

דו"ח מדעי שנתי לתוכנית מחקר 301-1093-21 - במימון מועצת החלב

תאריך דיווח: 15 לינואר 2024

תאריך תיקון (1): 11 לפברואר 2024

תאריך תיקון (2): 17 לפברואר 2024

תאריך תיקון (3): 20 לפברואר 2024

**שם התכנית:**

טיפול במי הנטל של מתקני ביוגז לטובת הפחתת הזיהום הסביבתי לרמה המאפשרת הזרמה לביוב ושימוש מדייק כמחליפי דשנים בחקלאות

Treatment of the liquid effluents from biogas facilities for sustainable reuse in agriculture while reducing their environmental pollution

[posmanik@agri.gov.il](mailto:posmanik@agri.gov.il)

**שמות השותפים למחקר:**

| שם החוקר         | שטח הפעולה   | החלק במחקר  |
|------------------|--|---|
| ד"ר רועי פוסמניק | חוקר ביחידה לטיפול בפסולות, מרכז מחקר נווה יער         | הסרת חנקן, גורל מיקרו-מזהמים אורגניים במי נטל מטופלים |
| פרופ' עמית גרוס  | מנהל מכון צוקרברג לחקר המים, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב | ביופילטרציה ובדיקת גזי חממה                           |
| הלל מלכה         | מנהל תחום בקר בשה"ם                                    | קישור למערכות ביוגז קיימות                            |

הממצאים הדו"ח זה הנם תוצאות ניסויים.

הניסויים אינם מהווים המלצות לחקלאים.

חתימת החוקר

## תקציר

מי הנטל ממתקני ביוגז מהווים אתגר סביבתי חמורה המוכר בארץ ובעולם. היעדר פתרון קצה למי הנטל של מתקני ביוגז עלול לגרום פיזור לא מבוקר בשטחים חקלאיים, הגורם לזיהום סביבתי חמור. על מנת להציע פתרון ישים כלכלית לבעיית מי הנטל ממתקני ביוגז תכנית המחקר הנוכחית הציעה להתמקד בשתי חלופות: (1) סילוק מקסימלי של חנקן ממי הנטל; (2) השבה מקסימלית של חנקן ממי הנטל. כבר בתחילת התכנית זיהינו את הפוטנציאל של מי הנטל הגולמיים מבחינת יסודות הזנה (NPK) ולכן בחרנו להתמקד באלטרנטיבה השנייה (השבת משאבים). בשנה הראשונה של המחקר התמקדנו בעיקר באפיון הפאזה הנוזלית של מי הנטל שכלל אנליזות כימיות ובדיקת פיטוטוקסיות. מבחני נביטה הראו כי לא קיימת פיטוטוקסיות לפאזה הנוזלית של מי הנטל. בניסויי חממה גידלנו כוסברה כאשר הפאזה הנוזלית של מי הנטל (לפני ואחרי טיפול) החליפו חלק ממנת החנקן הדרושה כדישון ראש (מתן דשן נוזלי במערכת ההשקיה). ניסוי הדישון הצביע על יתרון משמעותי של מי הנטל, גם ללא טיפול. בשנה השנייה, התמקדנו בפאזה המוצקה של מי הנטל ובדקנו את השימוש בה כדישון יסוד (בתחילת הגידול) של צמח מספוא (תירס). לאור ממצאי השנה הראשונה בחרנו לא להפעיל טיפול נוסף במי הנטל מלבד הפרדת פאזות. מדדי הצימוח והיבול הצביעו על יתרון דישוני משמעותי שקיים בפאזה המוצקה של מי הנטל. בנוסף, בחרנו לכמת את הפוטנציאל לשחרור גזי חממה בדגש על  $N_2O$  – גז חממה בעל פוטנציאל התחממות גלובלית הגבוה פי 298 מזה של פחמן דו-חמצני. לשמחתנו לא נצפה שיחרור מוגבר של  $N_2O$  מהעציצים שדושונו עם מי נטל (נוזל או מוצק). בשנה השלישית, בחרנו גם לבדוק אפיק נוסף של שימוש במי הנטל כחומר גלם לייצור הידרו-פחם, חומר פחמני שעשוי להיות תוסף למערכות ביולוגיות (כגון מעכלים אנאירוביים). לקראת סוף תקופת המחקר הספקנו לגמלן את המערכת ולהשתמש במידע שנצבר על מנת להקים מערכת משקית שמטפלת בשפכי הרפת בנווה יער לייצור אנרגיה לשימוש מקומי וניצול מי הנטל להשקיית אגנים ירוקים, ייצור קומפוסט ו/או הידרו-פחם. לאור ממצאי השנתיים הראשונות תכננו את המערכת שתאפשר הפרדה יעילה של פאזה נוזלית ומוצקה של מי הנטל. לסיכום, ממצאי המחקר מאפשרים מתן פתרון לבעיית מי הנטל ממתקני ביוגז – בעיה שמכבידה מאוד על המגדלים המעוניינים לטפל בפרש ובשפכי הרפת בטכנולוגיה זו. מספר יתרונות פוטנציאליים, סביבתיים וכלכליים, טמונים בשימוש בפתרון בעיית מי הנטל: (1) השבת נוטריינטים לצרכים חקלאיים והפיכת מטרד (מי נטל) למשאב (דשן); (3) הפחתת הסכנה לזיהום הסביבה, הרס של שטחים חקלאיים ובריאות הציבור כתוצאה מהיעדר טיפול במי הנטל; (3) שימוש מקסימלי באנרגיה מתחדשת; (4) הפחתת הקנסות אותם משלמים המגדלים בגין היעדר טיפול. יישום ממצאי המחקר (כפי שנעשה היום בנווה יער), יאפשר מתן חלופה לטיפול מקומי יעיל וזול בבעיה חמורה המכבידה על רפתות החלב בישראל ובעולם, תוך שימוש בעקרונות ה"כלכלה המעגלית" להשבת חומרי גלם ואנרגיה מתחדשת משפכי רפתות. בהיעדר טיפול מתאים ימשיכו מי הנטל להוות עומס סביבתי ומטרד בריאותי. חשוב להדגיש, כי בשל הבעיה של מי הנטל, מתקני הביוגז בארץ מטפלים בעיקר בפרש מדרכים ולא מטפלים כלל בשפכים ובמידה וימצא טיפול אופטימלי אפשר יהיה להזרים גם את השפכים למתקן הביוגז שאת תשטיפיו יהיה ניתן להזרים למכונני טיהור שפכים וכך עשויה להיפתר בעיה סביבתית חמורה נוספת.

## Abstract

Discharge of liquid effluents from biogas facilities (also known as 'anaerobic digestate') is a serious environmental challenge recognized in Israel and around the world. Lack of an "end-of-life" solution to anaerobic digestate leads to uncontrolled dispersal in agricultural land, causing severe environmental pollution. Today, in Israel, there are about four biogas facilities that handle manure of about 25,000 dairy cows. An "end-of-life" solution to the digestate may significantly reduce the carbon footprint of biogas facilities and make them a significant alternative for the treatment of manure and dairy effluents. In order to develop an economically feasible solution to this problem, the current research program focuses on two alternatives: (1) maximum removal of nitrogen from anaerobic digestate; (2) maximum recovery of nitrogen from anaerobic digestate. During the beginning of the project, we recognize the high nutritional value (N,P,K) of the digestate and decided to focus on the second alternative (maximum resource recovery). In the first year, we focused on the characterization of the liquid phase of the anaerobic digestate, including chemical analyses and phytotoxic activity. In a fertigation experiment, we grew coriander when the digestate (treated and untreated) to replace some of the required dose of nitrogen (given continuously as a liquid fertilizer). In the second year, we focused on the solid phase of the digestate and tested its value as a "base fertilizer" with corn (given one dose as a solid fertilizer). Along with monitoring plant growth and yield, we chose to quantify the potential for greenhouse gas emissions with an emphasis on  $N_2O$  - a greenhouse gas with a global warming potential that is 298 times higher than that of carbon dioxide. Aiming to enhance the sustainability of the system we also tested the feasibility to convert the solid phase of the digestate to hydrochar via a novel technology named hydrothermal carbonization and found that this feedstock can be used for this technology and the hydrochar may have high potential to be used as an additive to biological systems (e.g. anaerobic digestion). By the end of this project, we used the information to scale up and design a system that treat the livestock manure at Newe Ya'ar. To summarize, the research program offers a solution to the problem of the water from the load from biogas facilities - a problem that is very burdensome for breeders who want to treat the cavity and sewage effluent with this technology.

