

הוספת מי-חמצן למערכות טפטוף עילי וטמון להעלמת מחסורי חמצן בבית השורשים ושיפור יבולי מטעים

Injection of hydrogen peroxide to surface and subsurface drip irrigation for mitigating hypoxia in the rooting zone and improving yields of orchards

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות

ע"י

שמוליק פרידמן המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן 50250
גריגורי קומונר המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן 50250
אילן בן נח* המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן 50250

Shmulik Friedman, Inst. Soil, Water and Environmental Sciences, ARO, Bet Dagan 50250. E- mail:

vwsfied@agri.gov.il

Gregory Communar, Inst. Soil, Water and Environmental Sciences, ARO, Bet Dagan 50250. E- mail:

communar@agri.gov.il

Ilan Ben Noah, Inst. Soil, Water and Environmental Sciences, ARO, Bet Dagan 50250. E- mail:

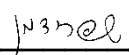
ilan.bennoah@mail.huji.ac.il

*סטודנט לתואר שני, האוניברסיטה העברית בירושלים

מאי 2013

סיוון תשע"ג

**הממצאים בדו"ח זה הינם תוצאות ניסויים.
הניסויים מהווים המלצות לחקלאים: לא**

חתימת החוקר 

תוכן עניינים

1.	תקציר.....	2
2.	תמצית הרקע המדעי.....	3
3.	מטרות המחקר.....	3
4.	שיטות ומהלך העבודה.....	3
4.1	ניסוי הגידול הראשון.....	4
4.2	ניסוי הגידול השני.....	4
5.	תוצאות ודיון.....	5
5.1	פירוק מי-חמצן בקרקע ללא צמחים.....	5
5.2	ניסוי הגידול הראשון.....	6
5.3	ניסוי הגידול השני.....	10
5.4	מודל לתיאור הפירוק של מי-החמצן לחמצן וצריכת החמצן בקרקע.....	13
6.	מסקנות.....	15
7.	רשימת ספרות.....	16
8.	סיכום עם שאלות מנחות.....	17

1. תקציר

1. הצגת הבעיה

מטעים רבים מכל הסוגים: הדורים, נשירים וסוב-טרופיים נטועים באדמות חרסיתיות, בעיקר באזורי העמקים בצפון המדינה. בדרך כלל, עבור אותם גידולים בתנאים אקלימיים דומים, מתקבלים יכולים גבוהים יותר בקרקעות חוליות (קלות) לעומת מטעים הנטועים באדמות חרסיתיות (כבדות). הבדלים אלו הן תוצאה של כמה גורמים, כשגורם אפשרי אחד הוא אוורור לקוי באדמות כבדות. במחקר המוצע נבחנת האפשרות של העלאת ריכוזי החמצן בקרקע והשפעות האפשרויות על הצמח של הוספת מי-חמצן בהשקיה בטפטוף עילי או טמון.

2. מטרת המחקר הייתה פיתוח של שיטה יעילה וכדאית כלכלית להוספת חמצן לקרקעות מטעים באמצעות הזרקת מי-חמצן בטפטוף עילי או טמון. המטרות הפרטניות היו: לימוד התהליכים המעורבים בהזרקת מי-חמצן לקרקע; בחינת יעילות הזרקת מי-חמצן לשיפור האוורור בקרקעות חרסיתיות; בחינת השפעת העלאת ריכוזי החמצן על יעילות השימוש במים, הצימוח הווגטיבי והניבה במטעים; פיתוח מודל תפעולי להערכת התגובה של הצמח ולעזרה בתכנון הזרקת מי-חמצן.

3. שיטות ומהלך העבודה

הפעילות בשתי שנות המחקר כללה ניסויי מעבדה במיכלים ללא צמחים, שני ניסויי חביות עוקבים עם צמחי פלפל בקרקע חרסיתית והתחלה של פיתוח מודל תפעולי לתיאור פיזור החמצן הקרקע. ניסויי הגידול בחביות כללו טיפולים של: 1. תופסת מי-חמצן בריכוז של 800 ח"מ בטפטוף עילי או טמון וטיפול בקורת ללא הוספת מי-חמצן; 2. תופסת מי-חמצן בריכוז של 600 ח"מ בטפטוף טמון וטיפול בקורת ללא הוספת מי-חמצן. נבחנו השפעות השקיה בתמיסות מי-חמצן בהשקיה עילית וטמונה על ריכוז החמצן בקרקע ועל הצימוח וההנבה של צמחי פלפל.

4. תוצאות עיקריות

השימוש במי-חמצן בריכוז של 600 עד 800 ח"מ נתגלה בד"כ כיעיל בהעלאת ריכוז החמצן באוויר הקרקע, בעיקר בהשקיה עילית, אולם לא נמצא יעיל בשיפור היבול, או בקצב הצימוח של צמחי פלפל. זאת, ככל הנראה כתוצאה מפעולה דואלית של שיפור זמינות החמצן ופגיעה כתוצאה מחימצון שורשים והשפעה פיזיולוגית הורמונאלית מזיקה.

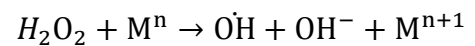
5. מסקנות והמלצות לגבי יישום התוצאות

הוספת מי-חמצן מעלה את ריכוז החמצן בקרקע בצורה יעילה יותר מאשר הזרקת אוויר בטפטוף טמון. כאשר ריכוז החמצן בקרקע גבוה, אין תועלת בהוספת מי-חמצן ואפילו ייתכן נזק כתוצאה מפגיעה בשורשים או השפעה על תהליכים פיזיולוגיים בצמח. לכן, בכדי ליישם טיפול זה יש צורך לכמת את השפעתו השלילית והחיובית ע"י בחינת השפעת ריכוזים שונים של מי-חמצן על שורשי צמחים במספר דרגות עקת חמצן. נמצא ששימוש במי-חמצן יעיל יותר באוורור הקרקע כאשר ניתן בהשקיה עילית מאשר בהשקיה טמונה, תוצאה המעידה על כך שפרוק מי-חמצן הינו איטי. גורם זה מאפשר שימוש במי-חמצן לאוורור קרקעות כבדות בהן תנועת המים הינה איטית וזמן ההגעה של המים מהמקור אל הריזוספירה גדול ללא תוספת של מערכת טפטוף טמון ייעודית. מכיוון שמי-החמצן בהשקיה עילית סייעו בהעלאת ריכוז החמצן, ניתן לבחון בהמשך האם השמת ריכוז מי-חמצן נמוך בהשקיה עילית ישפר את תנאי האוורור מבלי לפגוע בצמחים. בנוסף, ניתן לבחון האם השמת מי-החמצן בתקופה מסוימת של הגידול תגרום להשפעה חיובית יותר (או שלילית פחות) על היבול. עדיין מוקדם לגבש מסקנות סופיות לגבי התועלת הצפויה מהוספת מי-חמצן במטעים. נתון נוסף שצריך לקחת בחשבון הוא שהוספת מי-חמצן באופן קבוע בהשקיה הינה ככל הנראה יקרה מידי.

2. תמצית הרקע המדעי

פירוק מי-חמצן למים וחמצן מעלה את ריכוזי החמצן הן בתמיסת הקרקע והן באוויר הקרקע, אך לא מעבר למגבלות המסיסות של החמצן המשתחרר בפאזה המימית (מסיסות חמצן במים ב- 25°C היא כ-40 ח"מ, ובשיווי משקל עם אוויר אטמוספרי כ-8 ח"מ). ניתן להעריך את כמות החמצן שהוספה בניסויים של (Bhattarai et al., 2004) למשל: 12% בנפח אוויר שהוזרק בלחץ של כ-1.5 באר (אבסולוטי) למערכת הטפטוף הטמון משמעם ריכוז של כ-50 ח"מ חמצן במים. השקיה בקצב של 6 מ"מ/יום במים אלה מוסיפה לקרקע חמצן בקצב של 0.3 ג' ל-מ² ליום. ערך זה נמוך פי 50 לערך לעומת ערכים מדווחים של קצב נשימת קרקע עם צמחים: 15 ג' ל-מ² ליום (Hodgson and MacLeod, 1989). סיבה אפשרית לכך שתוספת קטנה זו של חמצן גורמת לעליה משמעותית של 20% עד 30% ביבולים היא המקום (והזמן) שבהם הועשרה הקרקע בחמצן: באזור הטפטפת הטמונה, היכן (ומתי) שמסופקים המים וחומרי ההזנה. מסביב לטפטפת נוצר אזור עם תנאים מיטביים לשורשי הצמחים: רטוב, עשיר בחמצן ובחומרי הזנה ושטוף ממלחים. מי-חמצן מתפרקים למים וחמצן כאשר ישנו קטליזאטור מתכתי (בד"כ תחמוצות ברזל או מנגן) בתהליך ספונטני: $2\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$. פרט להתפרקות זו עלולים להיווצר בקרקע תהליכי פירוק נוספים כגון:

- חמצון מרכיב קרקע מחזור: $S_{red} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow S_{ox} + \text{H}_2\text{O}$
- יצירת הידרוקסיד רדיקאל תוך חימצון מתכת (מחמצן חזק מאוד הגורם נזק לצמחים):



ישנה שונות גדולה בחלקה של כל ריאקציה בין קרקעות שונות. בקרקע חרסיתית דלה בחומר אורגני ועשירה בברזל נמצא קצב פירוק מי-חמצן איטי, יצירת הידרוקסיד רדיקאל נמוכה ויצירת חמצן גבוהה. כמו כן נמצא שקבוע קצב פירוק מי-החמצן (ריאקציה מסדר ראשון) מושפע בעיקר מריכוז הברזל והחומר האורגני בקרקע ומעט מערך ההגבה וריכוז הזרחן (Petigara et al., 2002). תנועת מי-החמצן בקרקע נעשית בעיקר על ידי הסעה עם מי ההשקיה אל שורשי הצמחים. בנוסף ישנה תנועה בדיפוסיה שכיוונה וגודלה תלויים בגרדיאנט ריכוז מי-החמצן. ריכוז זה תלוי במנגנוני ההתמודדות של הצמח עם מי-החמצן:

(א) יכולת בררנית של הצמח (ממברנה ומשאבות טרנס-ממברנליות) שיוצרת ריכוז גבוה של מי-חמצן בסביבת השורש ומקטינים את התנועה הדיפוסית אליו.

(ב) הפרשת אנזימים המפרקים את מי-החמצן, מקטינים את ריכוזו בסביבת השורש ומגדילים את התנועה הדיפוסית אליו. מנגנונים אלו גורמים לכך שריכוז החמצן בסביבת השורש יהיה גדול יותר, כך שבזרימה מסית של מים אל השורש תהיה העשרה גבוהה יותר בחמצן. מכיוון שמי-חמצן הינו הורמון צמחי המשפיע ומבקר מנגנונים פיזיולוגיים רבים בצמח הרי שהעלאת ריכוזו בצמח עלולה לגרום לתופעות לוואי מזיקות. שימוש במנגנון הראשון יגרום לעלייה גדולה יותר בריכוז מי-החמצן בשורשים מאשר המנגנון השני.

3. מטרת המחקר הייתה פיתוח של שיטה יעילה וכדאית כלכלית להוספת חמצן לקרקעות מטעים באמצעות הזרקת מי-חמצן בטפטוף עילי או טמון. המטרות הפרטניות הן:

- (1) לימוד התהליכים המעורבים בהזרקת מי-חמצן לקרקע.
- (2) בחינת יעילות הזרקת מי-החמצן לשיפור האוורור בקרקעות חרסיתיות.
- (3) בחינת השפעת העלאת ריכוזי החמצן על יעילות השימוש במים, הצימוח והוגטטיבי והניבה במטעים.
- (4) פיתוח מודל תפעולי להערכת התגובה של הצמח ולעזרה בתכנון הזרקת מי-החמצן.

