

דוח לתוכנית מחקר מספר 20-03-0027

שנת המחקר 3 מתוך 3 שנים: דוח סופי

## השפעת איכויות מים שונות, תכיפות ההשקיה ותעלות אוורור על אובדן חנקן

### לסביבה והצטברות ניטריט בבית השורשים בקרקע כבדה

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות

על ידי

שחר ברעם המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי, מרכז וולקני.

אשר בר-טל המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי, מרכז וולקני.

דדי רוסו המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי, מרכז וולקני.

שותפים למחקר:

הדר הלר המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי, מרכז וולקני.

אלון גל המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי, מרכז וולקני.

אנה בריוזקין המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי, מרכז וולקני.

אשר לאופר המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי, מרכז וולקני.

Shahar Baram, Institute for Soil, Water and Environmental Sciences, ARO Volcani Research Center, Bet Dagan, 50250, Israel. E-mail: shaharb@volcani.agri.gov.il

Asher Bar-Tal, Institute for Soil, Water and Environmental Sciences, ARO Volcani Research Center, Bet Dagan, 50250, Israel. E-mail: abartal@volcani.agri.gov.il

David Russo, Institute for Soil, Water and Environmental Sciences, ARO Volcani Research Center, Bet Dagan, 50250, Israel.

E-mail: vwrosd@volcani.agri.gov.il

Hadar Heller, Institute for Soil, Water and Environmental Sciences, ARO Volcani Research Center, Bet Dagan, 50250, Israel. E-mail: hadarh@agri.gov.il

## תוכן עניינים

|    |                                                     |
|----|-----------------------------------------------------|
| 3  | רשימת איורים.....                                   |
| 4  | רשימת טבלאות.....                                   |
| 4  | 1. תקציר מדעי.....                                  |
| 5  | 2. מבוא.....                                        |
| 7  | 3. מטרות המחקר.....                                 |
| 7  | 4. שיטות וחומרים.....                               |
| 9  | 4.1. שיטות.....                                     |
| 9  | 4.1.1. דיגום בשדה של מי הקרקע והעומד ההידראולי..... |
| 9  | 4.1.2. דיגום גזי חממה.....                          |
|    | 4.1.3. אנליזת חנקן בתמיסת הקרקע 12                  |
| 15 | 4.1.7. ריכוז כלל הפעילות שנעשתה.....                |
| 16 | 4.1.8. ניתוח סטטיסטי.....                           |
| 16 | 5. תוצאות ודיון.....                                |
| 16 | 5.1. דישון והשקיה.....                              |
| 18 | 5.2. חנקן בתמיסת הקרקע.....                         |
| 19 | 5.2.1. ניטרט (חנקה $\text{NO}_3^-$ ).....           |
| 20 | 5.2.2. אמון ( $\text{NH}_4^+$ ).....                |
| 21 | 5.2.3. ניטריט ( $\text{NO}_2^-$ ).....              |
| 25 | 5.3. גזי חממה.....                                  |
| 26 | 5.3.1. פליטת גז החממה $\text{N}_2\text{O}$ .....    |
| 36 | 5.3.1. פליטת גז החממה $\text{CO}_2$ .....           |
| 40 | 6. סיכום ומסקנות.....                               |
| 41 | 7. ביבליוגרפיה.....                                 |
| 48 | נספחים.....                                         |

## רשימת איורים

- איור 1. מבנה חלקת הניסוי ..... 9
- איור 2. מבנה חלקת מחקר, מערך הניטור סביב עצי המדידה בשדה ואופן מדידת שטף הגז בשדה. .... 11
- איור 3. אחוז דעיכת שטף גז  $N_2O$  כתלות בימים שעברו ממועד הדשייה בטפטוף ..... 12
- איור 4. גשם מצטבר בחלקת המחקר במהלך חורף 2018-2019 וחורף 2019-2020 ..... 18
- איור 5. עובי השקיה מצטבר בכלל הטיפולים במהלך שלוש שנות המחקר. .... 18
- איור 6. כמות חנקן מצטברת שנתנה לכל טיפול במהלך עונות ההדשייה 2018, 2019 ו- 2020. .... 18
- איור 7. השתנות לאורך תקופת המדידה של ריכוזי האמון, הניטריט והניטרט הממוצעים בעומק 35 ס"מ מתחת לטיפולים השונים כפי שנמדדו בדוגמאות המים היומיות. .... 22
- איור 8. השתנות לאורך תקופת המדידה של ריכוזי האמון, הניטריט והניטרט הממוצעים בעומק 35 ס"מ מתחת לטיפולים השונים כפי שנמדדו בדוגמאות המים המורכבות. .... 23
- איור 9. ריכוזי האמון, הניטריט והניטרט הממוצעים בעומק 90 ס"מ מתחת לטיפולים השונים כפי שנמדדו בדוגמאות המים המורכבות מתחת לטיפולים השונים. .... 24
- איור 10. גובה המים המצטבר אשר חלחלו מתחת לבית השורשים בטיפולים השונים במהלך שנה. .... 25
- איור 11. שטף מים יומי מתחת לשלושת הטיפולים העיקריים (על בסיס תוצאות המודל הנומרי). .... 25
- איור 12. שטף  $N_2O$  ו-  $CO_2$  ממוצע עבור כלל הטיפולים כפי שנמדדו בתאי דיגום סטטיים עם טפטפת (with) וללא טפטפת (withouot) במרכזן. .... 26
- איור 13. התפלגות ריכוזי האמון והניטרט בחתך הקרקע מתחת לשלוחת טפטוף על בסיס המודל הנומרי. .... 27
- איור 14. תוצאות מודל הזרימה המראה את התפלגות ריכוזי הניטרט והאמון בעשרת הסנטימטרים העליונים של חתך הקרקע מתחת לטפטפת ללא תא סטטי ומתחת לתאים סטטיים בעלי קוטר שונה שהוחדרו כ 10 ס"מ לתוך הקרקע, ולאורך 60 יום מתחילת עונת הדישון. .... 27
- איור 15. שטף מצטבר ממוצע של  $N_2O$  (גרם לעץ כחנקן) שנפלט במהלך שלוש עונות ההדשייה ובשני החורפים ביניהן מחמשת הטיפולים השונים. .... 30
- איור 16. (A) יחס בין כמות ה-  $N_2O$  (גרם לדונם) שנפלטת במהלך עונות ההשקיה 2018 ו- 2019 לבין כמות ה-  $N_2O$  (גרם לדונם) שנפלטת במהלך החורף העוקב, בהתאמה. (B) כמות ה-  $N_2O$  (ק"ג לדונם) שנפלטת במהלך שני החורפים בהם נערך המחקר (2018-2019, ו- 2019-2020). .... 30
- איור 17. (A) אחוז החנקן שנפלט כגז  $N_2O$  ביחס לכלל החנקן שיושם במטע בעונות 2018, 2019, 2020. (B) כמות החנקן המצטברת שנפלטת בכל שנה, ותרומתם היחסית של עונות ההדשייה והחורף. .... 31
- איור 18. (שמאל) השתנות היחס בין השטף היומי המצטבר סביב עץ של גז החממה  $N_2O$  לבין כמות החנקן שניתנה לעץ באותה העת מהטיפולים השונים במהלך עונת 2019 על פי תוצאות המודל הנומרי. (ימין) מידול השפעת הטיפולים השונים בקולחים ודישון בדשן דל אמון אל מול השקיה

- בשפירים בדשן עשיר אמון על השטף היומי הממוצע סביב עץ (שלוש טפטפות מכל צד) של גז
- 34..... החממה  $N_2O$
- 34..... איור 19. שטף מצטבר של גז החממה  $N_2O$  במהלך כל תקופת המחקר על פי מדידות השדה.
- איור 20. שטף מצטבר ממוצע של  $CO_2$  (ק"ג לעץ כפחמן) שנפלט במהלך שלוש עונות ההדשנה ובשני
- 39..... החורפים ביניהן מחמשת הטיפולים השונים.
- 39..... איור 21. שטף מצטבר של גז החממה  $CO_2$  במהלך כל תקופת המחקר על פי מדידות השדה.

## רשימת טבלאות

- טבלה 1. הרכב ממוצע לאורך תקופת המחקר של מי הקולחים ומי השפירים ששימשו להשקיה.....7
- טבלה 2. הטיפולים האגרונמיים השונים בחלקת המחקר כולל איכות מי ההשקיה, מרווחי ההשקיה ומערכת ההשקיה.....8
- טבלה 3. דעיכת שטף  $N_2O$  כתלות בזמן מאירוע הדשייה בטפטוף ומקדמי התיקון בהם נעשה שימוש.....11
- טבלה 4. פרמטרים הידרולוגיים מאפיינים של הקרקע אשר שימשו לחישוב שטף המים בעומק 90 ס"מ מתחת לבית השורשים.....13
- טבלה 5. ריכוז הפעילות שהתבצעה במהלך המחקר, כולל מועדי הפעילות.....15
- טבלה 6. מספר הדוגמאות שנאספו בשתי שיטות דיגום המים (יומי, מורכב) משני העומקים (35 ו-90 ס"מ).....19
- טבלה 7. ערכי שטף  $N-N_2O$  ממוצעים עבור כלל הטיפולים בשלושת עונות ההשקיה ובשני החורפים.....29
- טבלה 8. בחינה סטטיסטית של הבדלים בין שטפי  $N-N_2O$  שנמדדו בשדה בטיפולים השונים בכל יום דיגום.....35
- טבלה 9. ערכי פוטנציאל ההתחממות הגלובלית הנובע מפליטות גז ה- $N_2O$  עבור השנים השונות במחקר.....40

## 1. תקציר מדעי

פרויקט מחקר זה הינו חלק ממיזם האבוקדו המתבצע במטע קיבוץ יסעור. מטרת המחקר הנוכחי הינן לבחון את גורל החנקן בקרקע חרסית כבדה כתלות בתכיפות ההשקיה ובאיכות מי ההשקיה, והשפעתם על תשטיפים מתחת לבית השורשים, הצטברות ניטריט בבית השורשים ופליטת גזי חממה. במהלך שלוש עונות דישון (2018, 2019, 2020) ובחורפים ביניהן, הושקע מאמץ נרחב באיסוף מידע בשדה על ההשתנות העונתית, השבועית והיומית של שטף גזי החממה  $N_2O$  ו- $CO_2$ , וכן על ריכוז צורני החנקן בתמיסת הקרקע בעומק של 35 ו-90 ס"מ. במהלך המחקר נאספו מעל 1300 דוגמאות מים, מהן 930 דוגמאות מים מבית השורשים. כלל דוגמאות המים עברו אנליזה כימית לקביעת ריכוז צורני החנקן (אמון

( $\text{NH}_4^+$ ), ניטריט ( $\text{NO}_2^-$ ), וניטרט ( $\text{NO}_3^-$ ) בתמיסות. חנקת ( $\text{NO}_3^-$ ) נמצא כצורן החנקן העיקרי בתמיסת הקרקע. ריכוז החנקת בבית השורשים (35 ס"מ) ומתחת לו (עומק 90 ס"מ) הראה מגמה עונתית של עלייה בריכוז מתחילת עונת הדישון, התייצבות על ערכים גבוהים (50 ~ מג"ל חנקן- בחנקת) וירידה במהלך החורף. תוצאות אלו יחד עם מדידות העומד המטריצי בקרקע מעידות של שטיפה של חנקן בריכוז מעל לתקן מי השתייה אל מי התהום. מגמה זו היתה חמורה יותר בטיפולי הקולחים מאשר בטיפולי השפירים. תמיסות מי הקרקע הראו כי במרבית הזמן לא קיימת היווצרות והצטברות של חנקת ( $\text{NO}_2^-$ ) בקרקע. יחד עם זאת, במספר פעמים לא מבוטל נצפו ריכוזי חנקת גבוהים מ- 5 מג"ל (כחנקן בחנקת) בעומק של 35 ס"מ וגם בעומק של 90 ס"מ. ריכוזי החנקת הגבוהים נמדדו בעיקר במהלך תקופת ההדשה ולא בחורף. בהתאם לכך הגיוני לשער כי קיימת קליטה של חנקת על ידי הצמח בתקופה זו. שטפי ה- $\text{N}_2\text{O}$  בשדה הראו קשר ברור לדישון. באופן כללי, שטפי הגז שנמדדו בשדה במהלך תקופת ההדשה היו יחסית גבוהים בהשוואה למחקרים אחרים בהם נלמדה השפעת הדשה בטפטוף על שטף ה- $\text{N}_2\text{O}$  מהקרקע. פליטת  $\text{N}_2\text{O}$  במהלך החורף תרמה בערך 30% מסך הפליטות השנתיות. לא נמצאו קשרים סטטיסטיים מובהקים בין התנאים הפיזיקו-כימיים בקרקע לבין שטף ה- $\text{N}_2\text{O}$  מהקרקע. כפי הנראה כתוצאה מהשוניות המרחבית הגדולה בין החזרות בטיפולים השונים. יחד עם זאת השקיה במים שפירים הפחיתה את פליטת גזי החממה בהשוואה להשקיה בקולחים, והפליטה המצטברת הגבוהה ביותר היתה מטיפול הטוף. בחינה של דפוס הפליטה היומי של  $\text{CO}_2$  לא הראה שונות סטטיסטית מובהקת בין הטיפולים, למעט בטיפול המשקי בו הפליטות היו נמוכות יותר. על אף שוני זה, לא נצפו הבדלים מהותיים בפליטה המצטברת בין הטיפולים השונים. השוואה של סך פוטנציאל החימום הגלובאלי כתוצאה מפליטת גזי החממה ביחס לכמות הפחמן שמקובע על ידי העצים, הראתה שבנטו השנתי המטע מהווה מבלע ולא מקור לגזי חממה.

זרימת המים, תנועת המומסים ופליטת  $\text{N}_2\text{O}$  במהלך עונת ההדשה נבחנו באמצעות מודל פיזיקלי תלת מימדי של זרימה והסעה בקרקע הטרוגנית. תוצאות המודל תאמו את תצפיות השדה וחיזקו את אמינות התצפיות.

## 2. מבוא

מי הקולחים מהווים 35% (435 מל"מ"ק מתוך 1,231 מל"מ"ק) מכלל מי ההשקיה בחקלאות ישראל, ומשמשים בין היתר להשקייה של 833 אלף דונם מטעים (נתוני דו"ח משרד החקלאות, 2013). באזורים שונים בארץ, כולל בצפון, חלק ניכר ממשעי עצי הפרי המושקים בקולחין נטוע בקרקעות המאופיינות בתכולת חרסית גבוהה (מעל 40%). לאורך השנים נמצא כי השקייה בקולחים של קרקעות בעלות אחוז חרסית גבוהה (<30%, קרי: קרקע כבדה) מובילה למגמה ברורה של ירידה לאורך הזמן בביצועי העצים במטעים שונים (טרצ'יצקי ואח' 2006; זילברשטיין ואח' 2009; נאור ואח' 2009; Paudel et al., 2016; Assouline and Narkis, 2013; Assouline et al., 2015). אחד הגורמים העיקריים שנמצאו כמובילים לעקות במטעים המושקים בקולחים הינו הפחתת אוורור הקרקע; הנובעת מפגיעה במבנה הקרקע כתוצאה מעודף נתרן (ערכי- $\text{SAR}$  sodium adsorption ratio- גבוהים) ומהגברת נשימת הקרקע (ייצור ופליטת  $\text{CO}_2$ ) כתוצאה מתכולת החומר האורגני שבקולחים, או משילוב של שניהם (טרצ'יצקי ואח' 2015; בר טל ואח' 2015). בניסויים שונים בקרקעות כבדות המושקות בקולחים (טרצ'יצקי ואח' 2015), נמצא כי עלתה מידת התפיחה בקרקע וירדו כושר החידור, המוליכות ההידראולית ברוויה והספיגות, בהשוואה לחלקות

השפירים. באותם מקומות נמצא קשר הדוק בין רטיבות הקרקע לבין ערכי הרדוקס הנמוכים יותר (תנאי חיזור) שנמדדו לאורך שנתיים רצופות בבית השורשים במטעים מושקי קולחים. בניסוי אחר (בר טל ואח' 2015) נמצא כי בעת השקיה בקולחין של קרקע כבדה, ריכוז הניטראט בנקז ובעומק הקרקע היה נמוך מאוד; דבר שהצביע מחד על בעיית אוורור בקרקע ומאידך על מנגנון המונע אובדן דשנים למי התהום. בנוסף לפגיעה במבנה הפיסיקו-כימי של הקרקע, מחקרים הראו כי להשקיה בקולחים ישנה השפעה גדולה על הרכב חברת החיידקים בקרקע ועל פעילותם, בין השאר בפירוק מקרומולקולות אורגניות, חמצון חיזור וניטריפיקציה (Elifanz et al., 2001; Oved et al., 2011; Frenk et al., 2014). לאור תובנות אלו, החלה עבודת מחקר נרחבת במטע בצפון הארץ בו נבחנו טיפולים אגרוטכניים שונים בכדי לשפר את מצב האוורור בקרקעות כבדות שנפגעו מהשקיה רבת שנים בקולחים. טיפולים אגרוטכניים אלו כוללים: ממשקי השקיה שונים, תעלות אוורור ושינוי בהרכב המים המקטין את ערך ה SAR (איור 1). הנחות העבודה של מחקר זה הינן: (1) בזמן ההשקיה בקולחים נוצר מצב של מחסור בחמצן ופוטנציאל רדוקס נמוך בקרקע בנפח הקרקע המורטב (טרצ'צקי ואח' 2015), ועל כן השקיה בתדירות נמוכה ובמנות קטנות ליחידת שטח מושקה תמנע או תצמצם את משך מצבי חוסר חמצן בקרקע; (2) שיפור האוורור בנפח מצומצם, בתוך תעלות אוורור יאפשר התפתחות ופעילות שורשים תקינה שתפצה על חוסר האוורור העיתי בנפח הקרקע הכללי; (3) הורדת ה SAR של מי הקולחים כדרך לשיפור הדרגתי של מבנה הקרקע ושיפור מצב האוורור בבית השורשים. על אף המאמץ הנרחב שמושקע בפרויקט זה, במסגרת הפרויקט לא נבחנת ההשפעה של הפתרונות אגרוטכניים השונים על אובדני חנקן לסביבה, הן כגזי חממה ( $N_2O$ ) והן כתשטיפי ניטראט מתחת לבית השורשים. מאחר וריכוז ניטראט מעבר לתקן מי השתיה הינו הגורם הנפוץ ביותר לסגירת בארות הפקה בארץ (רשות המים, 2013) ובעולם, ומאחר וחקלאות הינה מקור נרחב לפליטת גזי חממה, בייחוד  $N_2O$  אשר הינו בעל פוטנציאל חימום עולמי (Global Warming Potential - GWP) גבוהה פי 310 מ  $CO_2$ , יש לבחון את התועלת האגרוטכנית של הפתרונות המוצעים אל מול פוטנציאל הזיהום הסביבתי שלהם.

ממשקי ניהול הדישון וההשקיה בחקלאות נמצאו כגורמים בעלי ההשפעה הגבוהה ביותר על מחזור החנקן בקרקע, פליטת גזי חממה ( $CO_2$  ו-  $N_2O$ ) מפני השטח (Heller et al., 2010) ושטפי החנקן מתחת לבית השורשים; בייחוד במשטרי הדישון הנהוגים כיום, בהם 30-50% מכמות הדשן החנקני המסופקת לגידול בעונה נשטפת מתחת לבית השורשים (Baram et al., 2016; Kurtzman et al., 2013). ממשקים אלו משפיעים באופן ישיר ועיתי על כמות הנקבובים המלאים במים (נ"מ) (water-filled pore space), ריכוז החמצן, האמוניום ( $NH_4^+$ ), הניטראט ( $NO_3^-$ ) והניטריט ( $NO_2^-$ ) חנקית) במי הנקבים, אשר מווסתים את הצריכה, ייצור ותנועה של צורוני החנקן השונים, כולל גזי חממה, בקרקע (Davidson and Schmiel, 1995). לאחרונה דווח כי תנאים המובילים להצטברות ניטריט בקרקע גורמים לפליטה של גז חממה  $N_2O$  (Cai et al., 2016). בהתאם לכך, ממשק אגרוטכני של השקיה תכופה, יכול לשמור על כמות נ"מ גבוהה יותר בשכבת הקרקע העליונה, בהשוואה לתכיפות השקיה נמוכה יותר, להוריד את זמינות החמצן בקרקע העליונה ולהגביר את תהליך הניטריפיקציה. יתרה מזאת, כאשר נעשה שימוש בקולחים במקום במים שפירים, פוטנציאל וקצבי הניטריפיקציה בקרקע יורדים, כפי הנראה כתוצאה ממחסור בחמצן עקב חימצון החומר האורגני מהקולחים (Stevens and Laughlin, 2001b; Zaman et al., 1999; Oved et al., 2001). בנוסף, נמצא כי השקיה בקולחין מובילה לאינהיביציה (עיכוב) קצרת מועד של תהליכי הניטריפיקציה בקרקע ולהצטברות ניטריט, עקב הצטברות גז אמוניה ( $NH_3$ ) או נוכחותן של מולקולות אורגניות בעלות משקל מולקולארי נמוך במים ובקרקע (Master et al., 2003; 2004). בקרקע ככלל ובקרקעות כבדות בפרט תהליכי ניטריפיקציה ודניטריפיקציה מתרחשים באופן מצומד (Kremen et al., 2005; Baram et al., 2012). בניגוד לקרקעות קלות, בקרקעות כבדות תופחות מערכות הסידוק הטבעיות, המתפתחות בעת הייבוש,

מגבירות את אוורור הקרקע, מאיצות תהליכי המלחה, מוליכות מים לעומק החתך ומשפיעות על מחזור החנקן ( Sher et al., 2012; Baram et al., 2013). בהתאם לכך כל שינוי בתדירות ההשקיה ובאיכות מי ההשקיה ישפיע באופן ישיר על רמת האוורור של בית השורשים ועל אובדני החנקן לסביבה.

### 3. מטרות המחקר

המטרה הכללית של מחקר זה (כפי שמופיעה בהצעת המחקר) הינה בחינת השפעת ממשקים אגרוטכניים שונים של השקיה בקולחים על דליפה אפשרית של ניטרט מתחת לבית השורשים, היווצרות ניטריט שעלולה לפגוע בשורשים ובעצים ופליטת גזי חממה. מטרות המשנה של המחקר הן:

א. לזהות ולאפיין את השינויים (עיתיים ורצופים) בהרכב צורני החנקן בתמיסת הקרקע באזור בית השורשים הפעיל ומתחת לו ואת שטף גזי החממה מפני השטח, בעקבות השקיה ממושכת בקולחים, בהשוואה למים שפירים, ולהשוות בין אובדני החנקן לסביבה בממשקים האגרוטכניים השונים שנבחנו כיום לשיפור אוורור קרקע כבדה המושקית בקולחים.

ב. לבחון את השינוי העיתי בריכוז הניטריט בבית השורשים כתלות ברמת האוורור של הקרקע ואיכות המים.

