלת. מחקר זה מציג כלי לחישוב ההשפעה הכלכלית והסביבתית של שימוש בתוצר לוואי של תהליך תעשייתי שמסוגל לשמש תחליף למשאבים מתכלים.

מחיר השוק לאפר פחם מרחף תלוי בערך השימוש בו לצרכן וכולל את עלויות ההובלה והפיזור ואת מידת הנדירות (מחיר צל). בשלב זה, הביקוש לאפר פחם מרחף גבוה מהמציא, שצפוי לרדת עוד. יש לשקלל גם את ההשפעה הסביבתית האפשרית (תועלת ונזק) הכרוכה בשימוש באפר פחם מרחף. אמידה של עלות ותועלת סביבתיות קשורה בעיקר לכשלי שוק הנובעים מהשפעות סביבתיות שאינן מובאות בחשבון במחיר השוק, ושקשה לאמוד אותן. העלות והתועלת של שימוש חקלאי באפר פחם מרחף (כבמס"א) מוצגות במחקר זה במונחים של כימות ההכנסות וההוצאות לדונם לשנה. התחשיב נעשה מנקודת ראותו של החקלאי, אך בהנחה כי הוא יחזיק בקרקע לטווח ארוך, ולכן ערך ההשפעות ארוכות הטווח, כמו פגיעה בפוריות הקרקע (או

שיפור הפוריות), נכלל בתחשיב. הנושאים הנוגעים לכלל הציבור (השפעה סביבתית) תורגמו למונחים של השפעה על הכנסות החקלאי.

הנתונים ששימושו בחישובי העלות-תועלת, לרבות ההשפעות האפשריות של השימוש החקלאי באפר פחם מרחף ובבמס"א על הסביבה, נלקחו ממחקרים רלוונטיים בארץ [11-19] ובעולם [29-33], ומראיונות עם אגרונומים ממשרד החקלאות ומהמגזר הפרטי, שהערכותיהם תורגמו למונחים כספיים.



ידול חסה על מצע המכיל אפר פחם | צילום: מנהלת אפר הפחם
לפרטים מלאים על אודות שיטות החישוב הכלכלי – ראו [נספח 1](#).

תוצאות

נועלת בפיזור אפר פחם מרחף כמרכיב במס"א

החלפת דשן כימי וטיוב הקרקע – במס"א מכילה חומר אורגני ויסודות הזנה, ושימוש בה מגדיל את תכולתם בקרקע בשכבה הרלוונטית, כתלות בעומס החומר המפוזר ובתכולת הבוצה בתוסף. המרכיב האורגני פריק, בדומה לחומר האורגני של הבוצה עצמה [13]. מנה של 5 מ"ק לדונם במס"א מחליפה כ-15 ק"ג חנקן, 4 ק"ג זרחן, ו-14 ק"ג אשלגן בשנת פיזור החומר. בשנה השנייה לאחר הוספת הבמס"א זמינות החנקן היא כ-7 ק"ג לדונם, זמינות הזרחן כ-4 ק"ג לדונם וזמינות האשלגן כ-4 ק"ג לדונם. מחירי דשנים (ק"ג יסוד צרוף, מחיר נומינלי) הם: חנקן – 7.19 ש"ח, זרחן – 5.79 ש"ח, אשלגן – 3.24 ש"ח. לפיכך, בתחשיב הבנוי על סכום הערכים המצטברים לחמש שנים (שער ריבית 7%) ופריסה למחיר ממוצע לשנה, התרומה הכלכלית של תחליף דשן לצמח המתקבלת לשנה היא 59 ש"ח לדונם. מקדם החשיפה הוא 1, שכן התרומה מתייחסת לכלל השטחים המטופלים בבמס"א.

העלות תכולת המים בקרקע (WI) – התכונות הפוצולניות (התקשות בתגובה עם סיד בסביבה מימית) של האפר המרחף, ולפיכך גם של הבמס"א, מביאות לשפור התכונות הפיזיקליות והכימיות של קרקעות. קרקעות חוליות הן אלה שיושפעו בעיקר, בגלל הגדלת תאחיזת המים וכמות המים הזמינים ובגלל ייצוב הקרקע בפני סחף רוח. הנחנו כי תוספת היבול עקב העלאת תכולת המים בקרקע תהיה דומה להבדל ביבול בין אזור שחון יחסית לאזור גשום יותר, כגון הגדלת תכולת המים בקיבול שדה מכ-2.5% לכ-5% [3], ובהתאם לכך הגדלה של תכולת המים הזמינים בשכבת החריש בכ-6 מ"מ. תרומת הגשם ליבול גרגרים מעל קו הבצורת (200 מ"מ לשנה) היא 1 ק"ג למ"מ בתנאי דישון תקין, ולפיכך העלייה הצפויה ביבול הגרעינים היא כ-6 ק"ג לדונם לשנה, שהם כ-3% עלייה בהכנסה הנקייה. לפיכך,

$$(1) \quad (WI = YR * RE * (0.2))$$

כאשר YR (Yield Rate) – שיעור השוני ביבול, הוא 3% מהיתרה השנתית הממוצעת לדונם (RE). החישוב ליתרה שנתית נעשה לפי יתרה לרווח מקובלת בחיטה של כ-180 ש"ח לדונם לשנה, ו-3% ממנה הם 5 ש"ח לדונם לשנה. כיוון שהטיב שחושב אופייני לקרקע חולית, שבהערכה גסה היא כ-20% מהשטח שמתוכננת בו כיום הוספת במס"א, מקדם החשיפה נלקח כ-0.2, והתועלת המשוקללת בשטח היא 1 ש"ח לדונם.



