

## השפעת תשתית בית השורשים על צמחי פלפל שגודלו בליזימטרים

אביתר איתאל - שה"מ, משרד החקלאות

עמי מדואל, מורן קפון, שבתאי כהן, רבקה אופנבך, יורם צביאלי, ישראל צברי, רמי גולן - מו"פ ערבה תיכונה וצפונית

אלון בן גל - המחלקה לקרקע ומים, מרכז מחקר גילת, מינהל המחקר החקלאי

נפתלי לזרוביץ - המכון לחקלאות באזורים צחיחים, קמפוס שדה בוקר, אוניברסיטת בן גוריון

### תקציר

ארבעה ליזימטרים בנפח של 800 ליטר כל אחד מוקמו בתוך מחפורת בבית צמיחה בתחנת זהר שבכיכר סדום והיוו חלק מניסוי שבוצע בחלקות בקרקע בעונת 2007/8. בתוך הליזימטרים מוקמו ארבע תשתיות בית שורשים: ביקורת חול מקומי, תעלת הזנה טוף, נש"מ (נפח בית שורשים מתוחם) עם ריצפת פלריג ונש"מ ריצפת רשת. לשם הבנת התהליכים המתקיימים בבית השורשים מוקמו חישני טמפרטורה, מתח מים (טנסיומטרים), חמצן, ומליחות (TDR) בעומקים שונים בליזימטרים. ערכי ההשקיה, הצריכה והנקז חושבו מתוך הקריאות הרציפות של המשקל. אחת לחודש נדגמו עלים לקביעת ריכוזי כלוריד. פירות נקטפו ומוינו בתדירות שנקבעה על סמך קצב ההבשלה. בסיום הניסוי נעקרו הצמחים בליזימטרים ונשקלו לקביעת יבול החומר היבש. הליזימטרים הושקו מטיפול השקיה שנקבע להיות "פעמיים צריכת הצמח" כפי שנמדדה בליזימטרים. ערכי האוופוטורנספירציה בליזימטר הביקורת היו גבוהים מהאחרים בתקופת החורף ולא היו שונים באביב. בתקופת החורף ערכי הצריכה היו נמוכים מ- 2 מ"מ ליום והחל ממחצית ינואר חלה עלייה קווית שהגיע לכדי 6 מ"מ בחודש מרץ. צריכת הצמחים בתקופת החורף הייתה מעט נמוכה מ- 0.5 מערכי ההתאדות בגיגית חוץ ואילו בחודשי האביב מעט גבוהה מ- 0.5 מערכי הגיגית. ערכי המליחות בתמיסת הנקז היו כפולים בדרך כלל מערכי מי ההשקיה. חיישני חמצן אווירני סיפקו נתונים על פירוס השורשים. ירידת ריכוז החמצן האטמוספרי בכ- 1% במהלך תקופת המדידות הייתה מונעת מהתחממות האוויר וירידת הלחץ החלקי של החמצן שפחת בקרקע בכ- 3%. השפעות קליטת החמצן על ריכוזי החמצן באווירת הקרקע מבטאות את מיקום המסה העיקרית של השורשים. ריכוזי החמצן בשכבת החצץ בעומק 35-40 ס"מ, היו גבוהים ב 2-3% בטיפול הפלריג בהשוואה לטיפול הרשת. ירידה זו בטיפול הרשת ניתן ליחסה לנשימת שורשים. לחילופין הריכוזים בשכבות 15-20 ס"מ היו נמוכים בטיפול הפלריג באותה המידה. מצב זה מבטא את יכולת הצמח לווסת קליטת חמצן מאזורי זמינות משתנה, כול עוד ערכי החמצן האווירני אינם נופלים מ-10%. בסיכום הניסוי נמצא כי יבול הפירות בטיפול תעלת ההזנה היה נמוך בכ- 25% מיתר הטיפולים ואילו יבול החומר היבש היה דומה בכל טיפולי הניסוי ועמד על כ- 1 ק"ג/מ"ר. מתקן הליזימטרים סיפק נתונים רבים שלא ניתן לקבלם מניסוי בחלקות בקרקע. דימיון הצמחים לחלקות הקרקע נובע הן מהתאמת התנאים בבית השורשים והן מאופן ההצבה. כאשר קיים דימיון טוב ניתן להשתמש בערכים הנמדדים בליזימטרים לכיול מודל לחיזוי קליטת המים על ידי הצמח ותנועת המים והמומסים במרחב.

### מבוא

מחקרים רבים מצביעים על כך שמחסור זמני בחמצן מומס בתמיסת בית השורשים משרה סגירת פיוניות ובשל כך פוחתת קליטת מים ומינרלים וחלה פגיעה בקצב הגדילה של הנוף והשורשים (Soffer et al., )

(1991; Morard *et al.*, 2000). בפלפל נמצאה רגישות גבוהה במספר הפירות לריכוזי החמצן המומס בטווח שבין 6-16 ח"מ. כאשר העלו Marfa *et al.* (2005) את ריכוזי החמצן בתמיסה לריכוז על רוויה של 16 ח"מ מדדו עלייה של 15% במספר הפירות בהשוואה לביקורת שלא קיבלה העשרה בחמצן. ריכוזי חמצן קריטיים באוויר הקרקע נחשבים לריכוזים הנמוכים מ-10%. תנועת גז בקרקע מונעת ממפל ריכוזים ומתוארת לפי חוק פיק :

