

דו"ח לתכנית מחקר מספר 301-0759-13

שנת המחקר: שלישית מתוך 3 שנים

שיפור תהליך הקומפוסטציה וטיב התוצר בעזרת ביו-פחם

Improved Compost with Biochar

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות

ע"י

אלן גרבר	מינהל המחקר החקלאי, וולקני.
מיכאל רביב	מינהל המחקר החקלאי, נווה יער.
בני לב	מינהל המחקר החקלאי, וולקני
יעל לאור	מינהל המחקר החקלאי, נווה יער.
לודמילה צחנסקי	מינהל המחקר החקלאי, וולקני.

Ellen Graber, Soil Chemistry, ARO, Volcani Center, ergraber@agri.gov.il

Michael Raviv, Ornamental Horticulture, ARO, Newe Ya'ar Research Center,
mraviv@agri.gov.il

Beni Lew, Agricultural Engineering, ARO, Volcani Center, benilew@agri.gov.il

Yael Laor, Organic Agriculture, ARO, Newe Ya'ar Research Center, laor@agri.gov.il

Ludmilla Tchekansky, Soil Chemistry, ARO, Volcani Center, lusit@agri.gov.il

תוכן עניינים

3.....	תקציר
4.....	מבוא
6.....	מטרות המחקר
6.....	עיקרי הממצאים
6.....	מחזור קומפוסטציה שני
8.....	מאפיינים פיסיקליים של התהליך
10.....	אנליזות כימיות
10.....	תוצאות
14.....	פליטת אמוניה
15.....	מבחן גידול
17.....	הערות כלליות לדיון וסיכום
18.....	רשימת פרסומים שנבעו מהמחקר
19.....	סיכום עם שאלות מנחות
21.....	ספרות

תקציר

במחקר זה הצענו לבחון את היעילות של תוסף ביו-פחם בתהליך הקומפוסטציה על מנת להפחית את איבודי החנקן ולשפר את זמינותו בקומפוסט. ביו-פחם הוא תוצר מוצק שמתקבל בתהליך פירוליזה, פירוק חומני ישיר של ביומסה בהעדר חמצן.

נוסחו היפותיזות העבודה הבאות: (1) מאפיינים פיסיקליים וכימיים של ביו-פחם, בעיקר חומציות פני השטח וק"ח, ובדרגת חשיבות פחותה שטח פנים סגולי (שפ"ס), יקבעו את קיבולת ספיחת החנקן ע"י הביו-פחם ליחידת משקל סופח. (2) קינטיקת הספיחה של חנקן תהיה תלויה בעיקר בגודל חלקיקי הביו-פחם, הנקבוביות, והקשרים שבין הנקבובים. בסופו של דבר, שילוב של קיבולת הספיחה והקינטיקה של תהליכי הספיחה יקבעו את ההשפעה הכוללת של תוספי ביו-פחם על איבודי חנקן במהלך הקומפוסטציה. (3) תוספי ביו-פחם ישפיעו על קצבי המינרליזציה והשחרור של חנקן מקומפוסט כיוון שהחנקן הספוח יהיה זמין לפעילות מיקרוביאלית דבר שיביא להפיכתו לחנקן אורגני במהלך הקומפוסטציה.

במחזור הקומפוסטציה הראשון שהתבסס על זבל בקר לא נמצא יתרון לטיפול הביו-פחם להעלאת שיעור החנקן בקומפוסט המוכן. מסיבה זאת הוחלט לבחון את הנושא בתהליך קומפוסטציה המבוסס על בוצת מט"שים העשירה יותר בחנקן בהשוואה לזבל בקר. בשנה השלישית הוכן מחזור קומפוסטציה בשלושה תאים עם תערובת של בוצת מט"ש וגזם עירוני (יחס נפחי 1:1). תא 1 כלל ביו-פחם (**grain husks**) בשיעור של 10% נפחי וטמפרטורת הסטפוינט נקבעה על 73 מ"צ. תאים 2 ו-3 היו ללא ביו-פחם וטמפרטורת הסטפוינט נקבעה על 73 ו-65-60 מ"צ, בהתאמה. פליטות האמוניה משלושת התאים נמדדו לאורך התהליך. שטף הפליטות המצטבר מתא 1 היה נמוך יותר בכסדר גודל מאשר בתאים 2 ו-3. אולם, מתוך חישוב איבודי החנקן המתבססים על ריכוז האפר וריכוז החנקן בזמן 0 ובסוף התהליך, נמצא שאיבוד החנקן היה דומה בשלושת התאים. התכונות הכימיות של הקומפוסטים משלושת התאים היו דומות לאורך התהליך ואינן מרמזות על מנגנון אפשרי לאיבוד החנקן במסלול אחר שאינו נידוף אמוניה. ניסויי גידול בחממה שבוצעו עם הקומפוסטים שהוכנו בשני מחזורי הקומפוסטציה במחקר זה הראו פחיתה מסוימת ביבולים בחלק מטיפולי הביו-פחם.

מעריכים מומלצים לבדיקת הדוח המדעי

1. זאב גרסטל
2. אורי מינגלגריין
3. ברוריה הויאר

.....
הצהרת החוקר הראשי:

הממצאים בדו"ח זה הינם תוצאות ניסויים.

הניסויים מהווים המלצות לחקלאים : לא

חתימת החוקר _____ תאריך _____

מבוא

קומפוסטציה הינה תהליך ביולוגי אירובי, במהלכו הופכות פסולות אורגניות לחומר מיוצב בעל ערך אגרונומי, ("קומפוסט"). קומפוסט המיושם בקרקע משפר את פוריותה בעיקר על ידי הגדלת הפעילות הביולוגית וכתוצאה מכך הגברת מיחזור יסודות הזנה. לקומפוסט השפעות חיוביות גם על התכונות הפיסיקליות של הקרקע כגון שיפור יציבות תלכידים ועקב כך הפחתה בתהליכי סחיפה והגדלת כושר תאחיזת המים.

עם זאת, ישנן גם השפעות סביבתיות שליליות בהקשר לייצור קומפוסט והשימוש בו. ההצעה הנוכחית מתמקדת בנושא אספקת החנקן שמקורו בחומרי הגלם שעוברים קומפוסטציה. איבודי חנקן משמעותיים במהלך הקומפוסטציה הינה בעיה ידועה אשר מפחיתה את הערך ההזנתי של הקומפוסט ואף תורמת לזיהום אוויר. ריכוזי חנקן נמוכים וחוסר זמינות מובילים בסופו של דבר את החקלאים ליישם קומפוסט בכמויות גדולות מהנדרש לצורך התועלות האחרות עבורן הוא מיושם.

במחקר זה, אנו מציעים לבחון את היעילות של ביו-פחם כתוסף בתהליך הקומפוסטציה על מנת להפחית את איבודי החנקן ולשפר את זמינותו בקומפוסט. ביו-פחם הוא תוצר מוצק שמתקבל בתהליך פירוליזה (פירוק חומני ישיר של ביומסה בהעדר חמצן). שילוב ביו-פחם בתהליכי קומפוסטציה התחיל להיבחן רק לאחרונה והעניין בו התעורר בזכות מספר תכונות מאפיינות של הביו-פחם העשויות לשפר הן את תהליך הקומפוסטציה והן את האיכות של הקומפוסט. סוג חומר הגלם, שיטת הפירוליזה, והטמפרטורה בה הביו-פחם נוצר ("טמפ' הטיפול הגבוהה ביותר", HTT) משפיעים באופן ניכר על התכונות הפיסיקליות והכימיות של הביו-פחם: הרכב האלמנטים (CHNOS), יחס C/N, תכולת מינרלים, נקבוביות ושטח פנים סגולי (שפ"ס), חומציות, קיבול קטיונים חליפיים (קק"ח) ועוד (Krull et al. 2009).