## 1. מבוא

שפכי רפת החלב, תשטיפים ממכוני חליבה וחצרות המתנה מהווים אתגר סביבתי בארץ ובעולם. בהתאם להחלטת הממשלה הוחלט לחייב את הרפתות לעמוד בסטנדרטים של "כללי תאגידי מים וביוב" טרם הזרמת השפכים למערכת הביוב [1]. אותם סטנדרטים מתייחסים לעומסי הפחמן האורגני המומס, כלל המוצקים המרחפים ונוטריינטים (חנקן וזרחן). בעקבות יוזמה של המשרד להגנת הסביבה למציאת פתרון לשפכי הרפתות, הוקמו בארץ מתקני ביוגז המבוססים על תהליך אנאירובי בפרש בע"ח להשבת אנרגיה. כיום, בישראל ישנם כארבעה מתקני ביוגז המטפלים בפרש של כ-25,000 פרות חולבות. אולם, לצד הפקת ביוגז, הטיפול האנאירובי מייצר תוצר לוואי נוזלי הנפלט מהמתקן – מי נטל (digestate). היעדר פתרון קצה למי הנטל עלול לגרום פיזור לא מבוקר בשטחים חקלאיים, המהווה בעיה סביבתית ממעלה ראשונה. בין היתר, פיזור לא מבוקר של מי הנטל עלול לגרום לזיהום קרקעות והמלחת קרקעות. זיהום של קרקעות וגופי מים בעודפי חנקן וזרחן עלול גם לגרום לשחרור של גזי חממה לרבות  $N_2O$  הנפלט כתוצאה של חמצון אמוניה (ניטריפיקציה) וחיזור חנקות (דניטריפיקציה) בקרקע [2]. בנוסף, מי הנטל עלולים להכיל רמות גבוהות של מיקרו-מזהמים אורגנים לרבות שיירי הורמונים, וגנים לעמידות לאנטיביוטיקה, העלולים להצטבר בקרקעות חקלאיות, לזהם מאגרי ההשקיה, ואף לחדור לגידולים חקלאיים. בעיית מי הנטל ממתקני ביוגז היא בעיה מוכרת בארץ ובעולם. מקור הבעיה הוא שרוב רובם של יסודות ההזנה (חנקן, זרחן ואשלגן) עוברים מינרליזציה חלקית במהלך העיכול האנאירובי ונשמרים בפאזה המוצקה ובפאזה הנוזלית [3]. עודף חנקן במי הנטל עלול לגרום לפליטות מוגברות של אמוניה ( $NH_3$ ) וחמצן דו-חנקני ( $N_2O$ ) – גז חממה בעל פוטנציאל התחממות גלובלית הגבוה פי 298 מזה של פחמן דו-חמצני [4]. פליטות אלו עלולות להתגבר כתוצאה מאגירה בלגונות פתוחות, פרקטיקה מקובלת בעיקר בארה"ב [5]. בנוסף, עומסים גבוהים של נוטריינטים במי הנטל של מערכות ביוגז עלולים לייקר את העלויות במורד הזרם בין היתר לטובת תשתית מתאימה לאגירה, שינוע ופיזור [6]. עבודה שנעשתה באוניברסיטת קורנל במטרה להבין את ההיתכנות הכלכלית והעלויות הסביבתיות של מערכות ביוגז הצביעה על קונפליקט בין הרווח לחקלאי הנגזר בעיקר מייצור ביוגז לעלות הסביבתית הקשורה בעיקר לשחרור גזי חממה בתהליך [3]. מעניין לציין, כי שחרור גזי החממה נמצא בעיקר מבריכות האגירה של מי הנטל. פתרון קצה למי הנטל עשוי להקטין משמעותית את פליטות גזי החממה הן במתקני האגירה והן מקרקעות חקלאיות. על מנת להציע פתרון ישים כלכלית לבעיית מי הנטל ממתקני ביוגז, תכנית המחקר הנוכחית מתמקדת בשתי חלופות: (1) סילוק מקסימלי של חנקן והבאת מי הנטל לאיכות של הזרמה לביוב; (2) השבה של החנקן ממי הנטל לטובת שימוש כמחליפי דשנים בחקלאות. שתי החלופות נבחנות בשתי טכנולוגיות מבוססות: (1) ריאקטור מנתי הפועל במחזוריות להפעלת תנאים אירוביים (לחמצון אמוניה) ואנאירוביים (לסילוק חנקות); (2) נידוף מבוקר של אמוניה ותפיסתה בפילטר ביולוגי אירובי – פתרון שפותח באוניברסיטת בן-גוריון בנגב [9]. הביופילטר, הוא למעשה עמודה של מצע נקבובי (למשל קומפוסט בדרגת בשלות גבוהה), בעל יכולת ספיחת אמוניה וחימצונה לחנקה. חלופה זו מאפשרת קבלת דשן עתיר חנקה

(המתקבל משטיפה של הביופילטר במים), מוצר בעל דרישה גבוהה בחקלאות לשימושי של דישון ראש (fertigation) [10]. לטובת שחרור מבוקר של האמוניה ממי הנטל ולכידתה בפילטר הביולוגי ניתן לבצע העלאה מבוקרת של ערך ההגבה (pH) של מי הנטל ע"י הוספה של סיד אשר עשוי לסייע גם לסילוק ואינאקטציה של פתוגנים. בעוד שתי החלופות הנ"ל מיושמות (בארץ ובעולם) בקנה מידה תעשייתי, קיימת אי וודאות בנוגע למחיר הסביבתי, בעיקר כתוצאה משימוש חוזר (כדשן) בהקשר של זיהום הקרקע בחנקות ושחרור גזי חממה (ממי נטל מטופלים).

## 2. מטרת המחקר

במסגרת תכנית המחקר, ביקשנו לפתח גישה חדשה לניהול מיטבי של מי הנטל ממערכות ביוגז. תכנית המחקר בחנה שתי חלופות לטיפול במי הנטל: (1) סילוק חנקן והזרמה לביוב; (2) השבת חנקן כדשן. בשנה הראשונה למחקר אופיינו מי הנטל ובשל ערכים גבוהים של יסודות הזנה החלטנו להתמקד בחלופה השנייה.

## 3. תוצאות המחקר

המחקר התבסס על דוגמאות מי נטל שנדגמו אחת לחודשיים ממתקן העיכול האנאירובי בעמק חפר. הדוגמאות נלקחו למעבדה בנווה יער שם עברו אפיון כימי, הפרדת פאזות וניסויי דישון שונים בחממה. בשנה הראשונה של התכנית, התמקדנו בעיקר בפאזה הנוזלית של מי הנטל, לפני ואחרי הטיפול המוצע. מי הנטל עברו טיפול אנאירובי נוסף בשילוב נידוף מאולץ של אמוניה ולכידתה בפילטר ביולוגי [9-10]. את הפאזה הנוזלית (לפני ואחרי טיפול) הפרדנו מהפאזה המוצקה (באמצעות צנטריפוגה וסינון), אפיינו כימית, בדקנו את מידת רעילותה ואת הפוטנציאל להשתמש בה כחלופה לדישון ראש (ניסוי כוסברה). בשנה השנייה, התמקדנו בפאזה המוצקה של מי הנטל (ללא טיפול נוסף) אפיינו אותה כימית ובדקנו את השימוש בה לדישון יסוד של גידול מספוא (תירס). בשנה השלישית התמקדנו בגימלון של המערכת, הקמנו מתקן אנאירובי משקי בנווה יער שמאפשר הפרדה

יעילה של שתי הפאזות של מי הנטל, שימוש בפאזה הנוזלית להשקיית אגנים ירוקים ובפאזה המוצקה להפקת הידרו-פחם. במקביל, לאורך שלוש השנים ערכנו דיגומי קרקע באתר הפיזור בגד"ש עמק חפר להבנת ההשפעה ארוכת הטווח של פיזור מי נטל גולמיים בשדות חקלאיים.

### 3.1 אפיון כימי של מי הנטל הגולמיים

בשנה הראשונה, מי הנטל מהמתקן בעמק חפר נדגמו (אחת לחודשיים) והובאו למעבדה

טבלה 1. אפיון כימי של מי נטל גולמיים

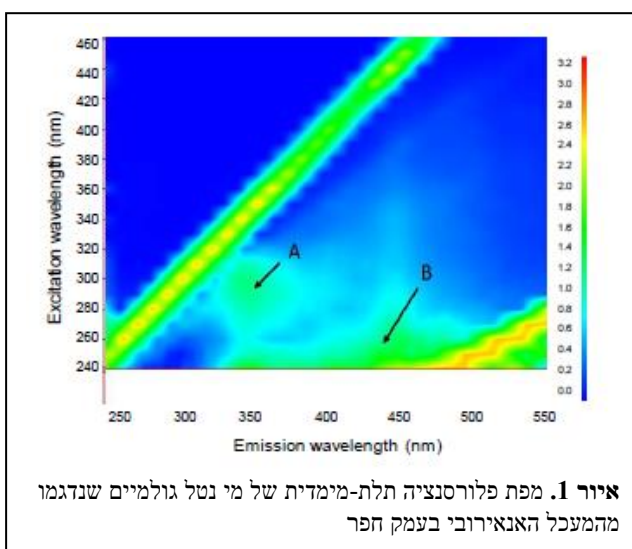
| פרמטר                  | מי נטל גולמיים (6 דגימות מ-2 מועדי דיגום שונים) ממתקן העיכול בעמק חפר |
|------------------------|---|
| pH                     | 8.0-8.1   |
| כלל מוצקים (g/L)       | 52.4-62.2   |
| מוצקים נדיפים (g/L)    | 30.0-36.8   |
| ציכת חמצן כימית (g/L)  | 100.0-119.4   |
| חנקן כללי (mg/L)       | 8,028-15,184  |
| חנקן אמוניקלי (mg/L)   | 4,333-4748  |
| מוליכות חשמלית (dS/m)  | 48.3-63.7   |
| נתרן (meq/L)           | 151.3-160.9   |
| סידן (meq/L)           | 17.8-25.2   |
| מגנזיום (meq/L)        | 7.2-8.5   |
| SAR ( $\sqrt{meq/L}$ ) | 39.2-42.9   |

בנווה יער לטובת טיפול ואפיון כימי. (פחמן אורגני, צריכת חמצן כימית (צח"כ), כלל מלחים, אלקליניות, מאקרו- ומיקרו-אלמנטים). ניתן לראות (טבלה 1) כי **מי הנטל הגולמיים** מכילים ריכוז גבוה של מלח (מוליכות חשמלית) ובעיקר נתרן התורם לערך SAR הגבוה. תכולת החומר האורגני גם היא גבוהה – מדד שבא לידי ביטוי בערכים גבוהים של מוצקים נדיפים (VS) וצריכת חמצן כימית (COD). גם ערכי החנקן (הכללי והאמוניקלי) היו גבוהים ובעלי שונות גבוהה (ככל הנראה בשל רמות חנקן אורגני גבוהות).

