

## תקציר

חומר אורגני (ח"א) הוא מרכיב חיוני לשמירה על בריאות ופוריות הקרקע. לח"א תפקיד מרכזי ביצירה ותחזוקה של המבנה התלכדי של הקרקע וכן כבסיס הזנתי לקיום הביוטה ובמיוחד המיקרוביוטה של הקרקע. המבנה התלכדי של הקרקע מאפשר יכולת תאחיזת מים גבוהה ואוורור מיטבי ואלו בתורם תורמים ליצירת תשתית פיזית נאותה לשגשוג ביולוגי. לאורך השנים, המחקר בתחום החומר האורגני של הקרקע (חא"ק) התמקד בתכונות האינהרנטיות של ח"א כגורם העיקרי המכתיב את הדינמיקה של פירוק ויצירת חא"ק. השתמרות של חומר צמחי קשה פירוק בקרקע, והיווצרות מקומית של חומרים הומיים, ארומטיים וקשיי פירוק נחשבו במסגרת הפרדיגמה המרכזית של בניית חא"ק, לשני התהליכים המרכזיים המביאים להצטברות של חא"ק ('מודל ההומיפיקציה').

מספר גילויים חדשים שנחשפו בעשורים האחרונים הובילו לשינוי הדרגתי באופן שבו חוקרים רבים תופסים את המערכת של יצירה ופירוק חא"ק ואת הגורמים המרכזיים הקובעים את הדינמיקה של חא"ק. הפרדיגמה החדשה ('המודל המעגלי'), רואה בהקשר הסביבתי והאקולוגי את התנאים הבסיסיים המשפיעים על היווצרות ופירוק של חא"ק ושמה דגש ניכר על האופי הדינמי של חא"ק. זאת בניגוד למודל ההומיפיקציה הנוטה להתייחס לחא"ק - בעיקר חא"ק בעל אורך חיים ממושך - כאל עתודה קבועה, המתקיימת בזכות מאפיינים מולקולריים-כימיים של החומר עצמו.

במסגרת המודל המעגלי, ניתן משקל רב לרכיב המיקרוביולוגי כגורם מפתח בקביעת הדינמיקה של חא"ק הן בתהליכי פירוק והן ביצירה וייצוב של חא"ק. המודל המעגלי מצביע על חומרים מסיסים ממקור צמחי, בעלי משקל מולקולרי נמוך, כמרכיבים העיקריים המובילים, בתווך מיקרוביאלי, ליצירה של ח"א מיוצב (בעל אורך חיים ממושך). חומרים אורגניים בעלי משקל מולקולרי נמוך משמשים לבניית ביומאסה מיקרוביאלית וחומרי הפסולת וגופי המיקרואורגניזמים עצמם מהווים חומר אורגני בעל פוטנציאל גבוה להמשך השתמרות בתור חא"ק. ההשתמרות של אותם תוצרים מיקרוביאליים (תוצרי פירוק) בקרקע תלויה בעיקר בקיום של תנאים המונעים פירוק נוסף של אותו ח"א ע"י מיקרואורגניזמים. הגנה מפני המשך פירוק מיקרוביאלי מתאפשרת ע"י יצירת קשרים כימיים חזקים בין תוצרי הפירוק לבין החומר המינרלי הקרקעי וכן ע"י הימצאות של תוצרי פירוק בחללים בעלי תכונות מרחביות המונעות כניסה של סוכני פירוק מיקרוביאליים. ברור אם כן, על פי גישה זו, כי יש חשיבות מכרעת לפעילות המיקרוביאלית בקרקע, כקטליזטור לבנייה וייצוב של ח"א מחד ומאידך למבנה התלכדי-מרחבי כתשתית לקשירה והגנה על ח"א מפני המשך פירוק.