4. שיטות ומהלך העבודה

הפעילות בשתי שנות המחקר כללה ניסויי מעבדה במיכלים ללא צמחים, שני ניסויי חביות עוקבים עם צמחי פלפל בקרקע חרסיתית והתחלה של פיתוח מודל תפעולי לתיאור פיזור החמצן הקרקע. ניסויי הגידול בחביות כללו טיפולים של: 1. תופסת מי-חמצן בריכוז של 800 ח"מ ושל בטפטוף עילי או טמון וטיפול בקורת ללא הוספת מי-חמצן; 2. תופסת מי-חמצן בריכוז של 600 ח"מ בטפטוף טמון וטיפול בקורת ללא

הוספת מי-חמצן. נבחנו השפעות השקיה בתמיסות מי-חמצן בהשקיה עילית וטמונה על ריכוז החמצן בקרקע ועל הצימוח וההנבה של צמחי פלפל.

4.1 ניסוי הגידול הראשון נערך בבית רשת בבית דגן בחביות (HDPE) שצורתן בקירוב גלילית (מעט מורחבות במרכז לקוטר מכסימאלי של 55 ס"מ ומוצרות בקצוות לקוטר מינימאלי של 45 ס"מ), גובהן 90 ס"מ ונפחן 200 ליטר. בחביות נארוזה קרקע ורטיסול (עם 55% חרסית) מקיבוץ שריד, עמק יזרעאל. נבחנו 4 טיפולים, לכל טיפול 4 חזרות (סה"כ 16 חביות), כאשר הטיפולים הם:

1. ביקורת טפטוף עילי ללא תוספת מי-חמצן

2. ביקורת טפטוף טמון ללא תוספת מי-חמצן

3. טפטוף עילי תמיסת מי-חמצן

4. טפטוף טמון בתוספת תמיסת מי-חמצן

ריכוז מי החמצן בתמיסת ההשקיה היה 800 ח"מ. ההשקיה ניתנה פעמים ביום: בבוקר (7:00) השקיה בתמיסת מי-חמצן ובצהריים (11:00) הדשיה (דשן שפר 1:2.5:5 בריכוז של 1.5%), ללא מי-חמצן. הדשן ניתן רק כאשר היה גידול בחביות. בכל חבית נשתל ב- 4.7.2010 צמח פלפל בודד בגיל 28 ימים (זן בנג'י, 14511, משתלת "שורשים", עין הבשור).

הטיפולים ניתנו תחת משטרי השקיה שונים על-פי מקדם שטיפה של 20% בכדי למנוע עקת מליחות, הבקרה על ההשקיה נעשתה ע"י ברזים חשמליים. בנוסף נאסף ונשקל הנקז מהחביות ונמדדה המוליכות החשמלית בנקז ובקרקע ע"י מחושי TDR לוודא שלא נוצרות עקת נוספות (יובש או מליחות). זאת מפני שעקת חמצן גורמת להגברה משמעותית של השפעת המליחות על צמחים. הטפטפות היו מסוג יונירעם 1 ל"ש של חברת "נטפים". בכל חבית נשתל צמח פלפל אחד, הפרמטרים הצמחיים שנמדדו הינם: קצב הצימוח של צמחי הפלפל והיבול, הפירות נקטפו כאשר האדימו ונשקלו מיד לאחר הקטיף (משקל טרי).

מדידת ריכוז החמצן בקרקע נעשתה כדלקמן: בשתיים מתוך ארבעת החביות נמדדו ריכוזי החמצן כל 30 שניות ע"י מחושי חמצן של חברת Apogee שהוטמנו בעומקים של 20 ו-40 ס"מ במרחק רדיאלי של 15 ס"מ ממרכז החבית ורישום של ממוצע הקריאות כל שעה עגולה בעזרת אוגר נתונים CR1000 של חברת Campbell. בחישים אלו ישנם גם תרמיסטורים המודדים את טמפרטורת אוויר הקרקע באותם מרווחי זמן. מדידות הטמפרטורה שימשו לצורך תיקון קריאות ריכוז החמצן לפי המלצות היצרן, וכן לבחינת השפעת הטמפרטורה על חמצן הקרקע.

בחביות בהן לא הותקנו מחושי חמצן, הוטמנו בקבוקוני פלסטיק מחוררים, בנפח- 100 מ"ל, במרחקים רדיאליים שונים (0 ו-15 ס"מ) ממרכז החבית ובעומקים שונים (20, 40 ו-60 ס"מ). מדידת תכולת הרטיבות נעשתה בעזרת מחושי TDR. המדידות בוצעו כל שעה.

מחושי ה-TDR הוטמנו באותם עומקים של מחושי החמצן

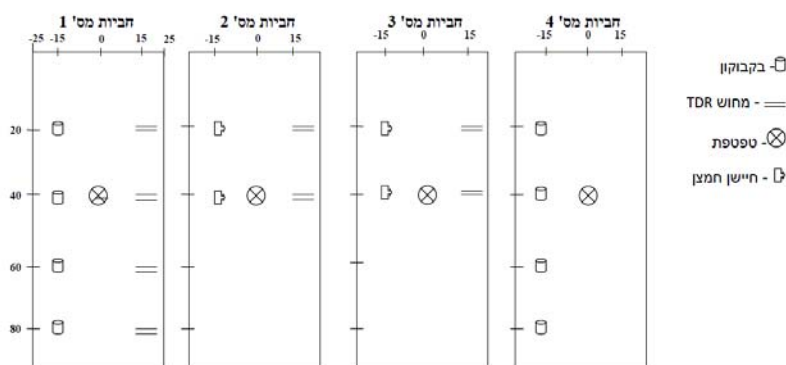
ובנוסף הייתה חבית אחת לכל טיפול בה לא היו מחושי חמצן, אולם הוטמנו בה מחושי TDR בעומקים: 20, 40, 60 ו-80 ס"מ. כל מחושי ה-TDR הוטמנו כשמרכזם במרחק רדיאלי של 10 ס"מ ממרכז החבית והם פנו כלפי מרכז החבית. אורך המחושים היה 15 ס"מ, כך שהמדידה מספקת ממוצע תכולת רטיבות בין מרכז החבית לדופן. קריאות ה-TDR נעשו

בעזרת מכשיר TDR1502B של חברת Tektronix תוך שימוש במרבבים (multiplexers) קואקסיאליים של חברת Dynamax.

הצבת אמצעי המדידה השונים מתוארת באיור 1.

4.2 ניסוי הגידול השני נערך בחביות ובקרקע של הניסוי הראשון וכלל רק שני טיפולים:

1. ביקורת: טפטוף טמון ללא מי חמצן



איור 1: הצבת הבקבוקונים, מחושי ה-TDR, חיישני החמצן והטפטפות בחביות הטיפולים. ערכי הציורים ניתנים ביחידות של ס"מ.

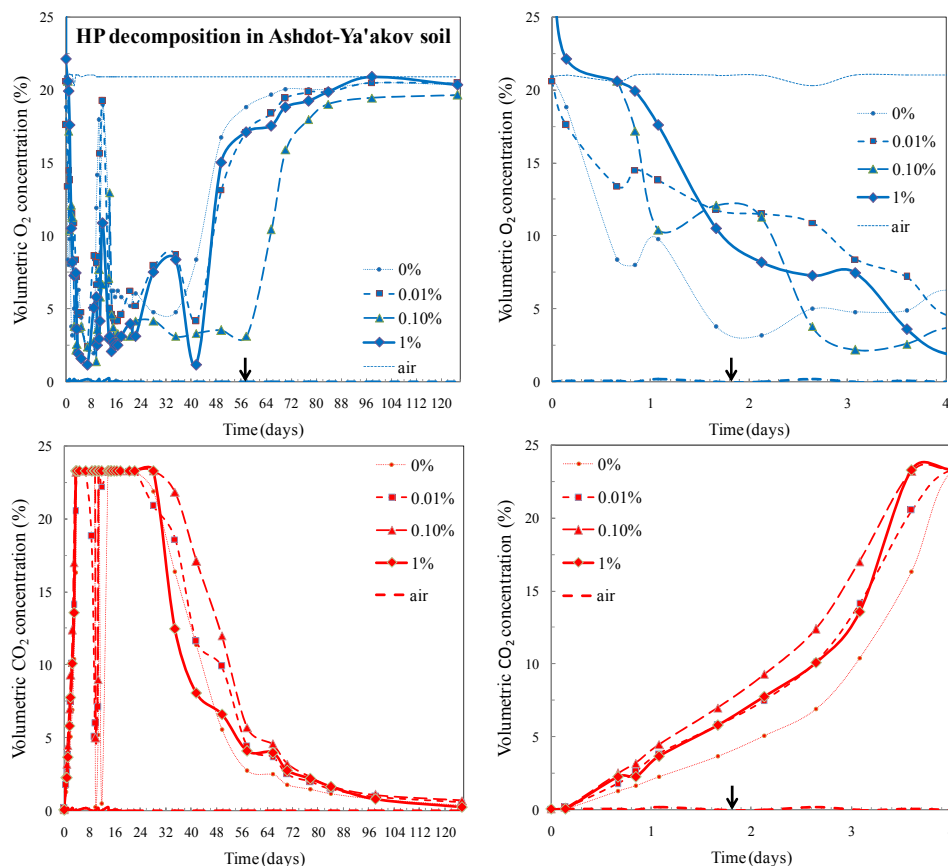
2. טפטוף טמון של תמיסת מי חמצן

ריכוז תמיסת ההשקיה היה 600 ח"מ מי חמצן. ההשקיה ניתנה פעמיים ביום, ב-5:00 הדשיה (דשן שפר 1:2.5:5), בריכוז של 0.15%, וב-7:00 תמיסת מי חמצן. בתחילת הניסוי ניתנה השקיה של 1.2 ליטר ליום לחבית ובסוף הניסוי 2.1 ליטר ליום לחבית. כלומר, כמות החמצן היומית שהוספה נעה בין 0.36 ל-0.63 גרם ליום לחבית (עם צמח בודד). הצבת החיישנים ומדידות ריכוז החמצן באוויר הקרקע, טמפרטורת אוויר הקרקע ותכולות הרטיבות נעשו כפי שמתואר לעיל בניסוי החביות הראשון (איור 1).

