פיתוח מדדים כימים פיזקלים וביולוגים לאיכות קומפוסט לפטריות מאכל בישראל בשלבי היצור השונים - 2004

עופר דנאי מו"פ צפון
נירית אזוב מו"פ-צפון

מבוא ותיאור הבעיה

כמות הפטריות שיוצרו בארץ בשנת 2004 הייתה כ 7,000 טון, מתוכם כ 5,000 טון יוצרו במושבים מעונה וזרעית והיתר בשאר אזורי הארץ. בשנת 1990 עמד היצור השנתי בגליל על 150 טון בלבד. סוגי הפטריות המגודלות כיום הן שמפיניון (*Agaricus*), פטריות יער-ירדן (*Pleurotus*) שהוכנסו לגידול ע"י מו"פ צפון לפני כ- 19 שנה, ופטריות החורש (*Portabella*) שהוכנסו לגידול ע"י המו"פ לפני כ 8 שנים.

גידול הפטריות בגליל נמצא במגמת פיתוח מתמשכת, הגידול מתאים לאזור הגליל ההררי מכוון שאינו נזקק לקרקע חקלאית ומסתפק במעט מאוד מים. היקף ייצור הקומפוסט המשמש כמצע לגידול ומיוצר במפעל קומפיט גדל מ כ- 1,500 טון שיוצרו בשנת 1990 ל כ- 27,500 טון בשנת 2004. בבחינת הגורמים האחראיים להצלחת הגידול נמצא כי איכות הקומפוסט ואחידותו הינו הגורם העיקרי המשפיע על תוצאות הגידול, ולכן יש חשיבות רבה בהבטחת איכותו ואחידותו. עד לתקופה האחרונה נעשתה בקרת איכות הקומפוסט בשלב הראשון של היצור במפעל קומפיט, והיא התבססה על תוצאות עבודת המחקר שנעשתה לפני כ 20 שנה על ידי לבנון וחובריו. השיטות ליצור הקומפוסט עברו שינויים רבים בשנים האחרונות, כתוצאה מהמגמה להקטנת רמת מפגעי הריח הנפלטים בתהליך היצור ולשיפור יעילות היצור, ע"י הגדלת הניצולת ושיפור המוצר. השינוי בשיטות הייצור מחייב פתוח מערך בקרה חדש שיתאים לתהליכים החדשים. בפיתוח מערך הבקרה ניתן להשתמש במדדים שנבדקו במדינות שונות. מספר חוקרים בעולם החלו לפתח את השימוש במכשיר NIR לבקרת איכות לקומפוט לפטריות. עלותו הגבוהה של ציוד זה והשוני בין הרכב חומרי הגלם המשמשים ליצור הקומפוסט במדינות השונות מחייבים פיתוח מדדי בקרת איכות בפרמטרים כימים פיזקלים וביולוגים חדשים, המתאימים לתנאי היצור הקיימים בישראל.

מטרות המחקר:

- אפיון שלבי היצור הקריטיים, בהם יש לבצע בקרת איכות.
- פיתוח מדדים כימים, פיזקלים וביולוגים לבקרת איכות בשלבים השונים.
- הגדרת תחומי האופטימום של המדדים השונים.
- פיתוח השיטה לצורך יישומה לבקרת התהליך במערכי היצור המסחריים.

שיטות המחקר:

בשנה א' התרכזנו באיסוף נתונים כימיים ופיזיקאליים רבים, מחומרי הגלם ומכל שלבי הכנת הקומפוסט, על מנת לאפיין את השלבי היצור בהם יש לבצע דיגום ועל מנת לבחון את שיטת הדיגום המתאימה שתייצג את המכלול. התברר שחומרי הגלם מגיעים למפעל "קומפיט" (המבצע את שלב הקומפוסטציה הראשון) בטווח שונות רחבה, שגורמת להבדלים גדולים בפרמטרים

הרצויים של הקומפוסט. סוג הקש התגלה כגורם המרכזי המשפיע על המבנה ועל פרמטרים נוספים שהחשוב שבהם הוא תכולת הרטיבות של הקומפוסט.

בשנה ב' התמקדנו בבחינת יעילות טכנולוגיית ה NIRS לאנליזה, הגדרת תחומי האופטימום ואפיון ההבדלים בין קש ארוך (טרי/חדש) לקש קצר וישן (קש שעמד תקופה ארוכה בשדה, והחלו בו תופעות של פרוק מיקרוביאלי). בדקנו את הקשר בין גיל הקש לאורך הגבעולים וליכולת ספיחת המים שלו על ציר הזמן. הבדלים במבנה הקש נגרמים בעונות גידול שונות (הבדלים בכמות ופיזור המשקעים), כתלות במקום הגידול (תנאי אקלים וקרקע) וכן עקב שונות בעיבודים (ריסוסים, דישונים ועוד) ובטיפול בקש לאחר הקציר.

