

שימוש באפר פחם לייצוב פני הקרקע למניעת נזקי סחף חוליות על ידי  
עידוד התפתחותם של קרומים ביוגניים.

דו"ח מסכם

מספר פרוייקט 277041412

מוגש

למנהלת אפר פחם

על ידי

אלי צעדי, שלמה שריג, יצחק קטרה, נפתלי גולדשלגר, דניאל ברקאי, יעקב קנול והיאם אבו-גליון.

נובמבר 2014

כסלו תשע"ה

## תוכן עניינים

<u>עמוד</u>	<u>הנושא</u>
3	רקע
3	תיאור המחקר ותוצאותיו
3	שלב ראשון
4	שלב שני
5	שלב שלישי
6	שלב רביעי
9	סיכום ומסקנות

## א. רקע

הקרקעות החוליות בצפון מערב הנגב מיוצבות באופן טבעי על ידי קרומים ביוגניים אשר לא נחשפו להפרעות אנתרופוגניות. האזור החדש אליו הופנו חלק מהמתיישבים מגוש קטיף נמצא באזור הצפוני של חולות חלוצה ודרומית לחבל כרם שלום, בשטח כולל של מעל כ-20 קמ"ר. באזור בוצעו עבודות פיתוח, יישור והכשרה של שטחי קרקע נרחבים לצורכי חקלאות בלב אזור של דיונות חול מיוצבות. הכשרת השטחים שבוצעה על ידי כלים כבדים אשר יישרו את פני השטח פגעה ביציבות הטבעית של פני הקרקע ועקב כך חשופים שטחי החקלאות לנזקי סחף רוחות. רוחות אלו הגורמות להתחדשות נדידת הדיונות הסמוכות לשטחים המעובדים. דבר זה המביא לנדידת גרגרי החול הפוגעים בגידולים ובירק.

בקרקות חוליות, טבעיות, בהן פני הקרקע מיוצבים נמצא אחוז החרסיות גבוה יחסית ממקטעי חול של דיונה נודדת, דבר שתורם מאד ומסייע להתפתחותם של הקרומים הביוגניים המייצבים לאורך זמן את הדיונות. על כן, הנחתנו היא ששימוש באפר פחם מרחף ייצור תנאים מסייעים לייצוב פני הקרקע באזורים החשופים הסמוכים לשטחי הגידול ויעודד את התפתחותם של הקרומים הביוגניים. בכך, יתרום הדבר להפחתת התנועה של החול והפגיעה בשטחי החקלאות ובתוצרתם.

בדו"ח הנוכחי אנו מגישים סיכום של המחקר.

## תיאור המחקר ותוצאותיו

המחקר התבצע בארבעה שלבים: שלב ראשון, בחינת היתכנות ברמת צלחות פטרי במעבדה, בשלב השני ניסוי במגשים בתנאי בית גידול בשילוב עם מנהרת רוח. שלב שלישי נערך בתנאי שדה והשלב הרביעי נערך בחממה האיאלית של אוניברסיטת בן-גוריון בשילוב עם מנהרת רוח.

**השלב הראשון.** בכדי לאמוד את הכמות האופטימאלית של תוספת האפר פחם אשר תורמת להתפתחות הקרומים הביוגניים נערכה בדיקה מקדימה בניסוי מעבדה. תוצאות ניסויי המעבדה נועדו לקביעת ריכוז אפר הפחם האופטימאלי שאינו פוגע בגופי הריבוי ותורם ליצירת הקרום הביוגני. לבקשת מנהלת אפר פחם נבדקו שני מקורות של אפר פחם מרחף האחד מדרום אפריקה [A] והשני מרוסיה [B]. נמדדו מספר משתנים פיסיקליים, כימיים וביולוגיים לבדיקת השפעת תוספת אפר פחם מרחף על התפתחות וייצוב הקרום הביוגני כמפורט בתוכנית העבודה. נמצא, שאפר פחם מרחף לא פוגע בדרך-כלל בגופי הריבוי של הקרום הביוגני. בהמשך, נערכו שני ניסויים ברצף. הניסוי הראשון עם אפר פחם מרחף כאשר מקור הפחם היה דרום אפריקה [A] והשני ממקור פחם ברוסיה [B]. הניסויים נערכו, כל אחד, במשך 45 יום כאשר בכל כ-15 ימים הוצאו דוגמאות של פני הקרקע לבדיקות מעבדה. התוצאות של השלב הראשון הראו כי [א] לא נמצא הבדל ביעילות בין תוספת אפר של 2% ו-4%. [ב] בכל הטיפולים בהם הוספו גורמי גידול של הקרומים נצפתה מגמה של עליה ברמות החלבון הכללי, הפוליסוכרים והכלורופיל בקרקע והיציבות היחסית של התלכידים בקרקע עלתה, לעומת תוספת של אפר פחם בלבד. [ג] תוספת של אפר הפחם העלתה את ערכי המוליכות החשמלית אך לא השפיעה על חומציות הקרקע. [ד]