בשנה השנייה, התמקדנו בהפרדת נוזל-מוצק וביצענו אפיון כימי של שתי הפאזות. הפרדת הפאזות התבצעה בעזרת צנטריפוגה מעבדתית (CyberScan CON 11, Eutech Instruments, Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, MA, USA). החדר (25°C) למשך 20 דקות ולאחריה בוצע וסינון גרביטציוני בעזרת נייר סינון (Watmann#1). המוצקים יובשו בתנור ונשלחו לאנליזת יסודות (ICP) במרכז מחקר גילת. לכימות יסודות מאקרו (חנקן, זרחן ואשלגן), נתרן, סידן מגנזיום וכן מיקרו-אלמנטים (ברזל, גופרית, אבץ ונחושת). **בטבלה 2** ניתן לראות את ריכוזי היסודות בפאזה המוצקה ובפאזה הנוזלית של מי הנטל. ניתן לראות שכל יסודות ההזנה (מאקרו ומיקרו) מצויים במוצקים ולא בנוזלים. זו נקודה חשובה שכן הפרדת המוצקים מהנוזל לכשעצמה עשויה לשמש כשלב חשוב בשימוש חוזר חכם במי הנטל הגולמיים.

**טבלה 2. ריכוזי יסודות הזנה בפאזה המוצקה והפאזה הנוזלית של מי הנטל (ממתקן העיכול בעמק חפר)**

| פאזה נוזלית של מי נטל | פאזה מוצקה של מי נטל | יסוד    |
|-----------------------|----------------------|---------|
| 18-19ppm              | 1.7-2.0%             | זרחן    |
| 160-165ppm            | 6.5-7.0%             | אשלגן   |
| 0.8-0.9ppm            | 0.18-0.2%            | ברזל    |
| 7.0-7.1ppm            | 1.0-1.2%             | מגנזיום |
| 12.0-12.2ppm          | 0.9-0.9%             | גופרית  |
| 48.0-52.0ppm          | 2.0-2.2%             | נתרן    |
| 13.0-14.0ppm          | 5.0-5.5%             | סידן    |
| 0.18-0.20ppm          | 740-750ppm           | אבץ     |
| 0.08-0.1ppm           | 470-480ppm           | נחושת   |

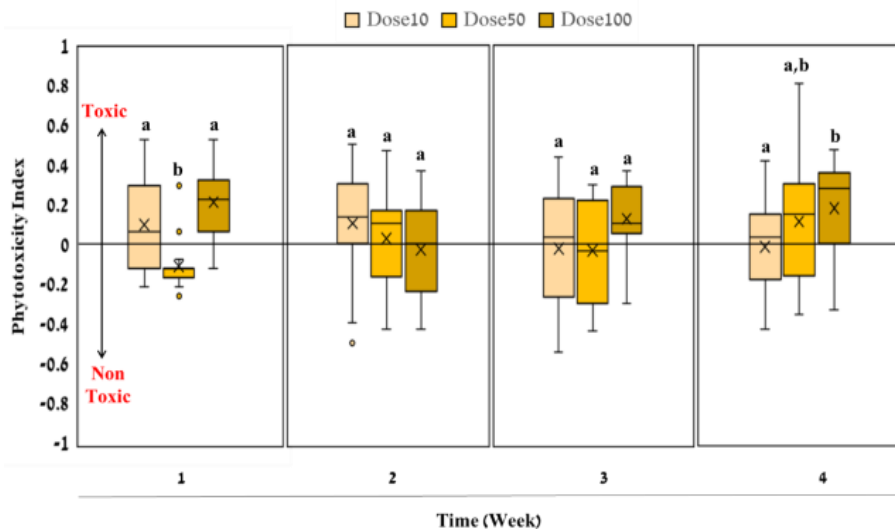


ממפת פלורסנציה של **מי הנטל הגולמיים** (איור 1) ניתן לראות אינדיקציה לנוכחות של חומר אורגני פריק (A; סוג חלבוני, הפולט אור באורך גל ~350 נמ', עם העירור ב-290 נמ') וגם חומר מייצג תרכובות אורגניות ארומטיות מחומצנות שעברו כנראה תהליכי פולימריזציה הפולטות אור בטווח רחב של אורכי גל מעבר ל-330 נמ' ועירור ב-280-240 נמ', החומרים שאמורים

להיות יציבים נגד פירוק ביולוגית B. העוצמות נמדדות של פליטת אור נותנות בסיס לניתוח כמותי של שינויים בהרכב של חומר אורגני כתוצאה מטיפול או אינטראקציות עם הקרקע.

### 3.2 בדיקת פיטוטוקסיות של הפאזה הנוזלית של מי הנטל (לפני ואחרי טיפול)

בשנה הראשונה, בחנו אם קיימת ההשפעה שלילית ישירה של הפאזה הנוזלית של מי נטל (מטופלים ולא מטופלים) על צמחים. מי הנטל הגולמיים עברו טיפול משלים [9–10], הכולל נידוף מבוקר של אמוניה לפילטר ביולוגי. על הפאזה הנוזלית של מי הנטל (לפני ואחרי הטיפול המשלים) נערכו מבחני נביטה (*in-vitro*) עם צמח מודל - *Lepidium sativum L.* בניסוי הנביטה בחנו יישום מינונים שונים בריכוז עולה אשר אקוויולנטים ל- 10, 50 ו- 100 מ"ק מי נטל לדונם קרקע. חשוב לציין, כי המינונים שנוסו במבחני הנביטה היו גבוהים משמעותית מהמינון המותר לפיזור של מי הנטל (5 מ"ק לדונם לשנה). אולם, היעדר בקרה אודות עומסי הפיזור מחייבים בדיקה של מינונים גבוהים. מתוצאות המבחן המוצגות 2, לא ניתן לזהות מגמת רעילות ישירה למי הנטל (הלא מטופלים) כך שממוצעי ערכי אינדקס הרעילות נעים סביב האפס ללא עלייה או ירידה חדה שמאפשרת לנו לקבוע בצורה חד משמעית שיש רעילות כתלות במינונים לאורך הזמן המוערך לניסוי (4 שבועות). חשוב לציין שאותו מבחן שערכנו עבור מי נטל מטופלים הראה התנהגות דומה.



איור 2. השוואה בין ערכי אינדקס רעילות (phytotoxicity index) לפאזה הנוזלית של מי הנטל עבור המינונים השונים האקוויולנטים ל- 10, 50, 100 קוב לדונם קרקע לאורך 4 שבועות של מבחני נביטה. האותיות השונות מייצגות מובהקות סטטיסטית בין הטיפולים ( $P < 0.05$ ) לפי מבחן Tukey.

### 3.3 שימוש בפאזה הנוזלית של מי הנטל להזנה חנקנית (דישון ראש)

בשנה הראשונה, הפאזה הנוזלית של מי הנטל (מטופלים ולא מטופלים) נבדקו כתחליפי דשנים (לאחר הפרדת פאזות מעבדתית) בניסויי עציצים בחממה בנווה יער עם צמח מודל (כוסברה). תוך שמירה על רמה זהה של יסודות הזנה (חנקן, זרחן ואשלגן), ביצענו ניסוי גידול מבוקר תוך מעקב רציף על רמות החנקן במי ההשקיה ובמי הנקז. אחת לשבוע נלקחה דגימת גז מפני הקרקע ומאזור בית השורשים למדידת אמוניה

וגזי חממה ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) במקביל, נלקחה דגימת קרקע למיצוי ובדיקות חנקן וזרחן. במהלך הניסוי ערכנו מעקב אחר מדדי הצימוח ובתום הניסוי נשקלה הביומסה הצמחית לטובת השוואה בין החלופות. לפי ההבדלים בין שני סוגים של מי

הנטל (מטופלים ולא מטופלים) ואחרי שנערך ניסוי רעילות לבדיקת השפעת מי הנטל, בוצע ניסוי חממה שבו נשתלו צמחי כוסברה בעציצי חול, והושקו בחמישה טיפולים שונים של דישון:

| טיפול מספר | שם טיפול | תיאור                                   |
|------------|----------|---|
| 1          | TLD+N    | Treated liquid digestate + N fertilizer |
| 2          | TLD      | Treated liquid digestate                |
| 3          | LD+N     | Liquid digestate + N fertilizer         |
| 4          | LD       | Liquid digestate                        |
| 5          | C        | Control (only N fertilizer)             |

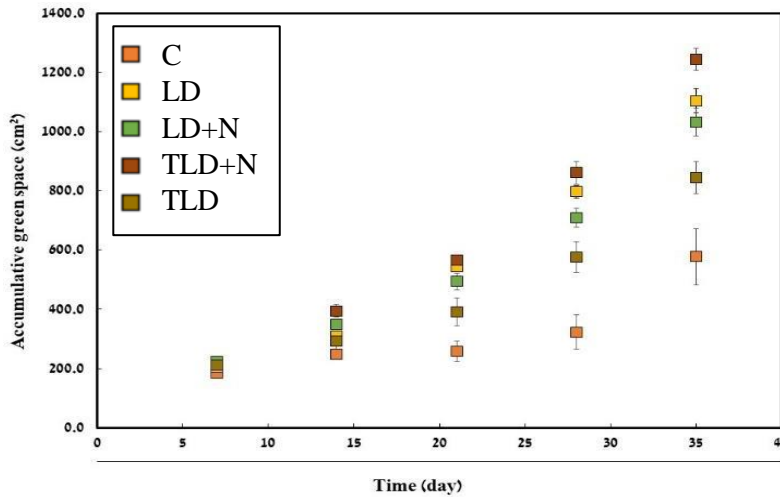
כל תמיסות הדישון (למעט אחת שנתנה חנקן בחסר) הכילו 100 מ"ג חנקן לליטר. **צילום 1** מציג הבדלים ויזואליים בצימוח הכוסברה שהומרו לשטח ירוק כמותי (**איור 3**).



