



מנהל המחקר החקלאי

**שימוש באפר פחם
לשיפור תכונות של קרקעות חקלאיות
הצעת מחקר**

מוגשת על ידי

אורי מינגלגרין, פנחס פיין, ורמי קרן המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי, אריה בוסק חוקר אזורי, מגדלי דרום יהודה וברק גובר, גד"ש מעגן מיכאל

למינהלת אפר הפחם

20.12.2003

בית דגן

שימוש באפר פחם לשיפור תכונות של קרקעות חקלאיות

רקע

רק חלק מזערי מכלל אפר הפחם המיוצר מנוצל כיום לשימושים חקלאיים. מאידך, פוטנציאל השימוש החקלאי גדול בעשרות מונים מן השימוש בפועל ולפי הערכות אופטימיות פוטנציאל זה גדול מסך כל הייצור השנתי העולמי של אפרי הפחם לסוגיהם (מינגלגרין, 2003). הייצור השנתי בישראל של אפר הפחם לסוגיו השונים הוא בסביבות כ- 1,300,000 טון וחלק נכבד מכמות זו הוא בעל פוטנציאל לשימוש בחקלאות. ערכו הכלכלי של השימוש בחקלאות אינו נובע רק מהתועלת לחקלאי, אלא גם מההימנעות מן הצורך לסלק את האפר לאתרי סילוק. למשל, Sell et al. (1989), הראו כי עלות הפיזור בשדה של אפר תחתי זולה בכ- 60% מעלות סילוקו לאתר מוסדר.

להלן כמה מתכונות אפר הפחם המכתיבות את השימוש האפשרי שלהם בחקלאות:

אפר הפחם המרחף הוא מקטע האפר הקטן דיו להיות נישא מן הכבשן אל הארובה בזרם האוויר החם. רב החלקיקים נמצאים בתווך הגודל של 20 - 2 מיקרון קטר נידמה, כלומר בתחום המקטע הסילטי הבינוני והעדין. חלקיקי האפר המרחף הם בדרך כלל כדוריים, לעיתים קרובות זכוכיתיים, בעלי שטח פנים בסביבות $1 \text{ m}^2/\text{g}$. האפר התחתי, זה הנותר בתחתית הכבשן, מורכב מחלקיקים גדולים יותר ובעלי מורפולוגיה מוגדרת פחות. המרכיבים העיקריים של האפר הם CaO , Fe_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 . המינרלוגיה של אפר הפחם מורכבת, אולם המרכיבים האמורפיים הם המרכיבים הדומיננטיים ובפרט באפר המרחף.

רוב אפרי הפחם ובפרט אלו הנוצרים בארץ הם בסיסיים ותגובת תמיסה מימית בשווי משקל אתם היא בתחום ערכי pH של 8-11. מאידך, קיימים אפרים חמוצים ואף כאלו שהתגובה בתמיסה המצויה בשווי משקל אתם היא בסביבות 4 (למשל, http://www.floridacenter.org/publications/coal_fly_ash_92-3.pdf).

ההרכב הכימי של האפר תלוי בסוג הפחם, מקורו ואופי תהליך השריפה. מעל ל-90% של האפר על סוגיו השונים מורכב מהיסודות Al, Ca, Fe, Mg, K, Si, Na, Ti. לפחות 5 מתוך 8 היסודות הללו הם יסודות הזנה חשובים לגידולים חקלאיים, אולם נוכחות יסודות המקרו האחרים או יסודות נוספים ברמות קורט עשויים להגביל את ניצול האפר לשימושים חקלאיים, משום פגיעה בגידול או משום סכנת זהום סביבתי או פגיעה בבריאות הציבור. תחום ריכוזי יסודות הקורט באפרים השונים רחב ביותר ותחומים אופייניים ניתנים למשל על ידי מינגלגרין, (2003). ככלל, גבוהות רמות הסלניום, הארסן והנחושת באפר המרחף מאשר באפר התחתי. כאשר הבעירה מתבצעת בטמפרטורה מספקת, גם ריכוזי הכספית והגופרית באפר התחתי יהיה נמוך יחסית. כל אפרי הפחם מכילים שאריות אורגניות הכוללות חמרים מסרטנים ומוטגניים כגון מולקולות פוליאורומטיות (e.g., Roy et al., 1981) ובבואנו להעריך את הסכנה הטמונה בשימוש חקלאי של אפר פחם, יש להביא נוכחות חמרים אלו בחשבון. אולם, נראה כי הסכנה העיקרית, אם זו קיימת בכלל, היא לעובדי שדה העלולים לקלוט את האפר המרחף כאבק נשים. סבירות הקליטה על ידי הצמח של חמרים אלו והינזקות מאכילתו נמוכה ביותר (Korcak, 1998). אפר הפחם מכיל גם כמויות מזעריות של רדיונוקליאידים כגון אורניום ורדיום. אולם, רב האפרים אינם מכילים ריכוזי איזוטופים אלו מעל תחום הריכוזים המצוי בקרקעות זמינותם של האיזוטופים המצויים באפר נמוכה. בהתאם, ריכוזי האיזוטופים הרדיואקטיביים במצוי מימי של דוגמאות אפר פחם נמצא מתחת לריכוזים המהווים סכנה לבריאות הציבור (U.S. Geologic Survey, 1997).

וויסות התכונות הפיזיקליות והכימיות של האפר ניתן להיעשות בעזרת הפרדת מקטעי הגודל השונים של האפר. דוידסון וחובריו (1974), הראו כי קיים הבדל משמעותי בין תכולת היסודות במקטעי הגודל השונים. חוקרים אלו וכן Phung et al., (1979) הראו כי ככל שקטן גודל הגרגר עולה ריכוז היסודות Se, Ca, As, Pb, Ni, B, Mo, Ni, Cr ו-Sn. סילוק המקטע העדין של האפר המרחף ישפר, לפיכך, את התאמת האפר לשימוש חקלאי. בהתאם, הוספה לקרקע חקלאית של אפר תחתי ניתנת להיעשות ברמות גבוהות משל אפר מרחף ללא גרימת נזק סביבתי או תברואתי. ניתן לעיתים לשפר את

התאמת האפר לשימוש חקלאי על ידי ערבוב אפרים מסוגים שונים כגון אפר מרחף ואפר תחתי (Macak & Night, 1985). קיימות שיטות, למשל הפרדת סולפידים על בסיס הצפיפות היחסית מיתרת הפחם, להפחתת ריכוזי גפרית, סלניום ומתכות קורט אחרות באפר.