תוספת של מעבר ל-2% אפר פחם הורידה את ערכי ה-NDVI דבר שיכול להצביע על הכנסת גורמים נוספים שמשפיעים על יצירת הקרומים.

יש להוסיף כי רמות החלבון מצביעות על ההתפתחות הכללית של האורגניזמים בקרקע. רמות הכלורופיל נוגעות ישירות לאורגניזמים הפוטוסינתטיים המרכיבים את הקרומים הביוגניים. רמות הפוליסוכרים אף הן מצביעות על קשר הדוק לאורגניזמים המרכיבים את הקרום הביוגני בהיות הציאנובקטריות ואצות הקרקע מפורשות אותם במהלך גידולן [גם חיידקים בקרקע מסוגלים להפריש פוליסוכרים אך לא ברמות גבוהות כמרכיבי הקרום]. לאור התוצאות, מאחר ולא היה שינוי בין שני מקורות האפר הפחם, הוחלט להשתמש בשלב השני של הניסוי בריכוזי אפר פחם מרחף של 1 ו-2 אחוז ממקור A [שהיה זמין להמשך הניסויים], בתוספת גורמי ריבוי.

**השלב השני.** על בסיס התוצאות של השלב הראשון ביקשנו לאמוד את הכמות האופטימאלית של תוספת האפר פחם אשר תורמת להתפתחות הקרומים הביוגניים בהקשר לסחיפת רוח.

הניסוי נערך במגשי גידול (2x0.5m) (תמונה 1) בהם נבדקו ריכוזים של 2% אפר פחם עם ובלי גופי ריבוי של הקרום הביוגני בכמות שוות ערך לחצי ק"ג למ"ר בשכבת החול של 0 עד 1 ס"מ עומק לעומת ביקורת של חול ללא כל תוספת (פרט למים). לאחר חודשיים של גידול הועברו המגשים לניסוי במנהרת רוח. הניסוי נערך במעבדה לסימולציה איאולית של דר' יצחק קטרה באוניברסיטת בן-גוריון.

