

**הגדלת יבולי מטעים בקרקעות כבדות על ידי שיטה חדשה להוספת חמצן באמצעות מיכלי אוורור טמונים**

**Increasing orchard yields in heavy-textured soils using a new sub-surface air-injection  
method**

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  
בוריס נפתלייב 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:  
[vwsfried@agri.gov.il](mailto:vwsfried@agri.gov.il)

Gregory Communar, Inst. Soil, Water and Environmental Sciences, ARO, Bet Dagan 50250. E- mail:  
[communar@agri.gov.il](mailto:communar@agri.gov.il)

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

Ilan Ben Noach, Inst. Soil, Water and Environmental Sciences, ARO, Bet Dagan 50250. E- mail:  
[ilan.bennoah@mail.huji.ac.il](mailto:ilan.bennoah@mail.huji.ac.il)

אוגוסט 2010

אלול תש"ע

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

**חתימת החוקר**

---

## תקציר

### 1. הצגת הבעיה

מטעים רבים מכל הסוגים: הדרים, נשירים וסוב-טרופיים נטועים באדמות חרסיות, בעיקר באזורי העמקים בצפון המדינה. בדרך כלל, עבור אותם גידולים בתנאים אקלימיים דומים, מתקבלים יבולים גבוהים יותר בקרקעות חוליות (קלות) לעומת מטעים הנטועים באדמות חרסיות (כבדות). הבדלים אלו הן תוצאה של כמה גורמים, כשגורם אפשרי אחד הוא אוורור לקוי באדמות כבדות. במחקר הנוכחי אנחנו בוחנים פתרון פשוט וזול לבעיה זאת: סביב כל טפטפת הוסף מיכל כדורי בקוטר 10 ס"מ, עשוי פלסטיק קשיח ומחורר ("אוורור"), שדרכו זורמים המים בתחילת מחזור ההשקיה ואוויר דחוס בסוף המחזור בלחצים דומים לאלו שבמערכת טפטוף טמון רגילה אך משטח אספקה גדול בהרבה.

2. מטרת המחקר היו: 1. פיתוח הטכנולוגיה של מיכלי אוורור טמונים; 2. בחינת יעילות אוורור קרקעות כבדות בשיטה המוצעת; 3. בחינת השפעת העלאת ריכוזי החמצן על הצימוח והניבה במטע.

### 3. שיטות העבודה

הפעילות בשלוש שנות המחקר כללה: 1) סקר מצב האוורור בכ-35 מטעים מסחריים ברחבי הארץ; 2) ניסויי הזרקת אויר עם וללא אווירונים לקרקע חרסיתית בדליים; 3) ניסויי הזרקת אוויר, עם ולא אווירונים, בחביות של 200 ליטר, ללא צמחים ועם צמחי פלפל; 4) ניסוי שדה של הזרקת אויר עם וללא אווירונים במטע מנגו צעיר בקיבוץ עמידה. 5) ניתוח תיאורטי של תהליך הזרקת האוויר לקרקע חרסיתית.

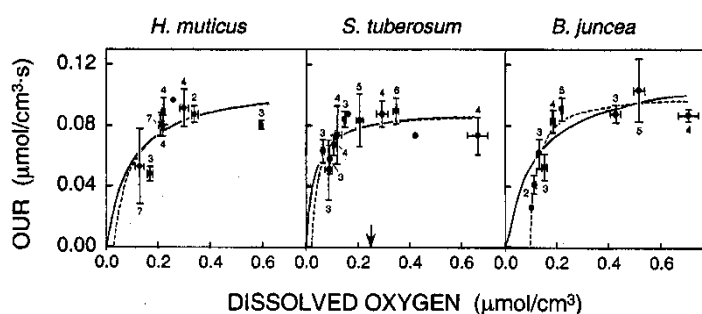
### 4. תוצאות עיקריות

מהנתונים שנצברו עד כה בסקר האוורור עולה שרק בקרקעות עם תכולת חרסית גבוהה (מעל 40 עד 50%) נמדדים ריכוזי חמצן נמוכים, בעיקר לאחר השקיה או סופת גשמים חזקה בחורף. רק בשני מטעי אבוקדו בעמק יזרעאל נמדדו ריכוזי חמצן נמוכים (כ-50% מאטמוספריים) לאורך מרבית עונת ההשקיה. ברוב המטעים האחרים בהם נתגלו ריכוזי חמצן נמוכים, הם שררו לאורך תקופה מוגבלת, למשל בתפוח בחודש מרץ, באפרסק בחודש אפריל ובאפרסמון בחודש ספטמבר במטעים סמוכים במושבי בני עטרות שבשפלת החוף. ריכוזי החמצן נמוכים יותר במטעים מושקים בשלוחה אחת לעומת אלו המושקים בשתי שלוחות טפטוף לשורת עצים. מניסויי הזרקת האוויר שבצענו עד כה עולה שהאוורור מקטין רק במעט את התנגדות הקרקע לזרימת האוויר, במיוחד בתכולות רטיבות גבוהות מאד. מניתוח תיאורטי של בעיית הזרקת אויר דחוס לחתך הקרקע עולה שצריכים להבחין בין שני מצבים קיצוניים: 1) בהזרקת אוויר לקרקע בתכולות רטיבות נמוכות הכוח העיקרי המניע את האוויר הוא מפל לחצים. בתנאים אלו ניתן לתאר את זרימת האוויר על ידי משוואת רצף דיפוסית עם תנאי שפה של לחץ אויר אטמוספרי בפני השטח. מתקבל פיזור הומוגני, רצוי של האוויר גם בכיוונים אופקיים (השפעת דחיסות האוויר על פיזורו זניחה וניתן להכלילה בחישובים ללא סיבוכ יתר); 2) בהזרקת אוויר לקרקע בתכולות רטיבות גבוהות יש כוח מניע משמעותי נוסף: כוח העילוי שנובע מהבדלי הצפיפות של המים והאוויר. בתנאים אלו מתקבלות תופעות של זרימת אוויר לא יציבה דרך נתיבים של זרימה מועדפת, כלומר פיזור לא הומוגני (ולא רצוי) של האוויר. גם בתנאים אלו ניתן לתאר (תיאור מקורב) את מעטפת קווי הזרם של האוויר המוזרק על ידי משוואת רצף מסוג קונבקציה-דיספרסיה עם פרמטר מאקרוסקופי המאפיין את היחס בין הכוחות המניעים: כוח העילוי ומפל הלחצים. הן בניסויי החביות והן בניסויי המטע (נמשכים) לא נתגלו עדיין מחסורים משמעותיים בחמצן בחתך הקרקע. לכן, לא ניתן להעריך עדיין את יעילות הזרקת האוויר, עם וללא אווירונים ואת תגובת הצמחים לטיפול אלו.

### 5. מסקנות והמלצות לגבי יישום התוצאות

עדיין מוקדם מדי מכדי לגבש המלצות למגדלים.

מטעים רבים מכל הסוגים: הדורים, נשירים וסוב-טרופיים נטועים באדמות חרסיתיות, בעיקר באזורי העמקים בצפון המדינה. מרבית המטעים מושקים כיום בטפטוף עלי וחלקם, ההולך ופוחת במתזים. בדרך כלל, עבור אותם גידולים בתנאים אקלימיים דומים, מתקבלים יכולים גבוהים יותר בקרקעות חוליות (קלות) לעומת מטעים הנטועים באדמות חרסיתיות (כבדות). הבדלים אלו הנם תוצאה של כמה גורמים, כשגורם אחד עיקרי הוא אוורור לקוי באדמות כבדות. מחקרים רבים הדגימו את ההשפעה החזקה של ריכוזי וקצב אספקת החמצן בבית השורשים על פעילות הצמח: נשימה, התארכות שורשים, דיות, קליטת חומרי הזנה וניבה,

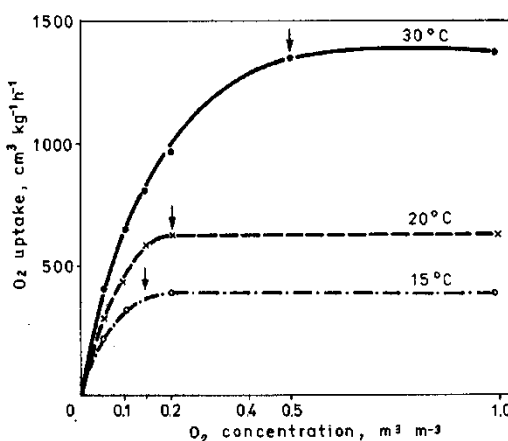


**איור 1.** קצב קליטת חמצן של שרשי חרדל (ימין), תפוח אדמה (מרכז) ו-henbain (שמאל) כתלות בריכוז החמצן המומס בתמיסה על פני השורש. ערך הרוויה דומה,  $300 \mu\text{mol O}_2/\text{cm}^3 \text{ tissue}$ , ומושג בריכוז גבוה במקצת מריכוז הרוויה וטמוספרי,  $0.25 \mu\text{mol}/\text{cm}^3$ , מסומן בחץ (מתוך Asplund and Curtis, 2001).

בפתרון למצב של מחסור מוחלט בחמצן (anoxia), אלא במצבים של רמת חמצן נמוכה (hypoxia) ותגובה חיובית של הצמח להעלאת ריכוזי החמצן בקרקע. ככלל, שורשי צמחים שונים מגיבים בצורה שונה לריכוזי חמצן מומס בתמיסת הקרקע, וברובם חלה פחיתה בקצב קליטת החמצן כאשר הריכוז פוחת מריכוז הרוויה האטמוספרי (איור 1). השפעת המחסור בחמצן על

ואת ההשפעה המזיקה של מחסור מוחלט (anaerobiosis, anoxia) וחלקי (hypoxia) בחמצן על התהליכים הפיסיולוגיים השונים (סקירות מקיפות ניתן למצוא בספר של (14), ובמאמרי הסקירה של (16), (3), ו-(10), ברשימת הספרות נמצאים מאמרי

מחקר נבחרים). המחקר המוצע אינו עוסק



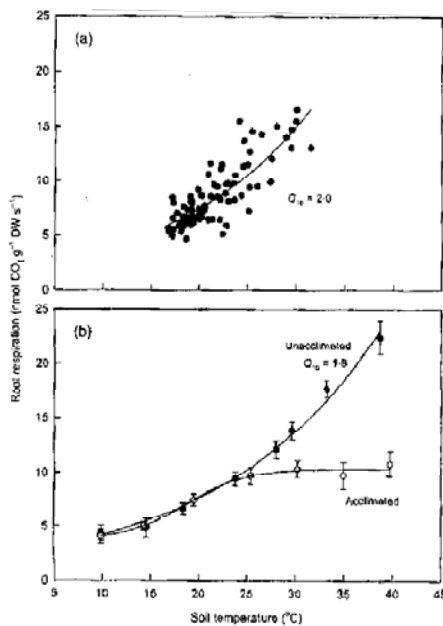
**איור 2.** השפעת ריכוז החמצן באוויר על קצב הנשימה של קצוות שורשי בצל בטמפרטורות שונות. ב- $30^\circ\text{C}$  ובריכוז חמצן של פחות מ-50% (גבוה מריכוז אטמוספרי: 21%) כבר יש פחיתה בקצב הנשימה (מתוך Berry and Norris, 1949).

דיכוי הפעילויות הפיסיולוגיות של הצמח גבוהה יותר כאשר עולה דרישת הצמח לחמצן, למשל בטמפרטורות גבוהות (קצבי נשימה מקסימאליים וריכוזי חמצן קריטי לשורשי)

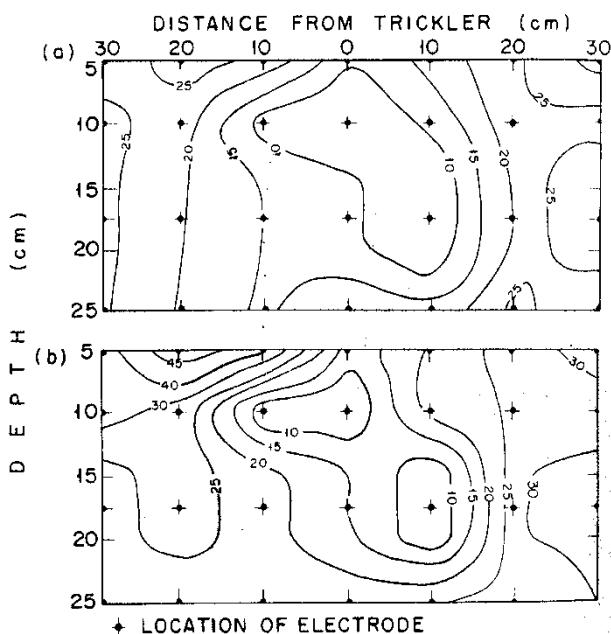
בצל שעולים עם הטמפרטורה, איור 2, ו- $Q_{10}$  של 2 לצריכת חמצן של שורשי הדורים, איור 3).