ישנם דיווחים מעטים בספרות המדעית המתעדים שימוש בביו-פחם בתהליך הקומפוסטציה, אך בכולם מדווח על ירידה משמעותית באיבודי החנקן (Chen et al. 2010; Dias et al. 2010; Steiner et al. 2009; al. 2010). איבוד של חנקן כללי (Kjeldahl) פחת ב-65% כאשר הוסף ביו-פחם ממקור במבוק לתערובת קומפוסט של זבל חזירים (בשיעור של 9% משקלי) (Chen et al. 2010) או לתערובת קומפוסט המבוססת על בוצת שפכים (Hua et al. 2009). במהלך קומפוסטציה של זבל עופות עם 20% תוספת של ביו-פחם שהוכן משבבי אורן, קצב פירוק החומר האורגני היה מהיר יותר והייתה פחיתה של 52% באיבוד החנקן הכללי ופחיתה ב-64% בפליטות האמוניה (Steiner et al. 2010). בעבודות אלה לא נחקרו המנגנונים המעורבים בהפחתת פליטות החנקן ולכן קשה להשליך מהן לגבי תערובות אחרות של חומרי גלם וביו-פחם. במחקרים אלה גם לא נבדקו איכויות הקומפוסט המוכן.

ביו-פחם המיוצר בטמפ' נמוכות יחסית נמצא כיעיל יותר לספיחה של אמוניה (כ- 10 g NH₃/kg) יחסית לביו-פחם שמיוצר בטמפ' גבוהות (כ-5 g NH₃/kg) (Asada et al. 2006). אפקט זה מיוחס לחומציות פני השטח של ביו-פחם המיוצר בטמפ' נמוכות (Asada et al. 2006; Taghizadeh-Toosi et al. 2011). חשיפת ביו-פחם לאוזון הגדילה אף היא את ספיחת האמוניה, ממצא המחזק את התיאוריה שקבוצות פונקציונליות חומציות אחראיות לספיחת אמוניה על שטחי הפנים (Kastner et al. 2009).

כאמור, הידע הקיים מועט ולא תמיד כמותי לגבי המנגנונים בהם הביו-פחם מעורב בהשפעה על הדינמיקה של החנקן בתהליך הקומפוסטציה. מעבר לכך, אין כלל ידע באשר לזמינות וכושר המינרליזציה של החנקן בקומפוסט המיוצר עם ביו-פחם. המאפיינים היחידים שדווחו עבור קומפוסטים שהוכנו עם ביו-פחם הצביעו על דרגת בשלות גבוהה יחסית בהשוואה לקומפוסטים שהוכנו ללא תוספת ביו-פחם (Dias et al. 2010). בשלות הקומפוסט קשורה לרמת הפעילות המיקרוביאלית ונחשבת כתכונה רצויה בהקשר לאספקת חנקן על ידי קומפוסט (Senesi and Plaza 2007). יש עדויות לכך שביו-פחם מעודד פעילות מיקרוביאלית במהלך הקומפוסטציה (האיץ תהליכי הבשלה) (Steiner et al. 2010), אולי בדומה לאופן בו הוא מעודד פעילות מיקרוביאלית בקרקע (Pietikainen et al. 2000; Graber et al. 2010; Kolton et al. 2011).

היפותיזת העבודה: על בסיס האמור לעיל נוסחו היפותיזות העבודה הבאות: (1) מאפיינים פיסיקליים וכימיים של ביו-פחם, בעיקר חומציות פני השטח וק"ח, ובדרגת חשיבות פחותה, שפ"ס, יקבעו את קיבולת ספיחת החנקן ע"י הביו-פחם ליחידת משקל סופח. (2) קינטיקת הספיחה של חנקן תהיה תלויה בעיקר בגודל חלקיקי הביו-פחם, הנקבוביות, והקשרים שבין הנקבובים. בסופו של דבר, שילוב של קיבולת הספיחה והקינטיקה של תהליכי הספיחה יקבעו את ההשפעה הכוללת של תוספי ביו-פחם על איבודי חנקן במהלך הקומפוסטציה. (3) תוספי ביו-פחם ישפיעו על קצבי המינרליזציה והשחרור של חנקן מהקומפוסט המוכן כיוון שהחנקן הספוח יהיה זמין לפעילות מיקרוביאלית, דבר שיביא להפיכתו לחנקן אורגני במהלך הקומפוסטציה. ביו-פחם צפוי להעלות את קצב הפעילות המיקרוביאלית ולהאיץ את תהליכי הבשלה, ובכך לאפשר את הגדלת אחוז החומר הליגני

בתערובת של חומרי הגלם, תוך יצירת קומפוסט באיכות גבוהה. היפותיזות עבודה אלו הובילו אותנו להגדרת המטרות ותוכנית המחקר.

בשנת המחקר השלישית העמדנו מחזור קומפוסטציה המבוסס על בוצת מט"שים במטרה לבחון את השפעת הביו-פחם על שחרור אמוניה בקומפוסטציה של חומר גלם עשיר בחנקן בהשוואה לזבל בקר ששימש במחזור הקומפוסטציה הראשון. כמו כן בשנה השלישית בוצעו ניסויי גידול בחממה עם קומפוסטים משני המחזורים. בנוסף, השלמנו ניסוי מעבדה בנושא קשירת אמון ואמוניה על מנת להבין את פוטנציאל של ביו-פחם להפחית פליטות של אמוניה ולשמר את החנקן כאמון חליף זמין לצמח.

מטרות המחקר

- מטרת העל** של מחקר זה הינה לבחון את השימוש בביו-פחם בתהליך הקומפוסטציה במטרה להפחית איבודי חנקן גזי וכן להגדיל את הערך ההזנתי של הקומפוסט. להשגת מטרות אלה נוסחו מטרות המשנה הבאות:
1. לימוד מנגנוני הספיחה והקשר בין תכונות פני השטח של ביו-פחם לבין קיבולת הספיחה והקינטיקה של ספיחת החנקן בצורותיו השונות.
 2. הערכת הפוטנציאל של ביו-פחם עם תכונות פני שטח מיטביות להפחתת איבודי חנקן גזי במהלך הקומפוסטציה.
 3. הבנת הקשר בין תכונות הביו-פחם ויכולתו לצמצם פליטת חנקן גזי לבין זמינות החנקן השאריתי בתוצר.

עיקרי הממצאים

במחזור הקומפוסטציה הראשון שהתבסס על זבל בקר וגזם כפות תמרים (דו"ח שנה ב') לא נמצא יתרון לטיפול הביו-פחם להעלאת שיעור החנקן בקומפוסט המוכן. מסיבה זאת הוחלט לבחון את הנושא בתהליך קומפוסטציה המבוסס על בוצת מט"שים העשירה יותר בחנקן בהשוואה לזבל בקר. בשנה השלישית הוכן מחזור קומפוסטציה בשלושה תאים עם תערובת של בוצת מט"ש וגזם עירוני (יחס נפחי 1:1).

מחזור קומפוסטציה שני

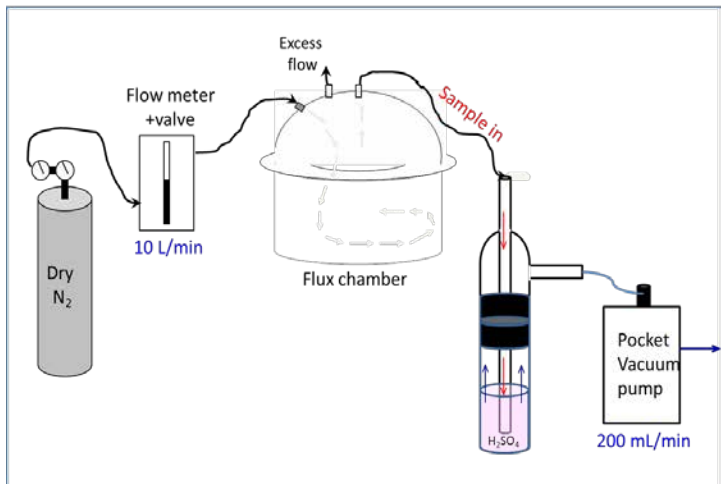
המחזור התחיל ב- 13/05/2015 והסתיים ב- 10/09/2015 (סה"כ 120 יום). הניסוי בוצע במתקן קומפוסטציה מבוקר (Rutgers type) הממוקם בנוה יער, ב- 3 תאים בנפח של כ- 5 מ"ק כל אחד, בהם הושם נפח תערובת של כ- 3.5 מ"ק, תוך בקרת טמפרטורה על ידי אוורור מאולץ. הרכבן של ערימות הקומפוסט מוצג בטבלה 1.