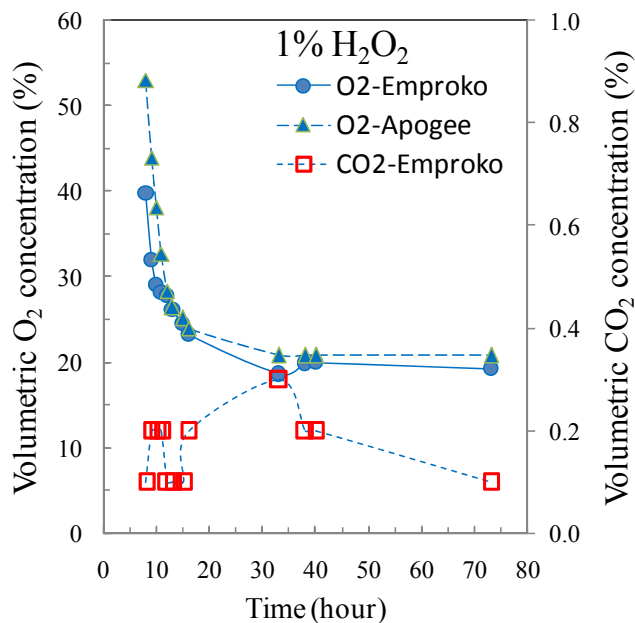
5. תוצאות ודיון

5.1 פירוק של מי-חמצן בקרקע ללא צמחים

באיור 2 נראים ריכוזי החמצן (למעלה) ודו-תחמוצת הפחמן (למטה) שנמדדו במשך ארבעה חודשים (משמאל) ובארבעת הימים הראשונים (מימין) לאחר אריזת דליים של 15 ליטר עם קרקע חרסיתית (57% חרסית, 26% סילט, 17% חול, 35% גיר, 1.8% ח"א) מקיבוץ אשדות יעקב איחוד, שבתחתיתם הוספה תמיסה בנפח של 1 ליטר ובריכוזים (משקליים) של 0, 0.01%, 0.1% ו-1% מי-חמצן. גובה הקרקע הארוזה היה 40 ס"מ והבקבוק המחורר ששימש למדידת ריכוזי הגזים היה בגובה של 25 ס"מ מתחתית הדליים (עומק של 15 ס"מ מתחת לפני הקרקע). הקרקע נדגמה בשדה ולאחר כמה שבועות של יבוש באוויר נארזה בדליים בתכולת רטיבות משקלית של 23.6%. בתחילת הניסוי הדליים הושקו ב-2 ליטר מים ובתאריכים המסומנים בחצים ניתנו השקיות נוספות של 1 ליטר כל אחת. תכולת הרטיבות המשקלית הממוצעת של הקרקע בדליים (שהיו בחדר בטמפרטורה של 25°C) בתם הניסוי הייתה 21.2%. ככלל, נראה שהוספת מי-חמצן גרמה לירידה מיידית בריכוזי החמצן ולעליה מיידית בריכוזי דו-תחמוצת הפחמן בקרקע. בימים הראשונים נראה שריכוזי שני הגזים היו גבוהים יותר בקרקעות שהוסף להן מי-חמצן לעומת טיפולי הביקורת (0% - הוספה של מים בלבד). ריכוז דו-תחמוצת הפחמן בשבועות הראשונים עלה על 23% (קצה הסקלה של מכשיר המדידה) וריכוז החמצן היה נמוך בהרבה מהריכוז האטמוספרי (21%). אחרי חודש התחילה ירידה של ריכוז ה- CO_2 ואחרי כחודש וחצי החלה עליה של ריכוזי ה- O_2 . מתוצאות אלו ניתן להסיק שהוספת מי-חמצן גרמה לפירוק מידי של החומר האורגני שבקרקע שצרך את רב החמצן שהשתחרר מהם, וששלב שני הייתה צריכת O_2 (ופליטת CO_2) מוגברת של האוכלוסיה המיקרוביאלית.



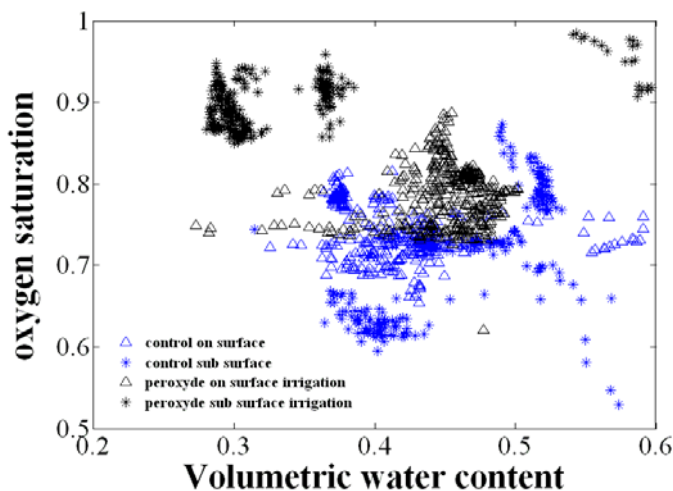
איור 2: ריכוזי החמצן (למעלה) ודו-תחמוצת הפחמן (למטה) שנמדדו במשך ארבעה חודשים (משמאל) ובארבעת הימים הראשונים (מימין) לאחר אריזת דליים של 15 ליטר עם קרקע חרסיתית מקיבוץ אשדות יעקב איחוד. שבתחתיתם הוספה תמיסה בנפח של 1 ליטר ובריכוזים (משקליים) של 0, 0.01%, 0.1% ו-1% מי-חמצן.



איור 3: ריכוזי החמצן (שנמדדו על ידי שני מחושים, סקלה שמאלית) ודו-תחמוצת הפחמן (סקלה ימנית) שנמדדו במשך ארבעה שלושה ימים לאחר אריזת דליים של 15 ליטר עם קרקע חרסיתית מקיבוץ אשדות יעקב איחוד, ששמשה קודם לכן לניסוי שתוצאותיו מתוארים באיור 1, שבתחתיתם הוספה תמיסה בנפח של 1 ליטר

באיור 3 רואים דוגמה של תוצאות של ניסוי זהה שנעשה באותה הקרקע, ששימשה לניסוי הקודם, לאחר כמה חודשים. הפעם נראה שבשעות הראשונות לאחר הוספת מי-החמצן ריכוזי החמצן בקרקע גבוהים בהרבה מהריכוז האטמוספרי ושריכוזי דו-תחמוצת הפחמן עלו לפרק זמן קצר לריכוז נמוך יחסית של רק 0.3% וירדו מיד לריכוז של 0.1% (שזהו סף המדידה של המכשיר שהשתמשנו בו). מתוצאות אלו ניתן להסיק שבשימוש חוזר של הוספת מי-חמצן, לקרקע עם ריכוז נמוך של חומר אורגני, לא מתרחש פירוק מסיבי נוסף של ח"א והחמצן שמקורו במי החמצן המוספים מעלה את ריכוזו בקרקע, אפילו כשהריכוז ההתחלתי גבוהה-אטמוספרי (21%), ולא כל שכן כשריכוז ההתחלתי נמוך. בתנאים של הניסוי הנוכחי אחרי כיממה השתחררה מרבית הכמות של החמצן שהוסף לקרקע כמי-חמצן. מתוצאות אלו ניתן להסיק שניתן להעלות את ריכוזי החמצן בקרקע על ידי הוספה מתמשכת של מי-חמצן, קבועה, או רק כשהריכוזים יורדים.

5.2 ניסוי הגידול הראשון



איור 4: תלות ריכוז החמצן (כחלק מהריכוז האטמוספרי) בתכולת הרטיבות בעומק 20 ס"מ בטיפולים השונים: מי חמצן (שחור) ביקורת (כחול) טפטוף עילי (Δ), טפטוף תמוך (*). המדידות נאספו בין ה-3 במאי ל-30 בנובמבר 2010.

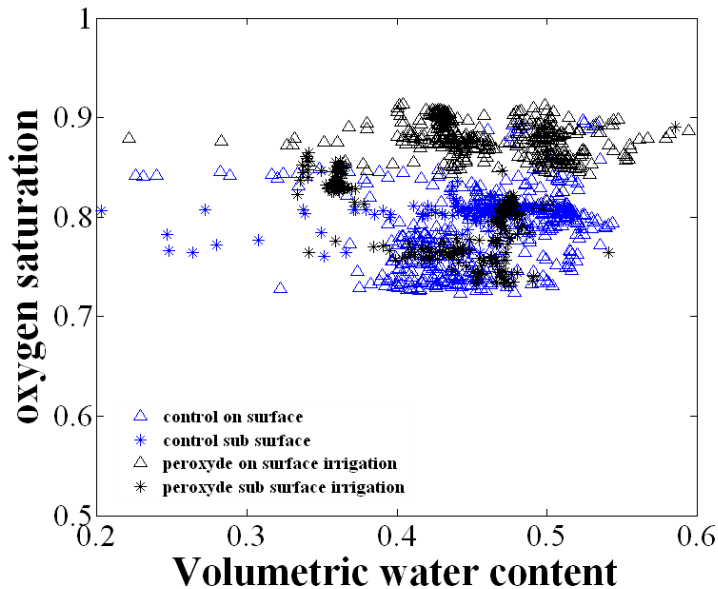
באיור 4 מוצגת תלות ריכוז החמצן בתכולת הרטיבות בעומק 20 ס"מ. ניתן לראות שעבור אותן תכולות רטיבות, ריכוז החמצן היה גבוה יותר בטיפולי מי-החמצן. עם זאת לא ניתן לראות קורלציה חיובית או שלילית בין ריכוז החמצן לתכולת הרטיבות בטיפול מי-חמצן בעומק 20 ס"מ, תוצאה היכולה להעיד על כך שתוספת מי-החמצן מבטלת את השפעתה השלילית של תכולת הרטיבות על ריכוז החמצן, אלא שגם בביקורת של טיפול זה לא נמצאה קורלציה טובה.

באיור 5 מוצגת תלות ריכוז החמצן בתכולת הרטיבות בעומק 40 ס"מ. ניתן לראות שכאשר ההשקיה עילית עבור תכולת רטיבות דומה, ריכוז החמצן בטיפול מי-החמצן הינו גבוה יותר. בהשקיה טמונה מגמה זו אינה ברורה. בדומה לעומק 20 ס"מ גם בעומק 40 ס"מ אין קורלציה בין תכולת הרטיבות לריכוז החמצן.

בשתי שיטות ההשקיה ישנה עדיפות לריכוז החמצן בטיפול מי-החמצן לעומת הביקורת פרט לעומק 40 ס"מ בהשקיה טמונה. מעניין שדווקא בטיפול זה בעומק זה הייתה צפויה ההשפעה החזקה ביותר לשיפור ריכוז החמצן כתוצאה מההשקיה במי-חמצן. יש לשים לב שמדידת ריכוז החמצן בעומק 40 ס"מ בטיפול הביקורת נעשתה בעזרת חיישן אחד בלבד, כך שיש להתייחס לתוצאה זו בחשדנות. בהשקיה עילית ממוצע ריכוז החמצן בעומק 40 ס"מ הינו גבוה מזה שב-20 ס"מ בטיפול הביקורת ובצורה בולטת יותר בטיפול מי-החמצן. תצפית זו הינה תוצאה של תכולת רטיבות גבוהה יותר בעומק 20 ס"מ בהשקיה עילית ונתיבי תנועת חמצן אטמוספרי עוקפים בדפנות החבית. ההבדל בין הטיפול לביקורת רומז שמי-החמצן מתפרקים לאט ובכך משפרים את ריכוז החמצן בעומק הקרקע. בנוסף ניתן לראות שבהשקיה טמונה ריכוז החמצן בטיפול הביקורת בעומק 20 ס"מ קטן מזה שבעומק 40 ס"מ, אולם במקרה זה תכולת הרטיבות בעומק 40

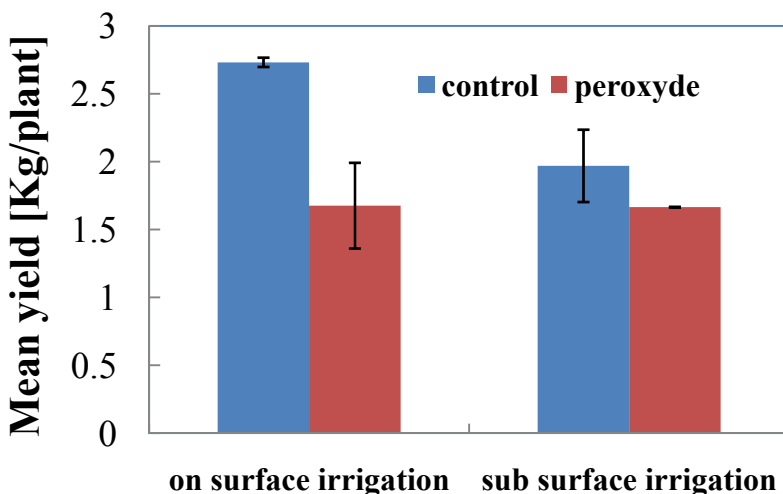
ס"מ גבוהה יותר. אין לנו הסבר מניח את הדעת לממצא זה, פרט להסבר שכבר צוין שמדידת ריכוז החמצן בביקורת הטמונה מתבססת על חיישן אחד בלבד.