$$J \approx D_s \frac{\Delta C}{\Delta Z} \quad [1]$$

כאשר J הינו שטף הגז בציר ה Z.  $\Delta C$  הינו הפרש ריכוזי הגז בין שתי קואורדינטות ו  $\Delta Z$  הינו הפרש הגובה בציר ה-Z.  $D_s$  הינו מקדם הדיפוסיה של הגז באוויר הקרקע אשר תלוי בנקבוביות הקרקע ובדרגת הרטיבות  $D_s(\phi, \theta)$ , כאשר  $\Phi(-)$  הינה הנקבוביות ו  $\theta(-)$  הינה הרטיבות. קיימים מספר מודלים המתארים את הקשר בין ריכוז הגז באוויר החופשי לבין ריכוזו בתווך נקבובי ברטיבות משתנה. המודל המקובל (Moldrup *et al.*, 2000) מציג פונקציה דעיכה לפי הקשר הבא :

$$D_s = D_a \left( \frac{(\phi - \theta)^{2.5}}{\phi} \right) \quad [2]$$

כאשר  $D_a$  הינו מקדם הדיפוסיה של החמצן באוויר החופשי ושווה ל:  $1.98 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . כאשר הרטיבות גבוהה פוחת מקדם הדיפוסיה באופן מעריכי ואין חשיבות רבה לנקבוביות הקרקע. כאשר שטף צריכת החמצן גבוה כתוצאה מנשימת שורשים, מקדם הדיפוסיה הוא שיקבע את שטף החמצן המגיע אל הנקודה למרות העלייה במפל הריכוזים. בקרקעות חוליות או במצעים נקבוביים קשה לשמר רטיבות גבוהות למשך זמן, כך שעל פי רוב מקדם הדיפוסיה לא נופל מ-50% מהמקדם באוויר אך בקרקעות עם מרקם עדין המקדם יכול ליפול לכדי 10% מזה שבאוויר. מטרת העבודה הייתה לבצע מאזני מים ומומסים בארבע תשתיות בית שורשים המוצבים בליזימטרים. כמו כן לעקוב באופן רציף אחר ריכוזי החמצן, המים, והמלח במרחב ומליחות בצמח. בנוסף לבחון התאמת הליזימטרים לתנאים השוררים בקרקע באמצעות השוואת ביצועי צמחי פלפל לאותם התשתיות.

## שיטות

נתונים אגרו טכניים : ארבע ליזימטרים שקילה (מסגריית קיבוץ סמר) בנפח של 800 ליטר כל אחד

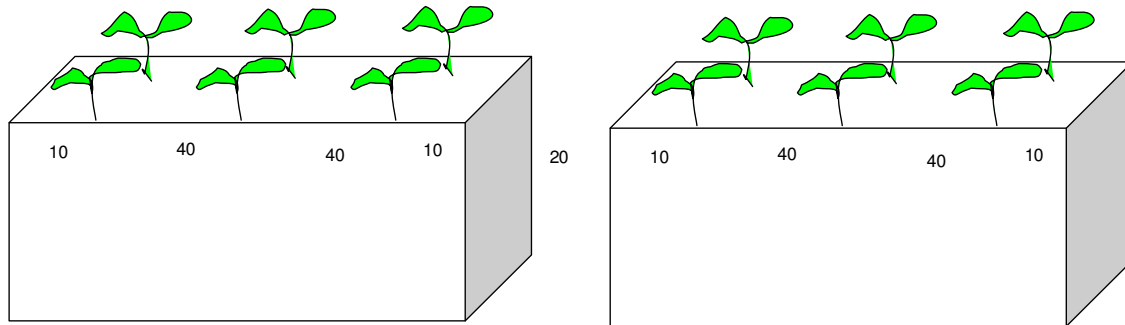


ובמימדים של 100\*100\*80 סמ"ק הוכנו באופן הבא : בתחתית המיכל הונחה שכבת צמר סלעים אליה חובר פתיל צמר סלעים שפותל על חוט ברזל והוחדר לאורך הנקז שנגמר במיכל איסוף הנקז.

על צמר הסלעים הונחה שכבת חול עד לגובה 35 ס"מ מפני המיכל העליונים. בליזימטר ראשון "ביקורת" הושלמה שכבת החול עד לפני השפה העליונה. קומפוסט בשעור של 5 ליטר למ"ר פוזר ברוחב 40 ס"מ ותוחח ידנית בשכבת

תמונה 1. המחפורת והכנת ארבעת הליזימטרים

החול העליונה. בליזימטר שני "תעלת הזנה" הונח טוף 0-8 מ"מ ברוחב 40 ס"מ ובעומק 10 ס"מ במרכז הליזימטר. בליזימטר שלישי "מחסום קפילרי עם יריעת פלריג" הונחה שכבת חצץ בעובי של 5 וברוחב 40 ס"מ בעומק של 30-35 ס"מ. על גבי החצץ והדפנות נפרסה יריעת פלריג שלתוכה הוספה שכבת חול בעומק 10-30 ס"מ. מעל שכבת החול הונחה שכבת טוף בדומה לטיפול תעלת הזנה. הטיפול בליזימטר הרביעי דמה לטיפול השלישי בכל אלא לפני החצץ כוסו ברשת 50 מש ("מחסום קפילרי עם רשת מש") ויריעת הפלריג כיסתה רק על הדפנות. בכל שלושת טיפולי הטוף עורבב קומפוסט בדומה לטיפול הביקורת. צמחי פלפל (זן סליקה) נשתלו במיכלי הליזימטרים בבית פלסטיק בתחנת זהר ב- 23/9/07 במקביל לשתילתם בחלקות הניסוי בקרקע. בכל ליזימטר נשתלו 6 צמחים לפי תרשים 1.



איור 1. חלוקת המרחקים בתוך ובין הליזימטרים.

