

| עמ' | תוכן העניינים                                                                      |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------|
| 2   | דף שער                                                                             |
| 3   | שאלות מנחות                                                                        |
| 4   | תקציר                                                                              |
| 5   | תיאור מקיף של הפעלת המחקר ב-2011 וב-2012                                           |
| 8   | תוצאות ניסוי השדה                                                                  |
|     | יבולים: 2011, 2012                                                                 |
|     | תכולות N, P, K בצמחי התיירס 2012                                                   |
|     | ריכוזים של יסודות מאקרו אחרים, יסודות קורט ומתכות כבדות בגרגרים ב-2012             |
|     | יסודות ההזנה בחתך הקרקע (עד 1.8 מ') לפני ובמהלך הניסוי                             |
| 13  | תכולת הורמונים סטרואידליים ומתכות כבדות בצמחי חסה: תוצאות נבחרות מניסוי הליזימטרים |
|     | יבולי חסה                                                                          |
|     | תכולת יסודות קורט ומתכות כבדות בצמחי החסה                                          |
|     | הורמונים סטרואידלים בבוצות ובצמחי החסה                                             |
| 16  | סיכום הפליטה של גזי חממה מהקרקע בשדה ברבדים- קיץ 2012                              |
| 18  | טבלאות                                                                             |
| 28  | איורים                                                                             |

# אופטימיזציה של השימוש בבוצות שפכים בגד"ש

דו"ח לתכנית מחקר מספר 301-0705-11

לשנים 2011 - 2013

מוגש ע"י

פנחס פיין מדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי  
דני קורצמן מדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי  
אשר בר-טל מדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי  
זאב גרסטל מדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי  
אחמד נאסר מדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי  
גיא לוי מדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי  
אדי סיטרין מדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי  
אשר אייזנקוט מדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי  
אריה בוסק אגודת מגדלי דרום יהודה  
משה ברוקנטל אגודת מגדלי דרום יהודה

המחקר בוצע בהשתתפותם של:

הדר הלר, הילה הכט, טיבור מרקוביץ', אנה בריוזקין, שושי סואריאנו, אסרה רבאח, דורית שרגיל, עידו ניצן

Pinchas Fine, Institute of Soil, Water & Environmental Sciences, Volcani Center, POB 6, Bet Dagan 50250. E-mail: [finpe@agri.gov.il](mailto:finpe@agri.gov.il)

Daniel Kurtzman, Institute of Soil, Water & Environmental Sciences, Volcani Center, POB 6, Bet Dagan 50250. E-mail: [daniel@agri.gov.il](mailto:daniel@agri.gov.il)

Asher Br-Tal Institute of Soil, Water & Environmental Sciences, Volcani Center, POB 6, Bet Dagan 50250. E-mail:

Zev Gerstl, Institute of Soil, Water & Environmental Sciences, Volcani Center, POB 6, Bet Dagan 50250. E-mail: [zgerstl@agri.gov.il](mailto:zgerstl@agri.gov.il)

Ahmed Nasser, Institute of Soil, Water & Environmental Sciences, Volcani Center, POB 6, Bet Dagan 50250. E-mail: [nasser@agri.gov.il](mailto:nasser@agri.gov.il)

Guy Levy, Institute of Soil, Water & Environmental Sciences, Volcani Center, POB 6, Bet Dagan 50250. E-mail:

Eddie Cytryn, Institute of Soil, Water & Environmental Sciences, Volcani Center, POB 6, Bet Dagan 50250. E-mail: [eddie@agri.gov.il](mailto:eddie@agri.gov.il)

Aryeh Bosik, South Yehuda Growers Cooperative Society Ltd. E-mail: [bosak@bezeqint.net](mailto:bosak@bezeqint.net)

Moshe Bruckental, South Yehuda Growers Cooperative Society Ltd. E-mail: [moshe\\_b@mhadarom.co.il](mailto:moshe_b@mhadarom.co.il)

**הצהרת החוקר הראשי:**

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

תאריך: 28/2/2014

חתימת החוקר

מטרות המחקר:

- (א) לימוד התהליכים הכימיים והביולוגיים המתרחשים בקרקעות מטופלות בבוצות סוג ב' וסוג א', ומדידה וחיזוי של השפעתן על הזמינות לצמח של יסודות ההזנה, הקורט והמתכות הכבדות והתנהגות חומרים בעלי פעילות הורמונלית בבוצות. כל אלה יבוצעו כתלות בסוג הבוצה ובעומס היישום.
- (ב) גיבוש המלצות ליישום בוצות בקרקעות חקלאיות בהתאם להרכבן, לקרקע, לגידול ולתנאי הסביבה.

שיטות: באביב 2011 הוצב ניסוי חלקות 'קבועות' בקיבוץ רבדים (קרקע גרומוסול) עם 16 טיפולים ב-6 בלוקים באקראי. נבחנו 4 סוגי זבל: בוצה סוג ב', קומפוסט בוצה, בוצת שפד"ן מטופלת בסיד ובאפר פחם (במס"א) וקומפוסט מהרקבובית של אשפת ערים. כל זבל נבחן ב-3 טיפולים: שניים בעומס שקול ל-50 ק"ג נ"ד, בשלושה יישומים אביביים, וטיפול שלישי שניתן רק ב-2011 לפי 150 ק"ג נ"ד. הטיפולים החליפו את דישון היסוד, ורק טיפול אחד מהזוג לעיל קיבל דשן חנקני בראש. טיפולי ההיקש הנם: (1) דישון 10 ק"ג נ"ד ביסוד; (2) 15 ק"ג נ"ד בראש; (3) טיפול 'משקי' עם חנקן ביסוד ובראש (25 יח'); (4) ללא תוספת. ב-3 השנים נזרע תירס לתחמיץ באביב, וב-2 החורפים האחרונים נזרעה חיטה. בנוסף בוצע ניסוי בליזימטרים בנפח 200 ל"; 14 טיפולים ב-3 קרקעות: חרסית, לס, חול ב-3 הבוצות בשיעורי יישום כנ"ל. גודלו 4 מחזורי חסה (2 אביב, 2 חורף) במטרה לבחון את זמינות יסודות הקורט והמתכות הכבדות בצמח בוחן רגיש. יבולי הדגנים: יבול התירס ב-2011 היה דומה בכל הטיפולים. ב-2012 היבול הגבוה ביותר היה בישום הבוצה סוג ב' בתוספת חנקן בראש. דמו לו ההיקש המשקי וטיפולי הזיבול עם דשן ראש. היבול היה נמוך במובהק בטיפולי הזיבול ללא דישון ראש (כולל במינון המשולש), בטיפול ק' האשפה עם דישון ראש, ובטיפולי ההיקש ללא דישון או בדישון חלקי. עם זאת, יבולי החיטה בחורף העוקב (2012/13) היו דומים במרבית הטיפולים, והיו נמוכים במובהק רק בהיקש עם דישון ראש בלבד (19% פחות מההיקש המשקי), ובטיפול ללא כל תוספת (33% פחות). באחרון, תוספת של 10 יחידות חנקן (בשטח מוגבל בכל אחת מ-6 החזרות) החזירה את היבול לתיקונו. יבולי התירס בשנה השלישית (2013) הראו לראשונה תגובה מובהקת לטיפולי הזיבול. הם היו גבוהים ביותר בטיפול המשקי ובבמס"א, וגבוהים יחסית (ולא שונים במובהק) בטיפולי הזיבול עם דישון הראש. בטיפולי הזיבול החוזרים ללא דישון ראש היבול היה נמוך ב-23% בממוצע מההיקש המשקי; בזיבול החד-פעמי במנה המשולשת היבול היה נמוך בכ-50% בממוצע; בדישון היסוד בלבד: -35%, ובהיקש ללא תוספת: -59% מהטיפול המשקי.

זמינות יסודות ההזנה לגידולים: יעילות השימוש בחנקן (NUE) שמקורו בזבלים הייתה 4%-14% בלבד בממוצע ל-3 השנים. המעניין הוא שה-NUE לא תאם לזמינות הפוטנציאלית של החנקן בזבלים לפי החיזוי בניסויי הדגרה במעבדה. כך, הזמינות הגבוהה של החנקן בבוצה ובבמס"א בהשוואה לקומפוסטים (בוצה ואשפת ערים) לא נכרה כלל ביבולי הביומאסה והחנקן (60-84 ק"ג נ"ד/4 עונות). ס"כ החזר החנקן, ביבולי 4 העונות ובחתך הקרקע עד עומק 1.8 מ', היה 150%-250% בטיפולי ההיקש ו-40%-75% בטיפולי הזיבול. ההחזר הגבוה בהיקש היה עקב מינרליזציה של החנקן האורגני הקרקעי (בעיקר ב-2 העונות הראשונות). הזמינות הגבוהה של חנקן הקרקע הגבילה את יעילות קליטת חנקן הזבל, ואיפשר את דליפתו לתת-הקרקע. פליטת חנקן תת-חמצני ( $N_2O$ ) מהקרקע בשדה הייתה מזערית (עד 60 ג' נ"ד/שנה), ומרביתה חלה בתקופה הראשונה (כחודש) לאחר יישום הזבלים, מה שכנראה מעיד שדניטריפיקציה בתנאי השדה לא הייתה משמעותית.

מסקנות מדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר. האם הושגו מטרות המחקר?

הזיבול במנה המומלצת מאפשר הימנעות מדישון ביסוד גם בגידול דורש-דשן כתירס מספוא. (2) נראה כי אין בעיה של קליטת יתר של מתכות כבדות בצמחים או דליפתם לעומק הקרקע. (3) עודפים גדולים של זרחן זמין מצטברים בחתך הקרקע ביישום חלק מהבוצות. (4) חל כנראה דלדול של החומר האורגני בקרקע בשילוב של הרכבי הזבלים ושיעורי יישום המותרים בתקנות. (5) ממשק הגידול ממזער פליטת גזי חממה ביישום בוצות. (6) החלנו בפיתוח מדד מהיר להערכת זמינות החנקן לתירס. מרבית הנושאים לעיל מחייבים המשך מחקר, בעיקר בהיבטים ארוכי הטווח: ממשק החומר האורגני בקרקע; זמינות מתכות כבדות ביישומים חוזרים; זמינות עודפת של הזרחה והכימיה של הזרחן בקרקע; מדדי להערכת זמינות חנקן לתירס.

בעיות שנתרו לפתרון:

הדגשים במחקר היו: (1) ממשק וחיסכון בדשן; מיסוך השפעת הזבלים ע"פ פוריות קרקע תחילית גבוהה מנע אפשרות לקבוע את העומס האופטימלי של כל אחד מהזבלים בו תהיה התמורה המרבית לחקלאי בלי שייגרם נזק סביבתי. רק בשנה ג' החל להסתמן הבדל מובהק בין הטיפולים ויש להמשיך בבדיקה. (2) סיכון לצבירת יסודות קורט ומתכות כבדות בצמחים מחייב בדיקה לטווח ארוך יותר; (3) הזרחן בזבלים ובקרקע; זרחה זמינה בקרקע נמצאת בעלייה תלולה. לא ברור אם הנושא בעייתי והאם יש השפעות גומלין עם יסודות

|                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| אחרים וסיכון פיסיוולוגי. הכימיה של הזרחן בזבלים ובקרקע נלמדת עתה. (4) פיתוח שיטות מהירות לאיפיון מצב ההזנה החנקני של הגידול                                                                                                                     |
| <p><u>הפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח:</u></p> <p>הרצאות בכנסי חקלאים (כולל האגודה הישראלית לגד"ש). הנחייה ישירה של איגודי מגדלים (צב"ר קמ"ה, 'מגדלי דרום יהודה', ליווי צמוד ל-GES, המשווקים במס"א בדרום הארץ. הוצאת ניירות עמדה למשרד להגה"ס.</p> |
| <p><u>פרסום הדו"ח:</u></p> <p>ללא הגבלה (בספריות ובאינטרנט)</p>                                                                                                                                                                                 |

## תקציר

שימוש בבוצות בגד"ש מיועד להחליף דישון רגיל, לטייב הקרקע ולהגדיל הרווחיות. נדרשת ידיעה של התועלות והמגבלות הכרוכות בשימוש בסוגיה השונים.

שיטות: באביב 2011 הוצב ניסוי חלקות 'קבועות' בקיבוץ רבדים (קרקע גרומוסול) עם 16 טיפולים ב-6 בלוקים באקראי. נבחנו 4 סוגי זבל: בוצה סוג ב', קומפוסט בוצה, בוצת שפד"ן מטופלת בסיד ובאפר פחם (במס"א) וקומפוסט מהרקבובית של אשפת ערים. כל זבל נבחן ב-3 טיפולים: שניים בעומס שקול ל-50 ק"ג מ"ד, בשלושה יישומים אביביים, וטיפול שלישי שניתן רק ב-2011 לפי 150 ק"ג מ"ד. הטיפולים החליפו את דישוני היסוד, ורק טיפול אחד מהזוג לעיל קיבל דשן חנקני בראש. טיפולי ההיקש הנם: (1) דישון 10 ק"ג מ"ד ביסוד; (2) 15 ק"ג מ"ד בראש; (3) טיפול 'משקי' עם חנקן ביסוד ובראש (25 יח'); (4) ללא תוספת. ב-3 השנים נזרע תירס לתחמיץ באביב, וב-2 החורפים האחרונים נזרעה חיטה. במקביל לשדה בוצע ניסוי בליזימטרים בנפח 200 ל"; ב-3 קרקעות: חרסית, לס, חול; ב-3 הבוצות בשיעורי יישום כנ"ל. גודלו 4 מחזורי חסה (2 אביב, 2 חורף) במטרה לבחון את זמינות יסודות הקורט והמתכות הכבדות בצמח בוחן רגיש.

יבולי הדגנים: יבול התירס ב-2011 היה דומה בכל הטיפולים. ב-2012 היבול הגבוה ביותר היה ביישום הבוצה סוג ב' בתוספת חנקן בראש. דמו לו ההיקש המשקי וטיפולי הזיבול עם דשן ראש. היבול היה נמוך במובהק בטיפולי הזיבול ללא דישון ראש (כולל במינון המשולש), בטיפול ק' האשפה עם דישון ראש, ובטיפולי ההיקש ללא דישון או בדישון חלקי. עם זאת, יבולי החיטה בחורף העוקב (2012/13) היו דומים במרבית הטיפולים, והיו נמוכים במובהק רק בהיקש עם דישון ראש בלבד (19% פחות מההיקש המשקי), ובטיפול ללא כל תוספת (33% פחות). באחרון, תוספת של 10 יחידות חנקן (בשטח מוגבל בכל אחת מ-6 החזרות) החזירה את היבול לתיקונו.

יבולי התירס בשנה השלישית (2013) הראו לראשונה תגובה מובהקת לטיפול הזיבול. הם היו גבוהים ביותר בטיפול המשקי ובבמס"א, וגבוהים יחסית (ולא שונים במובהק) בטיפולי הזיבול עם דישון ראש. בטיפולי הזיבול החוזרים ללא דישון ראש היבול היה נמוך ב-23% מממוצע מההיקש המשקי; בזיבול החד-פעמי במנה המשולשת היבול היה נמוך בכ-50% מממוצע; בדישון היסוד בלבד: -35%, ובהיקש ללא תוספת: -59% מהטיפול המשקי.

זמינות יסודות ההזנה לגידולים: יעילות השימוש בחנקן (NUE) שמקורו בזבלים הייתה 4%-14% בלבד בממוצע ל-3 השנים. המעניין הוא שה-NUE לא תאם לזמינות הפוטנציאלית של החנקן בזבלים לפי החיזוי בניסויי הדגרה במעבדה. כך, הזמינות הגבוהה של החנקן בבוצה ובבמס"א בהשוואה לקומפוסטים (בוצה ואשפת ערים) לא נכרה כלל ביבולי הביומאסה והחנקן (60-84 ק"ג מ"ד 4 עונות). ס"כ החזר החנקן, ביבולי 4 העונות ובחתך הקרקע עד עומק 1.8 מ', היה 150%-250% בטיפול ההיקש ו-40%-75% בטיפול הזיבול. ההחזר הגבוה בהיקש היה עקב מינרליזציה של החנקן האורגני הקרקעי (בעיקר ב-2 העונות הראשונות). הזמינות הגבוהה של חנקן הקרקע הגבילה את יעילות קליטת חנקן הזבל, ואיפשר את דליפתו לתת-הקרקע. פליטת חנקן תת-חמצני ( $N_2O$ ) מהקרקע בשדה הייתה מזערית (עד 60 ג' מ"ד לשנה), ומרביתה חלה בתקופה הראשונה (כחודש) לאחר יישום הזבלים, מה שכנראה מעיד שדנרופיקציה בתנאי השדה לא הייתה משמעותית.

