



1999-2001

תקופת המחקר:

301-0285-01

קוד מחקר:

Subject: DEVELOPEMENT OF SOUND
ENVIROMENTAL MANAGEMENT FOR LONG TERM
APPLICATION OF EFFLUENT AND SLUDGE IN
AGRICULTURE

Principal investigator: ASHER BAR-TAL

Cooperative investigator: AVIVA HADAS, DAN ZOHAR,
PINCHAS FINE, URI YIRMIYAHU, YERMIYAHU URI,
KINN MIRIM

Institute: Agricultural Research Organization (A.R.O.)

שם המחקר: פתוח מימשק לשימוש ארוך טווח
בתוצרי טהור שפכים בחקלאות תוך שמירת
איכות הסביבה

חוקר ראשי: אשר ברטל

חוקרים שותפים: אביבה הדס, דן זוהר, פנחס
פיין, אורי ירמיהו, אורי ירמיהו, מרים קינן

מוסד: מינהל המחקר החקלאי, ת.ד. 6 בית דגן
50250

תקציר

מטרת הניסוי הייתה לבחון את העומס האפשרי מבחינת החנקן המשתחרר מתוספת קומפוסט אורגני לקרקע בה גדלה חיטה ביישום חוזר במשך שלוש שנים ולבחון שיטות לחיזוי כמות החנקן שתשתחרר. לשם כך נערך ניסוי במכלים בחממה שבהם חיטה נזרעה במכלים בנפח 60 ליטר, בקרקע חמרה חול סיני. בקרקע ייושמו שני סוגי קומפוסטים: מבוצה מהמתקן לטהור קולחים בנתניה ומזבל בקר מתוצרת ש"חמ. הקומפוסטים בשלוש רמות (שוות ערך ל- 3, 6, 12 טון חומר יבש לדונם) עורבבו עם שכבת הקרקע העליונה, 0-15 ס"מ. ההשקיה היתה על פי שקילה לשמירה על ערך סף של רטיבות וללא נקז. במהלך הניסוי ערכנו בכל עונת גידול מספר דגימות קרקע לעומקים של 0-15, 15-30, 30-55 ס"מ שבהן נבדקו ריכוזי החנקן, זרחן ואשלגן, ומספר דגומי צמחים לקביעת משקל טרי ויבש וההרכב המינרלי (חנקן, זרחן ואשלגן) בכל איבר. בנוסף בצענו ניסוי מינרליזציה של שני הקומפוסטים בהדגרה בתנאים מבוקרים במעבדה, שממנו קבענו את קבועי המינרליזציה של הקומפוסטים בעזרת הרצות סימולציה של פרוק החומר האורגני ומינרליזציה של החנקן בתוכנת NCSOIL. תוצאות: יכולת הנזף והגרעינים עלו ככל שעלתה רמת הקומפוסט (מ 0.1 ו- 0.02 טון לדונם בהתאמה בטיפול ההיקש ל- 2.3 ו- 0.89 טון לדונם ברמת הקומפוסט הגדולה ביותר). בשנתיים הראשונות היבול בטיפול הקומפוסט המרבי היה כחצי מאשר בטיפול המדושן ללא קומפוסט, אך בשנה השלישית השתוו היבולים בטיפולים אלו. בכל שלושת השנים יבול החנקן וריכוזו בנוף ובגרעינים היה גבוה בהרבה בטיפול המדושן. סך קליטת החנקן עלה עם העלייה בכמות הקומפוסט המוספת. בשנתיים הראשונות סך קליטת החנקן בטיפול המדושן היתה גבוהה פי ארבעה מאשר בעומס הקומפוסט המרבי, ובשנה השלישית ב- 50% בלבד. ריכוזי הזרחן והאשלגן בנוף ובגרעינים בטיפולי הקומפוסט הגבוהים עלו על אלה שבטיפול המדושן. כמות החנקן שנקלטה על ידי הצמחים הייתה בקרוב טוב למוערך על פי ניסוי אינקובציה במעבדה. למעשה כמות החנקן שנקלטה על ידי הצמחים היתה דומה לכמות החנקן המינרלי שהיתה בקרקע ובקומפוסט המוסף. לסיכום, בעומסי הקומפוסט שנבדקו, עד 24 טון לדונם בשתי עונות, חנקן היה גורם מגביל להתפתחות הצמחים ולא נוצר עודף בשום מקרה. מצאנו בעזרת המודל NCSOIL את קבועי קצב הפרוק של הקומפוסט ושל החומר האורגני הקרקעי. מצאנו שאפשר לאפיין את הקומפוסטים כמורכבים משני מאגרים (POOLS), קל וקשה פרוק. המאגר קל הפרוק היה 16%-20% מכלל הפחמן ו- 11%-14% מכלל החנקן בקומפוסטים וקצב הפרוק שלו היה 0.024 ליום. המאגר קשה הפרוק היה 80%-84% מכלל הפחמן ו- 86%-89% מכלל החנקן בקומפוסטים וקצב הפרוק שלו היה 0.00014 ליום. ההבדל העיקרי בין הקומפוסטים היה בסך תכולת הפחמן והחנקן האורגניים והחנקן המינרלי בהם. השתמשנו בפרמטרים הללו בעבודת הסימולציה שכללה

גם את קליטת החנקן המדודה על ידי הצמחים, חישוב השפעת השינויים בטמפרטורות כפי שנמדדו בחממה, והשפעת הפרשת חומרים אורגנים על ידי הצמחים (קצב ההפרשה הוערך על פי עקום הגידול של הצמחים ונתונים מהספרות). כמויות החנקן המינרלי בקרקע שנחזו בסימולציות לטיפולים השונים היו בהתאמה טובה עם הכמות המדודה. לבסוף עשינו הרצות של המודל עבור תנאי שדה בניסוי שדה שנעשה בארץ ותוצאותיו פורסמו והערכנו את הכמות המינימלית של קומפוסט בוצה או בקר הדרושה לסיפוק תצרוכת החנקן של החיטה בקרקע החולית ללא דישון (17 ו- 20 טון לדונם, בהתאמה). ביישום של 6 טון לדונם קומפוסט בוצה או בקר לקרקע זו יהיה צורך להוסיף 20 או 23 ק"ג לדונם חנקן אנאורגני, בהתאמה.

דו"ח לתוכנית מחקר מספר 99-0285-301

פתוח ממשק לשימוש ארוך טווח בתוצרי טהור שפכים בחקלאות תוך שמירת איכות הסביבה

Development of sound environmental management for long term application of effluent and sludge in agriculture

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות

ע"י

אשר בר-טל, פנחס פיין, אביבה הדס, וסילי סולופנוב, ז"ק בירו, רבקה רחנברג, שרה דווידוב, מרים קינן, שושנה סוריאנו
כימיה של הקרקע והזנת הצמח, המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי
אורי ירמיהו קרקע ומים, תחנת גילת, מנהל המחקר החקלאי
דן זהר ממ"ר תבואות חורף, האגף לגידולי שדה, שרות ההדרכה והמקצוע

Asher Bar-Tal, Soil Chemistry & Plant Nutrition, Inst. Of Soils, Water & Environ. Sci. , ARO, The Volvani Center, P.O.Box 6, Bet Dagan 50250. E-mail: abartal@agri.gov.il

Pinchas Fine, Soil Chemistry & Plant Nutrition, Inst. Of Soils, Water & Environ. Sci. , ARO, The Volvani Center, P.O.Box 6, Bet Dagan 50250. E-mail: Finep@netvision.net.il

Aviva Hadas, Soil Chemistry & Plant Nutrition, Inst. Of Soils, Water & Environ. Sci. , ARO, The Volvani Center, P.O.Box 6, Bet Dagan 50250. E-mail: ahadas@agri.gov.il

Rivka Rosenberg, Sara Davidov, Miriam Keinan, Shoshana Soriano, Soil Chemistry & Plant Nutrition, Inst. of Soils, Water & Environ. Sci. , ARO, The Volvani Center, P.O.Box 6, Bet Dagan 50250.

Uri Yermiyahu, Molcho Center, Gilat Research Center, D.N. Negev 85280.

E-mail: uri4@netvision.net.il

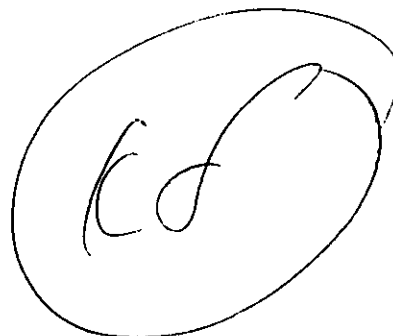
Dan Zohar, Dept. of Field Crops, Extension Service, Ministry of Agriculture, P.O.Box 6, Bet Dagan.

E-mail: danzohar@netvision.net.il

מרץ 2002

תשס"ב-ניסן

8.4.02



הממצאים בדו"ח זה הנם תוצאות ניסויים ואינם מהווים המלצות לחקלאים

חתימת החוקר 567 110

תקציר

מטרת הניסוי הייתה לבחון את העומס האפשרי מבחינת החנקן המשתחרר מתוספת קומפוסט אורגני לקרקע בה גדלה חיטה ביישום חוזר במשך שלוש שנים ולבחון שיטות לחיזוי כמות החנקן שתשתחרר. לשם כך נערך ניסוי במכלים בחממה שבהם חיטה נורעה במכלים בנפח 60 ליטר, בקרקע-חמרה חול סיני. בקרקע ייושמו שני סוגי קומפוסטים: מבוצה מהמתקן לטהור קולחים בנתניה ומזבל בקר מתוצרת ש"חמ. הקומפוסטים בשלוש רמות (שוות ערך ל - 3, 6, 12 טון חומר יבש לדונם) עורבבו עם שכבת הקרקע העליונה, 0-15 ס"מ. ההשקיה היתה על פי שקילה לשמירה על ערך סף של רטיבות וללא נקז. במהלך הניסוי ערכנו בכל עונת גידול מספר דגימות קרקע לעומקים של 0-15, 15-30, 30-55 ס"מ שבהן נבדקו ריכוזי החנקן, זרחן ואשלגן, ומספר דגומי צמחים לקביעת משקל טרי ויבש וההרכב המינרלי (חנקן, זרחן ואשלגן) בכל איבר. בנוסף בצענו ניסוי מינרליזציה של שני הקומפוסטים בהדגרה בתנאים מבוקרים במעבדה, שממנו קבענו את קבועי המינרליזציה של הקומפוסטים בעזרת הרצות סימולציה של פרוק החומר האורגני ומינרליזציה של החנקן בתוכנת NCSOIL. תוצאות: יכול הנוף והגרעינים עלו ככל שעלתה רמת הקומפוסט (מ 0.1 ו - 0.02 טון לדונם בהתאמה בטיפול ההיקש ל - 2.3 ו - 0.89 טון לדונם ברמת הקומפוסט הגדולה ביותר). בשנתיים הראשונות היבול בטיפול הקומפוסט המרבי היה כחצי מאשר בטיפול המדושן ללא קומפוסט, אך בשנה השלישית השתוו היבולים בטיפולים אלו. בכל שלושת השנים יכול החנקן וריכוזו בנוף ובגרעינים היה גבוה בהרבה בטיפול המדושן. סך קליטת החנקן עלה עם העלייה בכמות הקומפוסט המוספת. בשנתיים הראשונות סך קליטת החנקן בטיפול המדושן היתה גבוהה פי ארבעה מאשר בעומס הקומפוסט המרבי, ובשנה השלישית ב- 50% בלבד. ריכוזי הזרחן והאשלגן בנוף ובגרעינים בטיפולי הקומפוסט הגבוהים עלו על אלה שבטיפול המדושן. כמות החנקן שנקלטה על ידי הצמחים הייתה בקרוב טוב למוערך על פי ניסוי אינקובציה במעבדה. למעשה כמות החנקן שנקלטה על ידי הצמחים היתה דומה לכמות החנקן המינרלי שהיתה בקרקע ובקומפוסט המוסף. לסיכום, בעומסי הקומפוסט שנבדקו, עד 24 טון לדונם בשתי עונות, חנקן היה גורם מגביל להתפתחות הצמחים ולא נוצר עודף בשום מקרה. מצאנו בעזרת המודל NCSOIL את קבועי קצב הפרוק של הקומפוסט ושל החומר האורגני הקרקעי. מצאנו שאפשר לאפיין את הקומפוסטים כמורכבים משני מאגרים (POOLS), קל וקשה פרוק. המאגר קל הפרוק היה 16%-20% מכלל הפחמן ו- 11%-14% מכלל החנקן בקומפוסטים וקצב הפרוק שלו היה 0.024 ליום. המאגר קשה הפרוק היה 80%-84% מכלל הפחמן ו- 86%-89% מכלל החנקן בקומפוסטים וקצב הפרוק שלו היה 0.00014 ליום. ההבדל העיקרי בין הקומפוסטים היה בסך תכולת הפחמן והחנקן האורגניים והחנקן המינרלי בהם. השתמשנו בפרמטרים הללו בעבודת הסימולציה שכללה גם את קליטת החנקן המדודה על ידי הצמחים, חישוב השפעת השינויים בטמפרטורות כפי שנמדדו בחממה, והשפעת הפרשת תומרים אורגניים על ידי הצמחים (קצב ההפרשה הוערך על פי עקום הגידול של הצמחים ונתונים מהספרות). כמויות החנקן המינרלי בקרקע שנחזו בסימולציות לטיפולים השונים היו בהתאמה טובה עם הכמות המדודה. לבסוף עשינו הרצות של המודל עבור תנאי שדה בניסוי שדה שנעשה בארץ ותוצאותיו פורסמו והערכנו את הכמות המינימלית של קומפוסט בוצה או בקר הדרושה לסיפוק תצרוכת החנקן של החיטה בקרקע החולית ללא דישון (17 ו - 20 טון לדונם, בהתאמה). ביישום של 6 טון לדונם קומפוסט בוצה או בקר לקרקע זו יהיה צורך להוסיף 20 או 23 ק"ג לדונם חנקן אנאורגני, בהתאמה.