למותר לציין שהדיון דלעיל חוטא בהכללות. כל שימוש חקלאי באפר פחם מחייב בחינת התאמתו של האפר המיועד לשימוש המסוים לגופו.

שימושים באפר פחם למטרות חקלאיות:

תוסף לשימוש חקלאי צריך לתרום ישירות לגידול, למשל על ידי שפור מבנה הקרקע או תרומת יסודות מזון; לסייע בשימור הפוריות העתידית של הקרקע, למשל על ידי מניעת סחף; או להחליף תוסף או פעילות חקלאית אחרים תוך הסכון בעלויות או מניעת פגיעה סביבתית, למשל הקטנת צריכת חומרי הדברה. כל זאת, תוך שמירת מאזן חיובי של עלות-תועלת הן מן ההיבט הכלכלי והן מן ההיבט הסביבתי.

מרבית יסודות הקורט המצויים באפר פחם כמו גם יסודות מקרו (למשל K), הם יסודות מזון חיוניים. אפילו בורון, שבתנאי הארץ נחשב ליסוד רעיל משום ריכוזו הגבוה יחסית במים ובקרקע, הוא יסוד חיוני לצמח. מכאן שלהוספת אפר יכול להיות ערך דישוני מסוים. ואכן דווח כי אפרי פחם יכולים לשמש כמקור להשלמת חסרים של סלניום, מוליבדן, נחושת, אבץ בורון ויסודות אחרים (e.g., Page et al. 1979, Adriano et al. 1980, Aitken et al. 1984, El-Mogazi et al. 1988, Brieger et al. 1992). אפר פחם יכול להוות מקור לכל יסודות המזון החיוניים למעט חנקן. הגם שזרחן יכול לעיתים להמצא באפר פחם, זמינותו תהיה נמוכה בד"כ (בקרקעות ניטריות ובסיסיות). יתרה מזו, כמויות הברזל, האלומיניום והסידן הגבוהות יחסית במרבית האפרים יכולות אף להפחית את זמינות הזרחן המצוי בקרקע או המוסף כדשן, כתוצאה מהיווצרות תרכובות קשות תמס.

חלק מהיסודות המשתחררים מן האפר עלול להיות זמין ברמות שהן רעילות לגידולים רגישים (למשל בורון בהדרים), או לחילופין להצטבר ביבול ברמות המהוות סיכון לאדם או לבעל החי האוכל את היבול, לסכן את הביטחון של הקרקע, או לנוע אל עבר מקורות מים תחתיים או עיליים. סלניום, למשל, עלול לגרום גם בריכוזים נמוכים יחסית לנזקים חמורים לבעלי חיים הניזונים מצמחים עתירי סלניום, למרות שכמות נמוכה של יסוד זה חיונית להם. גם יסודות שאינם יסודות קורט, כגון גופרית המופיעה כסולפיד, עלולים להשתחרר ברמות מזיקות לצמחים. הוספה מוקדמת דיה לקרקע של אפר, שתאפשר חמצון הסולפיד לסולפט לפני המגע עם הצמח היא דוגמה לאמצעי שימנע נזק פוטנציאלי.

יסודות הקורט המצויים באפר פחם שהם הזמינים ביותר ולפיכך המהווים את הסכנה הפוטנציאלית העיקרית לסביבה ולצמח הם אלו הנוטים לייצור אוקסיאניונים, כדוגמת בורון, כרום, מוליבדן, ארסן, ונדיום וסלניום. פיין וחוב' (2003), הראו שחסה שגודלה במכלים על מצע של אפר מרחף מעורב בחול אכן קלטה כמות משמעותית של אוקסיאניונים (8.5 ו- 40% של תכולת המוליבדן והכרום הניתנים לשיטפה מהאפר בבית השורשים, בהתאמה). מאידך, לא אובחנו שום נזק לגידול כתוצאה מקליטה זו או מנוכחות האפר בכלל. גידולי עלים, כמו חסה, הם קולטים יעילים יחסית של יסודות קורט.

חשוב ללמוד את קצבי השחרור של היסודות השונים מן האפר אל הקרקע על מנת להגדיר את המינון הרצוי של תוספת אפר לקרקעות בכל הנוגע לזמינות היסודות ולהתאים את כמות האפר המוסף וסוגו לצרכי הגידול.

אפר פחם יכול לשמש לוויסות ה-pH בקרקע. מכיוון שרוב קרקעות ישראל בסיסיות וכך גם המיצוי המימי של האפרים המיוצרים בארץ, שימוש זה אינו מעשי בד"כ אלא במצבים יוצאי דופן. ההערכה היא (Korcak, 1998) כי השימוש החקלאי הגלובלי העיקרי של אפר הפחם יהיה לוויסות ה-pH של הקרקע. נושא זה יכול להיות בעל חשיבות רבה בתנאי הארץ, מאחר שהגורם המגביל לכמות האפר שניתן יהיה להוסיף ליחידת שטח עלול להיות עלייה בלתי רצויה ב-pH הקרקע. תוספת אפר בשילוב עם חומר אורגני פעיל כגון בוצת שפכים, עשויה להחזיר את הקרקע לרמת ה-pH הרצויה תוך מספר ימים או לכל היותר שבועות לאחר ההוספה המשולבת. כך למשל, אפשר ליישם אפר להעלאה זמנית של pH

תמיסת הקרקע לשם פגיעה בפתוגנים שוכני-קרקע, וירידה לרמות מיטביות לגידול עם הזמן כתוצאה מהכללת התוסף האורגני.