ג. לבחון את דליפות החנקן מהמטע (אובדנים לאוויר וחלחול מתחת לבית השורשים הפעיל) ביחס ליבול בכדי לגבש המלצות לחקלאי ולמטווי המדיניות לגבי יתרונות וחסרונות הפתרונות האגרוטכניים השונים. ד. הוספה של מודול המכמת את פליטת גזי החממה, ונתונים עיתיים על אובדן חנקן מתחת לבית השורשים כאמצעי כיוול למודל הנומרי בו נעשה שימוש באתר המחקר.

### 4. שיטות וחומרים

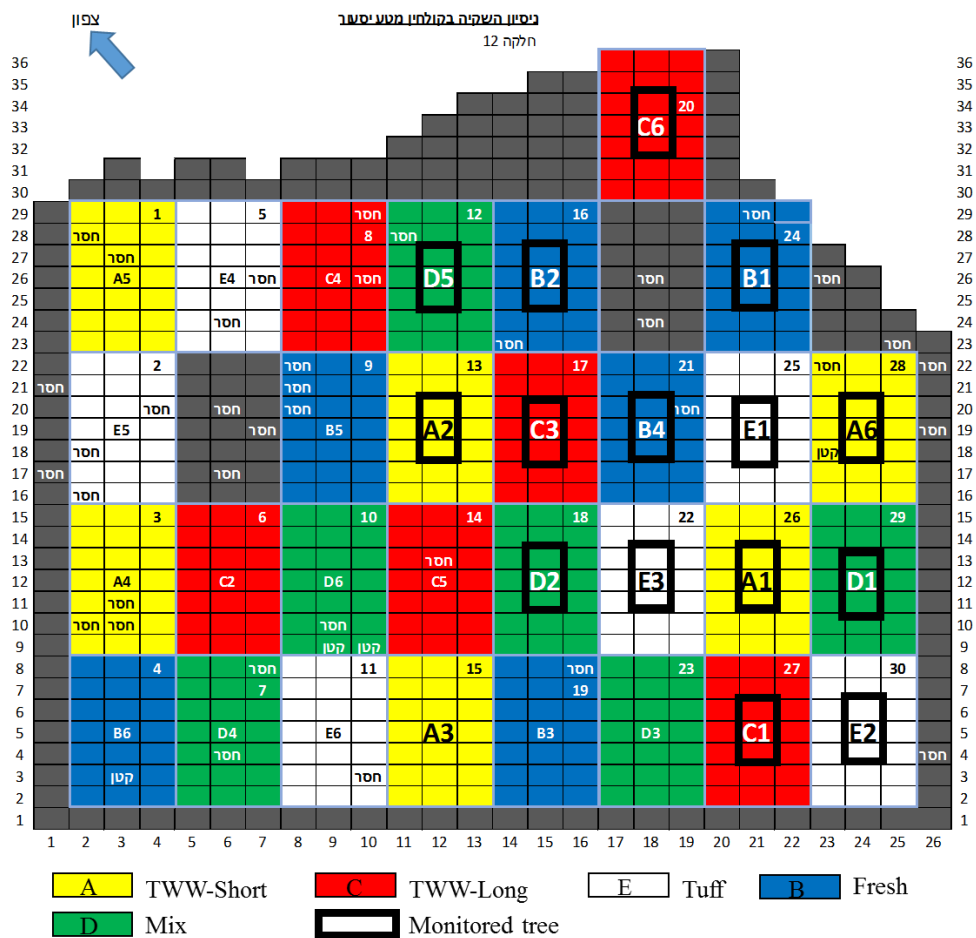
הניסוי התבצע בעצי אבוקדו מזן האס, בחלקה שניטעה בשנת 2009 במטע האבוקדו של קיבוץ יסעור (חלקה 12). שטח המטע הינו כ-17 ד' ובו נבחנו 5 טיפולים אגרוטכניים שונים במסגרת פרויקט מחקר של טרצ'יזקי וחוב' (2018) אשר מטרתו בחינת טיפולים למניעה ותיקון הנזק מהשקיה בקולחים במטעים בקרקעות כבדות. הטיפולים כוללים ממשקי השקיה שונים, איכויות מים שונות (טבלה 1) ותעלות אוורור עם סלע סקוריה טחון (ידוע בכינוי "טוף") (טבלה 2). תעלות האוורור נחפרו במרחק 30 ס"מ משני צדדי העצים, ברוחב ובעומק של 30 ס"מ. כל חלקת-מחקר (חזרה) מורכבת משלוש שורות עצים, באורך וברוחב של שבעה ושלושה עצים, בהתאמה (סה"כ 21 עצים בחזרה). לכל טיפול יש שש חזרות, ובכל חזרה שלושת העצים המרכזיים בשורה האמצעית משמשים כעצי המדידה, עם שטח ניסוי כולל של 8.8 דונם (איור 1). כלל הטיפולים מושקים בקווי טפטוף, הנמצאים במרחק 20-30 ס"מ משני צדדי העצים. תעלות הטוף הושקו מספר פעמים ביום במהלך 2018 ופעם ביום במהלך 2019 ו-2020.

**טבלה 1.** הרכב ממוצע לאורך תקופת המחקר של מי הקולחים ומי השפירים ששימשו להשקיה

|       | pH      | EC<br>mS cm <sup>-1</sup> | TSS                           | COD  | BOD   | Cl <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N |
|-------|---------|---------------------------|-------------------------------|------|-------|-----------------|---------------------------------|---------------------------------|
|       |         |                           | -----mg L <sup>-1</sup> ----- |      |       |                 |                                 |                                 |
| TWW   | 8.4±0.3 | 1.5±0.3                   | 12±3                          | 37±8 | 7.2±2 | 210±10          | ±14                             | 6.1±2                           |
| Fresh | 7.7±0.3 | 0.81±0.0                  | 0                             | 0    | 0     | 81±9            | 6±3                             | 0.5±1                           |

טבלה 2. הטיפולים האגרנטים השונים בחלקת המחקר כולל איכות מי ההשקיה, מרווחי ההשקיה ומערכת ההשקיה

| מספר שלוחות/<br>ספיקת טפטפות<br>(ל"/ש') | תיאור                                                   | מרווח השקיה                    | סוג מי ההשקיה       |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| 1.6/2                                   | השקיה משקית (TWW-Short)                                 | שלוש פעמים בשבוע               | קולחים              |
| 1.6/2                                   | השקיה משקית (Fresh)                                     | כנ"ל                           | שפירים              |
| 0.7/4                                   | 50% קולחים ו- 50% שפירים (שתי שלוחות לכל סוג מים) (Mix) | כנ"ל                           | קולחים-שפירים       |
| 1.6/3                                   | אינטרוול ארוך (TWW-Long)                                | פעמיים בשבוע                   | קולחים ממשק השקיה   |
| 1.6/2                                   | שתי תעלות מלאות בטוף (אחת מכל צד) (Tuff)                | יומית – פעם עד מספר פעמים ביום | קולחים-תעלות אוורור |





**איור 1.** מבנה חלקת הניסוי של טרצ' יצקן וחוב'. (2018) הכוללת חמישה טיפולים בשש חזרות עבור כל טיפול עם 21 עצים בטיפול (מלבנים קטנים). מלבנים שחורים בחלקו המזרחי של המטע מייצגים את העצים שנוטרו במחקר זה. חסר – מייצג עץ חסר, קטן – מייצג עץ קטן חריג בגודלו.

## 4.1. שיטות

### 4.1.1. דיגום בשדה של מי הקרקע והעומד ההידראולי

המחקר החל באוקטובר 2017. בהתאם לתוכנית המחקר, השלב הראשון במחקר היה בניה והתקנה של משאבים לדיגום מי הקרקע. בשלוש מתוך ארבע החזרות בניסוי הותקנו במהלך חורף 2018, שני משאבים לאיסוף תמיסת הקרקע, אחד בבית השורשים (עומק 35 ס"מ) והשני מתחת לבית השורשים האקטיבי (עומק 90 ס"מ). בתחילת שנת 2019 הותקנו בכל החזרות טנסיומטרים בעומק של 90 ס"מ. מי הקרקע נדגמו אחת לשבוע עד שלושה שבועות במהלך עונת ההשקיה ואחת לחודש במהלך החורף באמצעות יצירת תת לחץ בגוף המשאב. שני סוגי תמיסות נאספו. הראשונה: תמיסה מורכבת, מייצגת את הרכב תמיסת הקרקע הממוצע בין שני ימי דיגום, והשנייה: תמיסה יומית, המייצגת את הרכב המים לאורך מספר שעות במהלך יום דיגום, ולרוב נאספת במהלך ובסמוך לזמן ההשקיה. לקראת סיום כל עונת השקיה (2018, 2019) נערך שבוע דיגום רציף בו נדגמו מים מספר פעמים ביום בכל תחנת מדידה.

העומד ההידראולי בעומק 90 ס"מ נמדד ידנית אחת לחודש באמצעות חיבור טנסיומטר אלקטרוני (Vacuum Meter, VC-9200, Lutron) לטנסיומטרים בשדה.

### 4.1.2. דיגום גזי החממה

שטף גזי החממה מפני הקרקע בטיפולים השונים נמדד באמצעות תאי דיגום סטטיים אשר הוחדרו לתוך הקרקע לעומק של 8 ס"מ. בכל טיפול הותקנו שלושה תאים עם טפטפת במרכזם וכן תא אחד ללא טפטפת (איור 2). שטף גזי החממה נמדד בשדה, באותה התדירות של דיגום המים (כולל שבוע הדיגום; ראה טבלה 4), באמצעות סחרור של האוויר בחלל התא הסטטי דרך מכשיר Gasmet DX-4015. המדידות נעשו כל 10 שניות וברזולוציה של 1 הרץ, (קרי כל נקודת דיגום מייצגת ממוצע של 100 קריאות).

הקשר הישיר בין השתנות הריכוז הנפחי ( $\Delta C$ ,  $\mu\text{L/L}$ ) של גז נתון בתא הסטטי לבין זמן המדידה ( $\Delta t$ ) ( $\text{min/sec}$ ) שימש לחישוב שטף הגז מפני הקרקע ( $F_{N_2O}$ ) (מיקרוגרם לס"מ<sup>3</sup> לשניה) באמצעות משוואה 1.

$$F_{N_2O} = \left( \frac{\Delta C}{\Delta t} \right) \times \left( \frac{P}{RT} \right) M_w \times \left( \frac{V}{A} \right) \quad \text{משוואה 1.}$$

כאשר  $M_w$  הינו המסה המולקולרית של גז ה-  $N_2O$  וה-  $CO_2$  (44.01 ג'/מול),  $P$  (אטמ') ו-  $T$  (קלווין) הם הלחץ האטמוספרי וטמפרטורת התא הסטטי בשדה, בהתאמה,  $R$  [82.057338 (אטמ' ס"מ<sup>3</sup>)/(קלווין מול)] קבוע הגזים האוניברסלי,  $V$  (3768 ס"מ<sup>3</sup>) ו-  $A$  (314.159 ס"מ<sup>2</sup>) הם נפח ושטח הפנים של תא הדיגום הסטטי, בהתאמה.

שטף הפליטה של גז  $N_2O$  מפני השטח סביב טפטפת בודדת  $q_{drip}$  (ננוגרם לשנייה לטפטפת) חושב על פי משוואה 2 (Baram et al., 2018), תוך הנחה שלא קיימת חפיפה בין בצלי ההרטבה של טפטפות סמוכות (אושש על ידי תצפיות במטע), ושרדיוס ההרטבה מסביב לטפטפת אחיד ושווה בכל הטפטפות בשלוחות הטפטוף בניסוי:

$$q_{drip} = \int_0^{r_{max}} 2\pi \times q_{max} \times \sin\left[\frac{\pi}{2} \times \left(\frac{r}{r_{max}} + 1\right)\right] r dr$$

$$= \frac{4(\pi - 2)q_{max} \times r_{max}^2}{\pi}$$

משוואה 2

כאשר  $q_{max}$  (ננוגרם לסמ"ר לשניה) הינו השטף המדוד במרכז בצל ההרטבה (ליד הטפטפת;  $r=0$  ו- $r_{max}$  (ס"מ) הוא מרחק ההרטבה המקסימלי ממרכז הטפטפת ( $r=r_{max}=20\text{cm}$ ). המשוואה סוכמת את השטפים כדעיכה ממרכז הטפטפת בה השטף הינו מקסימלי לקצוות התחום הרטוב מסביב לטפטפת בהם השטף שואף לאפס.

שטף הגז מעץ בודד במטע ( $q_{tree}$ ) (ננוגרם לשנייה לעץ) חושב על ידי הכפלת השטף מטפטפת בודדת ( $q_{drip}$ ) במספר הטפטפות לעץ כפי שמתואר במשוואה 3. בבסיס חישוב זה ההנחה שהפליטות מהשטח ללא ההרטבה הינן זניחות:

$$q_{tree} = q_{drip} \times \frac{PS(m)}{DS(m)} \times DL$$

משוואה 3

כאשר  $PS$  הינו מרווח הנטיעה בין עצים (3.5 מטר),  $DS$  מרווח בין טפטפות על השלוחה (0.3 מטר), ו- $DL$  מספר שלוחות הטפטוף (2 – כלל הטיפולים, ו-3 אינטרוול ארוך). בהתאם למשוואה 3, מספר הטפטפות הכולל לעץ הינו 23 ו-35 טפטפות בכלל הטיפולים ובטיפול קולחים אינטרוול ארוך, בהתאמה. שטף הגז לדונם ( $q_{dunam}$ ) (ננוגרם לשנייה לדונם) חושב על ידי הכפלת השטף מעץ בודד ( $q_{tree}$ ) במספר העצים בדונם (55.5 עצים). שטף הגז היומי לדונם ( $Q$ ) (ק"ג ליום לדונם) חושב על ידי הכפלה של  $q_{dunam}$  במספר השניות ביום (86,400 שניות) וחלוקה ב- $10^9$ . כאשר אנו מניחים כי השטף השעתי אותו מדדנו בחלקת הניסוי אינו משתנה וקבוע במהלך היום. זוהי הערכה מחמירה שמתארת את התרחיש הקיצוני של הפליטות מן הקרקע לאטמוספירה.

שטף הפליטה המצטבר של גזי החממה (חודשי, עונתי ושנתי), לאורך תקופת המדידה חושב על ידי סכימה של השטף היומי. השלמת המידע לימים בהם לא נערכו מדידות בשדה התבצע בשתי דרכים: (א) ע"י אינטרפולציה לינארית של שטף הגז היומי בין שני ימי מדידה (נכון ל- $CO_2$  עבור כל תקופת המדידה ורק לתקופת החורף נובמבר-אפריל עבור ה- $N_2O$ ), (ב) ע"י הערכה של דעיכת שטף ה- $N_2O$  כתלות ממועד ההדשה. בשיטה זו, קצב דעיכת שטף ה- $N_2O$  כתלות ממועד ההדשה הוערך על בסיס נתונים בספרות ומדידות לאורך שבוע בשדה (איור 3). הערכים על בסיסם חושבו השטפים בין שני אירועי דישון מוצגים בטבלה 3. שטף הגז חזר לערכי הרקע כעבור ארבעה ימים מאירוע הדישון.

**טבלה 3.** דעיכת שטף  $N_2O$  כתלות בזמן (ימים) מאירוע הדשייה בטפטוף ומקדמי התיקון בהם נעשה שימוש (על בסיס המידע באיור 3).

| ימים לאחר הדשייה בטפטוף | ממוצע $(\pm)$ שגיאת תקן של דעיכת שטף $N_2O$ (%) | פקטור תיקון |
|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------|
| 0                       | 100                                             | 1           |
| 1                       | $41.9 \pm 2.7$                                  | 2.4         |
| 2                       | $30.6 \pm 3.6$                                  | 3.3         |
| 3                       | $15.9 \pm 3.2$                                  | 6.3         |
| 4                       | $7.8 \pm 2.3$                                   | 12.8        |

השפעת שטפי גזי החממה על פוטנציאל ההתחממות הגלובלית, הוערכה לאחר הפיכת המדידות ליחידות אקווילנטיות לאפקט החממה ( $GWP$  - Global Warming Potential) של גז ה- $CO_2$  במשך 100 שנים ( $CO_2eq$ ). במחקר זה ערך ה- $GWP$  של גז  $N_2O$  ( $GWP_{N_2O}$ ) הוערך כ-310 (IPCC, 2007) וחושב לפי משוואה 4.

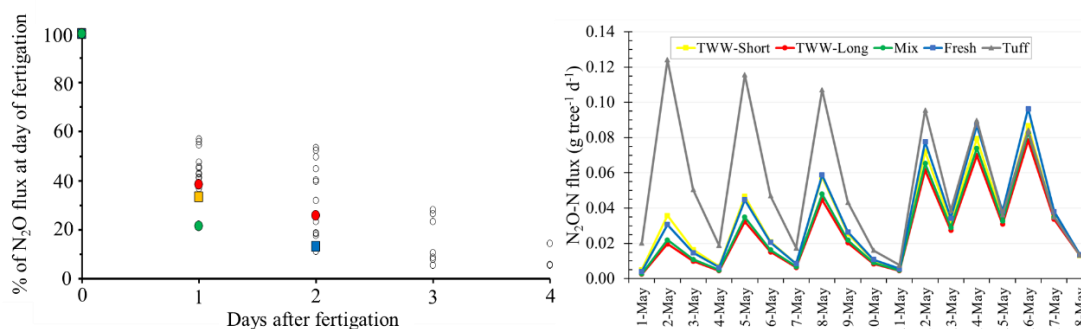
$$CO_2eq(N_2O) = GWP_{N_2O} \times Flux_{N_2O} \quad \text{משוואה 4}$$

כאשר  $Flux_{N_2O}$  מייצג שטף ליחידת זמן לדונם של גז  $N_2O$ .



**איור 2.** פאנל ימני, מבנה חלקת מחקר (חזרה), פאנל אמצעי, מערך הניטור סביב עצי המדידה בשדה הכולל (1) תא סטטי/דינמי לדיגום גזי חממה, (2) משאב לדיגום מים מבית השורשים (30 ס"מ), (3) משאב

לדיגום תמיסת הקרקע העמוקה (90 ס"מ), (4) טנסיומטר לניטור הפוטנציאל ההידראולי בקרקע ו- (5) מכשיר למדידת תכולת רטיבות נפחית. נקודות מייצגות את מיקום הטפטפות. פאנל שמאלי, מתאר את אופן מדידת שטף הגז בשדה. תמונה ימנית למטה מציגה את מערך הניסוי ותמונה שמאלית את אופן הדיגום בשדה.



**איור 3.** (שמאל) אחוז דעיכת שטף גז N<sub>2</sub>O כתלות בימים שעברו ממועד הדשייה בטפטוף, (ימין) ודוגמא לאופן ההשפעה על השטף שחושב בשדה למדידות מחודש מאי 2019. בגרף השמאלי, נקודות המסומנות בצבעים שונים מייצגות דעיכת N<sub>2</sub>O בטיפולים הנבחנים בחלקת המחקר בניסוי שלנו: קולחים אינטרוול קצר (צהוב), שפירים (כחול), קולחים אינטרוול ארוך (אדום) ומיהול (ירוק). עיגולים ריקים מייצגים דעיכה מתוך מחקרים מהספרות, בהם יושמו דשנים ממקור חנקני בהדשייה בטפטוף (Schellenberg et al., 2012; Garland et al., 2011 Alsina et al., 2013; Baram et al., 2018; Wolff et al., 2017; Zhang et al., 2016; Kennedy et al., 2013).

#### 4.1.3. אנליזת חנקן בתמיסת הקרקע

ריכוז צורוני החנקן אמון (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), ניטריט (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) וניטרט (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) בדוגמאות תמיסת הקרקע נקבע באמצעות אנליזה קלורимטרית (Gallery™ Plus Automated Photometric Analyzer, ThermoScientific, USA), ריכוז החנקן הכללי בתמיסת הקרקע חושב על ידי סכימה של ריכוז שלושת הצורונים הנ"ל.

#### 4.1.4. תכולת הרטיבות בקרקע

תכולת הרטיבות הנפחית בקרקע מתחת לקווי הטפטוף נמדדה באופן רציף (כל 10 דקות) בשני עומקים 10 ו- 35 ס"מ באמצעות חיישנים מסוג TDR (True TDR315, Acclima, USA) על ידי קבוצת המחקר של דר. אלכס פרומן מהטכניון. המידע שקיבלנו מאלכס שימש אותנו להערכת אחוז המים בנקבובי הקרקע (Water filled pore-space WFPS), שהוא היחס בין תכולת הרטיבות הנפחית לבין נקבוביות הקרקע.

#### 4.1.5. חישוב שטף המים והחנקן מתחת לבית השורשים

שטף המים מתחת לעומק של 90 ס"מ חושב על בסיס משוואת דרסי:

$$L = K \frac{\partial h}{\partial z} \quad \text{משוואה 5}$$

כאשר  $L$  הינו שטף המים (ס"מ/יום),  $K$  המוליכות ההידראולית (ס"מ/יום),  $h$  העומד ההידראולי הכללי ו- $z$  הגובה מעל לקו ייחוס (ס"מ). בחישובים הערכנו כי קיים גרדינט יחידה בקרקע (קרי,  $\frac{\partial h}{\partial z} = 1$ ). המוליכות ההידראולית חושבה אחת לחודש כפונקציה של הפוטנציאל המטריצי הממוצע  $K(\psi)$  שנמדד עבור כל טיפול באמצעות המשוואה של van Genuchten (1980) ו-Mualem (1976):

$$K(h) = K_s \left( \frac{1}{[1 + (\alpha|h|)^n]^{1-\frac{1}{n}}} \right)^{\frac{1}{2}} \left[ 1 - \left( 1 - \left( \frac{1}{[1 + (\alpha|h|)^n]^{1-\frac{1}{n}}} \right)^{\frac{n}{n-1}} \right)^{1-\frac{1}{n}} \right]^2 \quad \text{משוואה 6}$$

כאשר  $K_s$  (ס"מ/יום) הינה המוליכות ההידראולית של הקרקע ברוויה,  $\alpha$  (1/מ"ס) ו- $n$  (-) הינם פרמטרים אמפיריים הקשורים באופן הופכי לערך פריצת האוויר והתפלגות הנקבובים בקרקע, בהתאמה. הערכים בהם נעשה שימוש מופיעים בטבלה 4.

**טבלה 4.** פרמטרים הידרולוגיים מאפיינים של הקרקע אשר שימשו לחישוב שטף המים בעומק 90 ס"מ מתחת לבית השורשים.

| $\theta_R$ | $\theta_s$ | $\alpha$  | $n$   | $1-(1/n)$ | $n/(n-1)$ | $K_s$         |
|------------|------------|-----------|-------|-----------|-----------|---------------|
|            |            | $cm^{-1}$ |       |           |           | $cm \ d^{-1}$ |
| 0.147      | 0.59       | 0.783     | 1.478 | 0.32      | 3.09      | 0.108         |

$\theta_R$  ו- $\theta_s$  הינן תכולת הרטיבות של הקרקע ברוויה ותכולת הרטיבות השאריתית, בהתאמה

שטף החנקן מתחת לבית השורשים חושב על ידי הכפלה של ריכוז החנקן הממוצע (כניטרט) שנדגם במי הקרקע מעומק 90 ס"מ (גר/מ"ק) בשטף המים החודשי שחושב ע"פ משוואה 5.