מבוא

כתוצאה מהגדול המהיר באוכלוסיית ישראל, העלייה ברמת החיים והגברת המודעות לאיכות הסביבה גדלה מאוד כמות השפכים המטופלים ברמת טהור גבוהה. יחד עם זאת מתעוררת בעיית הצטברות בוצה במפעלי הטיהור, למשל השפ"דן מיצר מדי שנה כ- 6,000,000 מ"ק בוצה. הפתרון הכלכלי והסביבתי היעיל ביותר לבוצה הוא יישומה בשטחים חקלאיים. חיטה נראית כגדול מתאים הן לשימוש מעשי בבוצה והן לצורכי המחקר מהסיבות הבאות: גדול החיטה בדרום הארץ על שטח בהיקף גדול מאוד יחסית לישראל (450,000 דונם בנגב ועוד כ- 100,000 דונם באזור לכיש), זהו גדול שבו הפדיון השנתי ליחידת שטח הנו נמוך ולכן שימוש בתוצרי טהור שפכים כתחליף זול לדשן הוא מעניין, בעולם ובארץ קיים מידע רב על גדול החיטה וקליטת התנקן על ידי הגדול.

בארץ ובעולם נעשו ניסויים רבים ביישום בוצה בקרקע ובהשפעותיה על פוריות הקרקע, על גדולים חקלאיים ועל הסביבה (פיין וחוברין, 1996; פיין וחוברין, 1998; פלודה וחוברין, 1995; פלודה וחוברין, 1996; Fine et al, 1989). אולם תוצאות ניסויים אלו עדיין אינם מאפשרים חיזוי של השפעת השימוש לטווח ארוך בתוצרי טהור השפכים משום שהמערכות קרקע-צמח-אקלים ותוצרי השפכים הנם בעלי שונות טבעית גבוהה, המערכות הללו מורכבות מאוד והשפעות גורמים שונים נמצאים באינטראקציה זה עם זה. לכן ניתוח תוצאות כל ניסוי בנפרד מאפשר הבנה מוגבלת של המקרה הייחודי, אבל אינו מאפשר חיזוי כמותי לשם פתוח ממשק נכון לתנאים אחרים. ברשותנו מודל מחשב NCSOIL המחשב את תהליכי פרוק החומרים האורגניים והטרנספורמציות של התנקן בקרקע ומאפשר חיזוי כמותי של הדינמיקה של התנקן המינרלי בקרקע בהתאם לקבועי קצב הפרוק ותכונות החומר האורגני. יש צורך לקבוע את הפרמטרים של הקומפוסט בתנאים מבוקרים במעבדה ולבחון האם ניתן המודל מאפשר חיזוי של תהליכי הפרוק בקרקע בה גדלה חיטה.

מטרות המחקר: המטרה הכללית של תוכנית המחקר היא לפתח ממשק ארוך טווח לשימוש בבוצה ובשילוב השקית עזר וקולחים בגדול חיטה בדרום הארץ תוך שמירת איכות הסביבה. המטרות הייחודיות היו: א. לבחון את העומס האפשרי מבחינת התנקן המשתחרר מתוספת קומפוסט אורגני לקרקע בה גדלה חיטה ביישום חוזר במשך שלוש שנים ולבחון שיטות לחיזוי כמות החנקן שתשתחרר ב. לכייל את מודל הסימולציה NCSOIL לקומפוסטים שבהם השתמשנו, ג. לחזות בעזרת המודל את פרוק הקומפוסט ואספקת החנקן לחיטה בתנאי סביבה ותצורות חנקן ידועים.

שיטות העבודה

בניסוי נבדקו שני סוגי קומפוסט מבוצה ומבקר שהם שני מקורות חשובים של פסולת אורגנית להכנת קומפוסט. לפני תחילת העבודה יובש הקומפוסט ועבר אנליזות כימיות המוצגות בטבלה 1. הקרקע בה נערכו הניסויים היא קרקע חמרה חולית מאוד, מאזור נתניה המכילה: 4% חרסית, 2% סילט ו- 94% חול; pH בתמיסת העיסה הרוויה 7.5, 1.7% גיר, 5.6 מ"ג/ק"ג חומר אורגני (נקבע על ידי חימצון בדיכרומט), חנקן כללי 96 מ"ג/ק"ג נקבע לאחר עיכול בחומצה גופריתנית (H_2SO_4) ומי חמצן (H_2O_2), ונמדד בשיטה פתוח צבע במכשיר אוטומטי, אוטואנליזר (Lachat Instrument, Milwaukee, Wis.)

מדידות מינרליזציה של החומר האורגני בקרקע: מינרליזציה של הפחמן והחנקן האורגניים נלמדה בהדגרה של תערובות קרקע-קומפוסט בתנאי טמפרטורה קבועה של 30 מעלות צלזיוס. הניסוי כלל שלוש רמות קומפוסט, 3, 6 ו-12% מכל אחד משני הקומפוסטים (על בסיס משקל חומר יבש) וטיפול ביקורת של קרקע ללא קומפוסט, סך הכל שבעה טיפולים. כל טיפול נעשה בשתי חזרות, כל חזרה בצינצנת בנפח של 2 ליטר שלתוכה הוכנסה תערובת של 200 גרם קרקע עם הכמות המתאימה של קומפוסט. הקרקע הורטבה תחילה עם 10 מ"ל של מיצוי אדמת גינה כדי ליצור אוכלוסית מיקרואורגניזמים והורטבה במים מזוקקים לרטיבות של 70% מקיבול שדה. ערך קבול השדה נקבע קודם לכן על פי דוגמאות קרקע רוויות שהונחו למשך 48 שעות על גבי קרקע יבשה. הצינצנות כוסו בפוליאתילן מנוקב במחט כדי למנוע התייבשות מהירה ולאפשר חילוף גזים. פעמיים בשבוע הדוגמאות נשקלו והוספנו מים לשמירת תכולת הרטיבות של 70% מקיבול שדה. ההדגרה ברטיבות זו נמשכה 140 ימים, לאחר מכן הדוגמאות יובשו באויר במשך 30 ימים ושוב הורטבו להמשך הדגרה במשך 60 ימים נוספים. ריכוז החנקן המינרלי נקבע מספר פעמים בדגימות של 5 גרם קרקע בכל פעם. דגימת הקרקע מוצתה בתמיסת 1MKCl ביחס של 1 ל-5, קרקע לתמיסה. ריכוז האמון והחנקן במיצוי נקבע באוטואנלייזר. למדידת קצב הפליטה של דו תחמוצת הפחמן הוכנו מלכודות של תמיסת בסיס (1M NaOH), 4 מ"ל בכוס שהונחה מעל הקרקע ואז נסגרו הצנצנוצ הטיב למשך 48 שעות. שטח פני הכוס היה 13 סמ"ר בהשוואה ל 150 סמ"ר של פני הקרקע בצנצנת. תמיסת הבסיס טוטה לאחר מכן בחומצה כלורית בריכוז ידוע, 0.2M, ומהנפח שנמדד החסרנו את הכמות שנרשה להיקש ללא קרקע. קביעת החנקן והפחמן המינרלי נעשתה פעמיים בשבוע במשך השבועיים הראשונים, ואחר כך אחת לשבוע ולאחר 74 ימים אחת לחודש; לאחר תקופת הייבוש שוב נעשו מדידות פעמיים בשבוע. במשך השבועיים הראשונים של ההדגרה הצבנו בכל כלי מלכודת לאמוניה בכוס דומה לזו שתוארה עבור הדו תחמוצת הפחמן שהכילה חומצת מלח בריכוז XXX.

גידול חיטה במכלים: הניסוי נמשך שלוש שנים ובכל שנה הוספה מנת קומפוסט שווה לקרקע לפני זריעת החיטה. עם תחילת הניסוי בשנה הראשונה, מלאנו מכלי פלסטיק בנפח של 60 ליטר (רדיוס של 40 ס"מ, גובה 55 ס"מ) ב-80 ק"ג קרקע. השכבה העליונה בעומק 15 ס"מ עורבבה היטב עם כמות הקומפוסט בהתאם לטיפול מדי שנה. הטיפולים כללו את שני סוגי הקומפוסט, כל אחד בשלוש רמות 325, 650 ו-1300 גרם חומר יבש למכל שהם שווי ערך ל-3, 6 ו-12 קגמ"ר לשנה, בהתאמה. בסך הכל כמויות הקומפוסטים שהוספו במשך שלוש שנים היו 975, 1950 ו-3900 גרם חומר יבש למכל שהם שווי ערך ל-9, 18 ו-36 קגמ"ר, בהתאמה. בנוסף היו שני טיפולי הקש ללא קומפוסטים, אחד ללא דישון והשני עם הדישון המיטבי הידוע לנו. בתחילת כל שנה הקרקע הושקתה משך יומיים עד התחלת שטיפה מתחתית המכל. יום זה נקבע כזמן 0 לגידול, חיטה מזון "איילון" נזרעה במכלים בצפיפות של 100 נבטים למכל (800 למ"ר) בשנה הראשונה ו-60 נבטים למכל (480 למ"ר) בשנה השנייה והשלישית.

השקיה ודישון: בשנתיים הראשונות הצמחים הושקו ידנית במים מזוקקים. ההשקיה הראשונה בכל שנה היתה עד תחילת נקז בתחתית הכלי. מעקב אחר איבוד מים (אוופוטנספירציה) נעשה. עיי שקילה רצופה של אחד המכלים בטיפול מיטבי (היקש + דשן), השקיה נעשתה בהתאם לצורך לשמירת רטיבות של 25% בקרקע, הקרובה לתכולת המים בקיבול שדה ובאופן זה מנענו נקז בכל מהלך הגידול. הקרקע לא דושנה כלל במהלך העונה, לבד מטיפול ההיקש המדושן, שהושקה

במים מזוקקים עם דשן. תמיסת הדשן הכילה: 60 ח"מ חנקן כאמון, 17 ח"מ זרחן, 36 ח"מ אשלגן, 0.25 ח"מ ברזל, 0.1 ח"מ מנגן, 0.17 אבץ, 0.035 ח"מ נחושת ו-0.006 ח"מ מוליבדן. בשנה השלישית הוכנה מערכת השקיה בטיפטוף אוטומטית שכללה שלוש טפטפות 2 ליטרשעה למכל וההשקיה היתה במי ברז חוץ מטיפול ההיקש המדושן שהושקה בתמיסת הדישון בדומה לשנתיים הקודמות, אבל באמצעות משאבה ודרך מערכת הטיפטוף כמו שאר הטיפולים. בשנה זו הוסף לזימטר שקילה לחזרה אחת מכל טיפול, כך שניתן היה להתאים בצורה טובה יותר את ההשקיה לצריכת המים של כל טיפול.

דיגום קרקע וצמח: במהלך הניסוי בכל שנה ערכנו מספר דגימות קרקע (בכל אחד מהמכלים) לבדיקת חנקן, אשלגן וזרחן. דגימות קרקע נלקחו מ-3 עומקים: 0-15, 15-30, 30-55 ס"מ. בכל דיגום בדקנו את תכולת הרטיבות בקרקע ואת כמות החנקן המינרלי (במיצוי ב 1N KCl, 4 גרם קרקע ל-40 מ"ל תמיסה) וזרחן ואשלגן במיצוי OLSEN (3 M NaHCO_3 ב pH=8.5, 5 גרם קרקע ל-100 מ"ל תמיסה). גובה צמח ממוצע בכל מיכל נמדד לעיתים תכופות, עד פעם בשבוע. במהלך הגידול נערכו מספר קצירים שבכל אחד מהם נדגם מספר שווה של צמחים מכל מכל, ובתום הניסוי (150-140 ימים מזריעה) נקצרו כל הצמחים הנוותרים. בכל הקצירים נמדד המשקל היבש ונקבעה תכולת החנקן, זרחן ואשלגן בחומר הצמחי. בחישוב משקל הנוף, חובר התבן (מוצים, גלומות ושזרה) עם הקש. בקציר האחרון הופרדו הגרגרים מהשיבולים נשקלו ונקבע בהם ריכוז החנקן, אשלגן וזרחן ונקבע המשקל של 1000 גרגירים. טמפרטורת האוויר בחממה ובקרקע נמדדה באופן רציף.

תוצאות דיון

א. ייצור חומר יבש, יבול הגרגרים ואיכותם

כצפוי, טיפול ההיקש הבלתי-מדושן הניב רמת יבול נמוכה ביותר בשלושת השנים (טבלה 1). הקומפוסטים שיפרו את ייצור החומר היבש ויבול הגרגרים באופן דומה עם יתרון קל לקומפוסט הבוצה. ככל שרמת הקומפוסט היתה גבוהה יותר ייצור החומר היבש בנוף ויבול הגרעינים היה גבוה יותר. בשנתיים הראשונות ייצור החומר היבש בנוף ויבול הגרעינים בטיפול ההיקש המדושן היה גבוה באופן ניכר מאשר בטיפול הקומפוסט המיטביים ואילו בשנה השלישית לא היה הבדל בינו לבינו (טבלה 1). הסיבה להבדל בתגובה בין השנתיים הראשונות לשנה השלישית נובעת כנראה מעיכוב של שלושה שבועות בהתחלת הדישון בהיקש המדושן בשנה השלישית. ההבדלים בין רמות הקומפוסט החלו כ-48 עד 60 ימים לאחר הנביטה, כפי שמצאנו לפי עקומי ייצור החומר היבש וגובה הצמחים (איורים 1 ו-2). הטיפולים השפיעו גם על גודל הגרעינים כפי שהתבטא במשקל האלף, בכל השנים בטיפול ההקש משקל הגרעינים היה קטן מאוד ביחס לשאר הטיפולים אולם ההבדל במדד זה בין טיפולי הקומפוסט היה קטן מאשר ביבול הגרעינים. כמות יסודות ההזנה בקרקע בעומסי הקומפוסט הנמוכים הספיקה ל-30 יום בערך, ולאחר פרק זמן זה החלו להתבלט הבדלים בצימוח בין הטיפולים.

ב. קליטת חנקן, זרחן ואשלגן בצמחים:

ריכוזי חנקן, זרחן ואשלגן בנוף צמחי החיטה בתום הגידול בכל שנה מוצגים בטבלה 2. בכל שלושת השנים ריכוזי החנקן בנוף (ללא גרעינים) בסוף הגידול בכל טיפולי הקומפוסט היו בתחום של 0.22%-0.38% ואילו בטיפול ההקש המדושן הריכוז בנוף היה גבוה יחסית, כ-0.66%-0.84%.