אחד המדדים החשובים בהקשר זה הוא יעילות הניצול של חומר אורגני המוסף לקרקע. באופן הכללי ביותר, מדד זה בוחן את היחס בין כמות החומר המוסף למידת ההצטברות של חא"ק חדש. היחס בין פליטת פחמן דו-חמצני (פד"ח) ע"י האוכלוסיה המיקרוביאלית לבין קצב

הבנייה של ביומאסה (יעילות ניצול מיקרוביאלית) מהווה אינדיקטור חשוב ליעילות הניצול הכללית של הקרקע, זאת בעיקר כיוון שהפרשות מיקרוביאלות ובמיוחד שאריות תאים מיקרוביאליים נודעים כמרכיבים העיקריים ביצירת חא"ק מיוצב. יעילות הניצול הכללית מושפעת ככל הנראה במידה רבה גם מתכונות מינרלוגיות ופיזיות-מרחביות של הקרקע, בין השאר בשל ההשפעה הרבה שיש לתכונות אלו על פוטנציאל הקשירה וההגנה על ח"א מפני פירוק. ליעילות הניצול של חומר אורגני משמעות רבה לגבי תהליכים קצרי טווח אך גם לגבי דינמיקה ארוכת טווח של חא"ק.

דיון אורגני ידוע כבעל יכולת להעשיר את הקרקע בחומר אורגני ופרקציות אחרות כגון ביומאסה מיקרוביאלית, וכן לשפר את המבנה התלכדי של הקרקע ולהגדיל את יציבות התלכידים לעומת דיון מינרלי בלבד. ממשק חקלאי קונבנציונלי עלול במקרים רבים לגרום לתופעות שונות של דלדול קרקע, בעלות השפעות שליליות במרחב החקלאי וסביבו. לכן, למרות היתרונות המוכרים של דיון אורגני, ישנה חשיבות לבחון פרקטיקה זו גם ביחס לקרקע בלתי מעובדת, בכדי להבין את ה"עלות" הסביבתית של מערכות אלו. בחינה זו חשובה במיוחד באזורים צחיחים וצחיחים למחצה בהן הקרקעות לרוב דלות בח"א ובעלות מבנה תלכדי בלתי יציב ולכן חשופות ביתר שאת לפגיעה של תהליכי דלדול.

הקרקעות ששימשו בעבודה זו נדגמו מהחלקות ארוכות הטווח של פרויקט החקלאות האורגנית במרכז המחקר גילת. חלקות אלו השוו בין דיון בקומפוסט פסולת בקר (טיפול אורגני) לדיון בחנקן מינרלי (טיפול מינרלי). נלקחו דוגמאות קרקע מהטיפול האורגני והמינרלי ובנוסף נלקחו דוגמאות משטח הצמוד לחלקות הניסוי, שבו לא התקיימה פעילות חקלאית כלל במשך כל זמן הניסוי ארוך הטווח וככל הידוע לנו גם תקופה ארוכה לפני כן (בלתי מעובדת).

המטרה העיקרית של מחקר הנוכחי, הייתה לבחון את ההשפעות ארוכות הטווח של ממשקי דיון מנוגדים, אורגני מול מינרלי, על תכולתם של פרקציות חא"ק שונות, תוך כדי השוואת הממשקים הללו לקרקע בלתי מופרת. השוואה זו היא בעלת חשיבות מוגברת במיוחד באזורים ארידיים וסמי-ארידיים, בהם ההשפעה של פערים ממשקיים מסוג זה איננה מובנת מאליה.

מטרה עיקרית זו נפרטה לשתי מטרות משנה שנועדו לבחון את ההשפעה של הממשקים ארוכי הטווח בשני אופנים:

1. ההשפעה על פרקציות חא"ק בקרקע ללא תוספת של ח"א חיצוני. לצורך כך, הדינמיקה של קרקעות ללא תוספת, נטרה בשני ניסויי הדגרה קצרי טווח. נתונים אלו אפשרו לעקוב אחר התנודות בפרקציות חא"ק השונות ולקבוע ערכי בסיס מייצגים על סמך ממוצעים של תנודות אלו.
2. ההשפעה על דינמיקה קצרת טווח של פרקציות חא"ק בתגובה לתוספת של ח"א לבילי.