#### 4.1.6 מודל נומרי

תנועת המים, המומסים ופליטת גז החממה ( $N_2O$ ) הוערכו על ידי שימוש במודל פסיקלי תלת מימדי המביא בחשבון את האינטראקציה בין הזורם לקרקע, ומתחשב בתנאים המטאורולוגיים (גשם, התאדות), שיטת ההשקיה (טפטוף), נוהלי ההשקיה, ריכוזי היונים במי ההשקיה, הגיאומטריה המרחבית של פני הקרקע (גדודיות גבוהות), מערכת ההשקיה ושורשי העצים, והפרוס המרחבי של תכונות קרקע רלבנטיות, כולל תעלות ההשקיה, ומשתנים תלויי זרימה רלוונטיים. תיאור מפורט של מודל הזרימה וההסעה למטע ביסעור נתן למצוא בעבודה של Russo וחוב' (2020). בקצרה, ההשפעה ארוכת הטווח של השימוש במים מושבים (בווריאנטים שונים הנגזרים מהטיפולים שונים) על כושר הקרקע להוליך מים ומומסים ועל קליטת המים ע"י שורשי העצים, הוערכה באמצעות הדמיה של זרימת מים והסעת מומסים בחתך הקרקע במטע האבוקדו. ההדמיה מבוססת על אנליזה נומרית תלת ממדית, שמדמה את ההסעה והפיזור של מומסים בקרקע בסקאלת השדה, בשילוב עם גישות גיאו-סטטיסטיות לתיאור כמותי של השונות המרחבית בתכונות הקרקע הפיסיקליות והכימיות. בסקלה המקומית, התכונות ההידרוליות של הקרקע החרסיתית (המכילה תלכידים)

תוארו ע"י פונקציות בי מודליות, ואילו הזרימה וההסעה תוארו ע"י משוואת ריצ'רדס ומשוואת האדבקציה דיספרסיה התלת ממדיות, בהתאמה.

קליטת המים והחנקן ע"י שורשי הצמחים, טרנספורמציות של החנקן בקרקע (Russo et al, 2013), תהליכי תחרות בין כלוריד לניטרט על קליטת החנקן (Russo and Kurtzman, 2019) והשפעת מצב האוורור בבית השורשים על קליטת המים ע"י שורשי העצים (Russo et al, 2020) נלקחו בחשבון ע"י המודל.

שטף פליטת  $N_2O$  חושב על בסיס עבודות קודמות (Hénault et al., 2019, 2005; Rabot et al., 2015).

שטף ה- $N_2O$  כתוצאה מפעילות דה-ניטריפיקציה – חושב שילוב של פוטנציאל הדדה-ניטריפיקציה ( $Dp$ ) עם גורמים סביבתיים שונים:

$$N_2O_{denit} = Dp * F_W * F_N * F_T * r_{max} \quad \text{משוואה 7}$$

כאשר  $F_N$  הוא פקטור התגובה של הקרקע לריכוז הניטרט (על בסיס עקומת רוויה של Michaelis–Menten):

$$F_N = \frac{[NO_3^-]}{(Km)_1 + [NO_3^-]} \quad \text{משוואה 8}$$

כש-  $[NO_3^-]$  (מ"ג N לק"ג קרקע),  $Km = 22$  (מ"ג N לק"ג קרקע).

$r_{max}$  מייצג את היחס בין  $N_2O$  לניטרט שעבר דה ניטריפיקציה במהלך הדגרה בתנאים אירוביים, וחושב על בסיס העבודה של Hénault וחוב' (2019) תוך שימוש במודל partial least square (PLS):

$$-0.4pH + 0.026CEC - 0.001Clay + 3.13r = r_{max} \quad \text{משוואה 9}$$

כאשר  $r$  הינו מקדם הקורלציה הלינארי בין הערך החזוי לערך המדוד של כל פרמטר,  $CEC$  קיבול קטיונים חליפי ו-  $Clay$  תכולת החרסית בקרקע.

$F_T$  הינו תגובת תהליך הדדה ניטריפיקציה לטמפרטורת הקרקע:

$$F_T = \exp \left[ \frac{(T - 11) \ln(89) - p \ln(2.1)}{10} \right], T < 11^\circ C$$

$$F_T = \exp \left[ \frac{(T - 20) \ln(2.1)}{10} \right], T \geq 11^\circ C$$

$F_W$  הינו פקטור התגובה של תהליך הדדה-ניטריפיקציה ל-  $WFPS$ , מתוך הנחה שה  $WFPS$  מהווה קירוב לזמינות החמצן לפעילות מיקרוביאלית:

$$\text{If } WFPS < 0.62, FW = 0 \quad \text{משוואה 11}$$

$$\text{If } WFPS \geq 0.62, FW = \left( \frac{WFPS - 0.62}{0.38} \right)^{1.74}$$

שטף ה-N<sub>2</sub>O כתוצאה מפעילות הניטריפיקציה – כמות ה-N<sub>2</sub>O שנפלט במהלך תהליך הניטריפיקציה (קרי חמצון אמן לניטרט) חושב על פי המשוואות הבאות:

$$N_2O_{nit} = z \cdot N_A, WFPS < 0.62$$

משוואה 12

$$N_2O_{nit} = r_{max} \cdot z \cdot N_A, WFPS < 0.62$$

כאשר  $z$  הינו מקדם פרופורציה בין כמות החנקן שנפלטת כ-N<sub>2</sub>O לכמות החנקן שחומצן לניטרט (0.006).  $z =$  ע"פ Garrido וחוב' (2002). במהלך 2019 ו-2020 נערכו סימולציות של הטיפולים השונים ושל השפעתם ארוכת הטווח, תוך שימוש במידע ממדידות השדה.

#### 4.1.7. ריכוז כלל הפעילות שנעשתה

טבלה 5 מכילה ריכוז של כלל הפעילות שנעשתה במהלך כלל הפרויקט.

**טבלה 5.** ריכוז הפעילות שהתבצעה במהלך המחקר, כולל מועדי הפעילות.

| תאריך                  | משימה                                                                                                                                        |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| אוקטובר 2017           | התחלת הפרויקט - בניה של ציוד הדיגום.                                                                                                         |
| פברואר 2018            | התקנה בשדה של מערך ניטור גזי החממה ושל המשאבים לדיגום מי הקרקע בעומק 35 ס"מ.                                                                 |
| מרץ 2018 - יוני 2020   | דיגום כל שבוע עד שלושה שבועות (עונת השקיה) וכול חודש (חורף) של מי הקרקע בחלקת המחקר יחד עם מדידת שטף גזי החממה בשדה באמצעות מכשיר FTIR נייד. |
| מרץ 2018 - יולי 2019   | אנליזה לקביעת ריכוז צורוני החנקן השונים בדוגמאות המים.                                                                                       |
| יולי 2018              | התקנה בשדה של המשאבים העמוקים (90 ס"מ מתחת לפני השטח).                                                                                       |
| אוקטובר 2018           | שבוע דיגום רצוף של תמיסת הקרקע ושטף גזי החממה.                                                                                               |
| ינואר 2019             | התקנה בשדה של מערך הטנסיומטרים                                                                                                               |
| מרץ 2019 – ספטמבר 2020 | בניה וכיול של מודל זרימה, הסעה ופליטת גזים על בסיס הטיפולים השונים ומדידות השדה. ניתוח התוצאות וכתביה.                                       |

#### 4.1.8. ניתוח סטטיסטי

הניתוחים הסטטיסטיים לתוצאות בוצעו באמצעות תוכנת (Jmp 14.0, SAS institute Inc.). בחינת הבדלים בין שטפי הגזים היומיים והממוצע העונתי נבחנו באמצעות מבחן סטטיסטי לניתוח שונות ברמת מובהקות 5%. במקרים בהם היה שוני סטטיסטי מובהק נעשה שימוש במבחן Tukey HSD לזהות את השוני בין הקבוצות השונות ברמת מובהקות 5%. דפוס השטף היומי לגזי החממה נותח באמצעות מבחן סטטיסטי לניתוח שונות תלת גורמי עם מדידות חוזרות, כאשר בדקנו כיצד משפיעים הגורמים של טיפול, סבב ויום הדיגום במהלך השבוע על דפוס הפליטות היומי. הפליטות המצטברות במהלך הניסוי נותחו באמצעות מבחן סטטיסטי לניתוח שונות עם מדידות חוזרות לכל עונה בנפרד, כאשר הגורמים שנבחנו הם השפעת הטיפולים והזמן מתחילת כל עונה על הפליטות המצטברות. השפעת הטיפול והעונה על פקטור הפליטה (EF) נבחנו באמצעות מבחן לניתוח שונות דו גורמי כאשר הנתונים החודשיים שימשו כחזרות. בחינת הקשרים בין מדדי קרקע לבין שטף גזי החממה  $\text{CO}_2$  ו- $\text{N}_2\text{O}$  נערכה באמצעות רגרסיה ליניארית רבת משתנים.

#### 5. תוצאות ודיון

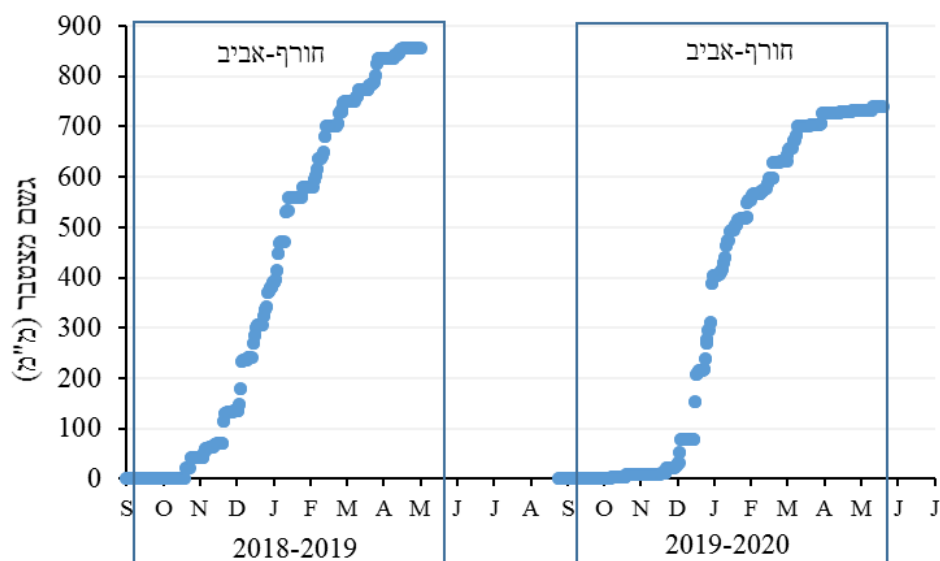
בתיאום עם תוכנית המחקר שהוגשה, המחקר התמקד בניטור הרכב צורני החנקן השונים בתמיסת הקרקע ודיגום שטף פליטת גזי החממה כתלות בטיפולים השונים. בשנה האחרונה של המחקר נעשתה עבודה לבניית וכיול של מודל נומרי לחיזוי פליטת גזי החממה ותנועת הנוטריינטים בקרקע.

##### 5.1. דישון והשקיה

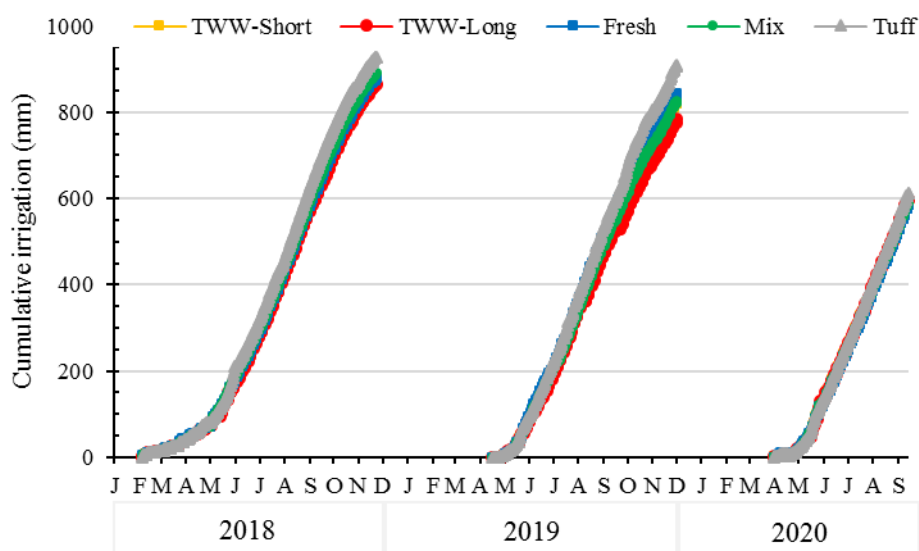
בשני החורפים (2018/19, 2019/20), כמות המשקעים היתה גבוהה מהמוצע לאזור (איור 4), וכתוצאה, הייתה דחיקה טובה של מלחים מחתך הקרקע (יידון בהמשך). בשלושת עונות הגידול (2018, 2019, 2020) הדישון וההשקיה החלו בסוף מרץ/תחילת אפריל והסתיימו בנובמבר. כלל הטיפולים דושנו באופן רציף דרך מערכת המים כאשר נעשה שימוש בדשנים הנוזליים גליל 8-8 ואמון גופרתי חנקתי 12%. ריכוז החנקן במי הקולחים (לפני מתן הדשן) השתנה במהלך העונה ונע בין 2 ל 10 מ"ג לליטר כאשר רובו היה בצורת אמון (מידע ממאגר המידע של מאגרי אשר; <http://www.milouot.co.il/site/index.asp?lat=ar>). בשלושת העונות הטיפולים קיבלו כמויות מים דומות ( $800 \pm 100$  מ"מ) כאשר טיפול הטוף קיבל את כמות המים הגדולה ביותר (איור 5). בעונת 2018 כל הטיפולים קיבלו מנת דשן על פי תכנון ( $\sim 30$  יחידות חנקן לדונם), למעט טיפול הטוף, שמסיבה טכנית לא ברורה קיבל מנת דשן כפולה מהמתוכנן (איור 6). למרות השוני במנת החנקן הכללי, ריכוז החנקן בתמיסות ההדשיה היה זהה בין הטיפולים ונע בין 50-80 מ"ג. ריכוזי חנקן אלו תואמים את הריכוזים הנחשבים מיטביים לגידול אבוקדו. בשנת 2019, בתחילת העונה (עד יוני) כלל הטיפולים קיבלו דשן על פי תכנון. לאחר יוני תוצאות מחשב ההשקיה הראו כי כלל הטיפולים, למעט טיפול השפירים, קיבלו מנת



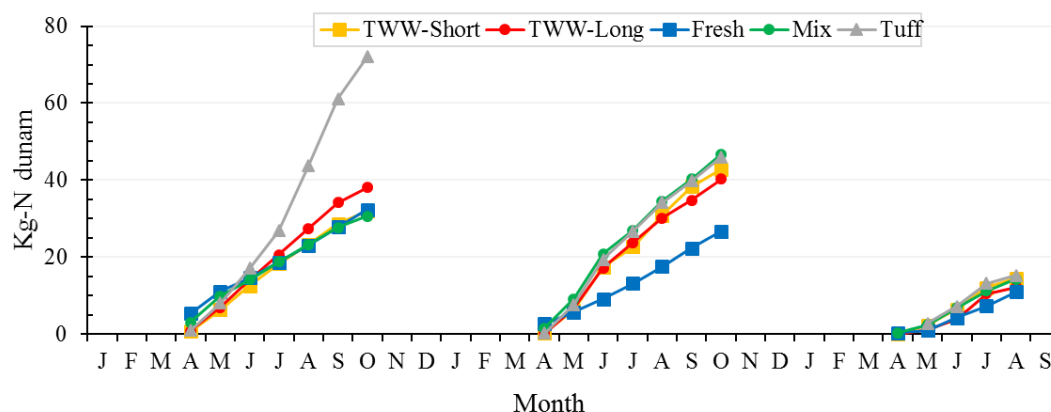
דישון כפולה (קרי ~60 ק"ג חנקן לדונם). לאחר בירור מפורט עם החקלאי, הוחלט שמנת הדישון היתה נמוכה יותר ועמדה סביב 40 ק"ג חנקן צרופ לדונם, אולם מספר זה אינו ודאי (איור 6). בעונת 2020, נכון לאוגוסט, הדישון התבצע על פי תוכנית לכל הטיפולים. באופן כללי בשתי עונות הדישון (2018 ו-2019) נתנה מנת דשן גבוהה מהמתוכנן במרבית הטיפולים ללא התחשבות בריכוז החנקן במי ההשקיה (נספח 1). נכון להיום, עקב מחסור במידע בזמן אמת לגבי ריכוז החנקן הכללי במי הקולחים ויכולת של החקלאי לתקן את ריכוז הדשן שנתן בהתאם, חקלאים נוטים ליישם חנקן בעודף בכדי להבטיח שלא תהיה פגיעה ביבול. בהתחשב בכך שכבר ברמת תוכנית הדישון השנתית, כמות הדשן החנקני שניתנת הינה בהתאמה לצפי של 3 טון יבול לדונם, ובהנחה של 50% יעילות דישון (Silber et al., 2018) (קרי סביב 30 יחידות חנקן לדונם), ובכך שבפועל ברוב חלקות הגידול היבול נמוך מערך זה בצורה משמעותית (קרי, 1-2 טון לדונם, כולל במחקר זה), אזי יעילות הדישון מאוד נמוכה. בהנחה שתכולת החנקן בפרי הינה סביב 0.5% משקלי, יעילות הדישון בחלקות המחקר נעה בין 13% ל-27% (קרי 8 יחידות חנקן הוסרו על ידי הפרי, בעוד ש-30-60 יחידות חנקן יושמו). לעניות דעתנו מצב זה אינו סביר ומחייב התייחסות מערכתית לניהול תשומות החנקן שמיושמות במטע כתלות ביבול הצפוי. מתוך רצון למתג את גידול האבוקדו כסביבתי ומתוך רצון לצמצם את הפגיעה בציבור על ידי זיהום מקורות המים, יש צורך לבנות יחד עם המגדלים תכנון תשומות התואם את עקום הצריכה והיבול על העץ, תוך שאיפה להגיע ל 70% יעילות קליטה לכל הפחות. מערכת מסוג זה מיושמת כיום בענף השקד בקליפורניה. יישום של מערכת מסוג זה מחייב אינטגרציה של נתונים רבים על בריאות הצמח, תנאי מזג האוויר ועוד, ומתבסס על הידע הנרחב שנצבר אצל מגדלים. חשוב לציין, שבעונת 2020, יישום הדשן הופחת (קרי סביב 15 יחידות חנקן לדונם) עקב היבול הנמוך, ממשק התואם את המלצתנו (איור 6). כפי שנציג בהמשך, כלל החנקן שלא נקלט על ידי הצמח מחלחל אל מי התהום, כתוצאה מחלחול במהלך עונת ההשקיה ודחיקה של החנקן לתת הקרקע במהלך החורף. יתרה מזאת, תוצאות מחקרים בשנים האחרונות מראות כי דישון עודף בחנקן עשוי לפגוע ביבול (Sperling et al., 2019).



**איור 4.** גשם מצטבר בחלקת המחקר במהלך חורף 2018-2019 וחורף 2019-2020. הנתונים על בסיס מידע מתחנות המדידה אפק ועין המפרץ (<https://ims.gov.il/he/Stations>).



**איור 5.** עובי השקיה מצטבר בכלל הטיפולים במהלך שלוש שנות המחקר.



**איור 6.** כמות חנקן מצטברת שנתנה לכל טיפול במהלך עונות ההדשיה 2018, 2019 ו-2020.

## 5.2 חנקן בתמיסת הקרקע

במהלך המחקר נאספו מעל 1300 דוגמאות מים, מהן 930 דוגמאות מים מבית השורשים (טבלה 6). השואה בין ריכוז צורני החנקן בתמיסות המים היומיות לבין הריכוזים בתמיסות המים המורכבות לא הראתה שונות סטטיסטית מובהקת ( $P > 0.05$ ) (איור 7 ואיור 8). בהתאם לכך, אנו נדון במגמות שנצפו בכלל דוגמאות המים ללא התייחסות לשיטת הדיגום.

**טבלה 6.** מספר הדוגמאות שנאספו בשתי שיטות דיגום המים (יומי, מורכב) משני העומקים (35 ו-90 ס"מ).

| טיפול |               |        |                |                   |     | סוג<br>עומק<br>(ס"מ) | תמיסה |
|-------|---------------|--------|----------------|-------------------|-----|----------------------|-------|
| סה"כ  | קולחים<br>קצר | שפירים | קולחים<br>ארוך | קולחים<br>+שפירים | טוף |                      |       |
| 532   | 94            | 109    | 92             | 102               | 134 | יומית                | 35    |
| 330   | 51            | 61     | 67             | 54                | 97  | מורכבת               |       |
| 937   | 160           | 185    | 174            | 171               | 247 | סה"כ                 |       |
| 378   | 83            | 60     | 80             | 78                | 78  | מורכבת               | 90    |
| 1315  | 243           | 245    | 254            | 249               | 324 | סה"כ                 |       |

### 5.2.1. ניטרט (חנקת $\text{NO}_3^-$ )

ניטרט נמצא כצורן החנקן העיקרי בתמיסת הקרקע (איורים 7,8,9). ריכוז הניטרט בבית השורשים (קרי, עומק של 35 ס"מ) הראה מגמה עונתית של עלייה בריכוז מתחילת עונת הדישון (אפריל;  $\text{N-NO}_3^- < 30 \text{ mg/L}$ ) ועד ליוני. מיוני ועד לסוף אוקטובר הריכוזים נותרו גבוהים, והתייצבו על ערכים הדומים לאלו במי ההשקיה (קרי 50-80 מ"ג/ל). הדמיון בין ריכוזי הניטרט במי הקרקע לאלו במי ההשקיה מרמז על כך שקצב קליטת המים היה זהה לקצב קליטת החנקן. בעונת 2018, לא היו הבדלים מובהקים בין הריכוזים בטיפולים השונים. אם זאת, בעונת 2019 הריכוזים בטיפול השפירים ובטיפול הערבוב היו נמוכים יותר מאשר בטיפולי ההשקיה בקולחים (איור 7C ואיור 8C). ריכוזי הניטרט בעומק 90 ס"מ הראה מגמה זהה של עלייה במהלך עונת ההדשה ושטיפה בחורף (איור 9C). בניגוד לריכוזים בעומק 35 ס"מ שהחלו לעלות מיד עם תחילת הדישון, בעומק 90 ס"מ הריכוזים החלו לעלות רק לקראת יולי. מגמה זו אינה מפתיעה ותואמת את קצב התקדמות המומסים בקרקע, כפי שנצפה במטעים אחרים (Baram et al., 2016), וכפי שנחזה על פי מודל הזרימה וההסעה למטע זה (Russo et al., 2020). בתאום עם המגמות שנצפו בעומק 35 ס"מ, בשנת 2019 ריכוזי הניטרט מתחת לטיפולי ההשקיה בקולחים היו גבוהים מאשר בטיפולי ההשקיה בשפירים (קרי, מיהול ושפירים), וזאת בניגוד לעונת 2018 בה הריכוזים בטיפול המיהול היו הגבוהים ביותר. לא ברור לנו מדוע הריכוזים הגבוהים ביותר נמדדו דווקא בטיפול המיהול ולא בטיפול הטוף שקיבל יותר דשן. ייתכן אם זאת, כי מדידה זו משקפת זיהום שנוצר בעת התקנת המשאבים (קרי, יולי 2018).