כאמור, נוכחות יוני אלומיניום, ברזל וסידן בקרקע מועשרת באפר פחם עלולה לגרום לירידה בזמינות הזרחן ובפרט ב - pH הבסיסי הצפוי בתמיסת הקרקע המועשרת. מאידך, תוספת אפר פחם יחד עם תוספים אורגנים כגון זבל עופות (היוצרים עודף זרחן זמין ולכן הם מהווים סיכון סביבתי), תאפשר וויסות זמינות הזרחן לרמה המיטבית לגידול (Korcak, 1998). תוספת משולבת של חומר אורגני, כגון בוצת שפכים, יחד עם אפר פחם יכולה גם למנוע את הפחיתה בפעילות המיקרוביולוגית שנצפתה בקרקעות מועשרות באפר פחם (Pichtel and Hayes, 1990). שימוש בקומפוסט של תערובת אפר פחם וזבל עופות לייצור מצעי גידול, דווח בעבר (Brodie et al., 1996).

לשימוש החקלאי של אפר בצרוף עם תוסף אורגני (Co-utilization) יש פוטנציאל יישומי רב (ראה למשל, Pang Oi Yan, 1994 – Stehouwer & Sutton, 1992). רבים דיווחו על תגובה חיובית של גידולים לתוספת זבל בעלי חיים או קומפוסט בוצת שפכים עירוניים יחד עם אפר מרחף (Adriano et al., 1982; Garau et al., 1991; Menon et al., 1992; Ghuman et al., 1994). הוא מקור לחנקן החסר באפר הפחם. השימוש בתערובות של אפר תחתי וקומפוסט של גפת ענבים או של זבל בקר במצעים מנותקים נוסה בהצלחה בארץ (Chen et al., 1991). לפיכך, נראה כי שילוב אפר פחם תחתי עם קומפוסט יכול לשמש תחליף לטוף. דבר זה הוכח בניסוי חממות מסחריות בגידול עגבניות שרי (חן ואביעד, 1999). תוצאות הניסוי הראו שלא הייתה הצטברות יסודות קורט ביבול ברמה מזיקה. Beaver (1994) דווח על קומפוסטציה משולבת של זבל בקר עם אפר מרחף בשיעור של עד 32%. בעוד שהתגובה של האפר לבדו הייתה 11.6, לקומפוסט המשולב היה ערך pH סופי תקין של 8.6.

אפר פחם עלול להכיל כמויות משמעותיות של מלחים מסיסים כגון מלחי נתרן. שחרורם עלול להעלות את רמת המליחות של תמיסת הקרקע לרמות המזיקות לצמח. הנתרן יגרום לפגיעה בפוריות הקרקע, שכן הוא יחליף קטיונים דו-ערכיים בקומפלקס הסופח, וכתוצאה מכך תגדל נטית החרסיות בקרקע לעבור דיספרסיה, דבר שיפגע במוליכות ההידראולית שלה, ויגדיל את הנגר והסחף. סכנת הניתרון גדולה במיוחד באזורים צחיחים כדוגמת מרבית שטחה של ישראל, למשל כתוצאה מהצטברות הנתרן בקרבת פני השטח בעקבות תנועה כלפי מעלה של תמיסת הקרקע המונעת על ידי התאיידות. שימוש באפר ישן (או מיוצב) הביא להקטנת כמות המלחים המסיסים שבו כמו גם לפחיתה בנזקי בורון (מינגלגריין, 2003). ייצוב גורם לא רק לשטיפת המלחים המסיסים לפני הוספת האפר לקרקע, אלא גם לקיבועם כתוצאה מקרבונציה (היווצרות $CaCO_3$). השימוש באפר מרחף מיוצב יפחית גם מפגעי אבק לעובדי השדה. הוספת תערובת מפוסטרת של אפר מרחף עם בוצת שפכים וסיד לקרקעות שנזרעו בהן גידולי מרעה נתנה תוצאות מצוינות כאשר ההוספה בוצעה כשנה לפני הזריעה. ככל שקוצר הזמן בין ההוספה לזריעה היו התוצאות מוצלחות פחות, ויישום התערובת שהכילה אפר פחות מחודשיים לפני הזריעה הקטינה את שיעור ההצצה בהשוואה לקרקע ללא התוספת (Rethman et al., 2001).

לאגרוטכניקה של השימוש באפר עשויה להיות השפעה משמעותית על הנזקים הצפויים כתוצאה מהמלחה. למשל, פזור על פני השטח ולאחר מכן חריש שיביא לקבורת האפר המוסף בעומק יכול למנוע פגיעה בנבטים הרגישים במיוחד למליחות משום ששורשיהם יגיעו לשכבה המכילה אפר רק זמן מסוים לאחר ההצצה (Korcak, 1998). פיזור מוקדם, ובעקבותיו שטיפה או חשיפה לגשם יביאו לירידה במליחות תמיסת הקרקע אליה ייחשף הגידול. שמושים באפר פחם המאפשרים הוספתו ברצועות יפחיתו גם הם את הפגיעה בצמח ובקרקע כתוצאה משחרור מלחים מסיסים.

תוספת אפר פחם יכולה לשפר את התכונות הפיזיקליות (למשל את המבנה או את התכונות ההידראוליות והאוויר) הן של קרקעות חרסיות והן של קרקעות חוליות. בקרקעות חרסיות תצמצם תוספת האפר את מידת התפיחה והסידוק של הקרקע ובקרקעות חוליות היא תשפר את תאחיזת המים. הפרדת האפר למקטעי גודל שונים תאפשר תוספת מקטע גודל המתאים לשיפור מרקם הקרקע. כך למשל דווחו Chang וחובריו (1989), על שיפור באוויר בקרקע לה הוסף המקטע הסילטי של אפרי פחם שונים. עלייה בתאחיזת המים של קרקעות כתוצאה מתוספת אפר דווחה בספרות (מינגלגריין, 2003).

