

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
בוריס נפתלייב המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן 50250
גריגורי קומונר 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

Boris Naftaliev, Inst. Soil, Water and Environmental Sciences, ARO, Bet Dagan 50250. E- mail: vwboris@agri.gov.il

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

communar@agri.gov.il

פברואר 2012

שבט תשע"ב

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

חתימת החוקר

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 האפשריות על הצמח של הוספת מי-חמצן בהשקיה בטפטוף עילי או טמון.

2. מטרות המחקר לשנת המחקר הראשונה

(1) בחינת יעילות הזרקת מי-החמצן לשיפור האוורור בקרקע חרסיתית.

(2) בחינת השפעת העלאת ריכוזי החמצן על הצימוח הווגטטיבי והניבה של צמח בוחן: פלפל.

3. שיטות ומהלך העבודה

הפעילות בשנת המחקר הראשונה כללה ניסוי חביות עם צמחי פלפל בקרקע חרסיתית שכלל טיפולים של תופסת מי-חמצן בריכוז של 800 ח"מ בטפטוף עילי או טמון וטיפול בקורת ללא הוספת מי-חמצן. נבחנו השפעות השקיה בתמיסות מי-חמצן בהשקיה עילית וטמונה על ריכוז החמצן בקרקע ויכול צמחי פלפל בניסויי חביות.

4. תוצאות עיקריות

השימוש במי-חמצן בריכוז של 800 ח"מ נתגלה 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 הרמונאלית 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. בנוסף, הוספת מי-חמצן באופן קבוע בהשקיה הינה ככל הנראה יקרה מידי.

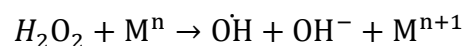
מניסוי זה עולה ששימוש במי-חמצן יעיל יותר באוורור הקרקע כאשר ניתן בהשקיה עילית מאשר בהשקיה טמונה, תוצאה המעידה על כך שפרוק מי-חמצן הינו איטי. גורם זה מאפשר שימוש במי-חמצן לאוורור קרקעות כבדות בהן תנועת המים הינה איטית וזמן ההגעה של המים מהמקור אל הריזוספירה גדול ללא תוספת של מערכת טפטוף טמון ייעודית. 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.

תמצית הרקע

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- m^2 ליום. ערך זה נמוך פי 50 לערך לעומת ערכים מדווחים של קצב נשימת קרקע עם צמחים: 15 ג' ל- m^2 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) שמשופקים 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.

שיטות ומהלך העבודה

הניסוי 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 נארזה 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).

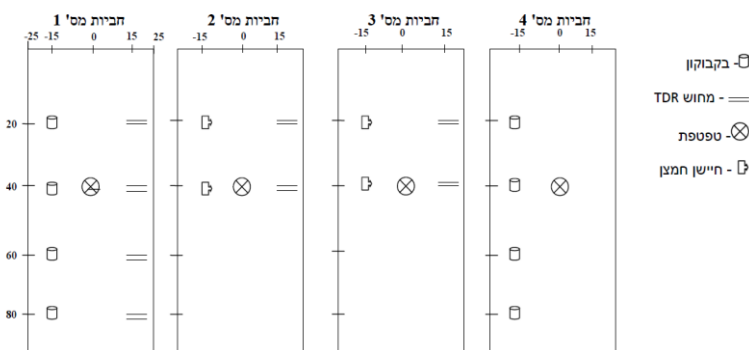
הטיפולים ניתנו תחת משטרי השקיה שונים על-פי מקדם שטיפה של 20% בכדי למנוע עקת מליחות, הבקרה על ההשקיה נעשתה ע"י ברזים חשמליים. בנוסף נאסף ונשקל הנקז מהחביות ונמדדה המוליכות החשמלית בנקז ובקרקע ע"י מחושי TDR לוודא שלא נוצרות עקות נוספות (יובש או מליחות). זאת מפני שעקת חמצן גורמת להגברה משמעותית של השפעת 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. בחישה 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.