מנהרת הרוח תוכננה לדמות פרופיל רוח טבעי לוגריתמי במהירויות רוח שונות. במנהרה ניתן לייצר משבי רוח של עד 18 מ"שנ' המייצגת מהירות רוח טבעית גבוהה מאוד בקרבת פני השטח. החתך הכללי של המנהרה הוא  $0.5 \times 0.5$  מ', באורך כולל של 10 מ'. מגשי הניסוי הונחו בתא המדידה של מנהרת הרוח. בכל ניסוי (מגש-טיפול) הופעלה רוח במהירויות שונות, בטווח של 5 – 10 מ'שנ' (רוח בינונית עד חזקה באזור המחקר, ומעל ערך הסף לתנועת חלקיקי חול). בכל מהירות רוח, נמדדה תנועת חלקיקי החול למשך שתי דקות. המדידה התבצעה באמצעות חיישן פיזואלקטרי למדידת שטף אופקי של גרגרי החול (סלטציה) מדגם סנסיט (Sensit) שרושם את מספר פגיעות החול בכל שנייה. לכל ניסוי חושב ממוצע שטף חול (גר/דקה) במהירות רוח נתונה. התוצאות של השלב השני הראו כי [א] לא נמצאו הבדלים בין הטיפולים של חול דיונה + 2 אחוז אפר פחם ממקור A, דיונה + 2 אחוז אפר פחם ממקור A + גופי ריבוי וכן דיונה + 2 אחוז אפר פחם ממקור B. אפר פחם מרחף של 2% ממקור A + גופי ריבוי הראה את התוצאה הגבוהה ביותר מצביע על תוספת של חלבון בקרום. [ב] לא נמצאו הבדלים ברמות הפוליסוכרים בקרומים בין הטיפולים של חול דיונה + גופי ריבוי, חול דיונה + 2 אחוז אפר פחם ממקור A, חול דיונה + 2 אחוז אפר פחם ממקור A + גופי ריבוי למרות שהטיפול האחרון הראה את רמות הפוליסוכרים הגבוהה ביותר בממוצע. כמו כן, לא נמצאו הבדלים בין רמות הכלורופיל, אך הביקורת של חול דיונה הראתה את רמות הנמוכות בין הטיפולים שנבדקו. [ג] יציבות התלכידים שנוצרו בטיפולים השונים הראתה כי לטיפול של חול דיונה + 2 אחוז אפר פחם ממקור A + גופי ריבוי נמצאה תוצאה טובה יותר. אולם, תוצאה זו לא נבדלת סטטיסטית משאר הטיפולים פרט לביקורת (איור 2). [ד] לטיפול של חול דיונה + 2 אחוז אפר פחם ממקור A + גופי ריבוי נמצאו הערכים הנמוכים

ביותר לגבי מליחות בקרומים. [ה] הערכים של הביקורת - חול דיונה ושל הטיפול של חול דיונה + גופי ריבוי + אפר פחם ממקור B נמצאו הגבוהים ביותר. [ו] לא נמצאו הבדלים לגבי חומציות הקרקע בין הטיפולים השונים. [ז] ההשוואה בין תוצאות הניסויים במנהרת הרוח הראתה כי בכל הטיפולים פרט לביקורת של חול דיונה, נוצר קרום ואותו הקרום מקטין את הניתוק וההסעה של החלקיקים על ידי הרוח. כבר במהירות של 7 מטרים לשנייה (29Hz) נמצא הבדל ברור בין התנועה של חול דיונה [Sample 0] לבין הטיפול של חול דיונה + 2 אחוז אפר פחם ממקור A + גופי ריבוי [Sample 5]. עוצמה של רוח של 7 מטרים לשנייה הינה מעל סף הסחיפה של חלקיקי חול דיוני. יש לציין כי זו נחשבת גבוהה יחסית לרוחות המקומיות באזור החלוציות. בעוצמות גבוהות יותר של רוח [מציינות רוחות סערה] התחילה תנועה מועטה מאד של חלקיקים במגשי הטיפול. (הערה: בחול דיונה [Sample 0] נצפתה מעין מגמה הפוכה של ירידה בתנועה עם העלייה במהירות הרוח וזאת כתוצאה מהפחתה בכמות החול הזמין לתנועה במגש עם התקדמות הניסוי) תוצאות השלב השני של המחקר הצביעו על החשיבות הרבה של הקרומים שנוצרים במניעת סחף על ידי רוחות. לאור התוצאות, הצענו להשתמש בריכוזי אפר פחם מרחף ממקור A בכמות של 2 אחוז בתוספת גורמי ריבוי בניסוי השדה.