חיישני חמצן, טנסיומטרים, טרמוקפלים, ו-TDR הוחדרו לכל תשתית בפרוט הבא :

יחסית למרכז	עומק	מיקום	רגש
0	5	1	OXI
0	20	2	OXI
0	35	3	OXI
15	15	5	OXI
0	5	1	TDR
0	20	2	TDR
0	40	4	TDR
15	15	5	TDR
15	30	6	TDR
0	5	1	TENS
0	20	2	TENS
0	40	4	TENS
15	15	5	TENS
15	30	6	TENS
0	5	1	TERMO
0	20	2	TERMO
0	35	3	TERMO
15	15	5	TERMO
		מיכל איסוף נקז	TERMO



איור 2. חישן חמצן KE-25

חיישני חמצן – תוצרת Figaro יפן מסוג KE-25 (איור 2) פועלים על בסיס תא אלקטרוכימי בו מתחזר החמצן על קטודת זהב. קצב הריאקציה נמצא ביחס ישיר למתח החשמלי שנוצר (Vasili *et al.*, 2005).

טרמוקפל - פועל על בסיס של שני חוטים האחד טונגסטן והשני נחושת המחוברים בקצה. המתח החשמלי הנוצר בנקודת החיבור נמצא ביחס ישיר לטמפרטורה לעובי ואורך החוטים.

טנסיומטרים – חרסי טנסיומטרים (עמי טנסיומטרים) מחוברים למתמרים אשר ממירים את הלחץ הנוצר בצינורית המחוברת לחרס למתח חשמלי.

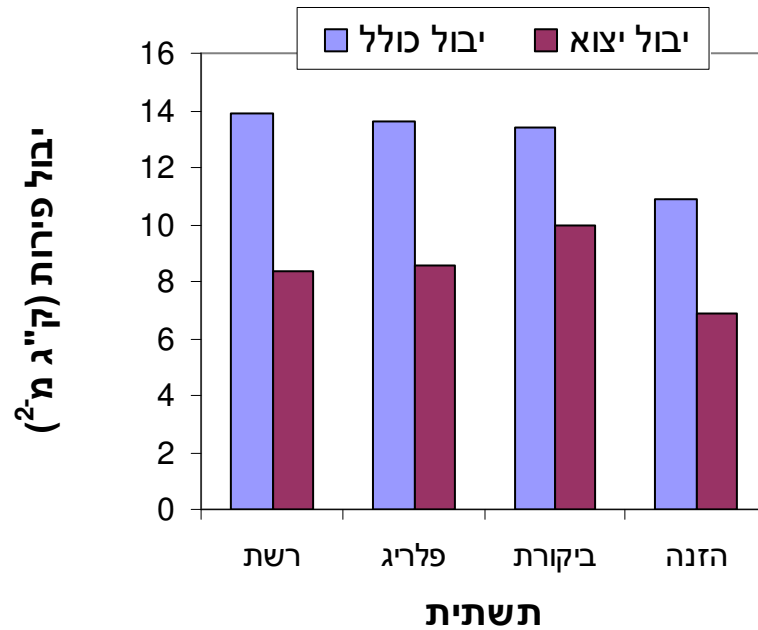
חיישני TDR - (TDR100, Campbell Scientific, USA) למדידת מליחות הקרקע. גל אלקטרו מגנטי שנשלח ממכשיר הטקטרוניקס נשלח לקרקע ונקלט בחזרתו. מליחות ורטיבות הקרקע משפיעים על צורת הגל החוזר. איסוף הנתונים נעשה באמצעות אוגר נתונים (קמבל) בתוספת מולטיפלקסר. הנתונים נאספו כל דקה ונרשמו כערך ממוצע כל 15 דקות. כבל שחובר מהאוגר נתונים למחשב במשרד איפשר פריקה ישירה של הנתונים לקובץ במחשב. אחת ליומיים נשלחו הנתונים בדואר אלקטרוני.

#### תפעול הליזימטרים

השקיה - ניתנה בתדירות של פעם ביום בשעה 5 בבוקר; ניקוז - ריקון מיכלי הנקז נעשה פעם ביום בשעה 2.30 בלילה; מדידת מליחות וחנקן בנקז ובטפטפת - אחת לשבוע נדגמו מי נקז ומי טפטפת.

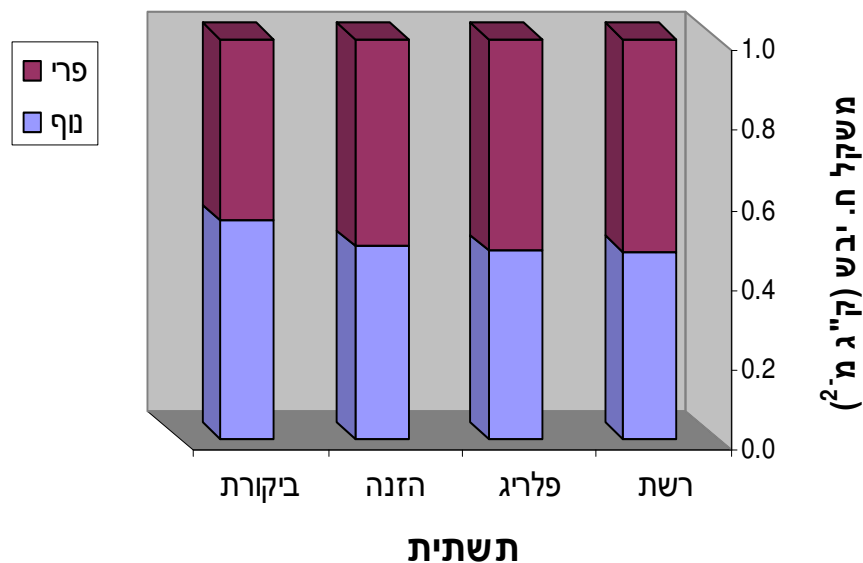
## תוצאות

יבול הפירות בתעלת ההזנה (איור 3) נפל בכ- 3 ק"ג מ<sup>2</sup> משלושת הטיפולים האחרים.