מענין שריכוז החנקן בנוף בהקש ללא דישון היה דומה או גבוה מאשר בטיפול הקומפוסט. באופן דומה העליה בריכוז החנקן בגרעינים אם העליה בכמות הקומפוסט היתה קטנה ולא תמיד מובהקת לעומת התגובה החזקה ביבול, ואילו בטיפול ההקש המדושן הריכוז בגרעינים היה גבוה באופן משמעותי ומובהק משאר הטיפולים, -2.78% ל 3.54% לעומת 1.15% ל 2.49% , בהתאמה. יש לציין שריכוז החנקן בגרעינים בטיפול הקומפוסט הלכו ועלו מהשנה הראשונה לשנה השלישית. ריכוזי הזרחן בנוף הצמחים בטיפול המדושן בשנתיים הראשונות היו דומים לטיפול הקומפוסט, ואילו בשנה השלישית ריכוזי הזרחן בנוף בטיפול זה היה כמחצית מזה של טיפולי הקומפוסט המירביים, 0.13 לעומת 0.25 ל 0.29% בהתאמה. ריכוזי הזרחן בנוף הצמחים בטיפול המדושן בשנתיים הראשונות היו דומים לטיפול הקומפוסט, ואילו בשנה השלישית ריכוזי הזרחן בנוף בטיפול זה היה כמחצית מזה של טיפולי הקומפוסט המירביים, 0.13 לעומת 0.25 ל 0.29% בהתאמה. בשנה זו גם התקבלה עליה בריכוזי הזרחן בנוף ובגרעינים עם העליה בכמות הקומפוסט. לעומת זאת ריכוזי הזרחן בגרעינים בטיפול ההקש המדושן היה גבוה מאשר בשאר הטיפולים. ריכוזי האשלגן בנוף עלה באופן ניכר ומובהק עם העליה בכמות הקומפוסט ובטיפולים המירביים היה גבוה מאשר בהקש המדושן. בשנתיים הראשונות ריכוזי האשלגן בנוף בטיפול קומפוסט הבוצה היו גבוהים מאשר בטיפול קומפוסט הבקר. ההבדלים בין הטיפולים בריכוזי האשלגן בגרעינים היו קטנים מאשר בנוף ובדומה לזרחן הריכוז בטיפול המדושן היה גבוה מאשר בטיפול הקומפוסט.

בטבלה 4 מוצגות כמויות חומרי ההזנה שהוספו לקרקע והכמויות שהצטברו בנוף וגרעיני הצמחים. כמות החנקן שנקלטה ע"י הצמחים בכל הטיפולים הייתה גדולה מכמות החנקן המינרלי שהוספה עם הקומפוסטים השונים אך היא הייתה זעומה בהשוואה לכלל תוספת החנקן. כמות החנקן שנקלטה עלתה עם העליה במנת הקומפוסט באופן דומה בשני סוגי הקומפוסט מ-12 ל-15 ק"ג/דונם עד 33.2 ל 37.6 ק"ג/דונם בשנה השלישית. בכל טיפול קומפוסט היתה עליה בכמות שנקלטה עם השנים, כך שבשנה השלישית הכמות המירבית שנקלטה בטיפול קומפוסט בוצה הגבוהה היתה 37.6 ק"ג/דונם לעומת 19.6 ק"ג/דונם בשנה הראשונה. כמות החנקן שנקלטה בטיפול ההקש המדושן היתה גבוהה ביותר מפי שתיים מאשר בטיפול הקומפוסט המירביים בשנתיים הראשונות, אך בשנה השלישית הפער צומצם.

בדומה לחנקן קליטת הזרחן הייתה פחותה בהרבה מהכמות הכללית של זרחן שהוספה. באופן דומה לחנקן, עליה במנת הקומפוסט הגדילה את כמות הזרחן שנקלטה. עודף זמינות זרחן עלול להיות תופעה בולטת בקרקעות מטופלות בבוצה ובזבלים אולם יש לבחון את השינויים בזמינות (ולא רק בכמות) לאורך זמן. כמויות האשלגן שנקלטו ע"י הצמחים בכל אחד מהטיפולים הייתה גבוהה באופן משמעותי מהכמות שיושמה עם הקומפוסטים, והייתה עליה ניכרת בכמות שנקלטה בשנה השלישית לעומת הראשונה והשנייה. בהקש המדושן הכמות שנקלטה בשנתיים הראשונות היתה גבוהה בהרבה מאשר בטיפול הקומפוסט המירביים, אך בשנה השלישית היא הייתה נמוכה יותר.

קליטת האשלגן עלתה באופן ניכר ומובהק עם העליה במנת הקומפוסט באופן דומה בשני הקומפוסטים. בדומה לחנקן והזרחן הכמות הכללית שנקלטה בשנה השלישית היתה גבוהה מאשר בשנה השנייה (חסרים נתונים לשנה הראשונה). ברור כי האשלגן נקלט בעיקר מהקרקע עצמה, כך שהקומפוסטים לא סיפקו די אשלגן, בכל עומס יישום קומפוסט. בדומה לזרחן סך קליטת האשלגן בהיקש בטיפול השנה השלישית היה נמוך מאשר בשנה השנייה ומאשר בטיפול

קליטת האשלגן בהיקש בטיפול השנה השלישית היה נמוך מאשר בשנה השניה ומאשר בטיפול הקומפוסט המירביים. בשנה השלישית כמות הדשן האשלגני שסופקה בהיקש המדושן היתה גבוהה מזו שנקלטה על ידי הצמחים בטיפול זה.

תוצאות אלו מצביעות על כך שהגורם מגביל הצמיחה והיבול היה זמינות החנקן משום שקליטת זרחן ואשלגן בטיפול הקומפוסט המירביים עלתה על זו שבהיקש המדושן.

ג. חנקן, זרחן ואשלגן בקרקע

בכל שלושת השנים ריכוז החנקן המינרלי בתחילת העונה בשכבת הקרקע העליונה גדול יותר ככל שמנת הקומפוסט גבוהה יותר, וגדול יותר בקומפוסט בוצה מאשר בקומפוסט בקר (איור 3). בתחילת העונה של השנה הראשונה ההיקש המדושן היה כמו ההקש ללא דישון אך בשנה השניה והשלישית הריכוז ההתחלתי היה גבוה כתוצאה מהדישון בשנה הקודמת. בשנה השניה והשלישית אנו רואים שבטיפול הקומפוסט בתחילת העונה יור ריכוז החנקן המינרלי הקרקעי בעיקר בשכבת הקרקע העליונה של השכבה, אך בהמשך לקראת סוף העונה, ריכוז החנקן בשכבה העליונה הלך וגדל ככל שכמות הקומפוסט המוסף גדלה, בעוד שבטיפול ההיקש ריכוז החנקן נשאר קבוע ואילו בטיפול המדושן הייתה ירידה לרמה דומה לזו שבטיפול הקומפוסט הגבוהים. בטיפול הקומפוסט נוצר פער גדול בין השכבה העליונה לתחתונה בעוד שבטיפול הדישון הפער הלך והצטמצם עם הזמן. תוצאות אלו מצביעות על כך שבטיפול הקומפוסט החנקן המינרלי הזמין לצמחים נוצר בתקופה מאוחרת יחסית וזה כנראה ההסבר לקליטה המעטה על ידי הצמחים יחסית לטיפול היקש+דשן. בטיפול ההיקש+דשן חנקן מהשכבה העליונה נקלט בחלקו על ידי הצמחים ובחלקו נע לעומק הקרקע.

ריכוז הזרחן בחתך הקרקע בטיפולים השונים בתום הניסוי ב 1999 ובמהלך שנת 2001 מוצג באיור 4. בכל הטיפולים ריכוז הזרחן הגבוה ביותר היה בשכבת הקרקע העליונה. ריכוז הזרחן עלה עם הגדלת מנת הקומפוסט, והיה גבוה בקומפוסט בקר מאשר בקומפוסט בוצה. ריכוז הזרחן בהיקש המדושן היה נמוך בהרבה מאשר בטיפול במנת הקומפוסט הנמוכה ביותר. בניגוד לחנקן המינרלי לא נמצאו שינויים ניכרים בריכוז הזרחן הניתן למיצוי בחתך הקרקע במהלך העונה. השימוש בקומפוסט עלול לגרום להצטברות כמות גדולה של זרחן בקרקע.

ריכוז האשלגן בחתך הקרקע בטיפולים השונים בתום הניסוי ב 1999 ובמהלך שנת 2001 מוצג באיור 5. בכל הטיפולים ריכוז האשלגן הגבוה ביותר היה בשכבת הקרקע העליונה. ריכוז האשלגן עלה עם הגדלת מנת הקומפוסט, והיה גבוה בקומפוסט הבוצה מאשר בקומפוסט הבקר. במהלך שנת 2001 ביתה ירידה בריכוז האשלגן בעיקר בשכבה העליונה, שם כנראה היה עיקר הקליטה על ידי הצמחים. ריכוז האשלגן בהיקש המדושן בתום הניסוי ב 1999 היה נמוך מאשר בטיפול במנת הקומפוסט הנמוכה ביותר, אולם במהלך שנת 2001 הוא עלה בשכבה העליונה לרמה דומה לזו של המנה הגבוהה של קומפוסט בקר. השימוש בקומפוסט מעשיר הקרקע באשלגן יחסית לדישון מינרלי.

ד. מאזן חנקן ואומדן המינרליזציה של החנקן האורגני בקרקע:

מאזן מפורט של חנקן בניסוי מוצג בטבלה 5. הנתונים כוללים כמויות חנקן מינרלי שהוסף לקרקע, כמות המצויה בחתך הקרקע בתחילת העונה ובסופה, והכמות המצויה בנוף של צמחי החיטה והערכה של הכמות שהצטברה בשורשים. בשנת הגידול הראשונה, החנקן המינרלי, שהוסף בתחילת העונה עם הקומפוסט, תרם עד 70% מהכמות שנמצאה בצמחים. אולם בשנה השניה והשלישית תרומת החנקן המינרלי מהקומפוסט היתה פחות ממחצית הכמות שנקלטה על

ידי הצמחים. בהיקש ללא-דשן, סך כל החנקן בצמחים היה זניח בהשוואה לטיפולים האחרים. ובצמחי הטיפול המדושן, כמות החנקן בנוף הייתה הגבוהה ביותר מבין כל הטיפולים בניסוי כתוצאה מהריכוז הגבוה בצמחים והיבול הצמחי הגבוה. יעילות הקליטה בצמחי הטיפול המדושן הייתה גבוהה מאד, סה"כ כ-86% מחנקן הדשן נמצא בנוף של הצמחים. ניתן לייחס את כמות החנקן החסרה לחנקן בשורשים הואיל ו-(1) כמויות החנקן בקרקע בטיפול זה, בתחילת העונה ובסופה, היו דומות (טבלה 5), (2) ההשקיה הייתה ללא נקז, ו(3) ניתן להניח כי לא היו איבודי חנקן באימוביליזציה עם חומר אורגני בקרקע (החומר האורגני בקרקע היה זניח), בנידוף אמוני או בדניטריפיקציה. בפועל, כמות החנקן בשורשים יכלה להיות גדולה יותר, ממינרליזציה של השורשים של העונה הקודמת, שלא נלקחה בחשבון.

המינרליזציה של החנקן האורגני בקרקע נאמדה לפי החנקן המדוד בנוף הצמחים והכמויות שנמדדו בקרקע ובקומפוסטים. המרכיב שהיה חסר במאזן הוא החנקן בשורשים. הנחנו כי ריכוז החנקן בשורש הוא 86% מאשר בנוף וכמות החומר היבש בנוף היא 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.8 מהנוף כאשר גיל הצמח 0-20, 20-40, 40-60, 60-100, ו-100 עד הקציר, בהתאמה. ההפרש בין סך הכל קליטת חנקן בצמחים לכמות החנקן שהוספה לקרקע ובתוספת ההפרש בין כמות החנקן המינרלי בתחילת ובסוף העונה מייצג את החנקן שעבר מינרליזציה (טבלה 5). ככל שעלתה כמות הקומפוסט שהוסף עלתה המינרליזציה, כאשר הכמויות המוחלטות בשנים השניה והשלישית היו דומות וגבוהות באופן ניכר מאשר בשנה הראשונה. אפשר להעריך שהקומפוסט המוסף מדי שנה תורם את החלק הארי של החנקן שעבר מינרליזציה והשאר ניתרם מהשארית האורגנית מהשנה הקודמת. בקרקע שעבדנו בה תרומת החומר האורגני למינרליזציה של החנקן היתה קטנה מאד ובהקש המדושן היתה אימוביליזציה.

פרוק חומר אורגני בשכבת הקרקע העליונה נמדד לפי השינוי בתכולת החומר האורגני בסוף העונה לעומת תחילתה (טבלה 6). בדומה למינרליזציה של החנקן ככל שמנת הקומפוסט היתה גדולה יותר השינוי בכמות החומר האורגני היתה גדולה יותר.

ה. ניסוי הדגרה של הקומפוסטים

עקומי המינרליזציה של פחמן וחנקן משני הקומפוסטים היו דומים (איור 6). במשך חמישים הימים הראשונים קצב פליטת דו תחמוצת הפחמן היה גבוה מאד עם שיא של 66, 61 ו-40 מ"ג/ק"ג פחמן ליום עבור קומפוסט בוצה בריכוז של 12, 6, ו-3%, בהתאמה ו-18, 15 ו-15 מ"ג/ק"ג פחמן ליום עבור קומפוסט זבל בקר. סך הכל הפסד הפחמן מקומפוסט הבוצה ומזבל הבקר היה 10% ו-6%, בהתאמה. באותו זמן נמדד רק שינוי קטן בריכוז החנקן המינרלי בקרקע ואפילו ירידה קלה בקומפוסט הבוצה. לאחר תקופה זו פליטת דו תחמוצת הפחמן היה נמוך מאד ויצבי, בעוד שריכוז החנקן המינרלי עלה באופן קבוע עד הפסקת ההדגרה וביום ה-140 הגיע ריכוז החנקן המינרלי ל-362, 168 ו-71 מ"ג/ק"ג לקומפוסט בוצה (12%, 6%, 3%, בהתאמה) ו-237, 143 ו-35 מ"ג/ק"ג לקומפוסט בקר (12%, 6%, 3%, בהתאמה). לבסוף סך המינרליזציה של חנקן מקומפוסט בוצה היה שווה לכמות ההתחלתית של חנקן מינרלי שהיה בו, ובקומפוסט זבל בקר היתה תוספת של 20% מעל ההתחלתית.

לאחר חודש של ייבוש אויר בהמשך ההדגרה התקבל גל של פליטת דו תחמוצת הפחמן, ששיאו כמחצית מהגל הראשון ולמשך זמן קצר יותר (איור 6). באותו זמן קצב המינרליזציה של החנקן ירד, אך לאחר שקצב פליטת דו תחמוצת הפחמן התייצב בערך נמוך חזר קצב המינרליזציה של החנקן לרמתו קודם הייבוש.