**שלב שלישי.** בשלב זה התבצע ניסוי בסמוך לשוב בני-נצרים הממוקם בחלקו הצפון של אזור חולות חלוצה, דרומית לחבל כרם שלום, דרום מזרחית לרצועת עזה ומזרחית לגבול ישראל מצרים. סימולציות איאוליות באמצעות מנהרת רוח ניידת בוצעו על גבי דיונה אורכית פעילה שעברה 4 טיפולים שונים. מטרת הניסוי הייתה לאתר מהו הטיפול היעיל ביותר לייצוב הקרקע מפני סחיפה איאולית באמצעות ניתוח משתנים כמותיים כגון: שטף אופקי (סלטציה) - חלקיקי קרקע הגדולים מ 100 מיקרון, ריכוז חלקיקי  $PM_{10}$  (חלקיקי הקטנים מ 10 מיקרון קוטר), וסחף סדימנטרי כולל בארבעה גבהים מעל פני החול, 3, 8, 15, ו 35 ס"מ. ערכים אלו התקבלו כתנאי לארבעה תדרי הפעלה של מנהרת הרוח, 26, 32, 38 ו 44 הרץ המייצגים מהירות רוח של 4, 6, 8 ו 10 מ/ש בהתאמה. כל מהירות יושמה למשך 120 שניות וסך כולל של 8 דק' ניסוי לכל חלקה. בנוסף נמדדה יכולתה של הקרקע להתנגד להידוק ולגזירה.

עקב שינויים פיזיים משמעותיים שחלו בשטח המחקר (נדידה של חלק מרכס הדיונה) לאחר יישום הטיפולים, הניסוי התבצע בתאי השטח שלא נפגעו מהשינוי (שלושה תאי שטח מתוך חמישה שהוכנו לניסוי). תאי שטח אלה מייצגים שלושה טיפולים שונים: ביקורת, ביקורת מושקת ובתוספת של גורמי ריבוי של הקרום [שני הטיפולים האחרים שהיו בתוספת גורמי ריבוי + אפר פחם מרחף וביקורת של אפר פחם כוסו בחול נודד שהגיע מהסביבה בסערה עזה, בגובה של כמטר אחד].

התוצאות של השלב השלישי הראו כי [א] בתדר של 26 הרץ לא הובחנה תנועת חלקיקי  $PM_{10}$  באף אחד משלושת תאי השטח שנדגמו. נרשמו ערכי מינימום בלבד ( $0.02 \text{ mg/m}^3$ ) ריכוז הרקע של הסביבה) לכל השטחים. [ב] הגברה של המפוח לתדר הפעלה של 32 הרץ גרמה לתגובה חיובית ומיידית בריכוז חלקיקי  $PM_{10}$  בשטח הביקורת בלבד. חלקה זו רשמה ערכי שיא של  $0.68 \text{ mg/m}^3$  בעוד שחלקות עם גורמי הריבוי של הקרום הביוגני והביקורת המושקת נשמרו ערכי מינימום המזוהים כריכוז הרקע של הסביבה. [ג] הגברה לתדר גבוה יותר של 38 הרץ גרמה לעלייה נוספת