השימוש באפר מרחף כמטייב קרקע נבחן בארץ על ידי גל וקרן (1993). הניסוי נערך בקרקע חרסיתית בגן שמואל עליה גידלו חיטה ותירס. נבחנו שיטות הוספה שונות של האפר (פיזור על פני השטח והצנעה). נוכחות האפר שיפרה את הדירות הקרקע למים בכל הטיפולים. ריכוז הבורון בתמיסת הקרקע היה נמוך יחסית, כנראה בגלל ספיחתו לחרסיות, וגם ריכוזי המוליבדן והסלניום היו מתחת לרמות המוגדרות כרעילות. תוספת האפר העלתה את היבול, וריכוזי בורון, מוליבדן וסלניום בצמחים היו נמוכים מאלה העלולים לגרום לנזק לצמח או לבעלי החיים שיוזנו בו.

אפר מרחף בקרקע חולית יכול להגדיל את אחוז הנקבובים הקטנים ובכך להעלות את יכולת האצירה של הקרקע למים (Chang et al. 1977). בניסוי שדה באנגליה (Salter et al. 1971) נבחנה השפעת אפר פחם בקרקע חולית על התכונות ההידראוליות של הקרקע ועל התפתחות הגידולים גור, חסה, צנונית וסלק סוכר. בכל המדידות לאורך תקופת הגידול נמצא שתכולת המים בקרקע המכילה אפר פחם בשעור גבוה מ-25 טון לדונם, שעור שהוא מעל 6% ממשקל הקרקע (האפר עורבב בשכבת קרקע של 30 ס"מ), היה גבוה מזה שהיתה בקרקע ללא אפר. העליה בכמות המים הזמינים הושגה בתחום המתחים 0.05 ו-1.0 אטמוספרות. תוצאות דומות התקבלו בניסוי שנערך במדינת Delaware, ארה"ב. אפר פחם שהוסף לקרקע חולית בשעורים שונים גרם לעליה ביכולת אצירת מים בקרקע חולית מ-12% בקרקע ללא אפר ל-25%, לדוגמא, כאשר הוסף אפר פחם בשעור של 30%, על בסיס משקלי (Ghodrati et al. 1995). אפר הפחם הגדיל לא רק את היכולת לאצירת מים, אלא גם את תכולת המים הזמינים בקרקע חולית בתחום לחצים שבין 100 – 300 קילו פסקל (Gangloff, et al. 2000).

השיפור בתכונות הפיזיקליות והכימיות של הקרקע הנובע מתוספת אפר פחם מצביע על כך שהאפר יכול לשמש לשיקום קרקעות מופרות, למשל בתהליכי שיקום מחצבות או מכרות פתוחים, גם אם השימוש המיועד אינו חקלאי אינטנסיבי. דיווחים רבים על פיתוח יער מסחרי או מרעה בקרקעות משוקמות על ידי תוספת פסולות שריפת פחם מופיעים בספרות (למשל Carlson & Adriano. 1991; Environmental Management Services. 1992).

התכונות הפוצולניות של אפר הפחם המרחף עלולות לגרום לפגיעה בפוריות הקרקע בהוספה בלתי זהירה של האפר. צמנטציה של הקרקע עקב תוספת בלתי מבוקרת של אפר מרחף תוריד את המוליכות ההידראולית של קרקע ותעכב גידול שורשים. מאידך, ניצול מושכל של התכונות הפוצולניות עשוי להביא תועלת. הנזקים הפוטנציאליים ניתנים למזעור בעזרת שימוש באפר מיוצב או על ידי שמירת מינון האפר המוסף ברמות מיטביות. הוספת האפר בפסים או טכניקות הוספה מתאימות אחרות יפחיתו גם הן את הנזקים הנובעים מנטיית האפר המוסף לקרקע להתקשות לאחר הרטבה. כאמור, התכונות הפוצולניות של האפר ניתנות לניצול בשימושים חקלאיים. אפשר למשל ליצור שכבה נקבובית בלתי חדירה לעשבים בעזרת בטון חלש המבוסס על אפר מרחף או חומר לוואי דומה בין שורות מטע קיים למניעת הצצת עשבים רעים וכתחליף לשימוש בקוטלי עשבים (Korcak, 1988). אפר ניתן גם להוספה בתעלות לאורך שורות בשדה או במטע. נבחן למשל מילוי תעלות צרות (15 ס"מ רחב) ועמוקות (120 ס"מ עומק) באפר FBC שהוא בעל תכונות פוצולניות, לאורך השורות במטע תפוחים. החומר בתעלות עבר תהליך מילוט, והגביל את הגידול הטרלי של השורשים. דבר זה איפשר ניהול יעיל יותר של ההשקיה והדישון, וגרם להקדמת ההנבה. שחרור מתכות הקורט מן האפר היה מוגבל לרמות שסיפקו את צרכי הצמח ולא הזיקו לגידול או לסביבה (Korcak, 1998).

הוספת אפר פחם תחתי ופסולות גסות-גרגר דומות בתעלות לאורך שדה או מטע יכולה לשמש למטרות חקלאיות. ככלל, לקרקעות דקות מירקם כושר חדירות למים ומוליכות הידראולית נמוכים. פגיעה בפוריות הקרקע צפויה גם באותן קרקעות בעלות מירקם גס יותר הנוטות ליצור קרום. הוספה של חומר גס-גרגר בתעלות לאורך השדה יכולה לשפר מאד את משטר הרטיבות ולכן את הפוריות של קרקעות שכאלו. שטה זו קרויה חיפוי אנכי (slit, or vertical, mulching). גם בקרקעות בהן מצויה שכבה אטימה בעומק הקרקע (כגון נזאז) או שהקרקע נתהדקה בגלל עיבוד לא נכון בצידוד כבד, טיפול כזה עשוי לשפר את פוריות הקרקע. חיפוי אנכי מתאים במיוחד למטעים צעירים או לגידולי שורה, ואפר פחם תחתי (מהיותו יציב וגס גרגר) מתאים לשמש כחומר החיפוי.