ז. אופטימיזציה של קבועי הקומפוסטים

מאופי עקומי המינרליזציה הסקנו שניתן לחלק את מאגר הקומפוסט לשני מרכיבים, קל וקשה פרוק. תוצאות הסימולציה של תוצאות ההדגרה עם קבועי הקומפוסטים שנקבעו בתוכנית אופטימיזציה מוצגות באיור 6 בעוד שהקבועים מוצגים בטבלה 7. לשני הקומפוסטים מאפיינים דומים: המרכיב קל הפרוק מהווה 16-20% מהפחמן האורגני, יחס הפחמן/חנקן שלו גבוה בהרבה משל המרכיב קשה הפרוק, קבועי קצב הפרוק מאוד דומים, 0.024 ליום לקל הפרוק של שני הקומפוסטים ו-0.00012 ו-0.00014 ליום למרכיב קשה הפרוק של קומפוסט בוצה וזבל בקר, בהתאמה. קבועי הקצב של המרכיב קל הפרוק נקבעו לפי ניסוי ההדגרה לזמן קצר יחסית, איור 1, ואילו של המרכיב קשה הפרוק לפי ניסוי הדגרה לזמן ארוך יותר (איור 7). עיקר ההבדל בין הקומפוסטים הוא בכמות הכללית של פחמן ויחס הפחמן/חנקן בכל מרכיב שלו. כדי לתזות את אפקט הייבוש וההרטבה על המינרליזציה הנחנו שבתהליך זה חלק קטן מהמרכיב קשה הפרוק בחומר האורגני הופך לקל פרוק, ומצאנו בעזרת תוכנית האופטימיזציה שהשינוי חל ב-1.4% ו-1.6% בקומפוסט זבל בקר וקומפוסט בוצה בהתאמה.

ז. סימולציה של טרנספורמציות פחמן-חנקן בקרקע NCSOIL

הסימולציה של השינוי בכמות החנקן המינרלי הממוצע בקרקע ושל המינרליזציה של חנקן אורגני בהתאם לסוג וכמות הקומפוסט מוצגת באיור 8, יחד עם התוצאות המדודות מהמכלים של החנקן המינרלי במכלים וקליטת חנקן על ידי הצמחים בשנת 2001. יש לציין שקליטת החנקן במנות הקומפוסט הגבוהות נמשכה עד סוף עונת הגידול, בעוד שבמנה הבינונית ובמנוכה הקליטה כמעט פסקה אחרי 30 עד 50 ימים. באופן דומה הירידה בריכוז החנקן המינרלי בקרקע במנה הגבוהה נמשכה עד 120 ימים ואילו במנות הנמוכות רק 30 עד 50 ימים שלאחריהם היתה התיצבות. המינרליזציה נטו של חנקן היתה בתחילת העונה קטנה או שלילית, ורק מאמצע העונה החלה המינרליזציה של חנקן אורגני לתרום לשמירה ואף עליה בריכוז החנקן המינרלי בקרקע. ההתאמה בין התוצאות החזויות והמדודות טובה, והמודל חוזה היטב את מגמת השינויים בכמות החנקן המינרלי. ההתאמה הטובה בחיזוי התקבלה הודות לכך שלקחנו במודל בשבון את ההפרשה של חומרים אורגנים על ידי השורשים שגרמו לאימוביליזציה של חנקן ולפחיתת המינרליזציה נטו. השפעת הפרשות השורשים על החיזוי מוצגת עבור מנת הקומפוסט הגבוהה באיור 9. גורם נוסף שנלקח בחשבון במודל הוא הטמפרטורה. בסימולציה שהצגנו הנחנו פקטור של 1.67 לכל 10 מעלות לעומת הפקטור המקובל 2.0. באיור 9 מוצגת השפעת ערך פקטור זה על תוצאות הסימולציה ומוכח שללא השימוש בפקטור, כלומר ערך 1.0, יגרום לסטייה גדולה מאוד בתוצאות הסימולציה והשיפור בסימולציה בין 1.67 ל 2.0 הוא קטן.

כדי להרחיב היישום של החיזוי בעזרת המודל NCSOIL השתמשנו בתוצאות מניסוי של כפכפי והלוי (1974) מהחלקות הקבועות בבית-דגן. נתונים נתוני מהלך הקליטה של חנקן על ידי חיטה בטיפול הדישון המיטבי (כ-35 ק"ג/דונם שנקלטו במשך 100 הימים הראשונים לגידול), ונתונים תנאי האקלים. הרצנו את המודל עבור שני הקומפוסטים בקרקע חקלאית ובקרקע חול שבה נעשה ניסוי המכלים, כאשר נעשו שתי הרצות: באחת בחנו מה כמות הקומפוסט המינימלית הנדרשת לאספקת החנקן המינרלי ובשניה קבענו מנת קומפוסט של 6 טון לדונם והרצנו עד שחסר היה חנקן, השלמנו כמות חנקן מינרלי והמשכנו בהרצה עד שהחנקן המינרלי נגמר ושוב היה צריך להוסיף מנת חנקן מינרלי. מנת הקומפוסט המינימלית שהיתה דרושה ללא תוספת חנקן מינרלי היתה 17 טון/דונם קומפוסט בוצה או 20 טון/דונם קומפוסט זבל בקר, שתיהן כמויות גדולות

מאוד שיגרמו לשארית חנקן מינרלי גדולה מאוד בסיום העונה (איור 10). בהרצה של כמות קומפוסט סבירה יותר, 6 טון/דונם, במקרה של קומפוסט בוצה היה צורך להוסיף 12 או 20 ק"ג חנקן מינרלי לדונם בקרקע חקלאית או חול בהתאמה, במקרה של קומפוסט זבל בקר היה צורך להוסיף 13 או 23 ק"ג חנקן מינרלי לדונם בקרקע חקלאית או חול בהתאמה.

סיכום

למעשה כמות החנקן שנקלטה על ידי הצמחים היתה דומה לכמות החנקן המינרלי שהיתה בקרקע ובקומפוסט המוסף. לסיכום, בעומסי הקומפוסט שנבדקו, עד 24 טון/דונם בשתי עונות, חנקן היה גורם מגביל להתפתחות הצמחים ולא נוצר עודף בשום מקרה. מצאנו בעזרת המודל NCSOIL את קבועי קצב הפרוק של הקומפוסט ושל החומר האורגני הקרקעי. מצאנו שאפשר לאפיין את הקומפוסטים כמורכבים משני מאגרים (POOLS), קל וקשה פרוק. המאגר קל הפרוק היה 16-20% מכלל הפחמן ו-11-14% מכלל החנקן בקומפוסטים וקצב הפרוק שלו היה 0.024 ליום. המאגר קשה הפרוק היה 80-84% מכלל הפחמן ו-86-89% מכלל החנקן בקומפוסטים וקצב הפרוק שלו היה 0.00014 ליום. ההבדל העיקרי בין הקומפוסטים היה בסך תכולת הפחמן והחנקן האורגניים והחנקן המינרלי בהם. השתמשנו בפרמטרים הללו בעבודת הסימולציה שכללה גם את קליטת החנקן המדודה על ידי הצמחים, חישוב השפעת השינויים בטמפרטורות כפי שנמדדו בחממה, והשפעת הפרשת חומרים אורגנים על ידי הצמחים (קצב ההפרשה הוערך על פי עקום הגידול של הצמחים ונתונים מהספרות). כמויות החנקן המינרלי בקרקע שנחזו בסימולציות לטיפולים השונים היו בהתאמה טובה עם הכמות המדודה. בהרצות של המודל עבור תנאי ניסוי שדה שנעשה בארץ ותוצאותיו פורסמו, הערכנו את הכמות המינימלית של קומפוסט בוצה או בקר הדרושה לסיפוק תצרוכת החנקן של החיטה בקרקע החולית ללא דישון (17 ו-20 טון לדונם, בהתאמה). ביישום של 6 טון לדונם קומפוסט בוצה או בקר לקרקע זו יהיה צורך להוסיף 20 או 23 ק"ג לדונם חנקן אנאורגני, בהתאמה.

רשימת ספרות

- כפכפי, ע., י. הלוי. 1974. קצב גידול וקליטת חנקן על ידי חיטה מנונסת למחצה שגודלה ברמות חנקן וזרחן שונות בקרקע, השדה 55: 360-367.
- פיין, פ., ע. בנין וז. גרסטל. 1996. סילוק בוצה עירונית בקרקעות חקלאיות: אפיון הרכב הבוצות כבסיס להערכת אפשרות השימוש בהן לחקלאות. דו"ח שנתי מוגש למדען הראשי, המשרד לאיכות הסביבה.
- פיין, פ., א. ירמיהו, א. הדס, ז. גרסטל, ו. סולפנט, ד. פלודה, ר. רוזנברג, א. גרוה, ע. גיפס, נ. אלקנה, א. צוקרמן. 1998. הערכת סיכונים ביישום וסילוק בוצת שפכים. דו"ח מדעי לשנת 1997 מוגש ל"מקורות".
- פלודה, ד', ד' לבנון, מ' זאבי, ופ' פיין. 1995. יישום קומפוסטים ממקורות שונים בגידול תפ"א אורגאניים. השדה ע"ה: 35-39, 94.
- פלודה, ד', פ' פיין, ז' גרסטל, ח' פרנקל וד' לבנון. 1996. פתוח קומפוסט מבוצה ממתקני טיהור שפכים והתאמתו לשימוש בחקלאות. דו"ח למדען הראשי במשרד החקלאות. הוצ' מו"פ צפון, מינהל המחקר החקלאי, קרית שמונה.
- Fine, P., U. Mingelgrin, and A. Feigin. 1989. Incubation studies on the fate of organic nitrogen in soils amended with activated sludge. Soil Sci. Soc. Am. J. 53:444-450.

סיכום עם שאלות מנחות

1. **מטרות המחקר:** המטרה הכללית של תוכנית המחקר היא לפתח ממשק ארוך טווח. לשימוש בבוצה בגדול חיטה תוך שמירת איכות הסביבה. המטרות הייחודיות היו: א. לבחון את העומס האפשרי מבחינת החנקן המשתחרר מתוספת קומפוסט אורגני לקרקע בה גדלה חיטה ביישום חוזר במשך שלוש שנים ולבחון שיטות לחיזוי כמות החנקן שתשתחרר ב. לכייל את מודל הסימולציה NCSOIL לקומפוסטים שבהם השתמשנו, ג. לחזות בעזרת המודל את פרוק הקומפוסט ואספקת החנקן לחיטה בתנאי סביבה ותצרוכת חנקן ידועים.
2. **עיקרי הניסויים והתוצאות:** ניסוי מכלים בחממה - חיטה נזרעה במכלים בנפח 60 ליטר, בקרקע חמרה חול סיני. בקרקע ייושמו שני סוגי קומפוסטים: מבוצה ומזבל בקר בשלוש רמות (שוות ערך ל - 3, 6, 12 טון חומר יבש לדונם). ניסוי הדגרה - פרוק הקומפוסטים בקרקע נלמד בתנאים מבוקרים במעבדה, ומקדמי המינרליזציה של הקומפוסטים נקבעו בעזרת המודל NCSOIL. תוצאות: יכול הנוף והגרעינים עלו ככל שעלתה רמת הקומפוסט (מ 0.1 ו - 0.02 טון לדונם בהתאמה בטיפול ההיקש ל - 2.3 ו - 0.89 טון לדונם ברמת הקומפוסט הגדולה ביותר). בשנתיים הראשונות היבול בטיפול הקומפוסט המרבי היה כחצי מאשר בטיפול המדושן ללא קומפוסט, אך בשנה השלישית השתנו היבולים בטיפולים אלו. סך קליטת החנקן עלה עם העלייה בכמות הקומפוסט המוספת. בשנתיים הראשונות קליטת החנקן בטיפול המדושן היתה גבוהה פי ארבעה מאשר בעומס הקומפוסט המרבי, ובשנה השלישית ב - 50% בלבד. ריכוזי הזרחן והאשלגן בנוף ובגרעינים בטיפולי הקומפוסט הגבוהים עלו על אלה שבטיפול המדושן. קבענו בעזרת המודל NCSOIL את קבועי קצב הפרוק של הקומפוסט ושל החומר האורגני הקרקעי. מצאנו שאפשר לאפיין את הקומפוסטים כמורכבים משני מאגרים, קל וקשה פרוק. המאגר קל הפרוק היה 16%-20% מכלל הפחמן ו - 11%-14% מכלל החנקן בקומפוסטים וקצב הפרוק שלו היה 0.024 ליום, וקצב הפרוק של המאגר קשה הפרוק היה 0.00014 ליום.
3. **המסקנות המדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו:** כמות החנקן שנקלטה על ידי הצמחים הייתה בקרוב טוב למוערך על פי ניסוי אינקובציה במעבדה. בעומסי הקומפוסט שנבדקו, עד 24 טון לדונם בשתי עונות, חנקן היה גורם מגביל להתפתחות הצמחים ולא נוצר עודף בשום מקרה. ההבדל העיקרי בין הקומפוסטים היה בסך תכולת הפחמן והחנקן האורגניים והחנקן המינרלי בהם. כמויות החנקן המינרלי בקרקע שנחזו בסימולציות לחיטה בקרקע בטיפולים השונים היו בהתאמה טובה עם הכמות המדודה. בהרצות של המודל עבור תנאי שדה בניסוי שדה שנעשה בארץ ותוצאותיו פורסמו מצאנו שהכמות המינימלית של קומפוסט בוצה או בקר הדרושה לסיפוק תצרוכת החנקן של החיטה בקרקע החולית ללא דישון היא 17 ו - 20 טון לדונם, בהתאמה. ביישום של 6 טון לדונם קומפוסט בוצה או בקר לקרקע זו יהיה צורך להוסיף 20 או 23 ק"ג לדונם חנקן מינרלי, בהתאמה.
4. **הבעיות שנתרנו לפתרון ואו השינויים במהלך העבודה, התיחסות המשך המחקר לגביהן:** חסרה שיטה מהירה לאיפיון המאגרים השונים בקומפוסט ומקדמי קצב הפרוק שלהם.

יש לבחון את מודל פרוק החומר האורגני NCSOIL במסגרת מודל חיזוי קרקע, מים, צמח מקיף.

יש לבחון שילוב של תהליכים כימיים שאינם מיקרוביאליים ומשפיעים על תהליכי הטרינספורמציה של החנקן והזרחן במודל.

5. הפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח:

בנוסף לדו"חות השנתיים וההרצאה ביום העיון השנתי שעורך המדען הראשי תוצאות העבודה הוצגו בהרצאה בכנס השנתי של האגודה לקרקע ומים בשנת 2001, ביום עיון של משתלמים מצרפת בישראל שגרירות צרפת בישראל ב-2001, ויוצגו בסמינר המכון למדעי הקרקע באפריל 2002.