שלושה גורמים עיקריים יכולים להסביר את ההבדל בין הריכוזים שנמדדו בעונות 2018 ו-2019, ובין טיפול השפירים לשאר הטיפולים, שניים טכניים ואחד פיזיולוגי. שני הגורמים הטכניים הינם: (א) בעונת 2019 נתנה מנת דשן כפולה לכלל טיפולי הקולחים אך לא לטיפולי השפירים, וריכוזי החנקן

בתמיסת ההשקיה היו גבוהים יותר מאשר בעונת 2018 (קרי, סביב 100 מג"ל חנקן צרוף), (ב) עקב מגבלות טכניות במהלך 2019 הדיגום בשדה התבצע תמיד בימי חמישי, ולא בימים שונים כפי שהיה ב 2018. מאחר והדשן לטיפול השפירים ניתן בהזרקה, מתוך מיכל שמולא בכל יום ראשון, על ידי משאבות מינון פרופורציונאליות (MixRite, Tefen) ובעומס של 0.4%, נוצר מצב בו בימי חמישי (ימי הדיגום) לא נותר דשן במיכל ובמי ההשקיה. כתוצאה, ריכוז הניטרט במי השורשים נמהל לאורך השבוע. חשוב לציין כי לנו לא הייתה גישה למועדי מילוי הדשן, או למשטר הדישון. החלטות אלו התקבלו על ידי המגדל, והוצאו לפועל על ידי איש המים של הקיבוץ (כלל הטיפולים למעט השפירים) ועל ידי טכנאים מחוות הניסיונות בעכו (שפירים). אפשרות נוספת, הינה (ג) קליטה טובה יותר של חנקן על ידי העץ. במחקר זה לא נמצאה השפעה מובהקת של ההשקיה בשפירים על היבול (איור 24, טרציקי וחוב', 2018), אולם כן נצפו ריכוזי חנקן נמוכים יותר במי הנקז מתחת לבית השורשים בטיפול השפירים (איור 9C), מה שעשוי להצביע על קליטה מוגברת בטיפול זה. הריכוזים הנמוכים הינם בהתאמה עם חישובי שטף המים על בסיס מדידות העומד המטריצי בשדה (איור 10), תוצאות מודל הזרימה (Russo et al., 2020) (איור 11) ותוצאות זרימת המים בגזע (sap-flow) (Nemera et al., 2020). בשלושת המקרים הנ"ל, צריכת המים הגבוהה ביותר נמדדה בטיפול השפירים, והעידה על שטיפה מינימאלית וייבוש של חתך הקרקע עד לעומק של 90 ס"מ. בניגוד לשוני המובהק בין טיפול השפירים לשאר הטיפולים לא נצפו הבדלים בהרכב מי הנקבים ובפוטנציאל המטריצי בין שאר הטיפולים. מחקר בליזימטרים שנערך במרכז גילת, הראה שבעת השקיה במים שפירים קיימות תקופות בשנה (בעיקר סתיו) בהן העץ צורך ריכוזי חנקן גבוהים מאוד (< 100 מג"ל) וכתוצאה הפריחה והחנתה משתפרת (שיחה בע"פ עם דר. רן אראל). מאחר ולעצים יש מערכות ויסות של מוטמעים ויסודות הזנה, לעיתים קרובות הבדלים בתשומות לא מובילים לשינוי משמעותי ביבול בשנים הראשונות של הניסוי. יתרה מכך, אירועי מזג אוויר קיצוניים (קרה, חמסין וכדומה) עשויים גם כן לפגוע ביבול ולמסך את השפעת הטיפולים. ייתכן ועל בסיס סיבות אלו טרם נצפה הבדל ביבול בין הטיפולים, למרות הקליטה הגבוהה יותר בשפירים.

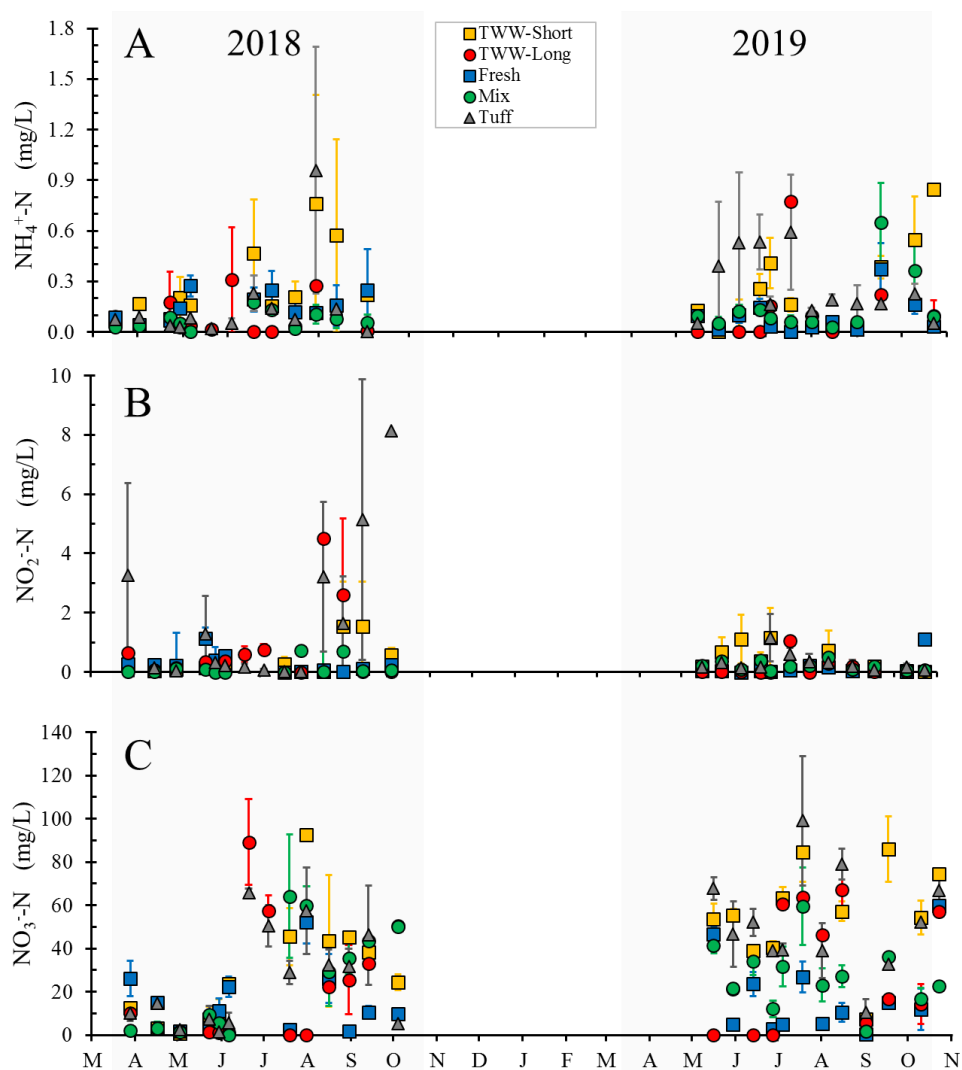
## 5.2.2. אמוני ( $\text{NH}_4^+$ )

על אף שבמי ההשקיה ריכוז האמוני היה גבוהה מריכוז החנקן, כמעט ולא נמדד אמוני במי הקרקע (איור 7A, איור 8A, איור 9A). חסרוננו של האמוני בתמיסה המובילית הנדגמת כפי הנראה נבע מספיחת האמוני לקרקע, כתוצאה מקיבול הקטיונים החליפיים הגבוה של הקרקע, וכן כתוצאה מחמצון האמוני לניטרט בתהליך ניטריפיקציה. דיגום של הקרקע בסיום החורף ובמהלך עונת הדישון הצביע על תנועה של אמוני לתת הקרקע (עד לעומק של 60 ס"מ) במהלך תקופת ההדשה, ושטיפה כמעט מלאה (ירידה של פי 2 עד 3 בריכוז) בסיום החורף. ממצאים אלו תואמים את דוגמאות המים ומעידים על אותם שני תהליכים (קרי, ניטריפיקציה וקליטה). בחינה של ריכוז האמוני + הניטרט במי הנקבים/ובמיצויי הקרקע הראתה גם תהליך חמצון האמוני לניטרט וגם קליטה ישירה של אמוני עשויים להחמיץ את סביבת בית השורשים. מבחינות שנערכו בקבוצתו של פרופסור משה שנקר, עולה שלא היה הבדל בין ערכי ה-pH של תמיסת הקרקע

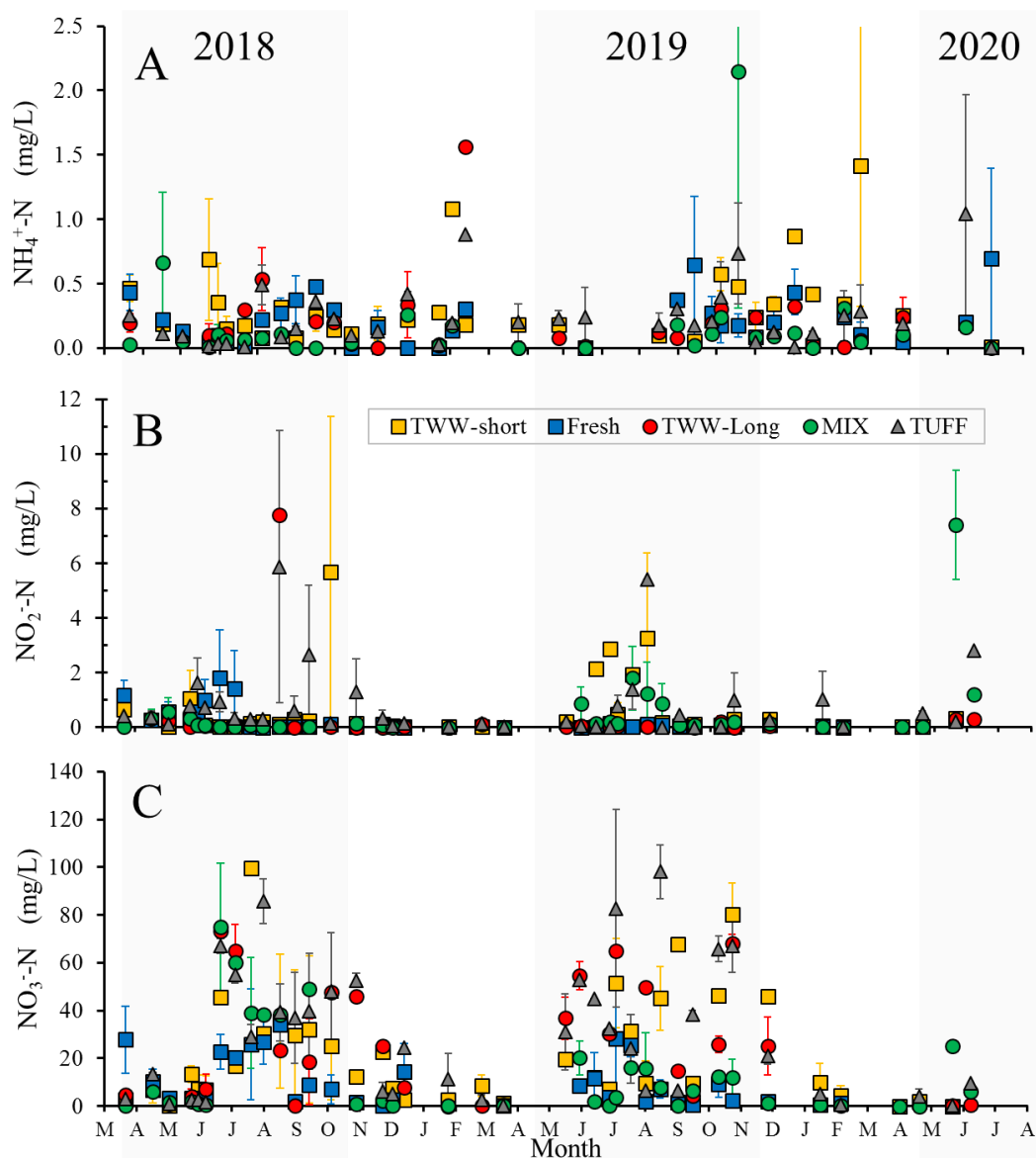
בטיפול השונים. ממצא זה אינו מפתיע מאחר ולקרקע תכולת גיר גבוהה (10-24%; טרצ'יצקי וחוב', 2018)), וכתוצאה יכולת בופר גבוהה.

### 5.2.3. ניטריט ( $\text{NO}_2^-$ )

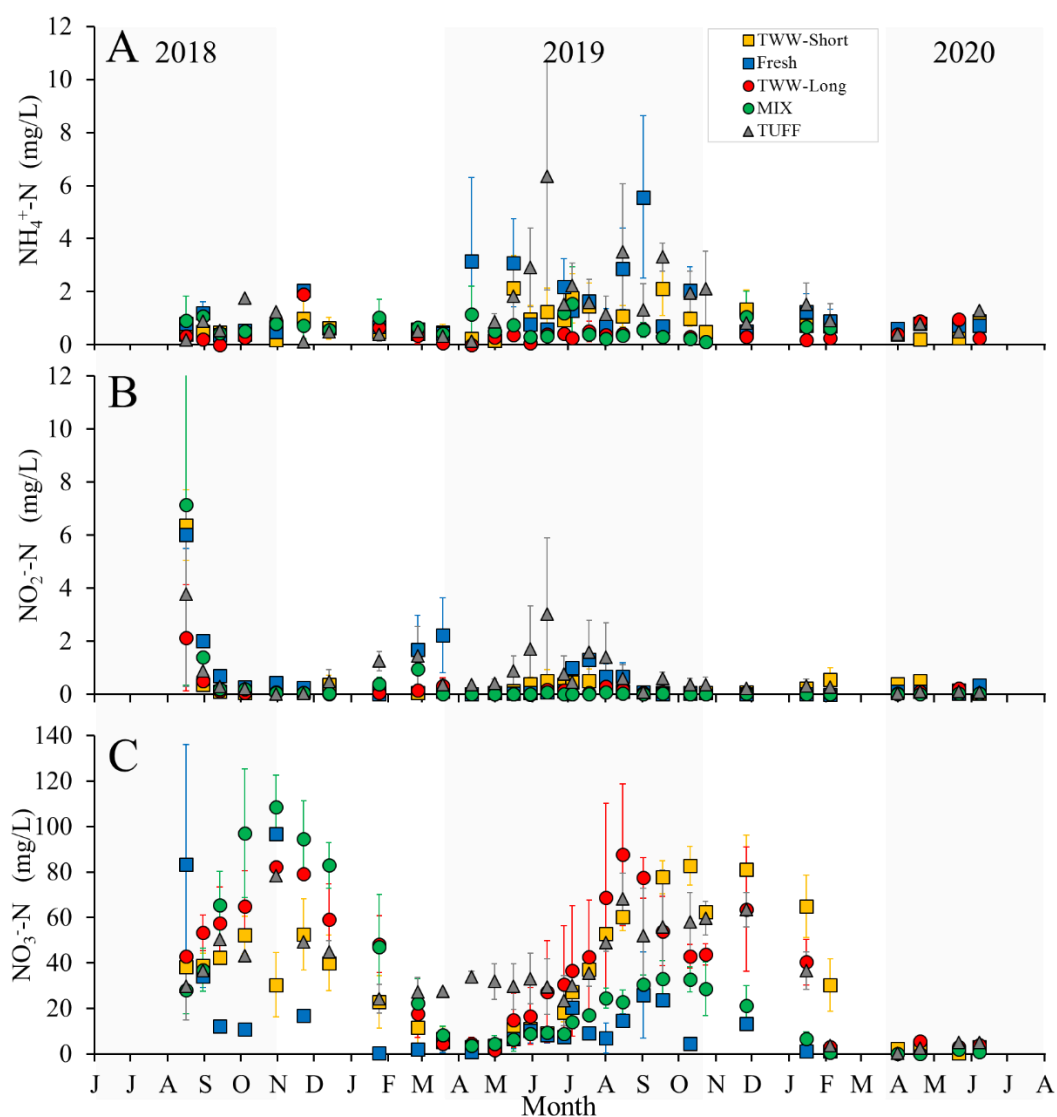
ניטריט (חנקית,  $\text{NO}_2^-$ ) – תמיסות מי הקרקע הראו כי במרבית הזמן לא קיימת היווצרות והצטברות של ניטריט בקרקע. באופן כללי הריכוזים מצביעים על כך שקיימת צריכה של הניטריט, בין אם במסלול ניטריפיקציה מלאה (קרי, חמצון אמוני לניטריט ואחר חמצון הניטריט לניטרט) או חלקית (קרי, חמצון אמוני לניטריט ולאחר חיזור הניטריט ל  $\text{N}_2\text{O}$  ולחנקן גזי), ובין אם בתהליך דה ניטריפיקציה (קרי, חיזור ניטרט לניטריט ואחר ל  $\text{N}_2\text{O}$  ולחנקן גזי). יחד עם זאת, במספר פעמים לא מבוטל נצפו ריכוזי ניטריט גבוהים מ-5 מג"ל (כחנקן בניטריט) בעומק של 35 ס"מ (איור 7B, 8B) וגם בעומק של 90 ס"מ (איור 9B). ריכוז הניטריט הגבוהה ביותר שנמדד היה זהה בשני העומקים ועמד על 14 מג"ל כחנקן בניטריט (קרי 46 מג"ל ניטריט). מעט מאוד מידע קיים לגבי פוטנציאל הרעילות של ניטריט לעצי אבוקדו. מחקר מאמצע המאה הקודמת, הראה רגישות של שתילי אבוקדו לניטריט בקרקע בעיקר בתנאי pH חומציים ( $>5.5$ ) ובריכוזים גבוהים מ-5 מג"ל (Curtis 1949). תנאי pH אלו אינם תואמים את תנאי השדה בהם צפינו עד עכשיו. ריכוזי הניטריט הגבוהים נמדדו בעיקר במהלך תקופת ההדשיה ולא בחורף. בהתאם לכך הגיוני לשער כי קיימת קליטה של ניטריט על ידי הצמח בתקופה זו. אין זה ממטרות תוכנית זו לזהות את מידת ההשפעה של ניטריט על תהליכים מטבוליים בצמח. לא נמצא קשר מובהק בין הממשק החקלאי לבין ריכוזי הניטריט אם זאת, בממשק ההשקיה המשקי בקולחים (TWW-Short) היו יותר פעמים בהם נצפו ריכוזי ניטריט גבוהים ( $<3$  מג"ל) מאשר בממשק השקיה זהה בשפירים (Fresh) (איור 7B ו-8B). תוצאות מקבוצות המחקר הנוספות (קרי, קבוצתו של משה שנקר) הראו ירידה חדה בריכוזי החמצן באוויר הקרקע בצמוד למועדי ההשקיה והדישון. הירידה הבולטת ביותר והערכים הנמוכים ביותר נמצאו בטיפול ההשקיה בקולחים בממשק המשקי המקובל (TWW-short) (קרי - איור 24 בעבודתם של טרצ'יצקי וחוב', 2018). בטיפול זה היו בכל מחזור השקיה מספר שעות בהן ריכוז החמצן היה מעט נמוך מ-10%, ולאחר שב ועלה לערכים המייצגים קרקע מאווררת למדי (16%~). ריכוז החמצן תחת אותו ממשק השקיה, אולם במים שפירים במקום קולחים, הראה ירידות מתונות יותר (ערכי מינימום של 12-13%). ריכוזי החמצן הגבוהים ביותר וירידות הריכוז המתונות ביותר התקבלו בתוך תעלות האוורור (TUF). חשוב לציין כי בכלל הטיפולים ריכוזי החמצן היו מספיק גבוהים בכדי לחמצן את האמוני לניטריט ולניטרט. בחינה סטטיסטית רבת משתנים, לא הראתה קשרים מובהקים, בין ריכוזי הניטריט שנמדדו, לבין מועד ותדירות ההדשיה/השקיה. בניגוד למתוכנן, השפעת ריכוז החמצן בתת הקרקע ופוטנציאל החמצון חיזור על ריכוזי הניטריט בבית השורשים לא נבחנה באנליזה רבת משתנים עקב בעיות עם אמינות ערכי המדידה שהתקבלו ממדידות האלקטרודות בשדה (קרי. מידע של קבוצה אחרת במיזם השפירים עליו התבסס מחקר זה).



**איור 7.** השתנות לאורך תקופת המדידה של ריכוזי (A) האמון (B), הניטריט (חנקית) ו- (C) הניטרט (חנקת) הממוצעים בעומק 35 ס"מ מתחת לטיפול השונים כפי שנמדדו בדוגמאות המים היומיות. שגיאת התקן בין 3 החזרות של כל טיפול מיוצגת על ידי הקו האנכי.

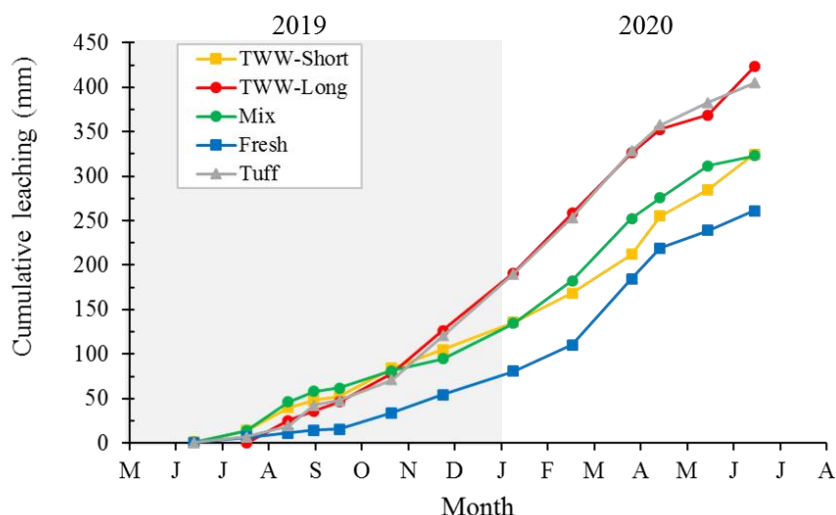


**איור 8.** השתנות לאורך תקופת המדידה של ריכוזי (A) האמון (B), הניטריט (חנקית) ו- (C) הניטרט (חנקת) הממוצעים בעומק 35 ס"מ מתחת לטיפולים השונים כפי שנמדדו בדוגמאות המים המורכבות. שגיאת התקן בין 3 החזרות של כל טיפול מיוצגת על ידי הקו האנכי.