יפוי אפר פחם תחתי בתחנת הכוח רוטנברג / צילום: מנהלת אפר הפחם

שיפור תכונות פיזיקליות של הקרקע (TL) – כאמור, אפר פחם מרחף עשוי לטייב קרקעות שוליות בעקבות העלאת תאחיזת המים בחול דיונה וייצובה מפני סופות רוח, הפחתת שיעור הנגר בקרקעות שקרומים קשים נוצרים על פניהן בעקבות הרטבה וייבוש, הפחתת הפלסטיות והסידוק בקרקעות חרסית-נתרנית, ועידוד התפתחות קרומים ביולוגיים בדיונות. כדי להעריך את המשמעות הכלכלית הנחנו כי אירוע סחיפה של קרקע חקלאית (F) מתרחש אחת ל-15 שנה, ולכן החקלאי מפחית לכאורה מהכנסתו מדי שנה סכום שערך המצטבר במהלך 15 שנה יהיה שווה ערך לנזק הנגרם מאירוע הסחיפה. בהתאם לכך, החישוב הוא לפי תשלום שנתי שמביא בחשבון את מספר השנים (15), את הריבית בשוק (7%) ואת ההכנסה שאובדת אחת ל-15 שנה. חישוב התועלת בוצע עבור גידול תפוחי אדמה (גידול חשוב בקרקעות הקלות בצפון-מערב הנגב). הכנסה נקייה ממוצעת רב-שנתית (RE) היא 500 ש"ח לדונם לשנה^[5], ושיעור הריבית (Rate) כדלעיל. התועלת המשוערת (TL) משיפור תכונות הקרקע בעקבות שימוש באפר פחם מרחף או בבמס"א היא:

$$(2) \quad (TL = PMT(Rate, F, RE) = 55)$$

אומנם מניעת נגר וסחף (סחף רוח וסחף מים) מתייחסת למגוון רחב של קרקעות, אולם מאחר שעיקר התועלת הצפויה היא בחול ובלס, נתייחס רק לקרקעות אלה. לפיכך, מקדם החשיפה נקבע כ-0.5, והתועלת המשוקללת בשטח מוערכת ב-27 ש"ח לדונם לשנה.

הפחתה בתצרוכת מי השקיה – עלייה בתאחיזת המים בקרקע בעקבות תוספת אפר פחם מרחף עשויה לאפשר חיסכון במי ההשקיה. מדובר בעיקר בהשקיות הטכניות הניתנות למילוי עומד, להנבטה ולביסוס הגידול, ובעיקר לאחר אירועי גשם. בעומד השקיה של 400 מ"ק לדונם לשנה הנחנו כי המרכיב הרלוונטי לחיסכון הוא כ-50 מ"ק לדונם לשנה, וכי בשטחי חול ניתן לחסוך כ-10 מ"ק לדונם לשנה בעלות של 1.5 ש"ח למ"ק לשנה. מכאן, שסך החיסכון הוא 15 ש"ח. סך כל השטח המושקע מתוך פוטנציאל השטחים המיועדים לתוספת במס"א הוא כשליש. מקדם החשיפה הוא 0.3, ולפיכך התועלת המשוקללת ליחידת שטח מייצגת היא 5 ש"ח לדונם לשנה.

הקטנת השטיפה של יסודות הזנה – ההנחה היא שעיקר השטיפה אל מתחת לבית השורשים היא של חנקן מינרלי, וכי בקרקעות בארץ שטיפת מרכיבי דשן אחרים זניחה בדרך כלל. השחרור האיטי יחסית של חנקן מזבל מאט את שטיפתו מהקרקע בהשוואה לשטיפה מדשן כימי, וניתן להניח כי מדשן או מבמס"א יישטפו כ-25% מהחנקן המינרלי הנוצר ממינרליזציה של החנקן האורגני (כמחצית ממידת השטיפה של דשן מסחרי הזמין לשטיפה מרגע הוספתו לקרקע). מדידות בשדה מסחרי חולי הראו כי יעילות ניצול החנקן מבמס"א הייתה גבוהה מאוד יחסית לדשן חנקני, שנשטף כולו [2]. בהערכה השמרנית לעיל, ההפחתה בכמות החנקן הנשטף היא כ-5 ק"ג לדונם, שערכם 36 ש"ח. הדבר נכון בעיקר בשטחי בעל, שכן בשלחין הדישון מבוקר יותר ופוטנציאל השטיפה נמוך יחסית. לפיכך, מקדם החשיפה הוא 0.8, והתועלת הפרוסה על חמש שנים היא 7 ש"ח לדונם לשנה. מן הראוי להדגיש כי למניעת דליפה של חנקות יש ערך סביבתי שלא ניסינו לכמת כאן.