מאמר לעיתונות מקצועית בינלאומית נמצא בשלבים סופיים של עריכה:

Beraud, J. Bar-Tal, A., Fine, P., Keinan, M., Rosenberg, R. and Hadas Aviva. (2002) Modeling carbon and nitrogen transformations for adjusting compost application with N consumption by wheat. Soil Biol. and Biochem. (submitted)

טבלה 1. הרכב כימי של קומפוסט בוצה ושל קומפוסט בקר.

	SSC	CMC
pH (H ₂ O 1:5)	7.6	7.5
EC (dS m ⁻¹ H ₂ O 1:5)	8.9	4.6
OM (g kg ⁻¹)	363	234
Organic C (g kg ⁻¹)	219	141
Total N (g kg ⁻¹)	18.1	15.2
Total P (g kg ⁻¹)	15.1	11.4
NH ₄ -N (mg kg ⁻¹)	1515	0
NO ₃ -N (mg kg ⁻¹)	103	1193
N in hot water (g kg ⁻¹)	4.37	0.30
N in cold water (g kg ⁻¹)	2.13	0.06
CaCO ₃ (g kg ⁻¹)	90	95

טבלה 2. יבול נוף וגרעינים סופי

א. שנת גידול ראשונה - 1998

טיפול	יבול נוף	יבול גרעינים	"משקל האלף"
	טון לדונם		גרם
בוצה 3	1.01	0.26 de	37.5 b
בוצה 6	1.52	0.44 cd	45.3 a
בוצה 12	2.84	0.78 b	45.5 a
בקר 3	0.82	0.15 e	36.8 b
בקר 6	1.24	0.33 d	41.2 ab
בקר 12	2.03	0.57 c	43.4 a
היקש לא מדושן	0.44	0.02 f	25.1 c
היקש מדושן	3.25	1.17 a	45.7 a

ב. שנת גידול שניה - 1999

טיפול	יבול נוף	יבול גרעינים	מס' שיבולים במיכל	"משקל האלף"
	טון לדונם			גרם
בוצה 3	0.8	0.25 cd	38 c	48 bc
בוצה 6	1.3 c	0.42 c	42 b	50 bc
בוצה 12	2.3 b	0.89 b	48 b	53ab
בקר 3	0.7 d	0.19 cd	36 c	45 c
בקר 6	1.1 c	0.34 c	37 c	48 bc
בקר 12	2.2 b	0.77 b	47 b	51 ab
היקש לא מדושן	0.1 e	0.02 d	37 c	19 d
היקש מדושן	4.5 a	1.90 a	104 a	56 a

ג. שנת גידול שלישית - 2001

טיפול	יבול נוף	יבול גרעינים	מס' שיבולים במיכל	"משקל האלף"
	טון לדונם			גרם
בוצה 3	0.71 b	0.41 b	24.5 b	47.4 b
בוצה 6	0.74 b	0.47 b	22.3 b	49.1 ab
בוצה 12	1.78 a	1.07 a	41.2 a	51.0 a
בקר 3	0.61 b	0.37 b	21.2 b	46.1 b
בקר 6	0.69 b	0.43 b	20.8 b	52.3 a
בקר 12	1.63 a	1.02 a	39.7 a	52.5 a
היקש לא מדושן	0.22 c	0.06 c	25.5 b	27.5 c
היקש מדושן	1.68 a	1.07 a	42.4 a	44.9 b

טבלה 3: ריכוזי חנקן, זרחן ואשלגן בנוף ובגרעינים בתום הגידול.

א. שנת גידול ראשונה - 1998

טיפול	נוף			גרעינים	
	חנקן	זרחן	אשלגן	חנקן	זרחן
	% ממשקל יבש			% ממשקל יבש	
בוצה 3	0.26 b	0.13 b	1.34 bc	1.15 d	0.36 b
בוצה 6	0.27 b	0.24 a	1.60 b	1.29 c	0.34 b
בוצה 12	0.27 b	0.23 a	2.05 a	1.34 c	0.34 b
בקר 3	0.27 b	0.10 b	0.98 c	1.14 d	0.32 b
בקר 6	0.22 b	0.10 b	1.44 b	1.05 d	0.31 b
בקר 12	0.29 b	0.13 b	1.74 ab	1.18 d	0.33 b
היקש לא מדושן	0.25 b	0.01 c	0.68 c	1.69 b	0.23 c
היקש מדושן	0.66 a	0.11 b	1.34 bc	2.93 a	0.44 a

ב. שנת גידול שניה - 1999

טיפול	נוף			גרעינים	
	חנקן	זרחן	אשלגן	חנקן	זרחן
	% ממשקל יבש			% ממשקל יבש	
בוצה 3	0.34 b	0.19 a	2.5 ab	1.68 c	0.35 bc
בוצה 6	0.34 b	0.17 a	2.7 ab	1.67 c	0.39 ab
בוצה 12	0.34 b	0.11 ab	3.0 a	1.72 c	0.34 bc
בקר 3	0.32 b	0.16 ab	2.1 b	1.61 c	0.35 bc
בקר 6	0.31 b	0.14 ab	2.0 b	1.60 c	0.36 abc
בקר 12	0.37 b	0.12 ab	2.1 ab	1.72 c	0.33 bc
היקש לא מדושן	0.39 b	0.06 b	0.2 b	2.11 b	0.30 c
היקש מדושן	0.69 a	0.09 ab	2.6 ab	2.78 a	0.42 a

ג. שנת גידול שלישית - 2001

טיפול	נוף			גרעינים	
	חנקן	זרחן	אשלגן	חנקן	זרחן
	% ממשקל יבש			% ממשקל יבש	
בוצה 3	0.36 c	0.20 b	2.05 bc	1.97 c	0.48b
בוצה 6	0.35 c	0.27 a	2.31 b	2.18 bc	0.50b
בוצה 12	0.38 c	0.29 a	2.68 a	2.49 b	0.55ab
בקר 3	0.33 b	0.15 c	1.85 c	1.91 c	0.46b
בקר 6	0.34 b	0.27 a	2.27 b	2.31 bc	0.51b
בקר 12	0.31 c	0.25 a	2.56 a	2.28 bc	0.54ab
היקש לא מדושן	0.47 b	0.02 d	1.48 d	2.38 b	0.23c
היקש מדושן	0.84 a	0.13 c	1.65 cd	3.54 a	0.60a

טבלה 4. כמויות חומרי הזנה שהוספו ונקלטו ע"י צמחי חיטה בטיפולים השונים. (ק"ג לדונם)
א. שנת גידול ראשונה - 1998

טיפול	כמות מוספת			בנוף ובגרעינים	
	חנקן		זרחן	חנקן	זרחן
	מינרלי	אורגני	כללי		
בוצה 3	4.8	54.3	45.3	6.9 ± 0.3	2.5 ± 0.1
בוצה 6	9.7	108.6	90.6	11.4 ± 1.2	5.1 ± 1.0
בוצה 12	19.4	217.2	181.2	19.6 ± 1.3	8.6 ± 1.9
בקר 3	3.6	45.6	34.2	5.5 ± 0.5	1.7 ± 0.2
בקר 6	7.2	91.2	68.4	8.1 ± 0.8	2.6 ± 0.2
בקר 12	14.3	182.4	136.8	14.7 ± 0.4	4.8 ± 0.5
היקש	0.0	0.0	0.0	1.9 ± 0.2	0.1 ± 0.0
היקש מדושן	50.3	0.0	17.1	49.2 ± 1.3	7.7 ± 0.4

ב. שנת גידול שניה - 1999

טיפול	כמות מוספת			כמות בנוף ובגרורים		
	חנקן		זרחן	אשלגן	חנקן	זרחן
	מינרלי	אורגני	כללי			אשלגן
בוצה 3	4.8	53.5	4.9	2.9	7.7 ± 0.7	1.8 ± 0.2
בוצה 6	9.6	106.9	9.8	5.8	13.0 ± 2.7	3.0 ± 0.5
בוצה 12	19.3	213.4	19.6	11.7	24.7 ± 1.3	4.8 ± 0.5
בקר 3	3.5	45.0	3.7	3.7	6.0 ± 0.3	1.4 ± 0.1
בקר 6	7.1	90.0	7.4	7.4	10.6 ± 2.5	2.3 ± 0.8
בקר 12	14.2	180.0	14.9	14.8	23.5 ± 1.8	4.5 ± 0.5
היקש ללא דשן	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6 ± 0.1	0.1 ± 0.0
היקש מדושן	87.3	0.0	24.7	52.4	74.9 ± 7.9	10.4 ± 0.1

ג. שנת גידול שלישית - 2001

טיפול	כמות מוספת			כמות בנוף ובגרורים		
	חנקן		זרחן	אשלגן	חנקן	זרחן
	מינרלי	אורגני	כללי			אשלגן
בוצה 3	8.8	53.5	4.9	2.9	15.1 ± 3.1	4.5 ± 0.9
בוצה 6	15.0	106.9	9.8	5.8	22.1 ± 4.2	7.0 ± 1.2
בוצה 12	26.3	213.4	19.6	11.7	37.6 ± 8.3	12.6 ± 2.9
בקר 3	7.5	45.0	3.7	3.7	12.3 ± 2.2	3.3 ± 0.5
בקר 6	12.5	90.0	7.4	7.4	17.6 ± 3.9	5.5 ± 1.0
בקר 12	21.2	180.0	14.9	14.8	33.2 ± 6.1	10.9 ± 1.8
היקש ללא דשן	2.4	0.0	0.0	0.0	2.3 ± 0.6	0.2 ± 0.07
היקש מדושן	88.9	0.0	24.7	52.4	50.5 ± 4.9	7.9 ± 0.9

טבלה 5. מאזן החנקן - כמויות מדודות של החנקן שהוסף לקרקע, ושל תכולתו בקרקע בתחילת הגידול ובסופו*, והערכה של כמות חנקן שנקלטה ע"י הצמחים⁸ (ק"ג/דונם)

א. שנת גידול ראשונה - 1998

טיפול	חנקן מינרלי שהוסף בזבלים או בדשן	חנקן בקרקע בתחילת העונה	חנקן בקרקע בסוף העונה	סיכ ההפרש בחנקן המינרלי בקרקע במהלך העונה	הערכה של סיכ החנקן בצמחים (נוף גרגרים ושורשים)	הערכה של המינרליזציה
בוצה 3	4.8	3.0	3.3	+4.5	7.6	+3.1
בוצה 6	9.6	3.0	2.3	+4.3	12.5	+8.2
בוצה 12	19.3	3.0	3.0	+13.3	21.6	+8.3
בקר 3	3.5	3.0	1.8	+4.7	6.0	+1.3
בקר 6	7.1	3.0	2.6	+7.5	8.9	+1.4
בקר 12	14.2	3.0	2.2	+15.0	16.2	+1.2
היקש ללא דשן	0.0	3.0	2.5	+0.5	2.1	+1.6
היקש מדושן	87.3	3.0	11.3	+79.0	54.2	-24.8

ב. שנת גידול שנייה - 1999

טיפול	חנקן מינרלי שהוסף בזבלים או בדשן	חנקן בקרקע בתחילת העונה	חנקן בקרקע בסוף העונה	סיכ ההפרש בחנקן המינרלי בקרקע במהלך העונה	הערכה של סיכ החנקן בצמחים (נוף גרגרים ושורשים)	הערכה של המינרליזציה
בוצה 3	4.8	3.3	5.1	+3.0	8.5	+5.5
בוצה 6	9.6	2.3	5.4	+6.5	14.3	+7.8
בוצה 12	19.3	3.0	7.7	+14.6	27.2	+12.6
בקר 3	3.5	1.8	5.3	0	6.6	+6.6
בקר 6	7.1	2.6	6.0	+3.7	11.7	+8.0
בקר 12	14.2	2.2	8.7	+7.7	25.9	+18.1
היקש ללא דשן	0.0	2.5	4.5	-2.5	0.7	+3.2
היקש מדושן	87.3	11.3	10.8	+87.8	82.4	-5.4

ג. שנת גידול שלישית - 2001

טיפול	חנקן מינרלי שהוסף בזבלים או בדשן	חנקן מינרלי שהוסף בהשקיה	חנקן בקרקע בתחילת העונה	חנקן בקרקע בסוף העונה	סיכ השינוי בחנקן המינרלי בקרקע במהלך העונה	הערכה של סיכ החנקן בצמחים (נוף גרגרים ושורשים)	הערכה של המינרליזציה
בוצה 3	4.8	4.0	11.5	6.3	+14.0	16.5	+2.5
בוצה 6	9.6	5.4	8.4	12.5	+11.0	22.2	+11.2
בוצה 12	19.3	6.9	22.1	13.7	+34.6	47.9	+13.3
בקר 3	3.5	4.0	7.0	4.1	+10.4	14.1	+3.7
בקר 6	7.1	5.4	6.6	5.0	+14.1	19.3	+5.2
בקר 12	14.2	6.9	12.0	9.1	+24.0	41.1	+17.1
היקש ללא דשן	0.0	2.4	5.86	3.7	+4.6	3.1	-1.5
היקש מדושן	80.9	8.0	16.80	14.2	+91.5	66.7	-24.8

סכום שתי העמודות הימניות פחות העמודה השלישית בטבלאות א ו-ב, סכום שלושת העמודות הימניות פחות העמודה הרביעית בטבלה ג.
& הכמות בשורשים הוערכה כ 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.8 מהנוף כאשר גיל הצמח 0-20, 20-40, 40-60, 60-100 ו-100 עד הקציר, בהתאמה וריכוז החנקן בשורשים 86% מזה שבנוף.

טבלה 6. השינוי בתכולת חומר אורגני (ח"א) בשכבת הקרקע העליונה, 0-15 ס"מ, בשנת הגידול האחרונה, 2001.