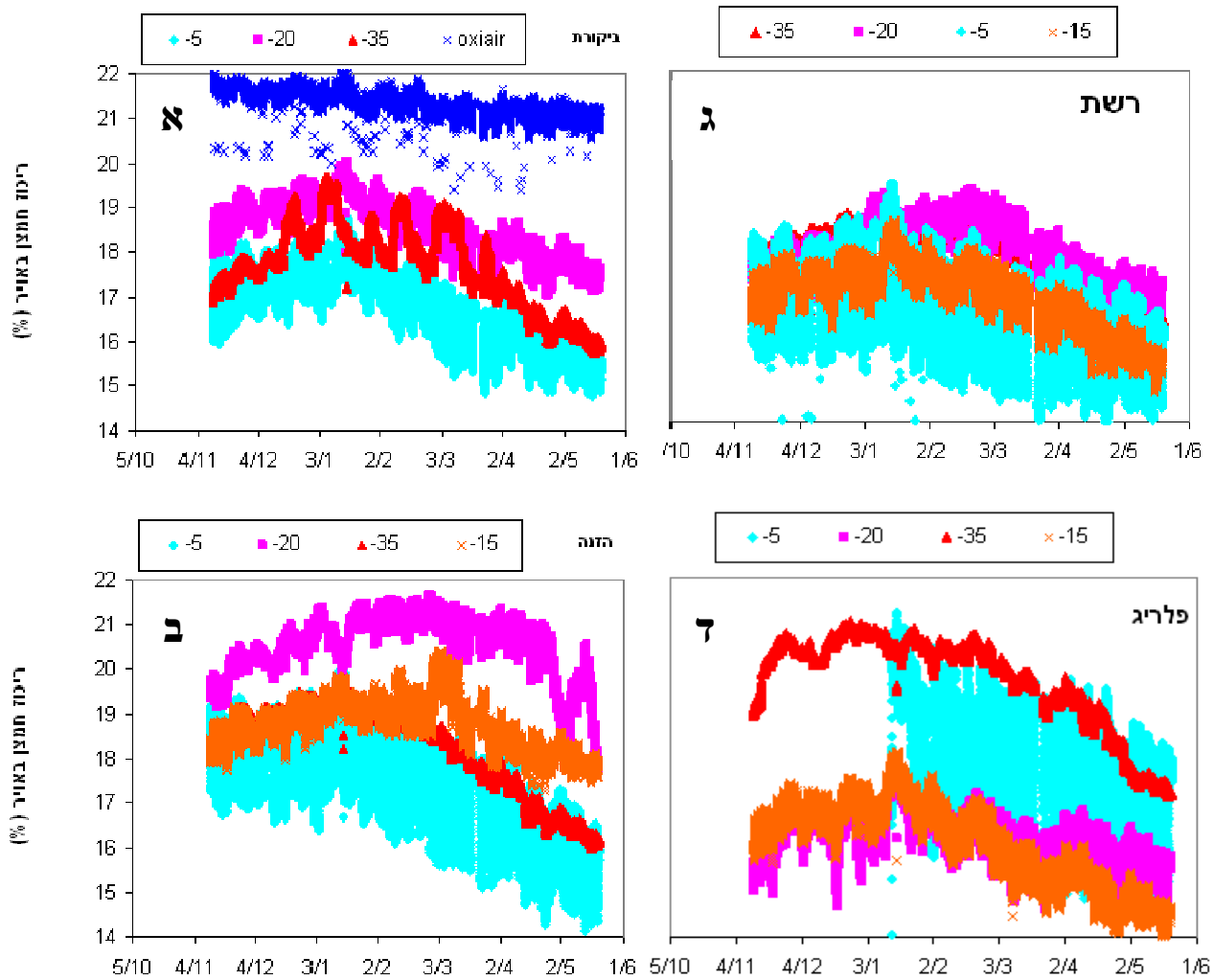


איור 3. יבול הפירות בטיפולי התשתיות

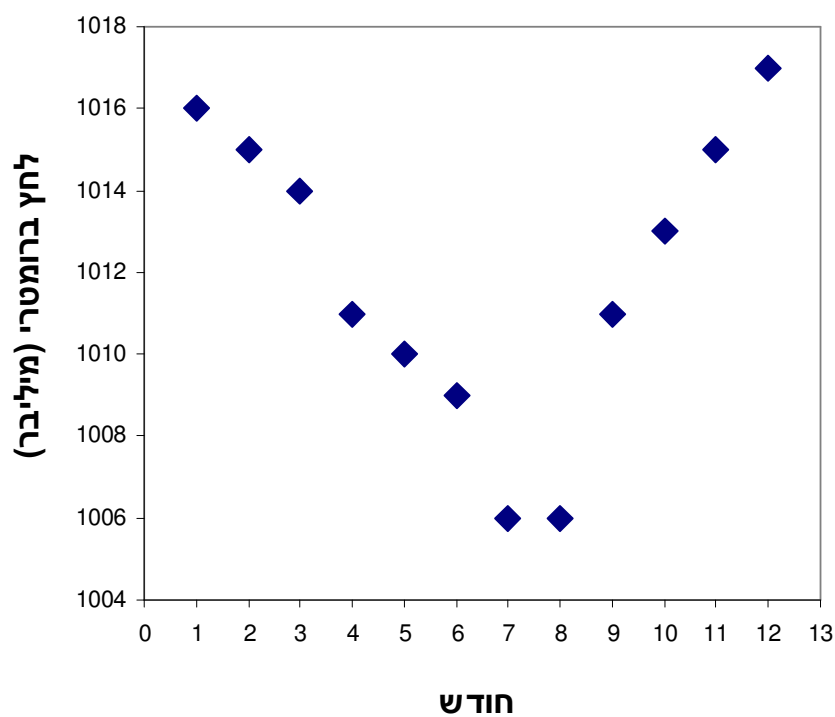
יבול החומר היבש (איור 4) לא היה שונה בין התשתיות. ריכוזי החמצן האטמוספרי (איור 5 א) פחתו החל ממחצית חודש ינואר בכ- 1%. ירידה זו מקבילה לירידה בלחץ הברומטרי (איור 7) ובאה לידי ביטוי גם בריכוזי החמצן בקרקע בשיעור של 3%. בטיפולי הביקורת ובתעלת ההזנה (איור 5 א, ב) הריכוז בעומק 5 ס"מ היה נמוך מיתר נקודות המדידה בפרופיל ואילו בטיפול הרשת הריכוז הנמוך ביותר