יישום הזבלים העלה מאד את ריכוזי הזרחן הזמינה בקרקע (עד 60 ס"מ בקרקע החרסיתית!), יותר בקומפ' הבוצה והבמס"א ופחות בבוצה המעוכלת ובאשפה, וזאת בהתאם ליחסי N/P בזבלים. העלייה בקומפוסט הבוצה הייתה עד סדר גודל, מכ-20 לכ-200 מ"ג פ"ק"ג. כמויות הזרחן שהורחקו עם יבולי התירס (קנים וגרגרים) בכל אחת מהעונות היו קטנות ודומות בכל הטיפולים, ולא היה קשר בין לבין יבולי החנקן. לעומת זאת, בכל אחת מ-3 השנים היה מתאם מובהק ביותר בין יבולי החנקן בתירס לבין יבולי האשלגן (שהיו בסה"כ 60-80 ק"ג מ"ד 4 עונות לטיפול).

יסודות קורט ומתכות כבדות: בשלב זה נבדקו הריכוזים בקנים ובגרגרים של התירס והחיטה מהשנה השנייה, ובחסה - מכל 4 עונות הגידול בליזימטרים. לא נמצאה עדיין השפעה של טיפולי הזיבול על הקליטה בדגניים, כולל בעומס הגבוה פי שלושה. בחסה הייתה לעיתים הגדלה בריכוזי יסודות קורט חיוניים (נחושת, אבץ, ניקל, מוליבדן, בורון) בחלק מטיפולי הזיבול (בעיקר בשילוב חול ובמס"א) אך הם היו תקינים. ריכוזי המתכות הכבדות המנוטרות (As, Pb, Cd, Cu, Zn, Cr, Ni) במי-הנקז בכל 4 העונות הייתה על סף יכולת המדידה. גם דליפת האוקסיאניונים בורון ומוליבדן לא הייתה שונה הרבה בין טיפולי הבוצה.

**לסיכום:** הגורם שהגביל יבולים היה חנקן. בעומס שקול ל-50 ק"ג N כליל'ד' הזבלים חסכו 10 יחידות חנקן ואת הזרחן והאשלגן. בשלב זה איננו יכולים להעריך את תרומת החנקן לחיטה בדו-גידול. זמינות חנקן אורגני גבוהה של הקרקע הקטינה את יעילות ניצול החנקן מהזבל, ואפשרה דליפה של חנקן מינרלי. זאת הייתה כנראה גם הסיבה לכך שההבדלים ביבולי התירס בין טיפולי הזיבול בשנתיים הראשונות היו קטנים. השאלה היא האם זאת תהיה המגמה גם להבא, והאם מנת הבוצה המותרת ליישום (50 ק"ג N כליל'ד' לשנה) מספיקה לקיים את פוריות הקרקע. התשובה היא ככל הנראה שלילית הואיל וכבר בשנה השלישית יבולי התירס הגיבו במובהק לטיפולים, כנראה עקב הידלדלות החנקן האורגני הקרקעי. לאישוש השערה זאת נבדקת עתה השפעת הטיפולים על תכולות החנקן והפחמן אורגניים בקרקע. לא הייתה צבירת מתכות כבדות בצמחים (דגניים בשדה, וחסה בליזמיטרים) והן לא דלפו במי-הנקז גם לאחר 3 שנות יישום בחול. פליטת גזי חממה בכל הטיפולים הייתה נמוכה מאד, כולל ביישום הבוצות הפחות מיוצבות. מבין הזבלים, הקומפוסט מאשפת ערים היה נחות בביצועיו יחסית לזבלים האחרים אולם ההחזר מהחיסכון בדשן ביישום קומפוסט הבוצה נמוך מעלותו לחקלאי (100-180 ש"ד).

## תיאור מקיף של הפעלת המחקר

### בוצות

נבחנו בוצות המייצגות מגוון רחב של תכונות כימיות ופיזיקליות (טבלה 1) כפי שנובע מאופן הכנתן, והן: (א) בוצה בלתי-מפוסטרת שעברה עיכול אל-אווירני ("סוג ב") (מקור: מט"ש חיפה); (ב) קומפוסט מבוצה שעברה עיכול אל-אווירני (מקור: "דשן אור"-טובלן); (ג) בוצת שפד"ן מטופלת בסיד ובאפר פחם מרחף (במס"א) (מקור: חברת דן-וירו, אתר השפד"ן); (ד) קומפוסט מאשפת ערים מופרדת (מקור: ויאוליה-טובלן). להשוואה מוצג גם ההרכב של בוצת השפד"ן עצמה (ממוצע 2011). בולט שהטיפול בבוצה וייצובה, בקומפוסטציה או בסיד ובאפר פחם, מפחית מאד את תכולות החומר האורגני (עליה ב- LOI), הפחמן האורגני, החנקן והזרחן. תכולת יסודות הקורט והמתכות הנקבעת הן ע"י המקור והן ע"י החומרים המוספים לשם הייצוב (טבלה 1). לדוגמה, בוצת חיפה עשירה ב-priority pollutants, וריכוזי ניקל ואבץ אף עברו את הערך המרבי המותר. הוספת אפר פחם לבוצה העשירה את התערובת ביסודות אוקסיאניוניים (As, B, Co, V אך לא ב- Cr) והפחיתה ריכוזי מתכות אחרות (Cd, Cu, Zn, Ag).

### ניסוי השדה

מבוצע בקיבוץ רבדים (חלקה 20, קרקע ורטיסול) בדו-גידול תירס (שלחין) וחיטה (בעל). בניסוי 16 טיפולים ב-6 בלוקים באקראי: ארבעה טיפולי היקש במשטרי דישון שונים: ללא דשן כלל, חנקן ביסוד בלבד (10 ק"ג N/ד'), חנקן בראש בלבד (15 ק"ג N/ד'), דישון משקי מלא (25 ק"ג N/ד'). טיפולי זיבול בבמס"א, קומפוסט בוצה, בוצה מעוכלת וקומפוסט אשפת ערים, כל זבל ב-3 טיפולים: (א) יישום במינון שקול ל-50 ק"ג N/ד' בתוספת חנקן בראש, (ב) כנ"ל ללא חנקן בראש, (ג) זבל במנה שקולה ל-150 ק"ג N/ד' ללא חנקן ראש. היישום במנה הנמוכה חזר בכל אביב, היישום הגבוה ניתן רק ב-2011. כל חלקה בשטח 72 מ"ר. יישום הזבלים היה ביד, באשפתונים בנפח 50 ל' שהוסעו לחלקות על פלטפורמה של טרקטור. הבוצות פוזרו במגרפות והוצנעו בדיסק כבד (תמונות 1 ו-2). בדיקות קרקע לפני כל עונת גידול בטיפולי ההיקש (חוץ מהטיפול ללא דשן בכלל) הראו כי אין צורך ב- K, P. ההשקיה הייתה במי-קולחים שהוסיפו עוד כ-2.5 ק"ג N/ד'.

### בקורות בניסוי השדה:

**קרקע:** בזמן אפס (מאי 2011) נדגמה ב-12 חזרות (בדגם W בשטח החלקה) עד לעומק 1.8 מ'. נבדקו התכולות הכלליות של הפחמן והחנקן האורגניים והזרחן, מרכיביהם המינרליים והאשלגן הזמין. במהלך עונות הגידול הקרקע נדגמה פעמיים לפחות, אחרי פיזור הזבלים ואחרי הקציר, ולעומק 60 ס"מ לפחות. הדיגום היה ב-3 מקטעי עומק. ב-2012 הדיגומים היו לעומק 2 מ' (כל 20, 30 או 50 ס"מ). מדגמי הקרקע יובשו ונכתשו לגודל קטן מ-2 מ"מ. נבדקו בהם ריכוזי האמון והחנקן (במיצוי 1 N KCl, יחס 1 קרקע ל-8 נוזל, טלטול לשעה וסרכוז), זרחה ואשלגן (מיצוי בנתרן דו-פחמתי ב-pH 8.5, יחס 1 קרקע ל-20 נוזל, טלטול 3 שעות, סרכוז, הורדת ה-pH ל-2, וסינון). בחלק מהמועדים נעשו מיצויים מימיים של הקרקע (ביחס 1 קרקע ל-5 מים, טלטול שעה, סרכוז, סינון > 0.45 μL) לבדיקת EC, pH, זרחה, זרחן כללי, אשלגן, יסודות קורט ומתכות כבדות. אשלגן נבדק גם במיצוי הקרקע ב-0.01 M CaCl<sub>2</sub> (לאחר טלטול שעה ביחס 20:1 וסרכוז).

שלושה דיגומי קרקע בוצעו ב-2011, שניים ב-2012 ואחד ב-2013. הראשון ב-2011 היה ב-9/5/11, לפני התחלת הניסוי, השני - כחודשיים לאחר הפיזור וכחודש לאחר הזריעה (4/8/11), והשלישי - לאחר קציר התירס והרטבת הקרקע בגשמים הראשונים. ב-2012 בוצעו 3 דיגומים עיקריים: בחודש מאי נדגמו כמחצית מהחלקות לעומק 2 מ' (לצורך טמינת צינורות גישה למפזר נויטרונים), ביוני (35 ימים לאחר הזריעה; 49 ימים לאחר הפיזור) - דיגום ל-60 ס"מ, ובסוף אוגוסט (אחרי הקציר) - דיגום נוסף ל-2 מ'. ב-2013 בוצעו 2 דיגומים: ב-17/6/13, כחודש לאחר פיזור הזבלים, ובנובמבר. נתוני האחרון טרם סוכמו.

**אפיון כימי של הזרחן בזבלים ובקרקע:** נעשה אפיון של המוצק-קובע-מסיסות הזרחן בטיפול היבול בקרקע החול מהשכבה 0-20 ס"מ בניסוי הליזימטרים. מדגמי קרקע במשקל 5 ג' טולטלו במים מזוקקים במשך 48 שעות ביחס קרקע מים 1:5 במבחנות בנפח 50 מ"ל בלי התאמה של ה-pH וב-EC ובתוספת איד בריכוז סופי של 200 מ"ג/ל. כל טיפול היה ב-4 ליזימטרים ומכל ליזימטר בוצעה חזרה אחת. המבחנות טולטלו ב-25°C, במהירות 110 rpm. לאחר 48 ש' הן סרכוז במשך 7 דקות במהירות 4500 סל"ד, והנוזל העליון סונן המסנן ניילון 0.45 µm (מורכב על מזרק). בתסנין נבדקו pH, EC, IC ו-OC ואזי הוא הוחמץ קלות ונבדקו בו הזרחה (אורטו), הסידן הכללי והמגנין הכללי. מתוך הרכב המיצוי חושבה האקטיביות של צורוני הזרחה והסידן באמצעות תוכנת MINTEQ, מהם הורכבה דיאגרמת פאזות בהתאמה למסיסות מלחי זרחן יציבים בתחום ה-pH המצוי בקרקעות (לפי Lindsay, 1979): די-קלציום פוספט דיהדראט (DCPD); אוקטה-קלציום פוספט (OCP); בטא-טרי-קלציום פוספט (βTCP); והידרוקסי אפטיט (HAP).

**צמח:** בכל מחזור גידול נדגמו הצמחים. תירס נדגם מספר פעמים במהלך העונה: לעת הפריחה הזכרית ובסיום. בדיגום המוקדם נקצר צמח אחד בכל חלקה, ונשקל להערכת היבול היחסי. בסיום, נקצרו הצמחים לאורך 5 מ' שורה. הצמחים נספרו, הופרדו לנוף ולקלחים (שנספרו אף הם), כלל הנוף והקלחים נשקלו בשדה, ונלקחו מדגמים לקביעת המשקל היבש (80 מ"צ) ולאנליזות כימיות. הגרגרים נבדקו לאחר הפרדתם מהאשכול, והאשכול צורף לנוף ונטחן אתו לבדיקה הכימית. בגרגרים ובנוף נבדקה תכולת יסודות כללית (חנקן, זרחן, אשלגן, יסודות מאקרו אחרים, יסודות קורט ומתכות כבדות).

**פליטת גזי חממה:** המדידות בוצעו בשדה הניסוי ברבדים ב-7 טיפולים וב-4 חזרות, כלהלן: ביקורת ללא תוספת, ביקורת משקית, קומפ' בוצה עם וללא דשן ראש, בוצה מעוכלת עם וללא דשן ראש ובמס"א ללא דשן ראש. טבעות PVC (קוטר 15 ס"מ, גובה 10 ס"מ) הוחדרו לקרקע לעומק 8 ס"מ בערוגה האמצעית בחלקה בתוך שורת הצמחים. במהלך דיגום הגז הולבש על הטבעת מכסה PVC עם סיליקון לאיטום. נפח תא המדידה 1230 סמ"ק. המכסה צויד באטם גומי דרכו נשאבו 20 מ"ל גז במזרק. הגז הוזרק לבקבוקון זכוכית אטום בנפח 20 מ"ל. כל דיגום חזר שלוש פעמים: 0, 30 ו-60 דקות למן אטימת תא הדיגום. הגזים הוזרקו ל-GC המצויד בדטקטור TC (thermal conductivity detector) למדידת פד"ח (CO<sub>2</sub>), דטקטור EC (capture detector electron) למדידת חנקן תת-חמצני (חח"ח, N<sub>2</sub>O), ודטקטור FI (flame ionization detector) למדידת מתאן. מהמדידה של הגז בשלושה זמנים חושב שטף הגזים מפני הקרקע, כל עוד היה קשר לינארי (השיפוע) בין ריכוזי הגזים לזמן. דיגום הגזים נעשה בתכיפות של פעמיים בשבוע בחודש הראשון לאחר הצנעת הזבלים, פעם בשבוע בחודש השני ופעם בשבועיים לאחר מכן.

### **ניסוי ליזימטרים:**

מטרת הניסוי הייתה לבדוק בצורה מבוקרת ככל האפשר את זמינות המתכות הכבדות ויסודות הקורט במערכת קרקע-בוצה-צמח. צמחי הבוחן היה *חסה ערבית* הידוע כרגיש לזמינות יסודות אלה.

ניסוי זה מדווח בנפרד

### **ניתוח סטטיסטי:**

מבחני שונות ומבחן תחום מרובה בוצעו באמצעות JMP 10.

### **תוצאות ניסוי השדה:**

**יבולי ביומסה – תירס וחטיטה (איור 1; טבלה 2):**

תירס מספוא, שנה הראשונה (2011): לטיפולים לא הייתה השפעה על הביומסה או על מדדי היבול (נבדקו: גובה הצמחים לעת הפריחה הזכרית ובקציר הסופי, מספר הצמחים למטר, מספר הקלחים למטר, יבול הקנים, יבול הקלחים והיבול הכולל). היבול היבש הכללי היה כ-2 ט"ד' ויבול הקלחים היבש

היה 1.25 ט"ד'. ניתן להסביר זאת רק בתכולת רקע שאריתית גבוהה של יסודות הזנה בקרקע למרות שלפי מבחני הזמינות ריכוזי היסודות בקרקע לפני התחלת הניסוי היו נמוכים.

תירס מספוא, שנה השנייה (2012): יבול מרבית טיפולי הזבל עם דשן ראש ובלעדיו לא היה שונה באופן מובהק (לפי Student's t) מהיבול בהיקש המסחרי, וגם טיפולי בוצה סוג ב' וקומפ' בוצה במנה המשולשת (ללא דשן ראש) היו דומים. יבול נמוך יחסית היה בשלושת טיפולי קומפ' האשפה ובטיפול הבמס"א במנה הגבוהה. למעשה, כל הטיפולים שזוכלו במנה המשולשת ב-2011 הניבו יבולים נמוכים יחסית. נזכיר כי הזיבול בקומפ' האשפה העירונית במנה הגבוהה החל ב-2012.