מניתוח השונויות הבוחן את השפעת הוספת מי-חמצן על ריכוז החמצן בקרקע בכל הטיפולים (נתונים מוצגים בטבלה 1) ניתן לומר ברמת מובהקות גבוהה ($p = 0.007$) שהשקיה במי-חמצן גורמת לעלייה בריכוז החמצן בקרקע. לא ניתן לקבוע האם עליה זו הושפעה יותר משחרור חמצן ע"י פירוק מי-החמצן לחמצן ומים או מהקטנת המבלע ע"י פגיעה באוכלוסיה המיקרוביאלית. ככל הנראה ההשפעה הינה שילוב של שני הגורמים. לעומת זאת, אם נסתכל בכל שיטת השקיה בנפרד לא מתקבלת מובהקות באף אחת מהן, זאת מכיוון שאין מספיק חזרות בכל שיטת השקיה. כמו כן, ניתן לראות שאין הבדל בין טיפול מי-החמצן לביקורת בעומק 40 ס"מ בטפטוף טמון. איננו יודעים להסביר תופעה זו. בטבלה 2 מוצגות תוצאות ניתוח שונויות דו-גורמי, הבוחן את



איור 5: תלות ריכוז החמצן (כחלקו מהריכוז האטמוספרי) בתכולת הרטיבות בעומק 40 ס"מ בטיפולים השונים: מי חמצן (שחור) ביקורת (כחול) טפטוף עילי (Δ), טפטוף טמון (*). המדידות נאספו בין ה- 3 במאי ל- 30 בנובמבר 2010.

השפעת הטיפולים והעומק על ריכוז החמצן. גם כאן ניתן לראות שמי-החמצן מעלים את ריכוז החמצן בקרקע ברמת מובהקות גבוהה ($p = 0.01$) בכל הטיפולים וברמת מובהקות של 0.015 בהשקיה עילית. כמו כן ריכוז החמצן בעומק 40 ס"מ גבוה מזה שבועומק 20 ס"מ בהשקיה הנ"ל. שילוב תוצאות אלו רומז על כך שמי-החמצן אינם מתפרקים במהירות והשפעתם יחסית אחידה בקרקע, כאשר בנוסף להשפעת מי-החמצן ישנה תרומה אטמוספרית המשפיעה יותר בעומק 40 ס"מ כתוצאה מהבדלים בתכולת הרטיבות וכתוצאה מעוצמת המבלעים ונתיבים מועדפים בין עומק הקרקע לאטמוספירה: תכולת הרטיבות הגבוהה בעומק 20 ס"מ כתוצאה מקרבה למקור גורמת לאוויר לקוי בעומק זה. לעומת זאת אוורור עומק הקרקע מתבצע ע"י נתיבי אוויר רחבים שנוצרו כנראה בין דופן החבית לקרקע. מהשוואת היבולים שהתקבלו בטיפולים השונים (נתונים מוצגים באיור 6), ניתן לראות שטיפול הביקורת במערכת טפטוף עילית נתן ייבול גבוה מזה של טיפול מי החמצן במערכת השקיה דומה. תופעה זו ניתן להסביר ע"י ריכוז מי-החמצן הגבוה (800 ח"מ) שעלול היה לגרום לפגיעה בצמח ע"י יצירת רדיקאליים כגון $OH^{\cdot}$ ואחרים המחמצנים ופוגעים בממברנות התאים. כמו כן תיתכן פגיעה בבקרה הצמחית, שכן מי-החמצן משמשים כסינגל צמחי למספר מנגנוני התגוננות מעקה ומזיקים.



איור 6: השפעת שיטת ההשקיה ותוספת מי החמצן על היבול. הפירות נקטפו בין התאריכים 2010.12.21-2010.12.26, נשקלו מיד לאחר הקטיף. הערכים המופעים באיור הינם ממוצע כל הפירות שנקטפו בטיפול חלקי מספר הצמחים מהן הם נקטפו. הקווים מסמנים סטיית תקן.

צמחי הטיפול הראו סימני מחסור באור, בפרט מרחק גדול בין המפרקים, אולם תופעה זו ניתן להסביר גם ע"י הצללה מסוימת שנגרמה כתוצאה מעץ אקליפטוס שבשעות מסוימות הטיל צל על הטיפול הנ"ל. שיפור ריכוז החמצן לא הביא לשיפור ביבול. נתון זה מרמז על כך שריכוז החמצן אינו מהווה גורם מגביל בניסוי זה, או לחילופין שהנזק הנגרם כתוצאה משימוש במי-חמצן היה גדול מהתועלת שבהעשרת הקרקע בחמצן. גורם נוסף שיכול לגרום לנזק ביבול טיפולי מי-החמצן הינו מליחות כפי שעולה מטבלה 3. ניתן לראות שבטיפול מי-החמצן גם ריכוז הנתרן וגם ריכוז הכלוריד היו גבוהים יותר.

ייתכן שהוספת מי-חמצן יוצרת צורוני חמצן פעיל הפוגעים בממברנת השורשים, ובכך מאפשרים חדירת מלחים, אם כי לא מצאנו עדויות

לתופעה כזאת במחקרים קודמים. העלייה בריכוז

החנקן יכולה להיגרם ע"י פרוק חומר אורגני

קשה פירוק ע"י מי-החמצן כך שנוצרו יתר צורוני

חנקן זמינים לצמח.

על-פי איור 7, המתאר את השפעת תכולת

הרטיבות על ריכוז החמצן בטיפול הזרקת אוויר

(לא מפורטים בדו"ח הנוכחי), טיפולי מי-החמצן

ובביקורת, נראה שישנה השפעה חיובית של

תכולת הרטיבות על ריכוז החמצן בטיפול

הביקורת. אין לנו הסבר לתופעה זו. כאמור

תכולת הרטיבות גם מקטינה את הדיפוסיה וגם

מגדילה את המבלע ומנגד כמות החמצן המומס

במים הינה נמוכה מכדי לגרום לעליה בריכוז

החמצן באוויר הקרקע.

בנוסף ניתן לראות שהשפעת תכולת הרטיבות על

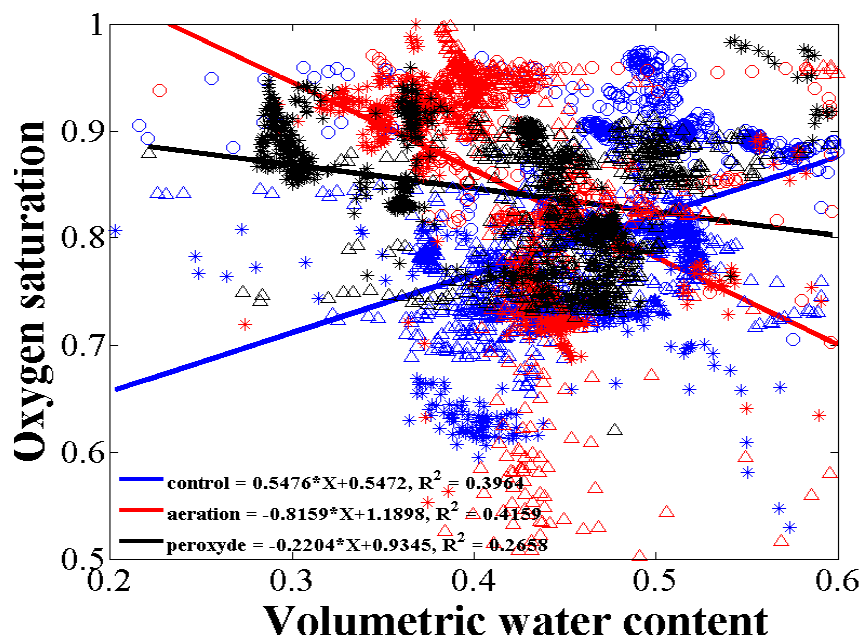
ריכוז החמצן בטיפול מי-החמצן שלילית פחות מזו

איור 7: השפעת תכולת הרטיבות על ריכוז החמצן באוויר הקרקע בטיפולים השונים: ביקורת (כחול), אוורור (אדום), מי חמצן (שחור), השקיה עילית (Δ), טמונה (*) , טמונה עם כדור (O), לא רלוונטי למי-חמצן). ריכוז החמצן ניתן כחלק מהריכוז האטמוספרי, תכולת הרטיבות הנפחית נמדדה על פי המקדם הדיאלקטרי של הקרקע, הערכים באיור הנ"ל (הן ריכוז החמצן וכן תכולת הרטיבות) הינם ממוצעים יומיים. המדידות נערכו ביו ה-3 במאי ל-30. בנובמבר 2010.

שבטיפול האוורור. זאת מכיוון שמצד אחד תמיסת מי-החמצן מכילה כמות גדולה בהרבה של חמצן מומס ושל מי-חמצן המתפרקים לחמצן

ולמים. בנוסף למי-החמצן ישנה השפעה אנטי-מיקרוביאלית המקטינה את מבלע החמצן, ומצד שני ככל שתכולת הרטיבות גדולה יותר, כך

יעילות האוורור קטנה כתוצאה מעלייה בכוח העילוי ותופעת אפקט הארובה.



השפעת מי החמצן על ריכוז החמצן בקרקע (ניתוח חד-גורמי):				
טיפול	מקור השונות	מספר פרטים	ממוצע	p
כל הטיפולים	ביקורת	7	0.75	0.0069
	מי-חמצן	8	0.84	
השקיה עילית עומק 20 ס"מ	ביקורת	2	0.74	0.0946
	מי-חמצן	2	0.78	
השקיה עילית עומק 40 ס"מ	ביקורת	2	0.78	0.0922
	מי-חמצן	2	0.88	
השקיה טמונה עומק 20 ס"מ	ביקורת	2	0.69	0.0796
	מי-חמצן	2	0.91	
השקיה טמונה עומק 40 ס"מ	ביקורת	1	0.81	0.9621
	מי-חמצן	2	0.81	

טבלה 1: ניתוח שונות הבוחן את השערת האפס שאין הבדל בין החיטשים בטיפולי מי החמצן למקבילים (אותו עומק) שלהם בטיפול הביקורת. העמודה p מציינת את ההסתברות שהשונות שנמדדה הינה אקראית, מסומן באדום הפרמטר שרמת המובהקות לכך שהשערת האפס איננה נכונה גדול מ- 95%. מסומן בכחול הפרמטר שהמובהקות לכך שהשערת האפס נכונה גבוה מ- 95%.

השפעת מי החמצן והעומק על ריכוז החמצן (ניתוח דו-גורמי):			
טיפול	מקור השונות	מספר פרטים	ממוצע
כל הטיפולים	ביקורת	7	0.75
	מי-חמצן	8	0.84
	20	8	0.78
	40	7	0.82
	מי-חמצן*עומק		0.211
השקיה עילית	ביקורת	4	0.76
	מי-חמצן	4	0.83
	20	4	0.76
	40	4	0.83
	מי-חמצן*עומק		0.249
השקיה טמונה	ביקורת	3	0.73
	מי-חמצן	4	0.86
	20	4	0.8
	40	3	0.81
	מי-חמצן*עומק		0.105
p			

טבלה 2: ניתוח שונות דו-גורמי הבוחן את השערת האפס שאין שונות בריכוז החמצן כתוצאה מהוספת מי חמצן או מהעומק בקרקע. העמודה p מציינת את ההסתברות שהשונות שנמדדה הינה אקראית, מסומנים באדום הפרמטרים שרמת המובהקות לכך שהשערת האפס איננה נכונה גדולה מ- 95%.