בריכוז חלקיקי  $PM_{10}$  בשטח הביקורת עם ערך שיא לניסוי זה של  $1.6 \text{ mg/m}^3$ . לאורך כל הניסוי היה ריכוז חלקיקי  $PM_{10}$  בשטח הביקורת גבוה מערכי המינימום בעוד שחלקות עם גורמי הריבוי של הקרום הביוגני והביקורת המושקת הציגו רק עלייה קטנה. לפרק זמן קצר בחלקה עם גורמי הריבוי של הקרום הביוגני הייתה עלייה בריכוז לאחר כעשר שניות מתחילת הניסוי ולמשך כ-40 שניות שאופיינו בערכים נמוכים יחסית של עד  $0.11 \text{ mg/m}^3$ . בדומה לניסוי הקודם גם בניסוי זה חלקת הביקורת מושקת הציגה את הערכים הנמוכים ביותר. [ד] הגברה לתדר ההפעלה הגבוה ביותר, 44 הרץ גרמה לעלייה משמעותית בעיקר בחלקה עם גופי הריבוי של הקרום הביוגני שהציגה עלייה בריכוז לאורך כל הניסוי ללא ירידה לערכי מינימום. עם זאת, חלקת הביקורת עדיין סיפקה את הערכים הגבוהים ביותר עם ערך שיא של  $1.49 \text{ mg/m}^3$ . ערך זה אמנם קטן מערך השיא שנמדד בתדר הפעלה של 38 הרץ אולם כאשר מחשבים את הריכוז המצטבר נמצא שבחלקת הביקורת הוא עמד על  $106.5 \text{ mg/m}^3$  בתדר 44 הרץ לעומת  $52 \text{ mg/m}^3$  בתדר הפעלה של 38 הרץ. הבדל זה ניכר גם בשטח עם גופי הריבוי של הקרום הביוגני כאשר הערך המצטבר בניסוי זה היה גבוה פי 4 מהריכוז שהתקבל בתדר של 38 הרץ. בשונה משני שטחים אלו שהציגו שינויים משמעותיים כתלות במהירות ההפעלה, שטח הביקורת המושקת לא הציג כל שינוי משמעותי בפליטת חלקיקי  $PM_{10}$  ובכל התדרים נשמר ערך מינימום של  $0.02 \text{ mg/m}^3$ . [ה] בניסוי זה נמדד גם כלל הסחף האיאולי (כל גודלי החלקיקים) בגבהים שונים. התקבלה תמונה דומה עבור שלוש החלקות: כמות הסחף (גרם) פחתה עם העלייה בגובה המדידה. בהשוואה בין החלקות התקבלו ערכים שונים בכל גובה. חלקת הביקורת הציגה את כמויות הסחף הגבוהות ביותר עבור ארבעת הגבהים שנמדדו. ערכי סחף נמוכים יותר התקבלו מחלקת הביקורת המושקת, ולאחר מכן מחלקה עם גופי הריבוי של הקרום הביוגני. [ו] נתוני הסחף האיאולי הכולל מציגים תמונה שבה השטח עם גופי הריבוי של הקרום הביוגני הינו היציב ביותר לסחיפה עם ערכי סחף מצטבר נמוכים יותר מחלקות הביקורת המושקת והביקורת. תוך כך, יש להבדיל בין סחף איאולי כולל לבין ריכוז חלקיקי  $PM_{10}$  שכן אין קשר מחייב ביניהם ואין תנאי שפליטה נמוכה של חלקיקי  $PM_{10}$  בחלקה אחת משמעותה גם סחף כולל נמוך.

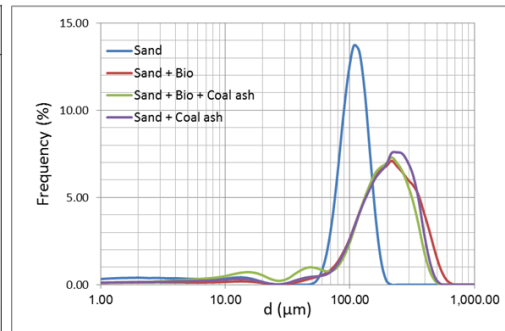
על-פי התוצאות השלב השלישי ניתן לאפיין את חלקת הביקורת כחלקה הכי פחות יציבה כאשר בכל הפרמטרים שנבדקו הציגה ערכים המעידים על חוסר ביציבותה ועל זמינות גבוהה יחסית של חומר לסחיפה.

בשל העדר חלקות חיוניות ובשל מספר חזרות מצומצם קשה לגזור מסקנות על אופי החלקות ועל יציבותן לסחיפה איאולית. מאחר ותנאי הניסוי היו מבוקרים באופן חלקי עקב מיקומם בשטח טבעי חשוף לשינויים, הוצע שלב רביעי של המחקר בו נערוך את אותו הניסוי בתנאי חממה האיאולית של אוניברסיטת בן-גוריון בנגב.