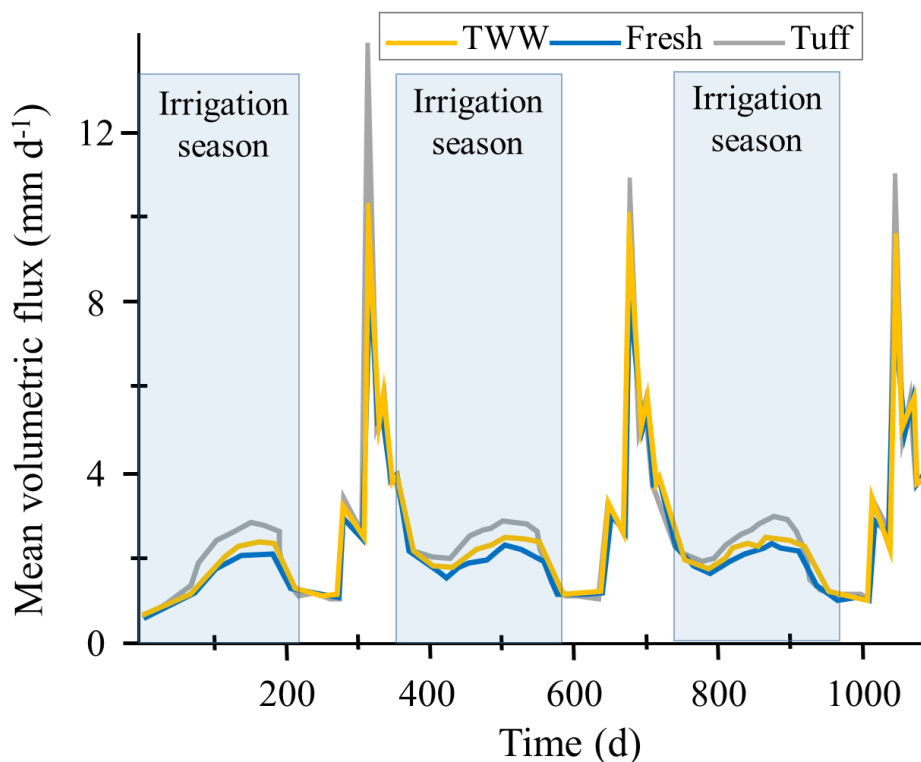


**איור 9.** ריכוזי (A) האמון (B), הניטריט (חנקית) ו- (C) הניטרט (חנקת) הממוצעים בעומק 90 ס"מ מתחת לטיפולים השונים כפי שנמדדו בדוגמאות המים המורכבות מתחת לטיפולים השונים. שגיאת התקן בין 3 החזרות של כל טיפול מיוצגת על ידי הקו האנכי.





**איור 10.** גובה המים המצטבר אשר חלחלו מתחת לבית השורשים בטיפולים השונים במהלך שנה. חושב על בסיס מדידות טנסיומטרים ומשוואות 5 ו-6.

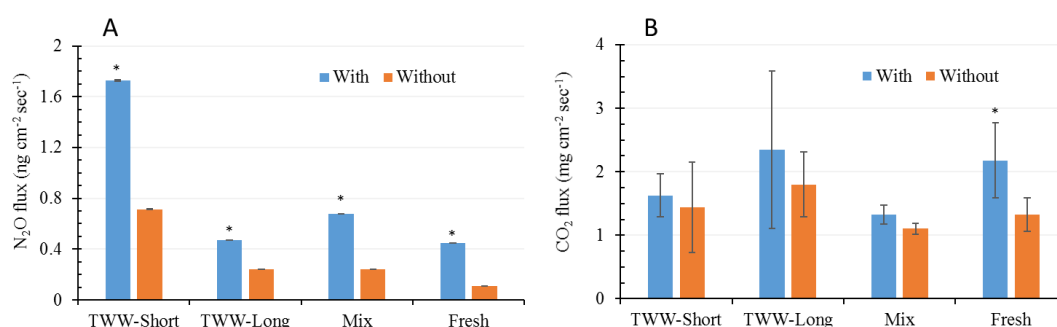


**איור 11.** שטף מים יומי מתחת לשלושת הטיפולים העיקריים הכולל ממשק השקיה מקובל כל יומיים במי קולחים (TWW-Short), השקיה באותה התדירות במים שפירים (Fresh) ו- השקיה יומית בתעלות אוורור עם טוף (Tuff). הגרף שונה על בסיס הגרף המוצג ב- (Russo et al., 2020).

### 5.3. גזי חממה

שטף גזי החממה  $\text{CO}_2$  ו-  $\text{N}_2\text{O}$  מהטיפולים השונים נמדד בשדה באמצעות מכשיר ה-FTIR מיוני 2018 ועד ליוני 2020. תוצאות מתקופה מוקדמת יותר של המחקר לא יידונו מאחר ומדידות השטף הוערכו

בשיטה שונה עם רגישות נמוכה יותר. בשנה הראשונה בכל יום דיגום נדגמו שלוש חזרות עם טפטפת בתוך הגליל וחזרה נוספת ללא טפטפת עבור כל טיפול, למעט טיפול הטוף בו לא היתה חזרה ללא טפטפת. בשנה השנייה הוספו חזרות ללא טפטפת כך שנדגמו שלוש חזרות עם ושלוש ללא טפטפת בתוך הגליל ששימש למדידת שטפי הגזים. בחינה של השפעת מיקום הטפטפת ביחס לבסיס התא הסטטי הראתה שונות מובהקת בין שטפי גז ה- $N_2O$  שנמדדו בתאים עם וללא טפטפת בכלל הטיפולים (איור 12). מגמה דומה אך ללא מובהקות סטטיסטית נצפתה גם בשטפי ה- $CO_2$ , למעט בטיפול השפירים בו ההבדל היה מובהק.



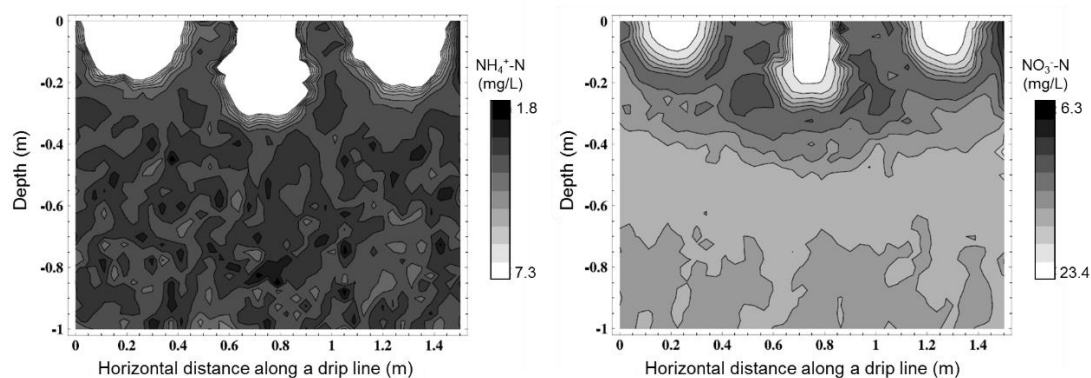
**איור 12.** שטף  $N_2O$  (A) ו- $CO_2$  (B) ממוצע עבור כלל הטיפולים כפי שנמדד בתאי דיגום סטטיים עם טפטפת (with) וללא טפטפת (without) במרכזן. מוצג ממוצע של כלל המדידות יחד בין השנים 2018-2020. שגיאת התקן בין החזרות של כל טיפול מיוצגת על ידי הקו האנכי. טיפול הטוף לא מוצג מאחר ולא נמדד השטף בתא ללא טפטפת בטיפול זה.

### 5.3.1. פליטת גז החממה $N_2O$

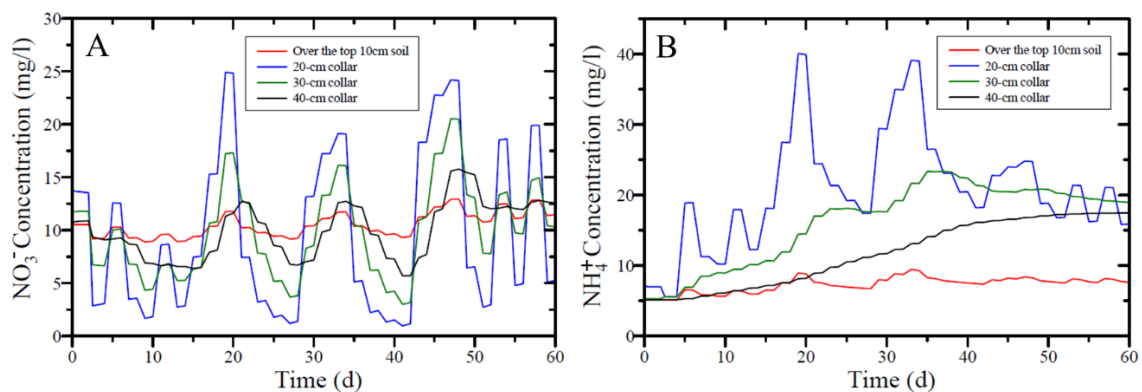
מדידה של שטף  $N_2O$  במהלך היום לא הראתה דפוס יומי. בהתאם, אנו שיערנו כי השטף אותו מדדנו ייצג את השטף היומי. לאורך כל תקופת המחקר, שטפי ה- $N_2O$  הראו קשר ברור לדישון. קשר ישיר בין ריכוז החנקן במי ההשקיה לבין שטף ה- $N_2O$  מהקרקע דווח במחקרים רבים קודמים (לדוגמא: Baram et al., 2018). באופן כללי, שטפי הגז שנמדדו בשדה בפרויקט זה הינם יחסית גבוהים בהשוואה למחקרים אחרים בהם נלמדה השפעת הדשיה בטפטוף על שטף ה- $N_2O$  מהקרקע (Schellenberg et al., 2012; Alsina et al., 2013; Fentabil et al., 2016; Baram et al., 2018). אנו מאמינים כי מקור ההבדל טמון בשיטת הדיגום. שימוש במכשיר ה-FTIR במחקר זה, מאפשר מדידה ברזולוציה הרבה יותר גבוהה (רגישות מדידה של 8 ppb) ותוך פרק זמן קצר מהותית מזה הנהוג בשיטת התא הסטטי והאנליזה במעבדה. כך שנוצרת הפרעה מינימלית לתנאים בתוך תא הדיגום (טמפרטורה וכדומה).

חשוב לציין שלשיטת התא הסטטי ישנה מגבלה גדולה. מצד אחד, מיקום הטפטפת מחוץ לבסיס תא הדיגום (איור 2) פוגע בחלחול ופיזור המים והמומסים קרוב לפני השטח בתוך בסיס התא, היכן שנמצאת מרבית הפעילות הביולוגית. מאידך, מיקום הטפטפת בתוך התא, משמעו טפטוף במרכז האזור בו תנועת המים לצדדים, מעבר לדפנות התא, אינה אפשרית (קרי, שמונת הסנטימטרים העליונים של הקרקע במחקר זה). כתוצאה, תכולת המים בתוך ומתחת לגליל גבוהה יותר וכך גם הניטרט והאמון נעים עמוק יותר, ובריכוזים גבוהים יותר (איור 13). שתי אסטרטגיות דיגום אלו אינן אידיאליות, ועשויות להוביל להערכת חסר של השטף (כאשר הטפטפת מחוץ לגליל), ולהערכת יתר של השטף במקרה ההפוך. מידת ההשפעה

של בסיס התא הסטטי על פרמטרים אלו תלויה בסוג הקרקע ובקוטר הגליל. בקרקע שלנו, המאופיינת באורך קפילארי גבוהה (כמה עשרות סנטימטרים) נראה שימוש בבסיס תא בעל קוטר גדול ( $<40$  ס"מ) יצמצם את השפעת הבסיס על התפלגות המים והמומסים בתוכו, וייצג באופן יותר נכון את תנאי השדה (איור 14). במחקר זה נעשה שימוש בגלילים בקוטר 20 ס"מ. על בסיס האמור לעיל, ניתן להניח ששטפי הגזים שנמדדו על ידינו בתאים עם הטפטפות הינם מעט גבוהים מהערכים בכלל המטע, בעוד שאלו שנמדדו בתאים ללא הטפטפות מייצגים ערכים נמוכים מהערכים בכלל המטע (איור 12). יש לציין שזה אינו המקרה בקרקע הטוף בה האורך הקאפילארי קצר מקוטר תא הדיגום. על אף שהשטפים שנמדדו אינם מייצגים את הערכים ה"אמיתיים" במטע, השינוי (א) אינו בא לידי ביטוי בסדרי גודל שונים ו- (ב) ההשפעה זהה לכלל הטיפולים. בהתאם לכך, ניתן להניח די בוודאות שההבדלים שידונו בין הטיפולים הינם מייצגים.



**איור 13.** התפלגות ריכוזי האמון (A) והניטרט (B) בחתך הקרקע מתחת לשלוחת טפטוף על בסיס המודל הנומרי. נקודות בהן מצויות טפטפות מיוצגות על ידי ריכוזים גבוהים (לבן). הטפטפת המרכזית בכל איור נמצאת במרכז בסיס תא דיגום הגז (גליל פלסטיק).



**איור 14.** תוצאות מודל הזרימה המראה את התפלגות ריכוזי (A) הניטרט ו- (B) האמון בעשרת הסנטימטרים העליונים של חתך הקרקע מתחת לטפטפת ללא תא סטטי (קו אדום) ומתחת לתאים סטטיים (collar) בעלי קוטר שונה שהוחדרו כ-10 ס"מ לתוך הקרקע, ולאורך 60 יום מתחילת עונת הדישון.

בכלל הטיפולים, שטפי  $N_2O$  שנמדדו במהלך עונת הדישון של 2019 ו-2020 היו גבוהים משמעותית מהשטפים שנמדדו בשנת 2018 (איור 15, איור 16). בחינה רבת משתנים (סוג דשן, כמות דשן, משך ההשקיה, תכולת רטיבות, טמפרטורת הקרקע, ריכוזי ניטרט ואמון, ריכוז החמצן) לא הצליחה

להצביע על גורם שיכול להסביר את השטפים הנמוכים שנמדדו בשנת 2018, ביחס לשתי עונות ההשקיה הנוספות. ייתכן, ומדובר בתגובת לוואי של מערכת הקרקע בשדה לתהליך ההתקנה של תאי הדיגום. אולם, אין לנו ממצאים שיאוששו זאת. בחינה של השטפים הממוצעים בטיפול תעלות האוורור מראה שלמרות שניתנה כמות דשן דומה בטיפול תעלות האוורור במהלך שתי עונות ההשקיה 2018 ו-2019, ובאותו ריכוז במי ההשקיה בשלושת העונות, ערך הפליטה הממוצע היה דומה ב-2020 ו-2019 וגבוה בסדר גודל מ-2018 (טבלה 7). אנו מעריכים, כי הבדל זה נבע כתוצאה משינוי שחל בממשק ההשקיה, ששונה ממספר פעימות ביום ב-2018 לפעם אחת ביום בשתי העונות אחר כך. שינוי ממשק ההשקיה השפיע באופן ישיר על אחוז המים בנקבובי הקרקע (WFPS), שהיו בממוצע  $79 \pm 10\%$  ו-  $85 \pm 6\%$  בעומקים של 10 ו-35 ס"מ בהתאמה, ואילו במהלך עונות 2019 ו-2020 ערכי ה-WFPS היו נמוכים ועמדו על  $76 \pm 5\%$  ו-  $74 \pm 7\%$ , בהתאמה. ייתכן כי משטר ההשקיה של מספר פעימות במרווחים קצרים בעונת 2018 הובילה לטווח ערכי תכולות רטיבות גבוה ויציב שהאיץ חיזור מלא של גז  $N_2O$  לגז  $N_2$  בתהליך הדה ניטריפיקציה. ערכי ה-WFPS במהלך עונות 2019 ו-2020 היו בטווח האופטימלי לפליטות  $N_2O$  (70-80%) בתהליך דה ניטריפיקציה (Butterbach-Bahl et al., 2013), וייתכן שהיוו את המקור לפליטות גבוהות יותר בהשוואה לעונת 2018 (אולם לא נמצאה לכך מובהקות סטטיסטית). מאחר ובמחקר זה לא נעשה שימוש באיזוטופים יציבים של חנקן לא ניתן לקבוע בוודאות אם אכן זהו המצב. על מנת לאושש את ההסבר אותו הצענו בו השקיה באינטרוול קצר במספר פעימות הגבירה חיזור ה-  $N_2O$  ל-  $N_2$  בדה ניטריפיקציה, אנו מציעים לבצע בעתיד ניסוי בתנאי סביבה מבוקרים שבו ייבחן הנושא. בנוסף, לניסויים אלו (שייעשו ללא צמח), מומלץ לבצע גם ניסויים עם צמח, בו יתבצע מעקב אחר קליטת הנוטריינטים והמים על ידי שורשי העצים. ניסוי מסוג זה יאפשר לבחון את הקשרים בין סוג הדשן החנקני שניתן, תנאי הסביבה וקצבי הקליטה על ידי הצמח, ביומסת השורשים אשר לכולם השפעה ישירה או עקיפה על פליטת  $N_2O$  ו-  $CO_2$ .

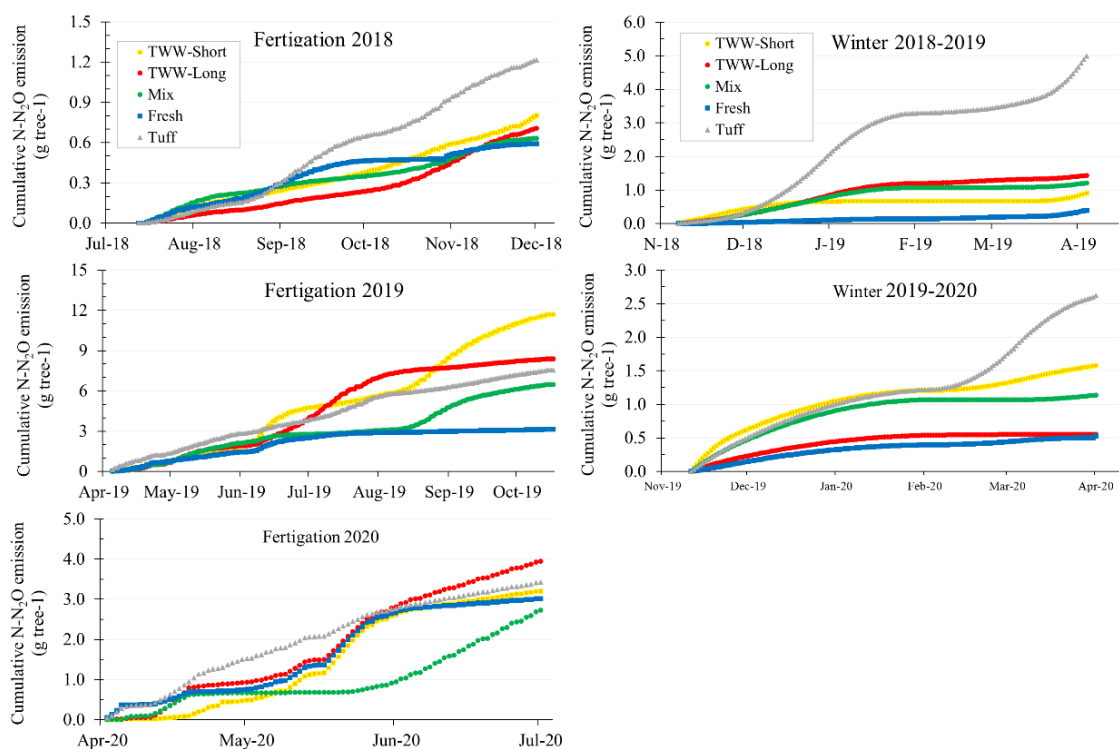
בכלל הטיפולים, למעט טיפול תעלות האוורור, פליטת הגזים בחורף 2018-2019 היתה גבוהה יותר מאשר בחורף 2019-2020, אולם ללא שוני סטטיסטי מובהק בין שני החורפים (טבלה 7 ואיור 15). בחינה של היחס בין שטף הגזים בעונת הדישון (אפריל 2019 עד כולל נובמבר 2019) לבין שטף הגזים בחורף (דצמבר 2019 עד כולל מרץ 2020) הראה כי השטף בחורף מהווה  $17 \pm 12\%$  מכלל שטף ה-  $N_2O$  השנתי (איור 16). ערכים אלו מעט נמוכים מהערכים בספרות בסביבת אקלים ים-תיכוני, בהם נמצא שהשטף בחורף מהווה 60% - 30% מסך הפליטה העונתי (Verhoeven et al., 2017). סביר להניח שההבדל בין התוצאות שלנו לבין תוצאות מחקרים אחרים נובע מאופן חישוב השטף במרחב. במחקר זה הערכנו את השטף רק מאזור בצלי ההרטבה של הטפטפות (קיץ + חורף) ולא מכלל השטח. ברור שהוספה של השטפים מהשטח מחוץ לבצלי ההרטבה של הטפטפות במהלך החורף (בקיץ השטפים באזור זה היו מתחת לסף הגילוי עקב תנאי היובש) יגדיל את תרומתם לכלל השטפים, זאת מאחר ושטח הטפטפות מהווה רק אחוז קטן מהשטח המורטב בחורף. בין החודשים ינואר למרץ, כאשר לא ניתן דשן, שטף ה-  $N_2O$  היה לרוב נמוך מאוד וקרוב או מתחת לגבול המדידה של המכשיר. בתקופה זו ריכוז החנקן ב 30 הס"מ של

הקרקע הינו נמוך מאוד (איור 8), ואף טמפרטורת הקרקע נמוכה (מידע לא מוצג). מעניין לראות שבשני החורפים שטף ה- $N_2O$  מטיפול תעלות האורור (טוף) היה הגבוה ביותר (איור 15, איור 16, איור 17), ובאופן מובהק (טבלה 7). ניתן להסביר תוצאה זו עקב היווצרות של תנאי היפוקסיה המעודדים דהניטריפיקציה בחלקו העליון של שכבת החרסית בבסיס תעלת הטוף. תנאים כאלו נוצרים בעת אירועי השקיה ובאירועי גשם, כאשר חלחול מהיר של מים דרך שכבת הטוף יוצר היעדרות של מים בשטח המגע בין הטוף לקרקע החרסית בבסיסו (נצפה פעמים רבות בשטח). כצפוי, במהלך החורף לממשק ההשקיה לא היתה השפעה על שטף ה- $N_2O$  ולכן לא נצפו הבדלים סטטיסטיים מובהקים בין השטפים שנמדדו מטיפולי הקולחים השונים (קרי השקיה כל יומיים (TWW-Short) או כל שלושה ימים (TWW-Long)) (טבלה 7). יחד אם זאת, נמצא כי הפליטות הנמוכות ביותר במהלך החורף היו מטיפול השפירים, עם שוני מובהק בחורף 2018-2019, וללא מובהקות בחורף 2019-2020. באותו האופן, טיפולי המיהול הראו ערכים נמוכים יותר אך ללא שוני סטטיסטי מובהק (טבלה 7). הפחיתה בשטף ה- $N_2O$  מטיפול השפירים, תואמת את התצפיות על שיקום מאפייני הקרקע הפיזיקליים (טרצ'יצקי וחוב' 2018), ומהוות עדות נוספת, מכיוון מיקרוביאל, על שיפור תנאי האורור והחלחול. ממצא זה מעודד ביותר ומצביע על כך שנכון לשלב זה הנזק שנגרם כתוצאה מהשקיה מרובת שנים בקולחים הינו הפך.