חיטה לתחמיץ, חורף 2012/13: יבולי החיטה לא היו שונים באופן מובהק סטטיסטית בין מרבית הטיפולים. נמוכים במובהק מההיקש המשקי היו רק ההיקש עם דישון ראש בלבד (19% פחות מההיקש המשקי), וההיקש ללא כל תוספת (33% פחות). לבקרה נוספת נתנו 10 יח' N בייסוד בהיקש ללא דשן (יישום על שליש משטח החלקה בכל החזרות). מנה זאת הספיקה לקבלת יבולי ביומסה וחנקן דומים לאלה שהיו בהיקש המשקי: עלייה מ-1 ט' ח"י"ד' (ויבול חנקן של 12 ק"ג N\ד' בביומסה), ל-1.2 ט' ח"י"ד' ו-18 ק"ג N\ד'. בהיקש המשקי הערכים היו 1.2 ט' ח"י"ד' ו-20 ק"ג N\ד'. נראה לפיכך שכל אחד מטיפולי הזיבול סיפק לפחות את 10 יחידות החנקן שחסרו לקבלת יבול תקין.

תירס מספוא, שנה שלישית (2013): לראשונה נראתה תגובה מובהקת של יבול התירס לטיפול הזיבול. היבולים הגבוהים ביותר היו בטיפול המשקי ובבמס"א, והם היו גבוהים יחסית (ולא שונים במובהק) בטיפולי הזיבול עם דישון הראש. בטיפולי הזיבול החוזרים ללא דישון ראש (מס' 9-12) היבול היה נמוך ב-23% בממוצע מההיקש המשקי, ובזיבול החד-פעמי במנה המשולשת (מס' 13-16) היבול היה נמוך בכ-50% בממוצע מההיקש המשקי. בטיפול דישון היסוד בלבד (2) הייתה ירידה של 35% ביבול ובהיקש ללא תוספת כל היבול היה קטן ב-59% מהיבול בטיפול המשקי.

ב-3 השנים (ו-4 עונות הגידול) סה"כ יבול הביומסה בהיקש המשקי היה 7.1 טון ח"י"ד', לא שונה באופן מובהק סטטיסטית בהשוואה לכל טיפולי הזיבול ולטיפולים עם דישון יסוד או דישון ראש בלבד (טבלה 3). בטיפולי הזיבול החוזרים ללא דישון ראש היבול היה נמוך ב-7% בממוצע מההיקש המשקי, ובזיבול החד-פעמי במנה המשולשת היבול היה נמוך בכ-11% בממוצע מההיקש המשקי. רק בהיקש ללא כל תוספת (ב-3 השנים!) היבול היה מובהק סטטיסטית קטן ב-21% מהיבול בטיפול המשקי.

#### החזר חנקן בביומסה הצמחית ויעילות ניצול החנקן המוסף:

החזר של יסוד הזנה ביבול הנו סך כל כמות היסוד שנקלטה ביבולים (תירס וחיטה) במהלך 3 השנים, והיא הנה סכום המכפלות של ריכוז של כל יסוד בגרגרים ובקנים ביבולי הגרגרים והקנים, בהתאמה, בכל אחד מ-4 הגידולים.

כמות החנקן (והיסודות האחרים) שהורחקה ביבולים הייתה שונה מאד בין העונות (איור 2), והיא הייתה במתאם נמוך עם יבול הביומסה (השווה הנתונים באיורים 1 ו-2). בממוצע לכל הטיפולים (96 החלקות) הכמויות היו: 13.5 ק"ג N\ד' (תירס 2011), 24.1 (תירס 2012), 18.8 (חיטה 2012/13) ו-10.9 (תירס 2013) ק"ג N\ד'. סך כמות החנקן שנקלטה ביבולי בהיקש המשקי (4) ב-4 העונות היה 80 ק"ג N\ד' (טבלה 3; איור 2). היבולים בטיפולי הזיבול שקיבלו דשן חנקני בראש הרחיקו כמויות חנקן דומות. ממוצע הרחיקת החנקן בביומסה ביתר טיפולי הזיבול (שלא קיבלו דשן) ובטיפולי ההיקש שקיבלו דשן חנקני כלשהו (יסוד או ראש) היה כ-80% מההיקש המשקי. חלק מאלה היו נמוכים באופן מובהק סטטיסטית (כגון, טיפולי קומפ' הבוצה וקומפ' האשפה העירונית: כ-20%-30% פחות; טבלה 3). ס"כ הרחיקת החנקן בביומסה בהיקש שלא קיבל דישון כלשהו (1) היה כ-40% פחות (מובהק) מאשר בהיקש המשקי.

הערכת יעילות הניצול של היסודות (ובעיקר החנקן) מהזבל היא אחת מהמטרות העיקריות של המחקר. יעילות ניצול חנקן הזבל ע"י הגידולים הנה ס"כ ההחזר נטו של החנקן ביבולים מחולק בס"כ תשומת החנקן. ההחזר נטו של החנקן ביבול בעונה כלשהי הוא ההפרש בין ס"כ החנקן שהורחק בביומסה בטיפול כלשהו לבין ס"כ החנקן שהורחק בביומסה של ההיקש. כמות החנקן הכוללת שנקלטה בטיפול ההיקש ללא תוספת (מס' 1), ואשר מקורה העיקרי היה במינרליזציה של החנקן האורגני בקרקע (וכן במי ההשקיה), הייתה 45.3 ק"ג N\ד'. הכמות הכוללת הממוצעת שנקלטה בכל טיפולי הזיבול (78 חלקות ב-4 עונות) הייתה 69 ק"ג N\ד'. לפיכך, כמות החנקן, שנקלטה בגידולים ב-4 העונות ושמקורה היה בזבל בלבד, הייתה בממוצע 24 ק"ג N\ד'. מאחר שהזבלים הוסיפו 150 ק"ג N\ד' בכל אחד מהטיפולים, יעילות ניצול חנקן הזבל הייתה 16% בממוצע.

בפועל המצב היה מעט שונה, הואיל ובחלק מטיפולי הזיבול ניתן גם דשן חנקני, וההיקש במקרה זה אינו טיפול #1 אלא טיפול #3. כאשר הדשן נלקח בחשבון, וכאשר החישוב נעשה לגבי כל חלקה בנפרד,



מתקבל שיעילות ניצול חנקן הזבל הייתה בין 4 ל-9% כשניתן דשן חנקני בראש ובין 9 ל-14% בטיפולים ללא דשן ראש (טבלה 3). בדומה, יעילות ניצול הדשן החנקני בטיפולי ההיקש היה כ-45% בטיפולים 3 ו-4 שקיבלו דשן ראש חנקני, ו-63% בטיפול עם דשן יסוד בלבד (2) (#2) (טבלה 3).

הסיבה ליעילות הנמוכה של ניצול החנקן המוסף (דשן ולא זבל) הייתה ככל הנראה זמינות פוטנציאלית תחילית גבוהה של החנקן האורגני בקרקע עצמה, שסיפקה די חנקן ליבולי השנתיים הראשונות. כפי שצינו לעיל, השפעת הטיפולים החלה להיראות רק בשנה השלישית. כתוצאה מכך, ההבדלים בשיעורי המינרליזציה (קרי, הזמינות) של החנקן האורגני שהוסף עם הזבלים לא באו לידי ביטוי ביבול הצמחי וביבולי החנקן בגידולים. אפשרות אחרת היא, ששיעורי המינרליזציה של החנקן האורגני של הזבלים בשדה היו נמוכים מאד בהשוואה למה שנמדד במעבדה. המבחן לאפשרות הראשונה הוא בכך שתמצאנה כמויות גדולות של חנקן מינרלי בחתך הקרקע (חנקן שנצטר ממינרליזציה של החנקן האורגני הקרקעי והמוסף). המבחן לאפשרות השנייה הוא שחלה עלייה בתכולת החומר האורגני בקרקע, חומר שמקורו בזבלים שלא התפרקו.

#### החזר אשלגן וזרחן בבביומסה הצמחית

כמות האשלגן הכללית שהורחקה ביבולי התירס והחיטה בהיקש המשקי הייתה כ-80 ק"ג/ד' ומרבית הטיפולים לא נבדלו ממנו במובהק (איור 2). היחידים היו ההיקש ללא דשן (42% פחות), קומפ' האשפה ללא דשן ראש וקומפ' הבוצה במנה החד-פעמית במשולשת (בשניהם כ-25% פחות K מההיקש המשקי). ס"כ קליטת האשלגן ביבול התירס בעונה הראשונה הייתה נמוכה מאד, כ-6 ק"ג/ד' בממוצע (איור 2). בעונה השנייה הקליטה הייתה גבוהה פי 4-5 בערך אך גם בעונה זאת ההבדלים בין הטיפולים לא היו מובהקים סטטיסטית. קליטת האשלגן בחיטה לא הייתה שונה הרבה בין מרבית הטיפולים (24 ק"ג/ד' בממוצע בהיקש המשקי; איור 2). רק בהיקש ללא דשן היה ערך נמוך (13 ק"ג/ד') במובהק מההיקש המשקי.

מעניין הקשר (מובהק ביותר) שנמצא בין ריכוזי החנקן לריכוזי האשלגן בצמחי התירס בכל אחת מ-3 השנים (איור 3). בשנה הראשונה קליטת האשלגן הייתה נמוכה מאד יחסית לקליטת החנקן (0.35 ממנו, איור 3) בהשוואה ל-2 השנים הבאות (65% ו-85% מהחנקן). הקשר בין שני היסודות ידוע ומיוחס לצורך באיזון חשמלי (של החנקן) בתמיסה הנקלטת בשורש. קליטת עודפת של אמוניום בשנה הראשונה יכולה להסביר את קליטת האשלגן הנמוכה יחסית, אולם אין לנו הסבר טוב לכך מדוע דווקא אמוניום הוא שנקלט.

ההחזר הכללי של הזרחן ביבולי התירס והחיטה אינו ניתן עדיין לחישוב הואיל ונתוני עונת התירס השלישית נמצאים עדיין בבדיקה. ההבדלים בין הטיפולים בכל אחת מ-2 עונות התירס הראשונות לא היו מובהקים, הגם שכלל הרחקת הזרחן הייתה שונה מאד בין שתי השנים: 3.2 ו-5.3 ק"ג/ד' בממוצע לכל הטיפולים ב-2011 וב-2012, בהתאמה. קליטת הזרחן בחיטה לא הייתה שונה הרבה בין מרבית הטיפולים (2.5 ק"ג/ד' בממוצע; איור 2). רק בהיקש ללא דשן היה ערך נמוך (1.8 ק"ג/ד') במובהק יחסית להיקש המשקי (2.4 ק"ג/ד').

#### תכולת יסודות הזנה (K, P, N) זמינים לצמח בחתך הקרקע:

דיגום קרקע ראשון נעשה לפני התחלת המחקר (מאי 2011), ובהמשך - לפחות פעמיים בכל שנה. הדיגום במאי 2011, במאי 2012 ובאוגוסט 2012 היה לעומק 2 מ' מה שמאפשר לנו לחשב שינויים בתכולת יסודות ההזנה על בסיס חתך קרקע מלא. ב-2011 הדיגום נעשה ב-12 חזרות על כל שטח השדה וכל קידוח היה ב-6 מקטעי עומק. ב-2012 הדיגום היה במחצית או בכל 96 החלקות. בסיום המחקר (במידה שהמחקר ימשיך) מתוכנן דיגום לעומק 4 מ'.

בכל מדגמי 2011 נבדקו ה-pH, ה-EC, והריכוזים של החנקן המינרלי, הזרחן והאשלגן ה"זמינים" (לפי מציוי בנתרן דו-פחמתי), האשלגן הזמין במיצי בתמיסת  $0.01 \text{ mM CaCl}_2$  והאשלגן המסיס במים, הפחמן האורגני, החנקן האורגני והזרחן הכללי. הנתונים מוצגים בדו"ח לשנה ראשונה ולא נחזרו עליהם כאן מקוצר מקום. מכל מקום, הנתונים הללו שמשו לנו לחישוב השינויים בחתך הקרקע במהלך השנתיים וחצי הראשונות של המחקר. המדגמים מדיגום הקרקע שבוצע בראשית נובמבר 2013 נמצאים עתה בבדיקה.

#### ריכוזי החנקן המינרלי בחתך הקרקע בשדה בתקופה מאי 2011 יוני 2013:

ריכוזי החנקן המינרלי (סכום אמוניום וחנקן רובו ככולו כחנקן) בקרקע ב-3 מקטעי עומק עד 60 ס"מ מוצגים באיור 4. באיור 12 איורי משנה, המוצגים ב-4 טורים וב-3 שורות. בכל שורה מוצגים נתונים לגבי עומק קרקע אחד (0-15 ס"מ, 15-30 ס"מ, 30-60 ס"מ), ובכל טור ההשוואה היא בתוך קבוצת טיפולים

אחת. הטורים משמאל לימין הם: טיפולי הביקורת ללא זבל; טיפולי זבל במינון שקול ל-50 ק"ג N/ד' בתוספת דשן ראש; טיפולי זבל במינון שקול ל-50 ק"ג N/ד' ללא דשן ראש; וטיפולי זבל במינון שקול ל-150 ק"ג N/ד' ללא דשן ראש. באיור 5 מוצגים ריכוזי החנקן המינרלי בחתך הקרקע עד עומק 2 מ' ב-3 מועדים: מאי 2011, מאי 2012 (אחרי החורף הראשון) ואוגוסט 2012 (לאחר קציר הגידול השני). בשני האיורים, כל נקודה הנה הממוצע של 6 החלקות בטיפול (נתוני מאי 2011: ממוצע 2 עד 12 חזרות).

פיזור הזבלים ולא הדשן העלה את ריכוזי החנקן המינרלי בעיקר בשכבות הקרקע העליונות (איור 4; איור 5: אוגוסט לעומת מאי), וגם לפעילות החקלאית כשלעצמה ללא תוספת דשן (טיפול 1) הייתה השפעה מסוימת. ריכוזי החנקן המינרלי בקרקע ירדו במהלך עונת הגידול הראשונה (איור 4) אך לא במהלך עונת הגידול השנייה (איורים 4, 5). בחלק מהטיפולים הייתה ירידה בריכוזים בחורף 2012/13 בעיקר בשכבה העליונה אך גם בשכבות העמוקות יותר (איור 5). בצורה גורפת, ההבדלים בריכוזים בין הטיפולים בכל עומק בנפרד לא היו מובהקים סטטיסטית (נבדק עד סוף 2012). נראה כי בדיקה סטטיסטית פרטנית (כגון, מבחני t לצמדי טיפולים) הייתה מעלה תוצאה אחרת. ניתן לציין כי ריכוזים גבוהים יותר היו בטיפולים עם הבוצות הגולמיות: חיפה (טיפולים 5, 9, 13) ובמס"א (טיפולים 9, 11), והם היו נמוכים יחסית עם הקומפוסטים. לא ברור מדוע זבל במנה משולשת (יושם ב-2011 בטיפולים 13-15) לא העלה את ריכוזי החנקן המינרלי בקרקע יותר מאשר החומר האורגני הקרקעי עצמו (טיפול 1). בכך, דווקא קומפ' אשפת הערים (שניתן רק ב-2012) היה חריג.

#### תכולת החנקן בחתך הקרקע, החזר החנקן בקרקע והחזר כולל של החנקן המוסף:

באיור 6 מוצג השנוי בתכולת החנקן המינרלי בחתך הקרקע עד עומק 1.8 מ' בין מאי 2011 ליוני 2013. התייחסנו כאן רק לתרומה נטו של תשומות הדשן ולא הזבל, כלהלן: נמדדו הריכוזים, הכמות חושבה לפי הצפיפות הנדמית של שכבות הקרקע, מהכמות שנמצאה בכל אחד מהטיפולים הופחתה הכמות שנמצאה באותו זמן בחתך הקרקע בטיפול ללא תוספת (כמות המשקפת את המינרליזציה של החנקן האורגני הקרקעי, בהנחה שהטיפול אינו משפיעה עליה) והופחתה הכמות שהייתה בקרקע בזמן אפס (מאי 2011). הכמויות המרביות של שארית מתשומות החנקן שנמצאו בקרקע כחנקן מינרלי היו בהיקש המשקי: 47 ק"ג N/ד', ובטיפול היישום החוזר של בוצה מעוכלת (טיפולים 5 ו-9) ושל במס"א (טיפולים 7 ו-11): 40 ק"ג N/ד' וכ-35 ק"ג N/ד', בהתאמה. כמות החנקן המינרלי הממוצעת השאריתית בקרקע ביתר הטיפולים הייתה כ-12 ק"ג N/ד'. התכולה בקרקע של חנקן מינרלי שמקורו רק מהדשן או הזבל (כלומר הנמדד פחות התכולות בזמן אפס ובהיקש ללא תוספת) כשיעור מכלל החנקן שהוסף הייתה בין 20%-50% בטיפול ההיקש, 15%-28% בטיפולים של מוצרי הבוצה (בוצה, קומפ' בוצה, במס"א) ביישום החוזר, ו-4%-11% בטיפול היישום החד-פעמי הגבוה ובטיפול קומפ' אשפת הערים.