טיפול	Ca	Mg	Na	K	P	N	Cl	Fe	Zn	Mn	B
קלציום	מגנזיום	נתרן	אשלגן	זרחן	חנקן	כלור	ברזל	אבץ	מנגן	בורון	
%	%	%	%	%	%	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
עילי ללא מי-חמצן	4.2	0.85	0.096	5.37	0.274	3.45	0.74	262	110	228	102.1
טמון ללא מי-חמצן	3.1	0.73	0.101	5.47	0.317	3.32	0.63	236	79	173	86.2
מי-חמצן עילי	3.1	0.720	0.120	4.77	0.290	4.16	0.99	291.0	120.0	191.0	86.6
מי-חמצן טמון	3.5	0.860	0.111	5.67	0.375	4.00	0.87	247.0	85.4	245.0	75.4
השפעת תוספת מי חמצן בהשקיה על חומרי ההזנה בעלים: ניתוח חד-גורמי											
ביקורת	3.65	0.79	0.10	5.42	0.30	3.39	0.69	249.00	94.50	200.50	94.15
מי-חמצן	3.30	0.79	0.12	5.22	0.33	4.08	0.93	269.00	102.70	218.00	81.00
p	0.61	1.00	0.08	0.70	0.52	0.02	0.09	0.52	0.76	0.69	0.31

טבלה 3: למעלה השפעת הטיפולים על ריכוז הנוטריינטים בעלים, ולמטה ניתוח שונות הבדק את השערת האפס שהוספת מי-חמצן אינה משפיעה על ריכוז הנוטריינטים. p מסמן את ההסתברות לכך שהשונות בין הערכים הינה מקרית, בכחול מסומנים הערכים הגבוהים מ- 0.9 ובאדום מסומנים הערכים הנמוכים מ- 0.1. העלים נקטפו ב- 20/11/2010 מ- 4 צמחים שונים בכל טיפול, העלים שנבחרו הינם עלים באורך הנע בין 4 ל- 8 ס"מ.

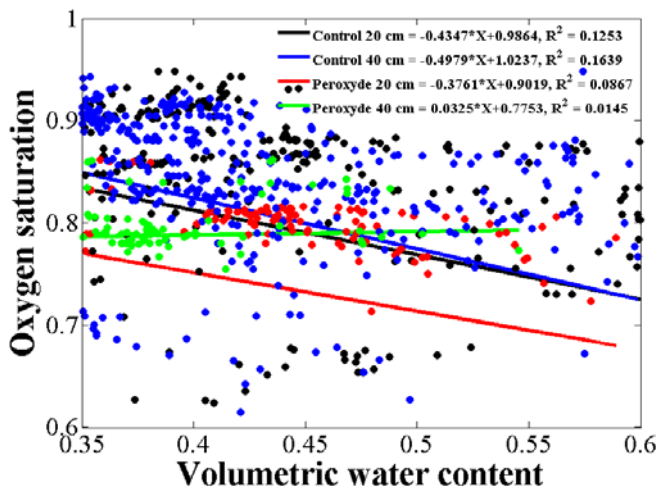
5.3 ניסוי הגידול השני

השפעת תכולת הרטיבות בעומקים 20 ו-40 ס"מ על ריכוז החמצן בעומק 30 ס"מ מוצגת באיור 8. ניתן לראות, שעבור תכולת רטיבות דומה, ריכוז החמצן בטיפול הביקורת הינו גבוה מזה שבטיפול מי החמצן. זאת בניגוד לציפיות (לאור תוצאות ניסוי הגידול הקודם) ואין לנו הסבר מניח את הדעת לתופעה זו. עם זאת, השפעת העלייה בתכולת הרטיבות בעומק 40 ס"מ על ריכוז החמצן בעומק 30 ס"מ בטיפול מי חמצן הינה חיובית, ואילו השפעת עלייה זו בתכולת הרטיבות בטיפול הביקורת הינה שלילית. היכולת של מי החמצן להעשיר את הקרקע בחמצן דווקא כאשר תכולת הרטיבות גדלה, הינה יתרון משמעותי לשיטה זו. בנוסף, ניתן לראות שעליה בתכולת הרטיבות בעומק 20 ס"מ גורמת לירידה בריכוז החמצן בעומק 30 ס"מ, הן בטיפול הביקורת והן במי החמצן. אולם, השפעה זו שלילית פחות בטיפול מי חמצן. מבחן שונות הבוחן את השפעת הוספת מי חמצן בהשקיה על ריכוז החמצן, מוצג בטבלה 4. מעבר לכך שאין מובהקות סטטיסטית אפשר לראות, כמו גם באיור 8, שממוצע ריכוז החמצן בטיפול הביקורת הינו גבוה מזה שבטיפול מי החמצן (גם כן, ללא מובהקות). עם זאת,

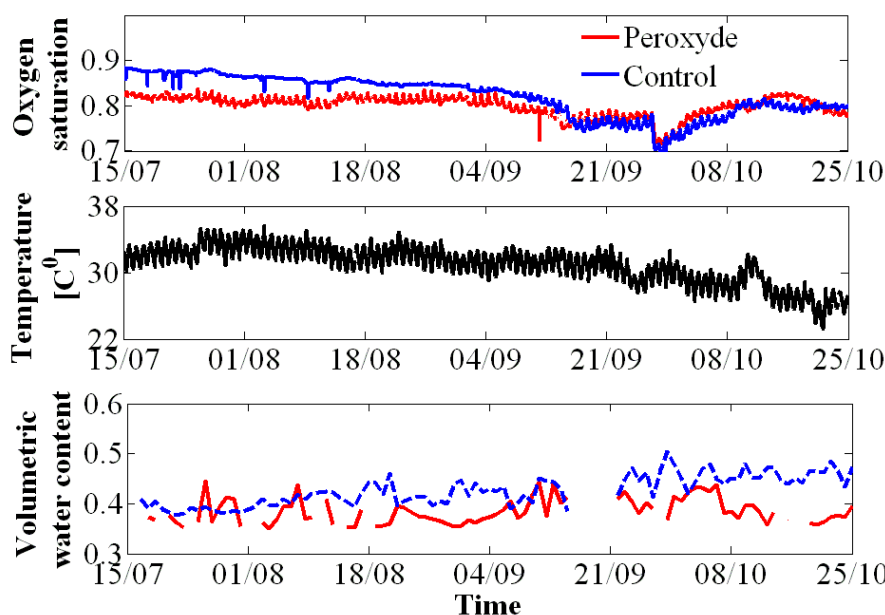
חשוב לציין, שעקב תקלת טפטפות נשארו רק 2 (מתוך 8) חזרות בטיפול מי החמצן.

בכדי לכמת את השפעת השונות בין החביות, נמדד ריכוז החמצן בכל חבית מטיפול מי החמצן שבוע לפני ושבוע אחרי שהופסקה הוספת תמיסת מי החמצן. התוצאות מרוכזות בטבלה 5. ניתן לראות, שלא נמצאה מובהקות סטטיסטית בין ריכוזי החמצן בחביות לפני ואחרי סיום הניסוי, אולי מכיוון שמספר החזרות הינו קטן מכדי להשיג מובהקות. מספר החזרות הנמוך הינו תוצאה עגומה של שילוב בין טפטפות לא מתפקדות וחיישנים מקולקלים. ב-14/9 וב-27/9 הוספו 4 ליטר מים לחביות בעזרת מזלף בכדי להקטין את השונות בין החביות שנגרמה כתוצאה מאריזה לא הדוקה מספיק של הקרקע. ניתן לראות באיור 9, המציג את השתנות ריכוז החמצן הממוצע, הטמפרטורה ותכולת הרטיבות

הממוצעת בעומק 30 ס"מ במהלך הניסוי, שהוספת המים גרמה לירידה חדה בריכוז החמצן, הן בטיפול הביקורת והן בטיפול מי החמצן. מכיוון שהמים שהוספו היו ללא מי חמצן, אין זה מפתיע שהטיפול הגיבו בצורה דומה להוספת המים. אם התנודות היומיות בריכוז החמצן נובעות מהגברת הנשימה של השורשים והאוכלוסיה המיקרוביאלית בקרקע, אזי מכך שהמהלך היומי של הטמפרטורה משפיע בצורה דומה על ריכוז החמצן בטיפולים השונים (גודל המשרעת הינו דומה), ניתן להסיק שאין פגיעה באוכלוסיה המיקרוביאלית ובשורשי הצמחים בקרקע.



איור 8: השפעת תכולת הרטיבות בעומקים 20 ו-40 ס"מ על ריכוז החמצן בעומק 30 ס"מ. בטיפולים: ביקורת 20 ס"מ (שחור), ביקורת 40 ס"מ (כחול), מי חמצן 20 ס"מ (אדום) ומי חמצן 40 ס"מ (ירוק). ערכי ריכוז החמצן ותכולות הרטיבות הינם ממוצעים יומיים.



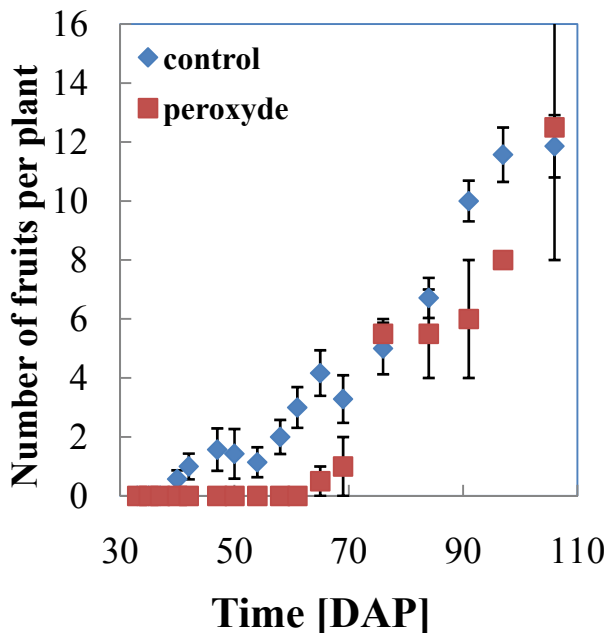
איור 9: השתנות ריכוז החמצן בעומק 30 ס"מ (למעלה), הטמפרטורה בעומק 30 ס"מ (אמצע) והממוצע בין תכולת הרטיבות בעומקים 20 ו-40 ס"מ (למטה) בהשקיה במי חמצן (אדום) וללא מי חמצן (כחול).

השתנות מספר הפרחים לצמח במהלך הניסוי מוצגת באיור 10. ניתן לראות שבצמחי מי החמצן החלה הפריחה כחודשיים לאחר צמחי הביקורת וכן ששיא הפריחה בצמחי הביקורת התרחש כשבועיים לפני שיא הפריחה בצמחי מי החמצן. כמות הפרחים בשיא הפריחה הייתה

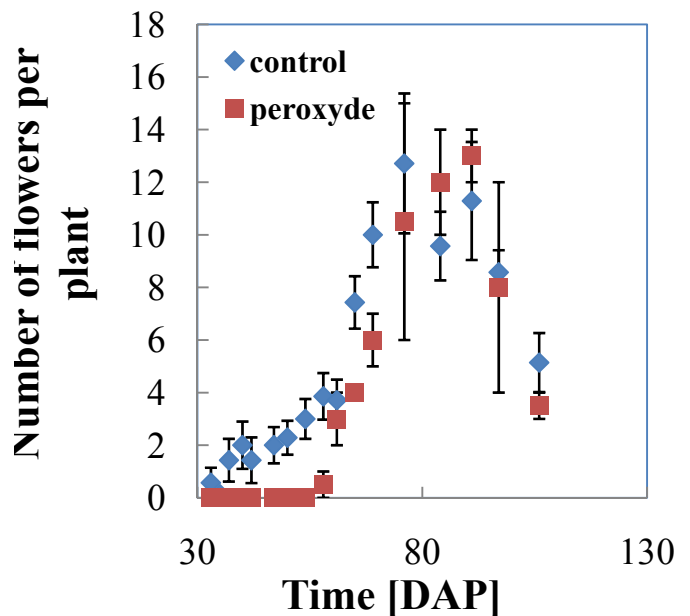
השפעת השקיה בתמיסת מי חמצן על ריכוז החמצן (ניתוח חד-גורמי):			
מקור השונות	מספר פרטים	ממוצע	p
ביקורת	7	0.84	0.405
מי חמצן	2	0.81	

טבלה 4: ניתוח שונות הבוחן את השערת האפס כי מי החמצן אינם משפיעים על ריכוז החמצן. ריכוז החמצן ניתן כחלקן מהריכוז האטמוספרי.