**צילום 1.** מדגם מייצג לעציצי כוסברה עבור חמישה טיפולים ממבט צד בשבוע 3.

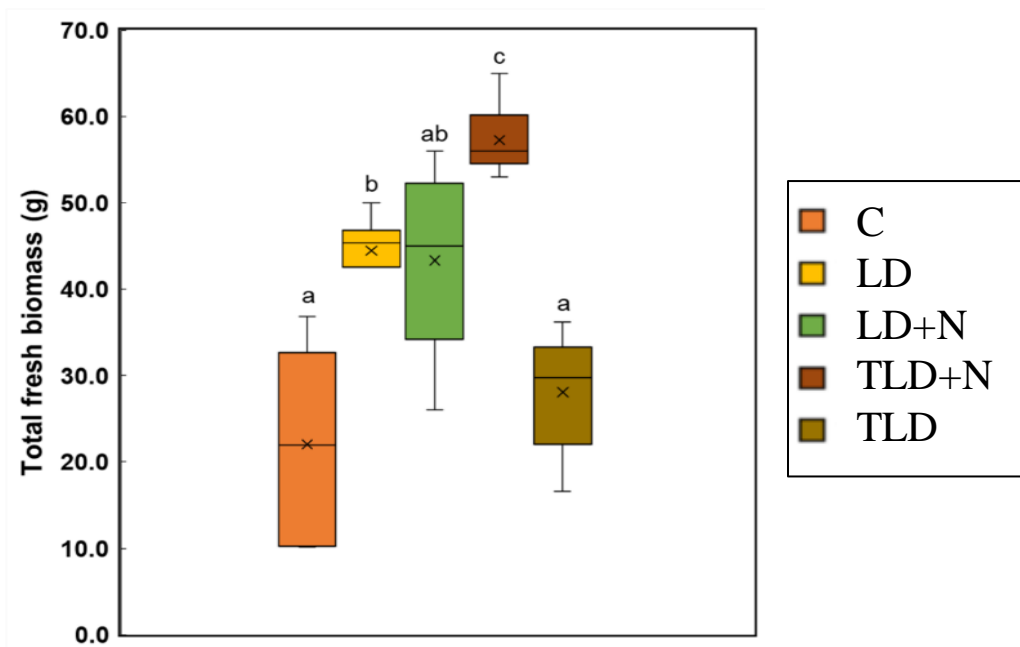
**צימות:** ניתן לראות כי עציץ שהושקה בפאזה הנוזלית של מי נטל (מטופלים) בשילוב עם אמון גופרתי בעל שטח ירוק וצפיפות עלים הכי גבוהה בהשוואה לביקורת. בעוד שאי אפשר לזהות הבדל משמעותי בין שני הטיפולים של מי נטל לא מטופלים (עם ובלי אמון גופרתי). בנוסף מזהים שהצמח אשר קיבל רק את הפאזה הנוזלית של מי הנטל המטופלים (ללא תוספת אמון גופרתי, כלומר חסר בחנקן) קרוב מאוד למצב הביקורת גם בצבע וגם בצפיפות.





**איור 3.** שטח ירוק (cm<sup>2</sup>) של הכוסברה בין הטיפולים השונים לאורך 35 ימי הניסוי. הערכים מייצגים ממוצע של שש חזרות ± סטיית תקן.

**יבול:** לאחר 35 ימים של ניסוי דישון צמח מודל (כוסברה) בפאזה הנוזלית של מי הנטל, נקטף היבול המצטבר של הצמח ונשקל כך שניתן לראות את ההבדלים בין הטיפולים באיור 4. ניתן לראות כי היבול המקסימלי התקבל מטיפול ההשקיה בתמיסה המשולבת של הפאזה הנוזלית של מי הנטל המטופלים בתוספת אמון גופרתי ושווה בממוצע ל-57 גרם. טיפול זה היה גבוה משמעותית (עם מובהקות סטטיסטית) מכל הטיפולים האחרים. לעומת זאת, טיפול הביקורת (אמון גופרתי בלבד) הראה את מדדי היבול הנמוכים ביותר (ושונים סטטיסטית) השווים בממוצע ל-22 גרם. מעניין לראות שהערך קרוב מאוד (וללא הבדל סטטיסטי) לסך היבול מטיפול החנקן בחדר (הפאזה הנוזלית של מי נטל מטופלים בלבד) השווה בממוצע ל-28 גרם. בנוסף, משני טיפולי מי הנטל הלא מטופלים (עם ובלי תוספת אמון גופרתי) התקבל יבול דומה השווה בממוצע ל-43 ו-44 גרם, בהתאמה (ללא הבדל סטטיסטי).



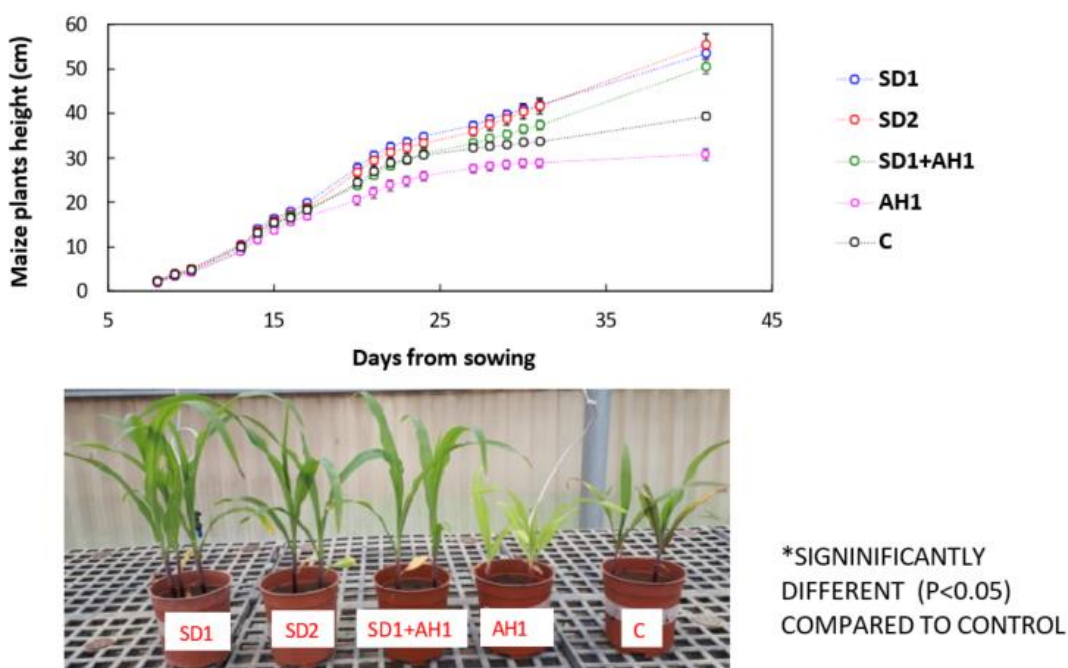
**איור 4.** ביומסה טרייה מצטברת (גרם) שנקטפה בתום 35 ימי הניסוי. האותיות השונות מייצגות מובהקות סטטיסטית בין הטיפולים ( $P < 0.05$ ) לפי מבחן Tukey.