היה בעומק 20 ס"מ. בטיפול נש"מ רשת (איור 5 ג) ריכוזי החמצן בעומק 35 ס"מ בשכבת החצץ נמוכים מאלו שבנש"מ פלריג בכ- 2% ואילו בכל יתר נקודות המדידה הערכים גבוהים יותר. הערכים הנמוכים ביותר שנמדדו לא נפלו מ- 14%.



איור 4. יבול החומר היבש בפירות ובנוף בטיפולי התשתיות



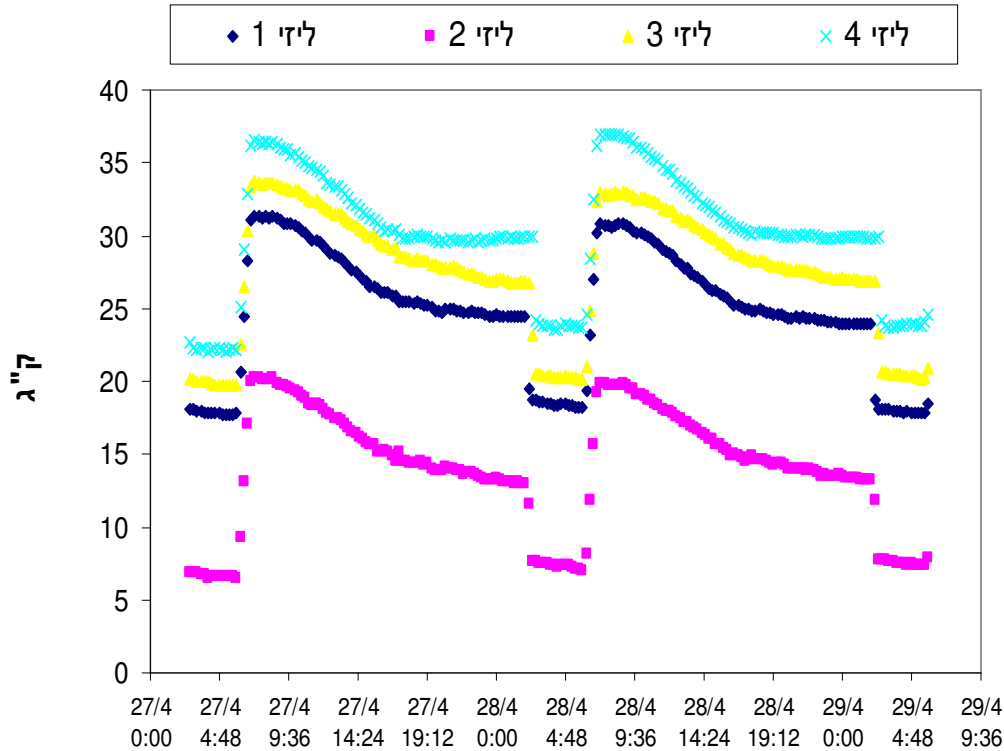
איור 5. ריכוזי חמצן באוויר האטמוספרי ובקרקע: א. ביקורת, ב. תעלת הזנה, ג. נשי"מ פלריג, ד. נשי"מ רשת



איור 6. לחץ ברומטרי בגובה פני הים (נתוני השרות המטאורולוגי)