הטיפול	ח"א לפני זריעה	ח"א לאחר הקציר	השינוי בח"א
ח"א %			
בוצה 3	2.23±0.19	1.62±0.06	-0.61
בוצה 6	2.72±0.57	2.30±0.31	-0.42
בוצה 12	6.58±2.82	4.84±0.74	-1.74
בקר 3	1.50±0.25	1.46±0.14	-0.04
בקר 6	2.53±1.12	2.15±0.50	-0.38
בקר 12	5.21±1.73	4.44±0.94	-0.77
היקש ללא דשן	0.45±0.29	0.80±0.04	+0.35
היקש מדושן	0.76±0.10	0.80±0.08	+0.04

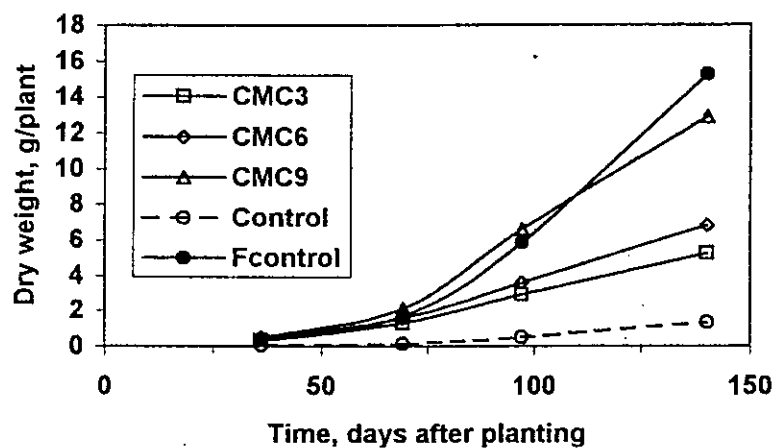
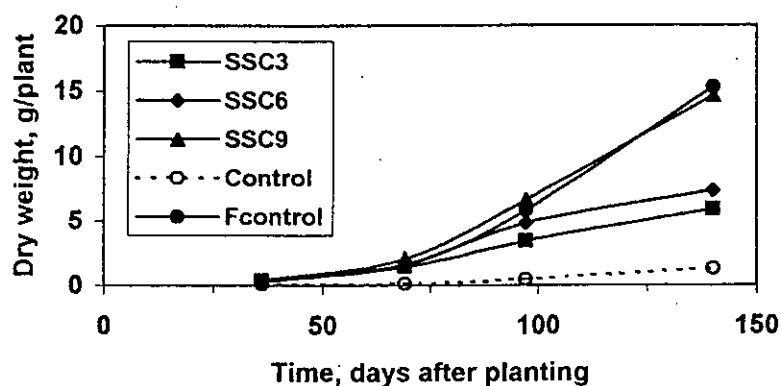
טבלה 7. חלוקת הפחמן בין המרכיב קל הפרוק למרכיב (abile) קשה הפרוק (resistant), יחסי הפחמן/חנקן בכל אחד מהם ומקדמי קצב הפרוק שלהם בקומפוסטים מבוצה ומזבל בקר, כפי שנקבעו בתוכנית האופטימיזציה למודל NCSSOIL לפי תוצאות ההדגרה במעבדה ב- 30 °C.

Compost	Organic C	C/N	k	Organic C	C/N	k	χ^2
	Labile component ^a			Resistant component ^b			
	g kg ⁻¹		d ⁻¹	g kg ⁻¹		d ⁻¹	
SSC	45	18.0	0.0240	174	11.2	0.000119	0.246
CMC	23	13.7	0.0239	118	8.8	0.000142	0.309

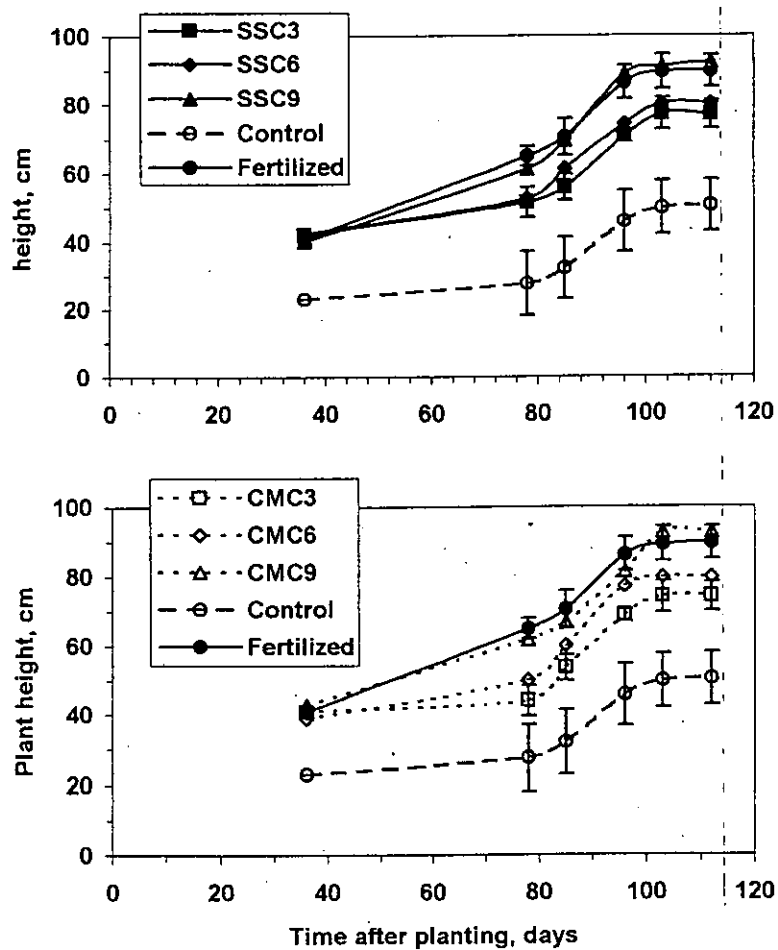
^a parameters of the labile component were optimized from 140 d incubation experiment

^b k of the resistant component was optimized from N mineralization in a long term (370 d) incubation experiment

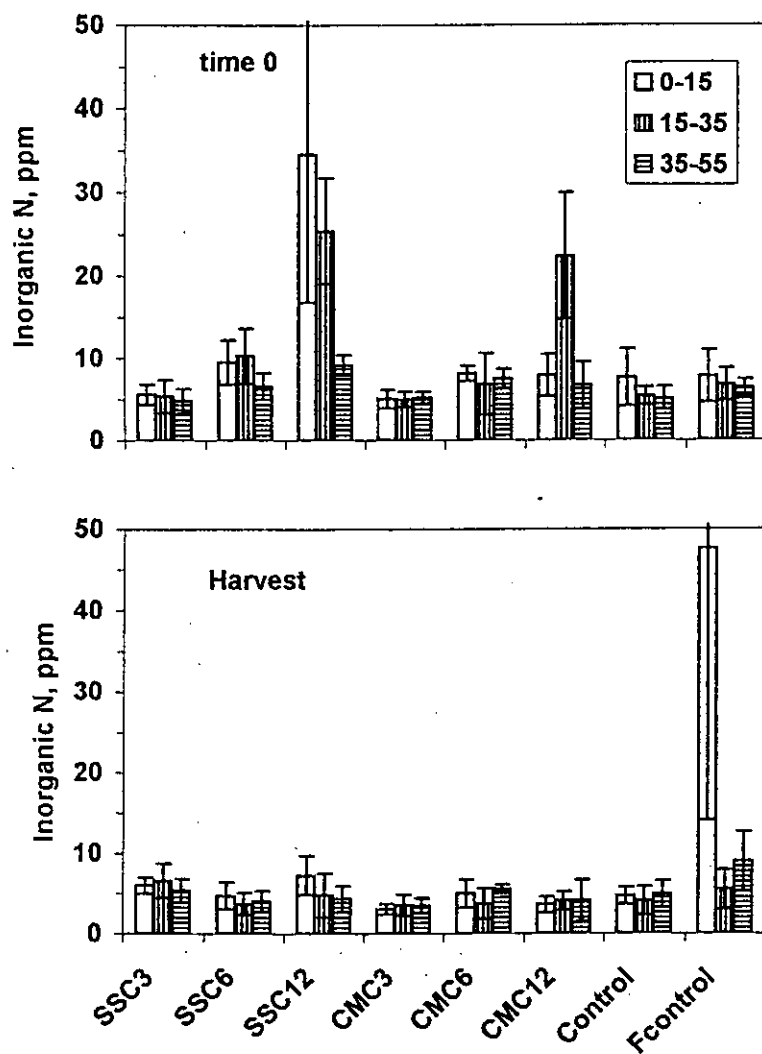
איור 1. השפעת סוג ומנת הקומפוסט ודישון מינרלי על ייצור חומר יבש בצמחי חיטה עם הזמן בעונה השלישית, 2001.



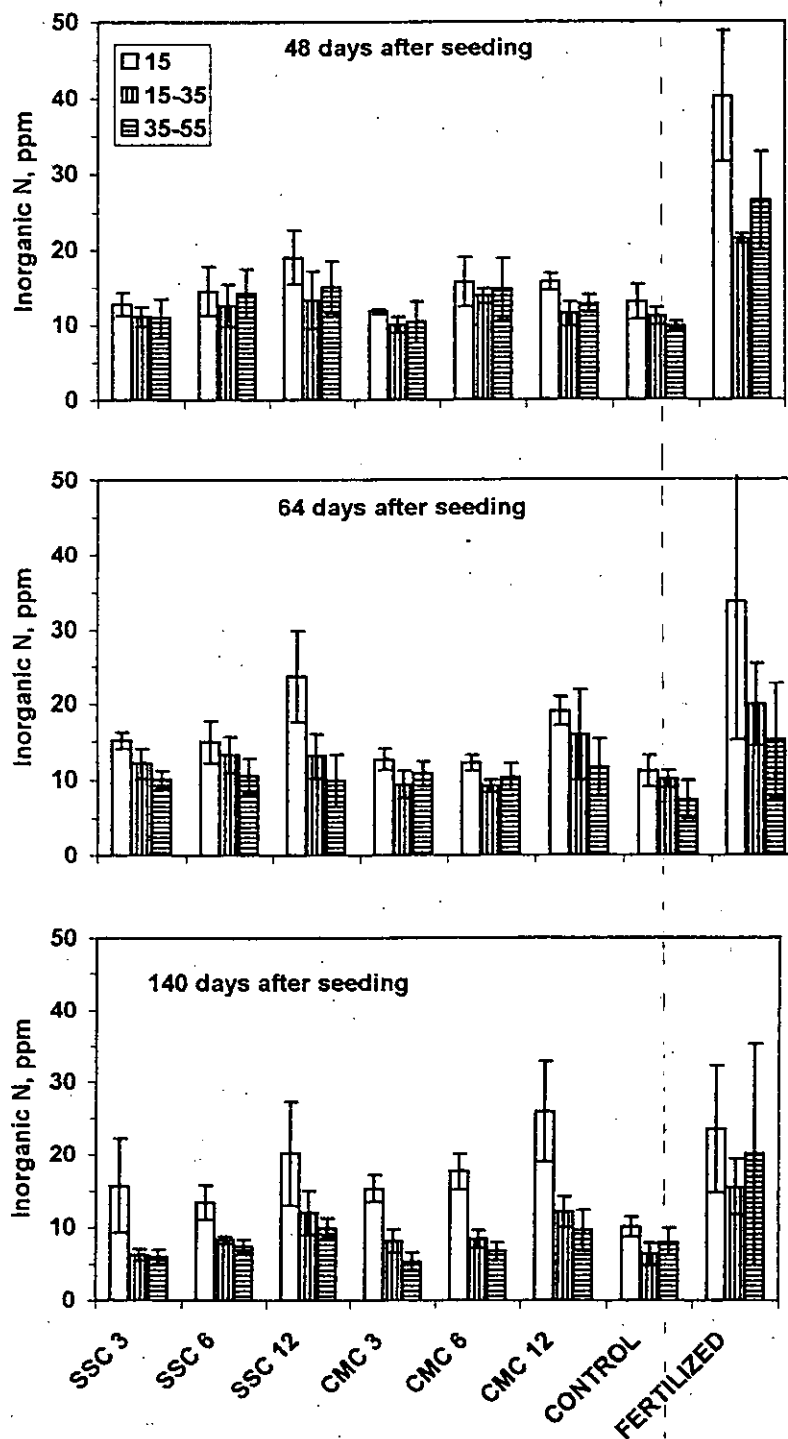
איור 2. השפעת סוג ומנת הקומפוסט ודישון מינרלי על עקום ההתארכות של צמחי חיטה עם הזמן בעונה השלישית, 2001.



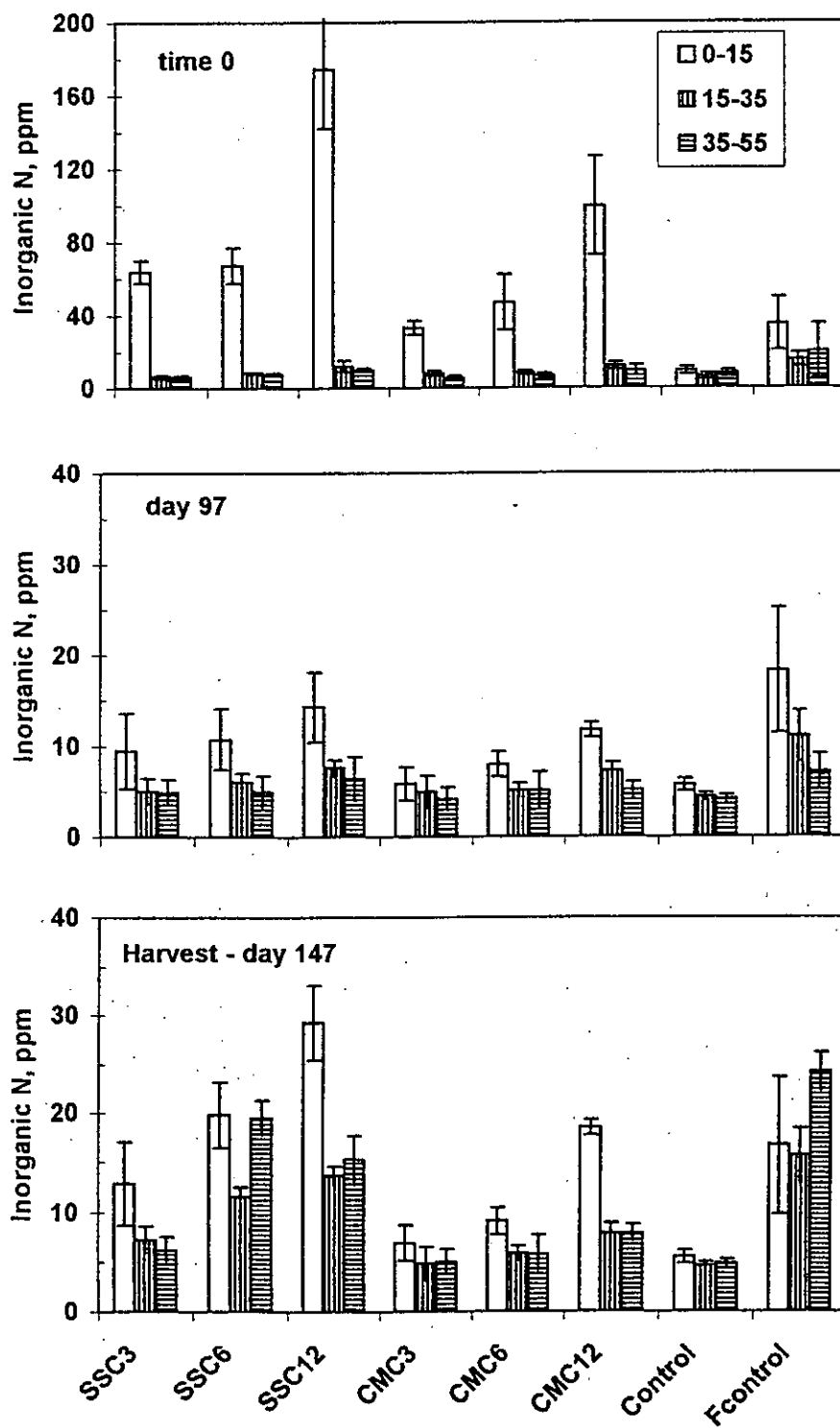
איור 3 א. ריכוז החנקן המינרלי, (חנקן + אמון) בקרקע כתלות בעומק לפני הזריעה ולאחר הקציר ב 1998.