### 3.4 שימוש בפאזה המוצקה של מי הנטל לדישון יסוד

לאור ממצאי השנה הראשונה, החלטנו בשנה השנייה להתמקד בפאזה המוצקה המופרדת מהפאזה הנוזלית. היות והטיפול במי הנטל לא הצביע על יתרון מובהק החלטנו לבדוק את הפאזה המוצקה של מי הנטל ללא טיפול נוסף. בשנה השנייה, ביצענו ניסוי עציצים עם תירס לתחמיץ. זרעי תירס מספוא (קולוסאוס) נזרעו באדמת עמק חפר שנבחרה עם התוספים הבאים:

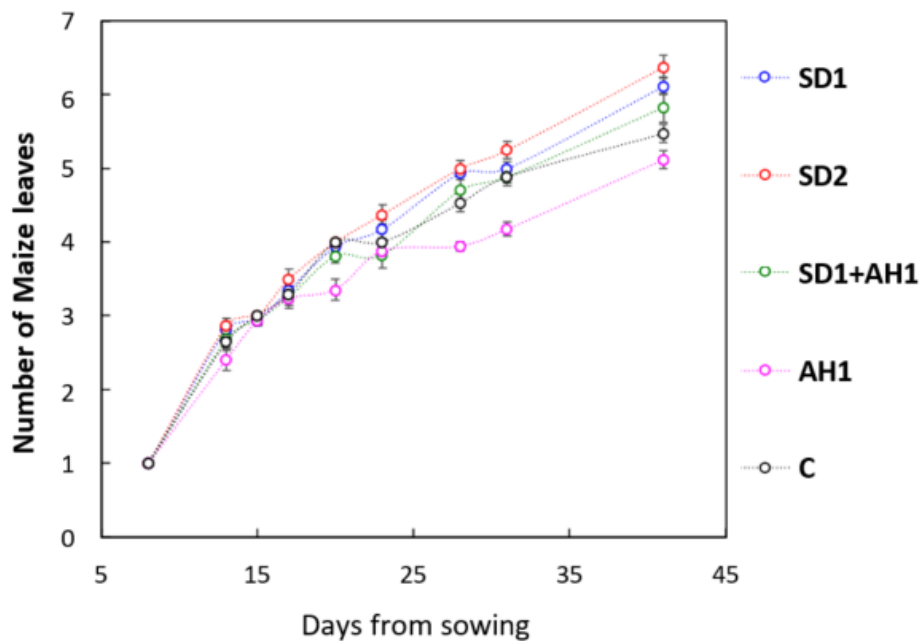
| תיאור                                  | שם טיפול | טיפול מספר |
|--|----------|------------|
| 1% solid digestate                     | SD1      | 1          |
| 2% solid digestate                     | SD2      | 2          |
| 1% solid digestate+1% acidic hydrochar | SD1+AH1  | 3          |
| 1% acidic hydrochar                    | AH1      | 4          |
| Control (only soil)                    | C        | 5          |

לכל טיפול נשתלו ב- 6 עציצים, בין 2-3 צמחים לעציץ בחממה מבוקרת בסידור רנדומלי. מדדי צימוח נלקחו אחת לשבוע. דוגמאות קרקע נלקחו שלוש פעמים במהלך הניסוי. בתום 40 יום הצמחים נקצרו. לפני ייבוש, התבצעה מדידת כלורופיל בעלים. הצמחים נשקלו ויובשו בתנור להמשך אנליזות. באיור 5 ניתן לראות שכל הצמחים שקיבלו SD (בשני המינונים, עם ובלי הידרו-פחם חומצי) הראו מדדי צימוח (גובה) טובים יותר (במובהקות סטטיסטית) בהשוואה לביקורת. באופן מפתיע הטיפול עם ההידרו-פחם (ללא SD) הראה מדדי צימוח פחות טובים – תופעה שמוסכה כאשר ניתן SD לעציץ.

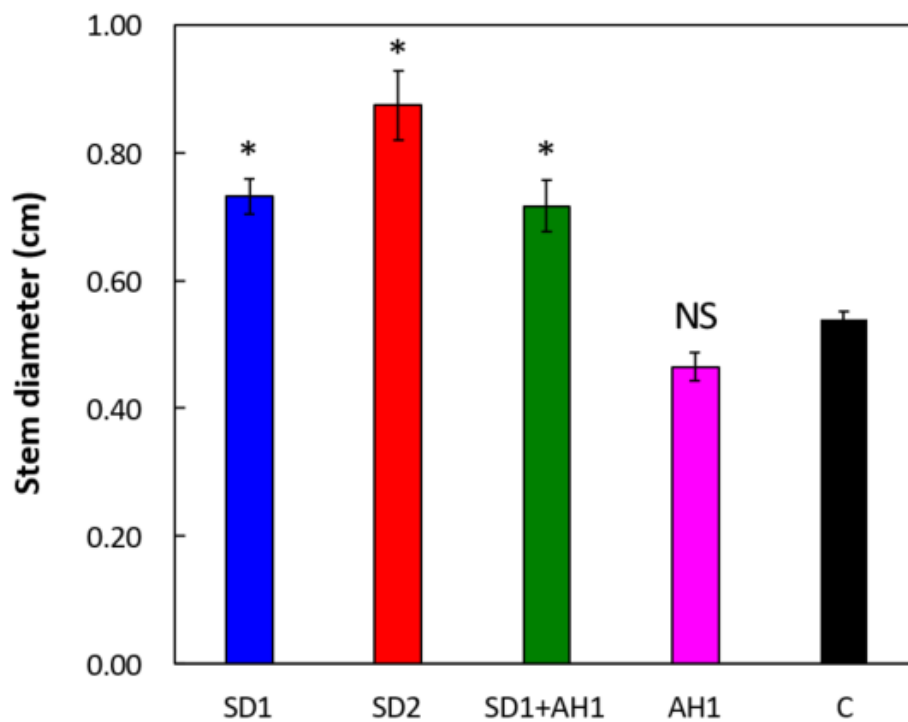


איור 5. מעקב אחר גובה צמחי תירס במהלך 40 ימי ניסוי (כוכבית מצביעה על הבדל מובהק סטטיסטית בהשוואה לביקורת). בצילום ניתן לראות את ההבדלים הוויזואליים בין הצמחים בתום 40 ימי גידול.

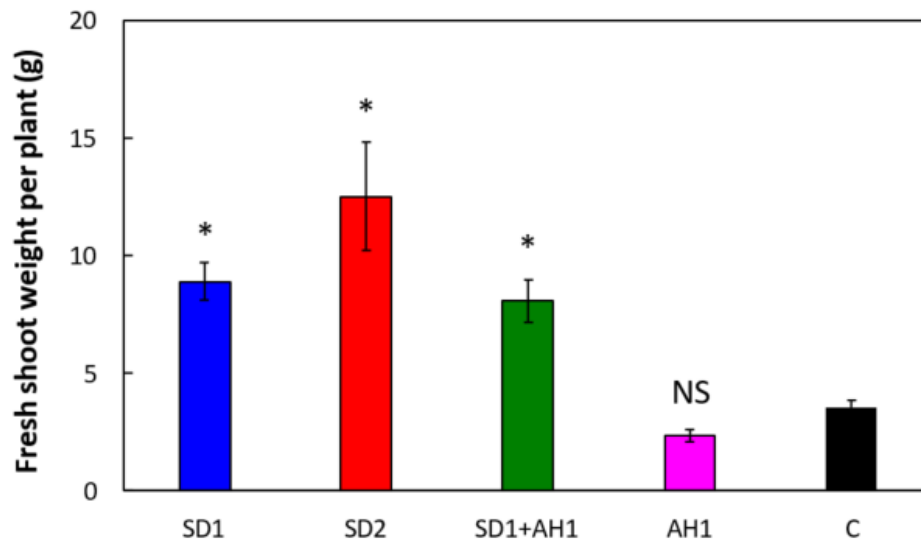
את ההבדלים בין הטיפולים השונים ניתן לראות גם במדדים פיזיולוגיים אחרים כגון מספר עלים (איור 6) קוטר הגזע לפני קציר (איור 7), ביומסה טרייה (יבול) בקציר (איור 8) וכלורופיל בעלים (איור 9).



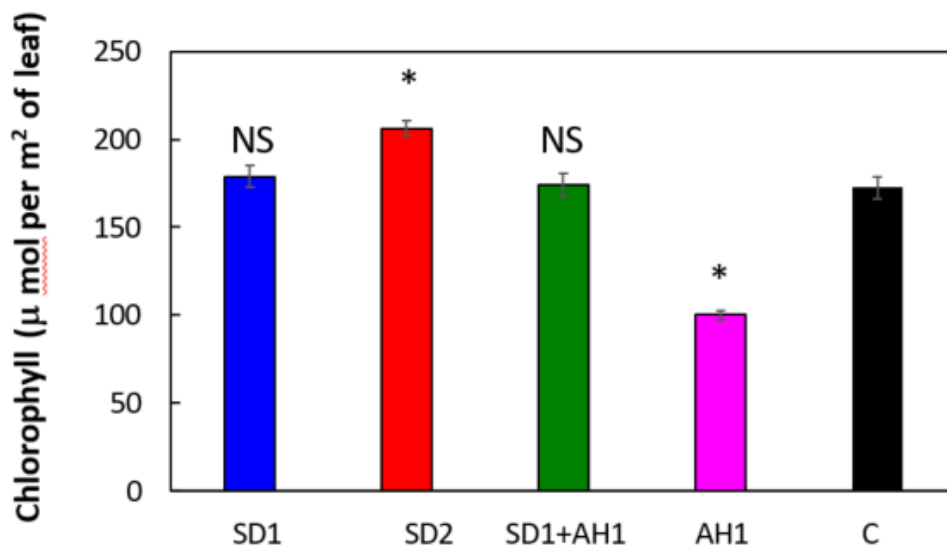
איור 6. מעקב אחר גובה צמחי תירס במהלך 40 ימי ניסוי (כוכבית מצביעה על הבדל מובהק סטטיסטית בהשוואה לביקורת). בצילום ניתן לראות את ההבדלים הוויזואליים בין הצמחים בתום 40 ימי גידול.



איור 7. קוטר הגזע של צמחי התירס טרם קציר (כוכבית מצביעה על מובהקות סטטיסטית, בהשוואה לביקורת, NS - לא מובהק סטטיסטית).



**איור 8.** סך הביומסה הצמחית (משקל רטוב) של צמחי התירס לאחר קציר (כוכבית מצביעה על מובהקות סטטיסטית, בהשוואה לביקורת, -NS - לא מובהק סטטיסטית).