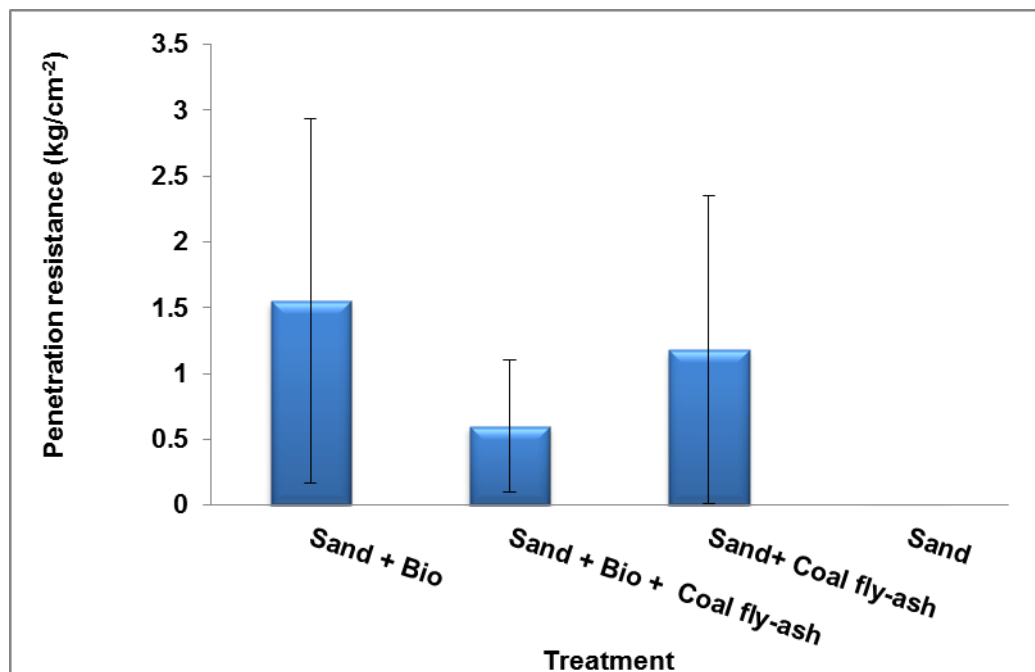
**שלב רביעי.** נערך חממה האיאולית של אוניברסיטת בן-גוריון בנגב. סימולציות איאוליות באמצעות מנהרת רוח נידת בוצעו על גבי משטחים של חול דיונה שהובא מאזור החלוציות. נערכו 4 טיפולים שונים: [א] ביקורת חול דיונה נקי, [ב] חול דיונה עם אפר פחם מרחף, חול דיונה עם גופי ריבוי של קרום ביוגני ו-[ד] חול דיונה עם גופי ריבוי ואפר פחם מרחף. מטרת הניסוי הייתה לאתר מהו הטיפול היעיל ביותר לייצוב הקרקע מפני סחיפה איאולית באמצעות ניתוח

משתנים כמותיים כגון: שטף אופקי (סלטציה) - חלקיקי קרקע הגדולים מ-100 מיקרון, ריכוז חלקיקי PM<sub>10</sub> (חלקיקי הקטנים מ-10 מיקרון קוטר), וסחף סדימנטרי כולל בארבעה גבהים מעל פני החול, 3, 8, 15, ו 35 ס"מ. ערכים אלו התקבלו בארבעה תדרי הפעלה של מנורת הרוח, 26, 32, 38 ו 44 הרץ המייצגים מהירות רוח של 5, 6, 7 ו-9 מטרים לשנייה, בהתאמה. כל מהירות יושמה למשך 120 שניות וסך כולל של 8 דק' ניסוי לכל חלקה. בנוסף נמדדה יכולתה של הקרקע להתנגד להידוק ולגזירה.