<u>רפד</u> – הרפד תורם החנקן העיקרי ולכן משפיע על תכולת החנקן וריכוז האמוניה . בשנים שלפני מחקר זה, הוכנסו כמויות קבועות של רפד לתערובת הקומפוסט, ללא התחשבות ברמת החנקן והרטיבות של הרפד. בשנת 2003 הוכנסו שינויים בשיטת העבודה, כך שחומרי הגלם מוכנסים למערך הייצור לאחר בדיקות במעבדת המו"פ, על פיהן נקבעת כמות הרפד המוכנס לייצור ע"פ איכותו

שנה ג' – בקיץ 2004 הבחנו בירידה משמעותית באיכות הקש, שנגרמה קרוב לוודאי עקב עצירת גשמים בסוף עונת גידול החיטה. הדבר התבטא בקש בעל גבעול קצר, בעל דופן דקה, עקב תכולת ליגנין והמיצלולוז נמוכה. שמתפרק בתהליך הקומפוסטציה בקצב מהיר. במטרה לשמור על איכות הקומפוסט נערכו התאמות בערכי האופטימום של הפרמטרים הכימיים והפיסיקליים. שינויים אלו כללו הורדת תכולת הרטיבות, החנקן הכללי וריכוז האמוניום . ערכי הפרמטרים האופטימליים בקש באיכות טובה וגרועה מוצגים בטבלה 3.

בנוסף אספנו דוגמאות של קש באיכות שונה משנת 2003 ועד סוף 2004 ושלחנו אותם לבדיקת הרכב סיבים, במעבדה בנווה יער. תוצאות הבדיקה מוצגות בטבלה 1.

בשנים הקודמות, ניסינו למצוא מתאם בין הפרמטרים הכימיים והפיסיקליים של הקומפוסט לבין היבול המתקבל. בחינה של כל פרמטר בנפרד לא נתנה תוצאות בעלות מתאם גבוה.

בשנה זו ניסינו בשיתוף עם פרופסור H. S. S. Sharma מאוניברסיטת Queen's באירלנד לפתח מודל, שבו ניתן לשקלל יחד את כל הפרמטרים ולמצוא את הקשר בין מכלול זה לבין היבול הצפוי.

<u>שיטות וחומרים</u>

<u>בדיקות קש :</u>

סוגי הקש אופינו בשתי קטגוריות עיקריות : קש ארוך (חדש) וקש קצר (ישן). אספנו 5 דוגמאות של קש ארוך ועירבבנו אותן, אותו הדבר נעשה בקש הקצר. מכל סוג קש נלקחו 50 גר' באופן אקראי וחולקו לקבוצות לפי אורך הגבעול. כל קבוצת אורך נשקלה וחושב האחוז המשקלי מתוך הדוגמה. בנוסף, נלקחו דוגמאות נוספות של 50 גר' משני סוגי הקש והושרו במים למשך פרקי זמן קבועים. בתום כל פרק זמן שנקבע הוצאה דוגמת הקש מהמים, ניתן לעודף המים להתנקז במשך דקה אחת ולאחר מכן נשקלה הדוגמה. כמות המים שנספגה חושבה כאחוז מהמשקל ההתחלתי.

<u>בדיקת רפד :</u>

נבדקה תכולת רטיבות וחנקן לכל משלוח רפד שהגיע למפעל "קומפיט". כמות הרפד שהוספה לקומפוסט חושבה ע"פ תוצאות הבדיקות. נערך מעקב אחר השינוי באחידות הקומפוסט ועמידה בפרמטרים הרצויים של חנקן ואמוניום.

במהלך שנה זו עבר מפעל "קומפיט" מקומפוסטציה בערמות לקומפוסטציה בבנקרים בלבד. תו ואיכות הקש שבשימוש..

<u>כיול מערכת NIRS:</u>

נלקחו 60 דוגמאות קומפוסט, משלבי הייצור השונים, ונבדקו בשיטות הבדיקה של "כימיה רטובה" כמתואר בהמשך. הפרמטרים שנבדקו: pH, אמוניום, חנקן כללי, אפר וחושב יחס C/N.

שיטות הבדיקה בכימיה רטובה:

pH - משרים 10 גר' דוגמה ב 50 מ"ל מים מזוקקים למשך 30 דקות. התמיסה נבדקה במד pH מתוצרת אל חמה, דגם 420A.

אמוניום - משרים 10 גר' דוגמה ב 50 מ"ל מים מזוקקים למשך 30 דקות. התמיסה נבדקה ע"פ פרוטוקול הבדיקה של ערכת Ammonium-Test מתוצרת חברת Merck.

רטיבות – שוקלים את הדוגמה ומכניסים לתנור ייבוש בטמפרטורה 105 מ"צ עד להתיצבות המשקל. שוקלים שוב ומחשבים את הרטיבות ע"פ הנוסחה:

$$\text{רטיבות } (\%) = 1 - \frac{\text{משקל יבש נטו}}{\text{משקל רטוב נטו}} \times 100$$

חנקן – בדיקת חנקן נעשתה לפי שיטת קלדהל.

אפר – ייבוש הדוגמה בטמפרטורה של 60 מ"צ וטחינתה לאבקה. שריפה בתנור בטמפ. של 600 מ"צ למשך 5 שעות, קרור בדסיקטור ושקילה.