אפר יכול לשמש בחקלאות גם למטרות אחרות מלבד כתוסף לקרקע. למשל, אפר תחתי נוסה בהצלחה בארץ (כמו גם בחו"ל), כמרכיב במצע ריפוד ברפתות (קרן וחובריו, 2000), אולם שימושים אלו אינם רלוונטיים לנושא המחקר המוצע.

יש להדגיש שכל הסיכונים הטמונים בהוספת אפר פחם לקרקע חקלאית ניתנים למניעה, הן באמצעות ממשקים מתאימים (למשל הגבלת הכמות הנוספת על פי תכונות הקרקע והגידול) והן בעזרת הגדרת קריטריוני איכות לאפר שימנעו שימוש בלתי מתאים לקרקע המטרה. כפי שהוגדרו בעבר סטנדרטים לשימוש באפר כמרכיב במלט, ניתן להגדיר סטנדרטים לשימושים חקלאיים שונים.

מטרות המחקר והנחות יסוד

על בסיס הידע שנצבר בעולם אודות שימושים חקלאיים בפסולות שריפת פחם ובהמשך לעבודות שבוצעו בנושא זה בארץ (מינגלגרין, 2003), ניתן להגדיר שימושים באפר פחם שהם בעלי סבירות גבוהה של הצלחה, אולם בחינתם בתנאי הארץ לא נעשתה או לפחות לא הושלמה. מטרת הפרויקט המוצע היא לבחון שימושים פוטנציאליים של אפר פחם כתוסף לקרקע חקלאית, ולהגדיר בניסויים מפורטים את דרכי היישום המיטביים של אותם שימושים אשר יוכחו בניסויים הקדמיים כבעלי סיכוי יישומי גבוה. בצד ההיבטים האגרונומיים והכלכליים, יושם בניסויים ההקדמיים דגש חזק על ההיבטים הסביבתיים, שכן ההיבטים הסביבתיים משקל רב בקביעת יישומיותו של השימוש החקלאי.

השימושים שיבחנו בשלב הסיווג הראשוני נבחרו על בסיס הצרכים האופייניים לאזורי הארץ השונים והם מפורטים להלן:

1. הגדלת פוריות קרקעות חוליות על ידי שיפור תאחיזת המים שלהן

תאחיזת המים בקרקעות חוליות נמוכה ולפיכך וויסות ההשקיה בהן דורש זהירות מרבית. קרקעות אלו רגישות ליובש או לתקלות בתפקוד מערכת ההשקיה. תוספת אפר מרחף תיצור תלכידים (בין השאר כתוצאה מהתכונות הפוצולניות של האפר המרחף) שיגדילו את תאחיזת המים.

2. מניעת היווצרות קרום, סחף, נגר והיסדקות בקרקעות לס.

קרקעות הלס, שהן בעלות תפוצה נרחבת בדרום הארץ, חסרות מיבנה ולפיכך הן נוטות ליצור קרומים האוטמים את פני הקרקע לחדירת מי-גשם ומי-השקיה, ואשר נסדקים בהתייבשותם. קרקעות כאלו רגישות לנזקי סחף ונגר. אפר פחם מרחף שיוסף לקרקעות כאלו יביא ליצירת תלכידים (כלומר, ישפר את מבנה הקרקע). שפור המבנה יצמצם או אף ימנע היווצרות קרום ויפחית את הסידוק ואת מידת הנגר והסחף.

3. מניעת סידוק בקרקעות כבדות.

קרקעות כבדות רבות נוטות לתפוח כשהן רטובות ולהתכווץ תוך יצירת סדקים עמוקים במהלך התייבשותן. הסידוק גורם לפיזור בלתי אחיד של מים ולנזקים נוספים כגון פגיעה בהתפתחות מערכת השורשים. תוספת אפר פחם מרחף תפחית את התפיחה בעת ההרטבה ולפיכך גם התכווצות והסידוק במהלך התייבשות.

שימוש באפר מרחף בתשתיות כבישים לשם הפחתת תפיחה, התכווצות וסידוק מקובל וניתן ליישם עיקרון זה בקרקעות חרסיתיות למטרות חקלאיות.

4. שיקום מחצבות ונטיעת יער מישקי.

שיקום מחצבות דורש כמויות ניכרות של חומר מילוי. אפר פחם (תחתי ומרחף כאחד) יכול לשמש כמרכיב עיקרי בחומר המילוי וכמצע עליו ניתן לגדל עצים או גידולי מרעה כך שהמחצבה המשוקמת

תוכל לשמש כשטח פתוח, כשטח מרעה, כיער מישקי (לעצה) או כיער לענפי קטיפ וצמחי דבש. בשלב זה תיבחן התאמת אפר פחם לשמש כבסיס לגידול יער מישקי במחצבות משוקמות. רווחיות היער המישקי אינה גבוהה, אך במקום בו אין חלופות רווחיות יותר, כמו בשיפועים תלולים או בקרקעות בלתי פוריות, זהו פתרון סביר.

תכנית העבודה לשנה א'

בשנת המחקר הראשונה יבוצעו מבחני היתכנות שעל בסיסם ייבחרו השימושים באפר פחם שיחקרו לעומק ברמת השדה. מכיוון שתכנית העבודה של שלב השדה מותנית בתוצאות מבחני ההיתכנות שייערכו בשנת המחקר הראשונה, תפורט להלן תכנית העבודה לשנה זו בלבד.

דוגמאות אפר הפחם שייבדקו ייבחרו בתיאום עם מינהלת אפר הפחם וחברת החשמל. כל בדיקה המתוארת להלן (למעט בסעיף 1) תיעשה במקביל באפר טרי ובאפר מיוצב.