קצב קליטת החמצן על ידי שורשי צמחים גבוה יותר מאשר קצב קליטת מאקרואלמנטים חיוניים, אך מסיסותו של החמצן במים נמוכה, כשל מיקרואלמנטים: כ-8 ח"מ או  $0.25 \mu\text{mol}/\text{cm}^3$  בשיווי-משקל עם 21% חמצן אטמוספרי ב- $25^\circ\text{C}$ . לכן, אם ריכוז החמצן המומס בתמיסת הקרקע אינו מחודש באופן רציף נוצרים תנאים היפוקסיים בטווח של מספר שעות בודדות: קצב צריכת חמצן אופייני של קרקע עם צמחים פעילים הוא כ-15 ג' ל- $\text{m}^2$  ליום (18), ואם נניח ש-1  $\text{m}^2$  קרקע מכילים כ-100 ל' תמיסה רוויה ב-8 ח"מ חמצן באזור בית השורשים, הוא יצרך תוך כדי שעה ורבע בלבד. ליטר אוויר אטמוספרי מכיל כ-250 מ"ג חמצן, בערך פי 30 מאשר ליטר מים בשיווי משקל אתו (8 מ"מ). לכן אוגר החמצן בקרקע נמצא רובו ככולו בפאזה הגזית, לבד ממצבים של קרקעות קרובות לרוויה במים. קליטת החמצן על ידי שורשי הצמח נעשית מתוך תמיסת הקרקע המצפה אותם, ומאחר ומקדם הדיפוסיה של החמצן במים קטן פי 10,000 מאשר מקדם הדיפוסיה באוויר, השלב האחרון של הדיפוסיה במוציג'ל מהווה את הגורם המגביל לקצב קליטת החמצן בתנאים בהם

אספקת החמצן בקרקע מאפשרת לספק את דרישות הצמח. החמצן שצורכים השורשים הנושמים בחתך הקרקע מתחדש על ידי כניסה של אוויר אטמוספרי עשיר בחמצן (21%) והסעתו בחתך הקרקע כתוצאה משינויי לחץ ברומטרי (וטמפרטורה) ודיפוסיה כתוצאה ממפל ריכוזים, ולמרחקים קצרים (לעבר השורש הבווד)



**איור 3.** קצב הנשימה של שורשים של חושש בן שנתיים כולות בטמפרטורה. קצב הנשימה גדל פי 2 בעליה של  $10^{\circ}\text{C}$  בטמפרטורה היומית הממוצעת (a, למעלה). כאשר טמפרטורת הקרקע נשמרה קבועה למשך שעה (עיגולים מלאים, b, למטה), עלתה הנשימה עם הטמפרטורה בצורה חדה, אך כאשר נשמרה טמפרטורה קבועה למשך 6 ימים, העצים מיתנו את פעילותם בטמפרטורות גבוהות וקצב הנשימה לא עלה מעבר ל- $10 \text{ nmol CO}_2/\text{gDW}\cdot\text{s}$  ב- $25^{\circ}\text{C}$  (עיגולים ריקים, למטה) (מתוך Bryla et al, 2001).



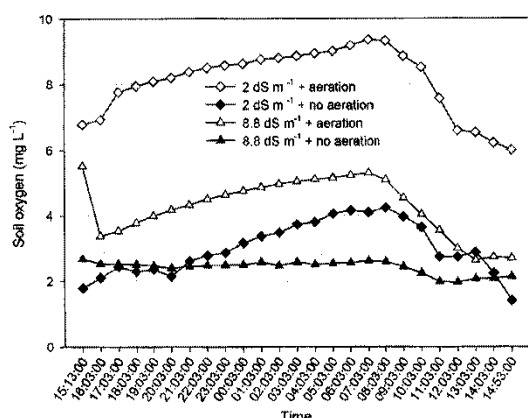
**איור 4.** פירוס קצב דיפוסית חמצן, ODR, (ביחידות של  $\text{gO}_2 \cdot 10^8/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ ) בחתך הקרקע מתחת לטפטפת שעה וחצי (למעלה) ו-4 ימים (למטה) אחרי ההשקיה (מתוך Silberbush et al., 1979) ערך של  $20 \cdot 10^8 \text{ gO}_2/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$  נחשב מגביל נשימה (Glinski and Stepienewski, 1985).

בעיקר בדיפוסיה מוליקולרית כתוצאה ממפל ריכוזים מקומי. קרקעות חרסיות מאופיינות על ידי נקבובים קטנים ותאחיזת מים גבוהה, מה שמקטין את קצב אספקת האוויר הן בהסעה והן בדיפוסיה. קרוב לפני הקרקע תכולת הרטיבות נמוכה וריכוזי החמצן גבוהים, אך בעומקים גדולים יותר בהם התנאים לקליטת מים וחומרי הזנה טובים יותר – רטיבות מספקת וריכוזי מלחים קטנים יותר – ריכוזי חמצן נמוכים מהווים בהרבה מקרים גורם מגביל לדיות, קליטת חומרי הזנה (דוגמת זרחן ואשלגן) ודחיית יונים מזיקים (דוגמת נתרן וכלוריד), הטמעה וניבה. הן מקדם הדיפוסיה והן חדירות הקרקע לאוויר יורדים בצורה חדה עם הירידה בתכולת האוויר (עליה בתכולת הרטיבות) ודי בהשקיה תכופה כדי להוריד את קצב דיפוסית החמצן (Oxygen Diffusion Rate, ODR) באזור שמתחת לטפטפת עילית לאחר מתן המים

(23, איור 4). מה שנותן בסיס להנחה שבמרבית המטעים קיים מחסור זמני בחמצן באזור הטפטפת בחלק ממחזור ההשקיה. בניסוי השקיה בטפטוף של עגבניות שנערך בקליפורניה, למשל, התנווד ריכוז החמצן בעומק של 20 ס"מ בקרקע הסיינית-חרסיתית בין 18 ל-10% בתדירות השקיה של פעם בשבוע, בעוד שבהשקיה יומית היה ריכוז יציב ונמוך של 4% חמצן (20). ניסויים בהם נתקבלו יכולים נמוכים יותר במנות השקיה גבוהות יותר (למשל בעגבניות אצל (5) מצביעים על האפשרות למחסור בחמצן, אך גם אם מתקבלת תגובה חיובית למנת ההשקיה (למשל באשכולית אדומה מושקת בקולחים באדמה חרסיתית, אצל (1,2), זה אינו שולל את האפשרות שהעשרת הקרקע בחמצן יכולה להעלות את היבול. סימן אפשרי למחסור בחמצן בניסוי של (2) הנם ריכוזים נמוכים של אשלגן וזרחן, שעלולים להיגרם בהדרגה (ובצמחים אחרים) כתוצאה ממחסור בחמצן (24).

התופעה של מחסורים זמניים בחמצן מוכרת מזה שנים רבות, אך עד היום לא נמצאו פתרונות מעשיים להעלאת ריכוזי החמצן

בצורה יעילה וכדאית מבחינה כלכלית. בארץ ובעולם נבדקו דרכים שונות לאוורור (חמצון הוא ביטוי יותר הולם) הקרקע כגון: דחיסת אוויר דרך מערכת טפטוף טמון (12,21), הוספת



**איור 5.** מהלך יומי של ריכוז החמצן בעציצים עם קרקע חרסיתית (ורטיסול) ועגבניות שמושקים במים עם מוליכות חשמלית של 2 ו-8.8 ד"ס/מ, עם וללא יניקת 12% (v/v) לתוך מי ההשקיה (מתוך Bhattarai et al., 2006).

מי-חמצן (8, 21), פראוקסידים אחרים (11, 17) או בועות אוויר למים בהשקיה בטפטוף טמון (8, 9, 15), וחפירת "תעלות הזנה" לאורך שורות העצים ומיליון בחומר עם הולכת אוויר ומים טובה כגון: טוף, פרלייט או קומפוסט (6, 19). איור 5 מציג את ריכוזי החמצן בקרקע עם וללא טיפול של הוספת חמצן על ידי יניקת בועות אוויר בעגבניות שהושקו במים עם מליחות של 2 ו-8.8 ד"ס/מ. ריכוזי החמצן בעציצים המלוחים היו נמוכים יותר והאוויר העלה את ריכוזי החמצן (איור 5) והיבולים (טבלה 1) ב-21% ו-28%, בהתאמה (9). מפתיע (שלא לומר חשוד) מחד גיסא ומעודד מאידך גיסא שגם בקרקעות חוליות (ובהטמנה רדודה: 15 ס"מ), היכן שלא צפויה בעיית אוורור, נתקבלה תגובה חיובית, עליה של 39% ביבולי פלפל, לחמצון על ידי יניקת בועות אוויר (15).

**טבלה 1.** מחקרים בהם נבחנו שיטות שונות להעשרת הקרקע בחמצן ותוספת היבול שהתקבלה (+ מציין תוספת)

| שיטת חמצון        | קרקע                            | גידול               | עצמת חימצון                                                   | תוספת יבול                    | מראה מקום               |
|-------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| מי חמצן, $H_2O_2$ | "עיבוד מצוין" 6% חומר אורגני    | תירס                |                                                               | 50% +                         | Melsted et al. (1949)   |
| $H_2O_2$          | "                               | סויה                |                                                               | 20% +                         | "                       |
| דחיסת אוויר       | "                               | תירס                |                                                               | 53% +                         | "                       |
| דחיסת אוויר       | "                               | סויה                |                                                               | אין השפעה                     | "                       |
| Urea peroxide     | כבול + פרלייט                   | כריזנטמה            |                                                               | שטח עלים + מסת צמח +          | Herr and Jarrell (1980) |
| Urea peroxide     | כבול + חול מוצפים               | עגבנייה             | $0.004\% \text{ UP} \equiv 18.5 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ | 20% + מסה על-קרקעית           | Bryce et al. (1982)     |
| דחיסת אוויר       | חמרה סיינית-חרסיתית השקיה יומית | עגבנייה חציל שעועית | 0.5 to 24 hr/d אוורור                                         | 150% + 100% + אין השפעה       | Busscher (1982)         |
| דחיסת אוויר       | חול השקיה יומית                 | פלפל סויה           | 0.5 to 24 hr/d אוורור                                         | 33% + אין השפעה               | "                       |
| יניקת בועות אוויר | חול סייני                       | פלפל                | 12% (v/v) אוויר                                               | 39% + פרי                     | Goorahoo et al. (2002)  |
| $H_2O_2$          | ורטיסול קיבול שדה עד רוויה      | קישוא (שדה)         | 2 טיפולים של $5 \text{ L Ha}^{-1}$ HP 50% תמיסת               | 25% + פרי                     | Bhattarai et al. (2004) |
| $H_2O_2$          | "                               | סויה (עציצים)       | $0.05\% \text{ HP} \equiv 30 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$    | 82% + משקל טרי, תרמילים       | "                       |
| $H_2O_2$          | "                               | כותנה (עציצים)      | "                                                             | 14% + הלקטים                  | "                       |
| יניקת בועות אוויר | "                               | סויה (עציצים)       | 12% (v/v) אוויר                                               | 6% + תרמילים                  | "                       |
| יניקת בועות אוויר | "                               | כותנה (עציצים)      | 12% (v/v) אוויר                                               | 28% + הלקטים                  | "                       |
| יניקת בועות אוויר | "                               | עגבנייה (עציצים)    | 12% (v/v) אוויר                                               | 21% + פרי 28% + במליחות גבוהה | Bhattarai et al. (2006) |

למרות הניסיונות הרבים, מספר הפרסומים המדעיים המעידים על הצלחה בחמצון הקרקע הנו קטן מאד (מרוכזים בטבלה 1), ואף לא אחת מהשיטות שנוסו יושמו בהרחבה בחיי המעשה החקלאים. חפירת "תעלות הזנה" והמילוי שלהן במצע מאוורר הביאה בחלק מהמקרים לגידול משמעותי ביבולים, אך היא שיטה יקרה עם השלכות בלתי הפיכות על האפשרות לעיבוד הקרקע. הוספת מי-חמצן יכולה להעלות את ריכוזי החמצן באוויר הקרקע, אך לא מעבר למגבלות המסיסות של החמצן המשתחרר בפאזה המימית (מסיסות חמצן במים ב- $25^\circ\text{C}$  היא כ-40 ח"מ, ובשיווי משקל עם אוויר

אטמוספרי כ-8 ח"מ). ניתן להעריך את כמות החמצן שהוספה בניסויים של (8), למשל: 12% בנפח אוויר שהוזרק ב- (תוספת) לחץ של כ-1.5 באר 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-מ<sup>2</sup> ליום. ערך זה נמוך פי 50 לערך לעומת ערכים מדווחים של קצב נשימת קרקע עם צמחים: 15 ג' ל-מ<sup>2</sup> ליום (18). כיצד אם כן, גורמת תוספת קטנה זו של חמצן לעליה משמעותית של 20 עד 30% ביבולים? התשובה לשאלה זאת אינה פשוטה ומצריכה מחקר נוסף. אחת הסיבות נעוצה, כנראה, במקום (ובזמן) 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. אין בנמצא פרסומים מדעיים מהם ניתן להסיק מה גרם לכישלון שיטת ההחדרה בלחץ של אוויר (גזי) דרך טפטפות תת-קרקעיות, אך סיבה ברורה אחת היא התנגדות הקרקע החרסיתית ליציאת אוויר (ומים) ממקור נקודתי. הלחץ הנגדי בקרקע הרטובה מגביל את קצב האספקה, וגורם לאי-אחידות באספקה לאורך השלוחה (נושא שנחקר רבות, לגבי פיזור המים בטפטוף טמון, 22). האוויר שיוצא מהטפטפת אינו מתפזר לכל הכיוונים, אלא עולה לפני הקרקע דרך איזור צר - אפקט הארובה. במחקר הנוכחי אנחנו בוחנים פתרון פשוט וזול לבעיה זאת: סביב כל טפטפת הוסף מיכל כדורי בקוטר 10 ס"מ, עשוי פלסטיק קשיח ומחורר (להלן "אוורור") שדרכו זורמים מים בתחילת מחזור ההשקיה ואוויר דחוס בסוף המחזור בלחצים דומים לאלו שבמערכת טפטוף טמון רגילה אך משטח אספקה גדול בהרבה. מטרות המחקר הכלליות היו: (1) פיתוח הטכנולוגיה של מיכלי אוורור טמונים; (2) בחינת יעילות אוורור קרקעות כבדות בשיטה המוצעת; (3) בחינת השפעת העלאת ריכוזי החמצן על הצימוח והניבה במטע.