לאחר יבוש וטחינה, הדוגמאות נשלחו לבדיקה בטכנולוגית NIRS, להכנת עקומת כיול. במעבדה של יאן לנדאו במינהל המחקר.

<u>השוואה בין תוצאות אנליזה של כימיה רטובה לאנליזה ב NIRS</u>

לאחר הכנת עקומת הכיול, נבדקו 20 דוגמאות נוספות בשתי השיטות, ונערכה השוואה בין התוצאות משתי שיטות הבדיקה, וסטיות התקן שלהן. תוצאות הבדיקות מוצגות בטבלה 3.

<u>בחינת רמות היבולים שהתקבלו והגדרת הפרמטרים האופטימליים בשלבי הייצור השונים</u>

נאספו נתוני יבול ממספר מגדלי פטריות ונבדקו רמות המתאם בין היבולים לפרמטרים הכימיים.

פיתוח מודל להגדרת הפרמטרים האופטימלים:

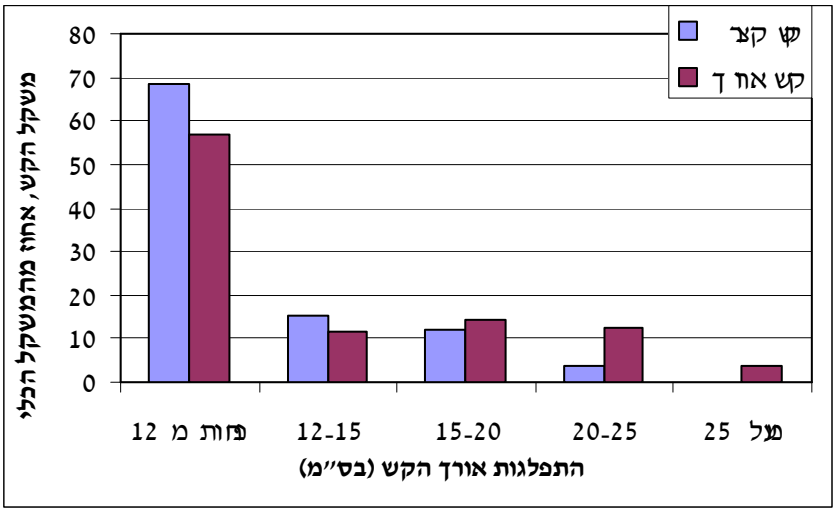
לצורך פיתוח המודל אספנו 93 דוגמאות קומפוסט מ 11 תהליכי יצור, בשלבי היצור השונים (קומפוסט ירוק, מפוסטר ומונבט), בין מרץ לספטמבר 2004. לכל הדוגמאות בדקנו 7 פרמטרים כימיים ופיזיקליים: (רטיבות, צפיפות, pH ריכוז אמוניום, חנקן כללי אפר ויחס C/N) וכן נאספו נתוני היבול שנקטף מקומפוסטים אלו אצל 4 מגדלים מסחריים. הדוגמאות, יבשות וטחונות, נשלחו לפרופסורSharma באירלנד. הפרמטרים הכימיים והפיסיקליים ותוצאות היבול נותחו בתוכנה CAMO גירסה 7.6, המאפשרת לאמוד את השינויים במהלך שלושת שלבי הייצור ולאחר מכן נבדק המתאם ביניהם לבין היבול המתאים, בעזרת תוכנת Partial Least Squars (PLS).

תוצאות:

1.פיתוח מדדים כימים, פיזקלים וביולוגים לבקרת איכות של חומרי הגלם.

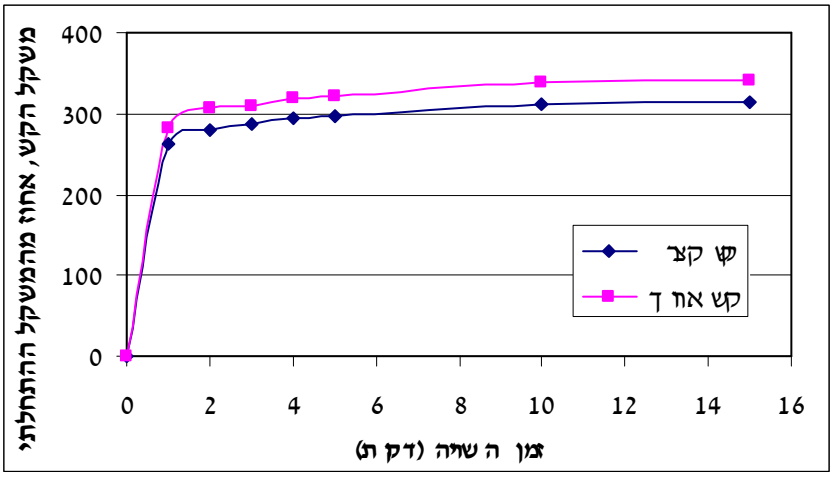
1.1 קש

איור 1 הבדלים באורך גבעולי הקש, בין קש באיכות טובה (ארוך) לקש באיכות גרועה (קצר).