1. הגדלת פוריות קרקעות חוליות על ידי שיפור תאחיזת המים שלהם.

א. בחינת השפעת תכולת האפר בקרקע החולית על המוליכות ההידראולית של התערובות בתנאי רוויה: תערובות של אפר מרחף וקרקע חולית יוכנו ע"י ערבוב 2 מרכיבים אלה ביחסים שונים (0, 10, 20 ו-30% אפר על בסיס משקלי). תערובות הומוגניות אלה יורטבו במים וייובשו (תהליכי הרטבה ויבוש) במספר מחזורים עד להתייצבות ה-pH. התערובת היבשה תארז בעמודות פרספקס, שקוטרן 5 ס"מ וגובהן 10 ס"מ בצפיפות נתונה (כ-1.4). העמודה תורווה במים מזוקקים מלמטה כדי למנוע כליאת אויר בתוכה ועם הרווייתה יוחלף כיוון הזרימה (מלמעלה למטה) בתנאים של רוויה ובעומד מים קבוע. התשטיף ייאסף באוסף פרקציות ויקבע נפח התמיסה במבחנה בזמן נתון. ממדידות אלה תחושב המוליכות ההידראולית. תבחן גם השפעת תהליכי יבוש והרטבה (ללא ערבוב) על כושרן של התערובות להוליך מים.

ב. קביעת הקשר שבין תכולת המים והפוטנציאל שלהם בתערובות חול-אפר מרחף כתלות במחזורי יבוש והרטבה: עקומי תאחיזה של התערובות-השונות של הקרקע החולית עם האפר המרחף (ראה סעיף א' לעייל) יבוצעו בתחום לחצים נמוך של 0 - 1 אטמוספירה. לצורך כך ישמשו פלטות - לחץ ומערכת עמודות קרקע בתנאים של אי רוויה. תבחן השפעת תכולת האפר המרחף ותהליכי יבוש והרטבה על עקום התאחיזה של המים בתערובות השונות שנבחנו בשלב להשגת המטרה הראשונה.

ג. בחינת השלכות סביבתיות: ייבחן קצב שחרור היסודות הרעילים למים מאפר פחם ומתערובות קרקע-אפר פחם בכמה עומסי אפר (ראה סעיף א' לעייל) ביחסי מוצק-נוזל שונים. התערובות ההומוגניות יורטבו במים מזוקקים ליחסי נוזל-מוצק שונים ויושאר ללא תזוזה. שחרור היסודות הרעילים מאפר הפחם וריכוזם בתמיסת הקרקע יקבע כתלות בזמן עד לשהייה של 6 חודשים. האנליזות של היסודות יבוצעו ב-ICP.

2. מניעת היווצרות קרום, סחף, נגר והיסדקות בקרקעות לס.

דוגמאות של 3 קרקעות לס בעלות מירקם שונה (מאזור נחל עוז, גילת, בקעת ערד) תעורבנה עם אפר פחם מרחף בעומסים של 0, 5, 10 ו-15% אפר, וכמו כן יבדקו תערובות כנ"ל עם זבל בקר בשיעור של 2% (אקווילנטי ל-5 טון/ד'). מגשים (5x50x40 ס"מ) שבתחתיתם פתח ניקוז ימולאו בתערובות האפר, ויחשפו לגשם מלאכותי (במערכת המצויה במינהל המחקר החקלאי) בעוצמות גדלות ולמשכי זמן מתארכים. לאחר כל דימוי של סופת גשם, התערובות במגשים ייובשו ליובש אוויר באינקובטור עם אוורור מאולץ בטמפרטורת החדר וייחשפו שוב לסופת גשם מלאכותי. ייבחנו 3 מחזורי גשם וייבוש. כמויות הנגר והתשטיף מהמגשים יימדדו בעת המטרת הגשם. תיבדק היווצרות קרומים על פני התערובות בעת סופת הגשם, ומידת הסתדקותם בשלב הייבוש. כל בדיקה תבצע ב-3 חזרות.

חוזק הקרום לאחר הייבוש יימדד באמצעות פנטרומטר (בשיתוף עם דר" עמוס הדס מהמחלקה לפיזיקה של הקרקע במכון למדעי הקרקע, המים והסביבה).

בחנית השלכות סביבתיות: דוגמאות נגר ותשטיף ייאספו לבדיקת הרכבם הכימי. המדדים הכימיים שייבדקו במי-הנקז ובמי-הנגר מהמגשים יהיו EC, pH, וריכוזי יסודות מקרו ויסודות קורט (ב-ICP).

3. מניעת סידוק בקרקעות כבדות.

א. תצפית בתנאי שדה: באזור פלשת יוגדר שטח לתצפית ובו יסומנו חלקות בגודל 4X4 מ' שבהן יפוזר אפר פחם מרחף על פי השעורים הבאים: 0, 10, 20, ו-30% של משקל שכבת החריש (עומק 30 ס"מ). הצנעת האפר וערבובו בקרקע תתבצע בסתיו, לפני עונת הגשמים, באמצעות מחרשה ומתחת. החלקות תגוממנה כדי למנוע נגר עילי. השטח יותר בור. במהלך הקיץ תימדד תכולת הרטיבות בעמקים שונים ויתבצע מעקב אחר התהוות סדקים. ייבחנו מידת הסידוק ואופיו (התפלגות אורך, רוחב ועומק הסדקים). כל טיפול ייבחן ב- 2 חזרות.