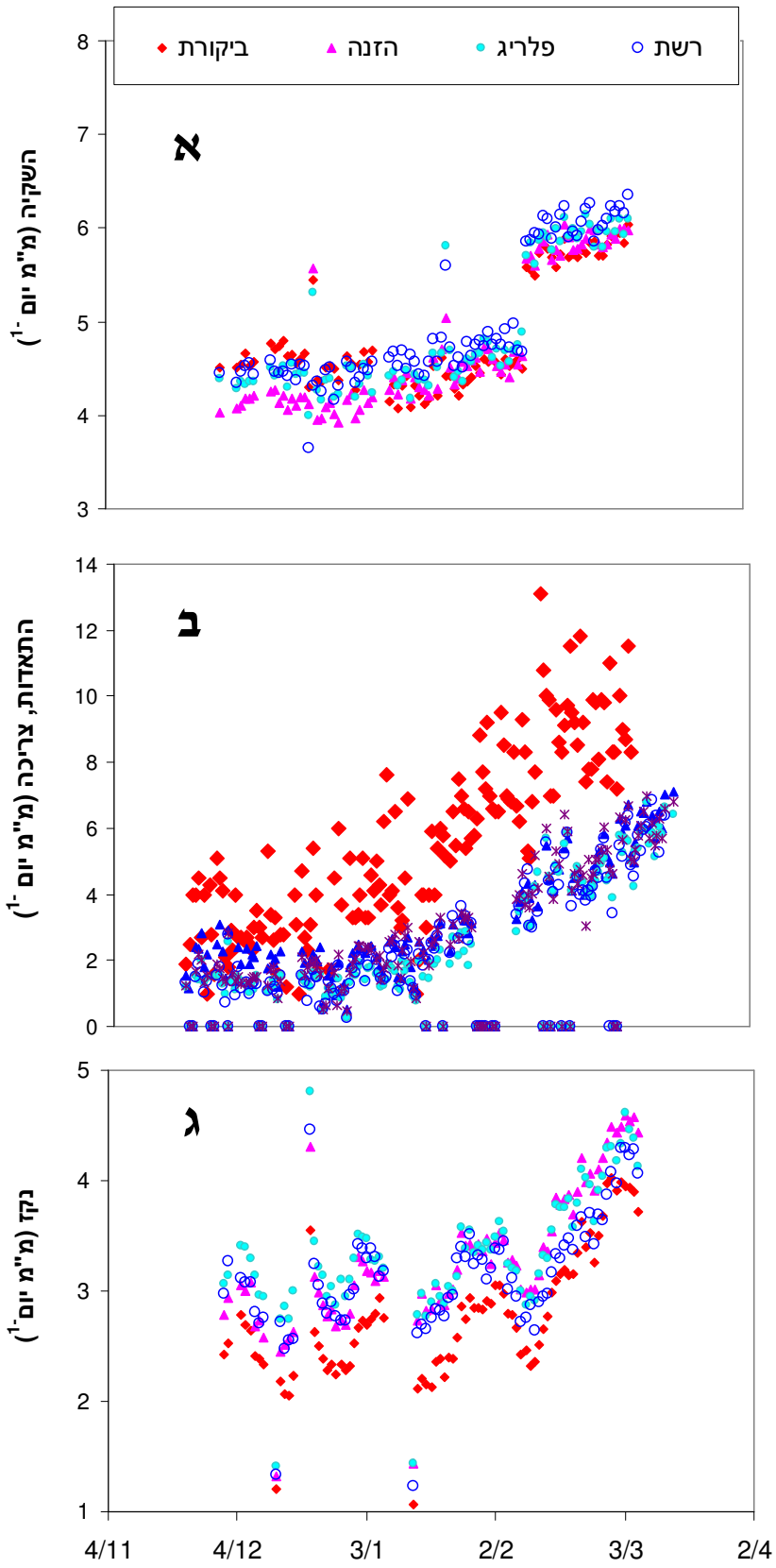
השקיה, צריכה, נקז ונתוני גיגית

אירועי ההשקיה והנקז ניכרים באיור 7. איבוד המשקל כתוצאה מצריכה מחושב מההפרש בין המשקל אחר השקיה למשקל לפני ניקוז. איבודי המשקל בליזימטרים 2 ו-3 אינם קוראים בפועל ונובעים כנראה מתגובה לטמפרטורה.



איור 7. תנודות משקלי הליזימטרים בימים : 27-28/4/08

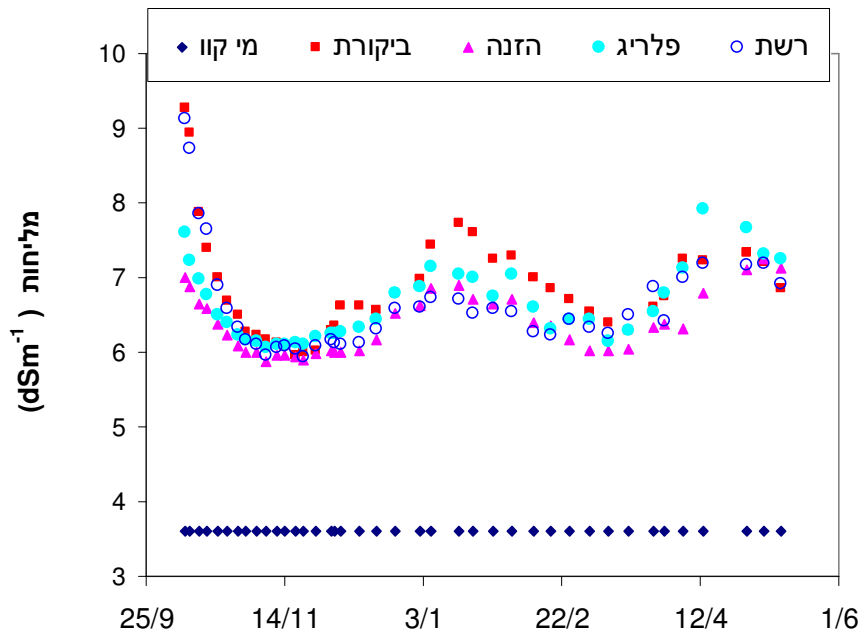
מנת ההשקיה המתוכננת לטיפול הייתה פעמיים האופוטורנספירציה בליזימטרים. במהלך תקופת החורף המנה עמדה על 4.5 מ"מ ליום והחל מסוף חודש פברואר החלה לטפס לערכים של 6 מ"מ ליום (איור 8א). ההתאדות מגיגית חוץ הייתה כפולה מערכי האופוטורנספירציה בתקופת החורף (איור 8ב) ועד כדי פעמיים וחצי בחודש אפריל. מנת הנקז (איור 8ג) הייתה נמוכה בכ- 10% במרבית התקופה בטיפול הביקורת יחסית ליתר טיפולי התשתית.