טבלה 1. הרכב תערובות חומרי הגלם וטמפרטורת הסף לפעילות המפוחים, בשלושת תאי הקומפוסטציה.

	Bin 1	Bin 2	Bin 3
Digested sewage sludge (% vol)	45	50	50
Shredded municipal green waste (% vol)	45	50	50
Biochar – grain husks (% vol)	10	-	-
Temperature setpoint °C	73	73	60-65

חומרי הגלם כללו: 1. בוצת מט"ש ניר עציון (החברה לטיפול במי חוף הכרמל). 2. גזם עירוני בגודל >30 מ"מ (צבי כהן אקולוגיה בע"מ). תוסף ביו-פחם ממקור קליפות זרעים (grain husks; lab designation E2). ניסוי זה תוכנן במטרה לעקוב אחרי ההשפעה של ביו-פחם בהשוואה לקומפוסט שהוכן מאותם חומרי גלם, בבקרת טמפרטורה משתנה. כיוון שלטמפרטורת התהליך יכולה להיות השפעה על נידוף אמוניה, הקומפוסטציה עם ביו-פחם בוצעה בתנאים "מחמירים" (73 מ"צ). טמפרטורת התהליך שהוגדרה לשני התאים האחרים הייתה 73 ו-60-65 מ"צ. נבחר ביו-פחם E2 לניסוי הקומפוסטציה מכיוון שלא היה הבדל בין שתי סוגי הביו-פחם מבחינת ספיחה של גז אמוניה (איור 1) אולם לביו-פחם E2 צפיפות קטנה יותר.

במהלך הקומפוסטציה נדגמו פליטות אמוניה מהערימות באמצעות מערכת של flux chamber ובעבוע על תוך מלכודת חומצית (איור 1). בכדי לייצר תנאי דיגום אחידים אשר אינם תלויים בהפעלה רגעית של המפוח (שנשלט על פי הטמפרטורה), המפוח הופעל למשך דקה אחת לפני הדיגום (ספיקת המפוח 400 מ"ק/שעה, כלומר, כ-3 החלפות אוויר של נפח החללים במצע). לאחר מכן, כאשר המפוח נמצא במצב OFF, נדגם האוויר מעל שטח המצע באמצעות הפעמון (flux chamber). הפעמון הוצב על פני מרכז השטח של הערימה בתא, דפנותיו הוחדרו מעט לתוך המצע, והזרם חנקן בספיקה של 10 ליטר/דקה במשך 30 דקות (להחלפת 3 נפחי אוויר לפחות של הפעמון). לאחר מכן התחיל שלב הדיגום, על ידי בעבוע אוויר מפתח היציאה של הפעמון לתוך מלכודת של 10 מ"ל 0.1N H₂SO₄ בספיקה של 200 מ"ל אוויר לדקה במשך 3 דקות (בשבועות הראשונים) או 10 דקות (בהמשך התהליך). בכל מועד דיגום בוצע בעבוע בזה אחר זה לתוך 3 מלכודות (חזרות).



פעמון דיגום (Flux chamber)

פתח ניקוז לעודפי החנקן שהתערבב עם אדים מהמקור

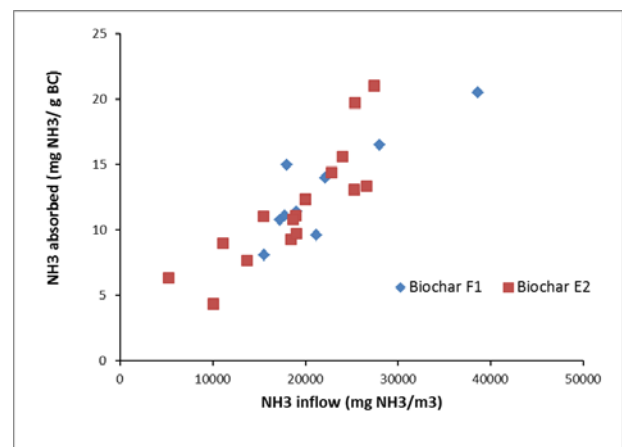
חיבור לקו הדיגום וצינורית טפלון עולה האוויר מהפעמון אל קו הדיגום



כניסת חנקן וצינורית טפלון מנוקבת דרכה יוצא החנקן אל חלל הפעמון

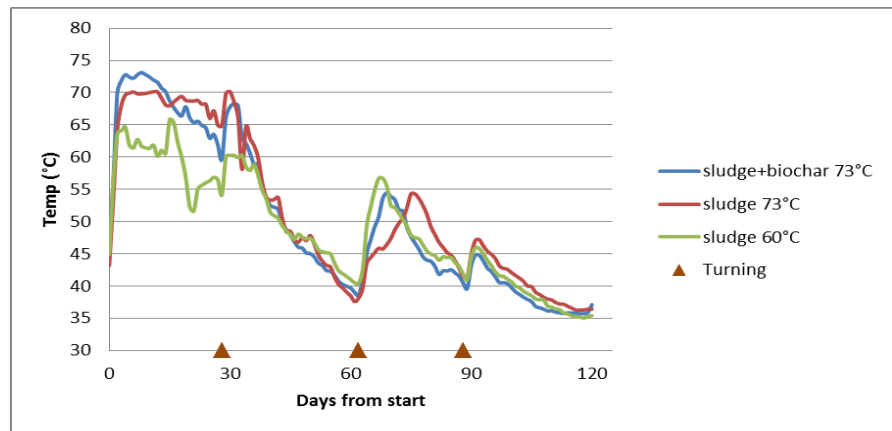
נתונים טכניים:
(הדגם המצולם הוא של חברת Odotech Inc., Canada)
פני שטח מעל המקור: 0.19 מ"ר
נפח הפעמון: 64.5 ליטר

איור 1. (למעלה) מערכת לדיגום פליטות אמוניה מתאי הקומפוסט (מלכודת החומצה והמשאבה מוגדלים באיור בהשוואה לפעמון). (למטה) ספיחת גז אמוניה על ביו-פחם F1-ו E2.