זפחת עשבייה ופתוגנים שוכני קרקע הודות לפיזור במס"א – הגורם הביצידני (חומר הגורם לקטילה של מערכות ביולוגיות, יהיו אלה צמחים, חיידקים או יונקים) הפעיל בשדה המטופל במס"א הוא אמוניה גזית. הבמס"א גורמת לשפעול האמוניה בקרקע [15, 10]. היות שכך, ניתן לחסוך באמצעות הוספת הבמס"א חלק מעלות חיטוי הקרקע בגידולי שדה. לשם הזהירות הנחנו כי החיסכון הוא 50 ש"ח לדונם בשנת הפיזור בלבד. לפיכך, בפריסה לחמש שנים החיסכון הוא 12 ש"ח לדונם לשנה. במקדם החשיפה 0.3 (שלחין בלבד) התועלת המשוקללת היא 4 ש"ח לדונם לשנה.

וספת יסודות קורט חיוניים לצמח ולאדם – שימוש באפר פחם מרחף ובבמס"א תורם יסודות קורט חיוניים לאדם ולצמח [32]. אף על פי שהתועלת הנובעת מתוספת יסודות הקורט מחושבת במחקר זה על בסיס ערכה לחקלאי, כמה יסודות, כמו סלניום ומוליבדן, שמקורם באפר הפחם, מועילים גם לאדם. ייתכן שבעתיד ניתן יהיה לגבות על כך מחיר מהצרכן. לדוגמה, כמקדם מכירות על עטיפות צ'יפס המיוצר באיטליה (SELENELLA) נכתב כי הוא עשיר בסלניום. ערך יסודות הקורט המוספים עם הבמס"א נבדק במגוון גידולים וקרקעות [20, 18]. עלות פיזור יחיד של יסודות קורט מוערכת בכ-20 ש"ח לדונם, ובגידול ירקות מקובל לפזר שלוש פעמים. בגידולי שדה לא נהוג להוסיף יסודות קורט, אך נראתה תוספת קליטה ויבול בקטניות למספוא גם חמש שנים לאחר השימוש. הונח כאן כי הזמינות בירקות תהיה לשנת הפיזור בלבד, וערכה הוא 60 ש"ח לדונם לשנה, שהם 14 ש"ח לדונם לשנה בפריסה לחמש שנים בריבית של 7%. בגידולי שדה מוערכת תוספת ערך של 20 ש"ח לדונם בשנה הראשונה והזמינות פוחתת בהדרגה בארבע השנים הבאות לערך של 11 ש"ח לדונם לשנה. בהנחה שמדובר על יתרון לכלל השטחים המטופלים בבמס"א, ושהיקף הגידול האינטנסיבי הוא כרבע מכלל השטח המעובד, התועלת המשוקללת בשטח היא כ-12 ש"ח לדונם לשנה (לפי 14*0.25 ועוד 11*0.75).

העלאת טמפרטורת הקרקע – שימוש באפר פחם מרחף או בבמס"א בקרקע בהירה (חול, לס) יגרום למופע כהה יותר שלה, ולפיכך להקטנת האלבידו ולחימום פני הקרקע. עובדה זו עשויה להועיל לירקות חורף, כגון תפוחי אדמה (שהיתרה לרווח בהם היא 500 ש"ח לדונם לשנה). הנחנו שתדירות אירועי קרה היא אחת לחמש שנים. מכיוון שהשפעת הבמס"א על טמפרטורת הקרקע אינה ידועה, נלקח ערך מזערי של 10% מניעת פחיתה ביבול באירוע קרה, ובהתאם לכך חושבה תועלת לכאורה של 12 ש"ח לדונם לשנה. מקדם החשיפה נלקח כ-0.5 (חלק שטחי החול והלס בדרום מכלל השטחים המיועדים לפיזור הבמס"א) והתועלת המשוקללת מוערכת ב-6 ש"ח לדונם לשנה. לעומת זאת, ערך חימום הקרקע בקיץ יהיה שלילי, ובמקרה של הצורך בצינון תפוחי אדמה לפני האסיף יש להניח שתהיה הגדלה בתצרוכת המים, ואולי אף ייגרם נזק ליבול. לפיכך, התרומה לחימום הקרקע לא נכללה בסכום התועלת הכללית.