## **שיטות ומהלך העבודה**

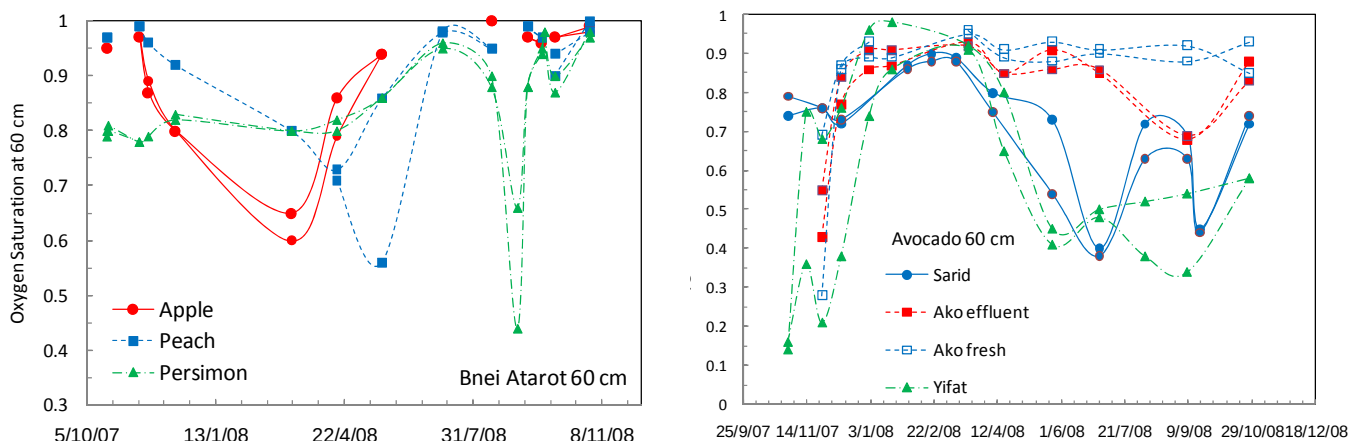
המחקר כולל ששה שלבים, רבם עדיין לא נסתיימו: (1) פיתוח הטכנולוגיה (פלסטיקה והידראוליקה) של מיכלי האוורור ודחיסת האוורור; (2) בדיקת פיזור האוורור (והמים) לתוך קרקע כבדה בתוך מיכלי גידול ללא צמחים; (3) בדיקת השפעת האוורור על צימוח שתילים בתוך מיכלי הגידול; (4) בדיקת מצב האוורור במטעים מסחריים; (5) ניסוי שדה במטע מסחרי מושקה בטפטוף עם וללא אוורור; (6) פיתוח מודל אופרטיבי לאמידת יעילות האוורור המאולץ.

## **תוצאות ודיון**

### **סקר מצב האוורור במטעים מסחריים**

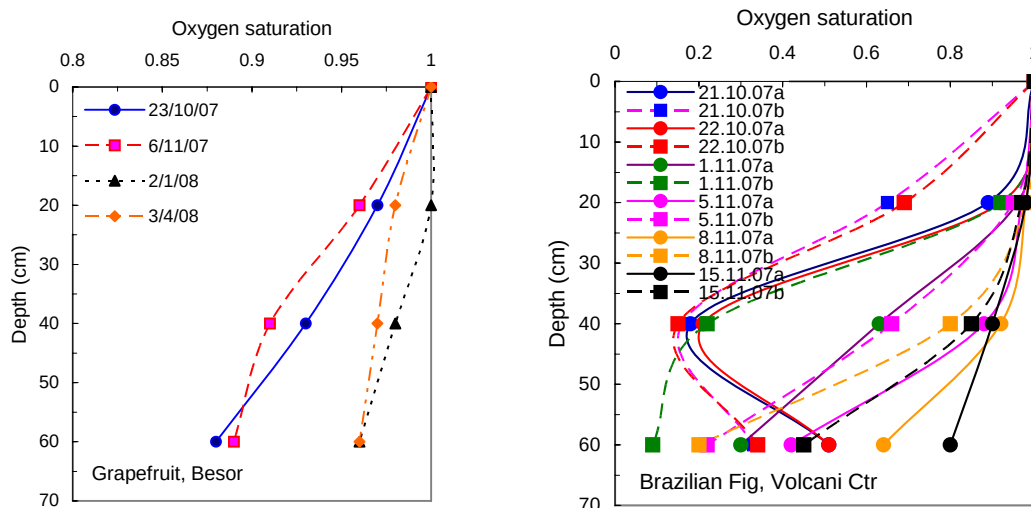
לקראת סוף עונת ההשקיה של 2007 הוטמנו 2 מערכים של 3 בקבוקי פלסטיק מחוררים (בקבוקים בנפח של 50 מ"ל שהוטמנו בעומקים של 20, 40 ו-60 ס"מ במרחק של 20 ס"מ מהטפטפות, החוצה משורת העצים) ב-19 מטעים מושקים בטפטוף. בשנת 2008 הוספנו מערכים של בקבוקי דיגום והרחבנו את הסקר לכ-35 מטעים מסחריים כדי לכלול יותר סוגים של עצים וכדי למצוא מטע מתאים ומגדל שיסכים לביצוע ניסוי השדה. מסקר האוורור עולה שבמרבית המטעים, אם יש מחסור בחמצן, הוא מתרחש בתקופה מוגבלת. באיור 6 ניתן לראות משמאל, למשל, את ריכוזי החמצן (מוצגים בצורה יחסית כרוויה לעומת 21% חמצן אטמוספרי) בעומק של 60 ס"מ במרחק של 20 ס"מ מהטפטפות בשלושה סוגי מטעים בקרקע חרסיתית (60% חרסית) במושב בני-עטרות. נראה כי בתפוח קיים מחסור מסוים בחמצן בסוף החורף, באפרסק לקראת סוף עונת ההשקיה של 2007 הוטמנו 2 מערכים של 3 בקבוקי פלסטיק מחוררים (בקבוקים בנפח של 50 מ"ל שהוטמנו בעומקים של 20, 40 ו-60 ס"מ במרחק של 20 ס"מ מהטפטפות, החוצה משורת העצים) ב-35 מטעים מושקים בטפטוף. בשנת 2008 הוספנו מערכים של בקבוקי דיגום והרחבנו את הסקר לכ-35 מטעים מסחריים כדי לכלול יותר

סוגים של עצים וכדי למצוא מטע מתאים ומגדל שיסכים לביצוע ניסוי השדה. מסקר האוורור עולה שבמרבית המטעים, אם יש מחסור בחמצן, הוא מתרחש בתקופה מוגבלת. באיור 6 ניתן לראות משמאל, למשל, את ריכוזי החמצן (מוצגים בצורה יחסית כרוויה לעומת 21% חמצן אטמוספרי) בעומק של 60 ס"מ במרחק של 20 ס"מ מהטפטפות בשלושה סוגי מטעים בקרקע חרסית (60% חרסית) במושב בני-עטרות. נראה כי בתפוח קיים מחסור מסוים בחמצן בסוף החורף, באפרסם יש מחסור באביב ובאפרסמון מחסור בתקופה קצרה של השקיה אינטנסיבית (6 מ"מ ביום) לפני הקטיפה בספטמבר. במטעי האבוקדו בשריד וביפעת (בקרקע עם כ-70% חרסית, תרשים מימין), לעומת זאת, נראה שיש מחסור בחמצן לאורך מרבית עונת ההשקיה.



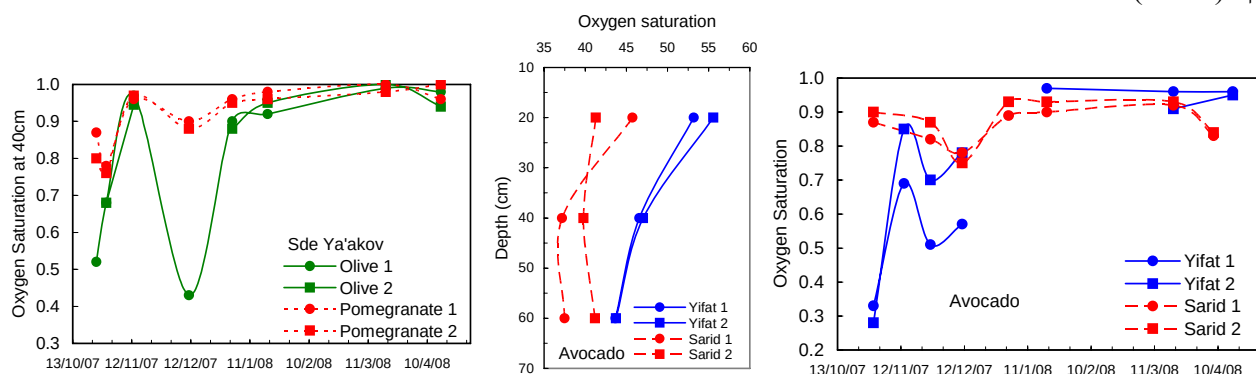
**איור 6. מימין:** ריכוזי החמצן באוויר הקרקע (מוצגים בצורה יחסית כרוויה לעומת 21% חמצן אטמוספרי) בעומק של 60 ס"מ במרחק של 20 ס"מ מהטפטפות בארבעה מטעי אבוקדו. **משמאל:** ריכוזי החמצן בעומק של 60 ס"מ בשלושה סוגי מטעים במושב בני-עטרות.

המדידות של ריכוזי החמצן הגבוהים בפרדס במרכז וולקני ממחישות את הרזולוציה ורגישות המדידה על-פי התגובה להשקיות שגרמה לפחיתה קטנה בריכוזי החמצן (איור 7, משמאל). במדידות ליד התאנה הברזילאית שהושקתה בצורה אינטנסיבית נראה שריכוזי החמצן ירדו עד ל-10% רוויה אטמוספרי. הפחתה ברמות ההשקיה גרמה לעליה בריכוזי החמצן בחתך (איור 7, מימין).



**איור 7. פרופיל ריכוזי החמצן בכמה ימי דיגום ליד עץ תאנה במרכז וולקני, בית-דגן (מימין, קרקע עם 41% חרסית) וליד עץ אשכולית בחוות הבשור (קרקע עם 10% חרסית, משמאל).**

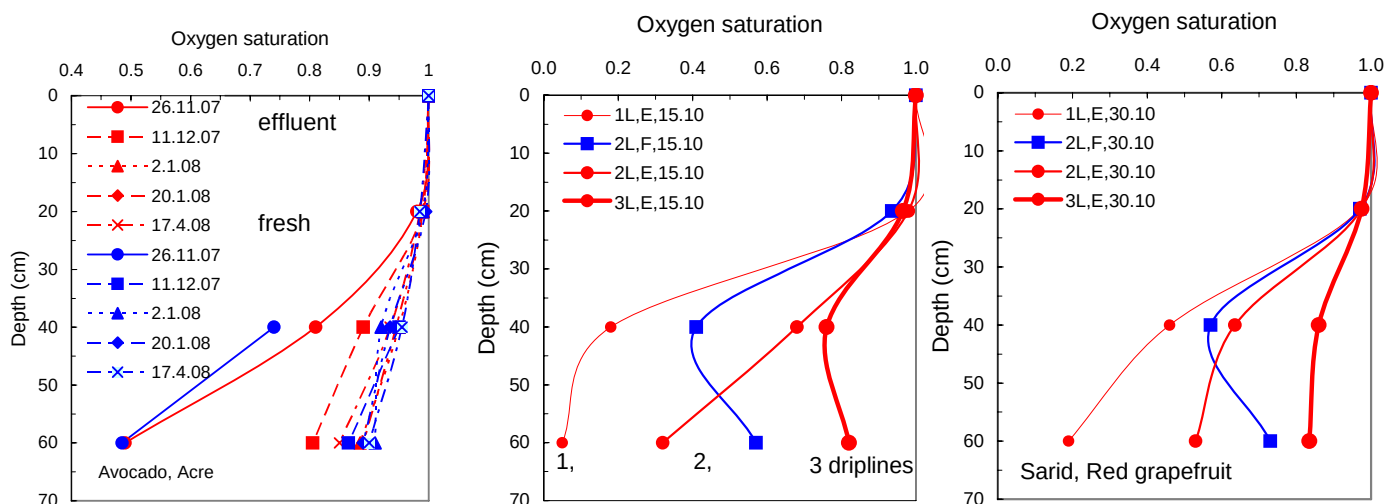
בדרך-כלל יורדים ריכוזי החמצן בצורה מונוטונית עם העומק, אך בכמה מקרים מתקבלים בעומק 40 ס"מ ריכוזים נמוכים יותר מאשר בעומק 60 ס"מ, כנראה בגלל צריכה מוגברת ודגם ההרטבה התלת-מימדי סביב הטפטפת (איור 7 מימין, איורים 10, 14). בקרקע חולית מתקבל תמיד פרופיל של ריכוזי חמצן היורדים במתינות עם העומק (איור 7 משמאל). מלבד צריכת החמצן של העצים והאוכלוסיה המיקרוביאלית, מושפעים ריכוזי החמצן גם מתכולת הרטיבות. בשני מטעי אבוקדו סמוכים בעמק יזרעאל נמדדו בשלהי עונת ההשקיה ריכוזי חמצן נמוכים בצורה משמעותית ביפעת, היכן שהקרקע רטובה יותר, כנראה בגלל שילוב של קרקע חרסיתית יותר ושיעורי השקיה גבוהים יותר לעומת המטע בשריד (איור 8). במטע זיתים ירדו ריכוזי החמצן לרמות נמוכות יותר בחורף מאשר במטע רימונים סמוך, כנראה בגלל הבדלים בתכונות הקרקע (איור 9).