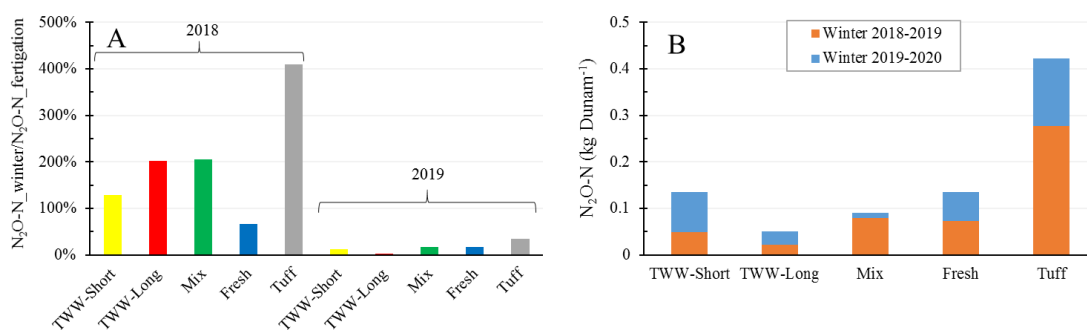
**טבלה 7.** ערכי שטף  $N-N_2O$  ממוצעים עבור כלל הטיפולים בשלושת עונות ההשקיה ובשני החורפים

|                                                               | TWW-Short | TWW-Long  | Mix       | Fresh     | Tuff     |
|---------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| Average measured $N-N_2O$ flux ( $\mu g\ cm^{-2}\ min^{-1}$ ) |           |           |           |           |          |
| Fertigation 2018                                              | 0.00044A  | 0.00043AB | 0.00044AB | 0.00044B  | 0.00079A |
| Fertigation 2019                                              | 0.0047A   | 0.0034AB  | 0.0026BC  | 0.0013C   | 0.0035AB |
| Fertigation 2020                                              | 0.0021AB  | 0.0023AB  | 0.0015B   | 0.0012B   | 0.0033A  |
| Winter 2018-2019                                              | 0.00030AB | 0.00034AB | 0.00030AB | 0.000025B | 0.00045A |
| Winter 2019-2020                                              | 0.00028B  | 0.000086B | 0.000083B | 0.000011B | 0.00094A |

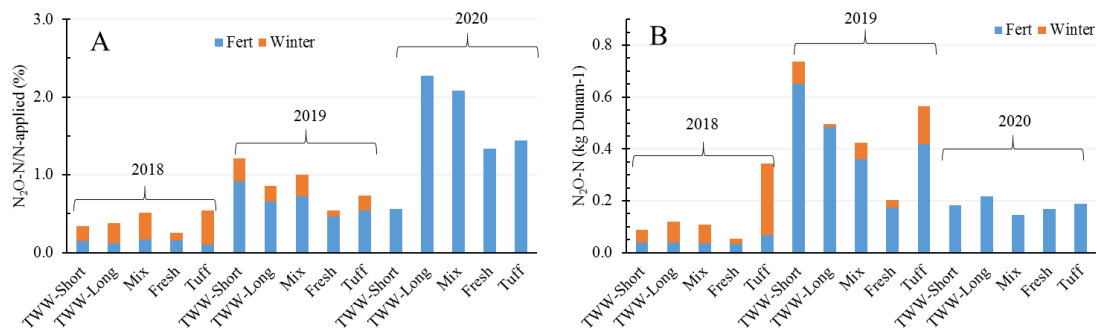
אותיות מייצגות שונות סטטיסטית מובהקת ( $p < 0.05$ ) בין הטיפולים ע"פ ANOVA ומבחן Tukey HSD



**איור 15.** שטף מצטבר ממוצע של  $N_2O$  (גרם לעץ כחנקן) שנפלט במהלך שלוש עונות ההדשיה (2018, 2019, 2020 Fertigation) ובשני החורפים ביניהן (winter) מחמשת הטיפולים השונים. אנא שים לב לערכים לשוני בין הערכים על הציר האנכי בין השנים והעונות.



**איור 16.** (A) יחס בין כמות ה- $N_2O$  (גרם לדונם) שנפלטת במהלך עונות ההשקיה 2018 ו-2019 לבין כמות ה- $N_2O$  (גרם לדונם) שנפלטת במהלך החורף העוקב, בהתאמה. (B) כמות ה- $N_2O$  (ק"ג לדונם) שנפלטת במהלך שני החורפים בהם נערך המחקר (2018-2019, ו-2019-2020).



**איור 17.** (A) אחוז החנקן שנפלט כגז  $N_2O$  ביחס לכלל החנקן שיושם במטע בעונת 2018, 2019, 2020. (B) כמות החנקן המצטברת שנפלטת בכל שנה, ותרומתם היחסית של עונת ההדשיה והחורף. מוצג ממוצע של כלל המדידות יחד עבור כל שנה.

בניגוד לדפוסי הפליטה בחורף, דפוסי הפליטה במהלך עונת ההדשיה הושפעו מאוד מעומס הדשן שיושם. לדוגמא בעונת 2018 הפליטה הגבוהה ביותר הייתה מטיפול הטוף שדושן בכמות דשן כפולה (טבלה 7 ואיור 15), בעוד שבעונת 2019 הפליטה הנמוכה ביותר הייתה מטיפול השפירים שקיבל מנת דשן פחותה (טבלה 7, איור 15). באותו האופן, שטף ה- $N_2O$  המצטבר בכלל הטיפולים (למעט השפירים בה ניתנה אותה כמות) היה הגבוה ביותר בעונת 2019 בה ניתנה מנת הדשן הגדולה ביותר.

בחינה סטטיסטית של השפעת ממשק ההשקיה (תכיפות ההשקיה) הראה מגמה מעורבת של פליטות גבוהות יותר באופן מובהק רק בעונת הדישון 2018 וללא הבדל בין הטיפולים בעונת 2019 ו-2020 (טבלה 8). בחינה של הנושא במודל הנומרי הראתה שהגדלת המרווח בין אירועי ההדשיה מאחת ליומיים (TWW-Short) לאחת לשלושה ימים (TWW-Long) צפויה להוריד את שטף ה- $N_2O$  (איור 18). הסיבה לכך נעוצה ב- (א) הפחתת ריכוז צורני החנקן בחתך העליון של הקרקע, ו- (ב) הפחתת תכולת הרטיבות באופן יחסי. קרי, פחות השקיות, משמעו פחות ימים בהם חתך הקרקע העליון, בו מתבצעת מרבית הפעילות המיקרוביאלית, רטוב יותר עם ריכוזי חנקן גבוהים יותר.

בנוסף לתכיפות ההשקיה גם מקור המים עשוי להשפיע על פליטת הגזים. באופן כללי השקיה במי קולחים עשויה להעלות את פליטת הגזים עקב שחרור ישיר של  $CO_2$  ו- $N_2O$  מתרכובות חנקן ופחמן שנמצאות במי הקולחים, ובאופן עקיף על ידי שינויים שהם גורמים בפעילות המיקרוביאלית ובתכונות הקרקע המשפיעים על היווצרות גזי חממה (Thangarajan et al., 2012). השקיה במי קולחים משפיע על פעילות מיקרוביאלית אשר מפחיתה את רמות החמצן וכך, נוצרים תנאים היפוקסיים מועדפים לפליטת  $N_2O$  (Saggar et al., 2004). במחקר שבחן את השפעת השקיה במי קולחים על רמות החמצן בקרקע חרסיתית במטע אבוקדו באקלים ים תיכוני במשך שתי עונות השקיה, נמצא כי השקיה בקולחים הובילה לריכוזי חמצן נמוכים יותר באווירת הקרקע מאשר בהשקיה בשפירים. במחקר זה מהלך שבועי של אירועי השקיה הראה כי ריכוזי החמצן בנקבובי הקרקע נמוכים יותר במהלך אירוע השקיה כאשר הקרקע קרובה למצב רוויה, וגם באי רוויה בשני עומקים שונים של 20 ו-35 ס"מ בבית השורשים (Yalin et al., 2017). אנו סבורים כי פליטות  $N_2O$  גבוהות במחקרנו בטיפול השקיה בקולחים לעומת טיפולי המיהול והשפירים

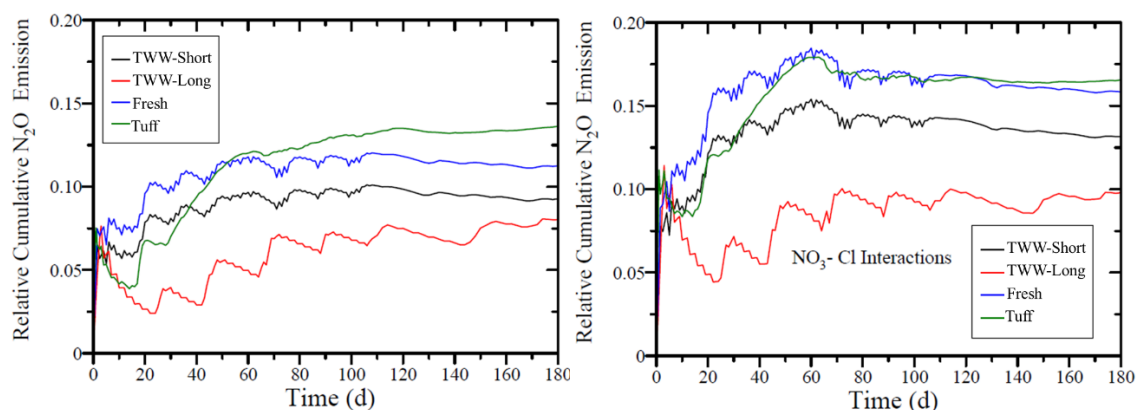
(טבלה 6) יכולות להיות מוסברות על ידי כך שרמות חמצן נמוכות במהלך השקיה ולאחריה כמו גם במהלך עונת השקיה מלאה הובילו לתנאי מחסור בחמצן אשר הגבירו היווצרות  $N_2O$  בתהליך זה ניטריפיקציה (במהלך אירוע השקיה). במחקרם של Master וחוב' (2003) אשר בחנו באמצעות איזוטופ יציב ( $N^{15}$ ) את השפעת השקיה במי קולחים על פליטת  $N_2O$  וטרנספורמציות חנקן בקרקע חרסיתית (61.5% חרסית), בניסוי לזימטרים ובתנאי מעבדה, דווח כי לא נמצאו הבדלים בפליטות  $N_2O$  כאשר השקו במי קולחים ושפירים, אך נמצא כי בתכולות רטיבות בהן הקרקע הייתה רוויה פקטור הפליטה הגיע לערך גבוה של 3.1% כתוצאה מתהליך זה ניטריפיקציה. העובדה כי לא היו הבדלים בפליטות  $N_2O$  בניסוי המעבדה במחקרו של Master יכולה להיות מוסברת על ידי כך שתכולות הרטיבות תוכננו להיות זהות ותכולת החומר האורגני במי הקולחים הייתה זניחה ביחס למים השפירים. הסבר אפשרי נוסף לפליטות גבוהות של  $N_2O$  בהשקיה בקולחים לעומת שפירים הינו שהשקיה במי קולחים עשויה לגרום לעלייה ברמות  $NO_2^-$  בתמיסת הקרקע המשמשת כסובסטרט להיווצרות  $N_2O$  בתהליכי ניטריפיקציה ודה ניטריפיקציה. Master וחוב' (2003; 2004) דיווחו, על בסיס ניסוי מעבדה, כי רמות גבוהות של  $NO_2^-$  בתמיסת הקרקע התקבלו לאחר יישום השקיה בקולחים. הם הראו כי השקיה קרקע חרסיתית במי קולחים שניוניים עיכבה את תהליך הניטריפיקציה ב- 15-25% בתכולת רטיבות של קיבול שדה וגרמה להצטברות  $NO_2^-$ . סיבה אפשרית להצטברות  $NO_2^-$  יכולה להיות מוסברת על ידי נוכחותו של חומר אורגני מומס במי הקולחים שעשוי לעכב את החמצון של  $NO_2^-$  (Stüven et al., 1992) ראשית, מכיוון שעקת מחסור בחמצן נוצרת על ידי צריכתו של החמצן בעת פירוקו של החומר האורגני המצוי במי הקולחים על ידי מיקרואורגניזמים. שנית, היחלשות פעילותם של אוכלוסיית החיידקים מבצעי ניטריפיקציה, בעקבות חשיפתם הממושכת לתנאים של מחסור בחמצן כתוצאה מצריכתו בעת פירוק החומר האורגני. בניסוי נוסף שביצעו Master וחוב' (2004) בתנאי הדגרה במעבדה במשך 14 ימים רמות  $NO_2^-$  היו גבוהות בסדר גודל בקרקע חרסיתית אשר הושקתה על ידי קולחים לעומת שפירים. רמות  $NO_2^-$  גבוהות נצפו בקולחים לעומת שפירים בתכולות רטיבות משקלית של 40%, 60%-ו 70%. בנוסף מחקר זה דיווח כי רמות  $NO_2^-$  היו גבוהות יותר בתכולת רטיבות של 20% לעומת 40%, כלומר גם בתנאים מאווררים בקרקע מנוקזת רמות גבוהות של  $NO_2^-$  עשויות להיווצר בעקבות השקיה בקולחים שמגבירה את תהליך הניטריפיקציה. תוצאות אלו לא תואמות את דפוס הצטברות  $NO_2^-$  שנצפה בטיפול הקולחים אל מול השפירים במחקר זה (איור 8). בניגוד לתוצאותיהם של Master וחוב' (2003; 2004) בהם הקולחים תרמו הרבה חומר אורגני, אנו מניחים כי השפעת החומר האורגני המומס בקולחים על הצטברות  $NO_2^-$  והיווצרותו של  $N_2O$  הינה זניחה ביחס לתוספת החומר האורגני במהלך העונות השונות במטע שנוסף על פני הקרקע ובעומקה על ידי עלים יבשים, ענפים, ריקבון שורשים ועוד. מכיוון שתוספת החומר האורגני במטע דומה בטיפול הקולחים והשפירים ומשמעותית יותר מכמות החומר האורגני המצוי במי הקולחים, ניתן להניח כי החומר האורגני בקרקע השפיע באופן דומה על היווצרות  $N_2O$  בטיפולים הנבחנו.

פרט לחומר האורגני, מי הקולחים בניסוי נבדלו מהמים השפירים גם ברמת המליחות (200-220 מג"ל כלוריד אל מול 75-90 מג"ל כלוריד, בהתאמה). הבדלים אלו במליחות, עשויים להשפיע על פליטות



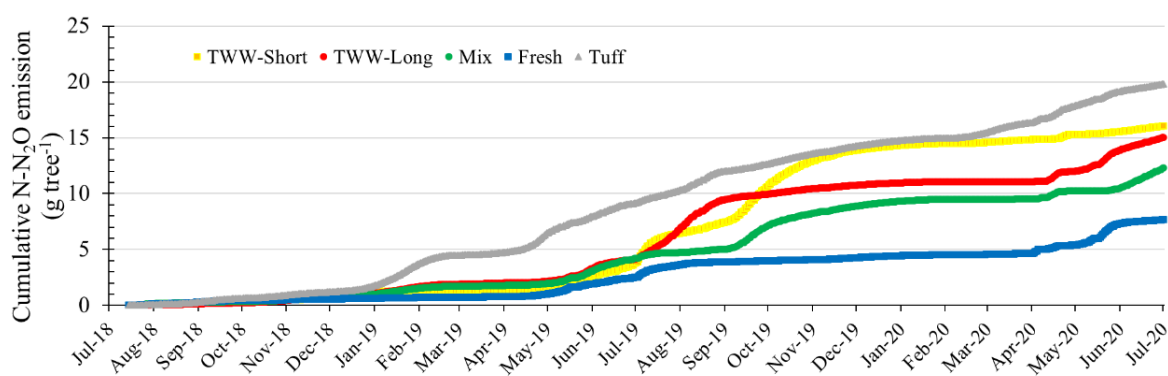
גזי החממה  $\text{CO}_2$  ו- $\text{N}_2\text{O}$  מכיוון ששינויי ברמת המליחות עשוי להשפיע על האוכלוסיות המיקרוביאליות בקרקע ועל פעילותן (Moussa et al., 2006; Tsuneda et al., 2005). תוצאותינו נמצאות בהתאמה למחקרים שבוצעו באזורים יבשים בסין ודיווחו כי, השקיה במים המאופיינים ברמות עולות של מליחות הגבירו פליטות  $\text{N}_2\text{O}$  לעומת השקיה במים שפירים בשדה כותנה שקיבל השקיה דרך שלוחות טפטוף (Zhang et al., 2016) ובניסוי הדגרה בתנאי מעבדה (Yu et al., 2019). מליחות משפיעה על תהליכי טרנספורמציות של חנקן בקרקע על ידי עיכוב מספר תהליכים ביולוגיים אשר אחראיים על שימור יחס  $\text{NH}_4/\text{NO}_3$  מאוזן (Lodhi et al., 2009). בקרקע חידקים מבצעי ניטריפיקציה שהופכים  $\text{N}^-$  ל- $\text{NH}_4^+$  ל- $\text{NO}_3^-$  בתהליכי חמצון, מושפעים באופן שלילי מעלייה במליחות אשר גורמת להפחתה בקצב תהליך הניטריפיקציה (Kumar et al., 2007; Irshad et al., 2005). במחקרנו פליטות  $\text{N}_2\text{O}$  היו גבוהות בטיפול השקיה בקולחים, שהתאפיין במליחות גבוהה יותר, בהשוואה לטיפול השפירים והמיהול (טבלה 7). לכן, אנו משערים שהמליחות הגבוהה של מי הקולחים הגבירה פליטות  $\text{N}_2\text{O}$  בהשוואה לטיפול השפירים והמיהול. זאת משום שמלח עשוי לעכב את השלב השני בניטריפיקציה ובעקבות כך לגרום להצטברות של  $\text{NO}_2^-$  (Ramirez-Fuentes et al., 2002) ולעלייה בהיווצרות  $\text{N}_2\text{O}$  מחד גיסא ומאידך גיסא, מחזרי  $\text{N}_2\text{O}$  רגישים מאוד לשינויים החלים בסביבתם. כאשר המליחות גבוהה, מתרחש עיכוב בפעילות של מחזרי  $\text{N}_2\text{O}$  בעקבות הצטברות  $\text{NO}_2^-$  אשר רעילה לסוג חידקים זה. עיכוב בחיזור של  $\text{N}_2\text{O}$  ל- $\text{N}_2$  בדה ניטריפיקציה עשוי לגרום לעלייה ברמות  $\text{N}_2\text{O}$  (Shang et al., 2009).

מעניין לראות שעל פי המודל הנומרי בו השתמשנו, לריכוז הכלוריד בתמיסה יש השפעה גדולה על פליטת הגזים. בניגוד לאמור לעיל, בו מודגשת השפעת המליחות על האוכלוסייה המיקרוביאלית בקרקע, תוצאות הפליטה של  $\text{N}_2\text{O}$  במודל הנומרי הושפעו מהתחרות בין הניטרט לבין הכלוריד על אתרי הקליטה של ניטרט בשורש (Russo and Kurtzman, 2019). כתוצאה מתחרות זו, ריכוז הניטרט בקרקע, גבוה יותר לאורך יותר זמן בטיפול עם ריכוזי כלוריד גבוהים יותר. בהתאם לכך, וכפי שנמצא במחקר זה, השקיה במי קולחים בהם ריכוז כלוריד גבוה יותר מאשר במים שפירים העלתה את פליטת ה- $\text{N}_2\text{O}$  (מידע לא מוצג). על אף האמור לעיל, אלמנט שנמצא כבעל השפעה גדולה יותר על פליטת ה- $\text{N}_2\text{O}$  מאשר איכות המים הינו סוג הדשן. כפי שנתן לראות באיור 18, כאשר ניתן באופן קבוע לטיפול השפירים דשן עם תכולת אמוני גבוהה יותר מאשר לשאר הטיפולים, פליטת ה- $\text{N}_2\text{O}$  מטיפול זה, כתוצאה מפליטת  $\text{N}_2\text{O}$  במהלך הניטריפיקציה, היתה גבוהה ומשמעותית יותר.



**איור 18.** (שמאל) השתנות היחס בין השטף היומי המצטבר סביב עץ (שלוש טפטפות מכל צד) של גז החממה  $N_2O$  לבין כמות החנקן שניתנה לעץ באותה העת מהטיפול השונים במהלך עונת 2019 על פי תוצאות המודל הנומרי. (ימין) מידול השפעת הטיפולים השונים בקולחים ודישון בדשן דל אמון אל מול השקיה בשפירים בדשן עשיר אמון על השטף היומי הממוצע סביב עץ (שלוש טפטפות מכל צד) של גז החממה  $N_2O$ . בשני הגרפים אפס (0) מייצג את תחילת הדישון בעונה (1 למאי).

בחינה סטטיסטית של השטפים שנמדדו בכל יום דיגום הראתה שוני סטטיסטי מובהק בין חלק מהטיפולים בשליש (32.5%) מימי הדיגום (טבלה 8). כאשר במרבית הפעמים בהם היה שוני סטטיסטי הוא נבע מכך שהפליטה בטיפול הטוף (70%) ובטיפול הממשק המשקי (TWW-Short) (50%) היתה יותר גבוהה. בכלל, בכל ימי הדיגום הפליטה מטיפול השפירים היתה נמוכה או זהה לכלל הטיפולים. בהתאם לכך, סכימה של כלל השטפים (המדודים והמחושבים) לאורך כל תקופת המחקר (יוני 2018 עד יוני 2020) הראתה שהשימוש במים באיכות גבוהה (קרי טיפולי השפירים והמיהול) הפחיתה את פליטת גזי החממה (איור 19). בנוסף, השטפים שנמדדו בחורף, היו כמעט תמיד נמוכים מהשטפים בעונת ההדשה. למעט בטיפול הטוף, כפי שנדון מוקדם יותר, שוני זה בא לידי ביטוי בשיפוע גרף השטף המצטבר, שהיה נמוך בחורף וגבוה בעונת הדישון (אפריל-נובמבר).