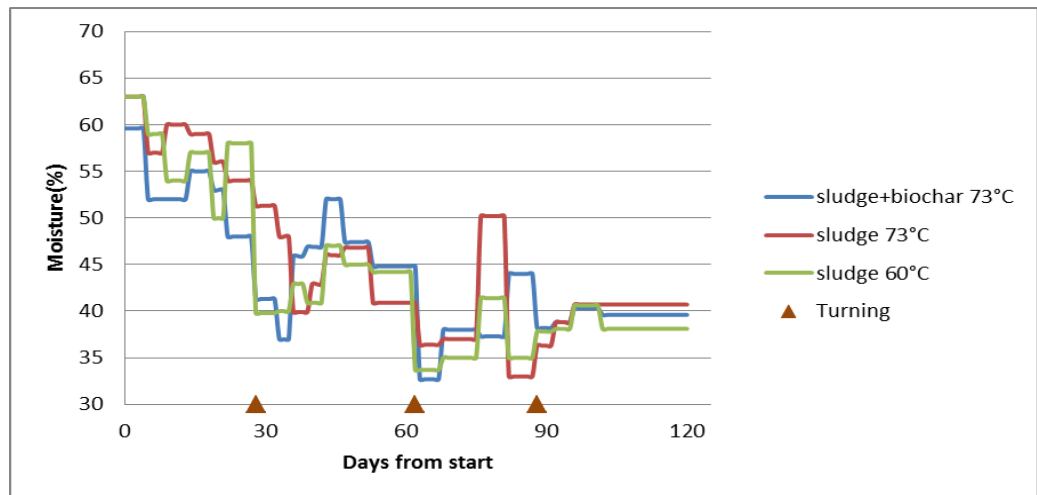
מאפיינים פיסיקליים של התהליך

הטמפרטורה נמדדה באופן רציף לאורך התהליך (איור 2). כפי שניתן לראות, ההתחממות הייתה מהירה והטמפרטורה הגיעה לערכי הסטפוינט של הפעלת המפוח בתוך ימים אחדים. לאחר ההפיכה הראשונה הטמפרטורות לא עלו בחזרה לערכי הסטפוינט אלא המשיכו לרדת בעקביות. לאחר ההפיכה השנייה הטמפ' עלו חזרה לערכים תרמופיליים (מעל 45 מ"צ) לפרק זמן קצר. במהלך מחזור הקומפוסטציה בוצעו 3 הפיכות של הקומפוסט, לאחר 29, 63 ו- 89 יום מתחילת התהליך. מחזור הקומפוסטציה בתא הסתיים לאחר 120 יום כאשר הטמפרטורה שנמדדה הייתה כ- 35°C (±2°C) וקרובה לטמפ' הסיביבה. לא נמצא הבדל משמעותי במהלך הטמפ' בין שני התאים בהם הוגדר הסטפוינט ל 73 מ"צ, עם או ללא ביו-פחם.



איור 2. מהלך הטמפרטורה בשלושת התאים. הנתונים מייצגים ממוצע יומי של מדידות רציפות וידיניות. המשולשים מצביעים על מועדי ההפיכות.

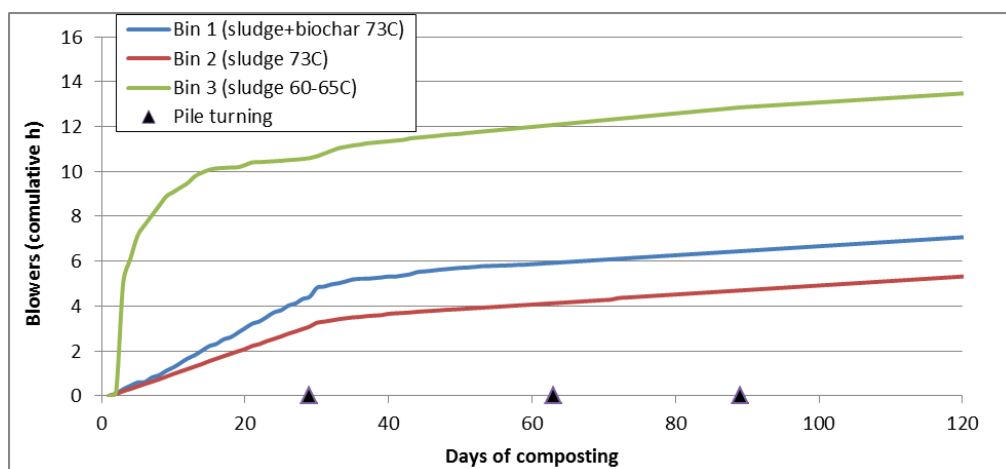
תכולת הרטיבות נבדקה פעמיים בשבוע. הדיגום בכל מועד נעשה מ- 2-3 מקומות בכל ערימה, כ- 500 ג' מכל מקום, מעומק חצי מגובה הערימה. הייבוש נעשה ב- 70°C עד לקבלת משקל דוגמא קבוע (איור 3). תכולת הרטיבות של התערובת הייתה בתחילת הניסוי כ- 60-65% ולאורך כל התקופה התרמופילית נעה בין 35-50% (על בסיס משקל רטוב).



איור 3. תכולת רטיבות במהלך הקומפוסטציה בשלושת התאים (% על בסיס משקל רטוב). תכולת הרטיבות נמדדה פעמיים בשבוע.

אזור הערימה. איור 4 מתאר את שעות העבודה המצטברות של עבודת המפוחים במהלך הקומפוסטציה. כפי שניתן לצפות, עיקר עבודת המפוחים נדרשה בחודש הראשון לתהליך. כמו כן, דרישת אוויר לצינור הערמה

הייתה משמעותית גבוהה יותר בתא בו הוגדרה טמפ' סף 60-65 מ"צ בהשוואה לשני התאים בו הוגדרה הטמפ' ל- 73 מ"צ.



איור 4. שעות עבודה מצטברות של המפוחים לאורך מחזור הקומפוסטציה בשלושת התאים.

אנליזות כימיות

סכמת הדיגום וסוגי הבדיקות שבוצעו מתוארים בפירוט בדו"ח השנה השנייה.

תוצאות

טבלה 2 מסכמת את התכונות הכימיות של התערובות בתחילת ובסוף מחזור הקומפוסטציה. באופן כללי התוצאות אופייניות לתהליכי קומפוסטציה תקינים. היחס בין ריכוזי החנקן לאמון במיצוי בסוף התהליך מעיד על בשלות של כל שלשת הקומפוסטים. העלייה בריכוזי רוב היסודות אופיינית למצב בו לא חלה שטיפת מינרלים מתוך הערימות, כפי שהיה במקרה זה. אין לנו הסבר פשוט לירידה בריכוזי הזרחן בשלושת התאים.

טבלה 2. התכונות הכימיות של התערובות בתחילת ובסוף מחזור הקומפוסטציה. ריכוזים כלליים של אלמנטים מופיעים כאחוז ממשקל יבש (לאחר ייבוש ב- 70 מ"צ). שאר הריכוזים מבוטאים כ- mg/l או כ- meq/l בתמיסת המיצוי המימית (יחס מיצוי 1:10).

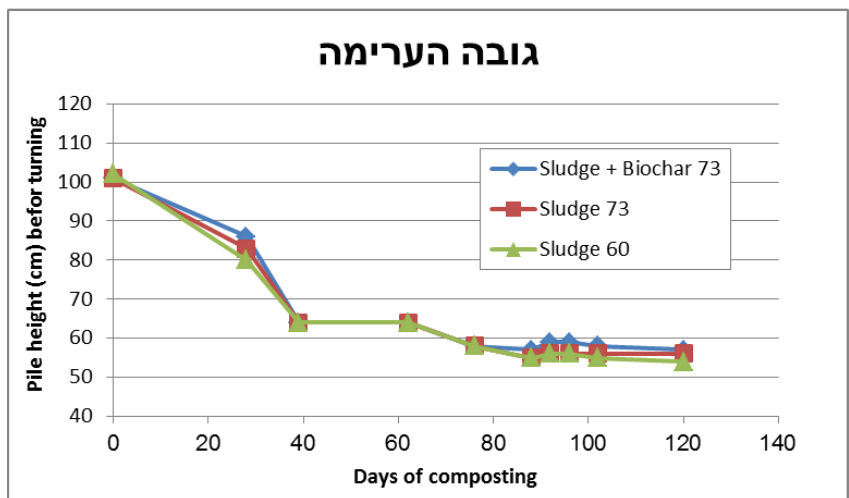
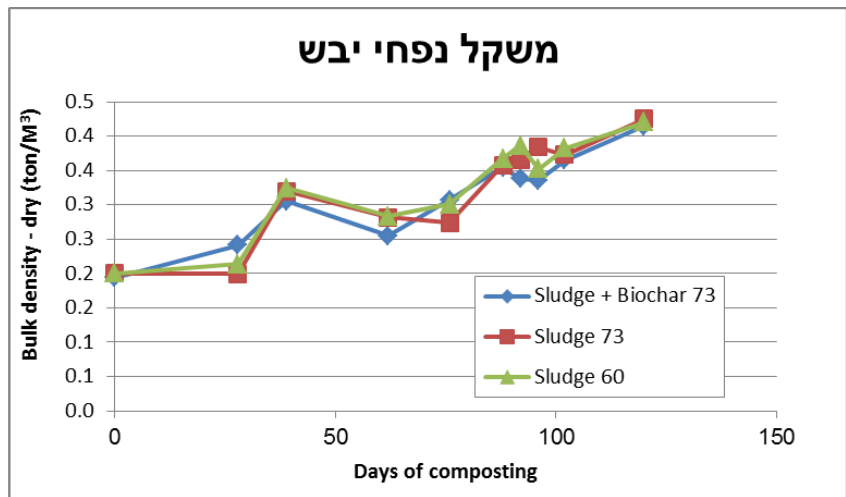
	Bin 1 (Sludge 73°C + B)	Bin 2 (Sludge 73°C)	Bin 3 (Sludge 6065-°C)