**איור 9.** ריכוזי החמצן בעומק 40 ס"מ לידי עצי זית (קרקע עם 72% חרסית ו-22% גיר) ורימון (קרקע עם 68%-5% גיר) בשדה-יעקב, עמק יזרעאל.

**איור 8.** מהלך ריכוזי החמצן בעומק 40 ס"מ (מימין) ופרופילי הרטיבות ביום הטמנת הבקבוקים (משמאל) לידי עצי אבוקדו בשני מטעים סמוכים (מרחק של 2 ק"מ לערך) בקיבוץ שריד (קרקע עם 69% חרסית, 2 שלוחות לשורת עצים) ובקיבוץ יפעת (קרקע עם 76% חרסית, שלוחה בודדת).

על-פי התוצאות שנמדדו במטע אחד, אשכולית אדומה בקיבוץ שריד (חלקת ניסוי שנעקרה), נראה שקיימת תלות חזקה של ריכוזי החמצן בחתך הקרקע בנפח ההרטבה: ריכוזים נמוכים בצורה משמעותית בהשקיה בנפח מצומצם, שלוחה בודדת לשורת עצים, לעומת השקיה ב-2 ו-3 שלוחות (איור 10). גם במטע אפרסמון במושב בני-עטרות המושקה בשתי שלוחות טפטוף נמדדו ריכוזי חמצן גבוהים יחסית למרות הקרקע החרסיתית ושיעורי ההשקיה הגבוהים (לא מוצג), ואולי גורם זה מסביר גם חלק מההבדלים בריכוזי החמצן במטעי האבוקדו של קיבוץ שריד וקיבוץ יפעת (איור 8). על-פי מדידות ספורות שנעשו בפרדס בקיבוץ שריד ובמטע אבוקדו בעכו לא נראה שאיכות מי ההשקיה: שפירים או קולחים משפיעה בצורה משמעותית על ריכוזי החמצן בקרקע (איורים 10, 11).

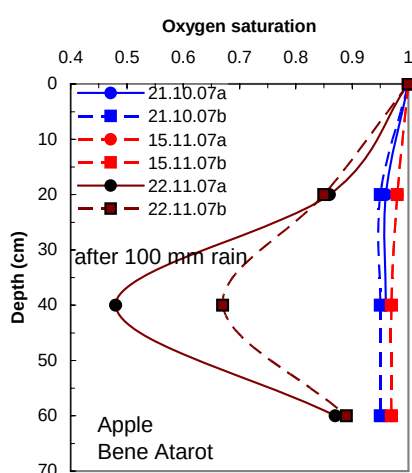


**איור 11.** פרופיל ריכוזי החמצן בחלקות ניסוי במטע אבוקדו בעכו המושקה במי קולחים ובמים שפירים.

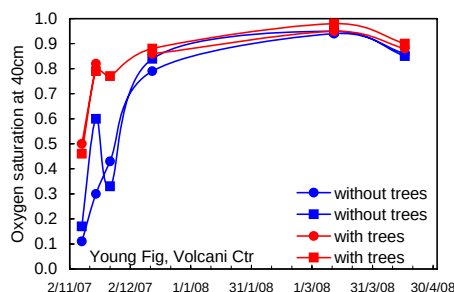
**איור 10.** פרופיל ריכוזי החמצן בשני ימי דיגום בשלהי עונת ההשקיה בחלקות ניסוי של אשכולית אדומה בקיבוץ שריד המושקות בשלוחה אחת, 2 ו-3 שלוחות במי קולחים וב-2 שלוחות גם במים שפירים.



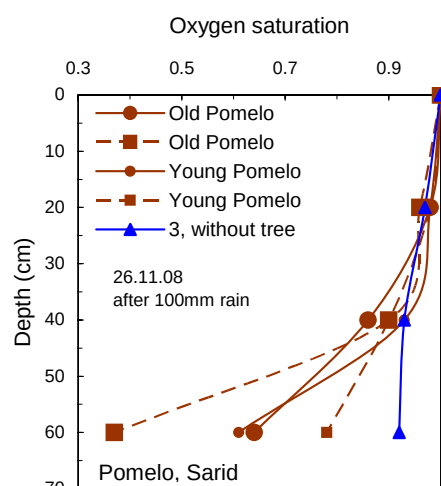
כדי לנסות לבודד (במידה כלשהי) את השפעת צריכת החמצן של העצים ושל הקרקע, נעשו בשני אתרים גם מדידות ללא עצים. בשתי חלקות פומלה בקיבוץ שריד נתקבלה תמונה הגיונית של ריכוזי חמצן בסדר יורד: ללא עצים, ליד עץ צעיר וליד עץ בוגר (איור 12). לעומת זאת במטע עם עצי תאנה צעירים במרכז וולקני, נצפו ריכוזי חמצן נמוכים יותר, דווקא במערכים שמוקמו ליד טפטפות משקות ללא עצים ולא ליד העצים (איור 13), מה שמעיד על מורכבות הבעיה. למרות שבמסגרת המחקר הנוכחי העניין העיקרי הוא מצב האוויר בתקופת ההשקיה, אפילו בחורף השחון של 2007/8 נצפו ירידות בריכוזי החמצן לאחר סופת גשם חזקה (למשל איורים 9, 14). שיטת הוספת החמצן, אם תוכח כיעילה, תוכל לשמש גם להעלאת ריכוזי החמצן בתקופת החורף אם יהיה צורך בכך במטעים מסוימים. המדידות הבודדות ניסו לעקוב אחר המהלך היומי של ריכוזי החמצן בקרקע התקבלה ברב המקרים עליה מתונה של ריכוזי החמצן במהלך שעות היום (איור 15).



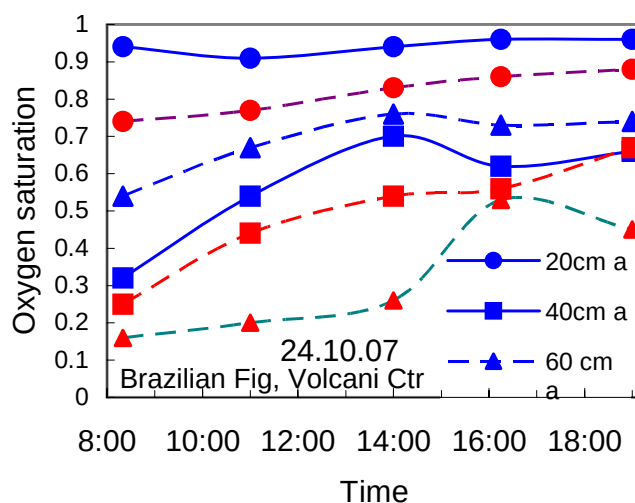
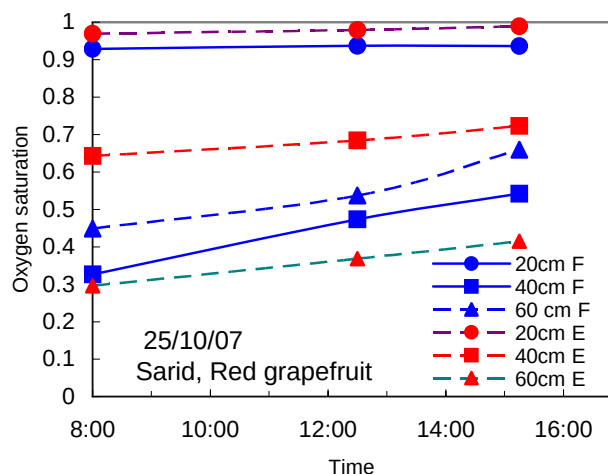
**איור 14.** פרופיל ריכוזי החמצן במטע תפוחים בבני עטרות (61% חרסית), בסוף עונת ההשקיה, ובחורף, לאחר סופת גשם של 100 מ"מ לערך.



**איור 13.** מהלך ריכוזי החמצן בעומק 40 ס"מ במטע תאנה צעיר במרכז וולקני ליד טפטפת סמוכה לעץ וליד טפטפת ללא עץ.

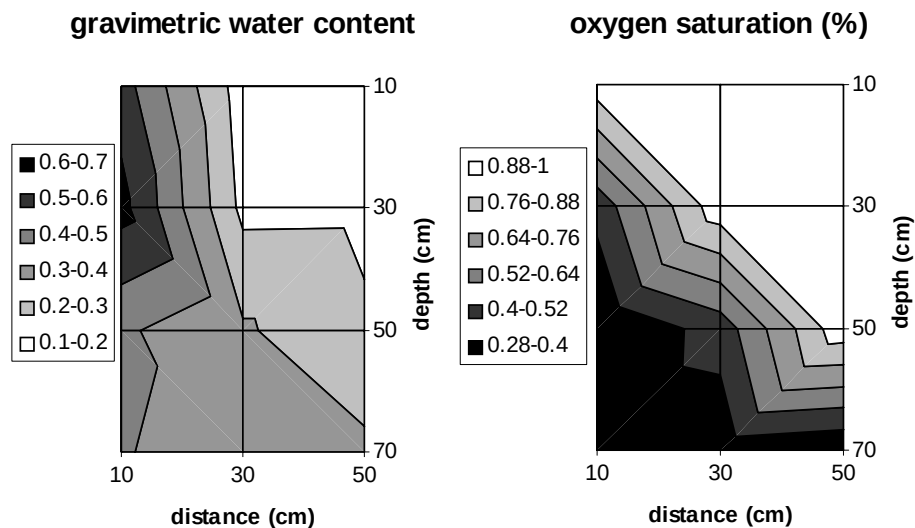


**איור 12.** פרופיל ריכוזי החמצן במטע בוגר (נטיעה ב-1997) ובמטע צעיר (נטיעה ב-2004) של פומלה בקיבוץ שריד. במטע הצעיר יש מדידה גם ליד טפטפת ללא עץ.

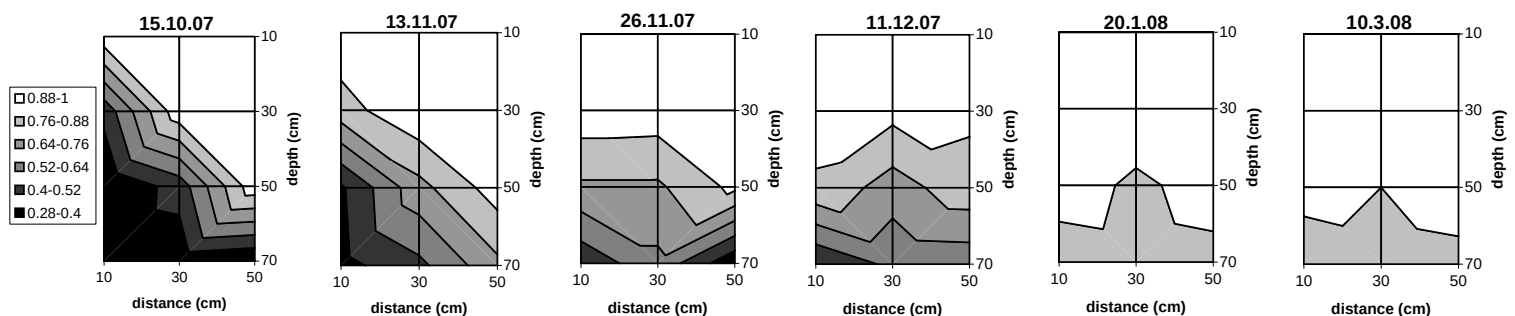


**איור 15.** מהלכים יומיים של ריכוזי החמצן בשלושה עומקים שנמדדו ליד תאנה ברזילאית במרכז וולקני (מימין) וליד אשכולית אדומה בקיבוץ שריד (משמאל).

מהמידות בחלקת הניסוי של אשכולית אדומה בקיבוץ שריד, בה הטמנו גם מערך דו-מימדי של בקבוקי דיגום במרחקים של 10, 30 ו-50 ס"מ מהטפטפת ולעומקים של 10, 30, 50 ו-70 ס"מ, מתקבלת תמונה ראשונית של הדגם המרחבי של ריכוזי החמצן סביב הטפטפת (איור 16 מימין). נראה שהדגם הדו-מימדי מושפע הן מהמרחק ממקור החמצן האטמוספירי (ריכוז יורד עם העומק, כפי שראינו במדידות החד-מימדיות), והן מדגם ההרטבה (איור 16 משמאל), כשהתוצאה הסופית היא ריכוזי חמצן פוחתים עם העומק ועם הקרבה לטפטפת. אחרי שנגמרת עונת ההשקיה, חתך הקרקע הולך ומתעשר בחמצן בקצב איטי ונוצר פרופיל חד-מימדי עם פחיתה בעומק ללא תלות במיקום הטפטפת (איור 17).