ההחזר הכולל של חנקן מינרלי במערכת קרקע-צמח ב-3 השנים בטיפול ההיקש היה בין 65%-93%, ובטיפול הזיבול למיניהם בין 8 ל-42% (טבלה 3). ההחזר הכולל הנמוך יכול לנבוע מהדחה של החנקן המינרלי שנוצר ממינרליזציה של החנקן האורגני הקרקעי והמוסף ולא מכך שחלק ניכר מהחנקן שהוסף צבל נותר בקרקע בלי שעבר מינרליזציה.

לסיכום נושא החנקן ניתן לומר כי להבנת המנגנון שהשפיע על שיעורי החזר החנקן יש השלכות מרחיקות לכת לגבי ממשק יישום הזבלים והבנת התנהגותם בקרקע. ניסוי מעבדה הראו כי קצבי המינרליזציה של החנקן האורגני בזבלים ושיעוריה שונים בתכלית בין הזבלים. אולם, ניתן לכאורה להסביר את שיעורי ההחזר הנמוכים בשדה בשימור מרבית החומר האורגני המוסף כמות שהוא, כלומר כעדות לאחידות בביודגרדציה של הזבלים בתנאי שדה. הסבר אלטרנטיבי הוא שהמינרליזציה אכן הייתה נמרצת וכתוצאה מכך הייתה הדחה רבה של חנקן מינרלי (מתחת ל-1.8 מ') וזו הקטינה את ההחזר. ממשק השימוש בזבלים וההערכה של השפעותיהם הסביבתיות יהיו שונים מאד בשני ההסברים החלופיים. הנושא יכול להיבדק (במידה שיהיה לכך מימון) ע"י בדיקה של חנקן ופחמן אורגניים בקרקע מהשדה, ע"י קידוחים לעומק, וע"י ניסוי מינרליזציה של הזבלים תוך דימוי מהימן יותר של תנאי הקרקע בשדה.

#### זרחן מינרלי "זמין פוטנציאלי לצמח" בחתך הקרקע:

עומס יישום הזבל נקבע לפי תכולת החנקן בו, וכמות הזרחן שהוספה עם הזבל הייתה תלויה ביחס N/P בזבל (טבלה 1). לפיכך, כמויות הזרחן שהוספו לקרקע בכל עונה ביישום הזבלים לפי עומס של 50 ק"ג N/ד' היו בממוצע 26, 31, 18 ו-11 ק"ג P/ד' בקומפוסט הבוצה, הבמס"א, הבוצה המעוכלת וקומפוסט האשפה, בהתאמה. ואכן, יישום הזבלים גרם לעלייה משמעותית בריכוזי הזרחן לצמחים (נבדק במיצוי בדו-פחמה) בעיקר בשכבת הקרקע העליונה (0-15 ס"מ) אך גם מתחת לה (איור 7). חדירת הזרחן לעומק בלטה כבר בעונה הראשונה לאחר יישום הבמס"א והקומפוסט בעומס היישום הגבוה, ונעשתה בולטת בשנה השלישית גם ביישום העיתי בעומס השנתי הנמוך. קומפוסט הבוצה והבמס"א העלו את

ריכוזי הזרחה הזמינה בכל השכבות במידה רבה יותר מאשר יישומי הבוצה המעוכלת וקומפ' אשפת הערים. הסיבה לכך הייתה היחס הנמוך יחסית של N/P בזבלים אלה (טבלה 1). לאחר יישום הזבלים השלישי, ריכוזי הזרחה בשכבה 0-15 ס"מ בטיפול היישום המדורג והיישום החד-פעמי הגבוה הגיעו לערכים דומים, בין 80-200 מ"ג P/kg. הריכוזים בשכבה 30-60 ס"מ בעומס החד פעמי הגבוה עלו כבר בעונה הראשונה ובטיפול העומס הנמוך הם עלו בעונה השלישית, אולם הדירוג בין הטיפולים לפי כמויות הזרחן הכללי שיושמו עם הזבלים (בהתאם ליחסי N/P בהם) נותר בעינו.

באיור 7 ניתן לראות כי היו תנודות גדולות בריכוזי הזרחה בקרקע בין דיגום אחד למשנהו, כאשר בדיגום הראשית הקיץ (בד"כ לאחר יישום זבל) הריכוזים היו גבוהים ובדיגום בסוף הקיץ הריכוזים היו נמוכים יחסית. באופן פשטני ניתן היה לייחס זאת (א) לעלייה בריכוז לאחר יישום, ו-(ב) לירידה לאחר עונת גידול עקב קליטה בצמחים. אולם נראה כי הגם ששני הגורמים אלה בודאי השפיעו, השפעתם לא הייתה בלבדית. ניתן לראות זאת מכך ש: (א) התנודות בריכוזי הזרחה הזמינה בקרקע בלטו מאד בטיפול היישום החד-פעמי ואפילו בעומק 30-60 ס"מ. (ב) עוצמת הירידה הייתה בחלק מהמקרים גדולה מכדי שתהיה עקב קליטה, (ג) ס"כ קליטת הזרחן בגידולים בכל עונה הייתה אחידה למדי בכל הטיפולים, כולל טיפולי ההיקש (איור 2) בהם ריכוזי הזרחה בקרקע היו נמוכים מאד ואחידים עם הזמן. מכאן שלא רק היישום החוזר או הקליטה גרמו לתנודות בריכוזי הזרחה הזמינה בקרקע, אלא ככל הנראה יש סיבות נוספות לכך שהנן משמעותיות מאד. לדוגמה, תהליכי שקיעה/המסה וספיחה/שחרור יכלו להשפיע על זמינות הזרחה, והם עשויים להיות משמעותיים בקרקעות חרסיתיות. הנושא חשוב, וצריך להיבדק. אין להוציא מכלל אפשרות טעויות אנוש, מאחר שקביעת ריכוזי הזרחה בקרקע הנה תהליך מורכב ובמידה רבה אמפירי, ובמהלך 3 השנים היא לא נעשתה בידי אותו אדם, ווריאציות אישיות בהליך הבדיקה יכלו אולי לתרום לתנודתיות.

התפלגות ריכוזי הזרחה הזמינה בחתך הקרקע עד עומק 2 מ' נמדדה ב-3 מועדים, מאי 2011 (זמ' אפס'), מאי 2012 ואוגוסט 2012, והשוותה למצב ההתחלתי שהיה במאי 2011 (איור 5). ניתן לראות כי כל ההשפעה של הזבלים הייתה ב-50 הס"מ העליונים של הקרקע, וכי לפחות עד סוף השנה השנייה לא הייתה חדירה של זרחה לעומק גדול יותר.

אפיון המוצקים-קובעי-מסיסות הזרחן בבוצה ובקרקע: אמדנו את האופי הכימי של הזרחה המסיסה במדגמים מהשנתיים הראשונות שנלקחו משכבת הקרקע העליונה בליזימטרים עם חול (אין כמעט ספיחה) וקרקע, ובקרקעות מהשדה (Fine and Mingelgrin, 1996). מסיסות הזרחה מוצגת באיור 8 על רקע קווים המתארים את המסיסות של מוצקי זרחן ידועים (DCPD, די-קלציום פוספט דיהדראט; OCP, אוקטה-קלציום פוספט;  $\beta$ TCP, בטא-טרי-קלציום פוספט; HAP, הידרוקסי אפטיט). ההנחה הייתה שיהיה הבדל גדול באופי הזרחן המסיס בקרקע בגלל ההבדלים הניכרים בתכונות הכימיות של הבוצות. מוצגים כל הטיפולים ב-3 הקרקעות מניסוי הליזימטרים. בפועל ההבדלים בין הזבלים ובין הקרקעות היו קטנים מאד. המסיסות של הזרחה הייתה בין זו של OCP לזו של  $\beta$ TCP ולא היה שינוי רב בצורה הכימית של הזרחן בקרקע במהלך 9 חודשי השהייה בקרקע (יולי 2011 עד אפריל 2012). גם השקיה במים שפירים או במי-קולחים לא גרמה הבדל בכימיה של הזרחן הממוס בקרקע החול (התוצאות בחול אינן מופרדות הואיל ולא היה הבדל במסיסות הזרחה בין המדגמים).

הנושא זה נמצא עתה בלימוד מעמיק.

#### תכולת אשלגן "זמין" בחתך הקרקע בעונות 2011 ו-2012:

ריכוזי האשלגן "הזמין" (לפי מיצוי בדו-פחמה) ב-3 שכבות הקרקע העליונות (0-15 ס"מ, 15-30 ס"מ, 30-60 ס"מ) מוצגים באיור 3, הבנוי כדלעיל. הפירוט לגבי התנודות בריכוזים ב-2011 ניתן הדו"ח שנה הראשונה. בתמצית, הייתה ירידה חדה ובלתי מוסברת בריכוז בכל העומקים בין זמן אפס לדיגום הראשון וירידה חדה דומה לקראת סוף העונה השנייה. ללא זיבול הערכים נשארו נמוכים גם בסוף העונה, אך הם עלו לקראת אמצע 2012, והמעניין הוא שהתגובה היא בכל 3 העומקים. בטיפול הזיבול הירידה בריכוז במקטע העליון התמידה עד סוף העונה אך ב-2 מקטעי העומק האחרים הייתה עלייה מסוימת, בעיקר בטיפול הזיבול. לזיבול במנה המשולשת לא הייתה השפעה בולטת ב-2011 או ב-2012. לטיפולים מסוימים הייתה השפעה ניכרת יותר, ובעיקר לטיפול בקומפ' אשפה עירונית בטיפול המינן הרגיל ולטיפול בקומפוסט בוצה במינן הגבוה.

נושא זמינות האשלגן דורש עמקה נוספת. לא סביר שהשינויים בריכוזיו בקרקע היו עקב קליטה ע"י הצמחים. סביר יותר להניח כי חלו שינויים בקשירתו לחלקיקי הקרקע ולא (סביר יותר) כי היו בעיות מתודולוגיות במיצויו מהקרקע.

#### ריכוזים של יסודות מאקרו אחרים, יסודות קורט ומתכות כבדות בגרגרים ב-2012:

הריכוזים הממוצעים בגרגרי התירס של יסודות בהם נמצא הבדל מובהק כלשהו בין הטיפולים מוצגים בטבלה 7, והריכוזים של מרבית יתר היסודות שנבדקו מוצגים בטבלה 8. ריכוזי סלן, ארסן וכסף היו אפס. הריכוזים המרביים של ארבעה יסודות (מגניון, סידן, ניקל, נחושת) היו בטיפולי היקש. הריכוזים המרביים של שני יסודות אחרים, מנגן ומוליבדן, היו בטיפולי במס"א. תחומי הריכוזים כולם היו בתחום התקין. השלשת עומס הזבל לא הגדילה את ריכוזי היסודות.

נעשתה האנליזה של יסודות המאקרו, הקורט ובמתכות הכבדות בקנים של צמחי התירס מ-2012 בצמחי כל 96 החלקות. בשל בעיות אנליטיות (סטיות גבוהות בתוך הטיפולים, בדיקות חוזרות מדגמיות הצביעו על טעויות בתהליך) החלטנו לגנוז את התוצאות, ולחזור על הבדיקה כולה (עיכול המדגמים ובדיקתם ב-ICP), למרות עלותה הגבוהה.

---

## פליטת גזי חממה מהקרקע בשדה ברבדים- קיץ 2012

??????????

ביקורת מסחרית עם דישון מינרלי מלא (con+N).

קומפוסט בוצה 50 ק"ג חנקן/דונם (CS).

קומפוסט בוצה 50 ק"ג חנקן/דונם + דישון חנקני בראש (CS+N).

בוצה מעוכלת 50 ק"ג חנקן/דונם (DS).

בוצה מעוכלת 50 ק"ג חנקן/דונם + דישון חנקני בראש (DS+N).

במס"א 50 ק"ג חנקן/דונם (LS).

### **תוצאות:**

פליטות פד"ח וחת"ח עיקריות נצפו בחודש הראשון לאחר הצנעת הזבלים ולדישון. כצפוי, הבוצות והדשן הגבירו את הפליטות באופן מובהק להשוואה לביקורת ללא דשן. פליטות החת"ח ירדו מאד כחודש לאחר יישום הדשנים. לעומת זאת, ריכוזי פד"ח עלו באופן די קבוע במהלך כל הניסוי, כנראה בגלל נשימת שורשי התירס שהתפתחו עם הזמן. ריכוזי המתאן בכל הטיפולים היו דומים לריכוזם האטמוספרי. שטפי החת"ח שנמדדו במהלך 85 ימי המדידה בניסוי היו: 620, 403, 85, 194, 158, 199 ו-51 ג' N\הקטר בטיפולים DS, DS+N, CS, CS+N, LS, con+N ו-con (איור 5). השטפים המצטברים התואמים עבור פד"ח היו 526, 447, 565, 564, 483, 474 ו-352 ק"ג C\הקטר (איור 6).

טיפול הבוצה המעוכלת (DS) פלט שטפי חת"ח גדולים בסדר גודל מהטיפולים האחרים, הבדל זה מובהק ומשקף את יחס C/N הנמוך שלה ואת הזמינות הביולוגית והתכולה של החנקן האורגני בה. הטיפול המשלים עם הדישון הכימי (DS+N) פלט פחות חת"ח מהטיפול של הבוצה המעוכלת בלבד בניגוד לצפוי. שטפי חת"ח מקומפוסט הבוצה (CS) היו נמוכים יחסית לשאר טיפולי הבוצה מהיותה מקור דל הן לחנקן והן לפחמן זמין. דישון בחנקן הגביר את פליטת החת"ח באופן מובהק מהביקורת אך לא הגבירה באופן מובהק את השטפים משאר הטיפולים. למרות האמור לעיל, כל השטפים היו מזעריים (60 ג'ד') בהשוואה למלאי החנקן בקרקע וצריכת הצמח (יותר מ-30 ק"גד').

יישום הבוצות הגדיל את פליטת הפד"ח באופן מובהק בהשוואה לביקורות (con, con+N). תוספת הדשן המסחרי הכימי לא הגבירה באופן מובהק את פליטות הפד"ח לעומת טיפולי הבוצות ללא דשן. טיפול קומפוסט בוצה + דשן נתן שטפים גבוהים, אך לא באופן מובהק משאר הטיפולים. פליטת פד"ח מהבמס"א ב-30 הימים הראשונים הייתה גבוהה באופן מובהק משאר הטיפולים.