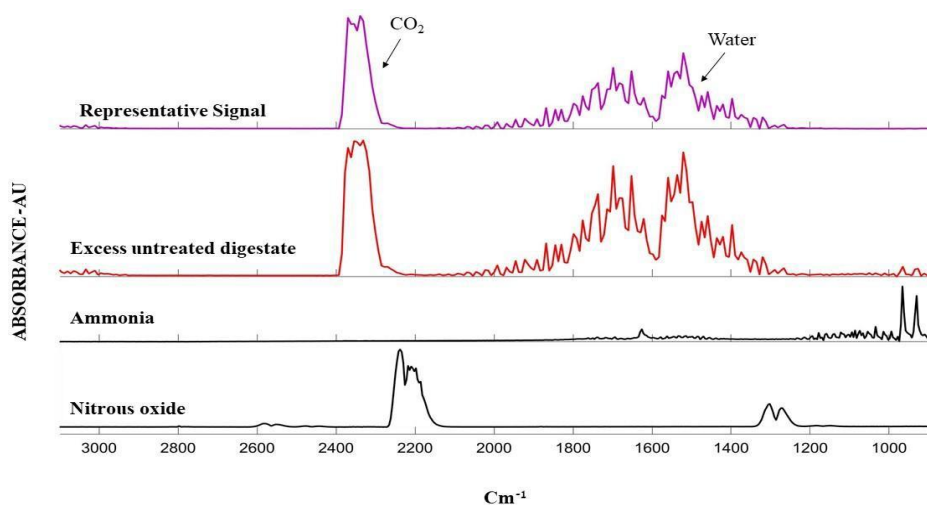
**איור 9.** ריכוז הכלורופיל בעלים של צמחי התירס לאחר קציר (כוכבית מצביעה על מובהקות סטטיסטית, בהשוואה לביקורת, -NS - לא מובהק סטטיסטית).

לסיכום הניסוי הצמחי, ניתן לראות כי תוספת של הפאזה המוצקה של מי הנטל לקרקע חרסיתית (עמק חפר) הטיבה עם גידול תירס. בכל המדדים הפיזיולוגיים שבדקנו תוספת 2% הייתה המוצלחת ביותר. ההבדל ביחס לביקורת תמיד היה מובהק סטטיסטית. אמנם ברוב המדדים ההבדל בין 1% ל-2% לא היה מובהק סטטיסטית אולם ההבדל המובהק בריכוז הכלורופיל בעלים מצביע על יתרון ליישום 2%. באופן מעניין, תוספת של הידרו-פחם (חומצי) לקרקע דווקא פגעה במדדים הפיזיולוגיים של התירס (ברוב המדדים במובהקות

סטטיסטית ביחס לביקורת). תופעה זו צריכה עוד להיחקר (לא כחלק ממטרות המחקר הנוכחי) ואנו משערים שמדובר בחומציות ההידרו-פחם. להפתעתנו, השילוב בין הפאזה המוצקה של מי-הנטל והידרו-פחם (חומצי) הראה תוצאות טובות – כלומר מי הנטל "ניטרלו" את האפקט השלילי של ההידרו-פחם. בעתיד, אנו מתכננים לבדוק את התופעה הזו בהקשר של הפוטנציאל לשיקום קרקעות פגועות (חומציות) באמצעות פיזור עונתי של הפאזה המוצקה של מי נטל.

### 3.5 שחרור גזי חממה כתוצאה מדישון במי נטל

השערת הניסוי הייתה שחנקן אמוניקלי מסיס **בפאזה הנוזלית של מי הנטל** עלול להגביר את תהליכי מעגל החנקן בקרקע ובכך לגרום לפליטות גזי חממה (בעיקר  $N_2O$ ). לכן, במהלך ניסוי הפרטיגציה (דישון ראש), נמדדו פעם בשבוע פליטות הגזים במכשיר FTIR. בכל המדידות שערכנו **לא נמצאו ריכוזים משמעותיים** (גבוהים מהרקע באטמוספירה) הן של אמוניה והן של  $N_2O$ . על מנת לוודא כי המכשיר אכן רגיש לגזים שעלולים להיפלט מקרקע בתגובה לדישון, לפני הניסוי, בוצע יישום עודף של פאזה נוזלית של מי נטל (לא מטופלים) ובדיקת הגזים השונים. ניתן לראות **באיור 10** תוצאות החתימה הספקטרלית עבור ספקטרום מייצג מהניסוי (בוורוד), ספקטרום יישום מי נטל בעודף (באדום) לצד החתימה הספקטרלית עבור סטנדרטים של אמוניה ו- $N_2O$  (בשחור). **איור 10** מייצג שתי חתימות אצבע עיקריות, הספקטרום בוורוד הינו החתימה הספקטרלית המייצגת כלל הטיפולים השונים לאורך זמן הניסוי (כאמור ללא פליטות משמעותיות). הספקטרום באדום מייצג החתימה של פליטות הגזים מקרקע שדושנה בעודף במי נטל לא מטופלים לפני הניסוי. שני הספקטרומים בשחור מייצגים את הבליעה הסטנדרטית האופיינית של אמוניה וחמצן דו-חנקני. ניתן לראות כי החתימה המייצגת לא הראתה ריכוזים משמעותיים של שני הגזים. יחד עם זאת, רואים בבירור שיישום עודף מי נטל לא מטופלים כן גורם לפליטות אמוניה כפי שמזהים בשני הפיקים באורכי גל באזור  $960-920\text{ cm}^{-1}$ .



**איור 10.** ספקטרום FTIR של פליטות גזי חממה עבור חתימה מייצגת (מניסוי דישון) חתימה של יישום עודף וחתימות של סטנדרטים (אמוניה וחמצן דו-חנקני).

### 3.6 שימוש בפאזה המוצקה של מי הנטל לייצור הידרו-פחם

בשנה השלישית, בחנו אופקים נוספים לשימוש יעיל של מי הנטל. היות ומדובר בתשטיפים עם תכולת חומר אורגני גבוהה, פיחום הידרותרמי עשוי להיות טכנולוגיה מתאימה. בקצרה, פיחום הידרותרמי מבוסס על טיפול תרמי (200-300 מ"צ) בסביבה מימית לקבלת חומר פחמי שיכול לשמש בין היתר כמקור אנרגיה, יסודות הזנה או כתוסף למערכות ביולוגיות. היות והתכנית עוסקת בתשטיפים של מערכות ביולוגיות חשבנו שיכול להיות מאוד מעניין לבדוק היתכנות ראשונית לייצור הידרו-פחם מהמוצקים של מי הנטל ולהחזירם למערכת התסיסה לטובת שיפור הביצועים של המערכת. השתמשנו בריאקטור מעבדתי לייצור הידרו-פחם ממי הנטל. הריאקטור (**איור 11**) מורכב מפלדת אל-חלד בנפח 600 מ"ל, חיישני לחץ וטמפרטורה ובוחש מגנטי (Nonclave type 3, BüchiGlasUster, שווייץ). בקרי לחץ וטמפרטורה משמשים לבקרה עבור כל תגובה. כדי להשיג יחס מוצק למים של 1:10, עבור כל הרצה, 100 גרם של דגימת מי נטל (10 גרם מהפאזה המוצקה היבשה ב- 90 גרם מהפאזה הנוזלית) הריאקטור נשטף בגז  $N_2$ , וניתן לחץ התחלתי של 2 מגה פסקל. הריאקטור מחומם מראש ל-50 מ"צ. נקודות היעד של הטמפרטורה הן 200, 220, 250, 270 מ"צ וקצבי החימום היו 5~ מ"צ לדקה. לאחר החימום, התגובה ההידרותרמית מתרחשת (לפחות בשלוש חזרות) במשך 30 דקות בכל טמפרטורת מטרה. במהלך התגובה, בוחש מגנטי מאפשר ערבוב רציף (300 סל"ד) ומבטיח הומוגניות של התערובת. בסוף כל הרצה, גוף החימום נכבה, ולולאת הקירור (באמצעות מים) נפתחת כדי להוריד בהדרגה את טמפרטורת התערובת ל-50 מ"צ בקצבי קירור של 3.2~ מ"צ לדקה. תנאים אלו נבחרו על סמך מחקרים קודמים שהראו ששינויים בתכונות המים הפוכים אותם למדיום אטרקטיבי לפירוק של פוליסכרידים, חלבונים ושומנים. יש לציין כי ניסויים ראשוניים הצביעו על פירוק ביומסה מוגבל מתחת ל-200 מ"צ. בשלב זה, הריאקטור נפתח לאיסוף ההידרו-פחם והתוצר הנוזלי (מי תהליך). לאחר כל תגובה, ההידרו-פחם מסונן בואקום (נייר פילטר 11 מיקרומטר) ומיובש ב-70 מ"צ למשך 72 שעות.