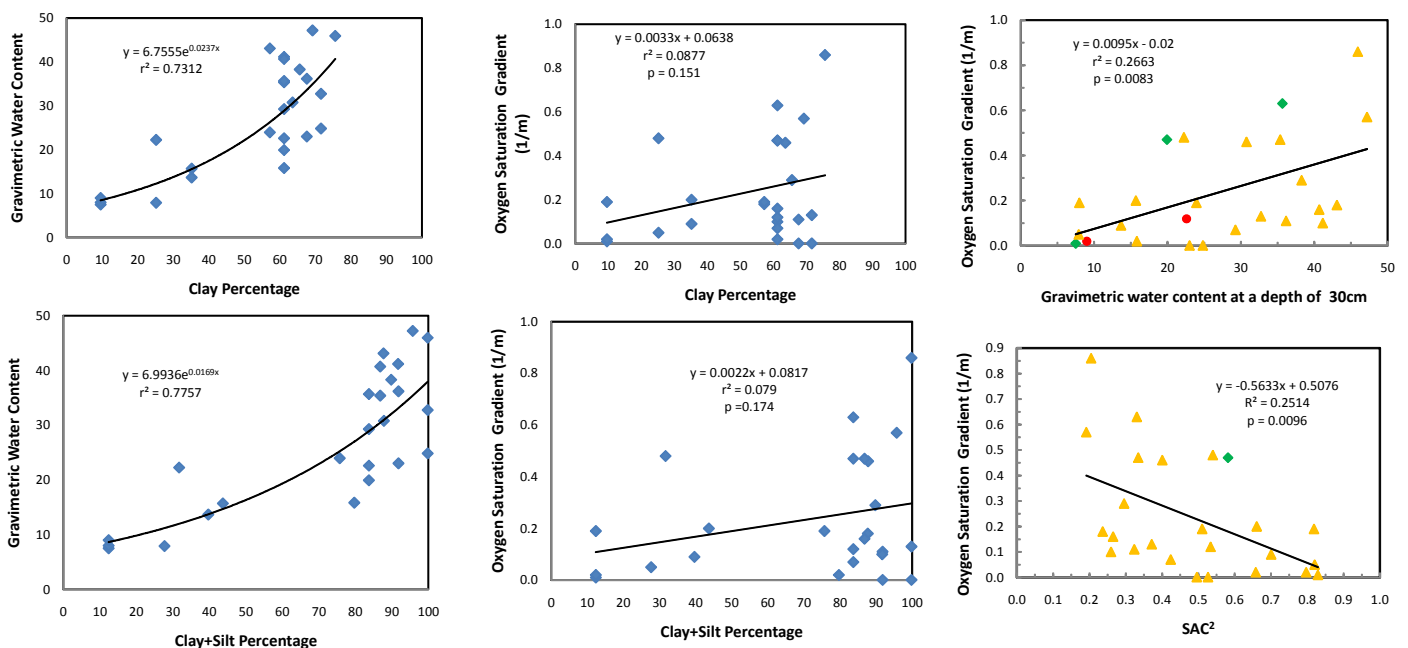
**איור 16.** פירוס דו-מימדי של ריכוזי החמצן בחתך הקרקע שנמדד ב-15 באוקטובר (מימין) ותכולת הרטיבות המשקלית שנמדדה בזמן הטמנת הבקבוקים ב-11 באוקטובר (משמאל) בחלקת ניסוי במטע של אשכולית אדומה בקיבוץ שריד (השקיה גבוהה בקולחים בשלוחה אחת).



**איור 17.** השתנות הפירוס הדו-מימדי של ריכוזי החמצן בחתך הקרקע בחלקת הניסוי במטע האשכולית האדומה בקיבוץ שריד משלהי עונת ההשקיה ועד האביב (המדידה האחרונה ב-8 באפריל 2008, נתנה ריכוזי חמצן גבוהים שיורדים מ-100% בפני הקרקע ל-90% בעומק של 70 ס"מ – חתך "לבן" כולו בסקלה הגרף).

מהנתונים שנצברו עד כה בסקר האוורור עולה שרק בקרקעות עם תכולת חרסית גבוהה (מעל 40 עד 50%) נמדדים ריכוזי חמצן נמוכים, בעיקר בתקופה של השקיה אינטנסיבית או אחרי סופת גשמים חזקה בחורף. כדי לבדוק את תלות ריכוזי החמצן בקרקע במרחק הקרקע ובתכולת הרטיבות שלה ערכנו בדיקות של מצב האוורור בכל המטעים במשך יומיים ובמקביל למדידת ריכוזי החמצן בשלושת העומקים, דגמנו ומדדנו גם את תכולת הרטיבות המשקלית בעומק 30 ס"מ, מרכז תחום המדידה (פני הקרקע עד לעומק של 60 ס"מ). בכל מטע קבענו את השיפוע הממוצע של ריכוזי החמצן בעומקים 0 עד 60 ס"מ על ידי רגרסיה ליניארית לערכים המדודים (ריכוז רוויה, 1, בפני הקרקע, ושתי חזרות לריכוזים בעומקים של 20, 40 ו-60 ס"מ). התרשימים באיור 18 בוחנים את המתאם בין מפל (השיפוע של) ריכוזי החמצן בקרקע לבין מרחק הקרקע ותכולת הרטיבות והאווריר שלה. ניתן לראות שקיים מתאם גבוה בין תכולת הרטיבות של הקרקע לבין אחוז

החרסית בעומק 30 ס"מ (או החרסית+הסילט, משמאל). ריכוז החמצן יורד לערכים נמוכים יותר ככל שהקרקע חרסיתית יותר וככל שהקרקע רטובה יותר, כשהמתאם בין מפל ריכוז החמצן באוויר הקרקע ותכולת רטיבותה (מימין למעלה) גבוה מהמתאם שקיים בין מפל ריכוזי החמצן וריכוז החרסית (באמצע למעלה). מקדמי הקורלציה אמנם נמוכים, אבל המתאם בין מפל ריכוזי החמצן בעומק 0 עד 60 ס"מ ותכולת הרטיבות המשקלית בעומק 30 ס"מ מובהק ברמה של 0.01. מנגנון ההסעה העיקרי של החמצן לעומק הקרקע הוא הדיפוסיה המולקולארית שלו בפאזה הגזית. מקדם הדיפוסיה של החמצן בקרקע תלוי בעיקר בתכולת האוויר הנפחית ומתכונות בקירוב לריבוע של תכולת האוויר. בתרשים 18 מימין למטה אכן נראה שהמתאם (השלילי) בין מפל ריכוזי החמצן לבין ריבוע תכולת האוויר הנפחית מובהק ברמה של 0.01. (במקביל לסקר במטעים הטמנו בקבוקים מחוררים ובדקנו את ריכוזי החמצן גם בגידולים חד שנתיים: פלפל ועגבנייה בקרקע חולית בחוות הבשור ובקרקע חרסיתית בבני עטרות. בחוות הבשור נמדדו ריכוזי חמצן גבוהים מאג שירדו לערכים של 99% רוויה ו-98% רוויה בעומק של 60 ס"מ, בפלפל ועגבנייה. בבני עטרות נמדדו ריכוזי חמצן נמוכים יותר, במיוחד בפלפל באיזור עם ניקוז בעייתי – שם גם נראו צמחים לא מפותחים שהניבו כרבע מהיבול של צמחים באותה ערוגה באיזור בו היה ניקוז תקין.)

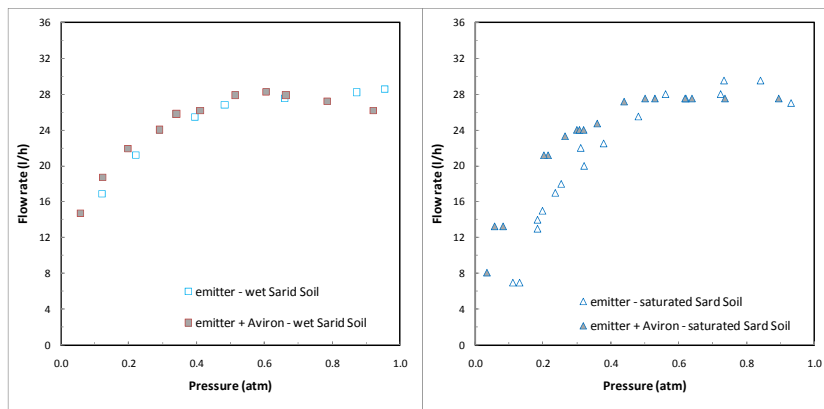


**איור 18. משמאל:** מתאם בין תכולת הרטיבות המשקלית בעומק 30 ס"מ ובמרחק של 20 ס"מ מהטפטפת (באחוזים) שנמדדה ב-9 וב-11 בספטמבר 2008 לבין אחוז החרסית בעומק 30 ס"מ (למעלה) ואחוז החרסית+הסילט (למטה). **באמצע:** מתאם בין השיפוע של ריכוז החמצן באוויר הקרקע בעומק 0 עד 60 ס"מ ובמרחק של 20 ס"מ מהטפטפת שנמדד ב-9 וב-11 בספטמבר 2008 לבין אחוז החרסית בעומק 30 ס"מ (למעלה) ואחוז החרסית+הסילט (למטה). **מימין:** מתאם בין השיפוע של ריכוז החמצן באוויר הקרקע לבין תכולת הרטיבות המשקלית בעומק 30 ס"מ (למעלה) ולבין הריבוע של תכולת האוויר הנפחית (למטה).

### ניסויי הזרקת אויר עם וללא אווירונים לקרקע חרסיתית בדליים של 20 ל'

השלוחות בהן אנחנו משתמשים לניסויי ההזרקה הן עם טפטפות מתווסות, אך לא אל-נגר כדי שיהיה ניתן להזרים אויר בלחץ נמוך יחסית אחרי הזרמת מים דרכן. בדיקה של תלות ספיקת האוויר דרך הטפטפות בלחץ האוויר בשלוחה מראה שהספיקה עולה עד ללחץ של כ-0.5 באר ואח"כ מתייצבת. השתמשנו בטפטפות יוני-רעם מתווסתת (לא אל-נגר) 1 ל'/ש' של נטפים, ובאוויר החופשי קבלנו ספיקה של כ-30 ל'/ש' בלחץ של כ-0.5 באר. ספיקת אויר גדולה פי 30 מזאת של המים בלחץ דומה מתאימה ליחס בין הצמיגות הדינאמית של מים ואוויר. באיור 19 מתוארים עקומי ספיקת אויר – לחץ עם וללא תוספת האווירון (הכדור המחורר) שנמדדו בקרקע עם 60% חרסית מקיבוץ שריד. בקרקע עם תכולת רטיבות

בינונית (34% רטיבות משקלית, משמאל) רואים השפעה קטנה של תוספת האווירון להגדלת ספיקות האוויר. לעומת זאת, כאשר הוזרק אויר לקרקע רוויה נמדדו ספיקות גדולות יותר בתוספת האווירון, בעיקר בלחצים הנמוכים (מימין).



**איור 19. משמאל:** תלות ספיקת האוויר המוזרק לקרקע שריד עם תכולת רטיבות משקלית של 34% בלחץ האוויר בשלוחה. טפטפת יוני-רעם מתווססת (לא אל-נגר) 1 ל"ש, "נטפים" עם וללא כדור פלסטיק מחורר בקוטר 10 ס"מ. **מימין:** הזרקה לקרקע רוויה במים. הקרקעות היו ארוזות בדליים של 25 ליטר, כשעומק הקרקע בדלי הוא כ-35 ס"מ והטפטפות היו בעומק של 30 ס"מ מתחת לפני הקרקע.

### ניסויי הזרקת אויר עם וללא אווירונים לקרקע חרסיתית בחביות של 200 ל' עם וללא צמחים

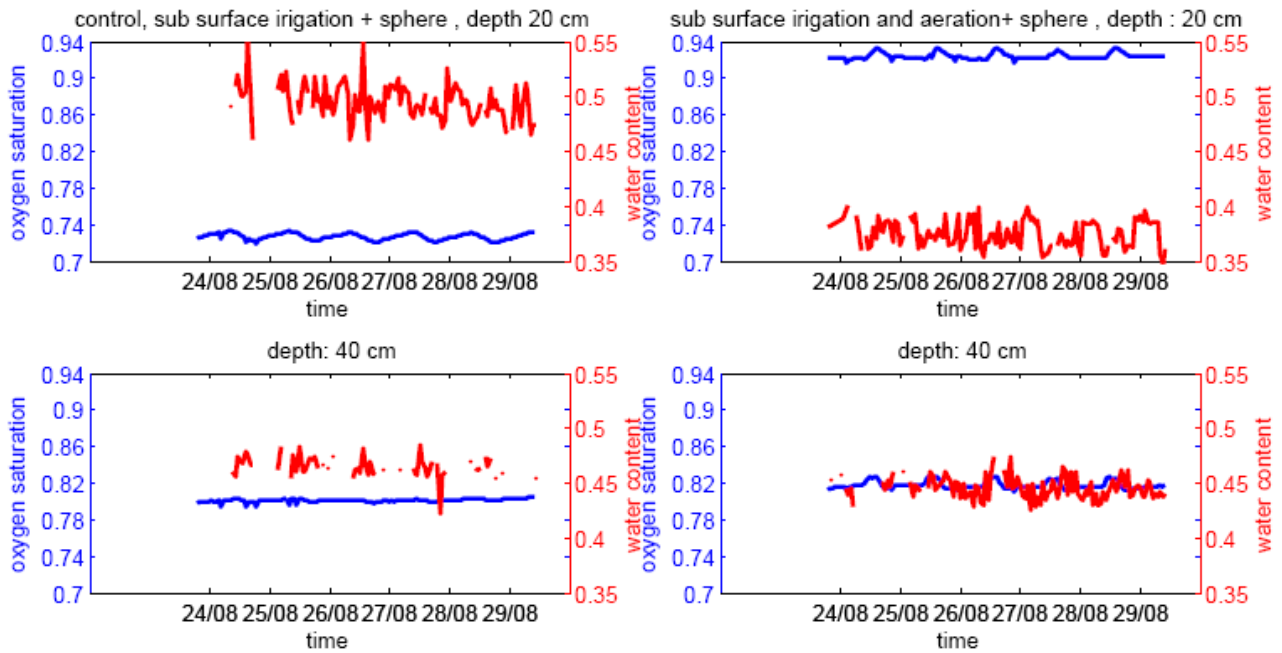


**איור 20.** מראה כללי של ניסוי הזרקת האוויר לחביות עם צמחי פלפל, אוגוסט 2010.

בניסויי ששה טיפולים (1 עד 3: ללא אוורור, מתן מים בלבד, 4 עד 6: בתוספת הזרקת אוויר): 1. טפטוף עילי (טפטפת בודדת לחבית, יוני-רעם 1 ל"ש, נטפים); 2. טפטוף טמון (בעומק 40 ס"מ); 3. טפטוף טמון בתוספת אווירון; 4. טפטוף טמון; 5. טפטוף טמון בתוספת אווירון; 6. מים בטפטוף עילי והזרקת אויר בטפטוף טמון בתוספת אווירון. בכל טיפול 4 חביות שמולאו בקרקע ורטיסול מקיבוץ שריד (55% חרסית, 20% סילט, 20% גיר, 5% נתון חליף) עד לגובה של 90 ס"מ (איור 20). בתחתית החביות צינור ניקוז חופשי. בשתי חביות מכל טיפול הותקנו 2 מחושי TDR ו-2 מחושי חמצן במרחק של 15 ס"מ מציר החבית ובעומקים של 20 ו-40 ס"מ לקריאה רציפה של