במטרה לנסות ולאפיין כמותית את ההבדלים בין הקש האיכותי ליצור קומפוסט לקש שאינו מתאים (גרוע) על פי בדיקה ויזואלית, בדקנו את התפלגות אורך גבעולי הקש בשתי דוגמאות מייצגות. מאיור זה ניתן לראות שהקש האיכותי מכיל גבעולים ארוכים יותר מאשר הקש הגרוע. 43% ממשקל הקש הארוך מהווים גבעולים שאורכם מעל 12 ס"מ לעומת 32% בקש הקצר.

איור 2 הבדלים בכשר ספיגת מים, בין קש ארוך לקצר.



בניסוי זה נבדק כושר ספיגת המים של שני סוגי הקש. ניתן לראות שמרבית המים נספגים בקש בדקה הראשונה (עליה של 283% מהמשקל ההתחלתי בקש ארוך, 263% בקש קצר). ההבדל בין שני סוגי הקש התיצב על 36% מהמשקל ההתחלתי, מכאן

כושר קליטת המים הסופית של הקש הארוך גדול ב 8% בהשואה לקש הקצר.

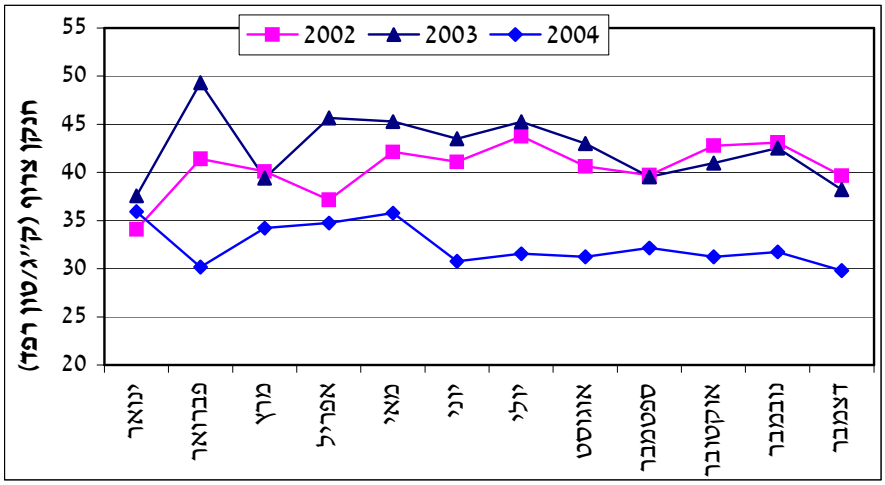
טבלה 1. תוצאות בדיקת סיבים בקש באיכות שונה

	DM (%)	OM (%)	Lignin (%)	אפר כללי (%)	אפר מסיס (%)	אפר בלתי מסיס (%)
קש ארוך 2003	43.51	42.00	16.05	5.48	5.93	-0.45
קש ארוך 2004	44.40	43.48	19.81	6.40	7.16	-0.76
קש קצר 2004	48.30	46.15	13.09	12.08	8.77	3.31

טבלה 1 מציגה את הנתונים העיקריים שהתקבלו מבדיקות כימיות שנערכו בנווה יער. (DM - נעכלות חומר יבש בכרס מלאכותית. OM – נעכלות חומר אורגני בכרס מלאכותית). הנתונים מצביעים על הבדלים ניכרים בין הקש הארוך, זה שמתאים ליצור קומפוסט, לקש הקצר בכל הפרמטרים שנבדקו ובמיוחד בתכולת אפר גבוהה (כללי ומסיס) וריכוז ליגנין נמוך בקש הקצר .

1.2 רפד לולים

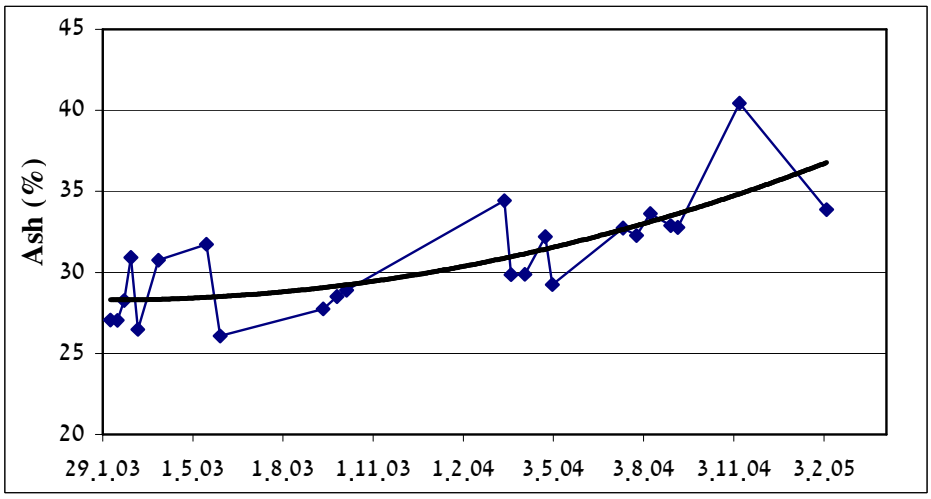
איור 3. תכולת חנקן צרוף ברפד במהלך 2002-2004