איור 8. א. השקיה ב. התאדות מגיית חוץ וצריכה ג. נקז בתשתיות

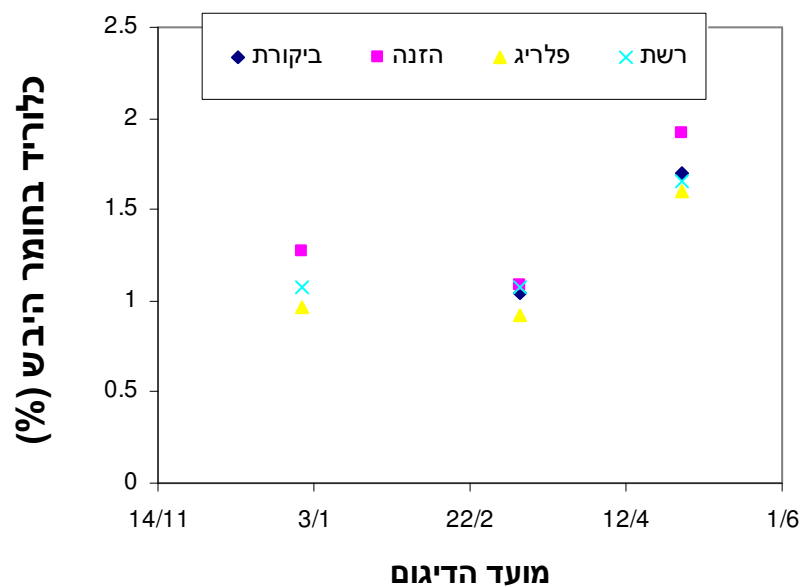


מליחות מי הנקז בטיפול הביקורת הייתה גבוהה מיתר הטיפולים בתקופה דצמבר - פברואר.  
 מליחות מי הנקז הייתה בדרך כלל כפולה מזו של מי הטפטפת (איור 9).



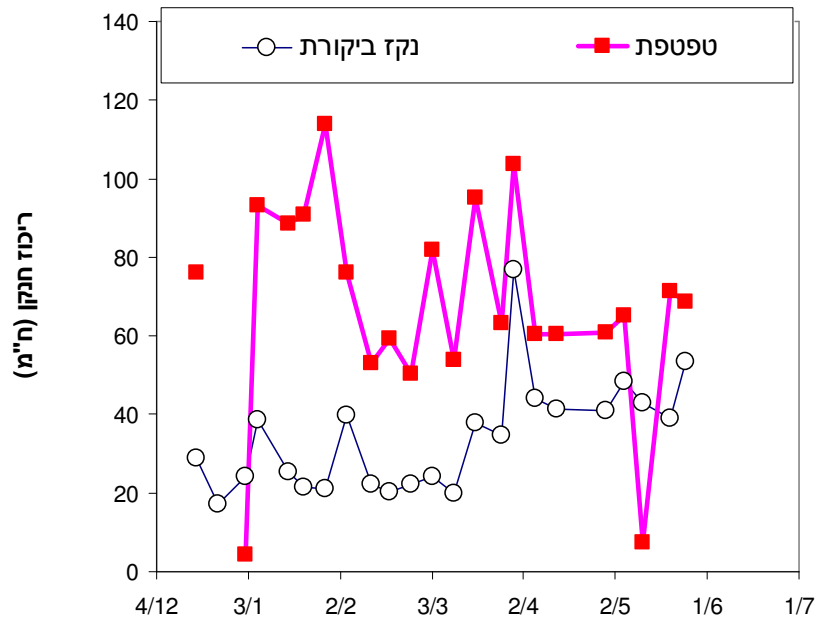
איור 9. מליחות מי ברז ומי נקז בתשתיות

ריכוז הכלוריד בעלים היה מעט גבוהה יותר בתעלת הזנה בהשוואה ליתר הטיפולים (איור 10).