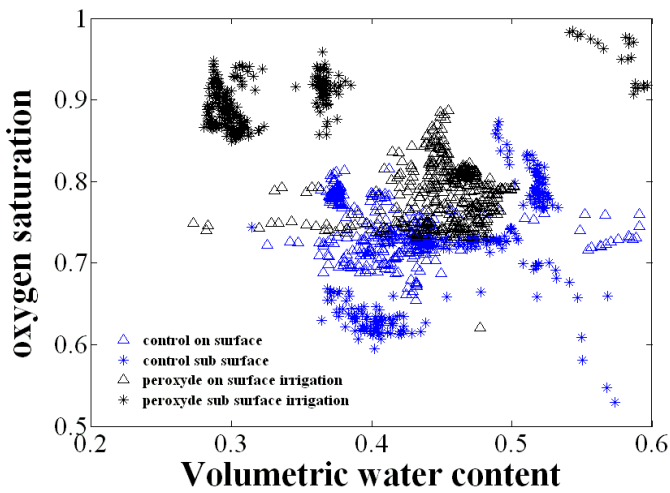
בחביות בהן לא הותקנו מחושי חמצן, הוטמנו בקבוקוני פלסטיק מחוררים, בנפח-100 מ"ל, במרחקים רדיאליים שונים (0 ו-15 ס"מ) ממרכז החבית ובעומקים שונים (20, 40 ו-60 ס"מ). מדידת תכולת הרטיבות נעשתה בעזרת מחושי TDR. המדידות בוצעו כל שעה. מחושי ה-TDR הוטמנו באותם עומקים של מחושי החמצן ובנוסף הייתה חבית אחת לכל טיפול 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 המחושם 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.

תוצאות ודין

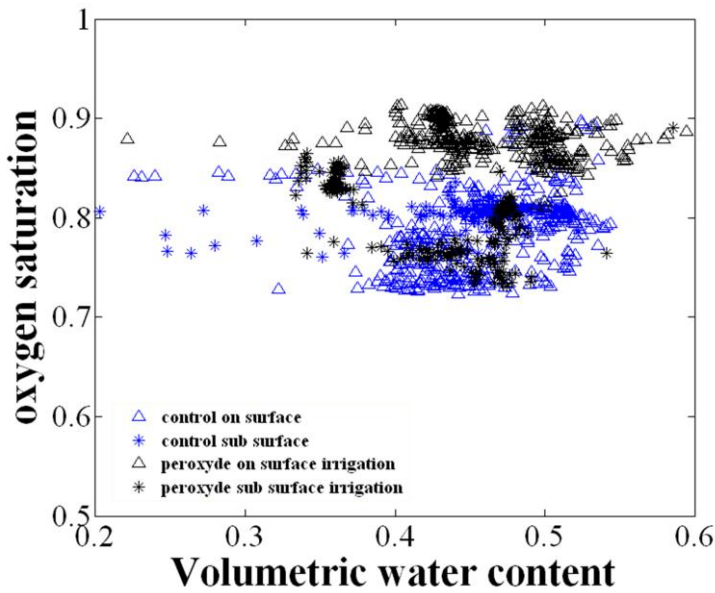
באיור 2 מוצגת תלות ריכוז החמצן בתכולת הרטיבות בעומק 20 ס"מ. ניתן לראות שעבור אותן תכולות רטיבות, ריכוז החמצן היה גבוה יותר בטיפולי מי-חמצן. עם זאת לא ניתן לראות קורלציה חיובית או שלילית בין ריכוז החמצן לתכולת הרטיבות בטיפולי מי-חמצן בעומק 20 ס"מ, תוצאה היכולה להעיד על כך שתוספת מי-חמצן מבטלת את השפעתה השלילית של תכולת הרטיבות על ריכוז החמצן, אלא שגם בביקורת של טיפול זה לא נמצאה קורלציה טובה.



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



איור 2: תלות ריכוז החמצן (כחלקו מהריכוז האטמוספרי) בתכולת הרטיבות בעומק 20 ס"מ בטיפולים השונים: מי חמצן (שחור) ביקורת (כחול) טפטוף עילי (Δ), טפטוף טמון (*). המדידות נאספו בין ה- 3 במאי ל- 30 בנובמבר 2010.



איור 3: 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.

גורמת לעלייה בריכוז החמצן בקרקע. לא ניתן לקבוע האם עלייה 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.