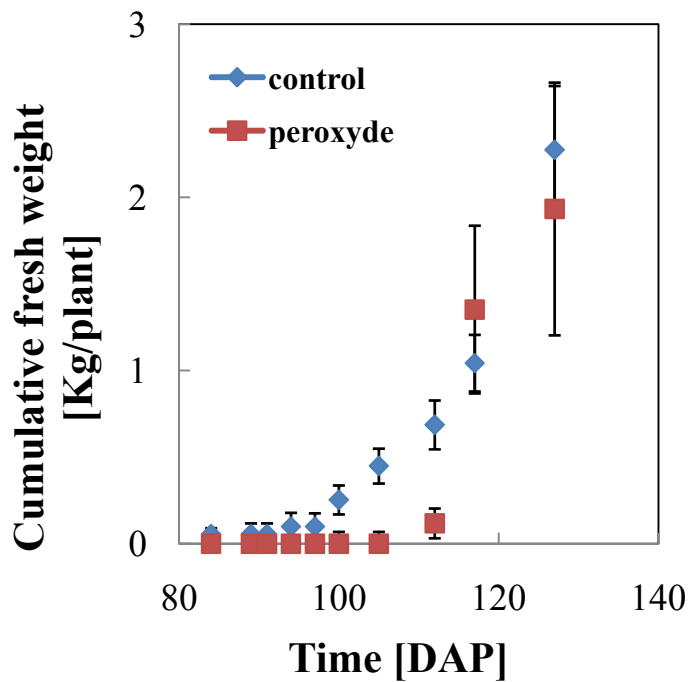
שווה בטיפולים השונים. מי חמצן הינו הורמון צמחי המשמש במספר רב של מנגנונים פיסיולוגיים בצמח וייתכן בהחלט שהשקיה בו תגרום לשינויים פיסיולוגיים כאלו. מאיור 11, המציג את השתנות מספר הפירות הצעירים לצמח בכל אחד מהטיפולים ניתן לראות שכתוצאה מהפריחה המוקדמת כך גם חנטה החלה קודם בצמחי הביקורת. בנוסף, ניתן לראות שבשבוע ה-11 מספר הפירות הצעירים בצמחי מי החמצן השתווה לזה שבביקורת על אף שמספר הפרחים היה קטן בשבועות שקדמו לו. תוצאה זו מעידה על חנטה משופרת בצמחי מי החמצן. אולם, לאחר מכן, מספר הפירות בטיפול הביקורת שוב עבר את טיפול מי החמצן. לאחר 15 שבועות (הנקודה האחרונה בגרף), נראה שישנו מספר דומה של פירות בטיפולים השונים. אולם, זה לאחר שכבר החל הקטיף בטיפולי הביקורת. ניתן לראות, מאיור 12 שקטיף הפירות בביקורת החל מוקדם יותר. עם זאת, מספר הפירות שנקטפו בטיפול מי החמצן הצליח להשיג את מספר פירות הביקורת ובסוף הניסוי שוב נפתח פער ביניהם. חשוב לציין שפלפל אינו צמח מסיים וסוף הניסוי נקבע משיקולים שאינם קשורים ביבול. לכן, מכיוון שישנו פיגור בטיפול מי החמצן, בהחלט ייתכן שסיום הניסוי במועדו פגע ביבול צמחי מי החמצן יותר מאשר בצמחי הביקורת. כמו כן, ניתן לייחס את הצניחה ביבול בסוף הניסוי לכך שצמחי טיפול מי החמצן הגיעו לתקרת בית הרשת, שהייתה נמוכה יותר מעליהם מאשר מעל צמחי הביקורת. גם באיור 13 ניתן לראות שהיבול בטיפולי הביקורת הקדים את היבול בטיפולי מי החמצן, אך לאחר שהצמחים המטופלים במי-חמצן החלו, הדביק יבול מי החמצן את יבול צמחי הביקורת.



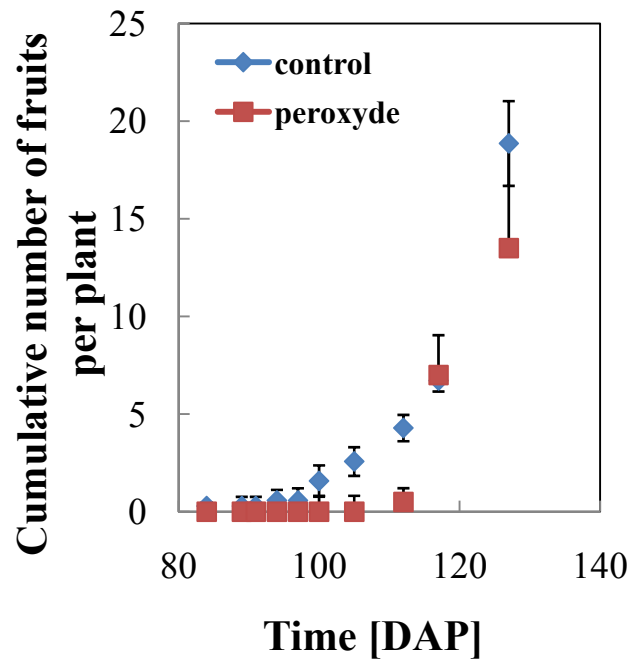
איור 11: השתנות מספר הפירות הממוצע לצמח בין הטיפולים השונים. הקווים מסמנים את שגיאת התקן.



איור 10: השתנות מספר הפרחים לצמח הממוצע בטיפולים השונים. הקווים מסמנים את שגיאת התקן.



איור 13: משקל יבול מצטבר במהלך הניסוי בטיפול מי החמצן (אדום) והביקורת (כחול). המשקל ניתן בק"ג טרי לצמח. הקווים מסמנים את שגיאת התקן.



איור 12: מספרם המצטבר של פירות שנקטפו במהלך הניסוי בטיפול מי החמצן (אדום) ובביקורת (כחול). הקווים מסמנים את שגיאת התקן.

מבחן שונות הבוחן האם ערכי היבול הסופיים אכן נבדלים בצורה מובהקת, מוצג בטבלה 5. מטבלה זו עולה, שלמרות מספר החזרות הנמוך בטיפול מי החמצן, ניתן לומר ברמת מובהקות של $p = 0.081$ שישנו הבדל במספר הפירות בין טיפול מי החמצן לבין הביקורת, כאשר בטיפול מי החמצן מספר הפירות הינו קטן יותר. עם זאת, אין הבדל מובהק במשקל הפרי הממוצע או ביבול הכולל. למרות שאין מובהקות

סטטיסטית ואי אפשר לומר זאת בוודאות, נראה

שההבדל במשקל הפרי הממוצע בין טיפול מי

החמצן (150 גרם) לביקורת (121 גרם) מייצג

תוצאה אמיתית, והסיבה לחוסר המובהקות הינה

מחסור בחזרות. בד"כ, כשמדובר בעקבות אחרות

(יובש או מליחות), משקל פרי נמוך מהווה

אינדיקטור טוב לרמת העקה. במקרה זה, ייתכן

שהשפעת מי החמצן על גודל הפרי הינה

הורמונאלית ואיננה קשורה כלל לשיפור תנאי

החמצן בקרקע. באיור 14 ניתן לראות שהשפעת

תכולת הרטיבות על ריכוז החמצן בטיפול מי

החמצן הינה חיובית, לעומת טיפול האוורור

(הזרקת של אוויר בלחץ דרך הטפטוף הטמון – לא

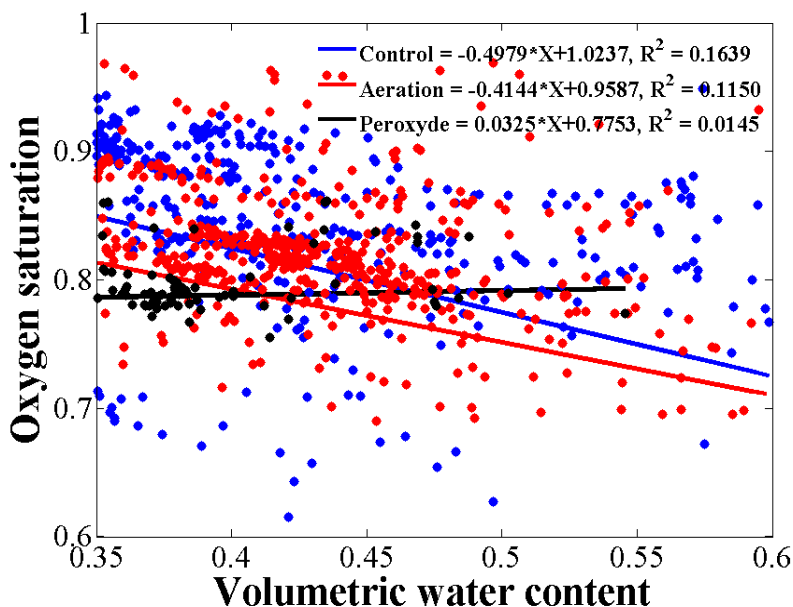
נידונה בדו"ח הנוכחי) והביקורת בהן ההשפעה

הינה שלילית. זאת, ככל הנראה, כתוצאה מאופיו

של טיפול זה, הן בכך שמי החמצן נעים עם המים

ושזמן העשרת הקרקע בחמצן נעשה בעת ההשקיה. אין לנו הסבר מדוע בניסוי הקודם, בו ניתן ריכוז מי חמצן גבוה יותר (איור 7), השפעת

תכולת הרטיבות על ריכוז החמצן הייתה שלילית.



איור 14: השפעת תכולת הרטיבות הממוצעת על ריכוז החמצן בעומק 30 ס"מ בטיפולים: ביקורת (כחול) אוורור עי הזרקת אוויר ומי חמצן (שחור). תכולת הרטיבות בעומק 30 ס"מ חושבה כממוצע בין תכולות הרטיבות בעומקים 20 ו-40 ס"מ.

השפעת טיפול מי החמצן על היבול (ניתוח חד-גורמי):			
מקור השונות	מספר פרטים	ממוצע (ק"ג טרי לצמח)	p
ביקורת	7	2.274	0.319
מי חמצן	2	1.933	
השפעת טיפול מי החמצן על מספר הפירות (ניתוח חד-גורמי):			
מקור השונות	מספר פרטים	ממוצע (פירות לצמח)	p
ביקורת	7	18.9	0.081
מי חמצן	2	13.5	
השפעת טיפול מי החמצן על משקל הפרי (ניתוח חד-גורמי):			
מקור השונות	מספר פרטים	ממוצע (פירות לצמח)	p
ביקורת	7	0.121	0.123
מי חמצן	2	0.15	

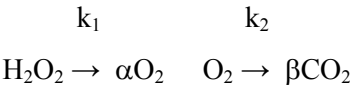
טבלה 19: שלושה ניתוחי שונות הבוחנים את השערות האפס: אין השפעה של טיפול מי החמצן על משקל היבול (למעלה), אין השפעה של טיפול מי החמצן על מספר הפירות שנקטפו (אמצע) ושאין השפעה של טיפול מי החמצן על משקל הפרי הממוצע(למטה).

בעוד שמטרת ניסוי הגידול השני הייתה להקטין את מספר הטיפולים ובכך להגדיל את מספר החזרות, נוצר מצב, עקב חוסר מזל, בו מספר החזרות קטן. משתי חזרות בלבד קשה מאוד למצוא מגמה אמיתית, וודאי כזו שתהייה גם מובהקת מבחינה סטטיסטית. בנוסף, הקטנת ריכוז מי החמצן במי ההשקיה (מ-800 ח"מ בניסוי הגידול הראשון ל-600 ח"מ בנוכחי) הקטינה ככל הנראה את השפעת מי החמצן על ריכוז החמצן בקרקע, אבל לא הגדילה את היבול. ייתכן שריכוז זה עדיין מזיק, שכן כזכור מי החמצן הינם הורמון צמחי, כך שבריכוזים נמוכים מאוד הוא עלול להשפיע על מערכות פיזיולוגיות של הצמח. עם זאת, לא נמצאה מובהקות סטטיסטית לפיה היבול בביקורת אכן גבוה מזה שבטיפול מי החמצן.