איור 3 מציג את הממוצע החודשי של תכולת חנקן צרוף ברפד גלמי, שנכנס למפעל קומפיט בתקופת המחקר. ניתן לראות כי רמת החקן הצרוף נעה בין 50 עד 30 ק"ג לטון רפד. ניתן להבחין בשינויים במהלך השנה ובשינויים בין השנים. ניתן לראות כי בשנת 2004 היתה ירידה של כ 24% בתכולת חנקן צרוף, לעומת השנתיים שקדמו לה. הממוצע בשנת 2003 היה – 42.52 ק"ג/טון ובשנת 2004 – 32.45 ק"ג/טון. (הסיבה לירידה זו היא כנראה שינויים בתזונת העופות).

2.1 שינויים בהרכב הקומפוסט

איור 4. תכולת אפר בקומפוסט שלב I במהלך 2003-2005

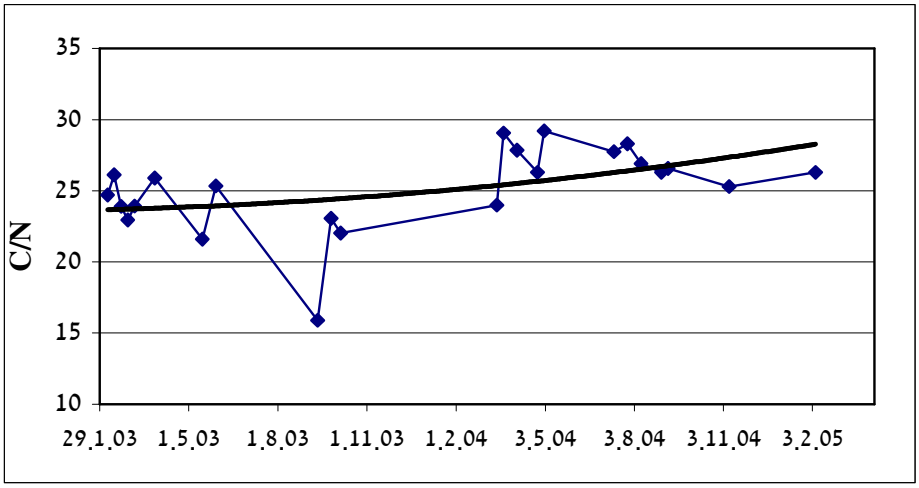


איור 4 מציג את ריכוז האפר הכללי בקומפוסט בסוף שלב הקומפוסטציה (Phase 1) ניתן לראות כי בבדיקות שנערכו לדוגמאות מ 22 תהליכי ייצור שונים במהלך 2003-2004 ניכרת מגמה של עליה בריכוז האפר בקומפוסט מכ 28% בתחילת שנת 2003 לכ 35% בסוף 2004.

הסיבות שעשויות לגרום לתופעה זאת הם:

עליה בריכוז האפר ההתחלתי של חומרי הגלם, בעיקר בקש.
עליה בכמות הרפד המוסף כתוצאה מירידה בכמות החנקן הצרוף.
הגדלת רמת הפירוק של החומר האורגי במהלך התהליך.

איור 5. יחס C/N בקומפוסט שלב I במהלת 2002-2004



באיור 5 ניתן לראות את השינוי המקביל ביחס C\N ב בסוף שלב הקומפוסטציה (Phase 1) . ניתן לראות כי בניגוד למצופה , עלית ריכוז האפר בקומפוסט לא הביאה לירידה מקבילה ב ביחס C\N זאת כניראה כתוצאה מירידה מקבילה בריכוז החנקן שמקורה כניראה בירידת רמת החנקן ברפד העופות.