	Start	End	Start	End	Start	End
Moisture (%)	60.9	38.4	63.6	36.4	63.6	36.5
Ash (%)	**37.5	51.3	38.5	48.7	38.5	56.7
Organic matter (%)	62.5	48.7	61.5	51.3	61.5	43.3
C (%)	28.1	28.8	36.2	30.4	36.2	25.6
N (%)	2.25	2.38	2.43	2.39	2.43	2.21
P (%)	0.736	1.02	0.72	1.01	0.72	0.81
K (%)	0.57	0.73	0.43	0.65	0.43	0.57
Ca (%)	4.72	5.26	4.1	4.52	4.1	4.50
Mg (%)	1.01	0.81	0.95	0.90	0.95	0.86
Na (%)	0.13	0.19	0.13	0.20	0.13	0.19
C/N (weight ratio)	**16.74	12.1	15.0	12.7	15.0	11.6
	In 1:10 water extract					
pH	7.2	6.36	7.0	6.30	7.0	6.33
EC (dS/m)	1.63	4.60	2.32	4.30	2.32	4.55
K (meq/l)	4.28	9.28	6.53	8.25	6.53	8.33
Na (meq/l)	3.2	5.2	4.1	5.5	4.1	5.8
Ca+Mg (meq/l)	4.6	28.0	6.4	27.8	6.4	29.6
SAR	2.11	1.39	2.29	1.48	2.26	1.51
P-PO ₄ (mg/l)	48.6	35.0	62.5	37.8	62.5	40.0
Cl (mg/l)	232	289	337	275	337	322
N-NO ₃ (mg/l)	0.7	402	0.8	312	0.8	343
N-NH ₄ (mg/l)	57.8	7.7	90.2	7.6	90.2	3.3
N-organic (mg/l)	240.6	36.7	406	63.4	406	54.8
soluble N-total	299.1	446.4	497	383.0	497	400
N-NO ₃ /N-NH ₄	0.01	52	0.01	41	0.01	104

*

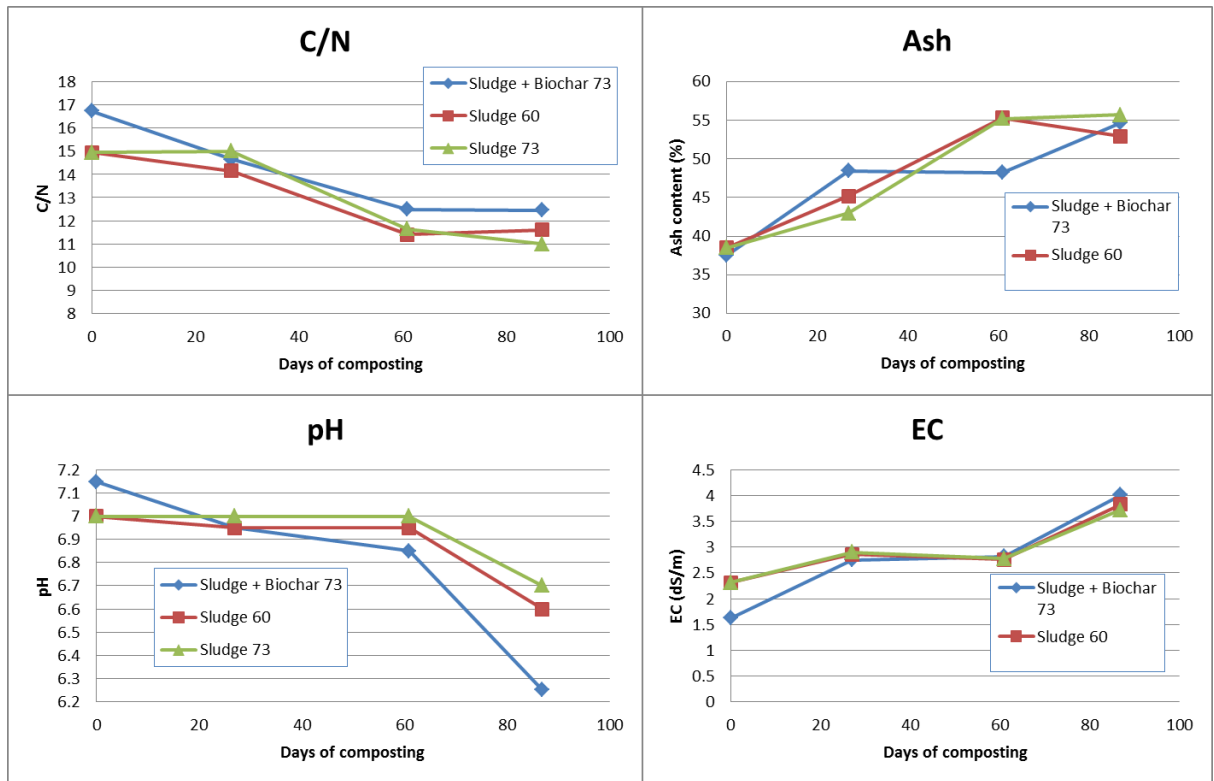
**מחושב מהמרכיבים

איורים 5-7 מתארים את הדינמיקה של חלק מהמאפיינים לאורך מחזור הקומפוסטציה. באיור 5 מגמת הירידה בגובה הערימה והעליה במשקל נפחי יבש הייתה דומה בשלושת התאים. במחזור הקומפוסטציה הקודם שהיה מבוסס על זבל בקר וגזם כפות תמרים ערמת הביקורת הייתה באופן עקבי נמוכה יותר בהשוואה לשני התאים עם ביו-פחם, והועלתה ההשערה כי הביו-פחם עשוי לשפר את המבנה הפיסיקלי של התערובת כ- bulking agent בזכות העובדה שהוא לא נדחס ואינו פריק. השערה זאת לא קיבלה תמיכה נוספת במחזור הקומפוסטציה עם הבוצה. מתוך נתוני המשקל הנפחי הרטוב, גובה הערימה, ותכולת הרטיבות הערכנו את כמות החומר היבש בזמן 0 (ששימש אותנו לחישוב איבודי חנקן, כמתואר בהמשך).