5.4 מודל לתיאור הפירוק של מי-החמצן לחמצן וצריכת החמצן בקרקע

לאור התוצאות הניסיוניות הראשוניות שהתקבלו בניסוי לא הייתה הצדקה לפתח מודל תפעולי לתכנון הזרקת מי-החמצן. דרוש ידע בסיסי נוסף לפני פיתוחו של מודל בעל אופי "הנדסי". התיאור הכמותי של התהליכים בהם מעורבים מי-החמצן והחמצן צריך לכלול את הרכיבים הבאים:

1. תגובת שרשרת בה מתפרקים מי-החמצן לחמצן והחמצן הופך לדו-תחמוצת הפחמן (נצרך על ידי השורשים והאוכלוסייה המיקרוביאלית) על-פי ריאקציה בלתי הפיכה מפסיאודו-סדר-ראשון:



עם קבוע פירוק, k_1 , המתאים לזמן מחצית חיים של שעות אחדות (0.1 h^{-1} , למשל, בתרשים 15) וקבוע נשימה (של הצמחים וה"קרקע") - k_2 קטן ממנו (0.05 h^{-1} , למשל, בתרשים 15) ומקדמים סטויכומטריים של היווצרות 0.5 O_2 ממולקולת H_2O_2 ($\alpha = 0.5$) ופחות ממולקולת CO_2 אחת ממולקולת O_2 (למשל $\beta = 0.75$ בתרשים 15).

משוואת הפירוק הסטויכיומטרי של מי-החמצן (ריכוז C_{HP}) לחמצן היא:

$$\frac{dC_{HP}}{dt} = -k_1 C_{HP} \tag{1}$$

קצב היווצרות דו-תחמוצת הפחמן (ריכוז C_{CO_2}), כלומר קצב הנשימה הוא:

$$\frac{dC_{CO_2}}{dt} = \beta k_2 C_{O_2} \quad [2]$$

ומשוואת שימור המסה של החמצן (ריכוז C_{O_2}) היא:

$$\frac{dC_{O_2}}{dt} = \alpha k_1 C_{HP} - k_2 C_{O_2} \quad [3]$$

הריכוזים התחיליים (בתחילת התהליך יש רק מי-חמצן, ריכוז יחסי של $C_{HP}^0 = 1$ בתרשים 15):

$$C_{HP}(0) = C_{HP}^0 \quad ; \quad C_{O_2}(0) = 0 \quad ; \quad C_{CO_2}(0) = 0 \quad [4]$$

והשתנות הריכוזים עם הזמן מתקבלת מתוך הפיתרון למשוואת [1] עד [4] הם:

$$C_{HP}(t) = C_{HP}^0 e^{-k_1 t} \quad [5]$$

$$C_{O_2}(t) = \alpha \frac{k_1 C_{HP}^0}{k_1 - k_2} (e^{-k_2 t} - e^{-k_1 t}) \quad [6]$$

$$C_{CO_2}(t) = \alpha \beta C_{HP}^0 \left[1 - \frac{k_1}{k_1 - k_2} e^{-k_2 t} + \frac{k_2}{k_1 - k_2} e^{-k_1 t} \right] \quad [7]$$

הריכוזים לעיל הנם ריכוזים של צורני החמצן ליחידת נפח קרקע. הנחה סבירה היא שמתקיים שיווי-משקל מיידי בכל זמן ומקום בין ריכוז החמצן באוויר הקרקע ($C_{O_2}^g$) וריכוז החמצן המומס בתמיסת הקרקע ($C_{O_2}^w$) על-פי "קבוע Henry" (H) עם ריכוז גבוה פי 30 לערך בפאזה הגזית) והיחסים בין תכולת הרטיבות הנפחית (θ) ותכולת האוויר הנפחית ($n - \theta$, n - נקבוביות הקרקע):

$$C_{O_2}^w(t) = H C_{O_2}^g(t) \quad ; \quad C_{O_2}(t) = \theta C_{O_2}^w(t) + (n - \theta) C_{O_2}^g(t)$$

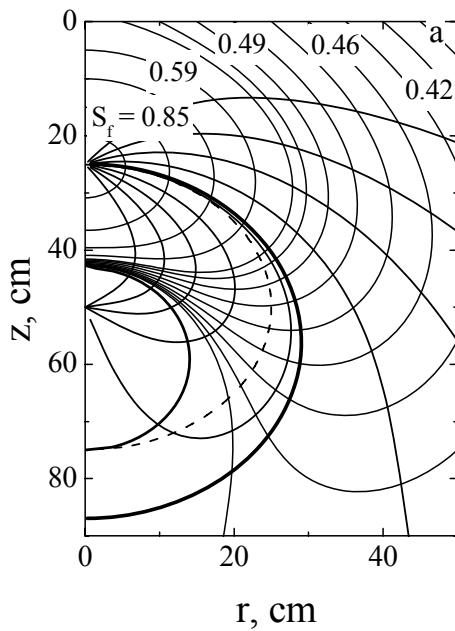
בתרשים 15 נראית דוגמה לקניטיקה של שלושת יצורי החמצן: בתחילת התהליך יש רק H_2O_2 , שאחרי זמן ארוך נעלמים מהקרקע. מאחר וקצב היווצרות ה- O_2 (פירוק ה- H_2O_2 , $k_1 = 0.1 \text{ h}^{-1}$) גבוה מקצב צריכת החמצן ($k_2 = 0.05 \text{ h}^{-1}$) הוא מצטבר בתחילת התהליך ונעלם מאוחר יותר. ה- CO_2 מצטבר בקצב איטי מתחילת התהליך ומגיע לערך סופי של 0.375 (על-פי המכפלות של המקדמים הסטויכיומטרים, $\alpha\beta = 0.375$ ומשוואה [7])

2. הסעה של מי-החמצן והחמצן בקרקע

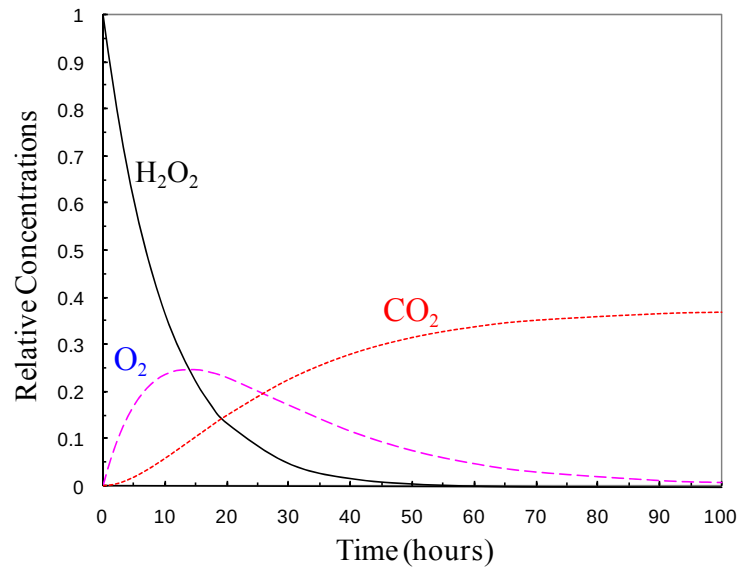
א. סביר להניח כי מנגנון התנועה היחידי של מי-החמצן הוא על ידי תנועת מסה של המים בקרקע (הזנחת התרומה של הדיפוסיה בפאזה הגזית מוצדקת מכיוון שבתנאים של תנועה משמעותית של החמצן בדיפוסיה הקרקע מאווררת ואין צורך בחימצון מאולץ. ברם, בשלב שני ניתן לבחון גם את השפעת ההסעה בדיפוסיה על ידי פתרון נומרי של בעיית הזרימה). כלומר, התהליך הכולל מתואר על ידי שינויים בזמן של ריכוזי מי-החמצן והחמצן המומס בתמיסת הקרקע ושל החמצן באוויר הקרקע על-פי התהליכים המתוארים לעיל, כשהנפח האלמנטרי של הקרקע המכיל את שתי הפאזות נע במרחב (ללא דיספרסיה) ממקור המים (הטפטפת) לחתך הקרקע במהירות זרימת המים.

ב. הפירוס המרחבי של מהירות זרימת המים מסביב לטפטפת יכול להתקבל מתוך פיתרון אנליטי לבעיה של זרימה וקליטה תמידית של מים על-פי מודל חילחול-קליטה מצומדים לחלחול מטפטפת (מקור נקודתי) עילית (Communar and Friedman, 2010a) או טמונה (Communar and Friedman, 2010b). בתרשים 16 מוצגת דוגמה לקווי הזרם ודרגות הרוויה (θ/n) מטפטפת של 1 ל/ש שטמונה בעומק של 25 ס"מ ומרכז מערכת שורשים בעומק של 50 ס"מ בקרקע עם מרקם בינוני. נראים שני סוגים של קווי זרם: כאלו שנקלטים על ידי שורשי הצמח (אלו הנעים לעבר מרכז המבלע בעומק של 50 ס"מ) וכאלו שמחלחלים לעומק הקרקע.

ג. מיקומו של נפח הקרקע האלמנטרי עם הריכוזים של צורוני החמצן ($C_{HP}(t)$, $C_{O_2}^g(t)$, $C_{O_2}^w(t)$) בזמן נתון (t) שחלף מאז שעזב את הטפטפת (בזמן $t=0$) יקבע על-פי אינטגרציה בזמן של מהירות תנועתו בשיטה של particle tracking. כך יתקבל הפירוס המרחבי התמידי של הריכוזים של שלושת צורוני החמצן בחתך הקרקע.



איור 16: תיאור סכמתי של דרגות הרוויה במים (כתובים כמה ערכים מחושבים) מטפטפת של 1 ל/ש שטמונה בעומק של 25 ס"מ ומרכז מערכת שורשים בעומק של 50 ס"מ בקרקע עם מרקם בינוני.



איור 15: תיאור סכמתי של ריכוזי מי-החמצן, החמצן ודו-תחמוצת המתקבלים בתגובות שרשרת של פירוק מי-חמצו ונשימה.

6. מסקנות

הוספת מי-חמצן מעלה את ריכוז החמצן בקרקע בצורה יעילה יותר מאשר הזרקת אוויר בטפטוף טמון (שלא נידונה בדו"ח הנוכחי, בן נח, 2012, פרידמן וחבריו, 2010). סיבה אפשרית לכך הינה שמי-החמצן מעלים את ריכוז החמצן גם כאשר ריכוז החמצן איננו נמוך. בעוד שאוורור הקרקע באוויר אטמוספרי מוגבל להעלאת ריכוז החמצן עד לערכו האטמוספרי, מי החמצן יכולים להעלות את ריכוז החמצן עד לרוויה (תיאורטית). בנוסף לכך נראה שהיכולת של מי החמצן להעשיר את הקרקע בחמצן דווקא כאשר תכולת הרטיבות גדלה, הינה יתרון משמעותי לשיטה זו.