בנוסף לשתי המטרות המרכזיות הנ"ל, הותוותה מטרה נלווית שלישית:

3 לבחון את ההשפעה של תוספות עוקבות של ח"א לבילי על הדינמיקה קצרת הטווח של פרקציות חא"ק. בהתאם לכך ייושמו בקרקע שלוש תוספות עוקבות של סובסרט אורגני לבילי במשך שבועיים

מבחינת ההשפעה ארוכת טווח על תכולת פחמן אורגני כללי והמדדים הנוספים, ציפיתי בעבודה זו לראות העשרה של אותם מדדים בטיפול האורגני לעומת המינרלי, בהתאם לעבודות קודמות שנעשו בחלקות ארוכות הטווח, ובהתאם לתוצאות רלוונטיות בספרות המקצועית. גם בהקשר של יעילות ניצול חומר אורגני ציפיתי לראות יתרון לטיפול האורגני בהתאם לשיפור הצפוי בתכונות הקרקע שלהן נודעת השפעה לגבי מדד זה, למשל מבנה תלכידי משופר וביומאסה ופעילות מיקרוביאלית מוגברת.

מחקרים רבים הראו ירידה ניכרת במדדים רבים של בריאות קרקע כגון תכולת חא"ק, ביומאסה מיקרוביאלית ויציבות תלכידים במעבר מקרקע בלתי מופרת ובלתי מעובדת לקרקע חקלאית. לכן ציפיתי לראות יתרון משמעותי במרבית המדדים, לטיפול הבלתי מעובד לעומת טיפולי הדישון שכללו במקביל עיבוד חקלאי קונבציונלי. במיוחד ציפיתי לראות יתרון ניכר לטיפול הבלתי מעובד מבחינת יציבות תלכידים, זאת לאור ההשפעות השליליות של פעולות חקלאיות כגון חריש, דישון מינרלי וחומרי הדברה על תהליכי ייצוב בקרקע.

בוצעו שני ניסויי הדגרה. ניסוי ראשון (ניסוי קש/קומפוסט) בן שבוע ימים כלל את שתי הקרקעות המדושנות ושני טיפולים קצרי טווח נפרדים, תוספת חד פעמית בתחילת הניסוי של קש חיטה או קומפוסט ממקור של פסולת ביתית וטיפול ביקורת שכלל הרטבה בלבד. הניסוי השני (ניסוי הפרשות שורש) והעיקרי כלל את שני הטיפולים ארוכי הטווח ואת הקרקע הבלתי מעובדת. בניסוי זה נבחנה בין היתר ההשפעה של תוספת סדרתית של סובסרט לבילי. הקרקעות הודגרו למשך 28 יום וניתנה תוספת של תמיסת מודל להפרשות שורש או מים מזוקקים (ביקורת) בימים 0, 7 ו-14. בשני הניסויים נמדדו פרקציות ח"א הבאות: פחמן אורגני כללי, נשימה מיקרוביאלית (פליטת פד"ח), ביומאסה מיקרוביאלית, פחמן במיצוי מימי ותכולת סוכרים במיצוי מים חמים. כמו כן נמדדה תכולת ארגוסטרול (סמן לנוכחות פטריות ספרופיטיות). בניסוי קש/קומפוסט נמדדה גם תכולת פחמן אורגני כללי במיצוי מים חמים ובניסוי הפרשות שורש נמדדה גם יציבות תלכידים בהרטבה. נתוני ביומאסה ונשימה שימשו לחישוב יעילות ניצול פחמן של האוכלוסיה המיקרוביאלית (יעילות ניצול). התוצאות מטיפול הביקורת בניסוי הפרשות שורש שימשו לחישוב ערכי בסיס לגבי כל אחד מהפרמטרים הנמדדים ואפשרו השוואה בין הטיפולים ארוכי הטווח.