ריכוזי החמצן באווירת הקרקע ותכולות הרטיבות. בחבית נוספת בכל טיפול הותקנו בקבוקים מחוררים למדידת ריכוזי החמצן ודו-תחמוצת הפחמן בעומקים של 20, 40 ו-60 ס"מ, בציר החבית ובמרחק של 15 ס"מ ממנו (הרדיוס של החבית הוא כ-25 ס"מ). בתאריך 4 ביולי 2010 נשתלו צמחי פלפל בני 35 יום מזן בנג'י (14511). באיור 21 רואים את השתנות ריכוזי החמצן ותכולות הרטיבות לאורך 5 ימים בשבוע שעבר בטיפולים 3 ו-5 בתקופה בהם הושקתה כל חבית ב-1 ל' מים (ו-1 סמ"ק דשן מור 4:2.5:6 + מיקרו) ליום בשעות 8:00 עד 8:30 (ללא דשן) ו-11:00 עד 11:30 (בתוספת דשן) ואווררה באוויר דחוס למשך שעותיים (כ-90 ליטר אוויר, שהם כ-20 ג' חמצן ביום) ב-4 פעימות של חצי שעה ב-9:30, 10:30, 12:30, ו-13:30. בטיפול האוורור (מימין) תכולות הרטיבות נמוכות יותר, בעיקר בעומק של 20 ס"מ (למעלה), וריכוזי החמצן גבוהים יותר, בעיקר בעומק 20 ס"מ (למעלה) (החמצן בטיפול 3 גבוה יותר בעומק 20 ס"מ מאשר בעומק 40 ס"מ, מכיוון שנמדדו בחביות שונות עקב הרטבות החיישנים). עד לתאריך כתיבת הדו"ח לא הייתה תגובה של הפלפל לטיפול הזרקת האוויר. בתם הניסוי עם הפלפל נשתול עצי הדר.





**איור 21.** ריכוזי החמצן באוויר הקרקע (מוצגים בצורה יחסית כרוויה לעומת 21% חמצן אטמוספרי) ותכולת הרטיבות הנפחית בעומק של 20 ס"מ (למעלה) ו-40 ס"מ (למטה) במרחק של 15 ס"מ מציר החבית בטיפול 3: טפטוף טמון בתוספת אוויר, רק מים (משמאל) ובטיפול 5: טפטוף טמון בתוספת אוויר, מים ואויר (מימין) במהלך חמישה ימים בחודש אוגוסט 2010.

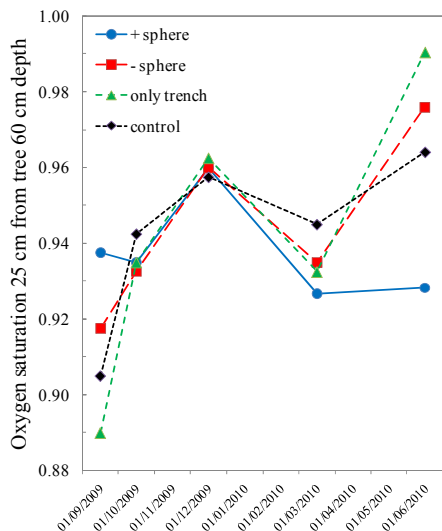
#### ניסויי שדה להזרקת אויר עם וללא אווירונים במטע מנגו צעיר

ביוני 2009 הטמנו שלווחות (0.6 Dripnet ל/ש כל 50 ס"מ, נטפים, עם וללא אווירונים) בעומק של 40 ס"מ במרחק של 50 ס"מ משני צדי שורות העצים במטע מנגו צעיר (זן קיט) של קיבוץ עמידה, מרווחי נטיעה של 6 על 2 מ' (איור 22).

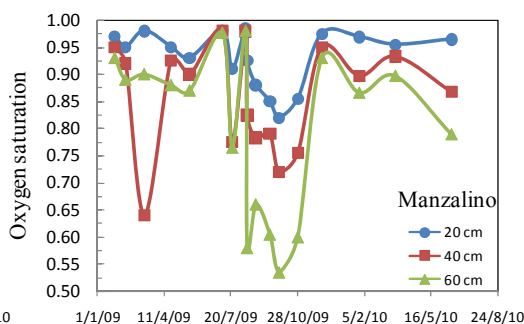
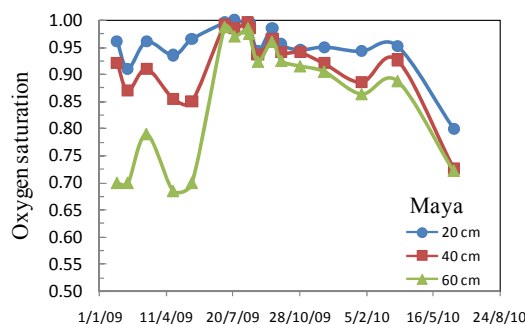


**איור 22. משמאל:** תעלות חפורות בעומק של 40 ס"מ במרחק של 50 ס"מ משני צדי שורות העצים. **באמצע:** שלווחת טפטוף בתוספת אווירונים בתוך התעלה לפני כיסויה. **מימין:** שורות העצים לאחר כיסוי התעלות והמדחס.

בניסוי ארבעה טיפולים: 1. הזרקת אוויר בתוספת אווירונים; 2. הזרקת אויר ללא אווירונים; 3. חפירת וכיסוי תעלות ללא הזרקת אוויר; 4. בקורת משקית: ללא חפירת תעלות וללא הזרקת אוויר. ההשקיה בכל הטיפולים היא בטפטוף עילי בשתי שלווחות במרחק של 50 ס"מ משני צדי העצים בממשק הרגיל על ידי המגדל (עובד גסטר, קיבוץ עמידה). הקרקע היא אבנית וגירנית מאד (40% חרסית, 35% סילט, 50% גיר). דחיסת האוויר בטיפולים 1 ו-2 היא למשך 18 שעה אחת כל יום, 4 מחזורים של רבע שעה, כשספיקת הטפטפות היא כ-18 ליטר אויר לשעה. בסמוך לטפטפות האוויר הוטמנו בקבוקים מחוררים במרחק של 25 ס"מ משורת העצים בעומקים של 20, 40 ו-60 ס"מ, ובמרחק של 50 ס"מ



**איור 23.** ריכוזי החמצן באוויר הקרקע (מוצגים בצורה יחסית כרוויה לעומת 21% חמצן אטמוספרי) בעומק של 60 ס"מ במרחק של 25 ס"מ משורת העצים בחדר ניצב לטפטפות האוורור.



**איור 24.** ריכוזי החמצן באוויר הקרקע (מוצגים בצורה יחסית כרוויה לעומת 21% חמצן אטמוספרי) במרחק 20 ס"מ מהטפטפת בשלושה עומקים (20, 40 ו-60 ס"מ) בשני מטעי מנגו בוגרים בקיבוץ עמידה.

### ניתוח תיאורטי של תהליך הזרקת האוויר לקרקע

כדי לפתח מודל זרימה שמוליך לביטויים מתמטיים פשוטים דיים לתיאור תהליך הזרקת האוויר לקרקע, אנחנו מניחים ש:

- צפיפות האוויר זניחה ביחס לצפיפות המים (קטנה פי 1000), כך שכח העילוי הפועל על האוויר שווה בגודלו לכח הכובד הפועל על המים והפוך בכיוונו.
- הצמיגות הדינאמית של +האוויר זניחה לעומת זאת של המים (קטנה פי 50 בערך), כך שתנועת אוויר משמעותית מתרחשת גם בגרדיאנטים קטנים של לחצים.
- ניתן לתאר את הפיזור המאקרוסקופי של האוויר המוזרק לקרקע כהתקדמות של חזית אוויר יציבה הדוחקת את המים ולהשתמש במשוואת רצף דוגמת משוואת דארסי תיאור דגם פיזור האוויר.
- ניתן לתאר את תלות המוליכות (החדירות) של הקרקע לאוויר בלחץ הקפילרי באמצעות פונקציה מעריכית.
- ההגעה למצב תמידי היא מהירה, לכן ננתח כאן רק מצבים של זרימה תמידית (קבועה בזמן).

### משוואות המודל:

משוואת שימור המסה עבור זרימת אוויר תמידית היא:

$$\text{div}(\rho_a \bar{v}_a) = 0 \quad [1]$$

( $\rho_a$  – צפיפות האוויר ו- $\bar{v}$  – מהירות הזרימה)

הרכיב האנכי ( $v_z$ ) והאופקי ( $v_r$ ) של מהירויות הזרימה (במערכת צירים גלילית:  $r, z$ ) מתוארים על ידי משוואת דארסי:

$$v_z = -\frac{K}{\mu_a} \left( \frac{\partial P_a}{\partial z} + \rho_a g \right), \quad v_r = -\frac{K}{\mu_a} \frac{\partial P_a}{\partial r} \quad [2]$$

(K) - מוליכות הידראולית" לאוויר,  $P_a$  - לחץ האוויר,  $g$  - תאוצת הכובד,  $\mu_a$  - צמיגות דינאמית של האוויר) ובהזנחת משקל האוויר:

$$\bar{v}_a = -\frac{K}{\mu_a} \text{grad } P_a \quad [2a]$$

אנחנו מבחינים בין שני מצבים קיצוניים על-פי תכולת הרטיבות של הקרקע: (1) כאשר תכולת הרטיבות נמוכה ולא פועל כח עילוי על האוויר; (2) כאשר הקרקע רוויה במים. לתיאור זרימת האוויר אנחנו מניחים בשני המקרים שהמים נייחים ורק האוויר נע.

בתכולות רטיבות נמוכות אנחנו גם מניחים ש- $K$  קבוע במרחב ואם מזניחים את דחיסות האוויר (תלות הצפיפות בלחץ,  $\rho_a(P_a)$ ) מקבלים מ-[1] ו-[2a] משוואת לה-פלאס:

$$\nabla^2 P_a = 0 \quad [3]$$

( $\nabla^2$  מציין לאפלסיין בקואורדינטות מימדיות)

ניתן לכלול בקלות את השפעת דחיסות האוויר (על-פי משוואת המצב של גז אידאלי:  $P_a = \rho_a^\circ (P_a^\circ / P_a^\circ)$ ,  $\rho_a^\circ$  ו- $P_a^\circ$  קבועים) והמשוואה נותרת לינארית, דוגמת משוואה [3], אבל ב- $P^2$ :

$$\nabla^2 P_a^2 = 0 \quad [4]$$

מאחר ולחץ המים,  $P_w$ , קבוע, ניתן לבטא את הפתרונות ל-[3] ו-[4] גם במושגים של לחץ קפילרי,  $P_c = P_a - P_w$ . במצב הקיצוני השני, הזרקת אויר לקרקע רוויה במים, ניתן להניח פירוס הידרוסטטי ( $P_w = -\rho_w g z$ ) של המים, ומשוואת דארסי [2] מנוסחת עם הלחץ הקפילרי מקבלת את הצורה:

$$v_z = -\frac{K}{\mu_a} \left( \frac{\partial P_c}{\partial z} - \rho_w g \right), \quad v_r = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial P_c}{\partial r} \quad [5]$$

אלא שעכשיו מוליכות האוויר הנה פונקציה של הלחץ הקפילרי. אם מזניחים את דחיסות האוויר מקבלים מ-[1] ו-[5]

$$\nabla(K \nabla P_c) = \rho_w g \frac{\partial K}{\partial z} \quad [6]$$

שימוש בטרנספורמציה של קירכהוף, עם פוטנציאל קירכהוף,  $\phi$ , המוגדר כ:

$$\phi = \frac{1}{\mu_a} \int_0^{P_c} K dP_c \quad [7]$$

מאפשר ליניאריזציה של משוואה [6] שמקבלת את הצורה:

$$\nabla^2 \phi = \rho_w g \frac{\partial K}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad [8]$$

ואם תלות מוליכות הקרקע לאוויר בלחץ הקפילרי יכולה להיות מיוצגת על ידי פונקציה מעריכית:

$$K = K_0 \exp(AP_c), (A > 0, K_0 > 0) \quad [9]$$

משוואה [8] הופכת להיות

$$\nabla^2 \varphi = \alpha \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad [10]$$

עם פרמטר יחיד,  $\alpha$ , המבטא את היחס (המאקרוסקופי) בין השפעת כח העילוי והשפעת גרדיאנט הלחצים:

$$\alpha = \rho_w g A \quad [11]$$

הפתרונות הדרושים למשוואות [3] ו-[10] במרחב  $0 < r \leq \infty, 0 < z \leq -\infty$  הם עבור מקור נקודתי עם שטף קבוע ב- $r \rightarrow 0$  ובעומק של  $z = z_*$  מתחת לפני הקרקע, שם שורר תנאי שפה של לחץ אטמוספירי קבוע ( $P_0$ ).