3.1 פיתוח השימוש ב אנליזה מהירה ב NIRS לבדיקות קומפוסט

טבלה 2 : השוואה בין תוצאות אנליזה של כימיה רטובה לאנליזה ב NIRS

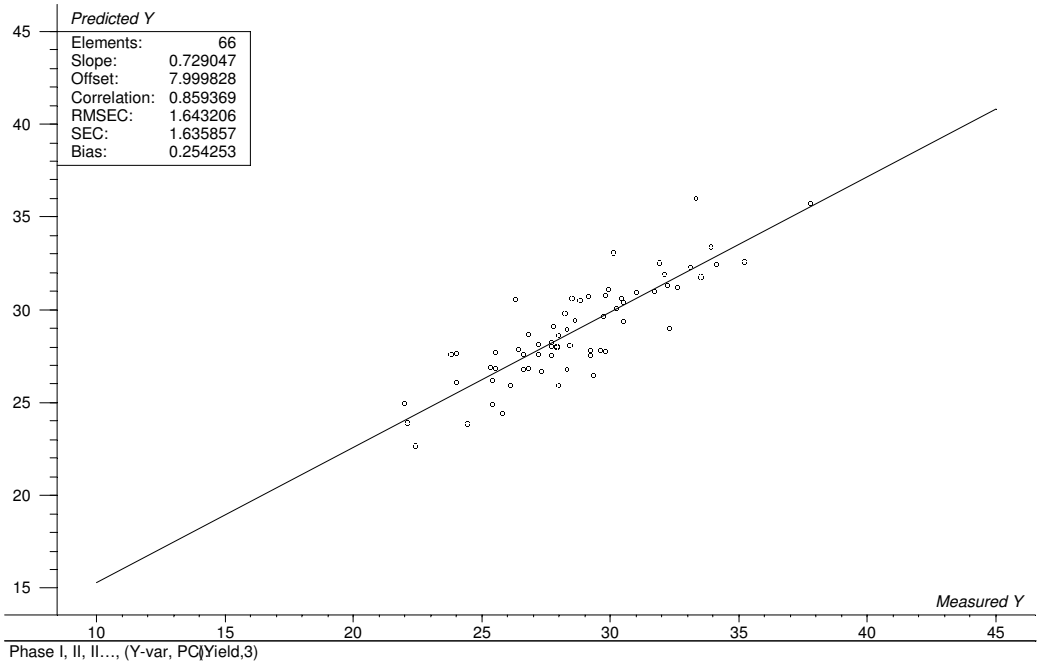
שיטה		סוג הקומפוסט	מספר דוגמאות	pH	אמוניום	חנקן	אפר	C/N
כימיה "רטובה"	ממוצע	ירוק	6	8.02	741.67	1.78	28.91	23.47
		בזריעה	9	7.53	209.44	2.44	39.28	14.41
		מונבט	3	6.59		2.86	42.53	11.80
	ס"ת %	ירוק	6	1.07	15.06	93.83	45.60	12.64
		בזריעה	9	7.92	169.77	44.32	23.06	41.90
		מונבט	3	0.84		2.94	2.76	5.99
NIRS	ממוצע	ירוק	6	8.01	897.17	1.86	31.35	23.11
		בזריעה	9	7.39	44.78	2.27	38.07	15.77

		מונבט	3	6.39		2.65	33.47	20.78
	ס"ת %	ירוק	6	1.64	13.81	8.39	12.15	13.96
		בזריעה	9	1.43	201.57	4.81	3.49	8.89
		מונבט	3	2.69		3.76	22.57	52.13

בטבלה 2 ניתן לראות את תוצאות של ממוצע וסטיית התקן (ס״ת) של מדגם דוגמאות קומפוסט משלבי יצור שונים שנבדקו בשתי שיטות: כימיה רטובה ו NIRS. התוצאות שהיתקבלו בבדיקות שנעשו בכימיה רטובה ניבדקו מול אלו שהיתקבלו ב NIRS ניתן לראות כי יש מתאם טוב בין בדיקות הכימיה הרטובה ובין אנליזת ה NIRS. בכל הפרמטרים שנבדקו ובשלושת שלבי היצור של הקומפוסט.

4.1 פיתוח מודל רב משתנים לאפיון הפרמטרים האופטימלים ליצור קומפוסט בשלושת שלבי היצור.

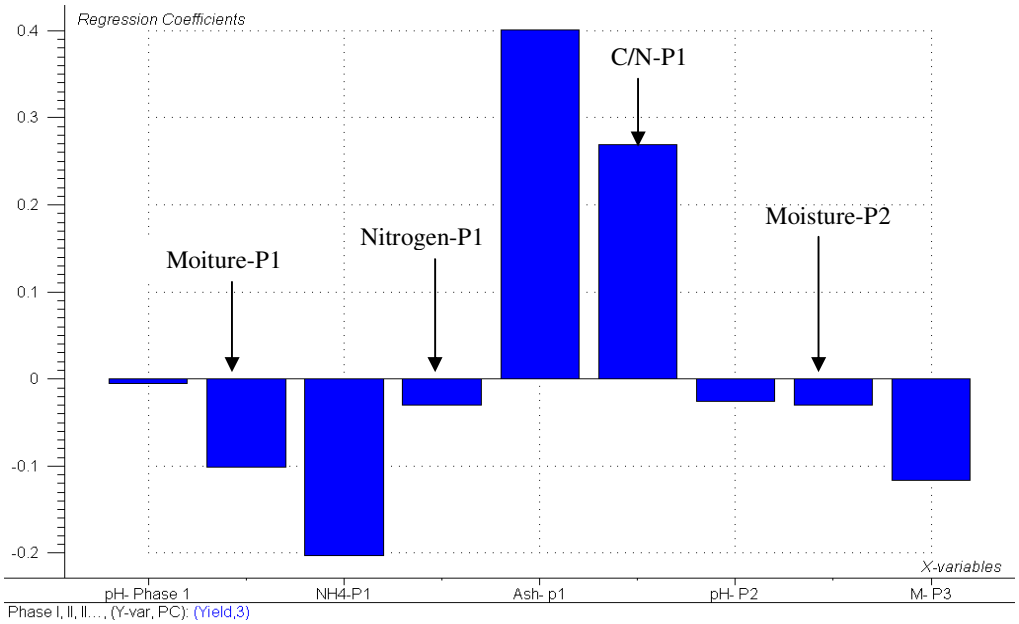
איור 6 המתאם בין הפרמטרים העיקריים בשלבים I, II, III והיבולים שהתקבלו (מהדוגמאות ששימשו לכיול) במהלך 2002-2004