לסיכום סוגי התועלת: היתרונות העיקריים הנובעים מהוספת במס"א לקרקע חקלאית שהודגמו במחקרים הם: תוספת יסודות הזנה לצמח (חנקן, זרחן, אשלגן), זמינות חנקן מבוקרת יותר במהלך עונת הגידול (בפלחה), תוספת יסודות קורט, עלייה בתכולת החומר האורגני בקרקע (דהיינו שיפור מבנה הקרקע), הפחתת פתוגנים שוכני קרקע ושיפור בתאחיזת המים.



יזור של בוצת שפכים מטופלת בסיד ובאפר פחם בתלמים בשדה | צילום: מנהלת אפר הפחם

עלויות הכרוכות בשימוש החקלאי באפר פחם מרחף ובבמס"א

העלות מליחות הקרקע – שימוש בבמס"א בעומס רגיל ובממשק תקין לא יגרום להמלחה, אך שימוש בעומס גבוה (לצורך הדברת פתוגנים שוכני קרקע) עלול לגרום להמלחה, בעיקר בחנקות. חישוב נזקי ההמלחה נעשה על בסיס הערכת מידת ההמלחה (הנחה של שווה ערך ל-15.4 ק"ג לדונם מלח לשנה) ועלות הדחת המלחים (לפי עלות התפלה של מים מליחים – 3.2 ש"ח למ"ק או כ-1.25 ש"ח לק"ג מלח). לפי שיקולים אלה, עלות המלח המתווסף לקרקע אחת לחמש שנים היא 18.9 ש"ח לדונם, ובמונחים שנתיים בריבית השוק כ-4.6 ש"ח לדונם לשנה. בהנחה שהעלות מתייחסת רק לשטחי בעל, מקדם החשיפה הוא 0.5, והעלות השנתית המשוקללת היא 2 ש"ח לדונם לשנה. זוהי הערכה מחמירה, הואיל ובממשק נכון לא יהיה כל נזק, להפך – תוספת החנקן רק תועיל, מאחר שאין נזק צפוי בשנים העוקבות עקב שטיפה במי גשם.

מתכות כבדות ויסודות רעילים אחרים – בניסויי שדה של הוספת אפר פחם מרחף ובמס"א נמצא כי ריכוזי היסודות הרעילים (קדמיום, עופרת וארסן) בצמחי הבוחן היו בדרך כלל נמוכים מאוד, ודומים לאלה שבחלקת הבקרה של ניסוי שמקבלת את הטיפול המסחרי המקובל^[9,10,23]. עם זאת, החשש העיקרי של הרשויות מפזור אפר פחם מרחף בחקלאות הוא מהצטברות מתכות רעילות בסביבה ובגידולים. לדרישת משרד הבריאות מתקיים ניטור למשך מספר שנים של גידולים חקלאיים לפני אישורם. במהלך תקופת הבדיקה נאסר שיווק הגידולים, ונגרם נזק לחקלאי בגין צמצום חלופות הגידול. כדוגמה, נבחר תרחיש של איסור לשלוש שנים על גידול ירקות עלים, המוערך בהפסד הכנסה של 200 ש"ח לדונם לשנה^[6] לפי ממוצע הכנסה מגידולי עלים לעומת הכנסה מגידולי שורש. בשיעור חשיפה של 5% מכלל השטח המטופל בבמס"א ובפריסה לחמש שנים וב-7% ריבית, הנזק המוערך הוא 6 ש"ח לדונם לשנה.

רדיונוקלידים – על אף העובדה שבדיקות חוזרות ונשנות הראו שאין בעיה של הצטברות רדיונוקלידים (יסוד רדיואקטיבי) בעקבות שימוש חקלאי באפר פחם, הועלה חשש מהצטברות שכזאת, ועל כן בוצע ניטור לבחינת הנושא. הממצאים מראים שאין הבדל ברמת הקרינה בין קרקעות שטופלו בבמס"א לבין קרקעות ללא הוספת הבמס"א, וכן את היעדר השפעת תוספת הבמס"א לקרקע על ריכוז הרדיונוקלידים בגידולים. התוצאות מגובות בתעודות בדיקה של הכור הגרעיני של נחל שורק^[9,10,22], עם זאת, מתבצע ניטור שוטף לנוכחות רדיונוקלידים בגידולים שטרם אושרו לשיווק. במהלך תקופת הניטור תידרש הימנעות מגידול הצמחים הנבחים, הימנעות שנוקה מוערך בהפסד הכנסה של 200 ש"ח לדונם לשנה (ראו סעיף "מתכות כבדות ויסודות רעילים אחרים" לעיל). בהנחה מחמירה שהאיסור יהיה לשבע שנים, באחוז חשיפה של 5% מסך כל השטח המטופל בבמס"א ובפריסה ובריבית כאמור לעיל, אובדן ההכנסה המוערך הוא 13 ש"ח לדונם לשנה.