**איור 19.** שטף מצטבר של גז החממה  $N_2O$  במהלך כל תקופת המחקר על פי מדידות השדה.

**טבלה 8.** בחינה סטטיסטית של הבדלים בין שטפי  $N-N_2O$  שנמדדו בשדה (ע"ב שלוש חזרות לטיפול) בטיפולים השונים בכל יום דיגום.

|           | TWW-Short | TWW-Long  | Mix       | Fresh    | Tuff      |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| 19-Jul-18 | 6.4E-04A  | 3.2E-04A  | 8.7E-04A  | 8.0E-04A | 3.7E-04A  |
| 31-Jul-18 | 4.8E-04A  | 2.9E-04A  | 6.4E-04A  | 3.1E-04A | 5.3E-04A  |
| 16-Aug-18 | 2.4E-04A  | 1.2E-04A  | 1.2E-04A  | 3.2E-04A | 1.9E-04A  |
| 30-Aug-18 | 3.6E-04A  | 3.6E-04A  | 4.0E-04A  | 8.0E-04A | 1.2E-03A  |
| 13-Sep-18 | 3.2E-04B  | 2.1E-04B  | 1.6E-04B  | 5.7E-04B | 1.2E-03A  |
| 4-Oct-18  | 4.5E-04A  | 2.4E-04A  | 1.8E-04B  | 4.0E-05B | 2.7E-04A  |
| 28-Oct-18 | 6.9E-04A  | 8.7E-04A  | 4.5E-04A  | 3.4E-05A | 1.2E-03A  |
| 29-Oct-18 | 1.2E-04B  | 1.4E-04B  | 4.1E-05B  | 1.4E-05B | 1.4E-03A  |
| 30-Oct-18 | 7.2E-04A  | 6.8E-04A  | 7.1E-04A  | 1.1E-03A | 5.2E-04A  |
| 1-Nov-18  | 3.5E-04A  | 1.0E-03A  | 7.8E-04A  | 4.3E-04A | 1.1E-03A  |
| 2-Dec-18  | 7.0E-04A  | 2.9E-04B  | 2.1E-05B  | 1.0E-06B | 3.9E-04A  |
| 13-Dec-18 | 1.0E-03A  | 5.8E-04A  | 7.3E-04A  | 9.8E-05A | 4.2E-04A  |
| 24-Jan-19 | 5.0E-05A  | 1.2E-03A  | 9.5E-04A  | 1.2E-04A | 4.1E-03A  |
| 25-Feb-19 | 1.0E-06A  | 4.1E-05A  | 1.0E-06A  | 5.0E-08A | 7.9E-05A  |
| 18-Mar-19 | 1.0E-06A  | 2.4E-04A  | 1.0E-06A  | 1.3E-04A | 3.5E-04A  |
| 11-Apr-19 | 1.0E-06A  | 8.2E-05A  | 8.2E-05A  | 6.2E-05A | 1.2E-03A  |
| 30-Apr-19 | 1.5E-03A  | 5.8E-04A  | 6.8E-04A  | 1.1E-03A | 6.6E-03A  |
| 16-May-19 | 4.4E-03A  | 4.0E-03A  | 4.2E-03A  | 4.9E-03A | 4.3E-03A  |
| 30-May-19 | 2.9E-03A  | 5.9E-03A  | 5.3E-03A  | 1.4E-03A | 4.2E-03A  |
| 13-Jun-19 | 1.9E-03A  | 1.6E-03A  | 2.7E-03A  | 2.1E-03A | 3.9E-03A  |
| 27-Jun-19 | 4.7E-03A  | 1.2E-03B  | 2.4E-03A  | 7.9E-04B | 2.1E-03A  |
| 4-Jul-19  | 1.4E-02A  | 5.0E-03A  | 3.3E-03A  | 5.5E-03A | 3.3E-03A  |
| 18-Jul-19 | 4.2E-03A  | 6.6E-03A  | 4.0E-04A  | 1.5E-03A | 2.4E-03A  |
| 1-Aug-19  | 1.2E-03A  | 1.0E-02A  | 3.2E-04B  | 1.8E-03A | 3.3E-03A  |
| 15-Aug-19 | 3.9E-03A  | 9.3E-03A  | 1.5E-03A  | 4.8E-04A | 8.1E-03A  |
| 1-Sep-19  | 2.3E-03A  | 2.3E-03A  | 4.0E-04A  | 1.6E-04A | 1.1E-03A  |
| 17-Sep-19 | 1.2E-02A  | 8.2E-04B  | 8.7E-03A  | 3.5E-04B | 1.9E-03B  |
| 10-Oct-19 | 6.5E-03A  | 1.5E-03BC | 2.9E-03BC | 2.2E-04B | 2.7E-03C  |
| 26-Nov-19 | 1.0E-03A  | 4.9E-04A  | 1.0E-03A  | 4.1E-04A | 1.1E-03A  |
| 4-Feb-20  | 1.7E-06A  | 3.3E-05B  | 5.5E-07A  | 1.1E-05B | 8.0E-05B  |
| 5-Mar-20  | 5.0E-04B  | 1.0E-07B  | 5.5E-07B  | 1.9E-04B | 2.2E-03A  |
| 31-Mar-20 | 3.3E-04A  | 5.1E-06A  | 2.5E-04A  | 7.8E-07A | 5.4E-04A  |
| 5-Apr-20  | 2.1E-04A  | 5.0E-04A  | 5.0E-07A  | 6.7E-03A | 5.0E-03A  |
| 6-Apr-20  | 1.0E-06A  | 5.0E-04A  | 2.7E-03A  | 1.8E-04A | 2.2E-03A  |
| 19-Apr-20 | 6.4E-04A  | 6.3E-03A  | 3.6E-03A  | 2.7E-03A | 4.2E-03A  |
| 20-Apr-20 | 2.7E-03A  | 8.2E-04B  | 5.2E-04B  | 2.4E-04B | 5.0E-03A  |
| 26-Apr-20 | 4.6E-03A  | 1.2E-03B  | 3.2E-04B  | 3.2E-04B | 2.1E-03A  |
| 27-Apr-20 | 2.2E-04B  | 1.6E-04B  | 8.5E-05B  | 1.4E-04B | 2.9E-03A  |
| 21-May-20 | 7.4E-03A  | 6.2E-03A  | 6.1E-05A  | 6.7E-03A | 3.2E-03A  |
| 7-Jun-20  | 1.4E-03AB | 2.9E-03AB | 5.0E-03A  | 7.4E-04B | 1.7E-03AB |

### 5.3.1. פליטת גז החממה CO<sub>2</sub>

בניגוד לדפוס הפליטה של ה-N<sub>2</sub>O שהושפע מאוד מאירועי הדשיה, השטף היומי של CO<sub>2</sub> היה דומה לאורך השבוע, ללא תלות באירועי הדשיה. לא נמצאה השפעה מובהקת של ממשק ההשקיה, איכות המים או תעלות האוורור על דפוס הפליטה. בחינה רבת משתנים בין פרמטרים בקרקע לשטפי CO<sub>2</sub> הראתה קשרים חיוביים בין הטמפרטורה ואחוז הנקבובים המלאים מים לבין שטפי גז ה-CO<sub>2</sub> בעומק 10 ס"מ. בניגוד לכך הכיוונית הכללית בעומק 35 ס"מ של הפרמטרים הייתה שלילית. דפוס השטף היומי של CO<sub>2</sub> במחקרנו אינו תואם לדפוס השטף היומי של CO<sub>2</sub> כפי שדיווח במחקרים רבים (Akinremi et al., 1999; Liu et al., 2010; Parkin and Kaspar, 2003). במחקרים אלו נצפה דפוס בו שטף CO<sub>2</sub> התפלג נורמלית ונמצא בהתאמה חזקה לטמפרטורת הסביבה. נראה כי, שטף מינימלי מתרחש בשעות הבוקר המוקדמות (5:00-6:00 בבוקר) כאשר טמפרטורות הסביבה קרות ולאחר מכן, השטף מתגבר בהדרגה עם ההתחממות של הטמפ' ומגיע לשטף מקסימלי בשעות הצהריים (12:00-16:00) ובהמשך לקראת שקיעה עם הירידה בטמפרטורות חלה דעיכה בשטף. במחקרים אלו שטף CO<sub>2</sub> היה בהתאמה חזקה יותר עם טמפ' הסביבה לעומת טמפ' הקרקע, זאת מכיוון שישנה היסטרוזה בקשר שבין שטף CO<sub>2</sub> מהקרקע לבין טמפ' הקרקע. קיום היסטרוזה בין טמפ' הקרקע לשטף CO<sub>2</sub> מתרחש בעיקר בעקבות תהליכי דיפוזיה של הגז שמתמוסס בתמיסת הקרקע כתלות בתכולת הרטיבות בה. בעת אירוע השקיה כאשר תכולת הרטיבות גבוהה ההיסטרוזה מתחזקת (Riveros-Iregui et al., 2007). אנו סבורים כי סיבה אפשרית לחוסר ההתאמה עם הדפוס של שטף CO<sub>2</sub> שמתפלג נורמלית במהלך היום, היא שבימי הדשיה נוצרת הטיה בשטפים הנמדדים כתוצאה מהיסטרוזה שמתרחשת בתכולת רטיבות גבוהה. העובדה כי לא נמצא הבדל מובהק בדפוס השטף היומי של CO<sub>2</sub> בטיפולים הנבחנו, יכולה להיות מוסברת על ידי העובדה שטמפ' הסביבה והקרקע היו דומות בכל הטיפולים בחלקת המחקר במטע (טמפ' הקרקע, בעומק 10 ס"מ, התאפיינה לאורך ימי הדיגום בסטיית תקן ממוצעת של  $0.5^{\circ}\text{C} \pm$ ). מכיוון שטמפ' הסביבה והקרקע הינם גורמים עיקריים בוויסות תהליך נשימת קרקע, ולא היו בהם הבדלים בכל הטיפולים, התקבלה תוצאה בה לא היו הבדלים מובהקים בדפוס השטף היומי של CO<sub>2</sub>. בנוסף, אנו סבורים כי בעקבות ביצוע הניסוי בתנאי שדה לא קיבלנו את הדפוס המקובל בו שטף CO<sub>2</sub> מתפלג נורמלית ונמצא בקשר חזק לטמפ' הסביבה. בניגוד למחקר שמתבצע בתנאי מעבדה מבוקרים בהם ניתן לווסת ולשלוט בגורמים הסביבתיים המשפיעים על שטפי CO<sub>2</sub> כמו טמפ', תכולת רטיבות והומוגניות הקרקע, בתנאי שדה הפעילות המיקרוביאלית וטמפ' הקרקע מתאפיינים בשונות גדולה בזמן ובמרחב ולכן, מתגבר הקושי בהערכת דפוס השטף היומי (Parkin and Kaspar, 2003).

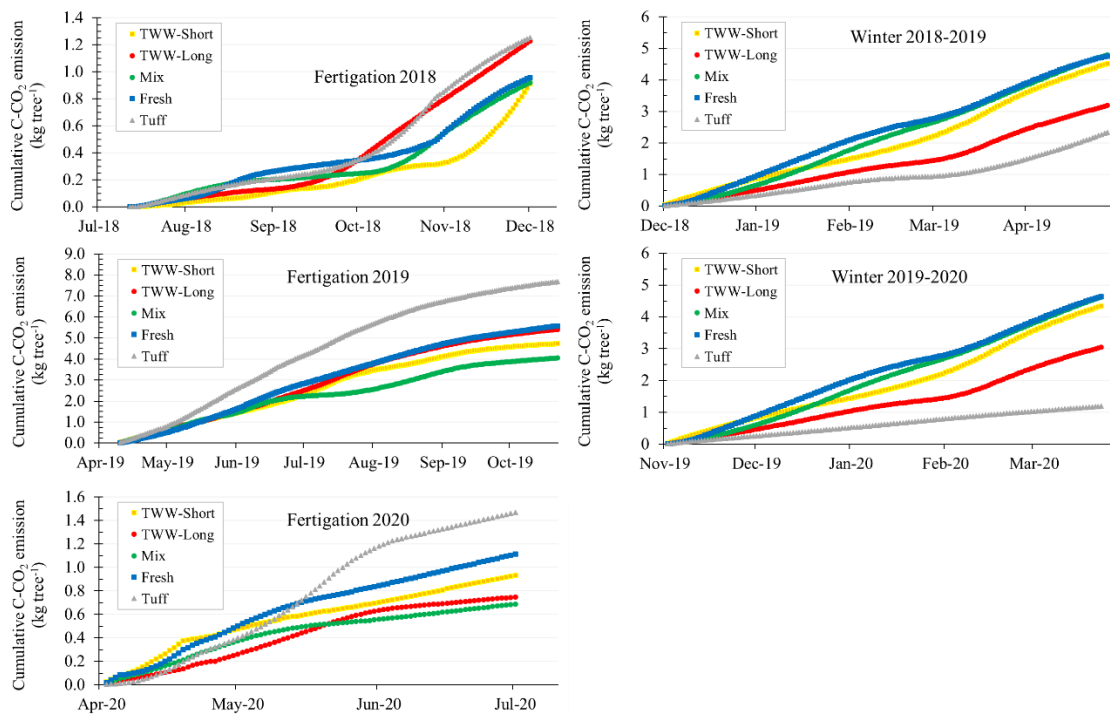
שלא כמו עם פליטת ה-N<sub>2</sub>O שהיתה נמוכה בעונת הדישון 2018 מבשאר השנים, לא היו הבדלים בין שטף ה-CO<sub>2</sub> ב-2018 ו-2020 (איור 20). ממצא זה מצביע על אמינות שיטת המדידה בשתי השנים ומגביר את התהייה לגבי שטפי ה-N<sub>2</sub>O הנמוכים שנמדדו בשנה זו. הפליטה המצטברת של ה-CO<sub>2</sub> בעונת 2019 היתה גבוהה מהותית מהפליטה בשתי השנים האחרות, הן מאחר ומשך הדיגום היה ארוך יותר (שבעה חודשים ולא ארבעה כמו ב-2018 ו-2020) והן מאחר והפליטות אכן היו גבוהות יותר. ראה לצורך השוואה

את השטף המצטבר עד ליוני בין עונות 2019 ו-2020 (איור 20). ייתכן ושוני זה מצביע על קשר בין דיכוי לבין פליטת CO<sub>2</sub>.

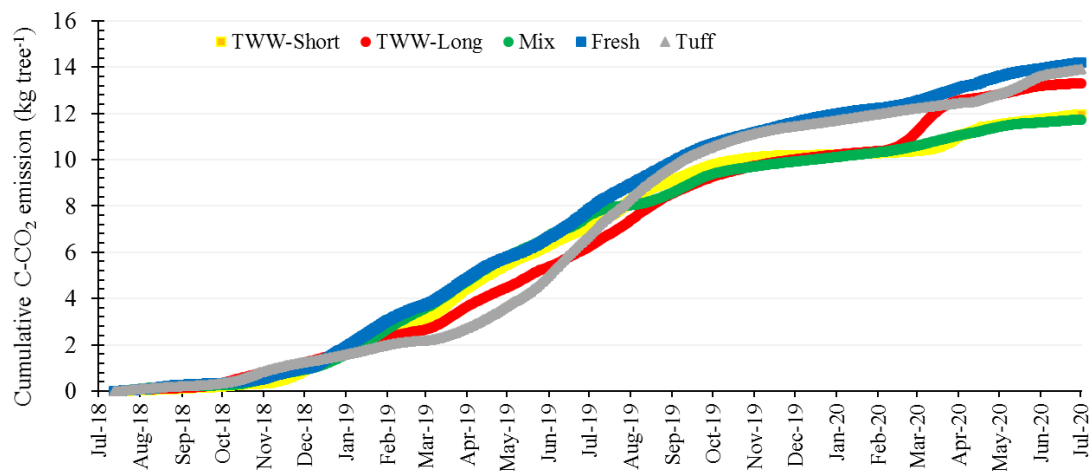
בחינה של דפוס השטפים במהלך החורף, הראתה כי בשני החורפים הפליטות המצטברות הנמוכות ביותר של CO<sub>2</sub> נמדדו בטיפול תעלות האורור (איור 20). אנו סבורים כי מגמות אלו נבעו הן מהתמוססות CO<sub>2</sub> במים שנקוו בשכבת המגע בין הטוף לחרסית, והן מפחיתת פעילות השורשים בתעלות הטוף במהלך החורף עקב תנאי אורור לא אופטימאליים. קיימות מספר מגבלות בהבנת המנגנונים המווסתים את תהליך נשימת קרקע ופליטת CO<sub>2</sub> מן הקרקע במהלך העונות השונות בשנה. ראשית, מכיוון שנשימת קרקע מורכבת משני תהליכים שונים של נשימה מיקרוביאלית ונשימת שורשים שתרומתם היחסית לנשימת הקרקע יכולה להתבטא בשונות גדולות בזמן ובמרחב כאשר כל תהליך מגיב באופן שונה לשינויים החלים בגורמים הסביבתיים (Hanson et al., 2000). ושנית, פליטה נטו של CO<sub>2</sub> משתנה לאורך העונות בשנה ותלויה בגורמים רבים. נראה כי לתוספת חנקן לקרקע יש השפעות שונות על פליטות CO<sub>2</sub> מהקרקע. ישנם דיווחים שונים על השפעת תוספת חנקן על נשימת הקרקע ומרבית העבודות נעשו ביערות ולכן קיים קושי השוואתי לעבודות ממערכות חקלאיות. עם זאת, שתי עבודות מחקר שביצעו ניתוח בעזרת מטא-אנליזה שבחנה את השפעותיהם של גורמים שונים על נשימת הקרקע ופליטת CO<sub>2</sub>, נמצא כי במערכות של גידולים חקלאיים תוספת חנקן הגבירה את פליטות CO<sub>2</sub> ואת נשימת הקרקע בכ-16.1% (Lu et al., 2011) ו-4.2% (Zhou et al., 2014). עבודות אלו דיווחו כי, תוספת החנקן לקרקע הגבירה את נשימת הקרקע כתוצאה מעלייה בביומסה של השורשים והגברת הזמינות של הפחמן בקרקע. אנו מעריכים כי הפליטות הגבוהות במחקרנו של CO<sub>2</sub> בעונת ההשקייה 2019 לעומת עונת 2018 ו-2019 התרחשו בעקבות הגברת זמינותו של הפחמן וגדילה בביומסה של השורשים. אך עם זאת, מכיוון שבמחקרנו לא קיים מידע אודות הביומסה ונפחם של שורשי עצי האבוקדו, הנחה זו הינה הנחה כללית בלבד. בניגוד לפליטות N<sub>2</sub>O במהלך החורף, פליטות CO<sub>2</sub> היו גבוהות (איור 20). אנו מניחים כי הסבר אפשרי לכך טמון באירועי גשם שהגבירו את נשימת הקרקע, בעיקר על ידי הגברת הנשימה המיקרוביאלית שחלה בעקבות עלייה בפעילות אוכלוסיות מיקרוביאליות. באופן כללי, לא ניתן לקבוע בצורה חד משמעית כיצד נשימת קרקע מגיבה לאירועי גשם. ניתן להניח כי הרטבה חוזרת ונשנית מגבירה פעילות מיקרוביאלית על בסיס מחקרים בהם הוספו מים לקרקע יבשה בחלקות מצומצמות בשדה (Borken et al., 1999; Liu et al., 2002) או בתנאי מעבדה (Halverson et al., 2000; Kieft et al., 1987; Orchard and Cook, 1983; Birch, 1958; 1959). עם זאת, קיימים פערים בתנאי הניסוי במחקרים אלו לבין התנאים החלים בשדה בדומה למחקרנו ולכן, הם אינם משקפים את הפליטות של CO<sub>2</sub> בתנאי שדה. לאחרונה מחקרים הראו שנשימת קרקע התגברה במערכות שונות מיד לאחר אירוע גשם (Xu and Baldocchi, 2004; Emmerich, 2003; reichstein et al., 2002; Flanagan et al., 2002). למרות זאת, לא נעשו מספיק עבודות וקיימת מגבלה בהבנת המנגנונים המובילים לפליטות CO<sub>2</sub> כתוצאה מאירועי גשם במטעים.

תשובה לשאלה האם מטע האבוקדו היווה מקור או מבלע (קרי, פוטוסינתזה) לגזי חממה בכלל ולגזי CO<sub>2</sub> בפרט במהלך תקופת המחקר אינה תמיד חד משמעית. על פי הספרות, ידוע שבמהלך השנה

שטף נטו של  $\text{CO}_2$  משתנה ועשוי לשמש כמקור או כמבלע כתלות בגורמים רבים. על בסיס העבודה של Schaffer and Whiley (2003) ניתן להניח ששטף הקיבוע הממוצע של פחמן במטע במשך 6 שעות ביום לאורך כל השנה הינו 3-23 מילימול למ"ר לשנייה (Schaffer and Whiley, 2003). על בסיס הנחה זו כמות הפחמן שקובעה במטע (בהנחה ש 70% מפני השטח מקבע פחמן) הינה בין 6 ל- 40 טון לדונם לשנה. על פי מדידות הגזים שלנו שטף הפחמן ב  $\text{CO}_2$  שנפלט מהקרקע נע סביב 600 ק"ג לדונם לשנה (ע"פ 55 עצים לדונם). הוספה לערכים אלו של ערכי פוטנציאל החימום הגלובאלי של  $\text{N}_2\text{O}$  (משוואה 4) מראה כי תרומתו של  $\text{N}_2\text{O}$  לפוטנציאל החימום הגלובאלי מהמטע (טבלה 9) הינו זניח בהשוואה לשטף ה-  $\text{CO}_2$ . ערכי הפליטה הכללים נמוכים בסדר גודל מערכי קיבוע הפחמן, ומעידים על כך שהמטע מהווה מבלע ולא מקור ל  $\text{CO}_2$ . מסקנה זו תואמת את תוצאות מחקרים נוספים באקלים ים תיכוני בהם נמצא (באמצעות מדידות בשיטת Eddy Covariance) שמטעי זיתים (Testi et al., 2008; Nardino et al., 2013), פרדסי הדורים (Maestre-Valero et al., 2017) ומטעי תפוחים (Zanotelli et al., 2015) היוו מבלע נטו לשטפי  $\text{CO}_2$  במהלך עונת ההשקיה. חשוב לציין שבחלק ממחקרים אלו נמצא שבמהלך מספר חודשים בחורף המטע היווה מקור ולא מבלע של  $\text{CO}_2$  (Maestre-Valero et al., 2015; Zanotelli et al., 2017). בנוסף, מחקרים אלו דיווחו כי בשעות המוארות בין זריחה לשקיעה המטעים מהווים מבלע נטו ל-  $\text{CO}_2$  כאשר מקסימום קיבוע  $\text{CO}_2$  מתרחש בין השעות 12:00-13:00 כאשר קצב הפוטוסינתזה הינו מקסימלי. בניגוד לכך, בשעות הלילה, כאשר לא מתבצעת פוטוסינתזה אך מתרחשת נשימת קרקע המטע מהווה מקור לפליטת  $\text{CO}_2$ . מכיוון שבמחקרנו אין מידע אודות הקיבוע של  $\text{CO}_2$  בפוטוסינתזה, או מידע לגבי הפליטה מהשטח שלא הושקה, אנו מציעים שמחקר המשך יתמקד בקיבוע הפחמן במטע, במקביל למדידות של שטף  $\text{CO}_2$  מעל נוף העצים שכוללות את העצים והקרקע (כפי שנעשה בשיטת Eddy Covariance), כך שניתן יהיה לכייל את הפליטות של  $\text{CO}_2$  מהקרקע מול המדידות של פליטות  $\text{CO}_2$  מן התאים הסטטיים. מחקר מסוג זה חייב גם להעריך את תרומת פירוק העלים על פני השטח של המטע, לשטף ה-  $\text{CO}_2$  הנמדד מאחר ושטפים אלו מקורם בקיבוע פחמן. אנו מאמינים שבאופן זה ניתן יהיה לקבוע באופן חד משמעי האם המטע מהווה מקור או מבלע ל-  $\text{CO}_2$ .