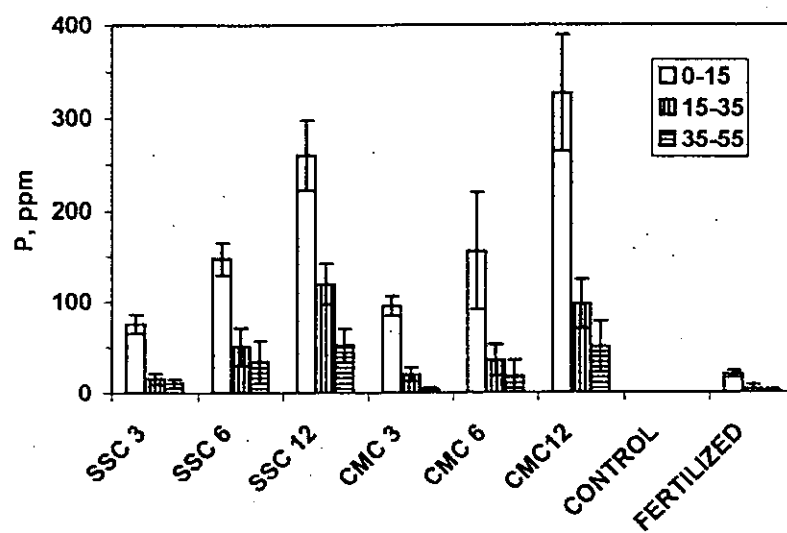
איור 3. ריכוז החנקן המינרלי, (חנקן + אמון) בקרקע כתלות בעומק ובזמן מזרעה, 1999.



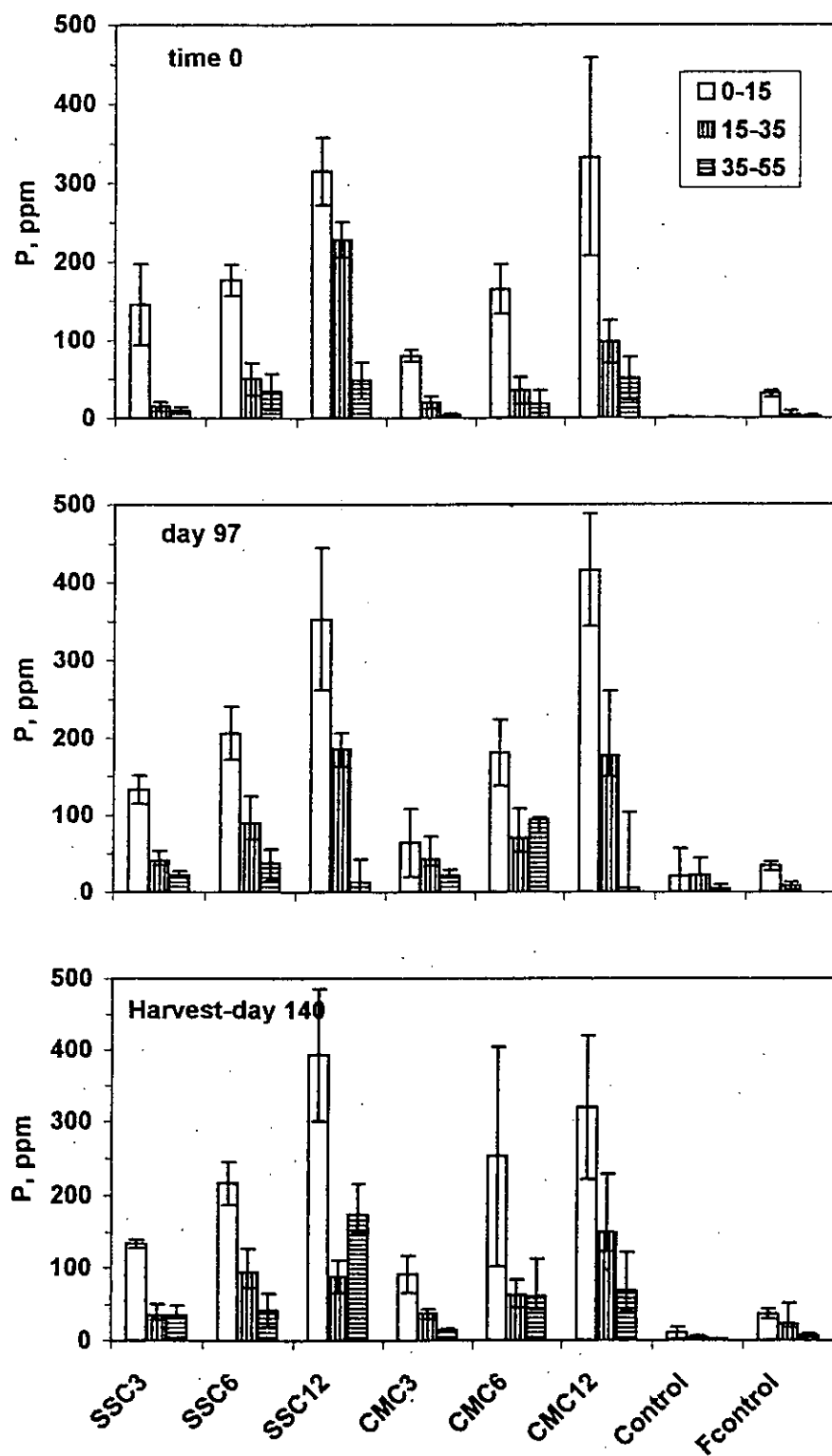
איור 3. ריכוז החנקן המינרלי (חנקן + אמון) בקרקע כתלות בעומק ובזמן מזריעה, 2001.



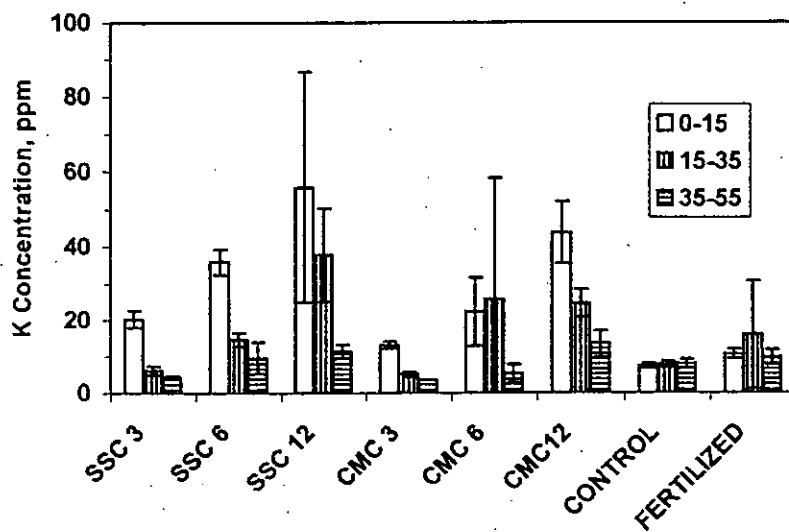
איור 4. ריכוז הזרחן בקרקע כתלות בטיפול ובעומק שכבת הקרקע בתום הניסוי, 1999.



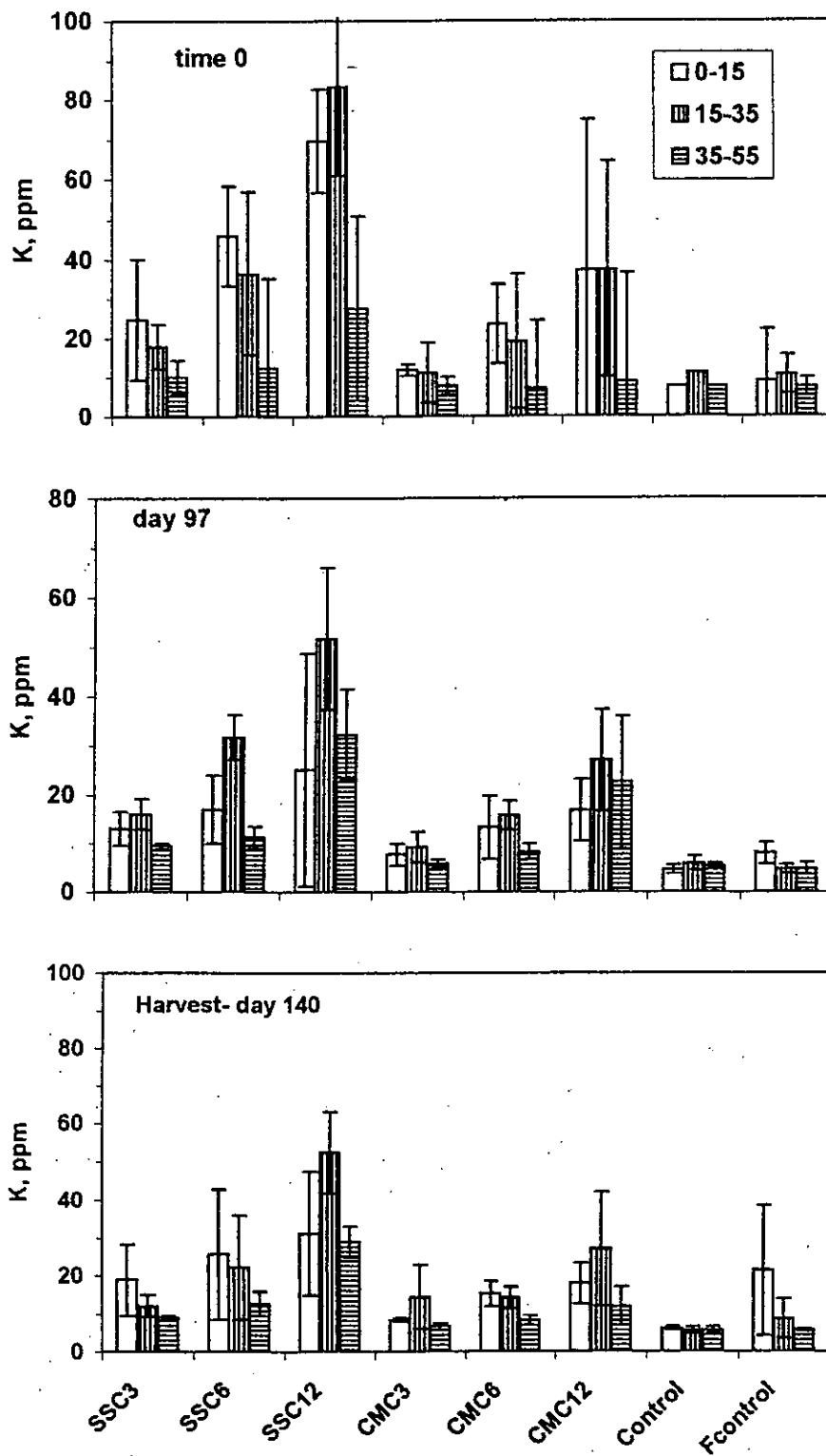
איור 4. ריכוז הזרחן הניתן למיצוי בבי קרבונט כתלות בעומק ובזמן מזרעה, 2001.



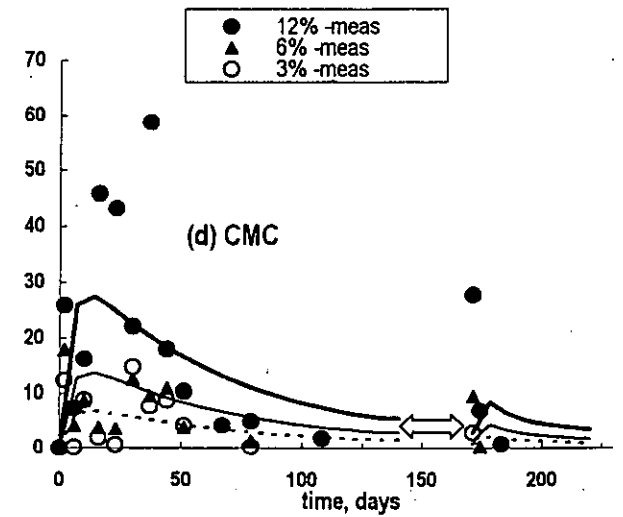
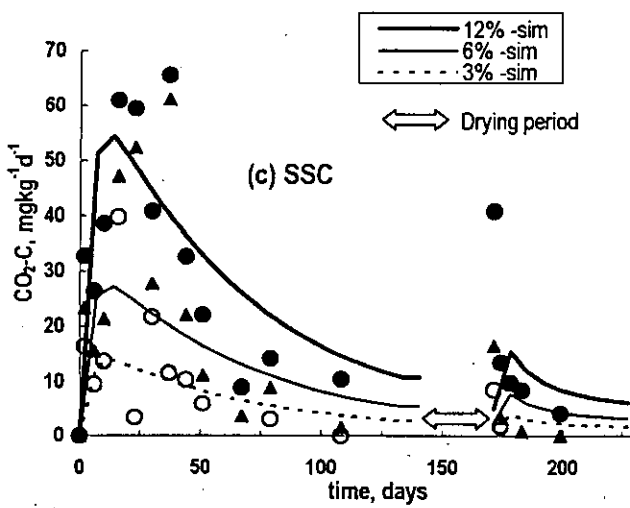
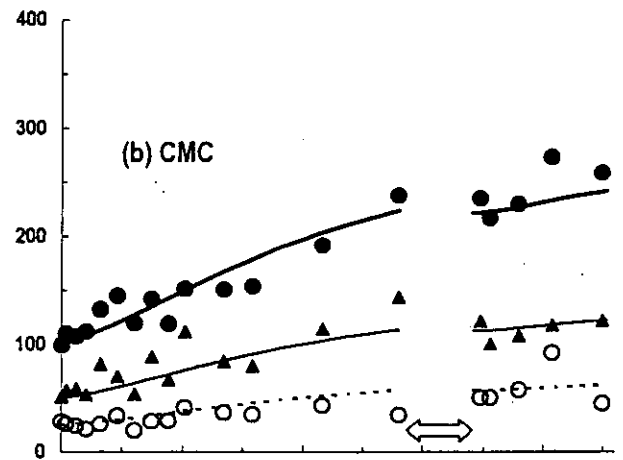
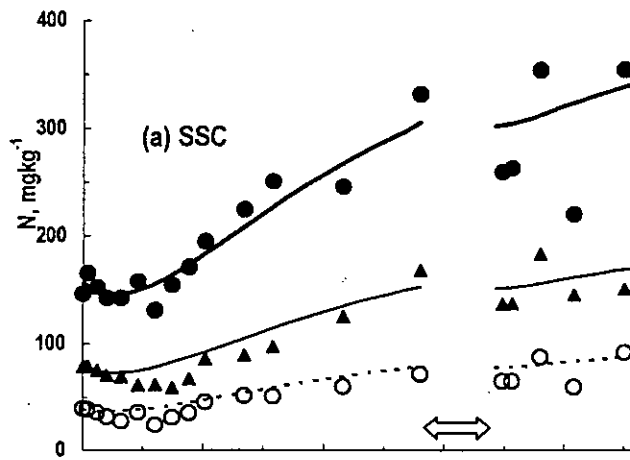
איור 5א. ריכוז השלגן בקרקע כתלות בטיפול ובעומק שכבת הקרקע בתום הניסוי, 1999.