## טבלה 1: הרכב ממוצע של הזבלים שיושמו ברבדים

| מרכיב<br>(בחומר היבש)              | יחידות | בוצת<br>שפד"ן | בוצת<br>חיפה | קומפוסט<br>בוצה | קומפוסט<br>אשפת ערים | במס"א<br>שפד"ן | ערך סף עליון* |             |
|------------------------------------|--------|---------------|--------------|-----------------|----------------------|----------------|---------------|-------------|
|                                    |        |               |              |                 |                      |                | בוצה          | בירקות עלים |
| חומר יבש                           | % (fw) | 22            | 20           | 59              | 60                   | 71             |               |             |
| אפר                                | %      | 23            | 24           | 53              | 64                   | 88             |               |             |
| C <sub>Organic</sub>               | - " -  | 37.7          | 38.7         | 22.2            | 19.8                 | 8.0            |               |             |
| N <sub>Total</sub>                 | - " -  | 6.39          | 6.33         | 2.07            | 1.40                 | 0.70           |               |             |
| C <sub>Org</sub> /N <sub>Org</sub> | ratio  | 6.1           | 6.3          | 12.2            | 14.6                 | 11.8           |               |             |
| N-NH <sub>4</sub>                  | mg/kg  | 1,650         | 2,000        | 2,500           | 400                  | 200            |               |             |
| P <sub>Total</sub>                 | %      | 1.3           | 2.2          | 1.3             | 0.32                 | 0.36           |               |             |
| mg/kg                              | mg/kg  | 3,525         | 2,060        | 1,030           | 546                  | 307            |               |             |
| PO <sub>4</sub> /P <sub>T</sub>    | %      | 27            | 9            | 8               | 17                   | 9              |               |             |
| N <sub>Total</sub> /P <sub>T</sub> |        | 4.9           | 2.8          | 1.6             | 4.4                  | 1.9            |               |             |
| pH (1:5)                           |        | 5.76          | 6.50         | 6.62            | 8.03                 | 12.5           |               |             |
| EC (1:5)                           | dS/m   | 5.9           | 7.8          | 6.6             | 1.4                  | 2.6            |               |             |
| As                                 | mg/kg  | 2.6           | 1.9          | 2.1             | 1.2                  | 13.3           |               | 5.0         |
| B                                  | - " -  | 42            | 29           | 53              | 29                   | 332            |               |             |
| Ca                                 | %      | 2.2           | 3.9          | 7.1             | 8.5                  | 5.6            |               |             |
| Cd                                 | mg/kg  | 2.9           | 5.0          | 1.1             | 0.3                  | 0.5            | 20            | 1.0         |
| Cr                                 | - " -  | 64            | 153          | 111             | 140                  | 77             | 400           |             |
| Cu                                 | - " -  | 149           | 540          | 234             | 37                   | 36             | 600           |             |
| Hg                                 | - " -  | < 0.5         |              |                 |                      | < 0.5          | 5             | 0.15        |
| K                                  | - " -  | 4,975         | 2,230        | 5,912           | 8,056                | 1,797          |               |             |
| Mo                                 | - " -  | 2.9           | 9.6          | 3.1             | 1.5                  | 4.2            |               |             |
| Ni                                 | - " -  | 46            | 108          | 63              | 69                   | 42             | 90            |             |
| Pb                                 | - " -  | 27            | 32           | 39              | 15                   | 30             | 200           | 1.5         |
| Zn                                 | - " -  | 945           | 3,366        | 1,170           | 120                  | 144            | 2500          |             |

\* ערך סף עליון: בבוצה – תקנות המים, המשרד להגה"ס, ירקות עלים יבשים: שירות מזון ארצי במשרד הבריאות

טבלה 2: יבולי ביומאסה ב-3 שנות הניסוי כ- % מההיקש המשקי (טיפול 4).  
 מובהקות ההבדלים בין הטיפולים נבחנה במבחן תחום מרובה Tukey-HSD ברמה של 5%.

| Treatment code*                        | Fertilizer N (kg/ha) |      | # | 2011 (corn)       | 2012 (corn) | 2012/13 (wheat) | 2013 (corn) | Overall yield 2011-13 |
|----------------------------------------|----------------------|------|---|-------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------------|
|                                        | Base                 | Side |   | % of treatment #4 |             |                 |             |                       |
| 1 Cont 0-0                             | 0                    | 0    |   | 100               | 69 d        | 77 c            | 41 f        | 78 b                  |
| 2 Cont N-0                             | 100                  | 0    | 3 | 106               | 95 bc       | 97 abc          | 66 bcdef    | 97 a                  |
| 3 Cont 0-N                             | 0                    | 150  | 3 | 100               | 84 c        | 81 bc           | 82 abcde    | 94 ab                 |
| 4 Cont N-N                             | 100                  | 150  | 3 | 100               | 100 ab      | 100 abc         | 100 ab      | 100 a                 |
| 5 SS-500+N                             | 0                    | 150  | 3 | 86                | 110 a       | 110 a           | 88 abcd     | 103 a                 |
| 6 SC-500+N                             | 0                    | 150  | 3 | 94                | 99 ab       | 100 abc         | 89 abcd     | 101 a                 |
| 7 NVS-500+N                            | 0                    | 150  | 3 | 95                | 101 ab      | 87 abc          | 110 a       | 102 a                 |
| 8 MSW-500+N                            | 0                    | 150  | 3 | 102               | 92 bc       | 98 abc          | 92 abc      | 99 a                  |
| 9 SS-500                               | 0                    | 0    | 3 | 103               | 103 ab      | 94 abc          | 65 bcdef    | 97 a                  |
| 10 SC-500                              | 0                    | 0    | 3 | 104               | 94 bc       | 103 abc         | 66 bcdef    | 95 a                  |
| 11 NVS-500                             | 0                    | 0    | 3 | 98                | 95 bc       | 105 ab          | 79 abcde    | 92 ab                 |
| 12 MSW-500                             | 0                    | 0    | 3 | 105               | 87 c        | 99 abc          | 55 def      | 87 ab                 |
| 13 SS-1500                             | 0                    | 0    | 1 | 92                | 93 bc       | 101 abc         | 57 cdef     | 88 ab                 |
| 14 SC-1500                             | 0                    | 0    | 1 | 104               | 94 bc       | 95 abc          | 42 f        | 90 ab                 |
| 15 NVS-1500                            | 0                    | 0    | 1 | 82                | 86 c        | 108 a           | 48 ef       | 88 ab                 |
| 16 MSW-1500                            | 0                    | 0    | 1 | -                 | 86 c        | 102 abc         | 46 ef       |                       |
| Commercial yield (treat #4) (dry t/ha) |                      |      |   | 20.4              | 22.3        | 12.6            | 18.1        | 71                    |

טבלה 3: ס"כ יבול הביומסה ב-3 שנות הניסוי וכמות היסודות שהורחקה בביומסה.  
מובהקות ההבדלים בין הטיפולים נבחנה במבחן תחום מרובה Tukey-HSD ברמה של 5%.

| Treatment code* | Fertilizer N (kg ha <sup>-1</sup> ) |      |    | Overall biomass 2011-13 | Crop N yield 2011-13 | Crop use of manure N** | N recovery in crops & soil |
|-----------------|-------------------------------------|------|----|-------------------------|----------------------|------------------------|----------------------------|
|                 | Base                                | Side | #  | dry t ha <sup>-1</sup>  | kg ha <sup>-1</sup>  | % of applied           |                            |
| 1 Cont 0-0      | 0                                   | 0    |    | 56 b                    | 467 d                | -                      | -                          |
| 2 Cont N-0      | 100                                 | 0    | 3  | 69 a                    | 656 abc              | 63                     | 88                         |
| 3 Cont 0-N      | 0                                   | 150  | 3  | 67 ab                   | 678 abc              | 47                     | 65                         |
| 4 Cont N-N      | 100                                 | 150  | 3+ | 71 a                    | 797 ab               | 44                     | 93                         |
| 5 SS-500+N      | 0                                   | 150  | 3  | 73 a                    | 842 a                | 9                      | 32                         |
| 6 SC-500+N      | 0                                   | 150  | 3  | 72 a                    | 794 ab               | 6                      | 26                         |
| 7 NVS-500+N     | 0                                   | 150  | 3  | 72 a                    | 792 ab               | 6                      | 21                         |
| 8 MSW-500+N     | 0                                   | 150  | 3  | 70 a                    | 751 abc              | 4                      | 8                          |
| 9 SS-500        | 0                                   | 0    | 3  | 69 a                    | 671 abc              | 14                     | 42                         |
| 10 SC-500       | 0                                   | 0    | 3  | 68 a                    | 637 bcd              | 12                     | 26                         |
| 11 NVS-500      | 0                                   | 0    | 3  | 65 ab                   | 682 abc              | 14                     | 30                         |
| 12 MSW-500      | 0                                   | 0    | 3  | 62 ab                   | 568 cd               | 7                      | 11                         |
| 13 SS-1500      | 0                                   | 0    | 1  | 63 ab                   | 614 bcd              | 10                     | 14                         |
| 14 SC-1500      | 0                                   | 0    | 1  | 64 ab                   | 600 cd               | 9                      | 15                         |
| 15 NVS-1500     | 0                                   | 0    | 1  | 63 ab                   | 655 abc              | 12                     | 24                         |
| 16 MSW-1500     | 0                                   | 0    | 1  | -                       | -                    | -                      | -                          |



טבלה 7: ריכוזים של יסודות (מ"ג/ק"ג) בגרגרי התירס מניסוי השדה ברבדים (נתוני 2012) בהם נמצא הבדל מובהק בין טיפולים כלשהם (המובהקות הנה לפי t Students או לפי Tukey-Kramer HSD שניהם ברמה של 5%).

| Treatment     | Mg<br>(Students' t) | Ca<br>(Students' t) | Mn<br>(Student' t) | Ni<br>(T-K HSD) | Cu<br>(Students' t) | Mo<br>(T-K HSD) |
|---------------|---------------------|---------------------|--------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| 1 Cont 0-0    | 1,132 abcde         | 44 a                | 5.5 bcd            | 0.44 A          | 1.52 abcde          | 0.13 abcd       |
| 2 Cont N-0    | 1,030 e             | 31 bcd              | 4.8 d              | 0.29 Ab         | 1.34 de             | 0.09 d          |
| 3 Cont 0-N    | 1,027 e             | 38 abc              | 4.8 d              | 0.21 B          | 1.46 bcde           | 0.11 bcd        |
| 4 Cont N-N    | 1,267 a             | 34 abcd             | 6.3 ab             | 0.17 B          | 1.75 a              | 0.10 d          |
| 5 SS-500+N    | 1,108 bcde          | 24 d                | 5.1 d              | 0.17 B          | 1.51 abcde          | 0.11 bcd        |
| 6 SC-500+N    | 1,204 abc           | 36 abcd             | 6.2 abc            | 0.17 B          | 1.66 abc            | 0.10 d          |
| 7 NVS-500+N   | 1,261 ab            | 40 abc              | 6.5 a              | 0.22 B          | 1.68 ab             | 0.15 ab         |
| 8 MSW-500+N   | 1,120 abcde         | 30 cd               | 5.4 cd             | 0.19 B          | 1.59 abcd           | 0.09 d          |
| 9 SS-500-0    | 1,041 de            | 34 abcd             | 4.9 d              | 0.28 Ab         | 1.42 cde            | 0.09 d          |
| 10 SC-500-0   | 1,099 cde           | 42 ab               | 5.4 bcd            | 0.28 Ab         | 1.50 abcde          | 0.10 cd         |
| 11 NVS-500-0  | 1,186 abcd          | 40 abc              | 5.5 bcd            | 0.22 B          | 1.66 abc            | 0.15 a          |
| 12 MSW-500-0  | 1,017 e             | 37 abc              | 5.2 cd             | 0.33 Ab         | 1.32 e              | 0.10 d          |
| 13 SS-1500-0  | 1,114 bcde          | 33 abcd             | 4.9 d              | 0.29 Ab         | 1.43 bcde           | 0.12 abcd       |
| 14 SC-1500-0  | 1,026 de            | 32 bcd              | 4.8 d              | 0.33 Ab         | 1.49 abcde          | 0.11 abcd       |
| 15 NVS-1500-0 | 1,102 cde           | 35 abcd             | 5.1 d              | 0.29 Ab         | 1.43 bcde           | 0.14 abc        |
| 16 MSW-1500-0 | 1,094 cde           | 42 ab               | 5.6 Abcd           | 0.37 Ab         | 1.54 abcde          | 0.13 abcd       |
| Average       | 1,114               | 36                  | 5.4                | 0.27            | 1.52                | 0.11            |
| P             | 0.02                | 0.08                | 0.007              | 0.0002          | 0.06                | <.0001          |

טבלה 8: הריכוז הממוצע (מ"ג/ק"ג) של היסודות בגרגרי התירס בשדה ברבדים (נתוני 2012)

| Zn    | Average |        | Quantification |
|-------|---------|--------|----------------|
| Level | (mg/kg) | P      | limit (mg/kg)  |
| B     | 18      |        |                |
| Ca    | 36      | 0.083  |                |
| Cd    | bql     |        | 0.035          |
| Co    | bql     |        | 0.035          |
| Cr    | 0.11    |        | 0.035          |
| Cu    | 1.5     | 0.062  |                |
| Fe    | 17      |        |                |
| K     | 4,746   |        |                |
| Li    | bql     |        | 0.035          |
| Mg    | 1,114   | 0.017  |                |
| Mn    | 5.4     | 0.007  |                |
| Mo    | 0.11    | <.0001 | 0.17           |
| Na    | 13      |        |                |
| Ni    | 0.27    | 0.000  |                |
| P     | 3,397   |        |                |
| Pb    | 0.12    |        | 0.35           |
| S     | 1,144   |        |                |
| Sr    | 0.16    | 0.049  |                |
| V     | bql     |        |                |

נ/ך – מתחת סף הכימות. אשר נקבע לפי הריכוז המזערי של היסוד בתמיסת הסטנדרט X יחס המיהול (20). סף הגילוי יכול להיות נמוך מזה.

).

טבלה 11: ריכוזי יסודות (מ"ג/ק"ג) נבחרים בצמחי חסה מהגידול בליזימטרים באתרי רבדים ובית דגן: חורף 2011/12 (עונה שנייה לאחר היישום הראשון של הבוצות)

| <b>Treatment</b>               | <b>As</b> | <b>Cd</b> | <b>Pb</b> | <b>B</b> | <b>Mo</b> | <b>Zn</b> | <b>Cu</b> | <b>P</b> | <b>Mn</b> | <b>Ni</b> | <b>Fe</b> |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Dry lettuce-upper bound</b> | 5         | 1         | 1.5       |          |           |           |           |          |           |           |           |
| <b>Dune sand</b>               |           |           |           |          |           |           |           |          |           |           |           |
| <b>Unamended</b>               | 0.12      | 0.42ab    | 0.20      | 49       | 0.57      | 27        | 3.2       | 3,432    | 161ab     | 1.3 a     | 228       |
| <b>NVS-50</b>                  | 0.12      | 0.26 b    | 0.18      | 48       | 1.15      | 31        | 4.2       | 4,227    | 95 b      | 0.9 ab    | 192       |
| <b>Sludge</b>                  | 0.18      | 0.81 a    | 0.35      | 51       | 0.89      | 72        | 5.1       | 5,992    | 229 a     | 1.6 a     | 314       |
| <b>Sludge compost</b>          | 0.07      | 0.20 b    | 0.10      | 43       | 0.40      | 37        | 2.8       | 4,567    | 108 b     | 0.5 b     | 151       |
| <b>P</b>                       |           | 0.009     |           |          |           |           |           |          | 0.018     | 0.057     |           |
| <b>Loess (silty clal loam)</b> |           |           |           |          |           |           |           |          |           |           |           |
| <b>Unamended</b>               | 0.04      | 0.10      | 0.03      | 53       | 0.82      | 27        | 7.8       | 5,000    | 61        | 1.2       | 178       |
| <b>NVS-50</b>                  | 0.07      | 0.10      | 0.16      | 48       | 1.11      | 24        | 6.2       | 4,732    | 52        | 0.9       | 185       |
| <b>Vertisol (clay)</b>         |           |           |           |          |           |           |           |          |           |           |           |
| <b>Unamended</b>               | 0.13      | 0.32      | 0.41      | 38       | 0.75      | 44        | 9.8       | 5,082    | 75        | 1.3       | 340       |
| <b>NVS-50</b>                  | 0.10      | 0.16      | 0.09      | 44       | 1.05      | 33        | 5.6       | 3,785    | 50        | 0.7       | 120       |
| <b>NVS-150</b>                 | 0.10      | 0.26      | 0.34      | 45       | 1.16      | 43        | 8.3       | 4,862    | 66        | 1.2       | 282       |
| <b>Sludge compost</b>          | 0.05      | 0.22      | 0.19      | 47       | 0.81      | 51        | 8.1       | 5,439    | 64        | 1.5       | 230       |
|                                |           |           |           |          |           |           |           |          |           |           |           |
| <b>Quantification limits</b>   | 0.28      | 0.05      | 0.7       |          | 0.56      |           |           |          |           |           |           |