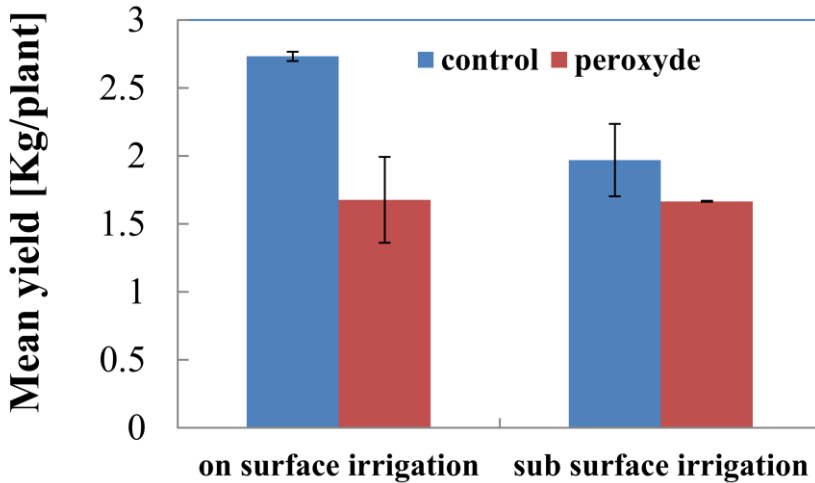
בטבלה 2 מוצגות תוצאות ניתוח שונות דו-גורמי, הבוחן את השפעת הטיפולים והעומק על ריכוז החמצן. גם כאן ניתן לראות שמי-החמצן מעלים את ריכוז החמצן בקרקע ברמת מובהקות גבוהה ($p = 0.01$) בכל הטיפולים וברמת מובהקות של 0.015 בהשקיה עילית. כמו כן ריכוז החמצן בעומק 40 ס"מ גבוה מזה שבעומק 20 ס"מ בהשקיה הנ"ל. שילוב 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 לאוורור לקוי בעומק זה. לעומת זאת אוורור עומק הקרקע מתבצע ע"י נתיבי אוויר רחבים שנוצרו כנראה בין דופן החבית לקרקע.

באיור 3 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 מהשקיה 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.

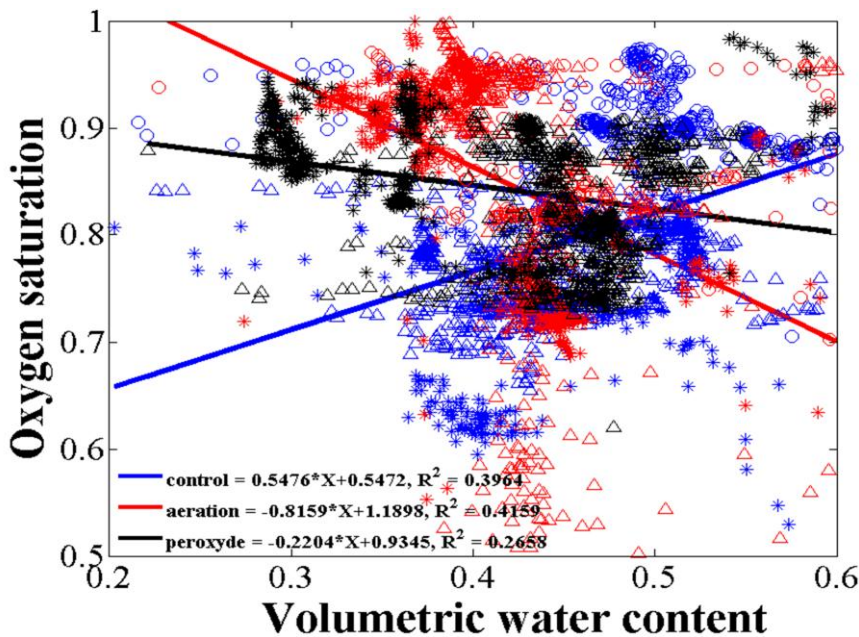
מניתוח השונות הבוחן את השפעת הוספת מי-חמצן על ריכוז החמצן בקרקע בכל הטיפולים (נתונים מוצגים בטבלה 1) ניתן לומר ברמת מובהקות גבוהה ($p = 0.007$) שהשקיה במי-חמצן



איור 4: השפעת שיטת ההשקיה ותוספת מי החמצן על היבול. הפירות נקטפו בין התאריכים 26.9.2010-21.12.2010, נשקלו מיד לאחר הקטיף. הערכים המופיעים באיור הינם ממוצע כל הפירות שנקטפו בטיפול חלקי מספר הצמחים מהן הם נקטפו. הקווים מסמנים סטיית תקן.

מהשוואת היבולים שהתקבלו בטיפולים השונים (נתונים מוצגים באיור 4), 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 רדיקאלים כגון OH⁻ ואחרים המחמצנים ופוגעים בממברנות התאים. כמו כן תיתכן פגיעה בבקרה הצמחית, שכן מי-החמצן משמשים כסינגל צמחי למספר מנגנוני התגוננות מעקה ומזיקים. 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



איור 5: 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 כחלקו 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 בין ה-3 במאי ל-30 בנובמבר 2010.