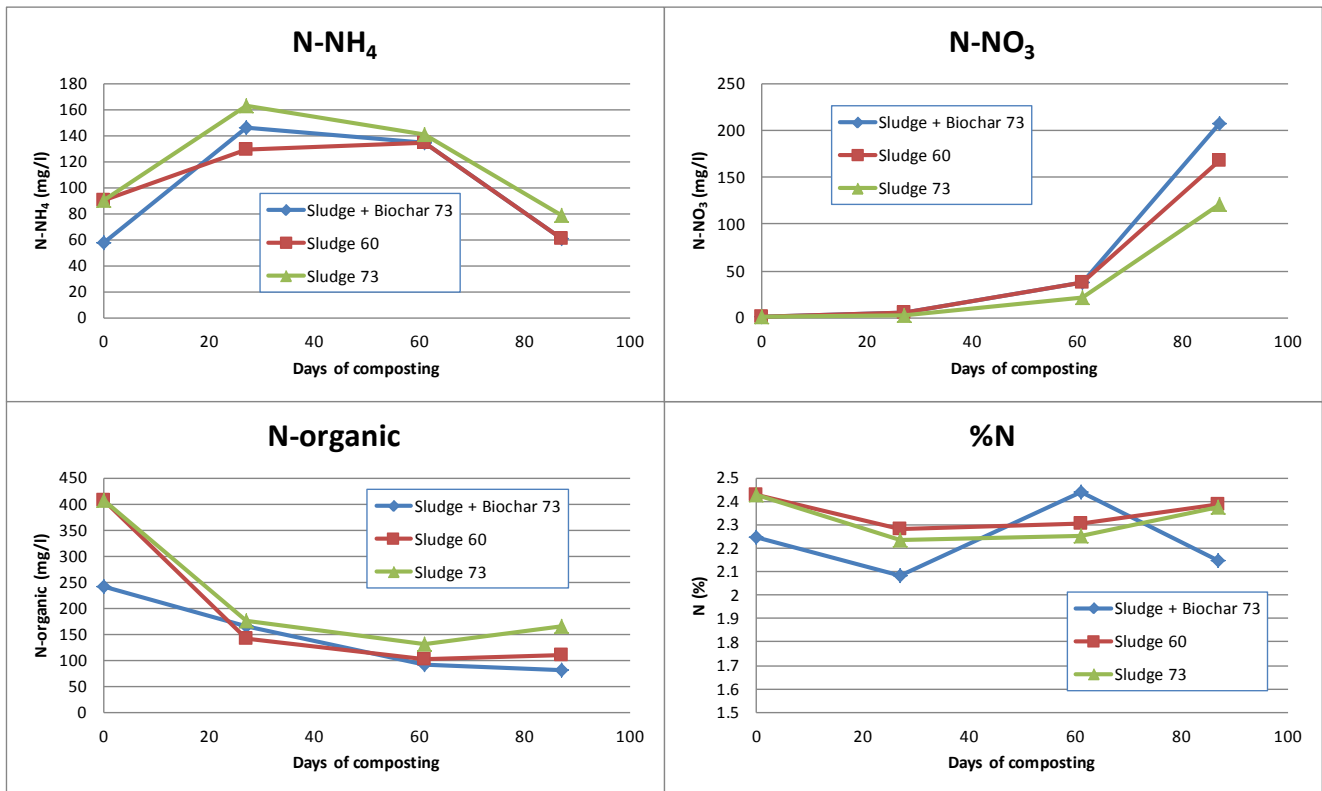
איור 5. שינויים במהלך מחזור הקומפוסטציה במשקל הנפחי היבש ובגובה הערימה בתא.

איור 6 מציג את השינויים בריכוז האפר, היחס C/N, מוליכות חשמלית, ו-pH. העלייה באחוז האפר לאורך המחזור. השינויים בריכוז האפר שימשו אותנו לחישוב איבודי חנקן, כמתואר בהמשך. הירידה ביחס C/N (פחמן כללי לחנקן כללי) לאורך התהליך אופיינית לתהליך קומפוסטציה, כאשר היחס יורד עם הבשלת החומר. העלייה בריכוז האפר ובמוליכות החשמלית אופייניות גם כן לתהליך בו מתפרקת הפרקציה האורגנית ויש הצטברות של מרכיבים אנאורגניים. לא ניכרים הבדלים משמעותיים בין הטיפולים.



איור 6. שינויים במהלך מחזור הקומפוסטציה באחוז האפר, היחס C/N, EC ו-pH במיצוי מימי 1:10.

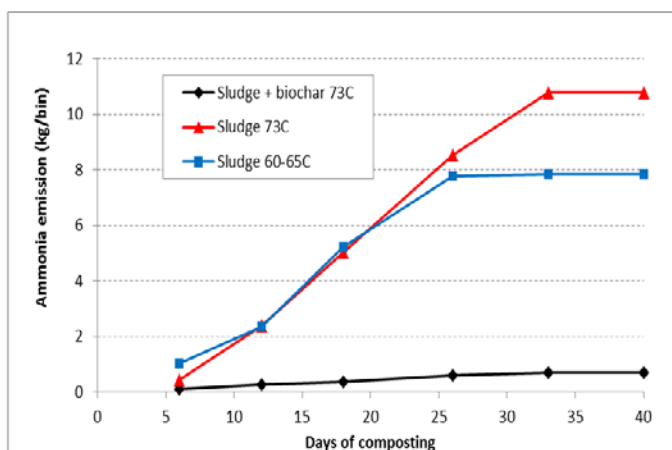
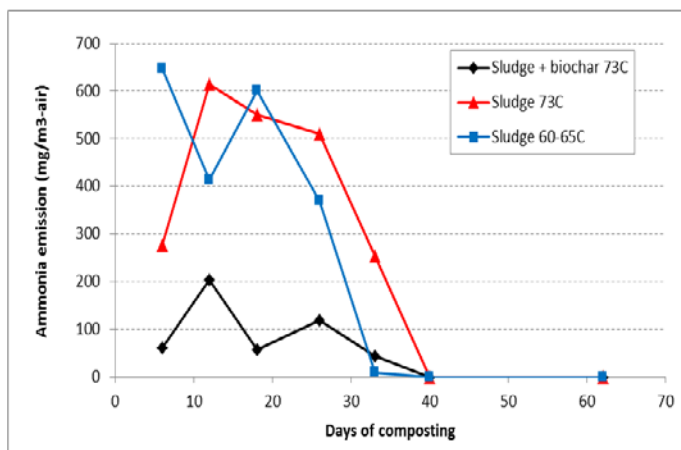
איור 7 מתאר את הדינמיקה של ריכוז החנקן הכללי וחסרן במיצוי מימי. נתוני החנקן הכללי והשינוי בריכוז האפר שימשו אותנו להעריך את כמות החנקן שאבד לאורך התהליך, כמתואר בהמשך. העלייה בריכוזי הניטראט אופיינית לתהליכי קומפוסטציה והבשלה של החומר בגמר השלב התרמופילי. ככל הנראה תהליכי הניטריפיקציה שחלו בשלב האחרון של הקומפוסטציה תרמו לירידת ה-pH. בכל המדדים לא ניכר הבדל משמעותי בין הטיפולים.



איור 7. ריכוזי החנקן במיצוי מימי 1:10 : אמון, ניטראט וחנקן אורגני. ו% החנקן בחומר היבש.

פליטת אמוניה

מדידות האמוניה מפני הערימות בתאים באמצעות פעמון דיגום (איור 1) מלמדות על שיעור פליטה נמוך משמעותית מתא 1 (בוצה + ביו-פחם) בהשוואה לשני התאים האחרים שלא הכילו ביו-פחם (איור 8). תוצאות אלה תומכות לכאורה בהיפותיזה של המחקר, שהשימוש בביו-פחם יכול לסייע בצמצום איבודי חנקן בתהליך קומפוסטציה. **אולם**, לא היו להבדלים אלה ביטוי בריכוזי החנקן שהתקבלו בשלושת הקומפוסטים לאורך התהליך. איבודי חנקן שחושבו על בסיס השינוי בריכוז האפר וריכוז החנקן הכללי תואמים בקירוב את האיבודים שנמדדו על פי פליטות האמוניה בתאים 2-3. אולם, חישובים אלה אינם תואמים את פליטות האמוניה הנמוכות שנמדדו מתא 1 (טבלאות 3-4). כמות החנקן שהלכה לאיבוד מכל תא (כ 8-10 ק"ג) מהווה כ 30% מכלל החנקן שהיה בתערובות בזמן 0. איבודי חנקן בשיעור שכזה נמצאים בטווח הערכים המוכר מהספרות. בשלב זה אין לנו הסבר לחוסר ההתאמה בין שני סוגי המדידות במקרה של תא 1.



איור 8. פליטת אמוניה במהלך הקומפוסטציה. הנתונים מוצגים כריכוז אמוניה באוויר הנדגם (איור שמאלי) או כשטף פליטות מצטבר מכל תא (איור ימיני).

טבלה 3. תכולת חנקן התחלתית בתערובות הקומפוסט ואיבודי חנקן מחושבים מתוך השינוי באחוז האפר ואחוז החנקן הכללי בתחילת וסוף התהליך.

Summary N loss	Kg N/bin	Kg N loss	% N loss
Bin 1 (sludge+biochar, 73C)	25.16	8.63	34.29
Bin 2 (sludge, 73C)	27.03	8.73	32.30
Bin 3 (sludge, 60-65C)	27.30	7.78	28.49

טבלה 4. השוואה בין איבודי החנקן על בסיס פליטות אמוניה, בהשוואה לחישוב על פי השינוי בריכוז האפר וריכוז החנקן הכללי בקומפוסט.