למקור נקודתי המקיים את משוואת לה-פלאס [3], עבור קרקע לא רוויה יש פוטנציאל,  $\Delta \Phi = K_0(P_a - P_0)$ , המקיים:

$$\Delta \Phi(r, z) = \frac{q}{4\pi} \left( \frac{1}{\rho_-} - \frac{1}{\rho_+} \right) \quad [12]$$

ופונקצית הזרם הלא מימדית שלו,  $\Psi = \psi/q$ , בעזרתה ניתן לשרטט את קווי הזרם היא:

$$\Psi = 1 - 0.5 \left( \frac{z_+}{\rho_+} - \frac{z_-}{\rho_-} \right) \quad [13]$$

(q היא ספיקת המקור ו- $\rho_{\mp} = \sqrt{r^2 + z_{\mp}^2}$  ו- $z_{\mp} = (z \mp z_*)$  הם משתני מרחב מרוכבים. הסימן "-" הוא עבור המקור

הממשי ב- $(r, z) = (0, z = z_*)$  והסימן "+" עבור הדמות שלו עם ספיקה זהה שלילית ב- $(r, z) = (0, z = -z_*)$ .

הפתרון למשוואה 10 (בקרקע רוויה, וישים גם לקרקעות בדרגות רוויה גבוהות) הוא:

$$\varphi(R, Z) = \frac{\alpha q}{8\pi} \left[ \frac{\exp(Z_- - \rho_-)}{\rho_-} - \frac{\exp(Z_- - \rho_+)}{\rho_+} \right] \quad [14]$$

עם משתני מרחב  $\rho_{\mp} = \sqrt{R^2 + Z_{\mp}^2}$  ו- $Z_{\mp} = (Z \mp Z_*)$  מבוטאים בקואורדינטות לא-מימדיות:

$$Z/z = Z_*/z_* = R/r = \alpha/2 \quad [15]$$

ופונקצית הזרם הלא מימדית,  $\Psi = \psi/q$ , המתאימה לפתרון [14] הינה:

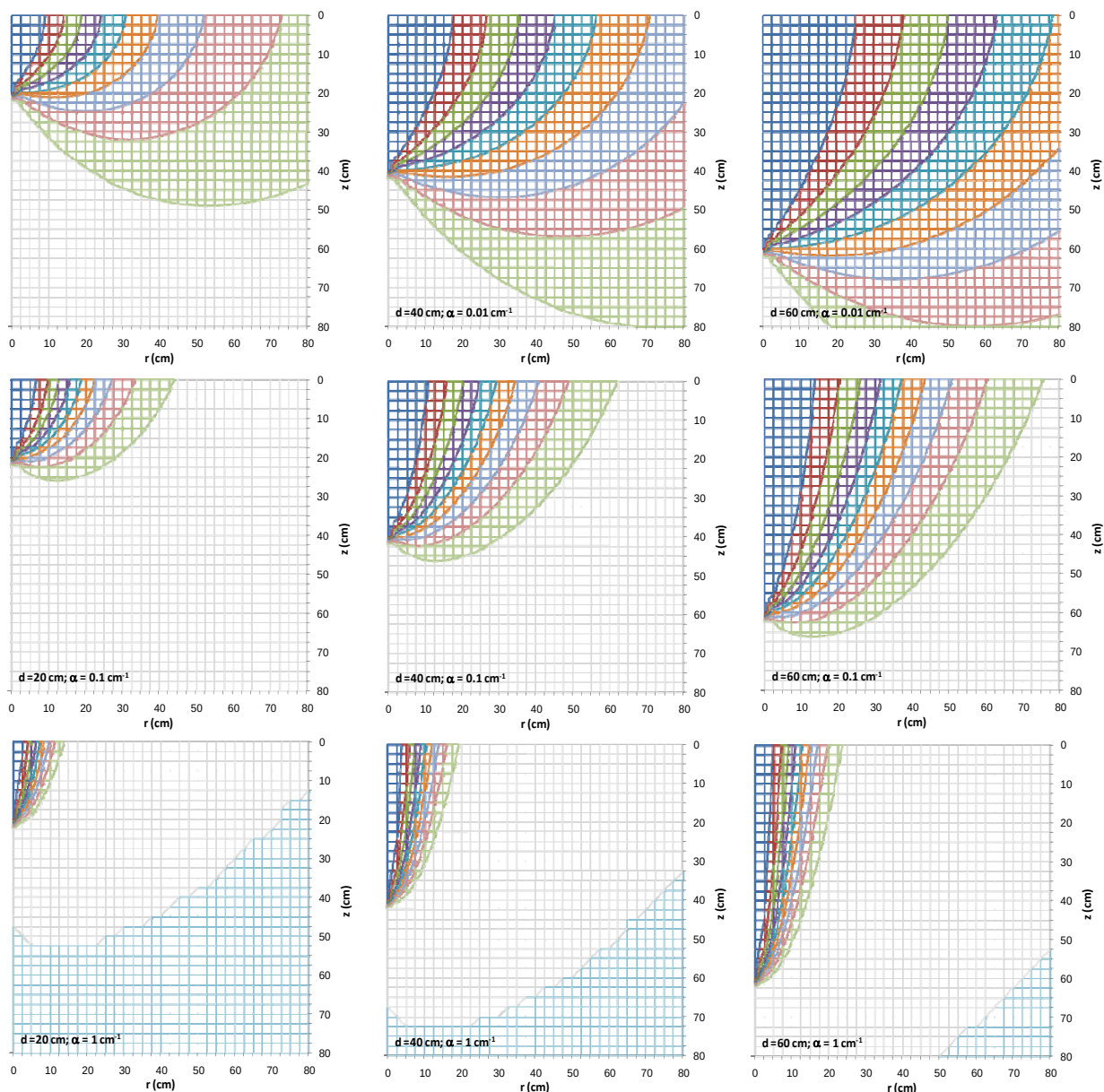
$$\Psi = 1 - \frac{1}{2} \left[ \left( 1 + \frac{Z_-}{\rho_-} \right) \exp(Z_- - \rho_-) - \left( 1 - \frac{Z_+}{\rho_+} \right) \exp(Z_- - \rho_+) \right] \quad [16]$$

#### דגם פיזור האוויר המוזרק לקרקע:

שרטוט של קווי הזרם (על-פי משוואה [16]) של האוויר המוזרק לקרקע על-פי הפתרון הכללי הלוקח בחשבון את השפעת גרדיאנט הלחצים וכח העילוי הפועל על האוויר (משוואה [10]) מדגים את השפעת עומק ההזרקה והיחס בין כח העילוי וגרדיאנט הלחצים על דגם פיזור האוויר ממקור נקודתי בעצמה קבועה (איור 25). עבור מצבים של כח עילוי משמעותי (ערך גבוה של הפרמטר  $\alpha$ ), תכולות רטיבות גבוהות (או מרקם קרקע חולי) ניתן לראות שתנועת האוויר היא רק כלפי מעלה (3 התרשימים התחתונים). לעומת זאת, בקרקע יבשה (או עם מקטע מאד חרסיתי) ניתן לראות זרימת אוויר משמעותית, גם לצדדים ולמטה, שזהו המצב הרצוי. ככל שעומק ההזרקה קרוב יותר לפני השטח (20 ס"מ בתרשימים



משמאל לעומת 60 ס"מ (בתרשימים מימין) ניכרת השפעה גדולה יותר של (תנאי השפה של) הלחץ האטמוספרי הקבוע בפני השטח. במצבים של כח עילוי דומיננטי ( $\alpha = 1 \text{ cm}^{-1}$ , תרשימים תחתונים) הגדלת עומק ההזרקה אינה משפרת בהרבה את המצב ורב האוויר המוזרק עולה למעלה ומאורר חלק קטן מדי מנפח הקרקע.

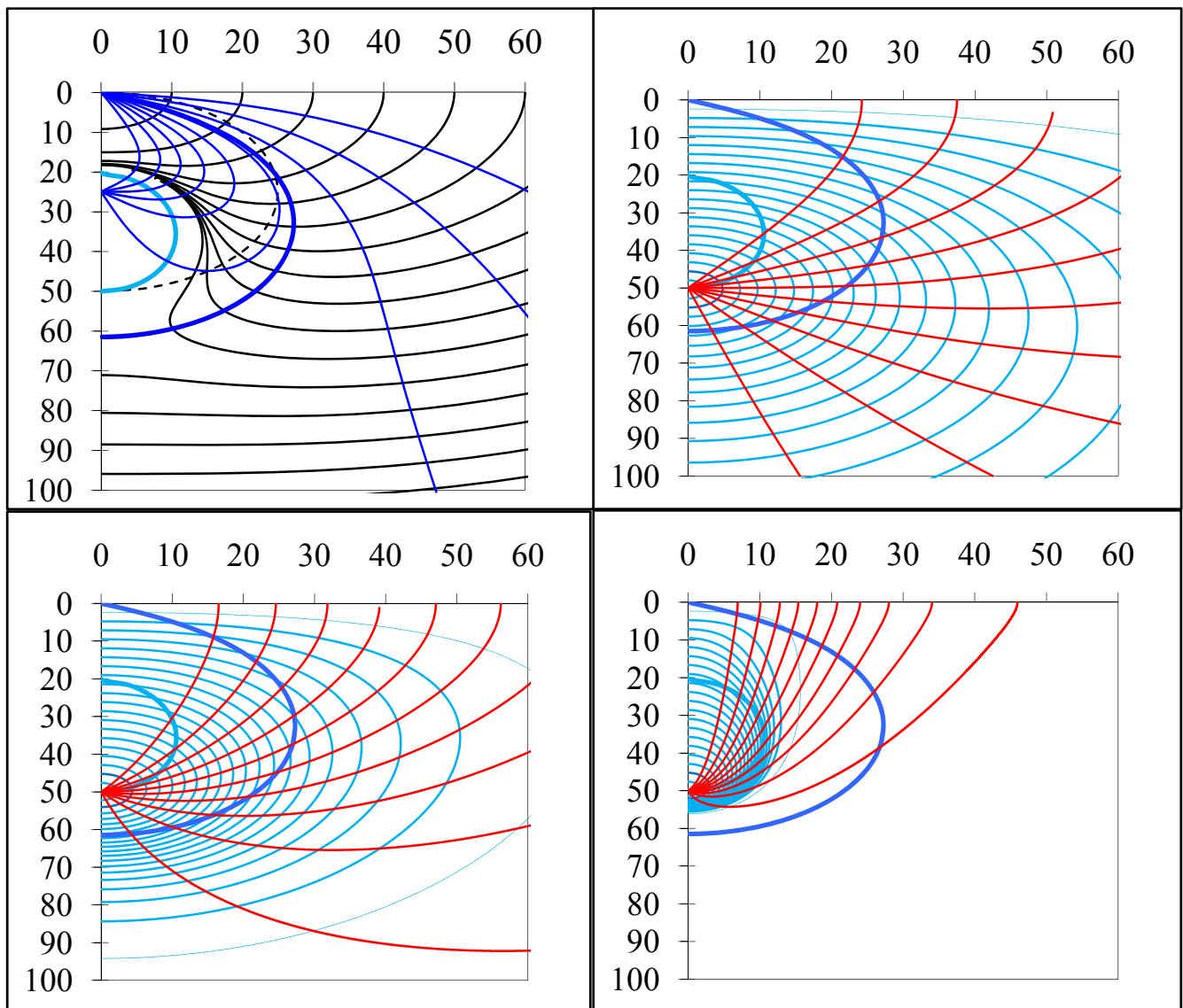


**איור 25.** דגם פיזור האוויר המוזרק לקרקע ממקור בעצמה של 1 ל/ש הנמצא בעומק של 20 (שמאל), 40 (אמצע) ו-60 ס"מ (ימין) מתחת לפני הקרקע עם ערכים של הפרמטר  $\alpha$  המתאימים למצב של קרקע (חרסיתית) יבשה ללא כחי עילוי ( $\alpha = 0.01 \text{ cm}^{-1}$ , למעלה), מצב של קרקע (חולית) קרובה לרוויה ( $\alpha = 1 \text{ cm}^{-1}$ , למטה) ומצב ביניים ( $\alpha = 0.1 \text{ cm}^{-1}$ , באמצע). תשעת קווי הזרם המשוורטים (על-פי פונקצית הזרם של הפתרון הכללי, משוואה [16]) מציינים 10% עד 90% מספיקת האוויר היוצא באינטרוול של 10%.

#### התאמה בין דגם פיזור האוויר המוזרק לקרקע לבין איזור קליטת המים על ידי השורשים:

התרשימים באיור 26 מדגימים את ההתאמה האפשרית בין איזור קליטת המים לבין האיזור המאורר על ידי האוויר המוזרק לקרקע. כדי לתאר את איזור קליטת המים הפעיל השתמשנו במודל פשוט של מקור מים (טפטפת בפני הקרקע) ומבלע נקודתיים מצומדים ממנו מתקבל דגם זרימה ואיזור קליטה הנראים בתרשימים השמאלי העליון. קו זרם המים החשוב ביותר הוא זה התוחם את איזור קליטת המים מאיזור החילחול לעומק (מסומן בקו כחול עבה החוצה את הציר  $r = 0$

בנקודות  $z=0$  ו- $z=61\text{cm}$ ). כשהאוויר מוזרק לקרקע יבשה יחסית ונע רק כתוצאה מגרדיאנט לחצים הוא מתפזר לכל הכיוונים (לכאורה, יותר מדי למטה ולצדדים), כלומר מאורר את כל איזור קליטת המים (לכאורה, גם איזורים לא רלוונטיים שאין בהם שורשים קולטי מים) (למעלה מימין). בהשפעתו של כח עילוי מתון נראה דגם דומה של פיזור אויר שמצליח לאורר את כל נפח הקרקע הפעיל בקליטת מים (תרשים משמאל למטה, עבור  $\alpha = 0.04\text{ cm}^{-1}$ ). רק במצב המאופיין על ידי כח עילוי מאד דומיננטי, מתקבלת תנועת אוויר בכיוון מועדף כלפי מעלה ואורר לקוי של החלקים התחתונים והלטרליים של נפח בית השורשים הפעיל (תרשים מימין למטה, עבור  $\alpha = 0.4\text{ cm}^{-1}$ ).