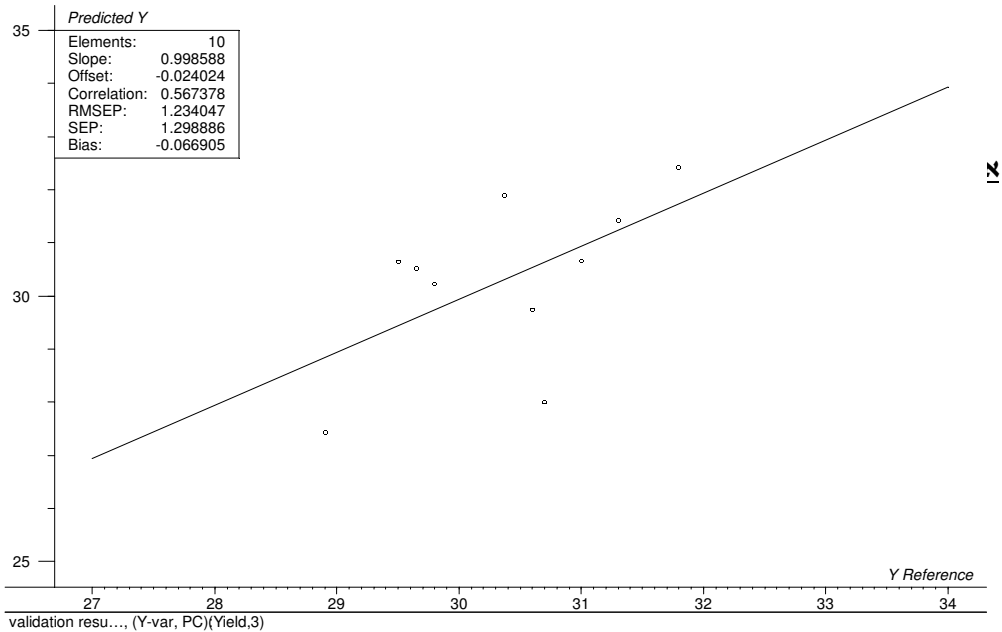
איור 6 מציג את היחס בין הפרמטרים העיקריים בשלושת שלבי הייצור(בשלבים I, II, III) לבין היבולים שהתקבלו במהלך 2002-2004. הבדיקה נעשתה במודל PLS (Partial least squares regression method) יחס שנמצא מוצג בתרשים ע״י המתאם (Correlation) בין היבול בפועל לבין היבול החזוי ע״פ הפרמטרים שנמדדו. נבדקו הפרמטרים של 66 דוגמאות קומפוסט משלושת

שלבי היצור . נמצא : רמת המתאם (R^2) היתה 0.86 עם טעות דגימה (SEC) של 1.64 ק״ג\מ״ר ומתאם צולב 0.8 עם טעות דגימה (SECV) 1.92 ק״ג\מ״ר.

איור 7. השפעה חיובית ושלילית של 9 פרמטרים כימיים ופיסיקליים של הקומפוסט על המודל

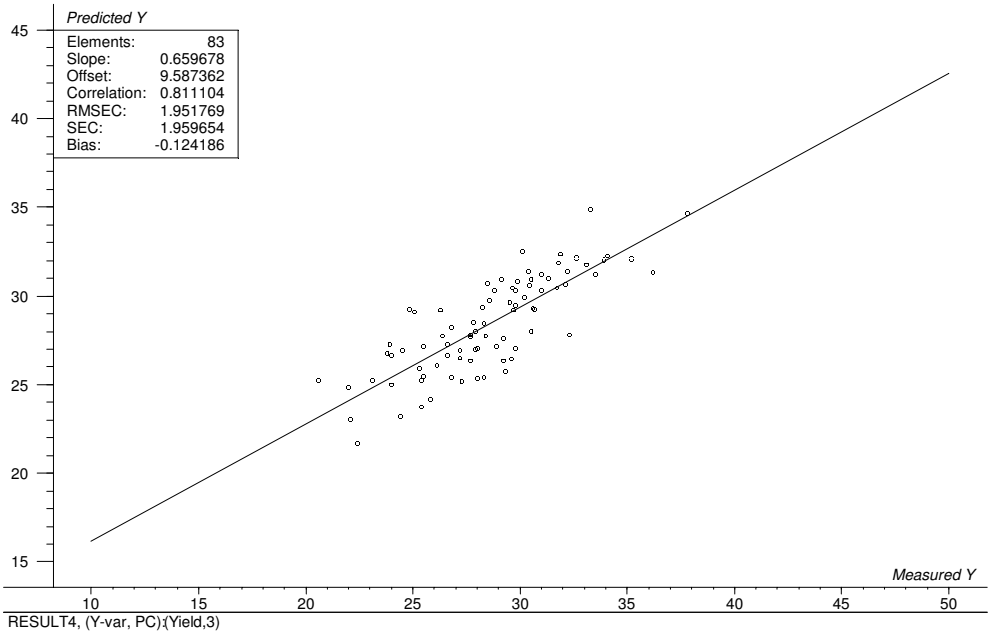


איור 7 מציג את ההשפעה של הפרמטרים שנבדקו על המודל. ניתן לראות שלאפר ויחס C/N היתה השפעה חיובית גדולה, ולעומתם אמוניום ורטיבות בשלב I ו- III השפיעו באופן שלילי על המודל.