Summary N loss	Kg N loss	
	Based on NH3 emission	Based on %N and ash content
Bin 1 (sludge+biochar, 73C)	0.70	8.63
Bin 2 (sludge, 73C)	10.77	8.73
Bin 3 (sludge, 60-65C)	7.84	7.78

מבחן גידול

הקומפוסט המוכן ממחזור הקומפוסטציה הראשון (זבל בקר עם גזם כפות תמרים +/- ביו-פחם משני סוגים, שבבי עצים (F1) וקליפות זרעים (E2)) נבדק בניסוי גידול של חסה. הקומפוסט המוכן ממחזור הקומפוסטציה השני (בוצה עם גזם +/- ביו-פחם מסוג קליפות זרעים (E2)) נבדק בניסוי גידול של חציל.

בניסוי גידול חסה הוכנה תערובת של קומפוסט/פרלייט ביחס של 1:1. צמחי חסה רומית מזן 936 נשתלו בעציצים של חצי ליטר. הקומפוסטים נשטפו לפני הניסוי לפחות בנפח אחד, עד לקבלת EC בערך של כ- 3 dS/m. שתילי חסה בני 4 שבועות נשתלו במצעים השונים, 10 צמחים בכל מצע באקראיות גמורה, כאשר כל צמח מהווה חזרה. במקביל נבדקו עציצים ללא שתילים. לאורך הניסוי נאספו מי נקז לאנליזת מינרלים. הצמחים גודלו לפי פרוטוקול גידול מסחרי בחממה בחורף ללא בקרת אקלים במשך 10 שבועות. לאחר מכן הביומסה נקצרה ונשקלה ונבדקה תכולת מינרלים בעלים. בניסוי זה נמצא שהביומסה הייתה נמוכה באופן מובהק ($P \leq 0.5$) בטיפול עם ביו-פחם מסוג wood chips (טבלה 5).

בניסוי גידול החציל הוכנה תערובת של קומפוסט/פרלייט ביחס של 1:1. צמחי חציל מזן קלאסיק נשתלו בעציצים של 1.5 ליטר. הקומפוסטים נשטפו לפני הניסוי לפחות בנפח אחד, עד לקבלת EC בערך של כ- 3 dS/m. שתילי חציל במצעים השונים, 10 צמחים בכל מצע באקראיות גמורה, כאשר כל צמח מהווה חזרה. הצמחים גודלו לפי פרוטוקול גידול מסחרי בחממה בחורף ללא בקרת אקלים במשך 6 שבועות. לאחר מכן הביומסה נקצרה ונשקלה. גם בניסוי זה נמצא שהביומסה הייתה נמוכה באופן מובהק ($P \leq 0.5$) בטיפול עם הביופחם.

בניסוי החסה וגם בניסוי החציל נמצא שהביומסה הייתה נמוכה באופן מובהק ($P \leq 0.5$) בטיפול עם ביו-פחם (טבלה 6).

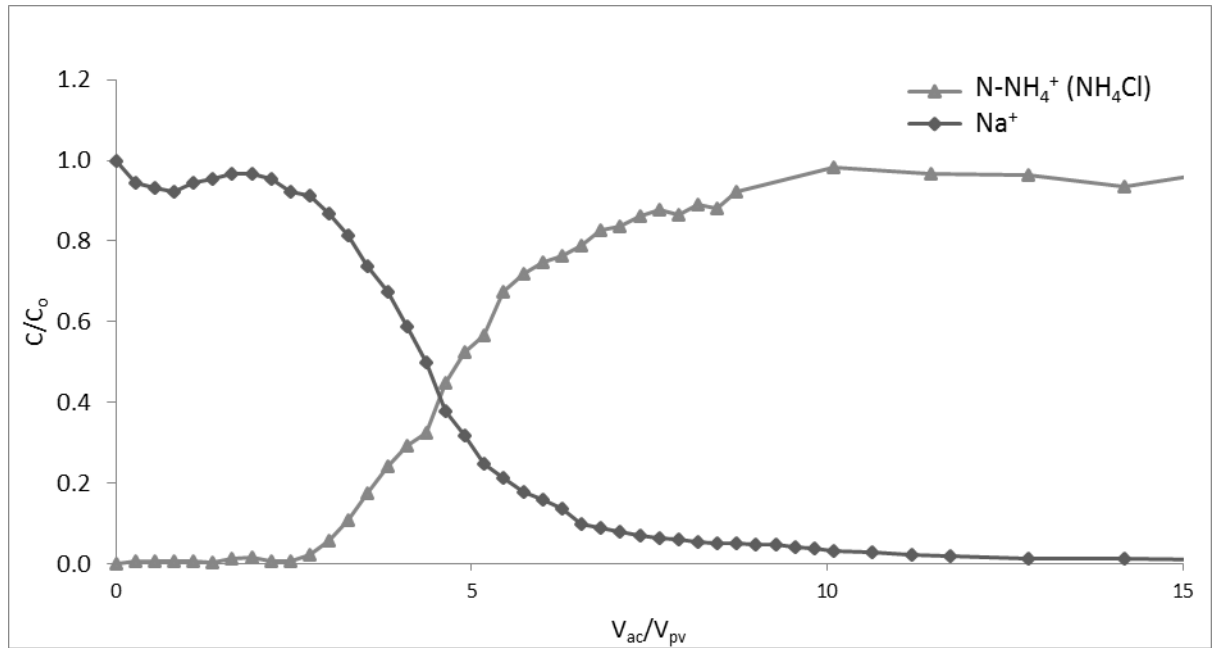
טבלה 5: משקל טרי ויבש של החסה.

	Dry weight		Fresh weight	
Control	2.58	A	23.78	A
Grain husks	2.43	AB	21.64	A
Wood chips	2.01	B	17.82	B

טבלה 6: משקל טרי ויבש של החצילים.

	Dry weight		Fresh weight	
2 - Sludge 73	4.543	A	26.45	A
3 - Sludge 60	4.491	AB	26.11	A
1 - Sludge 73 + BC	3.853	B	22.65	B

ניתן לראות בטבלה 2 כי אין הבדלים משמעותיים בריכוזם של צורני N (או יסודות הזנה עיקריים אחרים) במיצוי מים מהקומפוסטים השונים. לכן, זה לא יכול להסביר את תוצאות מבחני הגדילה. גם, נמצא כי קטיון NH_4^+ מתנהג בביו-פחם כקטיון חליף רגיל (איור 9), ולכן, אינטראקציות ספציפיות שלו עם ביו-פחם גם כן לא מסבירות את הפגיעה בגידול.



איור 9. חילוף בין קטיוני נתרן על ידי אמון בתהליך ספיחה על ביו-פחם הדרים. ציר ה- X הוא היחס בין נפח התשטיף המצטבר אשר מחולק בנפח הנקבובים של העמודה (V_{ac}/V_{pv}) וציר ה- Y הוא יחס בין ריכוזו של היון ביציאה מהעמודה מחולקת בריכוז היון בכניסה לעמודה (C/C_0).

הערות כלליות לדין וסיכום

נראה שהוספת ביו-פחם בשיעור של כ- 10% (נפחי) אינה משפיעה על מהלך הטמפרטורה של תהליך הקומפוסטציה וגם לא על מבחר של תכונות פיסקליות וכימיות של החומר לאורך התהליך.

בתערובת של בוצה+גזם הוספת ביו-פחם גרמה לירידה דרמטית בשיעור פליטת האמוניה. אולם, תכולת החנקן בקומפוסט המוכן מעידה ככל הנראה על איבודי חנקן בשיעור דומה לאיבודים מקומפוסטים שלא הכילו ביו-פחם. יתכן שזה נובע מאי דיוקים באנליזות והשינוי הקטן האבסולוטי בכמות החנקן שלא התנדף כאמוניה, כ-10 ג"ק N.