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 5, המתאר את השפעת תכולת הרטיבות על ריכוז החמצן בטיפול הירוק (לא מפורטים בדו"ח הנוכחי), טיפולי מי-החמצן וביקורת, 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 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.

הוספת מי-חמצן מעלה את ריכוז החמצן בקרקע בצורה יעילה יותר מאשר הזרקת אוויר בטפטוף טמון. 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).

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. בנוסף, הוספת מי-חמצן בהשקיה הינה ככל הנראה יקרה מידי.

מניסוי זה עולה 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. לעומת זאת, בקרקעות חוליות שימוש במי-חמצן עלול להיות

לא יעיל כתוצאה מחלחול מהיר, אולם בקרקעות אלו ממילא אין צורך באוורור.

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.

Hodgson A.S., MacLeod D.D. (1989) Use of oxygen flux density to estimate critical air-filled porosity of a vertisol. *Soil Sri. 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.

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

טבלה 1: ניתוח שונות הבוחן את השערת האפס שאין הבדל בין החיישנים בטיפולי מי החמצן למקבילים (אותו עומק) שלהם בטיפולי 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
	0.009		
השקיה עילית	ביקורת	4	0.76
	מי-חמצן	4	0.83
	20	4	0.76
	40	4	0.83
	מי-חמצן*עומק		0.249
	0.0149		
השקיה טמונה	ביקורת	3	0.73
	מי-חמצן	4	0.86
	20	4	0.8
	40	3	0.81
	מי-חמצן*עומק		0.105
	0.099		

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%.

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

טבלה 3: למעלה השפעת הטיפולים על ריכוז הנוטריינטים בעלים, ולמטה ניתוח שונות הבדוק 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.

סיכום עם שאלות מנחות

מטרות המחקר תוך התייחסות לתוכנית העבודה

מטרות המחקר לשנת המחקר הראשונה היו: 1. בחינת יעילות הזרקת מי-החמצן לשיפור האוורור בקרקע חרסיתית. 2. בחינת השפעת העלאת ריכוזי החמצן על הצימוח הווגטיבי והניבה של צמח בוחן: פלפל.

עיקרי הניסויים והתוצאות

נבחנו השפעות השקיה בתמיסות מי-חמצן בריכוז של 800 ח"מ בהשקיה עילית וטמונה על ריכוז החמצן בקרקע ויבול צמחי פלפל בניסויי חביות. השימוש במי-חמצן בריכוז של 800 ח"מ נתגלה 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.

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

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. בנוסף, הוספת מי-חמצן באופן קבוע בהשקיה הינה ככל הנראה יקרה מידי. מניסוי זה עולה 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. לעומת זאת, בקרקעות חוליות שימוש במי-חמצן עלול להיות לא יעיל כתוצאה מחלחול מהיר, אולם בקרקעות אלו ממילא אין צורך באוורור. עדיין מוקדם לגבש מסקנות סופיות לגבי התועלת הצפויה מהוספת מי-חמצן במטעים.

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

מטרות המחקר בתקופה שנתרה לביצוע תוכנית המחקר?

בהתאם להמלצות הסוקרים והחלטת וועדת השיפוט בשתי שנות המחקר הראשונות (שאושרו) נבצע רק ניסויי מעבדה, ניסויים במיכלי גידול ונפתח את המודל התפעולי. רק אם התוצאות של חלק זה של המחקר יצדיקו זאת נשקול בשנה השלישית התחלה של ניסוי שדה שיהווה ניסויי מקדים לקראת פרויקט המשך עתידי. מכיוון שמי-חמצן בהשקיה עילית סייעו בהעלאת ריכוז החמצן, ניתן בהמשך לעבודה זו לבחון האם השמת ריכוז מי-חמצן נמוך בהשקיה עילית ישפר את תנאי האוורור מבלי לפגוע בצמחים. בנוסף, ניתן לבחון האם השמת מי-חמצן בתקופה מסוימת של הגידול תגרום להשפעה חיובית יותר (או שלילית פחות) על היבול. מאחר ולא נתקבלו תשובות חד-משמעיות בניסויי החביות הראשון, אנחנו נבצע ניסוי דומה בריכוז מי-חמצן קצת נמוך יותר שאולי יפגע פחות בצמחים ועדיין יעלה את ריכוז מי-חמצן.

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

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

אילן בן נח עומד להגיש בקרוב את עבודת המסטר שלו לאוניברסיטה העברית שכוללת גם את הניסוי המדווח 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.