**איור 11.** הריאקטור המעבדתי לטיפול הידרותרמי במי הנטל.

דוגמאות ההידרו-פחם שנוצרו מכל הטיפולים אופיינו, ונמצאו מספר מגמות (**טבלה 3**). ראשית, נצפית ירידה בהשבת מוצקים עם עליית הטמפרטורה. ככל הנראה, טמפרטורות גבוהות יותר גורמות לשיעורי פירוק גבוהים יותר וחלוקה של תרכובות לפאזה הנוזלית והגזית. בנוסף, הפחתה ביחס האטומי בין חמצן לפחמן (יחס O/C) נמצאה קשורה לעליית הטמפרטורה. עם זאת, ראוי לציין שמגמת ירידה זו נשארת קבועה בין טמפרטורות של 250 מ"צ ל-270 מ"צ. הפחתה זו מיוחסת להתרחשות של תהליכי דחיסה הכוללים דה-הידרציה ודה-קרבוקסילציה (שחרור H<sub>2</sub>O ו-CO<sub>2</sub>, בהתאמה). לבסוף, נצפתה ירידה במליחות כפי שנצפתה על ידי מוליכות חשמלית (EC) עם עליית הטמפרטורה.

**טבלה 3.** אפיון פיזיקו-כימי של הידרו-פחם שהופק ממי נטל בטמפרטורות השונות (200–270 מ"צ).

| Treatments         | 200        | 220        | 250        | 270        |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|
| pH                 | 8.6 ± 0.0  | 8.3 ± 0.0  | 8.6 ± 0.0  | 8.6 ± 0.0  |
| EC (dS/m)          | 6.8 ± 0.5  | 5.0 ± 0.2  | 4.2 ± 0.0  | 3.7 ± 0.2  |
| Nitrogen %         | 2.6 ± 0.2  | 2.2 ± 0.0  | 2.5 ± 0.1  | 2.4 ± 0.1  |
| Carbon %           | 32.0 ± 1.7 | 32.3 ± 1.6 | 34.3 ± 1.2 | 33.6 ± 0.5 |
| Hydrogen %         | 4.1 ± 0.1  | 4.0 ± 0.2  | 4.0 ± 0.1  | 3.7 ± 0.1  |
| Ash %              | 41.8 ± 2.5 | 46.3 ± 1.9 | 44.5 ± 4.7 | 47.3 ± 3.6 |
| Oxygen %           | 19.5 ± 3.6 | 15.2 ± 3.1 | 14.6 ± 4.9 | 12.9 ± 4.0 |
| Atomic H/C         | 1.5 ± 0.1  | 1.5 ± 0.1  | 1.4 ± 0.0  | 1.3 ± 0.0  |
| Atomic O/C         | 0.5 ± 0.1  | 0.4 ± 0.1  | 0.3 ± 0.1  | 0.3 ± 0.1  |
| solid recovery %   | 57.9 ± 0.1 | 55.2 ± 0.0 | 53.4 ± 0.6 | 50.0 ± 0.4 |
| H.C (C) recovery % | 60.4 ± 0.0 | 58.1 ± 0.0 | 59.8 ± 0.0 | 54.8 ± 0.0 |
| H.C (N) recovery % | 44.7 ± 0.0 | 36.2 ± 0.0 | 40.0 ± 0.0 | 36.1 ± 0.0 |

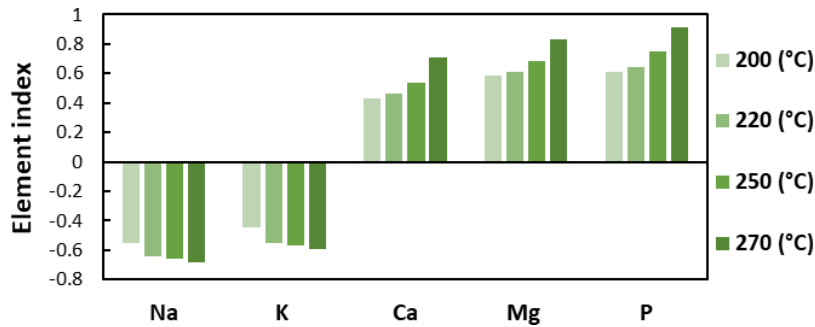
### 3.6.1 אפיון הידרו-פחם כתוסף למערכות ביולוגיות בדגש על ספיחת אמוניה והרחקת מלחים

מדד "אינדקס היסודות" (EI) חושב עבור קטיונים חד-ודי-ערכיים ועבור זרחן בדוגמאות הידרו-פחם שהופקו בכל אחת מטמפרטורות התגובה. EI מוגדר כיחס בין הפרש ריכוז היסוד (X) במי הנטל ובהידרו-פחם לריכוז היסוד (X) במי הנטל הגולמיים (**משוואה 1**).

$$Eq(1) \quad EI = \frac{Hydrochar \ element(X) \left(\frac{g}{kg}\right) - Digestate \ element(X) \left(\frac{g}{kg}\right)}{Digestate \ element(X) \left(\frac{g}{kg}\right)}$$

ה-EI חושף הבדלים בין ההידרו-פחם לבין מי הנטל (כלומר EI≠0) ועלייה הדרגתית עם הטמפרטורה. התיאור הגרפי **באיור 12** ממחיש ירידה בקטיונים חד ערכיים לאחר טיפול הידרותרמי כפי שמצוין על ידי הערכים השליליים. לעומת זאת, קטיונים דו ערכיים מציגים עלייה ניכרת בעקבות טיפול הידרותרמי כפי שבא לידי ביטוי בערכים החיוביים. יש לציין כי זרחן מפגין התנהגות דומה לקטיונים דו ערכיים. תופעה זו מצביעה על כך שטיפול הידרותרמי מוביל להפחתה בתכולת הנתרן והאשלגן, הנמצאים בשפע במי הנטל

הגולמיים לפי הנתונים בטבלה 3. במקביל, ישנה העשרה יחסית של קטיונים דו-ערכיים ותכולת זרחן בהידרו-פחם שנוצר.

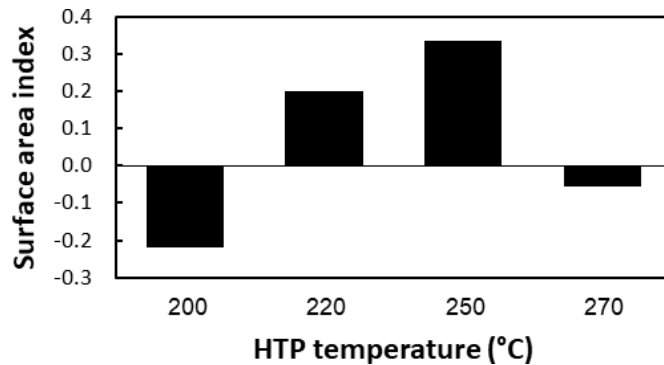


**איור 12.** אינדקס אלמנטים עבור זרחן, יונים חד-ערכיים ודו-ערכיים בהידרו-פחם (ביחס למי הנטל הגולמיים) שהופק בטמפרטורות השונות. ערכים שליליים מצביעים על הפחתה וערכים חיוביים מצביעים על הגברה.

אינדקס שטח פנים" (SAI) הוא היחס בין הפרש שטח הפנים של חומר הגלם (הפאזה המוצקה של מי הנטל) וההידרו-פחם לשטח הפנים של חומר הגלם (משוואה 2).

$$Eq(2) \quad SAI = \frac{\text{Hydrochar surface area} \left(\frac{m^2}{g}\right) - \text{Digestate surface area} \left(\frac{m^2}{g}\right)}{\text{Digestate surface area} \left(\frac{m^2}{g}\right)}$$

**איור 13** מתאר SAI עבור דוגמאות הידרו-פחם מכל הטיפולים שתוארו. ה-SAI משמש כאינדיקטור לשינוי בשטח הפנים בהידרו-פחם לאחר טיפול הידרותרמי. ערכים חיוביים מצביעים על עלייה בשטח הפנים, בעוד שערכים שליליים מצביעים על הפחתה בשטח הפנים בהשוואה לחומר הגלם הראשוני (הפאזה המוצקה של מי הנטל). הנתונים מצביעים על ערכי SAI חיוביים שנמצאו עבור הידרו-פחם בטמפרטורות של 250 מ"צ ו-220 מ"צ, מה שמעיד על עלייה בשטח הפנים ביחס לזה של חומר הגלם. לעומת זאת, טיפול הידרותרמי בטמפרטורות של 200 מ"צ ו-270 מ"צ גרם לערכי SAI שליליים, ירידה בשטח הפנים בהשוואה לחומר הגלם. יש לציין שהעלייה המשמעותית ביותר נצפתה בטיפול שנערך ב-250 מ"צ.



**איור 13.** "אינדקס שטח פנים" עבור הידרו-פחם שהופק ממי נטל בטמפרטורות שונות.



לסיכום, התוצאות מניסויי ההידרו-פחם מראות מגמות פיזיקליות וכימיות הקשורות לאפקט הטמפרטורה של טיפול ההידרו-תרמי במי הנטל. הניסויים תרמו לפיתוח פרוטוקולים מעבדתיים ואנליטיים. התוצאות תומכות ביעד הספציפי של בחירת תנאי תהליך התגובה האופטימליים לייצור הידרו-פחם ממי-נטל ומאשרות את ההשערה שלנו לגבי אפקטיביות הטיפול. יחד עם זאת, חשוב לציין שטיפול הידרותרמי במי הנטל חייב לעמוד במבחן היתכנות כלכלית (לא חלק מיעדי התכנית הנוכחית).