הפחמן האורגני הכללי היה גבוה באופן מובהק בטיפול האורגני לעומת המינרלי וכמו כן, גם ערכי הבסיס במרבית הפרמטרים היו גבוהים בטיפול האורגני מאשר המינרלי (למרות שההבדלים היו ברובם בלתי מובהקים). באופן מעניין, ערכי הבסיס היו גבוהים באופן מובהק בטיפול האורגני - ובמידה מסוימת גם במינרלי - לעומת הבלתי מעובד. תוספת סדרתית של תערובת הפרשות שורש הובילה לירידה ניכרת ביעילות הניצול עם הזמן בכל שלושת הטיפולים ארוכי הטווח. בנוסף יכולת הסילוק של פחמן זמין (פחמן במיצוי מימי) מהפרקציה המסיסה ירדה באופן דרסטי מהיישום הראשון לבאים אחריו בשלושת השבועות הראשונים של הניסוי. הטיפולים ההיסטוריים הציגו שונות מובהקות ביכולת הסילוק של פחמן זמין מהפרקציה המסיסה, לפי הסדר הבא: אורגני < מינרלי < בלתי מעובד. סדר זה נמצא בהתאמה טובה לערכי הבסיס של ח"א כללי, פחמן מיקרוביאלי ונשימה מיקרוביאלית בשלושת הטיפולים ההיסטוריים. לעומת זאת לא נצפו הבדלים משמעותיים ביעילות הניצול המיקרוביאלית בין הטיפולים ההיסטוריים.

התוצאות מעבודה זו הראו שיפור ניכר בתכולה של פרקציות חא"ק שונות כמו גם ביציבות תלכידים לאחר 5 שנים של דיסון אורגני לעומת דיסון מינרלי. תוצאות אלו התקבלו למרות שבמשך השנתיים האחרונות לפני דיגום הקרקעות הופסקו טיפולי הדיסון השונים בניסוי השדה ובשנה האחרונה הקרקע הייתה ללא עיבוד חקלאי כלל. אם כן, למרות תקופה זו של פעילות מצומצמת בחלקות האורגניות לפני הדיגום לעבודה הנוכחית, ההשפעה של טיפולי הדיסון ארוכי הטווח ניכרת באופן ברור בתוצאות ויש בכך עדות לשאריתיות של השפעה זו בטווח של מספר שנים.

ההבדלים המשמעותיים בין הקרקעות המעובדות ומדושנות לבין הקרקע הבלתי מעובדת מבחינת ערכי הבסיס של הפרמטרים השונים, הם בבחינת תוצאה בלתי צפויה, בהתחשב במספר הרב של עבודות קודמות המעידות על ירידה מובהקת במדדים שונים של בריאות ואיכות קרקע במעבר בין קרקע בלתי מופרת לקרקע תחת ממשק חקלאי קונבנציונלי. בין היתר, פעולות כמו חריש, דיסון מינרלי מוגבר ושימוש בחומרי הדברה שונים, ידועים כגורמים היכולים להביא לפגיעה ניכרת ביציבות תלכידים ותכונות קרקע נוספות בעלי חשיבות לבריאות הקרקע. יחד עם זאת, מספר מחקרים מצביעים על כך שמידת התגובה של קרקעות לשינויים ממשקיים מסוג זה, תלויה במידה רבה בהקשר הסביבתי. במיוחד מצביעות העבודות הללו על ההשפעה של תנאי האקלים על הקשר בין שינויים בממשק הקרקע ליצרנות הצמחית (Net Primary Productivity) והן מראות כי בתנאי אקלים ארידיים וסמי ארידיים תיתכן דווקא עלייה ביצרנות במעבר לממשק חקלאי.

תוצאות מחקר זה מהוות עדות נוספת ליתרונות של דיסון אורגני בהעשרה של הקרקע בחומר אורגני כללי והעשרה של מרכיבי ח"א ספציפיים וחשובים, כגון ביומאסה מיקרוביאלית וחומר אורגני במיצוי מים חמים. הצבת הקרקע הבלתי מעובדת כנקודת ייחוס לטיפולים המעובדים, הביאה לידי ביטוי את השונות בתגובה ארוכת טווח של קרקעות במעבר מממשק ללא עיבוד