באיור 8 ניתן לראות את התוצאות הבדיקה של דוגמאות משלושת שלבי היצור שניבדקו בשנת 2004 . נמצא : רמת המתאם (R^2) היתה 0.6 עם טעות דגימה (SEP) של 1.29 ק״ג\מ״ר קומפוסט מערמה 699 שמוקף בעיגול יוצא דופן מסיבות שאינן ברורות עם עם טעות דגימה (SEP) של 2.7 ק״ג\מר׳.

<u>איור 9 בדיקת המודל על 83 דוגמאות.</u>



איור 9 מציג את היחס בין הפרמטרים העיקריים בשלושת שלבי הייצור(בשלבים I, II, III)_לבין כל היבולים שהתקבלו במהלך 2002-2004. הבדיקה נעשתה במודל PLS (Partial least squares regression method) יחס שנמצא מוצג בתרשים ע״י המתאם (Correlation) בין היבול בפועל לבין היבול החזוי ע״פ הפרמטרים שנמדדו. סה״כ נבדקו הפרמטרים של 83 דוגמאות קומפוסט משלושת שלבי היצור . נמצא : רמת המתאם (R^2) היתה 0.81 עם טעות דגימה (SEC) של 1.95 ק״ג\מ״ר ומתאם צולב 0.76 עם טעות דגימה (SECV) 2 ק״ג\מ״ר.

5.1 הגדרת תחומי האופטימום של המדדים השונים לצורך שימושם לבקרת התהליך במערכי היצור המסחריים.

טבלה 3. פרמטרים אופטימליים לאיכות קומפוסט בשלבים I, II, III בשימוש בקש באיכות טובה (HSQ) ובקש באיכות גרועה (PSQ).

Parameter	Phase I HSQ	Phase I PSQ	Phase II HSQ	Phase II PSQ	Phase III HSQ	Phase III PSQ
Moisture (%)	73.5 - 74.5	71.5 - 72.5	66 – 68	65 – 67	64 – 66	62 – 64
pH	8.1 - 8.2	8.0 - 8.1	7.5 – 7.7	7.6	6.3 – 6.5	6.4
Ammonia (ppm)	750 - 950	650 – 850	50 – 100	50	-	-
Total nitrogen (%)	1.7 - 1.9	1.5 - 1.7	1.9 – 2.1	2.0	2.1 – 2.3	2.2
Ash (%)	25.0 - 29.0	27	27 – 32	29.5	29 - 35	32
C:N ratio	21 - 26	23 – 28	14 – 16	15	12-15	13.5
Bulk Density (kg/m^3)	570	580	-	-	-	-

טבלה 3 מציגה את תחומי האופטימום של הפרמטרים העיקריים של הקומפוסט בשלושת שלבי הייצור, בשימוש בקש באיכות טובה וגרועה, כפי שנמצאו במודל שפותח. ניתן לראות שההמלצה

היא להפחית את הערכים של מרבית הפרמטרים בשימוש בקש גרוע, על מנת לשמור על המבנה הפיסיקאלי וצפיפות הקומפוסט. התאמות אלו איפשרו את המשך הייצור בירידה מינימלית ביבול

מסקנות והמלצות להמשך המחקר

במסגרת תוכנית מחקר זאת :

בחנו את שלבי היצור הקריטיים, בהם יש לבצע בקרת איכות ומצאנו כי קימת שונות גבוהה מאוד בהרכב חומרי הגלם שהיגעו למתקן יצור הקומפוסט : רפד עופות, וקש חיטה . דבר זה מחייב ביצוע בדיקות הרכב של חומרים אלו בשלב טרום הכנסתם למתקן היצור על מנת לקבוע באיזה כמות ובאיזה אופן יש להשתמש בהם. אנו ממליצים לבחון בעתיד מהם המקורות לשונות זאת.

פיתחנו במשותף עם דר. יאן לנדאו ממנהל המחקר את השימוש שיטת NIRS לבדיקה מהירה של קומפוסט שנמצאה במתאם גבוה עם בדיקות של כימיה רטובה. אנו ממליצים להמשיך ולהרחיב את השימוש בשיטה זאת ולבחון את אפשריות העבודה עם דוגמאות רטובות שיאפשרו זמן תגובה קצר יותר.

פיתחנו במשותף עם פרופסור H. S. S. Sharma מאוניברסיטת Queen's באירלנד מודל להגדרת הפרמטרים האופטימלים של קומפוסט בשלבי יצורו השונים. יש להרחיב את הבדיקה על מנת לשפר את איכות המודל .