כאשר ריכוז החמצן בקרקע גבוה, אין תועלת בהוספת מי-חמצן ואפילו ייתכן נזק כתוצאה מפגיעה בשורשים או השפעה על תהליכים פיזיולוגיים בצמח. לכן בכדי ליישם טיפול של הוספת מי-חמצן יש צורך לכמת את השפעתו השלילית והחיובית ע"י ניסויים נוספים בהן תיבחן השפעת ריכוזים שונים של מי-חמצן על שורשי צמחים במספר דרגות עקת חמצן. הקטנת ריכוז מי החמצן במי ההשקיה (מ-800 ח"מ בניסוי הראשון ל-600 ח"מ בניסוי השני) הקטינה ככל הנראה את השפעת מי החמצן על ריכוז החמצן בקרקע, אבל לא הגדילה את היבול. ייתכן שריכוז זה עדיין מזיק, שכן, כזכור מי החמצן הינם הורמון צמחי, כך שבריכוזים נמוכים מאוד הוא עלול להשפיע על מערכות פיזיולוגיות של הצמח. עם זאת, לא נמצאה מובהקות סטטיסטית לפיה היבול בביקורת אכן גבוה מזה שבטיפול מי החמצן. נראה שההבדל במשקל הפרי הממוצע בין טיפול מי החמצן (150 גרם) לביקורת (121 גרם) מייצג תוצאה אמיתית למרות שלא היה מובהק סטטיסטית. הוספת 800 ח"מ מי-חמצן בהשקיה של 2 ליטר ליום, למשל, מוסיפה כ-0.8 $\frac{gr_{O_2}}{day}$. אם תצרוכת החמצן של הקרקע שווה ל-

16.6 $\frac{gr(O_2)}{m^3(soil) \cdot day}$ (Sierra and Renault, 1995), כמות החמצן המוספת ע"י מי החמצן בהשקיה מספקת את צריכת החמצן היומית של

48 ליטר קרקע. אם נניח ששורשי הפלפל היו פרוסים ב-40 ס"מ העליונים של החביות (קוטר 50 ס"מ), נקבל שנפח הקרקע הרלוונטי לאוורור הינו כ-80 ליטר. משמע מי-החמצן יכולים לספק עד 60% מצריכת החמצן.

מתוצאות הניסויים עולה ששימוש במי-חמצן הינו יותר באזור הקרקע, כאשר ניתן בטפטוף עילי מאשר בטפטוף טמון. תוצאה זו מעידה על כך שפרוק מי-החמצן הינו איטי. גורם זה מאפשר שימוש במי-חמצן לאזור קרקעות כבדות, בהן תנועת המים הינה איטית וזמן ההגעה של המים מהמקור אל הריזוספרה גדול, ללא תוספת של מערכת טפטוף טמון ייעודית. לעומת זאת, בקרקעות חוליות שימוש במי-חמצן עלול להיות לא יעיל כתוצאה מחלחול מהיר. אולם, בקרקעות אלו, ממילא אין צורך באזור.

סקר על מצב האזור במטעים ברחבי הארץ הראה שבמרבית המטעים במרבית הזמן הקרקע מאווררת, כלומר ריכוזי החמצן בקרקע קרובים לריכוז האטמוספרי (Friedman and Naftaliev, 2012). בחלק קטן מהמטעים יש מחסור בחמצן ברב השנה ובחלק גדול יותר יש מחסור בחלק קטן מהזמן – בעונת ההשקיה או בעונת הגשמים. השיטה של הוספת מי-חמצן בטפטוף עלי מתאימה למצבים אלו מכיוון שניתן ללא ציוד יעודי יקר להוסיף, כשנדרש, מי-חמצן באמצעות מיכל דישון נוסף (מכיוון שרצוי להפריד את זמני הדישון והוספת מי-החמצן למניעת תגובות לא רצויות ושקיעות במערכת ההשקיה). צריך לזכור שהוספת מי-חמצן בהשקיה הינה יקרה, כך שרק הוספה בפרקי זמן קצובים יכולה להיות כדאית.

7. רשימת ספרות

- אילן בן נח. אזור קרקעות חרסיתיות באמצעות הזרקת אוויר בטפטוף טמון או הוספת מי-חמצן בהשקיה. עבודת גמר, הוגשה לפקולטה לחקלאות לשם קבלת תואר "מוסמך למדעי החקלאות", מזון ואיכות סביבה על שם רוברט ה. סמית של האוניברסיטה העברית בירושלים, ספטמבר, 2012.
- פרידמן ש, קומונר ג, נפתלייב, ב. בן נח א., 2010. הגדלת יכולי מטעים בקרקעות כבדות על ידי שיטה חדשה להוספת חמצן באמצעות מיכלי אוורור טמונים, דו"ח סופי לתכנית מחקר מספר 306-0359, מוגש לקרן המדען הראשי של משרד החקלאות.
- Bhattarai, S.P., Huber, S., and Midmore, D. J. (2004). Aerated subsurface irrigation water gives growth and yield benefits to zucchini, vegetable soybean and cotton in heavy clay soil. *Ann. Appl. Biol.* 144, 285-298.
- Communar, G., and S.P. Friedman. 2010a. Relative water uptake rate as a criterion for trickle irrigation system design: I. Coupled source-sink steady water flow model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74:1493-1508.
- Communar, G and S. P., Friedman. 2010b. Relative water uptake rate as a criterion- for trickle irrigation system design: III. Subsurface trickle irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74: 1518-1525.
- Friedman, S.P. and Naftaliev, B. 2012. A survey of the aeration status of drip-irrigated orchards. *Agricultural Water Management*, 115:132-147.
- Hodgson A.S., MacLeod D.D. 1989. Use of oxygen flux density to estimate critical air-filled porosity of a vertisol. *Soil Sci. Soc. Am., Proc.* 53:355-361.
- Petigara, B. R., Blough, N. V., and Mignerey, A. C. 2002. Mechanism of hydrogen peroxide decomposition in soils. *Environ. Sci. Technol.* 36, 639-645.
- Sierra J., Renault P. (1995) Oxygen consumption by soil microorganisms as affected by oxygen and carbon dioxide levels. *Applied Soil Ecology* 2:175-184.

8. סיכום עם שאלות מנחות

מטרות המחקר תוך התייחסות לתוכנית העבודה

מטרת המחקר הייתה פיתוח של שיטה יעילה וכדאית כלכלית להוספת חמצן לקרקעות מטעים באמצעות הזרקת מי-חמצן בטפטוף עילי או טמון והמטרות הפרטניות היו:

- 1) לימוד התהליכים המעורבים בהזרקת מי-חמצן לקרקע.
- 2) בחינת יעילות הזרקת מי-החמצן לשיפור האוויר בקרקעות חרסיות.
- 3) בחינת השפעת העלאת ריכוזי החמצן על יעילות השימוש במים, הצימוח והוגטיבי והניבה במטעים.
- 4) פיתוח מודל תפעולי להערכת התגובה של הצמח ולעזרה בתכנון הזרקת מי-החמצן.

עיקרי הניסויים והתוצאות

הפעילות בשתי שנות המחקר כללה ניסוי מעבדה במיכלים ללא צמחים, שני ניסויי חביות עוקבים עם צמחי פלפל בקרקע חרסיתית והתחלה של פיתוח מודל תפעולי לתיאור פיזור החמצן הקרקע. ניסויי הגידול בחביות כללו טיפולים של: 1. תופסת מי-חמצן בריכוז של 800 ח"מ בטפטוף עילי או טמון וטיפול בקורת ללא הוספת מי-חמצן; 2. תופסת מי-חמצן בריכוז של 600 ח"מ בטפטוף טמון וטיפול בקורת ללא הוספת מי-חמצן. נבחנו השפעות השקיה בתמיסות מי-חמצן בהשקיה עילית וטמונה על ריכוזי החמצן בקרקע ועל הצימוח וההנבה של צמחי פירוק מי-החמצן בקרקע מתרחש תוך שעות אחדות שבמהלכן מתקבלים ריכוזים גבוהים של חמצן. השימוש במי-חמצן בריכוז של 600 עד 800 ח"מ נתגלה כיעיל בהעלאת ריכוזי החמצן באוויר הקרקע, בעיקר בהשקיה עילית, אולם לא נמצא יעיל בשיפור היבול, או בקצב הצימוח של צמחי פלפל. זאת, ככל הנראה כתוצאה מפעולה דואלית של שיפור זמינות החמצן ופגיעה כתוצאה מחימצון שורשים והשפעה פיזיולוגית הורמונאלית מזיקה.

מסקנות מדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו. האם הושגו מטרות המחקר לתקופת הדוח?

הוספת מי-חמצן מעלה את ריכוזי החמצן בקרקע בצורה יעילה יותר מאשר הזרקת אוויר בטפטוף טמון. כאשר ריכוזי החמצן בקרקע גבוה, אין תועלת בהוספת מי-חמצן ואפילו ייתכן נזק כתוצאה מפגיעה בשורשים או השפעה על תהליכים פיזיולוגיים בצמח. בנוסף, הוספת מי-חמצן באופן קבוע בהשקיה הינה ככל הנראה יקרה מדי. מתוצאות הניסויים עולה ששימוש במי-חמצן יעיל יותר באוויר הקרקע כאשר ניתן בהשקיה עילית מאשר בהשקיה טמונה, תוצאה המעידה על כך שפרוק מי-חמצן הינו איטי. גורם זה מאפשר שימוש במי-חמצן לאוויר קרקעות כבדות בהן תנועת המים הינה איטית וזמן ההגעה של המים מהמקור אל הריזוספירה גדול ללא תוספת של מערכת טפטוף טמון ייעודית. לעומת זאת, בקרקעות חוליות שימוש במי-חמצן עלול להיות לא יעיל כתוצאה מחלחול מהיר, אולם בקרקעות אלו ממילא אין צורך באוויר. עדיין מוקדם לגבש מסקנות סופיות לגבי התועלת הצפויה מהוספת מי-חמצן במטעים. המטרות 1 עד 3 הושגו באופן חלקי בלבד, ולכן לא פיתחנו את המודל התפעולי.

בעיות שנותרו לפתרון ו/או שינויים (טכנולוגיים, שיווקיים ואחרים) שחלו במהלך העבודה; התייחסות המשך המחקר לגביהן, האם יושגו

מטרות המחקר בתקופה שנותרה לביצוע תוכנית המחקר?

בהתאם להמלצות הסוקרים והחלטת וועדת השיפוט בשתי שנות המחקר הראשונות (שאושרו) ביצענו רק ניסוי מעבדה וניסויים במיכלי גידול. ההמלצה הייתה שרק אם התוצאות של חלק זה של המחקר יצדיקו זאת, נשקול בשנה השלישית התחלה של ניסוי שדה שיהווה ניסוי מקדים לקראת פרויקט המשך עתידי. בניסויים שעשינו נמצא שמי-החמצן גרמו נזק לצמחי פלפל (השתמשנו בצמחי פלפל כדי לקבל תגובות מהירות יותר מאשר בעצים). לכן בכדי ליישם טיפול של הוספת מי-חמצן יש צורך לכמת את השפעתו השלילית והחיובית ע"י בחינת השפעת ריכוזים שונים של מי-חמצן על שורשי צמחים במספר דרגות עקת חמצן. מכיוון שמי-החמצן בהשקיה עילית סייעו בהעלאת ריכוזי החמצן, ניתן בהמשך לעבודה זו לבחון האם השמת ריכוזי מי-חמצן נמוך בהשקיה עילית ישפר את תנאי האוויר מבלי לפגוע בצמחים. בנוסף, ניתן לבחון האם השמת מי-החמצן בתקופה מסוימת של הגידול תגרום להשפעה חיובית יותר (או שלילית פחות) על היבול.

הפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח: פרסומים בכתב - ציטוט ביבליוגרפי כמקובל בפרסום מאמר מדעי;

עדיין לא פרסמנו בכתב ולא דווחנו בעל-פה על תוצאות המחקר

אילן בן נח הגיש בשנת 2012 את עבודת המסטר שלו לאוניברסיטה העברית שכוללת גם את הניסויים המדווחים כאן. **פטנטים** - יש לציין שם ומס' פטנט; **הרצאות וימי עיון** - יש לפרט מקום, תאריך, ציטוט ביבליוגרפי של התקציר כמקובל בפרסום מאמר מדעי.

פרסום הדוח: אני ממליץ לפרסם את הדוח: (סמן אחת מהאופציות)

רק בספריות

ללא הגבלה (בספריות ובאינטרנט)

חסוי - לא לפרסם

האם בכוונתך להגיש תוכנית המשך בתום תקופת המחקר הנוכחי? כן* - לא -

*יש לענות על שאלה זו רק בדוח שנה ראשונה במחקר שאושר לשנתיים, או בדוח שנה שניה במחקר שאושר לשלוש שנים.