לממשק חקלאי קונבנציונלי. מערך ניסויי זה מצביע על האפשרות כי עיבוד חקלאי קונבנציונלי, במיוחד בשילוב של דישון אורגני ובהינתן תנאי אקלים יובשניים, יכול להוביל לשיפור בתכולת ח"אק ופרקציות אחרות כמו גם לשיפור ניכר ביציבות תלכידים, לעומת קרקע בלתי מעובדת. השונות הניכרת בין הטיפולים ארוכי הטווח, מבחינת הדינמיקה של פחמן במיצוי מימי וההתאמה של שונות זו להבדלים בערכי הבסיס של תכולת ח"א ופרקציות ח"א"ק ביולוגיות, מצביעים על קשר אפשרי בין מידת הפעילות והעושר הביולוגי הקיימים בקרקע, ליכולת של המערכת הקרקעית למתן שינויים דרסטיים בטווח הקצר. מכיוון שלא נצפו הבדלים מובהקים ביעילות הניצול המיקרוביאלית, לא ניתן לקשור באופן ברור בין יכולת הסילוק של חומר אורגני זמין ליעילות הניצול המיקרוביאלית ובהמשך לפוטנציאל הייצוב של חומר אורגני בקרקע. למרות זאת, נראה כי ביואמסה מיקרוביאלית מפותחת, פעילות מיקרוביאלית מוגברת (כפי שבאה לידי ביטוי בנשימה באזלית) וככל הנראה גם מבנה תלכיד מפותח, מעודדים פירוק מהיר ויעיל של חומר אורגני זמין והדבר יכול להוביל לשיפור בפוטנציאל הייצוב של חומר אורגני בקרקע.

בכדי להסביר ולפרש את הדינמיקה של פירוק חומר אורגני במערכת הניסויית הנוכחית, הוצע מודל קונספטואלי בסיסי שמתאר את גורמי המפתח בקביעת הפוטנציאל לייצוב או מינרליזציה של סובסטרט אורגני זמין בטווח הקצר. בהתאם למודל זה, הירידה הדרסטית ביעילות הניצול במהלך הניסוי, יוחסה לשינויים בפרופורציות בין שלושה מרכיבים מרכזיים: גודל הביומאסה המיקרוביאלית הפעילה, עומס סובסטרט אורגני זמין והשכיחות של אתרים מרחביים בעלי פוטנציאל לייצוב חומר אורגני. לפי ניתוח רעיוני זה, עלייה משמעותית בעומס של סובסטרט אורגני שאינה מלווה בגידול משמעותי בשכיחות של אתרי קיבוע מרחביים, הובילה במקרה זה לירידה ניכרת ביעילות הניצול המיקרוביאלית. מסקנה זו תומכת בחשיבות של מבנה תלכיד מפותח ביצירת תנאים מיטביים לייצוב של חומר אורגני בקרקע.

לסיכום, מחקר זה הראה עלייה משמעותית בתכולת פחמן אורגני כללי ופרקציות ח"א נוספות כמו גם ביציבות תלכידים לאחר 5 שנים של דישון אורגני לעומת דישון מינרלי. כמו כן נצפתה השפעה לדישון אורגני ארוך טווח על אופן הניצול של סובסטרט אורגני זמין בטווח הקצר, זאת גם לעומת דישון מינרלי ארוך טווח ובמיוחד בהשוואה לקרקע בלתי מעובדת. באופן מפתיע נצפתה עלייה ניכרת בתכולת פחמן אורגני כללי, פרקציות ח"א בעלת אופן ביולוגי כגון ביומאסה מיקרוביאלית ונשימה מיקרוביאלית וכן ביציבות תלכידים להרטבה, בטיפולים המעובדים (אורגני ומינרלי) לעומת הקרקע הבלתי מעובדת. על סמך תוצאות האינקובציה עם סובסטרט לבילי, הוצע מודל רעיוני סכמטי המתאר את הגורמים המרכזיים שהשפיעו על הדינמיקה קצרת טווח של פירוק הסובסטרט.

האוניברסיטה העברית בירושלים  
THE HEBREW UNIVERSITY OF JERUSALEM



**השפעת ממשק דישון אורגני על דינמיקה ארוכה  
וקצרת טווח של מספר מאגרי פחמן אורגני שונים  
בקרקע.**

עבודת גמר

מוגשת לפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה על שם רוברט ה. סמיט  
האוניברסיטה העברית בירושלים

לשם קבלת תואר  
"מוסמך למדעי החקלאות"

על ידי  
אילן בראודה

פברואר 2021

רחובות

אדר, תשפ"א