טבלה 12: ריכוזי יסודות (מ"ג/ק"ג) נבחרים בצמחי החסה מהגידול בליזימטרים באתרי רבדים ובית דגן: עונת הקיץ 2012 (עונת גידול שלישית, מיד לאחר היישום השני של הבוצות)

| <b>Dune sand</b>    | <b>As</b> | <b>Cd</b> | <b>Pb</b> | <b>B</b> | <b>Mo</b> | <b>Zn</b> | <b>Cu</b> | <b>P</b> | <b>Mn</b> | <b>Ni</b> | <b>Fe</b> |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Unamended</b>    | 0.12      | 0.50 ab   | 0.09      | 46 b     | 0.30 b    | 37 b      | 4.2 c     | 4,867 c  | 210 ab    | 1.0 b     | 189       |
| <b>NVS-50</b>       | 0.17      | 0.29 b    | 0.11      | 75 a     | 1.01 a    | 48 b      | 7.5 a     | 5,166 bc | 109 b     | 0.9 b     | 202       |
| <b>Sludge</b>       | 0.13      | 0.98 a    | 0.08      | 44 b     | 0.20 b    | 110 a     | 6.5 ab    | 6,594 ab | 365 a     | 1.6 a     | 205       |
| <b>Sludge comp.</b> | 0.13      | 0.50 ab   | <0.15     | 39 b     | 0.38 b    | 61 b      | 5.6 bc    | 6,578 a  | 224 ab    | 0.8 b     | 176       |
| <b>P</b>            |           | 0.014     |           | <.0001   | <.0001    | 0.0001    | 0.0005    | 0.002    | 0.011     | 0.003     |           |
| <b>Loess scl</b>    |           |           |           |          |           |           |           |          |           |           |           |
| <b>Unamended</b>    | 0.02 b    | 0.07 b    | 0.08      | 37 b     | 0.54 b    | 32        | 8.0       | 4,805    | 77        | 1.1 a     | 201       |
| <b>NVS-50</b>       | 0.15 a    | 0.11 a    | 0.13      | 57 a     | 0.93 a    | 42        | 8.2       | 4,565    | 72        | 0.8 b     | 157       |
| <b>P</b>            | <0.001    | 0.031     |           | 0.027    | 0.015     |           |           |          |           | 0.008     |           |
| <b>Vertisol c.</b>  |           |           |           |          |           |           |           |          |           |           |           |
| <b>Unamended</b>    | 0.13      | 0.20      | 0.29      | 35       | 0.30 b    | 46 bc     | 9.3       | 6,490    | 71        | 2.4       | 385       |
| <b>NVS-50</b>       | 0.22      | 0.27      | 0.23      | 47       | 0.80 a    | 40 c      | 8.4       | 5,140    | 60        | 1.8       | 325       |
| <b>NVS-150</b>      | 0.13      | 0.27      | 0.32      | 46       | 0.76 a    | 53 ab     | 11.7      | 6,920    | 71        | 1.6       | 291       |
| <b>Sludge comp.</b> | 0.09      | 0.24      | 0.31      | 37       | 0.38 ab   | 65 a      | 9.2       | 6,614    | 66        | 1.9       | 329       |
| <b>P</b>            |           |           |           |          | 0.0098    | 0.0006    |           |          |           |           |           |

## מקרא לאיורים

**איור 1:** יבול ביומאסה ב-4 העונות, 3 עונות תירס ועונה של חיטה. 4 המסגרות הן (א) טיפולי הביקורת ללא זבל (0-0: ללא דשן, 10-0: 10 יח' N ביסוד, 0-15: 15 יח' N בראש, 10-15: טיפול משקי חנקן ביסוד ובראש); (ב) טיפולי זבל במינון שקול ל-50 ק"ג N/ד' בתוספת חנקן בראש; (ג) טיפולי זבל במינון שקול ל-50 ק"ג N/ד' ללא דשן ראש; (ד) טיפולי זבל במינון שקול ל-150 ק"ג N/ד' ללא דשן ראש. SS: בוצה סוג ב', SC: קומפ' בוצה, NVS: במס"א, MSW: קומפ' אשפת ערים.

**איור 2:** יבול יסודות הזנה בצמחי התירס ב-3 עונות. הטיפולים הנם כבאיור 1.

**איור 3:** הקשר בין ריכוזי האשלגן לבין ריכוזי החנקן בצמחי התירס.

**איור 4:** ריכוזי החנקן המינרלי (סכום אמוניום וחנקן, רובו ככולו כחנקן) בקרקע בשכבה 0-60 ס"מ. האיור בנוי מ-12 איורי משנה, המוצגים ב-4 טורים וב-3 שורות. בכל שורה נתונים לגבי עומק קרקע אחד (0-15 ס"מ, 15-30 ס"מ, 30-60 ס"מ), ובכל טור מוצגת קבוצת טיפולים אחת: הטורים משמאל לימין הם: טיפולי הביקורת ללא זבל; טיפולי זבל במינון שקול ל-50 ק"ג N/ד' בתוספת חנקן בראש; טיפולי זבל במינון שקול ל-50 ק"ג N/ד' ללא דשן ראש; וטיפולי זבל במינון שקול ל-150 ק"ג N/ד' ללא דשן ראש. ב-2011 היו 3 מועדי דיגום, הראשון - זמן אפס (לפני פיזור הזבלים, 9/5/11), וב-2012 שניים - בינוי, כחודש לאחר פיזור הזבלים, ובאוגוסט (לאחר הקציר המסחרי).

**איור 5:** ריכוזי החנקן המינרלי בקרקע בשכבה 0-200 ס"מ במאי 2011 (לפני התחלת הניסוי), במאי 2012 (אחרי החורף הראשון) ובסוף אוגוסט 2012 (אחרי עונת התירס השנייה). כל נקודה היא ממוצע של 6 חזרות. במאי 2011 אלו הן 2 חזרות (בעומק) עד 12 חזרות.

**איור 6:** השינויים בתכולת היסודות P, N ו-K בחתך הקרקע בשכבה 0-180 ס"מ בין מאי 2011 (טרם הניסוי) לבין יוני 2013 (לאחר היישום השלישי של הזבלים). החישוב בוצע לפי התכולה בשכבה 0-60 ס"מ ביוני 2013 + התכולה בשכבה 60-180 ס"מ באוג' 2012. מערכים אלה הופחתו ערכי טרום הניסוי והשינוי שחל בטיפול ההיקש ללא כל תוספת (#1). הערכים הנם ממוצעים וטעויות תקן של 6 חזרות. ההבדל ביניהם לא היה מובהק סטטיסטית ( $p > 0.05$ ).

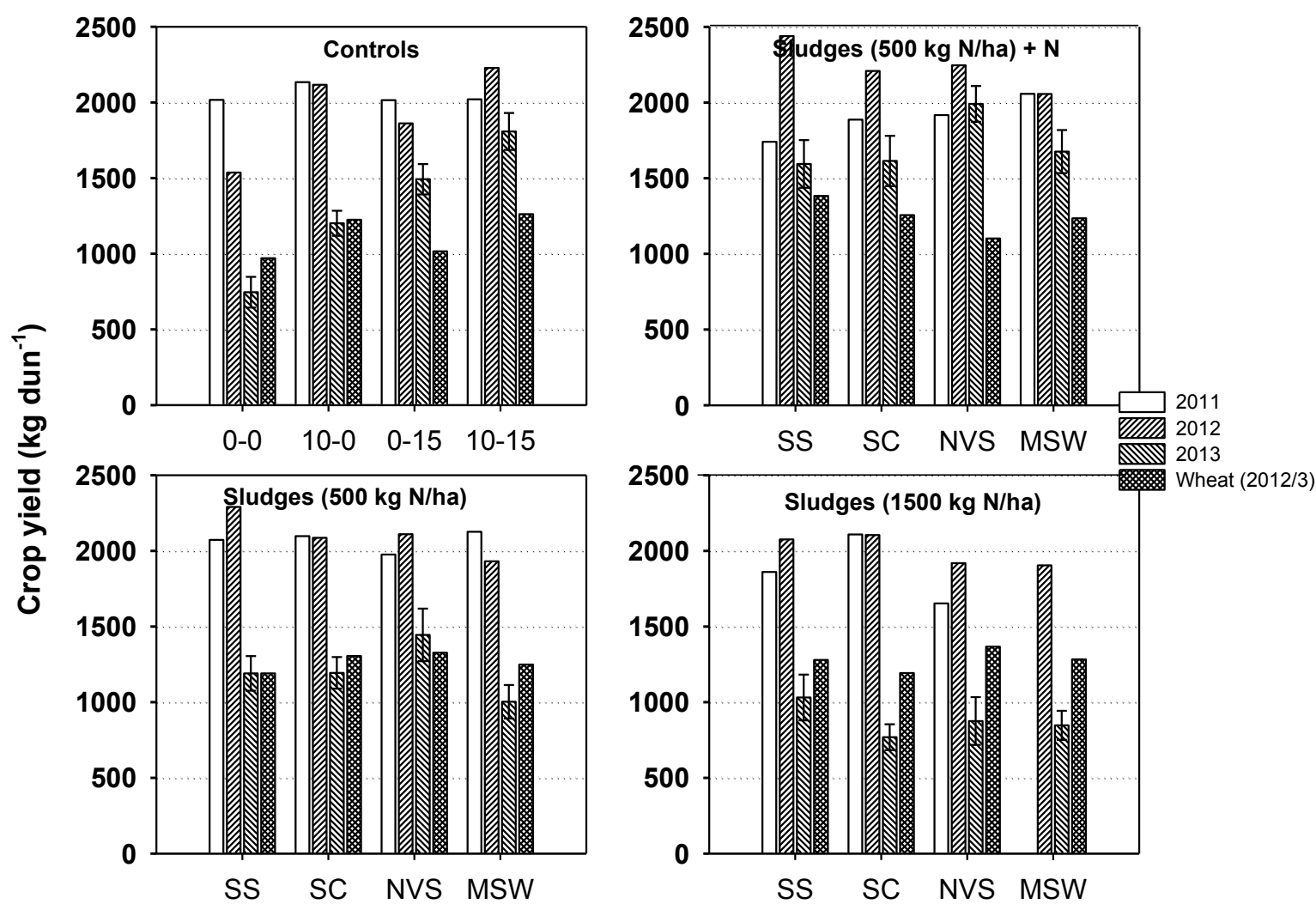
**איור 7:** ריכוזי זרחן מתמצה בדו-פחמה בקרקע בשכבה 0-60 ס"מ (המשך התיאור ראה באיור 4).

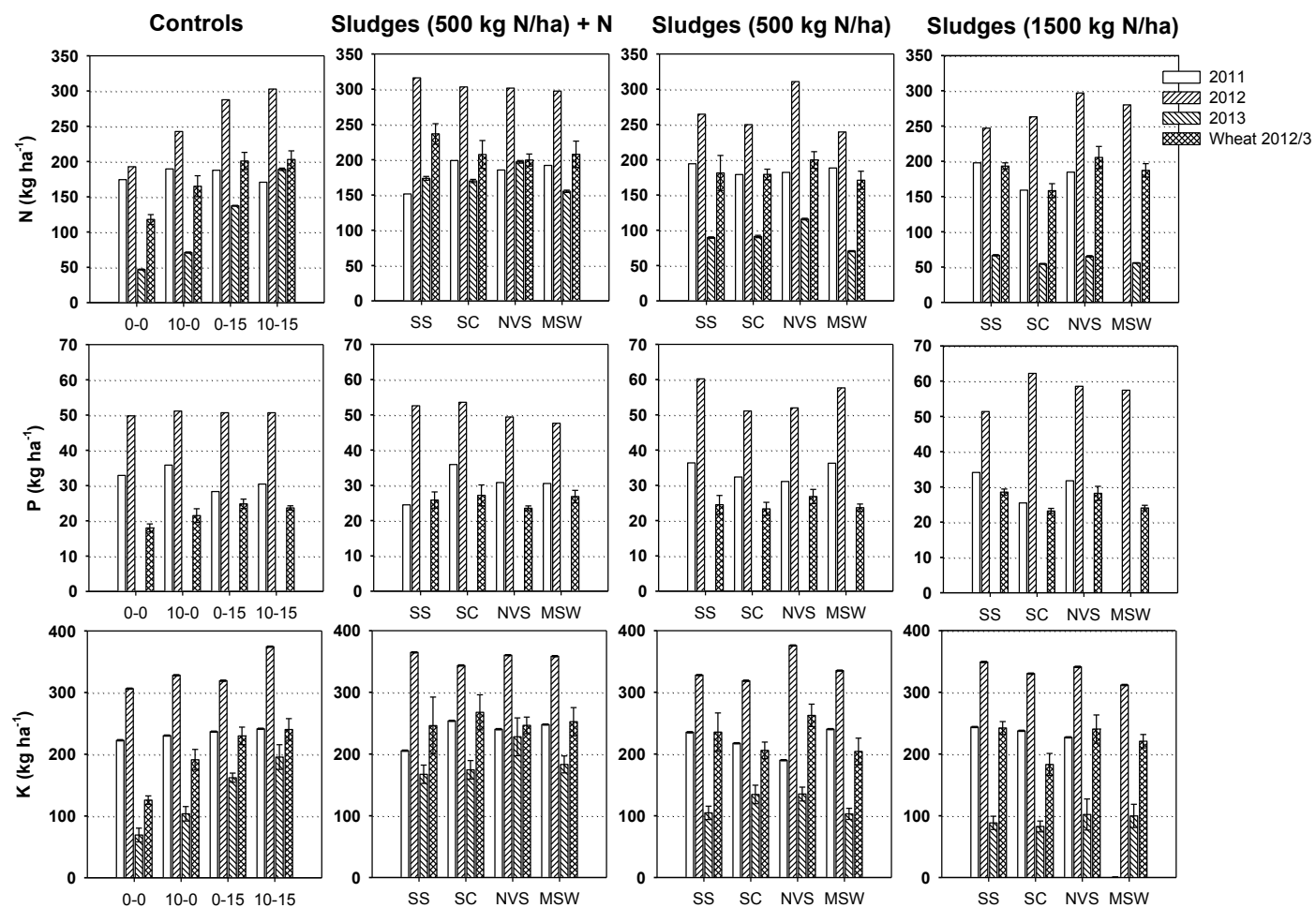
**איור 8:** אפיון המוצקים-קובעי-מסיסות הזרחן בטיפולים בקרקע החול מניסוי הליזימטרים. מסיסות צורוני הזרחה חושבה באמצעות תוכנת MINTEQ לפי הרכב מיצוי הקרקע ביחס 1:5 קרקע:מים (EC, pH, ריכוזי זרחה, סידן, מגניזיום, פחמה מסיסה, חא"מ). הקווים חושבו על פי מכפלות המסיסות של מוצקי זרחן ידועים (DCPD, די-קלציום פוספט דיהדראט; OCP, אוקטה-קלציום פוספט; TCP $\beta$ , בטא-טרי-קלציום פוספט; HAP, הידרוקסי אפטיט).

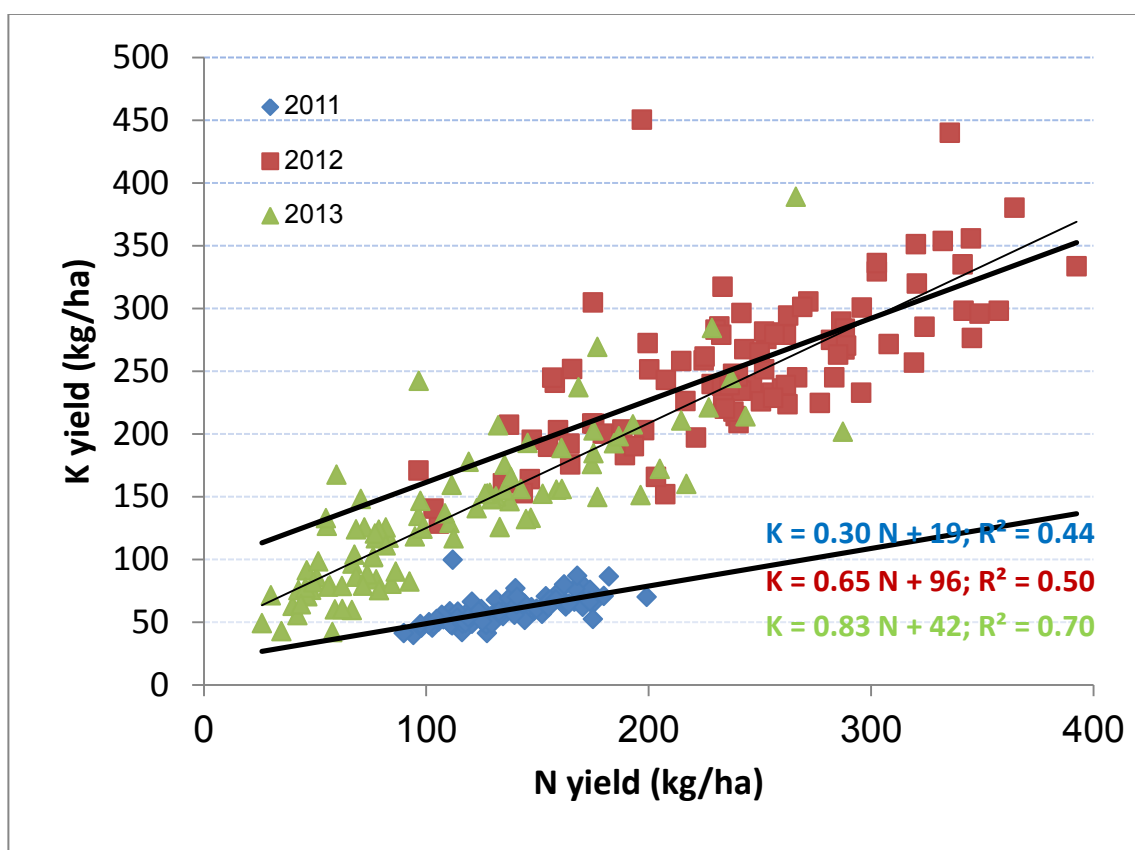
**איור 9:** ריכוזי אשלגן מתמצה בדו-פחמה בקרקע בשכבה 0-60 ס"מ. (המשך התיאור ראה באיור 1).