הוספת הביו-פחם בשני מחזורי הקומפוסטציה גרמה בסופו של דבר ליבול נמוך יותר בניסויי גידול. אין לנו הסבר לכך, וזה דורש עבודה נוספת.

רשימת פרסומים שנבעו מהמחקר

1. Tsechansky, L. and Graber E.R. (2014). Methodological Limitations to Determining Acidic Groups at Biochar Surfaces via the Boehm Titration. *Carbon*, 66, 730-733.
2. Pirelli T. (2013). Mineral nitrogen and biochar: Isotherm adsorption and substrate-plant interactions studies. Ph.D. Dissertation submitted to Udine University, Italy, December 2013.
3. Graber, E.R., Tsechansky, L., Fidel, R.B., Thompson, M.L., Laird, D.A. (2016) Determining Acidic Groups at Biochar Surfaces via the Boehm Titration. In: Singh, B., Camps-Arbestain, M., Lehmann, J. (Eds). *Methods of Biochar Analysis*. CSIRO, chapter 8 (in press).
4. Graber, E.R., Singh, B., Hanley, K., Lehmann, J. (2016) Determining Cation Exchange Capacity of Biochar. In: Singh, B., Camps-Arbestain, M., Lehmann, J. (Eds). *Methods of Biochar Analysis*. CSIRO, chapter 7 (in press).

5. פוחילנקו, אלכסנדר (2016) השפעת ביו-פחם על ספיחה, שחרור וזמינות ביולוגית של צורות שונות של חנקן, עבודת-גמר מוגשת לפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה ע"ש רוברט ה. סמית, האוניברסיטה העברית בירושלים, מוסמך למדעי החקלאות.

סיכום עם שאלות מנחות

מטרות המחקר תוך התייחסות לתוכנית העבודה
מטרת העל של מחקר זה הייתה לבחון את השימוש בביו-פחם בתהליך הקומפוסטציה במטרה להפחית איבודי חנקן גזי וכן להגדיל את הערך ההזנתי של הקומפוסט.
אלו ממטרות המחקר הושגו בעבודת המחקר הנוכחית
במחקר נמצא כי תוספת ביו-פחם בתהליך הקומפוסטציה אכן מפחיתה בצורה משמעותית מאוד את פליטות אמוניה, אבל אינו מגדיל את ערך ההזנתי של הקומפוסט.
עיקרי התוצאות
נמצא כי תוספת ביו-פחם בתהליך הקומפוסטציה אכן מפחיתה בצורה משמעותית מאוד את פליטות אמוניה ללא יתרון בהעלאת שיעור החנקן בקומפוסט המוכן. ניסוי חממה הראו שלקומפוסטים שונים שהוכנו עם ביו-פחם השפעה שלילית על גידול צמחי בוחן בהשוואה לקומפוסטים שנוצרו ללא ביו-פחם.
מסקנות מדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו. האם הושגו מטרות המחקר לתקופת הדו"ח?
תוספת של 10% ביו-פחם הפחיתה בסדר גודל אחד את פליטות אמוניה בעת הקומפוסטציה, תוצאה בעלת משמעות גדולה מבחינת זיהום אוויר ומטרדי ריח. תוצאה זו חיובית ביותר, אולם, תוצר הקומפוסט הסופי היה פחות איכותי בהשוואה לקומפוסטים שנוצרו ללא ביו-פחם. לכן, מתעורר צורך במחקר המשך במטרה להבין את סיבות הירידה באיכות הקומפוסט כתוצאה של תוספת ביו-פחם, ובכימות עלות-תועלת של הוספת ביו-פחם בתהליך הקומפוסטציה. את המשך המחקר כדאי לבצע בקני מידה גדול יותר ובתנאים אמתיים ללא אזורר מאולץ. כדאי גם לבצע בדיקות של חומרי ריח אורגניים נדיפים.
מחקר זה מראה כי לביו-פחם יש פוטנציאל כסופח לאמוניה.
בעיות שנתרו לפתרון ו/או שינויים (טכנולוגיים, שיווקיים ואחרים) שחלו במהלך העבודה ; התייחסות להמשך המחקר

הפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח

1. Tsechansky, L. and Graber E.R. (2014). Methodological Limitations to Determining Acidic Groups at Biochar Surfaces via the Boehm Titration. *Carbon*, 66, 730-733.
2. Pirelli T. (2013). Mineral nitrogen and biochar: Isotherm adsorption and substrate-plant interactions studies. Ph.D. Dissertation submitted to Udine University, Italy, December 2013.
3. Graber, E.R., Tsechansky, L., Fidel, R.B., Thompson, M.L., Laird, D.A. (2016) Determining Acidic Groups at Biochar Surfaces via the Boehm Titration. In: Singh, B., Camps-Arbestain, M., Lehmann, J. (Eds). *Methods of Biochar Analysis*. CSIRO, chapter 8 (in press).
4. Graber, E.R., Singh, B., Hanley, K., Lehmann, J. (2016) Determining Cation Exchange Capacity of Biochar. In: Singh, B., Camps-Arbestain, M., Lehmann, J. (Eds). *Methods of Biochar Analysis*. CSIRO, chapter 7 (in press).
5. פוחילנקו, אלכסנדר (2016) השפעת ביו-פחם על ספיחה, שחרור וזמינות ביולוגית של צורות שונות של חנקן, עבודת-גמר מוגשת לפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה ע"ש רוברט האוניברסיטה העברית בירושלים, מוסמך למדעי החקלאות. ה. סמית

פרסום הדו"ח: אני ממליץ לפרסם את הדו"ח עד לדו"ח

ללא הגבלה ➤

- Asada T, Ohkubo T, Kawata K, Oikawa K (2006) Ammonia adsorption on bamboo charcoal with acid treatment. *J Health Sci* 52:585-589
- Chen YX, Huang XD, Han ZY, Huang X, Hu B, Shi DZ, Wu WX (2010) Effects of bamboo charcoal and bamboo vinegar on nitrogen conservation and heavy metals immobility during pig manure composting. *Chemosphere* 78:1177-1181
- Dias BO, Silva CA, Higashikawa FS, Roig A, Sanchez-Monedero MA (2010) Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure: Effect on organic matter degradation and humification. *Biores Technol* 101:1239-1246
- Graber ER, Meller-Harel Y, Kolton M, Cytryn E, Silber A, Rav David D, Tsechansky L, Borenshtein M, Elad Y (2010) Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media. *Plant Soil* 337:481-496
- Hua L, Wu WX, Liu YX, McBride M, Chen YX (2009) Reduction of nitrogen loss and Cu and Zn mobility during sludge composting with bamboo charcoal amendment. *Environ Sci Poll Res* 16:1-9
- Kastner JR, Miller J, Das KC (2009) Pyrolysis conditions and ozone oxidation effects on ammonia adsorption in biomass generated chars. *J Haz Mat* 164:1420-1427
- Kolton M, Meller Harel Y, Pasternak Z, Graber ER, Elad Y, Cytryn E (2011) Impact of biochar application to soil on the root-associated bacterial community structure of fully developed greenhouse pepper plants. *Appl Environ Microbiol* 77:4924 - 4930
- Krull E, Baldock JA, Skjemstad J, Smernik R (2009) Characteristics of biochar: Organo-chemical properties. In: Lehmann J, Joseph S) ed) *Biochar for environmental management: Science and technology*. Earthscan, London. pp 53-66
- Pietikainen J, Kiikkila O, Fritze H (2000) Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus. *Oikos* 89:231-242
- Senesi N, Plaza C (2007) Role of humification processes in recycling organic wastes of various nature and sources as soil amendments. *Clean-Soil Air Water* 35:26-41
- Steiner C, Das KC, Melear N, Lakly D (2010) Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar. *J Environ Qual* 39:1236-1242

Taghizadeh-Toosi A, Clough TJ, Condrón LM, Sherlock RR, Anderson CR, Craigie RA (2011)
Biochar incorporation into pasture soil suppresses in situ nitrous oxide emissions from
ruminant urine patches. *J Environ Qual* 40:468-476