**איור 26. משמאל למעלה:** דגם פיזור המים מטפטפת עם ספיקה של 1 ל/ש הממוקמת על פני הקרקע בראשית הצירים בקרקע עם התכונות הבאות:  $K_{sat} = 1\text{cm/h}$ ;  $\alpha_{water} = 0.04\text{ cm}^{-1}$ . מרכז בית השורשים הפעיל הוא בעומק של 25 ס"מ מתחת לטפטפת והקליטה היחסית (חלק המים שנקלט על ידי השורשים) היא 62%. קווים שווים עומד ההידראולי מסומנים בקו שחור. קווי הזרם מסומנים בקו כחול, הקו האליפטי הפנימי, בין 20 ל-50 ס"מ, מציין את איזור מבלע המים במודל הקליטה והקו אליפטי החיצוני, בין 0 ל-61 ס"מ מציין את קו הזרם הגבולי, המפריד בין נפח הקרקע הפנימי ממנו מתרחשת קליטת מים לבין נפח הקרקע החיצוני ממנו מחלחלים המים לעומק (מופיעים כקווים כחולים עבים גם בתרשימים הבאים).

**מימין למעלה:** דגם פיזור האוויר ממקור נקודתי בספיקה של 1 ל/ש הממוקם בעומק של 50 ס"מ "לקרקע יבשה", כלומר פיתרון של משוואת לה-פלאס [12] עבור לחץ אטמוספרי קבוע בפני הקרקע. קווים שווים לחץ מסומנים בקו כחול. קווי הזרם [13] מסומנים בקו אדום: 9 קווים של 10% עד 90% באינטרוול של 10% וקו זרם אחרון המתאר 99% מהספיקה.

**משמאל למטה:** דגם פיזור האוויר ממקור נקודתי בספיקה של 1 ל/ש הממוקם בעומק של 50 ס"מ "לקרקע רוויה" המאופיינת על ידי  $\alpha_{air} = 0.04\text{ cm}^{-1}$  (אופייני לקרקע דקת מרקם או בדרגת רוויה נמוכה יחסית), כלומר פיתרון למשוואה הכללית עם לחץ אטמוספרי קבוע בפני הקרקע [14]. קווים שווים לחץ מסומנים בקו כחול. קווי הזרם [16] מסומנים בקו אדום: 9 קווים של 10% עד 90% באינטרוול של 10% וקו זרם אחרון המתאר 99% מהספיקה.

**מימין למטה:** דגם פיזור האוויר ממקור נקודתי בספיקה של 1 ל/ש הממוקם בעומק של 50 ס"מ "לקרקע רוויה" המאופיינת על ידי  $\alpha_{air} = 0.4\text{ cm}^{-1}$  (אופייני לקרקע גסה מרקם או בדרגת רוויה גבוהה), כלומר פיתרון למשוואה הכללית עם לחץ אטמוספרי קבוע בפני הקרקע [14]. קווים שווים לחץ מסומנים בקו כחול. קווי הזרם [16] מסומנים בקו אדום: 9 קווים של 10% עד 90% באינטרוול של 10% וקו זרם אחרון המתאר 99% מהספיקה.

1. פרידמן ש, מאירי א, נפתלייב ב, דיין ח, דננבאום ב, איזנקוט א, גרינוולד ד, תדמור ד, (2002). התאמת ממשק וטכנולוגיה להשקיית אשכולית אדומה בקולחים מטופלים של עמק יזרעאל, דו"ח סופי לתכנית מחקר מספר 306-0359, מוגש לקרן המדען הראשי של משרד החקלאות.
2. פרידמן ש, מאירי א, נפתלייב ב, דיין ח, דננבאום ב, איזנקוט א, , ותדמור ד, (2005). התאמת שטח ההשקיה בטפטוף וממשקי ההשקיה והשטיפה לשימוש מיטבי בקולחים מושבים להשקיית פרדסים. דו"ח שנתי לשנת 2005 לתכנית מחקר מספר 304-0287, מוגש לקרן המדען הראשי של משרד החקלאות.
3. Armstrong, W. (1979). Aeration in higher plants. *Adv. Bot. Res.* 7, 225-332.
4. Asplund, P.T., and Curtis, W.R. (2001). Intrinsic oxygen use kinetics of transformed plant root culture. *Biotechnolo. Prog.*, 17:481-489.
5. Bar-Yosef, B., Stammers, C., and Sagiv, B. (1980). Growth of trickle-irrigated tomato as related to rooting volume and uptake of N and water. *Agron. J.* 72, 815-822.
6. Ben-Gal, A., Lazorovitch, N., and Shani, U. (2004) Subsurface drip irrigation in gravel-filled cavities. *Vadose Zone J.* 3: 1407-1413.
7. Berry, L.J., and Norris, W.E. (1949). Studies of onion root repairation. Velocity of oxygen consumption in different segments of root if different temperatures as a function of partial pressure of oxygen. *Biochim. Biophys. Acta.* 3:593.1949,
8. 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.
9. Bhattarai, S.P., Pendergast, L., and Midmore, D. J. (2006). Root aeration improves yield and water use efficiency of irrigated tomato in heavy clay and saline soils. *Sci. Hortic.* 108:278-288.
10. Bhattarai, S.P., Su, N., and Midmore, D. J. (2005). Oxygation unblocks yield potentials of crops in oxygen-limited soil environments. *Adv. Agronomy* 88: 313-317.
11. Bryce, J. H., Focht, D. D., and Stolzy, L. H. (1982). Soil aeration and plant growth response to urea peroxide fertilization. *Soil Sci.* 134, 111-116.
12. Busscher, W. J. (1982). Improved growing conditioris through soil aeration. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 13,401-409.
13. Bryla, D. R., T. J. Bouma, U. Hartmond, and D. M. Eissenstat (2001) Influence of temperature and soil drying on respiration of individual roots in citrus: integrating greenhouse observations into a predictive model for the field. *Plant, Cell & Environment*, 24, 781-790.
14. Glinski, J., and Stepniewski, W. (1985). "Soil Aeration and its Role for Plants." CRC Press, Boca Raton.
15. Goorahoo, D., Carstensen, G., Zoldoske, D. F., Norum, E., and Mazzei, A. (2002). Using air in sub-surface drip irrigation (SDI) to increase yields in bell peppers. *Int. Water Irrig.* 22,39-42.
16. Grable, A. R. (1966). Soil aeration and plant growth. *Adv. Agron.* 18, 57-106.
17. Herr, E. M., and Jarrel, W. M. (1980). Response of Chrysanthemum to urea peroxide. *Hort. Sci.* 15, 501-502.
18. Hodgson, A.S., and MacLeod, D.A. (1989) Use of oxygen flux density to estimate critical air-filled porosity of a vertisol. *Soil Sri. Soc. Am., Proc.* 53, 355-361.
19. MacDonald, J.D., Costello, L.R., Lichter J.M., and Quickert, D. (2004) Fill Soil effects on soil aeration and tree growth. *J. Arbooriculture* 30:19-27.
20. Meek, B. D., Ehlig, C. F., Stolzy, L. H., and Graham, L. E. (1983). Furrow and trickle irrigation: Effects on soil oxygen and ethylene and tomato yield. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47, 631-635.
21. Melsted, S. W., Krutz, T., and Bray, R. (1949). Hydrogen peroxide as an oxygen fertilizer. *Agron J.* 41: 97.
22. Shani, U, Xue, S, GordinKatz, R, and Warrick, A.W. (1996) Soil-limiting flow from subsurface emitters: I. Pressure measurements. *J. Irrigation Drainage Eng.-ASCE* 122: 291-295.
23. Silberbush, M., Gornat, B., and Goldberg, D. (1979). Effect of irrigation from a point source (trickle) on oxygen flux and on root extension in the soil. *Plant Soil.* 52, 507-514.
24. Stolzy, L.H., Van Gundy, S. D., Labanauskas, C. K., and Szuszkiewicz, T.E. (1963). response of *Tylenchulus semipenetrans* infected citrus seedlings to soil aeration and temperature. *Soil Sci.* 96: 292-298.

## סיכום עם שאלות מנחות

נא להתייחס לכל השאלות בקצרה ולעניין, ב-3 עד 4 שורות לכל שאלה (לא תובא בחשבון חריגה מגבולות המסגרת המודפסת). שיתוף הפעולה שלך יסייע לתהליך ההערכה של תוצאות המחקר.  
**הערה:** נא לציין הפניה לדו"ח אם נכללו בו נקודות נוספות לאלה שבסיכום.

### מטרות המחקר תוך התייחסות לתוכנית העבודה

מטרות המחקר היו: 1. פיתוח הטכנולוגיה של מיכלי אוורור טמונים; 2. בחינת יעילות אוורור קרקעות כבדות בשיטה המוצעת; 3. בחינת השפעת העלאת ריכוזי החמצן על הצימוח והניבה במטע.

### עיקרי הניסויים והתוצאות

מהנתונים שנצברו עד כה בסקר האוורור עולה שרק בקרקעות עם תכולת חרסית גבוהה (מעל 40 עד 50%) נמדדים ריכוזי חמצן נמוכים, בעיקר לאחר השקיה או סופת גשמים חזקה בחורף. רק בשני מטעי אבוקדו בעמק יזרעאל נמדדו ריכוזי חמצן נמוכים (כ-50% מאטמוספריים) לאורך מרבית עונת ההשקיה. ברוב המטעים האחרים בהם נתגלו ריכוזי חמצן נמוכים, הם שררו לאורך תקופה מוגבלת, למשל בתפוח בחודש מרץ, באפרסק בחודש אפריל ובאפרסמון בחודש ספטמבר במטעים סמוכים במושב בני עטרות שבשפלת החוף. ריכוזי החמצן נמוכים יותר במטעים מושקים בשלוחה אחת לעומת אלו המושקים בשתי שלוחות טפטוף לשורת עצים. מניסויי הזרקת האווריר שבצענו עד כה עולה שהאווריר מקטין במעט את התנגדות הקרקע לזרימת האווריר, במיוחד בתכולות רטיבות גבוהות מאד. מניתוח תיאורטי של בעיית הזרקת אויר דחוס לחתך הקרקע עולה שצריכים להבחין בין 2 מצבים קיצוניים: (1) בהזרקת אווריר לקרקע בתכולות רטיבות נמוכות הכח העיקרי המניע את האווריר הוא מפל לחצים. בתנאים אלו ניתן לתאר את זרימת האווריר על ידי משוואת רצף דיפוזיה עם תנאי שפה של לחץ אויר אטמוספרי בפני השטח. מתקבל פיזור הומוגני, רצוי של האווריר גם בכיוונים אופקיים (השפעת דחיסות האווריר על פיזורו זניחה וניתן להכלילה ללא סיבוך יתר); (2) בהזרקת אווריר לקרקע בתכולות רטיבות גבוהות יש כח מניע משמעותי נוסף: כח העילוי שנובע מהבדלי הצפיפות של המים והאווריר. בתנאים אלו מתקבלות תופעות של זרימת אווריר לא יציבה דרך נתיבים של זרימה מועדפת, כלומר פיזור לא הומוגני (ולא רצוי) של האווריר. גם בתנאים אלו ניתן לתאר (תיאור מקורב) את מעטפת קווי הזרם של האווריר המוזרק על ידי משוואת רצף מסוג קונבקציה-דיספרסיה עם פרמטר מאקרוסקופי המאפיין את היחס בין הכוחות המניעים: כח העילוי ומפל הלחצים.

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

עדיין מוקדם לגבש מסקנות סופיות לגבי בעיית האוורור במטעים ולגבי האפשרות לפתור אותה עם הרעיון שנבדק במסגרת המחקר הנוכחי. לצערנו, לא קבלנו עדיין תגובות של הצמחים לטיפול האוורור בניסויי חביות וניסויי במטע שנמשכים. למרות העיכובים בהתחלת ניסויי החביות והניסויי במטע, אנחנו צוברים ידע רלוונטי.

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

#### יושגו מטרות המחקר בתקופה שנתורה לביצוע תוכנית המחקר?

בניגוד לתוכנית המחקר המקורית ניסוי השדה לא החל בשנה השנייה של המחקר, אלא רק בשנה השלישית. שינוי מהותי נוסף הוא שלמרות שבתכנון המקורי היה לעשות סקר של מצב האוורור רק בשניים או שלושה מטעים מסחריים, החלטנו להרחיב את הסקר למספר גדול בהרבה של כ-35 מטעים. סקר כזה עדיין לא נעשה בארץ או בחו"ל והחלטנו לעשותו בשל 3 סיבות עיקריות: (1) לאמוד את שכיחות וחומרת בעיות האוורור – האם אנחנו "מציאים בעיה שאינה קיימת", אם לא; (2) ללמוד על השפעת הגורמים הסביבתיים והאגרוטכניים על מצב האוורור בתנאים מציאותיים במטעים מסחריים; (3) לבחור מטע (סוג גידול, סוג קרקע) מתאים לעריכת הניסוי.

קיימת בעיה טכנולוגית שעדיין לא פתרנו בצורה מעשית ומשביעת רצון: כיצד להגביל את ספיקת האווריר לערכים נמוכים של ליטרים בודדים לשעה לטפטפת בתנאי שדה – דבר שרצוי מבחינת דגם פיזור האווריר ולא ניתן להשגה עם טפטפות מתווסתות.

### 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, מלבד הרצאה על תוצאות סקר האוורור בפני מדריכי שה"מ. **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

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