בורן (B) – ריכוזי הבורן באפר פחם מרחף ובבמס"א גבוהים יחסית לריכוזיו בבוצות ובזבלים אחרים, ושימוש בבמס"א עלול לגרום לרעילות בגידולים רגישים. מאידך גיסא, אם ייווצר עודף בורן הוא יתקיים לטווח זמן קצר בלבד, מאחר שהבורן נשטף בנקל במי הגשם. בארץ לא אובחנה פגיעה בגלל נוכחות הבורן בכל גידול שהוא, כולל בעומסי במס"א חריגים [11, 12, 15, 20]. עם זאת, החשש לגידולים רגישים מקטין את היצע השטחים והגידולים הרלוונטיים לפיזור במס"א. הנחנו כי הנזק הצפוי מכך הוא 200 ש"ח לדונם לשנה (בגלל צמצום חלופות הגידול), אך בשל קלות שטיפת הבורן הערכנו את תוחלת הנזק בשנתיים. בשיעור חשיפה של 5% לגידולים רגישים במיוחד ובשיעור ריבית למשך חמש שנים ההוצאה המוערכת היא 4 ש"ח לדונם לשנה.

$$B = PV(7\%, 2, 200) * 0.05 = 4 \quad (3)$$

הקטנת זמינות הזרחן ויסודות הקורט המצויים בקרקע – הגם שכמעט לא היו לכך עדויות (כולל בארבעה ניסויים באגוזי אדמה, שרגישים למחסור בברזל [16, 21]), הוחלט להביא בחשבון את ההיתכנות של הקטנת הזמינות של זרחן או יסודות קורט בשדות מטופלים בבמס"א, וזאת כתוצאה אפשרית של עליית ערך ההגבה (pH) והסידן המסיס בקרקע (ראו להלן). הואיל ומלאי יסודות הקורט בקרקע גדל בהוספת במס"א, די יהיה להערכתנו בהוספת כלאס (צורן כימי שמסוגל לקשור אליו יוני מתכות, כגון ברזל, ביותר מאתר אחד לאורך המולקולה שלו) (10 מ"ג לליטר בכ-150 מ"ק מי השקיה) כדי להבטיח את זמינותם. הכמות שתידרש היא כ-1.5 ק"ג לדונם לשנה, ועלותה כ-45 ש"ח. להחמרה, הסיכוי למחסור הוערך ב-15% מגידולי הירקות שהם כשליש משטחי הבמס"א, לכל אורך חמש השנים שלאחר הטיפול. בהתאם לכך, ניתן לחשב את העלות השנתית לפי 45 ש"ח לדונם מוכפל בכ-15% שיעור הסיכוי למחסור וב-30% שהם שטחי הירקות מכלל השטחים המטופלים בבמס"א. הנזק מוערך ב-2 ש"ח לדונם לשנה.

העלאת ערך ההגבה וריכוזי הגיר והסידן בקרקע (PH) – השפעה זו של תוספת הבמס"א יכולה להוריד את זמינות הזרחן ויסודות הקורט הקטיוניים לצמח בעיקר בקרקעות חסרות גיר, כדוגמת קרקעות חמרה. בפועל, נזק כזה לא נצפה. העלייה בערך ההגבה שנגרמת בעקבות הוספת הבמס"א נעלמת שעות או ימים ספורים לאחר הפיזור עקב תגובה של פחמן דו-חמצני עם עודפי ההידרוקסיל (לאחר הרטבת הקרקע ותוך פירוק החומר האורגני שבבמס"א, תהליך המשחרר פחמן דו-חמצני). עם זאת, ההנחה היא שפגיעה בגלל עלייה בערך ההגבה יכולה להתרחש עקב ממשק טיפול שגוי בהיקף של עד 10% משטחי הבעל (שיעור החשיפה של כ-0.1), וכי שיעור הפגיעה יהיה 20% מפוטנציאל היבול. יתרה מקובלת לגידולי מספוא בבעל היא 400 ש"ח לדונם לשנה [5]. חישוב לפי פריסה לחמש שנים בריבית ובתנאים שלעיל ייתן עלות של 2 ש"ח לדונם לשנה. אף על פי שהנזק הפוטנציאלי העיקרי הוא הקטנת זמינות זרחן ויסודות קורט שמקורם בקרקע (נזק שחושב כבר בסעיף הקודם), הכללנו סעיף עלויות זה מטעמי זהירות, כדי לכסות נזקים בלתי צפויים אחרים היכולים להיגרם מהעלייה בערך ההגבה ובתכולת הגיר בקרקע.

$$PPH = PMT(7\%, 5, 400 * 0.2 * 0.1) = 2 \quad (4)$$

פיזור והצנעה (SP) – בהנחה שעלות ההצנעה (6 ש"ח למ"ק) ועלות הפיזור (9 ש"ח למ"ק) מוטלות על כל מי שמשתמש בבמס"א, ובהנחה שהכמות המפוזרת היא 5 מ"ק לדונם, מקדם החשיפה הוא 1, והפיזור נעשה אחת לחמש שנים, מתקבל כי סך העלות השנתית לפיזור ולהצנעה היא 18 ש"ח לדונם לשנה.