ב. הערכת שחרור יסודות: דוגמאות קרקע מאתר הניסוי יעורבבו עם אפר פחם ביחסים המפורטים בסעיף 3א לעיל. הקרקעות יארזו בצפיפות קבועה בעמודות (5 ס"מ קטר פנימי, 15 ס"מ גובה) והעמודות ישטפו במים מזוקקים בשטף קבוע של 20 מ"מ לשעה. משך השטיפה יקבע בעזרת מודל המחשב את קצב שחרור היסודות בורון, וונדיום וסלן כפונקציה של תכולת החרסית בקרקע אשר פותח על ידי רמי קרן. דוגמאות נפרדות של תערובות הקרקע-אפר תעבורנה 3 מחזורי ייבוש והרטבה כסימולציה לתנאי שדה ואז יבחן שחרור היסודות מהן בעמודות כמתואר לעיל. מחזורי ייבוש-הרטבה יתבצעו על ידי הרטבת דוגמאות התערובות עד לרוויה במגשים ולאחר מכן ייבושן ליובש אוויר באינקובטור עם אוורור מאולץ בטמפרטורת החדר. כל בדיקה תתבצע ב-3 חזרות.

בחנית השלכות סביבתיות: תשטיפי העמודות ייאספו ויימדדו בהם EC, pH, וריכוזי יסודות מקרו ויסודות קורט (ב-ICP).

ג. השפעת אפר פחם על כושר התפיחה: כוסות כימיות מכוילות ימולאו בתערובות קרקע-אפר פחם (סעיף 3א) לגובה 10 ס"מ, ויורטבו לתכולות רטיבות שונות עד לרמה של עיסה רווייה. יוגדר עקום תפיחה כנגד אחוז רטיבות, הן בהרטבה הראשונה והן לאחר שני מחזורי ייבוש והרטבה. יבחנו גם תערובות קרקע-כדורי זכוכית בקוטר של כ-10 מיקרון כהיקש. של כל הרצה תתבצע ב-5 חזרות.

4. שיקום מחצבות ונטיעת יער מישקי.

מכלים שבתחתיתם פתחי ניקוז ימולאו בדוגמאות תערובות 3:1 חמרה חולית ואפר מרחף, 1:1 חמרה חולית ואפר תחתי או אפר תחתי בלבד. המצע במכלים יורטב כדי לאפשר קרבונציה של עודפי ההידרוקסיל. עם הירידה ב pH מתחת לערך של 9 יינטעו במכלים עצי אקליפטוס המקור (או אשל הפרקים), והעצים יגודלו למשך 9 חודשים. ההשקיה והדישון יהיו ממוחשבים, והדשן יהיה על בסיס אמן גופרתי (דשן מחמיץ) וזרחה, ללא מקרואלמנטים אחרים וללא יסודות קורט. תיבחן גם מערכת תערובות מקבילה שבה 15 הס"מ העליונים במכל הגידול יכילו זבל בקר בשיעור משקלי של 2%. הגידול יהיה בהשקיה גירעונית (ללא שטיפה) ואם יהיו סימני עקה, ננקוט במשטר של שטיפה למקוטעין. לאחר 9 חדשי הגידול, הקרקעות יישטפו בנפח מים (חסרי יונים) השווה לפעמיים נפח המים המצוי בקרקע (השווה לקיבול שדה) והתשטיפים ייאספו. כל מערכת עץ - תערובת תיבחן ב-3 חזרות. מדדי גידול העצים (גובה, משקל, וקוטר בגובה 20 ס"מ מעל פני הקרקע) ייבדקו במהלך ובסוף תקופת הגידול.

בחנית השלכות סביבתיות: בתשטיפים שיאספו בתום התקופה ובמהלך תקופת הגידול ימדדו מדדים כימיים, כולל EC, pH, וריכוזי יסודות מקרו ויסודות קורט (ב-ICP). למרות ששאריות מתכות קורט בעץ המיועד לתעשייה אינן צפויות להוות בעיה סביבתית או בריאותית, נבדוק ריכוזי יסודות מקרו ויסודות קורט בדוגמאות עלים וגזע בתום תקופת הגידול.

http://www.floridacenter.org/publications/coal_fly_ash_92-3.pdf

- חן, י. ואביעד, צ. 1999. גידול עגבניות שרי במצע המכיל אפר פחם ממוין. דו"ח מסכם. הוגש למינהלת אפר הפחם.
- מינגלגרין, א. 2003. שמושים חקלאיים באפר פחם. סקר ספרות. הוגש למינהלת אפר הפחם.
- פיין, פ., קרן, ר., חיים, א., סוריאנו, ש. ובריוזקין, א. 2003. שטיפת יסודות קורט מאפר פחם וקליטתם בצמחי חסה במצע מנותק. דו"ח מחקר. הוגש לחברת החשמל.
- גל, מ. וקרן, ר. 1993. שמושים באפר מרחף כמטייב קרקע. דו"ח מחקר. הוגש לחברת החשמל.
- קרן, ר., מינגלגרין, א. פיין, פ. וברוקנטל, י. 2000. התאמת אפר פחם תחתי לשימוש במצע ריפוד ברפת – אספקטים סביבתיים. דו"ח מחקר. הוגש למינהלת אפר הפחם.
- Adriano, D.C., A.L. Page, A.A. Elsewi, A.C. Chang, and I. Straughan. 1980. Utilization and disposal of fly ash and other coal residues in terrestrial ecosystems: A review. *Journal of Environmental Quality* 9:333–344.
- Adriano, D. C., A. L. Page, A. A. Elsewi, and A. C. Chang. Cadmium Availability to Sudangrass Grown on Soils Amended with Sewage Sludge and Fly Ash. *Journal of Environmental Quality* 11:197-203, 1982.
- Aitken, R.L., D.J. Campbell, and L.C. Bell. 1984. Properties of Australian fly ashes relevant to their agronomic utilization. *Australian Journal of Soil Research* 22:443–453.
- Beaver, Theresa. 1994. Pilot study of coal ash compost. *Compost-Science-and-Utilization* 2, no. 3: 18-21.
- Brieger, G., J.R. Wells, and R.D. Hunter. 1992. Plant and animal species composition and heavy metal content in fly ash ecosystems. *Water, Air, and Soil Pollution* 63:87–103.
- Brodie, H. L., L. E. Carr, E. K. Biermann, G. A. Christiana, and J. R. Udinsky. 1996. Composting coal ash with poultry litter for topsoil manufacture. *Compost-Science-and-Utilization* 4, no. 4: 6-13.
- Carlson, C.L., and D.C. Adriano. 1991. Growth and elemental content of two tree species growing on abandoned coal fly ash basins. *Journal of Environmental Quality* 20:581–587.
- Chang, A.C., L.J. Lund, A.L. Page and J.E. Warneke. 1977. Physical properties of Fly-Amended soils. *J. Quality*, 6:267-270.
- Chang, A.C., A.L. Page, L.J. Lund, et al. 1989. Municipal sludges and utility ashes in California and their effects on soils. In B. Bar-Yosef, N.J. Barrow, and J. Goldshmid, eds., *Inorganic Contaminants in the Vadose Zone*, Vol. 74, pp. 125–139. *Ecological Studies*, Springer-Verlag, Berlin.
- Chen, Y., A. Gottesman, T. Aviad, and Y. Inbar. "The Use of Bottom-Ash Coal-Cinder Amended with Compost as a Container Medium in Horticulture," *Acta Horticulturae* 294: 173-I 8 1, 199 1.