**איור 10:** שטפי חת"ח ( $N_2O$ ) מצטברים מהטיפולים השונים בשדה התירס ברבדים במהלך 85 ימי המדידה

**איור 11:** שטפי פד"ח מצטברים מהטיפולים השונים בשדה התירס ברבדים במהלך 85 ימי הניסוי

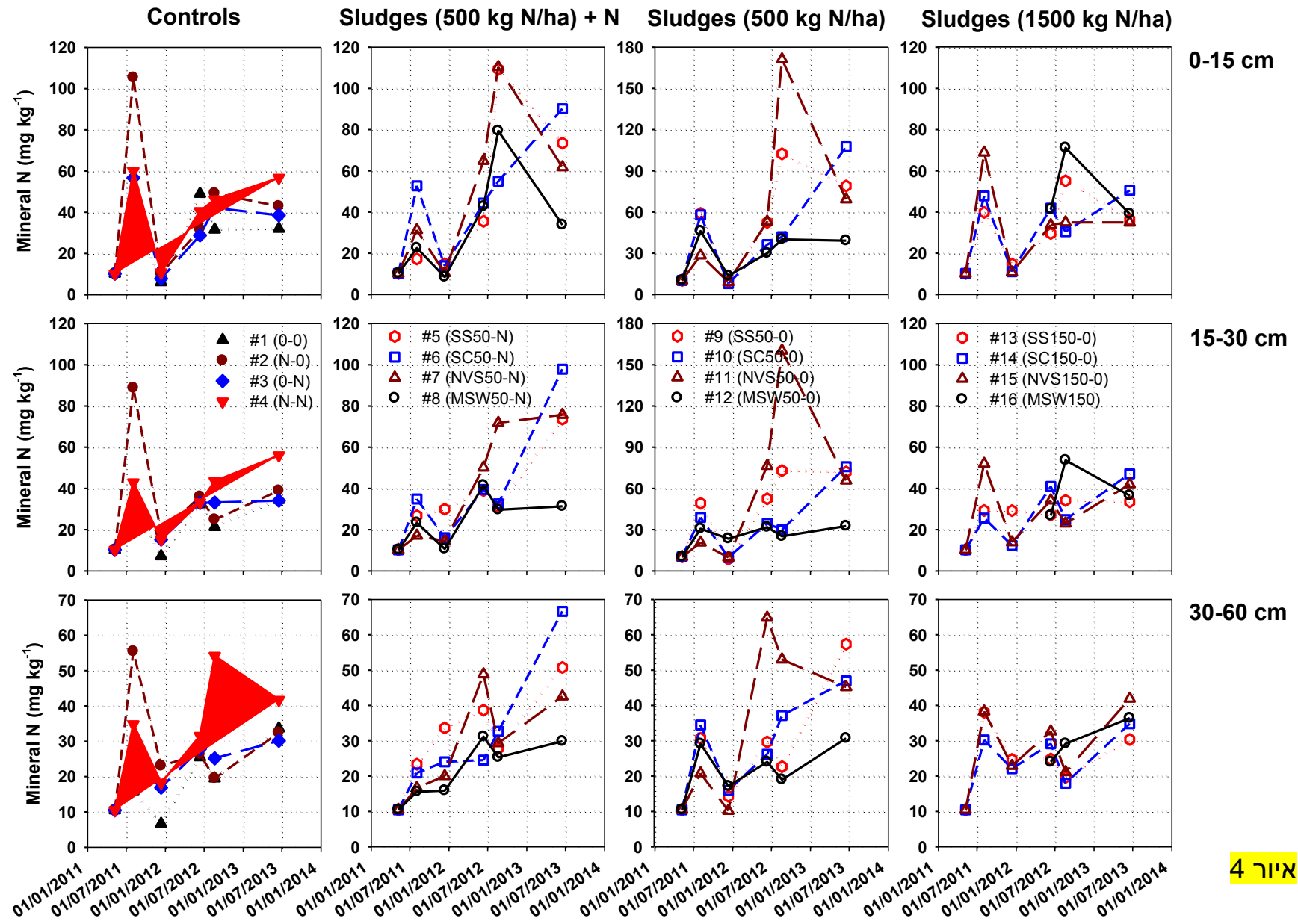


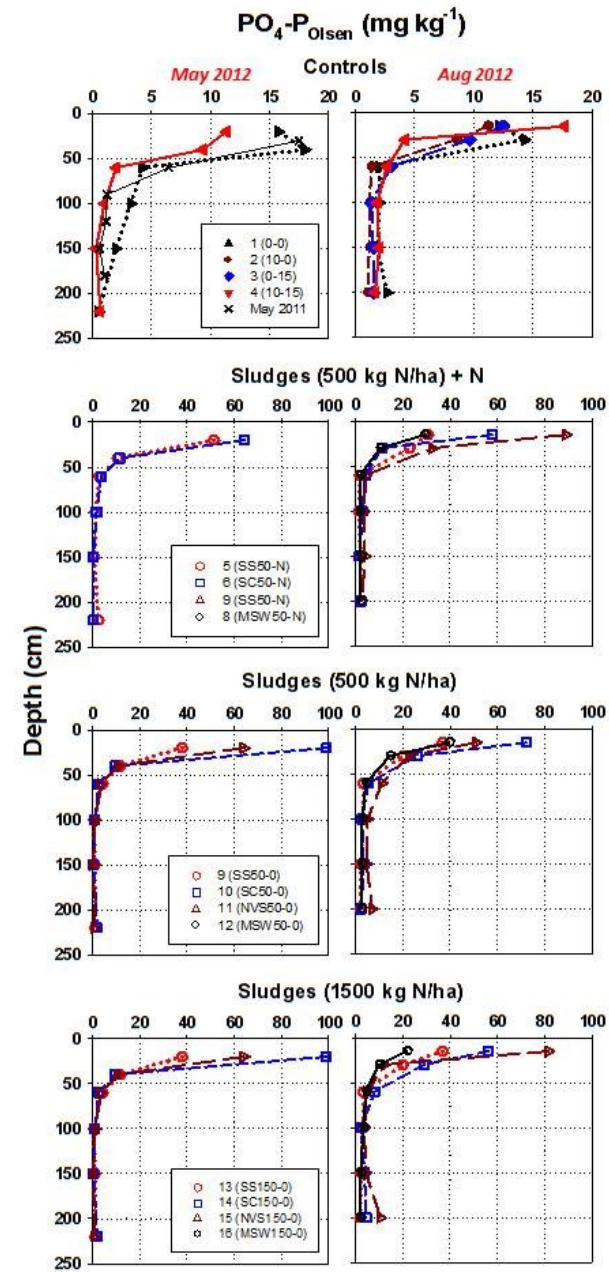
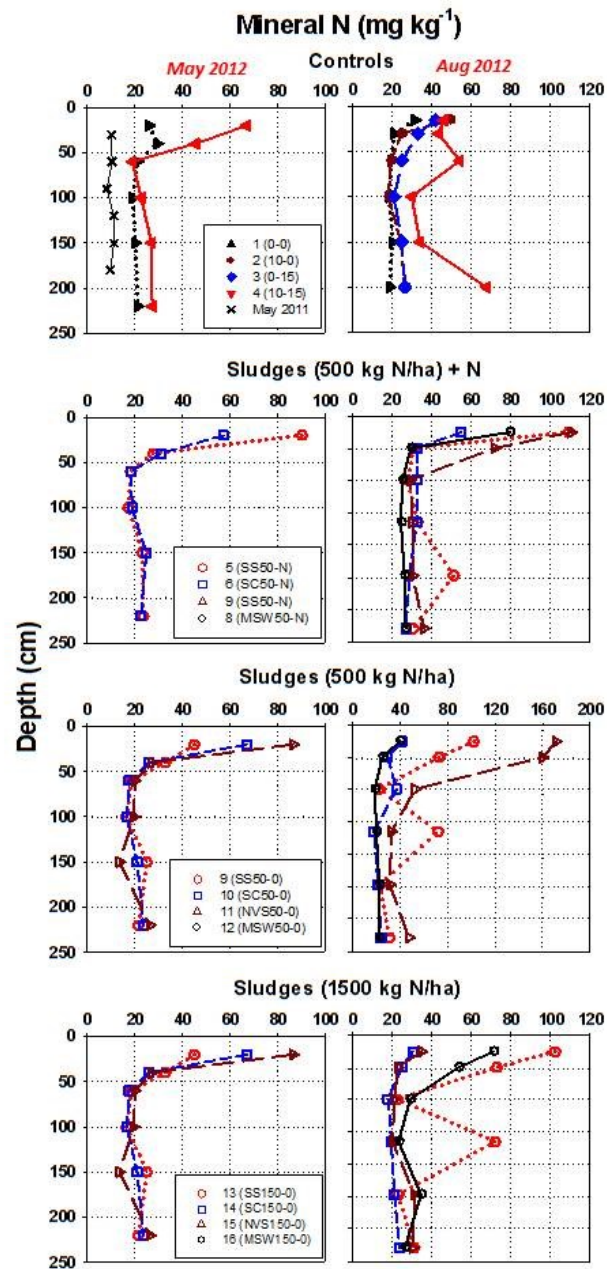