### 3.7 גמלון מתקן משקי

לקראת סוף השנה השלישית לתכנית הספקנו להשלים את גמלון המערכת בנווה יער (איור 14). מדובר במערכת שמבוססת על מעכל אנאירובי מדגם 6 של חברת "הום ביוגז" (איור 14 משמאל) שמוזן מידי יום בפרש רטוב (בנווה יער יש מפטמת עגלים לפיטום עם פרש יחסית יבש אז אנחנו מוסיפים מים לפרש). המעכל מבוסס על התהליך המוכר של תסיסה אנאירובית שממירה את הפחמן האורגני בפרש לביוגז (גז דליק המורכב מ-60-70% מתאן ו-30-40% פחמן דו חמצני). הקונפיגורציה הזו של המעכל (plug-flow) מאפשרת הפרדה קלה יחסית של פאזה מוצקה ונוזלית של מי הנטל (אחד ממצאי השנתיים הראשונות של התכנית) והיא כבר בשימוש נרחב בעולם ובארץ אולם השימוש שלה ברמת המשק הבודד עדיין אינו נפוץ בארץ. הביוגז יכול להזין גרטור לייצור חשמל או לשמש כחומר בעירה (גז בישול), חימום מים ועוד. בנווה יער אנו מתכוונים לנצל את האנרגיה לחימום מים (לטובת חימום חממת הדגמה) ובעתיד אף נשקול להגדיל את הספיקה היומית של הפרש המטופל (או להוסיף עוד מעכל) לטובת הפקת חשמל לשימוש מקומי (הטענת רכבים חשמליים למשל). כאמור, מלבד ביוגז, המעכל מייצר גם מי נטל שנמצאו עתירים ביסודות הזנה (חנקן, זרחן ואשלגן). תכנית ההפעלה של המעכל מאפשרת למעשה הפרדה יעילה של נוזלים ומוצקים ממי הנטל (ללא צורך בצנטריפוגה וסינון כמו במערכת המעבדתית). הפאזה הנוזלית יוצאת באופן יומיומי למיכל דישון בעוד המוצקים מצטברים במעכל ומסולקים אחת לחצי שנה. לאור התוצאות המבטיחות של השנתיים הראשונות אנו בוחנים האפשרות להשתמש בפאזה הנוזלית באגנים ירוקים (איור 14 מימין) בעלי זיקה לתשטיפים עם עומס אורגני גבוה ורמות נתון גבוהות יחסית. את המוצקים מהמערכת נסלק אחת לחצי שנה לשימוש כדישון ראש או בתוף הקומפוסטציה (איור 14, במרכז, או במתקן הידרותרמי (ראה סעיף 3.6) לייצור הידרוצ'אר שייצייב את המעכל האנאירובי.



איור 14. מבט על המערכת המשקית שהוקמה בנווה יער

#### 4. סיכום ומסקנות

הגידול בדרישה למזון מן החי הינו אתגר גלובלי וגם מקומי, המקבל ביטוי חזק יותר באזורים מפותחים, צפופים, ודלים במשאבים (קרקע, מים, אנרגיה). משבר המזון העולמי מחייב אם כך גם את המשק הישראלי למציאת כלים לקיום חקלאות אינטנסיבית לצד שמירה על הסביבה לדורות הבאים. מתקני ביוגז המבוססים על תסיסה אנאירובית של פרש בע"ח הם דוגמא מצוינת לניסיון להשבת אנרגיה מפסולת. אולם, הבעיה של היווצרות מי הנטל במתקני ביוגז מכבידה על יישום מתקנים אנאירוביים לטיפול בשפכי רפנות בארץ ובעולם. היעדר פתרון קצה למי הנטל מציב את המגדלים בבעיה חמורה שכן במקום לטפל בשפכים בצורה מקיימת הם נאלצים לפזר את מי הנטל בשטחים חקלאיים וגורמים לזיהום משני ונזק חמור לקרקע. למשל, מתקן הביוגז האזורי בעמק חפר מטפל בפרש מ-12,500 חולבות מרפתות האזור ומחוצה לו. בכל יום המתקן מטפל בכ-700 מ"ק פרש ובהנחה שלפחות 90% נותר כמי נטל – מדובר בכ-230 אלף מ"ק בשנה. מספר זה רק צפוי לעלות בעתיד. לעומת זאת, עתודות הקרקע לפיזור אינן צפויות לגדול ובהנחה שמדובר בשבעה חודשים בשנה בהם ניתן לפזר – הפתרון לבעיה חייב לכלול טיפול במי הנטל על מנת להביאם לאיכות המאפשרת פיזור או השקיה ללא הגבלה. לפיתוח טיפול משלים למי נטל ממתקני ביוגז יש מספר יתרונות פוטנציאליים, סביבתיים וכלכליים: (1) שימוש פנימי מקסימלי באנרגיה מתחדשת וצריכה מינימלית של אנרגיה חיצונית; (2) השבת נוטריינטים לשימוש חקלאי והפיכת מי הנטל ממטרד למשאב; (3) הפחתת הסכנה לזיהום הסביבה, אובדן שטחים חקלאיים ובריאות הציבור. בשנת המחקר הראשונה, אפיינו את מי הנטל מהמתקן בעמק חפר והתמקדנו בשימוש חקלאי מושכל בפאזה הנוזלית של מי הנטל לדישון ראש (רציף). **איתור הפוטנציאל הגלום באותם מי נטל מיקד את התכנית לכיוון של מיקסום השבת משאבים במינימום טופול נוסף.** בשנת המחקר השנייה, התמקדנו בפאזה המוצקה של מי הנטל ולמעשה זיהינו את הפוטנציאל לשימוש באותם מוצקים ללא **טיפול נוסף** לטיוב קרקע ושיפור פוריות הקרקע. את הפוטנציאל ניתן לראות הן באפיון כימי של אותם מוצקים והן בשיפור הצימוח והיבול של צמח מודל (תירס לתחמיץ) לאחר דישון יסוד בפאזה המוצקה של מי הנטל (בתחילת הגידול). בשנה השלישית בחנו אספקט נוסף של שימוש במי נטל לייצור הידרו-פחם – מוצר חדשני שעשוי לטייב מערכות ביולוגיות (לרבות מעכלים אנאירוביים) ובכך לתרום עוד ל"כלכלה המעגלית" של המערכת. בנוסף, לקראת סוף השנה השלישית, התמקדנו בגמלון המערכת והדגמה של הטיפול בקנה מידה משקי ברפת נווה יער. תכנון המתקן המשקי התאפשר בזכות ממצאי השנתיים הראשונות של התכנית שהצביעו על הצורך בהפרדה יעילה של הפאזה הנוזלית והמוצקה של מי הנטל. המערכת שהקמנו מאפשרת את אותה הפרדה ושימוש יעיל בכל פאזה ליישומים חקלאיים. יישום ממצאי המחקר (כפי שנעשה כיום בנווה יער) יאפשר מתן מענה לבעיה חמורה המכבידה על רפתות החלב בישראל, באמצעות טיפול מקומי יעיל וזול, תוך שימוש בעקרונות ה"כלכלה המעגלית" להשבת חומרי גלם ואנרגיה מתחדשת משפכי רפנות.

## 5. רשימת ספרות מצוטטת

1. מלכה, ה. (2014) שפכי מכון חליבה וזבל תמונת מצב וכווני התמודדות. מוסף הרפת והסביבה, 369, 28-31.
2. Kidron, J.G., Posmanik, R., Brunner, T., Nejidat, A. (2015) Spatial abundance of microbial nitrogen-transforming genes and inorganic nitrogen in biocrusts along a transect of an arid sand dune in the Negev Desert. *Soil Biology and Biochemistry* 83, 150–159.
3. Usack, J.G., Gerber Van Doren, L., Posmanik, R., Labatut, R.A., Tester, J.W., Angenent, L.T. (2018) An evaluation of anaerobic co-digestion implementation on New York State dairy farms using an environmental and economic life-cycle framework. *Applied Energy* 221, 28–40.
4. Posmanik, R., Nejidat, A., Dahan, O., Gross, A. (2017) Seasonal emissions of nitrous oxide from different irrigated desert soils amended with digested poultry manures. *Science of the Total Environment* 593–594, 91–98.
5. De Vries, J.W., Vinken, T.M.W.J., Hamelin, L., De Boer, I.J.M. (2012) Comparing environmental consequences of anaerobic mono- and co-digestion of pig manure to produce bioenergy– a life cycle perspective. *Bioresource Technology* 125, 239–248.
6. ten Hoeve, M., Hutchings, N.J., Peters, G.M., Svanström, M., Jensen, L.S., Bruun, S. (2014) Life cycle assessment of pig slurry treatment technologies for nutrient redistribution in Denmark. *Journal of Environmental Management* 132, 60–70.
7. International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) (2003) Endocrine Disruptors in the Environment. IUPAC Technical Report, *Pure Applied Chemistry*, 75, 5, pp. 31–681.
8. Cheng, D.L., Ngo, H.H., Guo, W.S., Liu, Y.W., Zhou, J.L., Chang, S.W., Nguyen, D.D., Bui, X.T., Zhang, X.B. (2018) Bioprocessing for elimination antibiotics and hormones from swine wastewater. *Science of the Total Environment* 621, 1664–1682.
9. Posmanik, R., Bar-Sinay, B., Nejidat, A., Gross, A. (2013) Integrated biological treatment of fowl manure for nitrogen recovery and reuse. *Journal of Environmental Management* 117, 172–179.
10. Gross, A., Guy, O., Posmanik, R., Fine, P., Nejidat, A. (2012) A novel method for the combined biowaste stabilization and production of nitrate-rich liquid fertilizer, for use in organic horticulture. *Water, Air, and Soil Pollution* 223, 1205–1214.