- Davidson, R.L., D.F.S. Natusch, and J.R. Wallace. 1974. Trace elements in fly ash. Dependence of concentration on particle size. *Environmental Science and Technology* 8:1107-1113.
- El-Mogazi, D., D.J. Lisk, and L.H. Weinstein. 1988. A review of physical, chemical, and biological properties of fly ash and effects on agricultural ecosystems. *Science of the Total Environment* 74:1-37.
- Environmental Management Services. 1992. Land application of coal combustion byproducts: Utilization in agriculture and land reclamation. Prepared for Electric Power Research Institute, EPRI Research Project # RP 3270-01, Waupaca, WI.
- Gangloff, W.J., M. Ghodrati, J.T. Sims and B.L. Vasilas. 2000. Impact of Fly Ash amendment and incorporation method on hydraulic properties of a sandy soil. *Water, Air, and Soil Pollution* 119:231-245.
- Garau, M. A., J. L. Dalmau, and M. T. Felipo. "Nitrogen Mineralization in Soil Amended with Sewage Sludge and Fly Ash," *Biology and Fertility of Soils* 12: 199-201, 1991.
- Ghodrati, M., J.T. Sims, and B.L. Vasilas. 1995. Evaluation of fly ash as a soil amendment for the Atlantic Coastal Plain: I. Soil hydraulic properties and elemental leaching. *Air, and Soil Pollution* 81:349-361.
- Ghuman, G. S., M. P. Menon, K. Chandra, and J. James. "Uptake of Multi- Elements by Corn from Fly Ash-Compost Amended Soil," *Water, Air, and Soil Pollution* 72:285-295, 1994.
- Korcak, R.F. 1988. Fluidized bed material applied at disposal levels: Effects on an apple orchard. *Journal of the American Society of Horticultural Science* 113:189-193.
- Korcak, R.F. 1998. Agricultural uses of coal combustion byproducts. *In* R.J. Wright, W.D. Kemper, P.D. Millner, J.F. Power and R.F. Korcak eds., *Agricultural Uses of Municipal, Animal and Industrial Byproducts*, USDA, ARS Conservation Research Report No. 44, 135 pp.
- Macak, J.J. and M.J. Knight. 1985. Establishment of vegetation on mixtures of bottom ash and fly ash. 7th International symposium on Ash Utilization. pp. 106-127.
- Menon, M. P., G. S. Ghuman, J. James, and K. Chandra. "Effects of Coal Fly Ash-Amended Composts on the Yield and Elemental Uptake by Plants," *Journal of Environmental Science and Health A27*: 1127-1139, 1992.
- Page, A.L., A.A. Elseewi, and I.R. Straughan. 1979. Physical and chemical properties of fly ash from coal-fired power plants with reference to environmental impacts. *Residue Reviews* 71:83-120.
- Pang Oi Yang. 1994. Artificial soil-mix from coal fly ash and sewage sludge. Thesis. Hong Kong Baptist College. p. 63.
- Phung, H.T., L.J. Lund, A.L. Page, and G.R. Bradford. 1979. Trace elements in fly ash and their release in water and treated soils. *Journal of Environmental Quality* 8:171-175.
- Pichtel, J.R., and J.M. Hayes. 1990. Influence of fly ash on soil microbial activity and populations. *Journal of Environmental Quality* 19:593-597.

- Randolph, J., J.R. Jones, and L.J. Prelaz. 1990. Virginia coal. Virginia Center for Coal and Energy Research, Virginia Polytechnic Institute State University, Blacksburg.
- Rethman, N. R.A. Kruger, E. du Toit, E. Ramagadza, W. Truter and K. Reynolds. 2001. The use of fly ash and biosolids to ameliorate soils, revegetate disturbed areas and improve plant productivity. 14th International symposium on CCPs –ACAA. pp. 2-1- 2-8.
- Roy, W.R., R.G. Theiry, R.M. Schuller, and J.J. Suloway. 1981. Coal fly ash: A review of the literature and proposed classification system with emphasis on environmental impacts. Environmental Geology Notes 96, Illinois State Geological Survey.
- Salter P.J., D.S. Webb and J.B. Williams. 1971. Effects of pulverized fuel ash on the moisture characteristics of coarse-textured soils and on crop yields. *J. Agric. Sci.* 77:53-60.
- Sell, N., T. McIntosh, C. Severance, and A. Peterson. 1989. The agronomic land spreading of coal bottom ash: Using a regulated solid waste as a resource. *Resources, Conservation Recycling* 2:119–129.
- Stehouwer, R., and P. Sutton. 1992. Treatment of acid mine spoil with dry FGD byproducts: Leachate quality and plant growth. Abandoned Mine Lands Conference, Aug. 23–26, 1992, Chicago, IL, p. 1-15.
- U.S. Geologic Survey. 1997. Radioactive Elements in Coal and Fly Ash: Abundance, Forms, and Environmental Significance. Fact Sheet FS-167-97.