$$SP = PMT(0.07, 5, 75) * 1 = 18 \quad (5)$$

מן הראוי לציין כי כיום עלות שינוע הבמס"א מוטלת על החברה המייצרת את החומר, ולכן היא מחושבת כאפס מנקודת מבטו של החקלאי. הפתרון החקלאי נותן מענה לצורך של המט"ש (מתקן הטיפול בשפכים) לסילוק הבוצה, ולכן כל עוד תהיה התארגנות של חקלאים שתאפשר עמידה כנגד המט"ש, ימשיך המט"ש לשאת בעלות השינוע, שכן למט"ש כדאי לסלק את הבוצה באמצעות שימוש חקלאי גם ללא גביית מחיר ההובלה.

סיכום ומסקנות

טבלה 1 מסכמת את תוצאות ניתוח העלות-תועלת של שימוש ארוך טווח בבמס"א בחקלאות במונחי עלות ותועלת פוטנציאליים לדונם. סך התועלת, 115 ש"ח, עולה על העלויות, 46 ש"ח לדונם לשנה.

טבלה 1. סך כל התועלת והעלות המשוקללות של שימוש בבמס"א בקרקע חקלאית (במחירי 2014, לפי ההנחות המובאות בטקסט)

תועלת	ס' לדונם לשנה	עלות	ס' לדונם לשנה
החלפת דשן כימי וספיג קרקע	59	העלאת מליחות הקרקע	2
העלאת תכולת המים בקרקע	1	הוכחת היעדר יסודות זרחן	6
שימור תכונות פיזיקליות של הקרקע	27	הוכחת היעדר רדיונוקלידים	13
הפחתה בתצרוכת מי ההשקיה	5	תוספת בורחן	3
הקטנת שטיפה של יסודות הזנה	7	הקטנת זמינות זרחן ויסודות קורט	2
הפחתה של פתוגנים שוכני קרקע	4	העלאת טווח ההגנה (H)	2
תוספת יסודות קורט זמינים	12	עלות פיזור והצנעה	18
סך כל התועלת המשוקללת	115	סך כל העלות המשוקללת	46

טבלה 1

סך כל התועלת והעלות המשוקללות של שימוש בבמס"א בקרקע חקלאית (במחירי 2014, לפי ההנחות המובאות בטקסט)

ההשפעות קצרות הטווח וארוכות הטווח של טיפול באפר פחם מרחף ובבמס"א על הגידולים, על הקרקע ועל הסביבה קובעות את הכדאיות הכלכלית לחקלאי של הטיפול. במס"א מחליפה תשומות דשן כימי בשחרור איטי, משפרת תכונות פיזיקליות וכימיות של קרקעות ומסייעת בהדברת עשבייה ופתוגנים שוכני קרקע. בהתאם לכך, מרבית הממצאים בארץ ובעולם מראים כי הוספה מושכלת של אפר פחם מרחף משולב בבוצה עשויה לשפר תכונות פיזיקליות וביולוגיות של קרקעות ולדשן אותן, וכי בכל מקרה טיפול זה לא יפגע בתפקודן התקין כמצע לגידול צמחים. השימוש בבמס"א תורם לא רק לרווחיות ולקיימות של המשק החקלאי, אלא גם לאיכות הסביבה ולמגזר העירוני. התרומה לסביבה היא, בין היתר, במניעת פליטת אמוניה וגזי חממה המתרחשת במהלך הקומפוסטציה של בוצות וייצור דשנים כימיים, צמצום הכרייה של משאבים מתכלים (דלק מחצבים המנוצל במהלך ייצור הדשן המסחרי, מחצבי זרחן, אשלגן ויסודות קורט), האפשרות להפחית שימוש בחומרי הדברה, ועצם הקיום של עקרון המחזור. התרומה למגזר העירוני היא בהפחתת עלויות סילוק הבוצה על-ידי הפנייתה לחקלאות ובצמצום משמעותי ביותר בעלויות הפסטור.