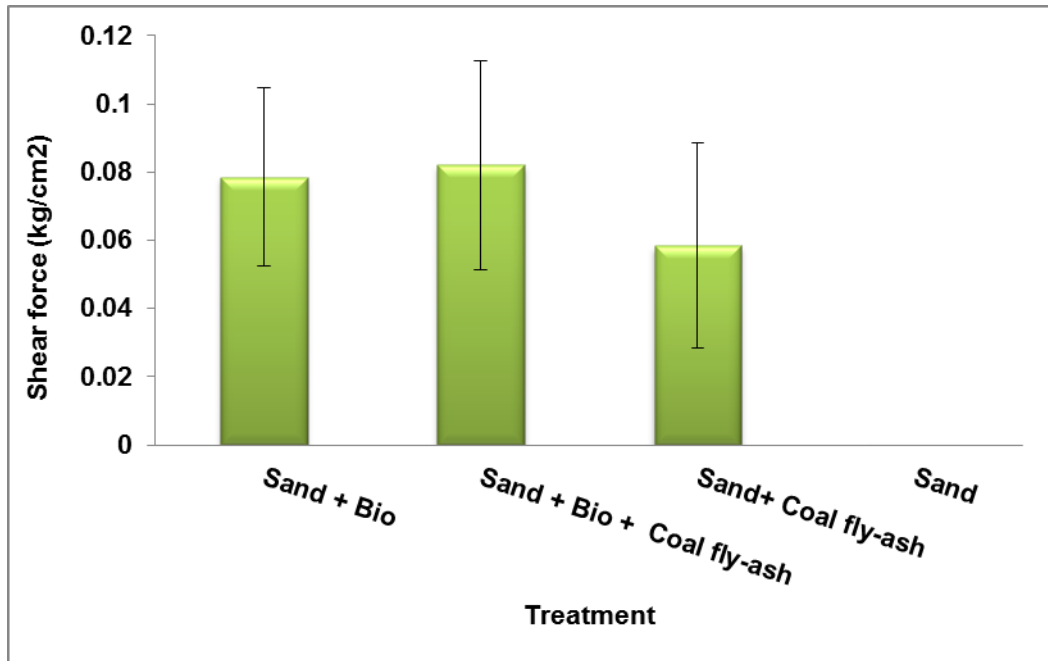
	Sand	Sand + Bio	Sand + Bio + Coal ash	Sand + Coal ash
Statistical parameters (μm)				
Mean	101.6	227.1	184.2	208.7
Mode	113.4	227.5	226.5	251.3
D10	7.7	88.2	18.5	64.4
D50	108.9	209.7	181.3	203.7
D90	151.5	399.1	330.9	354.9
Fraction weight (%)				
Clay (< 2 μm)	5.2	1.8	2.0	1.6
Fine-silt (2-20 μm)	8.1	8.9	5.3	3.3
Coarse-silt (20-63 μm)	1.3	7.0	2.9	2.2
Sand (63-2000 μm)	85.1	82.8	89.8	92.8



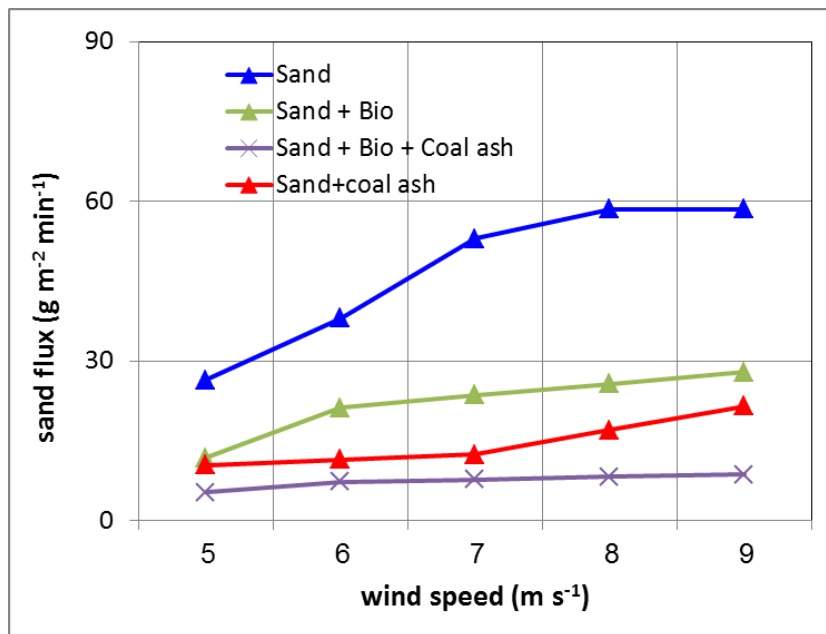
איור 1. התפלגות גודל החלקיקים של השכבה העליונה בחלקות הניסוי בחממה האיאלית.