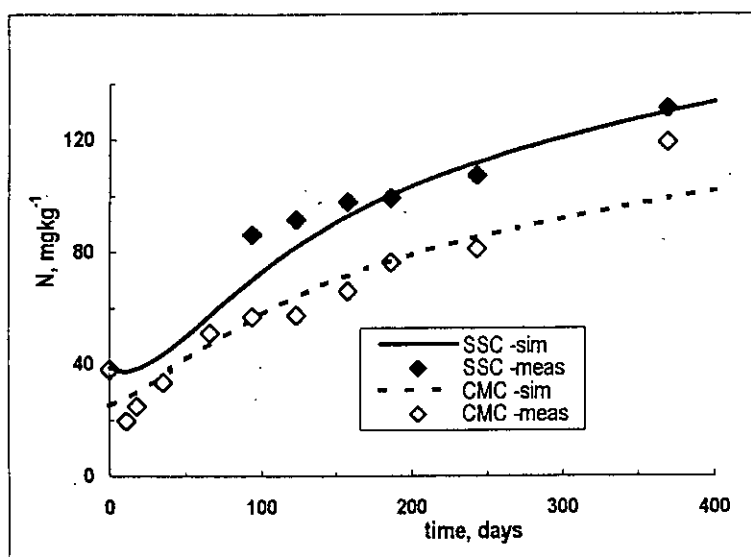
איור 5ב. ריכוז האשלגן בקרקע כתלות בעומק ובזמן מזרעה, 2001.



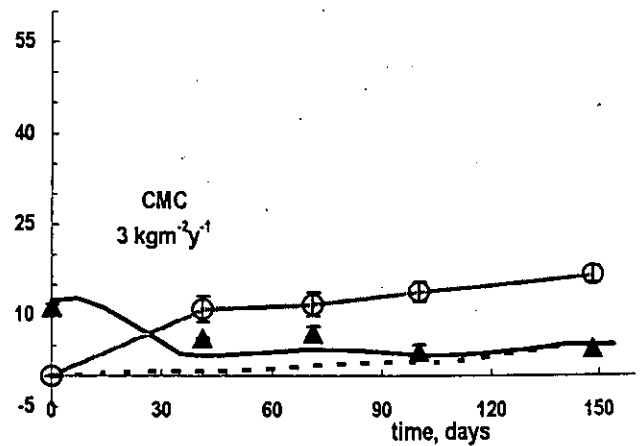
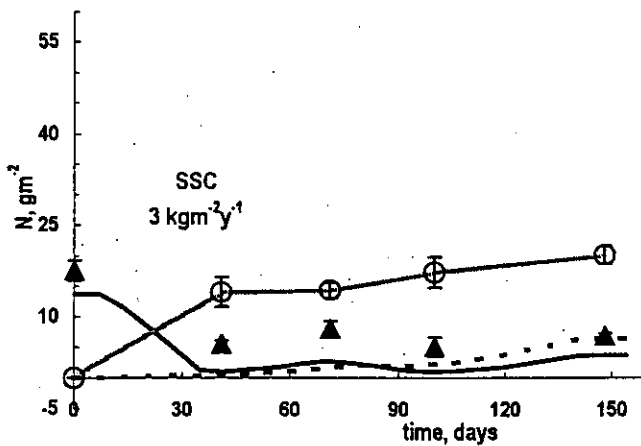
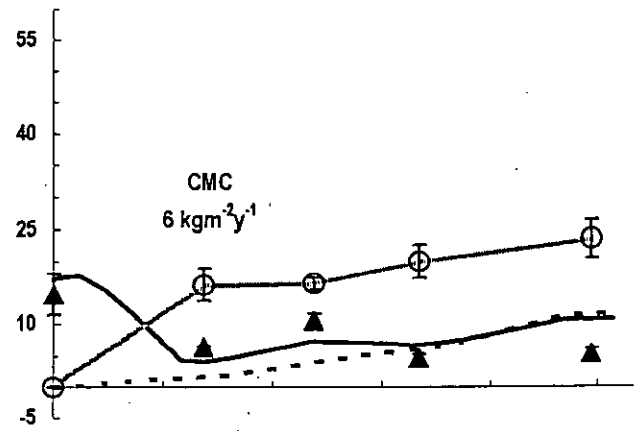
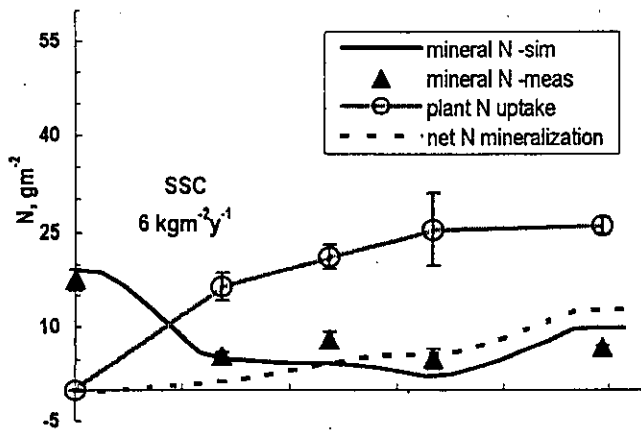
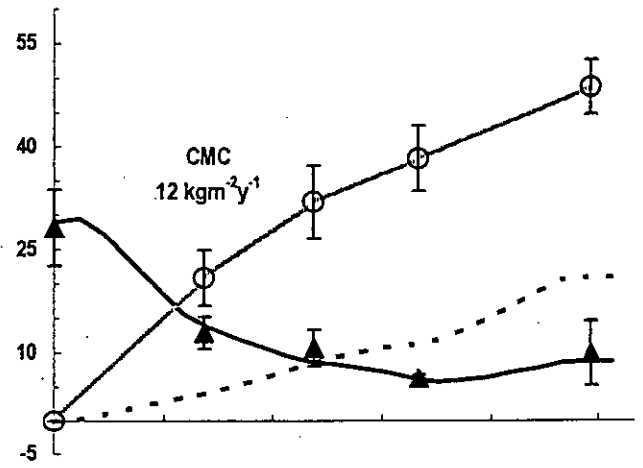
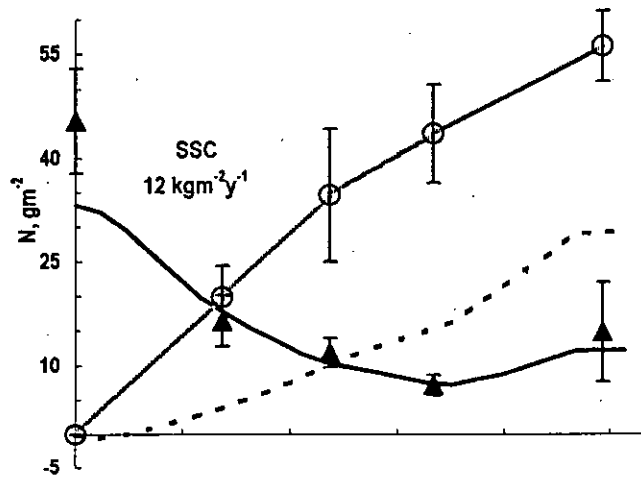
איור 6. השינוי בריכוז חנקן מינרלי וקצב שיחרור דו תחמוצת הפחמן בטיפול הקומפוסטים בוצה (SSC) ובקר (CMC) כתלות בזמן מתחילת ההדגרה ב 30 מעלות.



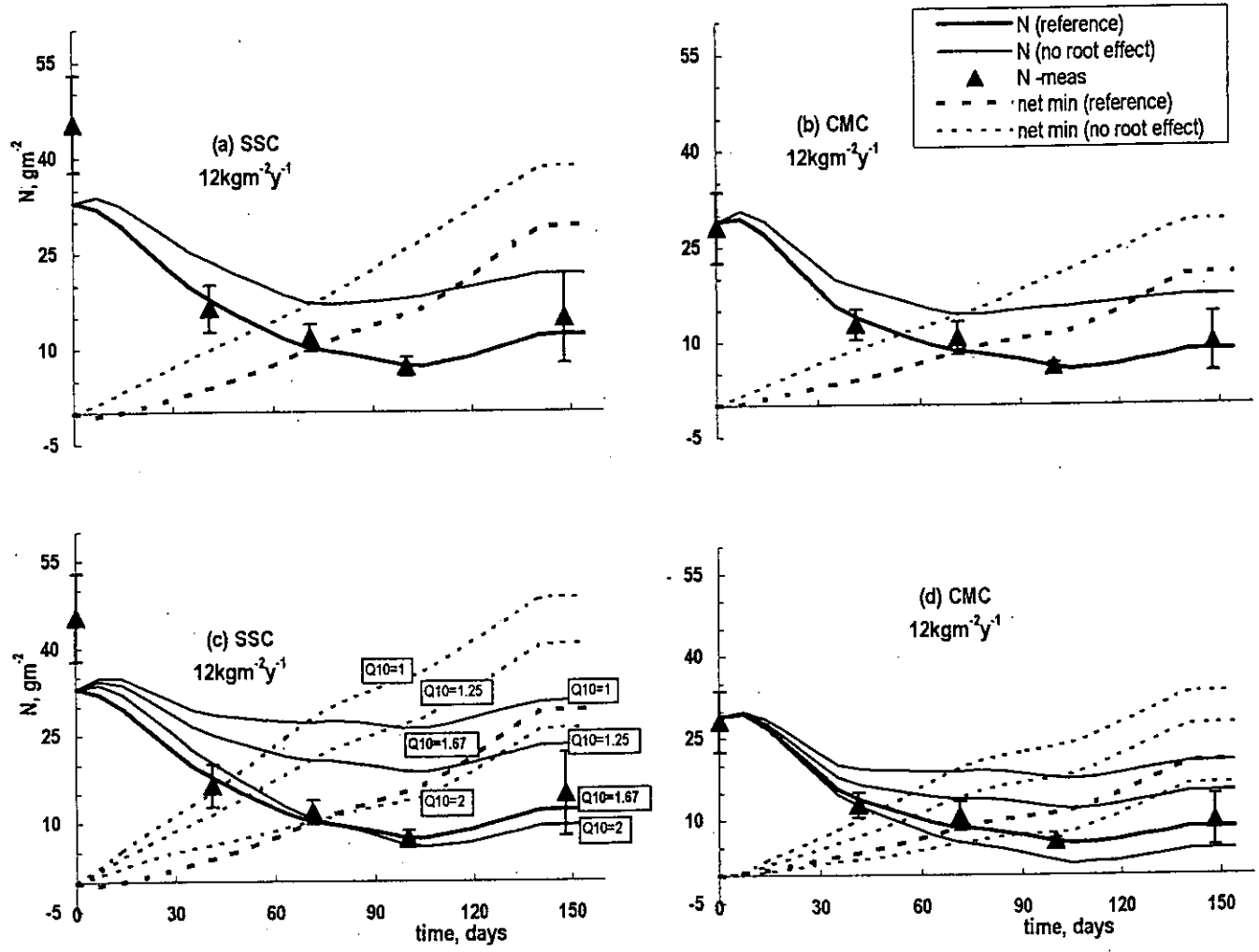
איור 7. ריכוז חנקן בקרקע כתלות בזמן לאחר הוספת 3% קומפוסט בוצה (SSC) או בקר (CMC).



קליטת חנקן (מדודה בנוף ומחושבת בשורשים) וחנקן מינרלי מדוד בקרקע כתלות בזמן ובהשפעת סוג וכמות הקומפוסט, בוצה (SSC) בקר (CMC), במכלים בשנת 2001, והתוצאות החזויות בסימולציה של החנקן המינרלי ושל המינרליזציה.



חנקן מינרלי מדוד בשנת 2001 (נקודות) וחזוי בסימולציה (קווים) כתלות בזמן בשני סוגי הקומפוסט, בוצה (SSC) ובקר (CMC), ברמת היישום הגבוהה והשפעת אפקט השורשים והטפרטורה על החיזוי.



קליטת חנקן מדודה בניסוי החלקות הקבועות (כפכפי והלוי, 1974) וחיזוי ריכוז חנקן מינרלי בקרקע חולית ובקרקע פוריה לאחר תוספת קומפוסט בוצה (SSC) או בקר (CMC) בכמות של 6 טון לדונם ובתוספת של דשן מינרלי (בבוצה 12 ו- 20 ק"ג לדונם בחול ובקרקע פוריה, בהתאמה, 13 ו- 23 ק"ג לדונם לבקר בחול ובקרקע פוריה, בהתאמה), או קומפוסט בלבד בכמות של 17 ו- 20 טון לדונם בוצה ובקר בחול.