בהערכת העלות והתועלת שבוצעה במחקר זה אומצו הנחות שמרניות תוך הבאה בחשבון של עלויות הנזקים שסיכוי התממשותם זניחים, מטעמי החמרה. בשקלול העלויות הובא בחשבון גם החשש מנזקים ארוכי טווח לקרקע, שלא נחזו מראש ושנגרמו בגלל השימוש באפר פחם מרחף, וזאת אף על פי שהידע והניסיון שנצבר במהלך השנים בכל הנוגע לפיזור במס"א בקרקע חקלאית הוכיחו שסבירות נזקים שכאלה זניחה. הניסויים בבמס"א שבוצעו בארץ ובעולם, כמו גם השימוש רב השנים בה, מוכיחים עד כמה נמוכה הסבירות של נזקים ארוכי טווח בעקבות הוספתה לקרקע. למרות זאת, מתבצע מעקב בשטחי הטיפול כמקובל לגבי כל תוסף שהשימוש בו חדש יחסית, וזאת כדי להסיר כל ספק באשר לנזק, גם אם הסבירות להתממשותם זניחה. ייחודו של מחקר זה בשני היבטים עיקריים. ראשית, בכך שהוא מראה כי התועלת הכלכלית מהשימוש החקלאי באפר הפחם כתוסף לבוצה עולה על העלות, ויש מקום להמליץ לחקלאים על שימוש זה, ושנית, המודל המוצע לבחינה הכלכלית מסכם לפרטיות את התועלת מול העלות, וכך מאפשר לראות בצורה בהירה את כל היתרונות והחסרונות בשימוש בבמס"א. המודל יכול לשמש לחישוב דומה של עלות ותועלת של שימוש בתוספי קרקע אחרים. עם זאת, חשוב להדגיש כי למודל המוצע מגבלות שחשוב לתת עליהן את הדעת, והן יפורטו להלן.

מגבלות המחקר:

- החישוב בוצע לפי תנאי השוק בזמן נתון של היצע וביקוש הפחם לייצור חשמל, ייצור שהאפר הוא תוצר נלווה בו. תנאים אלה עלולים להשתנות עם הזמן.
- שימוש באפר פחם לחקלאות הוכח כיעיל, אך לא משתמע מכאן ששימוש זה הוא הפתרון "האידיאלי" לטיפול באפר או כחלופה לדשן ותוסף קרקע לחקלאות. ניתן לבצע חישוב השוואתי בין שימוש זה לחלופות אחרות בתנאי שוק נתונים בשיטה המוצגת כאן.
- שינוי בתמחור שיביא להטלת עלות השינוע של הבמס"א על החקלאים יכול ליצור מצב של חוסר כדאיות לרכישה. כדי למנוע מצב כזה, לחקלאים כדאי להתארגן מול יצרני הבוצה המעוניינים להיפטר ממנה בדרך הזולה ביותר. דרישה מהחקלאים לכסות את עלות השינוע עלולה ליצור מצב שלחקלאים יהיה כדאי לנצל חלופות נוספות, כמו שימוש בזבל פרות, בקומפוסט בוצה סוג א' ועוד.
- במחקר זה הושם דגש על גידולי שדה וזאת בגלל שיקולים אגרונומיים ותברואתיים. עם זאת, מכיוון שיכולת התשלום של מטעים גבוהה מזו של גידולי שדה, במצבי תמחור משתנים ייתכן שנוכל להשתמש בבמס"א באופן

רווחי בגידולי מטעים וירקות מושקים, בעוד שבגידולי שדה בבעל לא ישתלם השימוש.



צילום אווירי של חלקת ניסוי ברבדים. בחלקה נחנן ערכם של זבלים שונים, ובהם במס"א (בחלקות הניכרות בצבען הבהיר), כדשן | צילום: דוד שביט, כימניר

מקורות

1. אמדור ל, צבן ח, אבנימלך י ואילון א. 2005. שמירה על המרחב הכפרי מודל יישום חקלאות בת קיימא. מוסד שמואל נאמן.
2. בוסק א וריצ'קר ע. 2015. שיפור יבול חיטה לגרעינים בכתמי קרקע חוליים – לפידות 2014–2015. כנס פלחה חורף – קיבוץ ארז 2015.
3. בר טל ש. 2008. שימוש באפר פחם מרחף מרחף לשיפור תכונות של קרקעות שוליות בישראל (עבודת גמר לתואר מוסמך). רחובות: האוניברסיטה העברית בירושלים.
4. גיפס ע. 2008. הדברת גורמי מחלות שוכני קרקע באמצעות אמוניה (עבודה לקבלת תואר דוקטור). רחובות: האוניברסיטה העברית בירושלים.
5. גל ב וסלומון א. 2014. תחשיבים לגידולי שדה. משרד החקלאות ופיתוח הכפר.
6. גל ב ומדלאג ג'. 2012. תחשיבים בגידול ירקות. משרד החקלאות ופיתוח הכפר.
7. אפרת ה, גרינהוט צ ופרידקין צ. 2013. ניהול תוצרי הלואי בחקלאות ישראל והגדלת כושר הטיפול במשאביהם. משרד החקלאות ופיתוח הכפר.
8. אפרת ה, איזנקוט א, מינגלגרין א ופיין פ. 2016. עלות מול תועלת כלכלית של השימוש החקלאי באפר פחם מרחף – חישוב כלכלי של השימוש החקלאי באפר בשילוב עם בוצה.