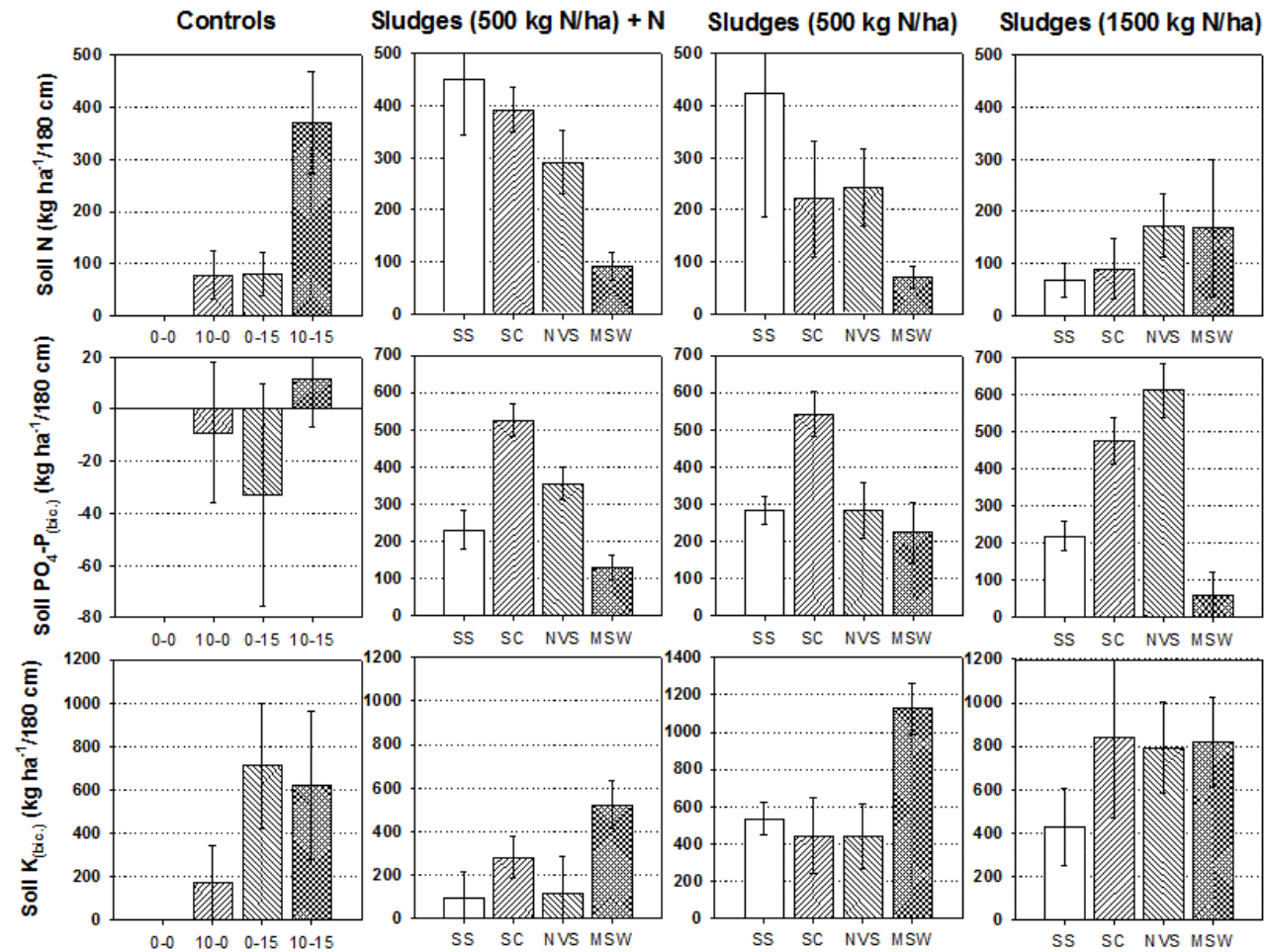
איור 3

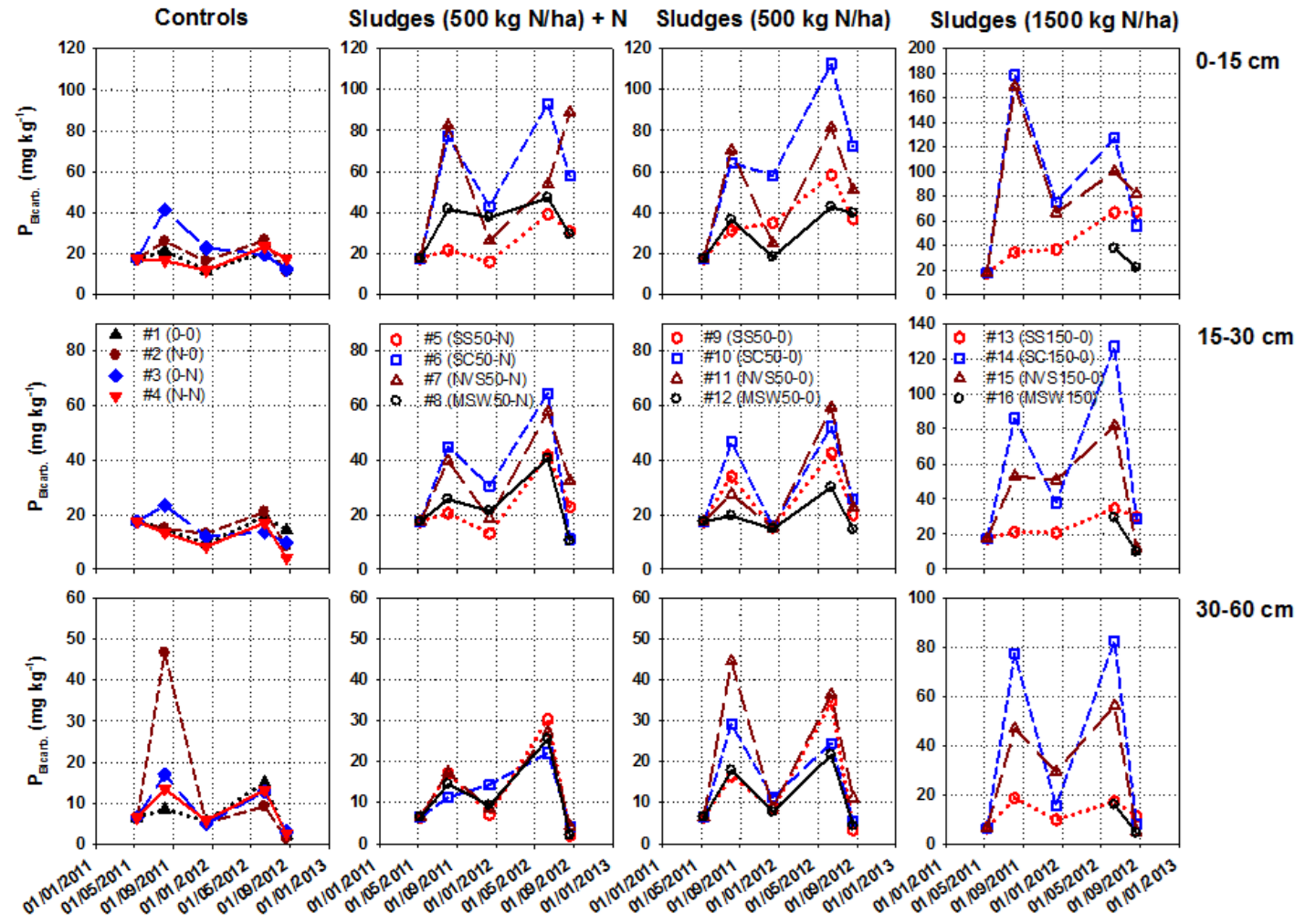


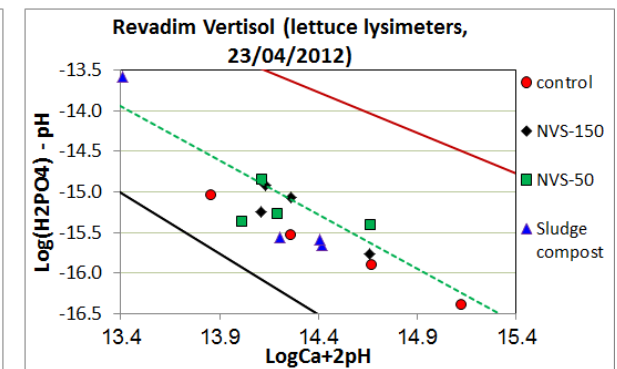
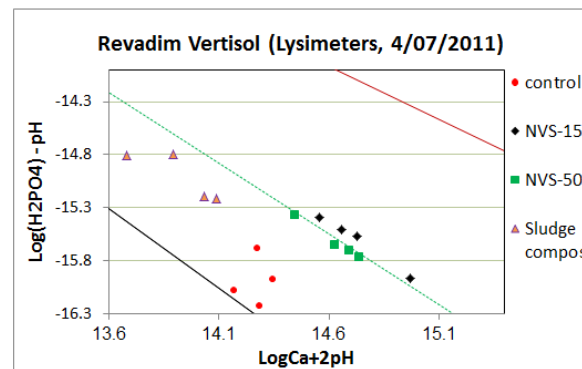
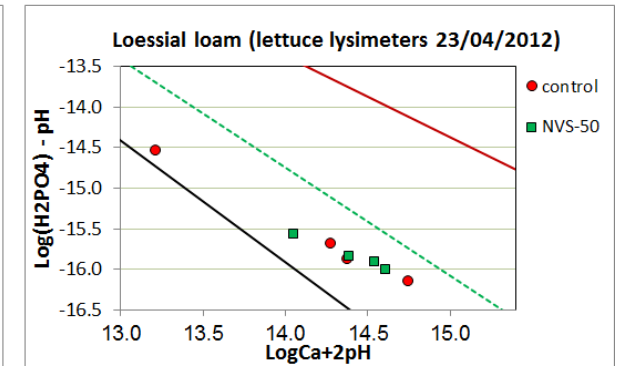
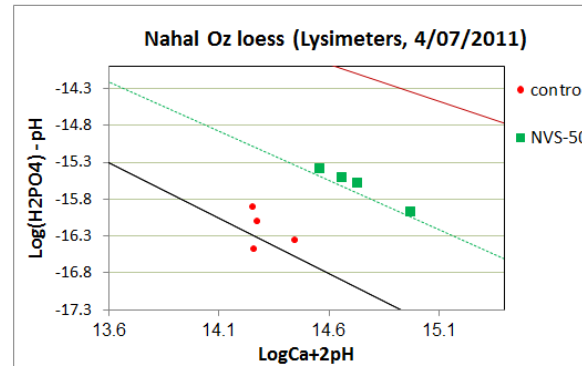
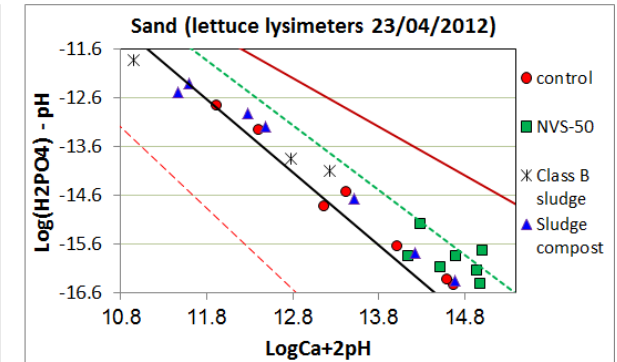
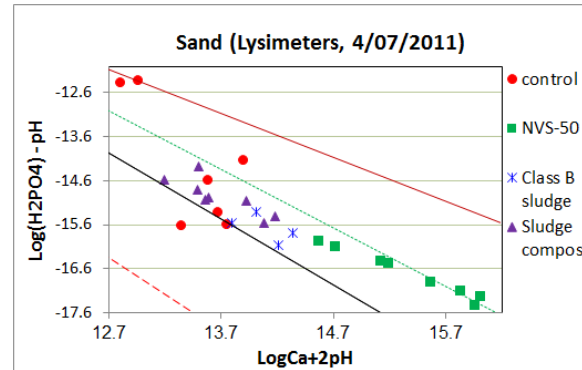




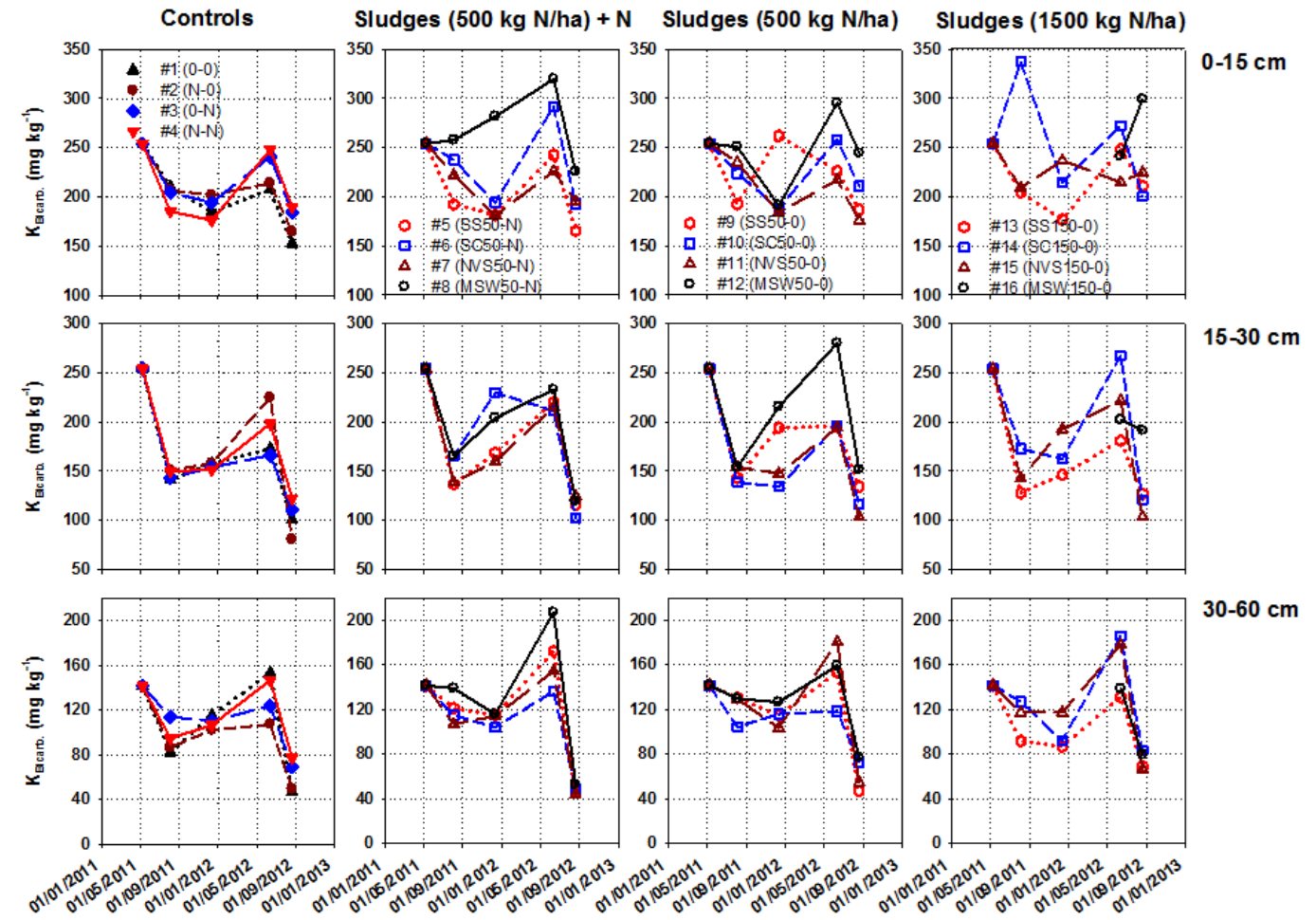
השינויים בתכולת היסודות בחתך הקרקע עד עומק 1.8 מ' לאחר היישום השלישי (יוני 2013)  
(סכום 0-60 ס"מ ביוני 2013, ו-60-180 ס"מ באוג' 2012; בהפחתת ההתחלה והשינוי בטיפול 0-0)

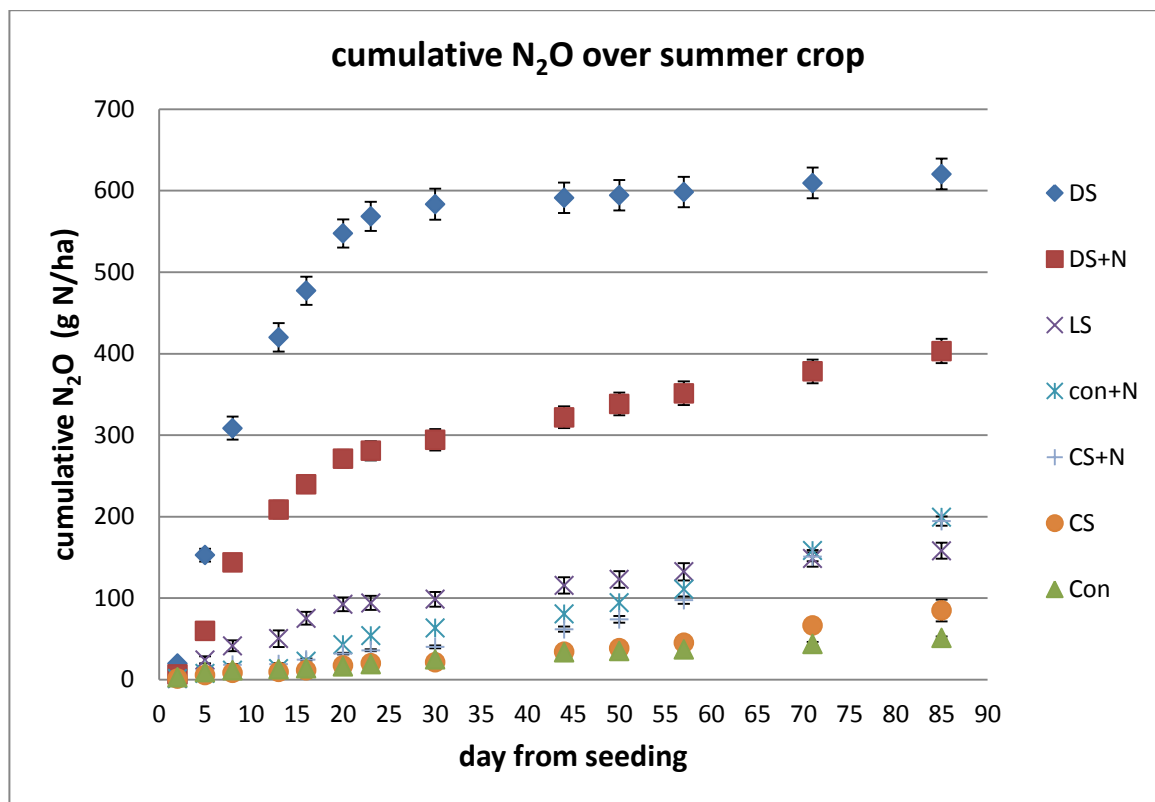




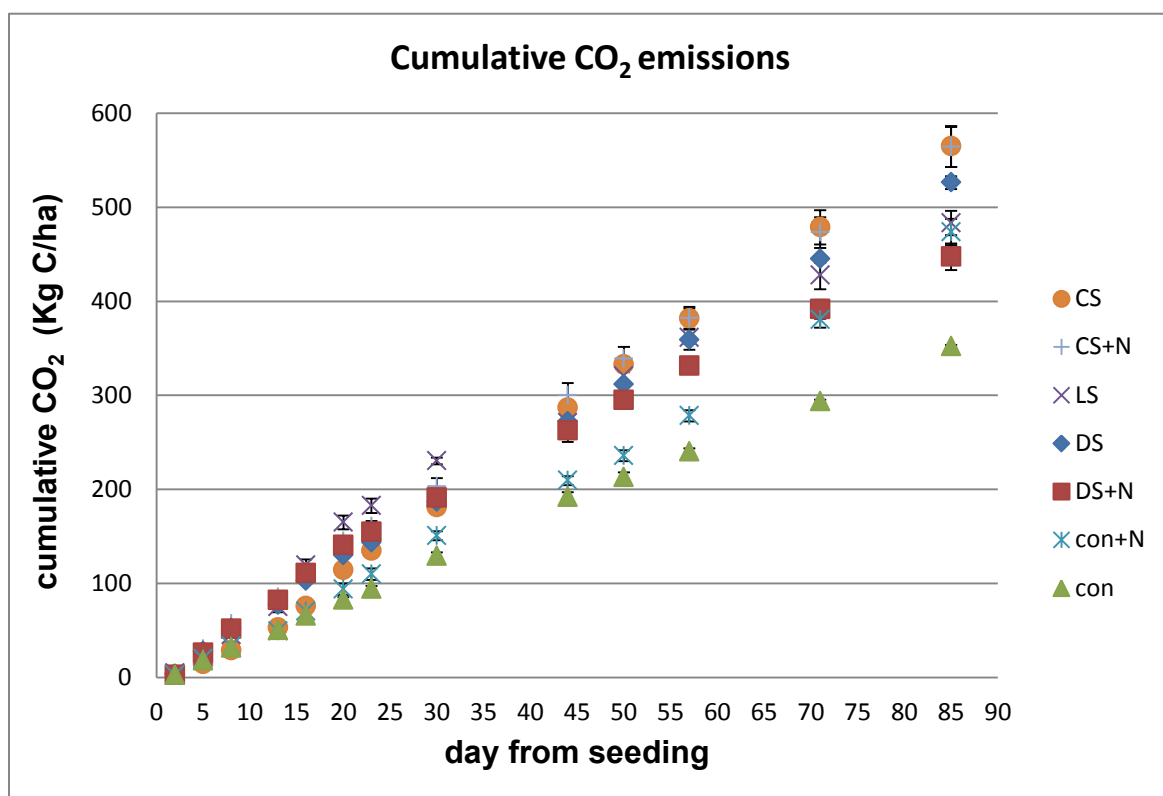








**איור 5:**



**איור 6**