**איור 20.** שטף מצטבר ממוצע של CO<sub>2</sub> (ק"ג לעץ כפחמן) שנפלט במהלך שלוש עונות ההדשיה (2018, 2019, 2020) ובשני החורפים ביניהן (winter) מחמשת הטיפולים השונים. אנא שים לב לערכים לשוני בין הערכים על הציר האנכי בין השנים והעונות.



**איור 21.** שטף מצטבר של גז החממה CO<sub>2</sub> במהלך כל תקופת המחקר על פי מדידות השדה.

**טבלה 9. ערכי פוטנציאל ההתחממות הגלובלית הנובע מפליטות גז ה- $N_2O$  עבור השנים השונות במחקר**

|                                               | TWW-Short | TWW-Long | Mix  | Fresh | Tuff |
|-----------------------------------------------|-----------|----------|------|-------|------|
| CO <sub>2</sub> -eq (kg dunam <sup>-1</sup> ) |           |          |      |       |      |
| 2018                                          | 4.7       | 6.4      | 5.8  | 3.0   | 18.7 |
| 2019                                          | 39.8      | 26.8     | 22.9 | 11.0  | 30.5 |
| 2020*                                         | 14.5      | 12.4     | 11.2 | 10.6  | 18.1 |

\* עונת הדישון בלבד.

## 6. סיכום ומסקנות

על בסיס המידע שנאסף בשדה בשלושת שנות המחקר ניתן לקבוע את הנקודות הבאות:

1. ניטריט עשויה להצטבר בקרקע לפרקי זמן קצרים בעת אירועי דישון, בייחוד בטיפול תעלות האוורור בו נוצרת הערמות של מים בשכבת המגע בין הטוף לחרסית. השפעתם של ריכוזי ניטריט גבוהים (<30 מג"ל; איור 8B) על עצי האבוקדו אינה ידועה, וייתכן והם מהווים גורם הפוגע ביבול.
2. יעילות הדישון במטע האבוקדו היתה נמוכה מאוד (>30%). ערכים אלו הינם לא הגיוניים מבחינה כלכלית עבור החקלאי ופוגעים באיכות מי התהום שהינה קניין ציבורי. בכלל טיפולי הקולחים ריכוזי הניטריט במים המחלחלים אל מי התהום גבוהים כמעט פי 5 מהערכים המותרים במי שתיה (קרי 70 מג"ל ניטריט; איור 9C). נראה כי מיהול מי הקולחים במים שפירים וכן השקיה במים שפירים משפרים את קליטת המים והחנקן ומצמצמים את הנזק הסביבתי מחלחול למי התהום.
3. נראה כי הדרך המיטבית לשמירת תעלת האוורור ושכבת המגע בינו לבין הקרקע בבסיסן מאווררת ומתחת לתנאי הרוויה למים הינה להשקות לפרקי זמן קצרים ובספיקות נמוכות מספר פעמים ביום. משטר השקיה כזה, בניגוד להשקיה אחת ביום, ימנע היווצרות של תנאי היפוקסיה בבסיס התעלה. באותו האופן, אירועי גשם בהם יורדים משקעים רבים, יוצרים תנאי היפוקסיה בבסיס תעלות האוורור. תנאים אלו עשויים לפגוע בשורשים המתפתחים בתעלות במהלך עונת ההשקיה. יש צורך במחקר המשך לבחון את הנושא.
4. אירועי הדשיה מובילים לעליה בפליטת גזי החממה מהמטע. סה"כ כמות החנקן שאובדת מהמטע כגז  $N_2O$  מהווה בין 0.1% ל- 2% מכמות החנקן המיושמת (איור 17A). השונות המרחבית הרבה בשדה הקשתה על מציאת קשרים ברורים בין פרמטרים פיזיקאליים בקרקע לבין שטף ה-  $N_2O$ . מומלץ לנסות ולבחון את הנושא בתנאים מבוקרים. על אף האמור לעיל, השקיה במים שפירים הפחיתה את פליטת ה-  $N_2O$  לעומת השקיה בקולחים. פחיתה זו כפי הנראה נבעה הן משיפור מבנה הקרקע בטיפול השפירים והן משימוש במים עם ריכוז חמצן מומס גבוהה יותר וריכוזי מלחים נמוכים יותר.
5. שטפי גזי החממה בחורף אינם זניחים, ומהווים 30% לערך מהפליטה העונתית של  $N_2O$  ו-50% ואף יותר משטף ה-  $CO_2$ . בחורף, הפליטה הגבוהה ביותר של  $N_2O$  נמדדה מטיפול תעלות האוורור (איור



15), וזאת עקב הסיבות שצוינו לעיל. העלאת תדירות ההדשיה מכל יום לכל שלושה ימים הפחיתה את פליטת ה- $N_2O$ , אולם לא באופן מובהק סטטיסטית.

## 7. ביבליוגרפיה

- Akinremi, O.O., McGinn, S.M., McLean, H.D.J., 1999. Effects of Soil Temperature and Moisture on Soil Respiration in Barley and Fallow Plots. *Canadian Journal of Soil Science* 79 (1): 5–13. <https://doi.org/10.4141/S98-023>.
- Assouline, S., Russo, D., Silber, A., & Or, D. 2015. Balancing water scarcity and quality for sustainable irrigated agriculture. *Water Resources Research*, 51(5), 3419-3436.
- Assouline, S., Narkis, K., 2013. Effects of long-term irrigation with treated wastewater on the root zone environment. *Vadose Zone J.* 12, 1–10. <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2012.0216>.
- Baram, S., Arnon, S., Ronen, Z., Kurtzman, D., Dahan, O., 2012. Pollutant transport through clayey vadose zone underlying dairy farm waste lagoons. *J. Environ. Qual.* 41, 1623–1632.
- Baram, S., Ronen, Z., Kurtzman, D., Külls, C., Dahan, O., 2013. Desiccation-crack-induced salinization in deep clay sediment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 1533–1545. doi:10.5194/hess-17-1533-2013.
- Baram, S., Dabach, S., Jerszurki, D., Stockert, C.M., Smart, D.R., 2018. Upscaling point measurements of  $N_2O$  emissions into the orchard scale under drip and microsprinkler irrigation. *Agric. Ecosyst. Environ.* 265, 103–111. doi:10.1016/j.agee.2018.05.022
- Birch, H.F., 1958. The Effect of Soil Drying on Humus Decomposition and Nitrogen Availability. *Plant and Soil* 10 (1): 9–31. <https://doi.org/10.1007/BF01343734>.
- Birch, H.F., 1959. Further Observations on Humus Decomposition and Nitrification. *Plant and Soil* 11 (3): 262–286. <https://doi.org/10.1007/BF01435157>.
- Borken, W., Xu, Y.J., Brumme, R., Lamersdorf, N., 1999. A Climate Change Scenario for Carbon Dioxide and Dissolved Organic Carbon Fluxes from a Temperate

- Forest Soil Drought and Rewetting Effects. *Soil Science Society of America Journal* 63 (6): 1848–1855. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6361848x>.
- Curtis, D., 1949. Nitrite Injury on Avocado and Citrus Seedlings in Nutrient Solution<sup>1</sup>. *Soil Science*, 68:441-450
- Elifantz, H., Kautzky, L., Mor-Yosef, M., Tarchitzky, J., Bar-Tal, A., Chen, Y., &Minz, D. (2011). Microbial activity and organic matter dynamics during four-years of irrigation with effluents. *Microb. Ecol.* 62:973-981.
- Emmerich, W. E., 2003. Carbon Dioxide Fluxes in a Semiarid Environment with High Carbonate Soils. *Agricultural and Forest Meteorology* 116 (1–2): 91–102. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00231-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00231-9).
- Fentabil, M., Craig, M., Nichol, F., Jones, M.D., Neilsen, G.H., Neilsen, D., Hannam, K.D., 2016. Effect of Drip Irrigation Frequency, Nitrogen Rate and Mulching on Nitrous Oxide Emissions in a Semi-Arid Climate: An Assessment across Two Years in an Apple Orchard. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 235 (November): 242–252. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.09.033>.
- Flanagan, L.B., Wever, L.A., Carlson, P.J., 2002. Seasonal and Interannual Variation in Carbon Dioxide Exchange and Carbon Balance in a Northern Temperate Grassland. *Global Change Biology* 8 (7): 599–615. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00491.x>.
- Frenk, S., Hadar, Y., & Minz, D. 2014. Resilience of soil bacterial community to irrigation with water of different qualities under Mediterranean climate. *Environ. Microbiol.* 16:559-569.
- Halverson, L.J., Jones, T.M., Firestone, M.K., 2000. Release of Intracellular Solutes by Four Soil Bacteria Exposed to Dilution Stress. *Soil Science Society of America Journal* 64 (5): 1630–1637. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6451630x>.
- Hanson, P.J., Edwards, N.T., Garten, C.T., Andrews, J.A., 2000. Separating Root and Soil Microbial Contributions to Soil Respiration: A Review of Methods and Observations. *Biogeochemistry* 48 (1): 115-146. <https://doi.org/10.1023/A:1006244819642>.
- Irshad, M., Honna, T., Yamamoto, S., Eneji, A.E., Yamasaki, N., 2005. Nitrogen Mineralization Under Saline Conditions. *Communications in Soil Science and*

- Plant Analysis 36 (11–12): 1681–1689. <https://doi.org/10.1081/CSS-200059116>.
- Kieft, T.L., soroker, E., firestone, M.K., 1987. Microbial Biomass Response to a Rapid Increase in Water Potential When Dry Soil Is Wetted. *Soil Biology and Biochemistry* 19 (2): 119–126. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90070-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90070-8).
- Klein C, Harvey M. Ministry for Primary Industries. Wellington, UK. 2013. Nitrous Oxide Chamber Methodology Guidelines; pp. 1–146.
- Kremen, A., Bear, J., Shavit, U., Shaviv, A., 2005. Model demonstrating the potential for coupled nitrification denitrification in soil aggregates. *Environ. Sci. Technol.* 39, 4180–4188.
- Kumar, U., Kumar, V., Singh, J.P., 2007. Effect of Different Factors on Hydrolysis and Nitrification of Urea in Soils. *Archives of Agronomy and Soil Science* 53 (2): 173–182. <https://doi.org/10.1080/03650340601138818>.
- Lado, M., Bar-Tal, A., Azenkot, A., Assouline, S., Ravina, I., Erner, Y., Fine, P., Dasberg, S., Ben-Hur, M., 2012. Changes in Chemical Properties of Semiarid Soils under Long-Term Secondary Treated Wastewater Irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76, 1358. doi:10.2136/sssaj2011.0230
- Liu, Xiaozhong, Shiqiang Wan, Bo Su, Dafeng Hui, and Yiqi Luo. 2002. Response of Soil CO<sub>2</sub> Efflux to Water Manipulation in a Tallgrass Prairie Ecosystem, *Plant and Soil* 240 (2) :213-223. <https://doi.org/10.1023/A:1015744126533>.
- Liu, Y., Li, S.Q., Yang, S.J., Hu, W., Chen. X.P., 2010. Diurnal and Seasonal Soil CO<sub>2</sub> Flux Patterns in Spring Maize Fields on the Loess Plateau, China. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Plant Soil Science* 60 (3): 245–55. <https://doi.org/10.1080/09064710902878121>.
- Lodhi, Asma, M Arshad, F Azam, and M H Sajjad. 2009. Changes in Mineral and Mineralizable N of Soil Incubated at Varying Salinity, Moisture and Temperature Regimes. *Pakistan Journal of Botany* 41(2): 967-980.
- Lu, M., Zhou, X., Luo, Y., Yang, Y., Fang, C., Chen, J., Li. B., 2011. Minor Stimulation of Soil Carbon Storage by Nitrogen Addition: A Meta-Analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 140 (1–2): 234–244. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.12.010>.

- Maestre-Valero, J.F., Testi, L., Jiménez-Bello, M.A., Castel, J.R., Intrigliolo, D.S., 2017. Evapotranspiration and Carbon Exchange in a Citrus Orchard Using Eddy Covariance. *Irrigation Science* 35 (5): 397–408. <https://doi.org/10.1007/s00271-017-0548-6>.
- Master, Y., Laughlin, R. J., Shavit, U., Stevens, R. J., Shaviv, A., 2003. Gaseous Nitrogen Emissions and Mineral Nitrogen Transformations as Affected by Reclaimed Effluent Application. *Journal of Environment Quality* 32 (4): 1204.
- Master, Y., Laughlin, R. J., Stevens, R. J., Shaviv, A., 2004. Nitrite Formation and Nitrous Oxide Emissions as Affected by Reclaimed Effluent Application. *Journal of Environment Quality* 33 (3): 852.
- Nardino, M., Pernice, F., Rossi, F., Georgiadis, T., Facini, O., Motisi, A., Drago, A., 2013. Annual and Monthly Carbon Balance in an Intensively Managed Mediterranean Olive Orchard. *Photosynthetica* 51 (1): 63–74. <https://doi.org/10.1007/s11099-012-0079-6>.
- Orchard, V.A., Cook, F.J., 1983. Relationship between Soil Respiration and Soil Moisture. *Soil Biology and Biochemistry* 15 (4): 447–453. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(83\)90010-X](https://doi.org/10.1016/0038-0717(83)90010-X).
- Oved, T., Shaviv, A., Goldrath, T., Mandelbaum, R., & Minz, D. 2001. Influence of effluent irrigation on community composition and function of ammonia-oxidizing bacteria in soil. *Appl. Environ. Microbiol.* 67: 3426-3433.
- Parkin TB, Venterea RT, Follet RF, editor. 2010. Chamber-Based Trace Gas Flux Measurements. In: Sampling Protocols. <http://www.ars.usda.gov/research/GRACEnet>. 2010. pp. 3–39.
- Parkin, T.B., Kaspar, T.C., 2003. Temperature Controls on Diurnal Carbon Dioxide Flux: Implications for Estimating Soil Carbon Loss. *Soil Science Society of America Journal* 67 (6): 1763-1772.
- Ramirez-Fuentes, E., Lucho-Constantino, C., Escamilla-Silva, E., Dendooven, L., 2002. Characteristics, and Carbon and Nitrogen Dynamics in Soil Irrigated with Wastewater for Different Lengths of Time. *Bioresource Technology* 85 (2): 179–187. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00035-4).
- Reichstein, M., Tenhunen, J.D., Roupsard, O., Ourcival, J.M., Rambal, S., miglietta, F., peressotti, A., pecchiari, M., tirone, G., valentini, R., 2002. Severe Drought

- Effects on Ecosystem CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O Fluxes at Three Mediterranean Evergreen Sites: Revision of Current Hypotheses? *Global Change Biology* 8 (10): 999–1017. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00530.x>.
- Riveros-Iregui, D.A., Emanuel, R.E., Muth, D.J., McGlynn, B.L., Epstein, H.E., Welsch, D.L., Pacific, V.J., Wraith, J. M., 2007. Diurnal Hysteresis between Soil CO<sub>2</sub> and Soil Temperature Is Controlled by Soil Water Content. *Geophysical Research Letters* 34 (17). <https://doi.org/10.1029/2007GL030938>.
- Russo, D., A. Laufer, R. H. Shapira and D. Kurtzman. 2013. Assessment of solute fluxes beneath an orchard irrigated with treated sewage water: A numerical study, *Water Resour. Res.*, 49, doi:10.1002/wrcr.20085.
- Russo, D., and D. Kurtzman. 2019. Using Desalinated Water for Irrigation: Its Effect on Field Scale Water Flow and Contaminant Transport under Cropped Conditions, *Water* 2019, 11, 687; doi:10.3390/w11040687.
- Russo, D., A. Laufer and A. Bar-Tal. 2020. Improving Water Uptake by Trees Planted on a Clayey Soil and Irrigated with Low-Quality Water by various Management Means: A Numerical Study. *Agric. Water Manag.* 229, doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105891.
- Saggar, S., Bolan, N.S., Bhandral, R., Hedley, C.B., Luo, J., 2004. A Review of Emissions of Methane, Ammonia, and Nitrous Oxide from Animal Excreta Deposition and Farm Effluent Application in Grazed Pastures. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 47 (4): 513–544. <https://doi.org/10.1080/00288233.2004.9513618>.
- Shang, H.L., Peng, Y.Z., Zhang, J.R., Ye, L., Zhao, K.F., 2009. Effects of salinity concentration on N<sub>2</sub>O production during nitrification. *Huanjing Kexue/Environmental Science* 30 (4): 1079-1083.
- Stüven, R., Vollmer, M., Bock, E., 1992. The Impact of Organic Matter on Nitric Oxide Formation by *Nitrosomonas Europaea*. *Archives of Microbiology* 158 (6). <https://dx.doi.org/10.1007/BF00276306>.
- Sher, Y., Baram, S., Dahan, O., Ronen, Z., Nejijat, A., 2012. Nitrogen transformations and abundance of nitrifiers and denitrifiers in a clay soil underlying a manure pond. *Fems Microbiol. Ecol.* 81, 145–155.

- Testi, L., Orgaz, F., Villalobos, F., 2008. Carbon Exchange and Water Use Efficiency of a Growing, Irrigated Olive Orchard. *Environmental and Experimental Botany* 63 (1–3): 168–177. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.11.006>.
- Thangarajan, R., Kunhikrishnan, A., Seshadri, B., Bolan, N.S., Naidu, R., 2012. Greenhouse Gas Emission from Wastewater Irrigated Soils. In , 225–236. Adelaide, Australia. <https://doi.org/10.2495/SI120191>.
- Xu, L., Baldocchi, D.D., 2004. Seasonal Variation in Carbon Dioxide Exchange over a Mediterranean Annual Grassland in California. *Agricultural and Forest Meteorology* 123 (1–2): 79–96. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.10.004>.
- Yalin, D, Schwartz, A., Assouline, S., Narkis, K., Eshel, A., Levin, A.G., Lowengart-Aycicegi, A., Tarchitzky, J., Shenker, M., 2017. Insights from ‘The Hidden Half’: The Impact of Root-Zone Oxygen and Redox Dynamics on the Response of Avocado to Long-Term Irrigation with Treated Wastewater in Clayey Soil. *Israel Journal of Plant Sciences*, March: 1–18. <https://doi.org/10.1080/07929978.2017.1288478>.
- Yu, Y., Zhao, C., Zheng, N., Jia, H., Yao, H., 2019. Interactive Effects of Soil Texture and Salinity on Nitrous Oxide Emissions Following Crop Residue Amendment. *Geoderma* 337 (March): 1146–1154. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.11.012>.
- Zanotelli, D., Montagnani, L., Manca, G., Scandellari, F., Tagliavini, M., 2015. Net Ecosystem Carbon Balance of an Apple Orchard. *European Journal of Agronomy* 63 (February): 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.12.002>.
- Zhang, W., Zhou, G., Li, Q., Liao, N., Guo, H., Min, W., Ma, L., Ye, J., Hou, Z., 2016. Saline Water Irrigation Stimulate N<sub>2</sub>O Emission from a Drip-Irrigated Cotton Field. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science* 66 (2): 141–152. <https://doi.org/10.1080/09064710.2015.1084038>.
- Zhou, L., Zhou, X., Zhang, B., Lu, M., Luo, Y., Liu, L., Li, B., 2014. Different Responses of Soil Respiration and Its Components to Nitrogen Addition among Biomes: A Meta-Analysis. *Global Change Biology* 20 (7): 2332–43. <https://doi.org/10.1111/gcb.12490>.

בר טל, א. ואחרים. 2015. ברור נזקי הקרקע כתוצאה מהשקיה ארוכת טווח בקולחים והשפעתם על גדולי מטע דו"ח סופי לתכנית מחקר מספר 301-0746-11 לקרן המדען הראשי של משרד החקלאות. זילברשטיין, מ., לוינגרט-אייצ'יי, ע., אסולין, ש., נאור, ע., קרן, ר., חן, י., מינץ, ד. 2009. לימוד ההשפעות ארוכות הטווח של ההשקיה בקולחים על עץ האבוקדו בקרקעות שונים. דוח שנתי לתכנית מחקר מספר 596-0383-08 מוגש לקרן המדען הראשי של משרד החקלאות.

טרצ'יצקי, ח., ואחרים. 2018. בחינת טיפולים למניעה ותיקון הנזק מהשקיה בקולחים במטעים בקרקעות כבדות. דו"ח סופי לתכנית מחקר מספר 21-16-004, שנה 3 מתוך 3, מוגש לקרן המדען הראשי של משרד החקלאות.

נאור, ע., אסולין, ש., טרצ'יצקי, ח., פרס, מ., גרינבלט, י. 2009. השפעת השקיה בקולחים על ביצועי אגס ודרכים להקטנת נזקים. דו"ח למחקר 556-0314-08 מוגש לקרן המדען הראשי של משרד החקלאות.

רשות המים, 2013. טיוב מי בארות על ידי הכרה כהפקת טיוב - סיכום נתוני שנת 2013.

# נספחים:

נספח 1: תוכנית הדישון אל מול עומסי היישום בפועל

| 2020                     |        | 2019         |        | 2018        |        | הטיפול    |
|--------------------------|--------|--------------|--------|-------------|--------|-----------|
| יישום בפועל**            | תוכנית | יישום בפועל* | תוכנית | יישום בפועל | תוכנית |           |
| -----ק"ג חנקן לדונם----- |        |              |        |             |        |           |
| 15                       | 26     | 71           | 25     | 32          | 30     | TWW-Short |
| 11                       | 26     | 27           | 25     | 32          | 30     | Fresh     |
| 12                       | 26     | 67           | 25     | 38          | 30     | TWW-Long  |
| 14                       | 26     | 78           | 25     | 31          | 30     | Mix       |
| 15                       | 26     | 77           | 25     | 72          | 30     | Tuff      |

\* על פי המידע ממחשב ההשקיה; \*\* נכון לסוף אוגוסט 2020.