9. חקין ג. 2013. קליטת רדיונוקלידים בתוצרת חקלאית – מסמך עמדה. יבנה: הוועדה לאנרגיה אטומית, ממ"ג.
10. כ"ץ ג ושוורץ א. 2013. סקר מתכות ורדיונוקלידים בגידולים עם דשן DAN-VIRO: דו"ח ממציא האנליזות – חוות דעת מקצועית. הוגש למנהלת אפר הפחם ולמשרד הבריאות.
11. לוי ג, פיין פ, בוסק א ואחרים. 2013. טיוב קרקע חרסית-נתרנית באמצעות במס"א, אפר פחם, וקומפוסט בוצה. בתוך: פיין פ (עורך). ייעוד במס"א ליישום חקלאי – מעקב אגרונומי וסביבתי, צביר דו"חות מוגש למנהלת אפר הפחם.
12. פיין פ, רוזנברג ר, גולדשטיין ד ולוי ג. 2007. טיוב קרקע נתרנית בעזרת בוצות שפכים. *גן שדה ומשק אפריל*: 30-26.
13. פיין פ. 2013. ייעוד במס"א ליישום חקלאי – מעקב אגרונומי וסביבתי. צביר דו"חות מוגש למנהלת אפר הפחם.
14. פיין פ, בוסק א, בריוזקין א ורבאח א. 2013. ייעוד במס"א ליישום חקלאי, 2013, – 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.
15. פיין פ, בוסק א, קילמן י ואחרים. 2013. יישום אפר פחם 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.
16. פיין פ. 2014. השפעת במס"א על מדדי צמיחה, על הקרקע ועל הסביבה – תמצית ממציא מחקרים. מסמך עמדה למדען הראשי במשרד להגה"ס ולמנהלת אפר הפחם. בית דגן: המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי – מרכז וולקני.
17. פיין פ, בוסק א, בריוזקין א ואחרים. 2014. הערכת איכות בוצות ואשפה עירונית כתחליפי דשן כימי בגד"ש. *ניר ותלם* **56**: 35-27.
18. פיין פ, קורצמן ד, שרגיל ד ואחרים. 2014. 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.
19. פיין פ, קורצמן ד, שרגיל ד ואחרים. 2014. 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 301-0705-12 לשנים 2011-2013 בנושא: אופטימיזציה של השימוש בבוצות שפכים בגד"ש. הוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות. בית דגן: המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה.
20. פיין פ. 2015. הערכת כדאיות של יישום זבלים כתחליף דשן בגד"ש, *ניר ותלם* **59**: 26-21.
21. פיין פ. 2015. 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. דו"ח למנהלת אפר הפחם. בית דגן: המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי – מרכז וולקני.
22. קוך ז'. 2002. הערכת החשיפה לקרינה מייננת בשימושי אפר הפחם בחקלאות. יבנה: המרכז למחקר גרעיני נחל שורק.

23. קורן ז'. 2010. חשיפה לקרינה מבמס"א – מסמך עמדה. יבנה: המרכז למחקר גרעיני נחל שורק.
24. רוזנטל גופוקס ה. 2015. ניתוח כלכלי של ממשקי עיבוד בגידולי הבעל בנחל שקמה. מכון דש"א.
25. Curran MA. 2006. Life Cycle Assessment principles and practice. Scientific Applications International Corporation (SAIC), Work Assignment 3-15. EPA/600/R-06/060 Contract No. 68-C02-067
26. Epstein PR, Buonocore JJ, Eckerle K, et al. 2011. Full cost accounting for the life cycle of coal. *Annals of New York Academy of Sciences*, DOI: 10.1111/j.1749-6632.2010.05890.
27. Hong J, Xu C, Hong J, et al. 2013. Life Cycle Assessment of sewage sludge co-incineration in a coal-based power station. *Waste Management* **33**(9): 1843-1852.
28. IPCC. 1996. [Revised guidelines for national greenhouse gas inventories](#). IPCC/OECD/IEA. In: Callender BA (Ed). Bracknell: UK Meteorological Office. Viewed Jul 2009.
29. Korcak RF. 1995. Utilization of coal combustion by-products in agriculture and horticulture. In: Karlen DL, Wright RJ, and Kemper WO (Eds). Agriculture utilization of urban and industrial by-products. Madison (WI): ASA Special Publication No 58. ASA, CSSA, SSSA.
30. Manoharan V, Yunusa IAM, Loganathan P, et al. 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.
31. Logan TJ and Burnham JC. 1994. The alkaline stabilization with accelerated drying process (N-Viro): An advanced technology to convert sewage sludge into a soil product. In: Karlen DL, Wright RJ, and Kemper WO (Eds). Agriculture utilization of urban and industrial by-products. Madison (WI): ASA Special Publication No 58. ASA, CSSA, SSSA.
32. Ukwattage NL, Ranjith PG, and Bouazza M. 2013. The use of coal combustion fly ash as a soil amendment in agricultural lands (with comments on its potential to improve food security and sequester carbon). *Fuel* **109**: 400-408.
33. Veeresh H, Tripathy S, Chaudhuri, D, et al. 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.

נספחים (זמינים באתר)

נספח 1. שיטות
החישוב הכלכלי

[להורדה](#)