איור 2. הכוח הנדרש לחדירה לשכבת פני הקרקע בכל אחד מן הטיפולים שנבדקו (Bio - מציין תוספת של גורמי ריבוי של הקרום הביוגני ו-coal ash מציין תוספת של אפר פחם מרחף).



איור 3. חוזק הנדרש לגזירה של קרום פני הקרקע בכל אחד מן הטיפולים שנבדקו (Bio) - מציין תוספת של גורמי ריבוי של הקרום הביוגני ו-coal ash מציין תוספת של אפר פחם מרחף).



איור 4. שטף חול המתקבל במהלך הניסויים בחממה האיטלית בכל אחד מן הטיפולים שנבדקו (Bio) - מציין תוספת של גורמי ריבוי של הקרום הביוגני ו-coal ash מציין תוספת של אפר פחם מרחף).



תוצאות השלב הרביעי של המחקר מצביעות על כך ש: [א] כל שלושת הטיפולים גרמו ליצירת תלכידים מעל ל-180 מיקרומטר (184.2 - 227.1  $\mu\text{m}$ ) הגדולים מאלה של גרגרי החול של הביקורת (101.6  $\mu\text{m}$ ) (איור וטבלה 1). [ב] לא התקבלו הבדלים סטטיסטיים בין שלושת הטיפולים לגבי הלחץ הנדרש לחדור את פני הקרקע, אך כולם נמצאו גבוהים לעומת הביקורת (חול דיונה נקי) (איור 2). [ג] חוזק הנדרש לגזירה של קרום פני הקרקע בכל אחד מן הטיפולים שנבדקו היה גבוה במובהק מאשר של טיפול הביקורת (איור 3). [ד] בבדיקת שטף החול (גר/מ"ר/דקה) המתקבל במהלך הניסויים בחממה האיאלית (איור 4), נמצא כי החול עם אפר הפחם המרחף וגופי הריבוי של הקרום הביוגני היה היציב ביותר לכל טווח מהירויות הרוח שנבדקו, כאשר לאחרי החול עם אפר הפחם המרחף, החול עם גופי הריבוי של הקרום הביוגני והביקורת (חול דיונה נקי). האחרון נמצא כרגיש ביותר ושטף החול ממנו נמצא גבוה לכל אורך טווח המהירויות של הרוח שנבדקו.

### סיכום ומסקנות

המחקר הנוכחי עסק בנושא השימוש באפר פחם מרחף לייצוב פני הקרקע למניעת נזקי סחף חוליות על ידי עידוד התפתחותם של קרומים ביוגניים. הרעיון המרכזי היה למצוא דרך מהירה יחסית לייצב את דיונות החול הנוודות במערב הנגב כדי למנוע פגיעה בגידולים החקלאיים בשולי שדות מעובדים וזרועים. בסיס הרעיון היה כי השימוש בחלקיקי אפר פחם מרחף יסייעו לגורמי הריבוי של הקרומים הביוגניים, כגון ציאנובקטריות ואצות ירוקות, "לדלג" מעל המרווחים בין גרגרי החול ובכך יאפשרו את הדבקת גרגרי החול ליצירת קרום ביוגני יציב. בתחילה, נבדק האם אפר פחם מרחף מזיק לגופי הריבוי ולאחר שמכשלה זו הוסרה, נבדק הריכוז המתאים לשימוש של אפר הפחם המרחף לצורכי הניסוי. לאחר שנמצא כי ריכוז של 1 עד 2 אחוזים הינו יעיל נערך ניסוי במנהרת רוח שהצביע בבירור על תרומת הצירוף של אפר הפחם וגופי הריבוי לייצוב פני הקרקע. גם ניסוי השדה [למרות שהופרע בשל תנאי הטבע הקיצוניים], הצביע על היתכנות הנושא. התוצאה הוכחה מעל לספק בניסויים מבוקרים שבוצעו בחממה איאלית שם נמצא כי החול עם אפר הפחם המרחף וגופי הריבוי של הקרום הביוגני היה היציב ביותר לכל טווח מהירויות הרוח שנבדקו.