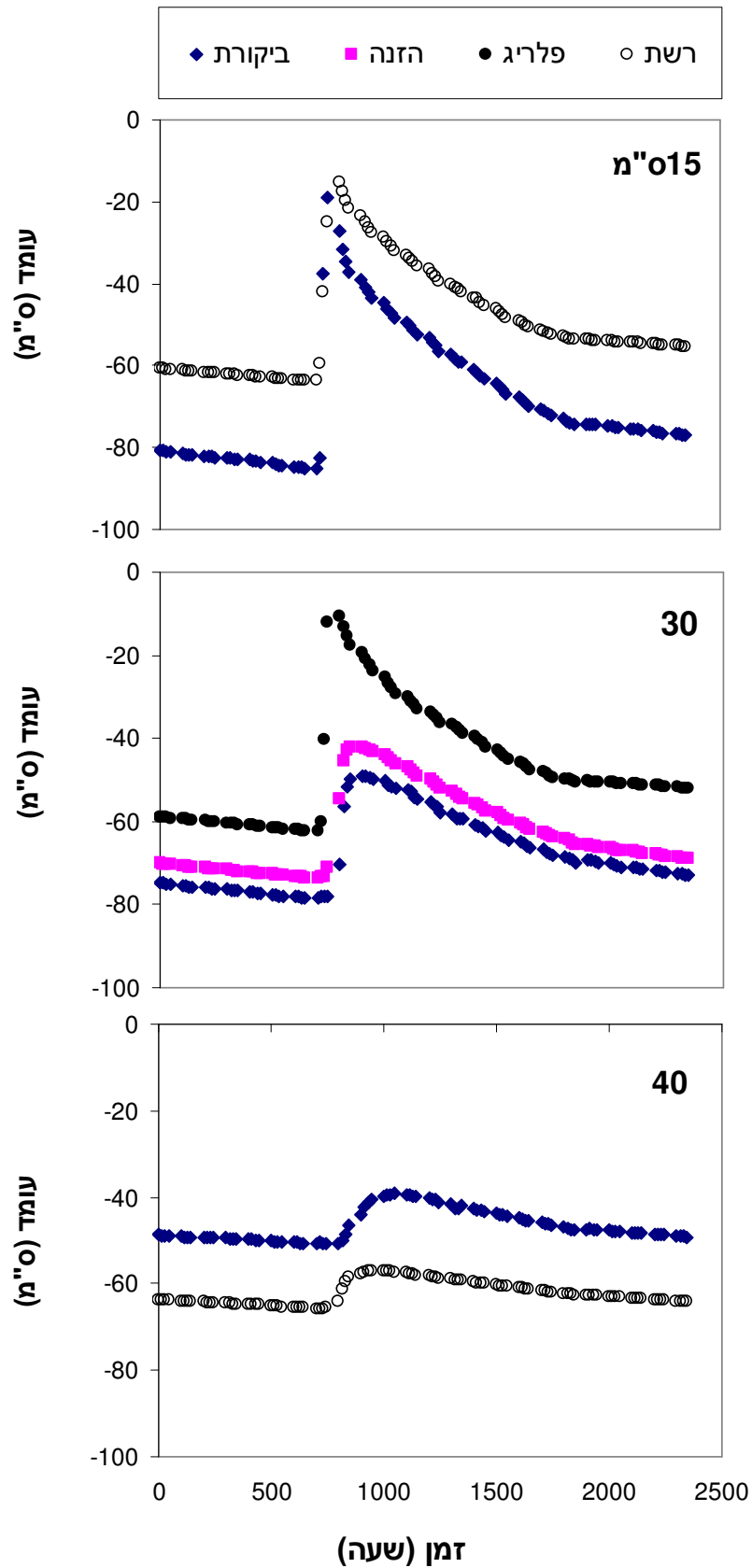
איור 10. ריכוז כלוריד בעלה ראשון פרוס בארבע תשתיות

ריכוזי החנקן בנקז לא היו שונים במידה רבה בין התשתיות. ריכוזי החנקן בנקז הושפע מריכוזו במי ההשקיה (איור 11) ומגודל מנת ההשקיה.



איור 11. ריכוזי החנקן במי הטפטפת ובמי הנקז בטיפול הביקורת

בשני הטיפולים רשת ופליג העומד בטנסיומטרים גבוהה מאשר בביקורת או בתעלת ההזנה. בעומק 40 ס"מ קיימת שכבת חצץ בטיפול הרשת כך שקריאת הטנסיומטר אינה מבטאת עומד מטריצי (איור 12).



איור 12. עומד בטנסיומטרים בשלושה עומקים במהלך יממה (30/3/2008).

## דיון וסיכום

חישוב ערכי האופוטנספירציה נתגלה כמעט בעייתי בשל השתנות המשקל בלילה בשני לזימטרים מתוך הארבעה. תופעה שאינה נובעת משינוי אמיתי אלא כנראה מתגובה לטמפרטורה. ערכי האופוטנספירציה בליזימטר הביקורת היו גבוהים מהאחרים בתקופת החורף ולא היו שונים באביב. בתקופת החורף ערכי הצריכה היו נמוכים מ- 2 מ"מ ליום והחל ממחצית ינואר חלה עלייה קווית שהגיע ל- 6 מ"מ בחודש מרץ. עלייה זו מונעת כנראה מהשינויים בתנאים האקלימיים כפי שבא לידי ביטוי בערכי ההתאדות מגיגית חוץ. בתקופת החורף צריכת הצמחים הייתה מעט נמוכה מ- 0.5 מערכי הגיגית ואילו בחודשי האביב מעט גבוהה מ- 0.5. ההסבר לתופעה זו קשור להשפעות הלילה על הגיגית שנהיות יותר משמעותיות ככל שעולות הטמפרטורות ואינן קיימות לגבי הצמחים. ערכי מליחות תמיסת הנקז היו כפולים מערכי מי ההשקיה. תוצאה זו הייתה צפויה מעצם העובדה שמנת ההשקיה תוכננה להיות פעמיים מנת הנקז וכפי שבאה לידי ביטוי במשוואת מאזן המסה:

$$2 = \frac{Q_I}{Q_D} = \frac{C_D}{C_I} \approx \frac{EC_D}{EC_I} \quad [1]$$

כאשר  $Q_I$  הינה מנת ההשקיה,  $Q_D$  הינה מנת הנקז,  $EC_D$  ו-  $EC_I$  הינם מליחויות מי הנקז ומי ההשקיה בהתאמה. הסטיות כלפי מעלה נבעו מהערכה נמוכה לערכי הצריכה בתקופות מסוימות וכתוצאה מכך השקיה במנה נמוכה מדי.

חישני חמצן פעלו מצוין. ירידת הריכוז האטמוספרי ב- 1% בתקופת המדידות מונעת מהתחממות האוויר כפי שבאה לידי ביטוי בירידה בלחץ הברומטרי. השפעות אלו מתעצמות בקרקע בערך פי שלושה. השפעות קליטת החמצן על ריכוזי החמצן באווירת הקרקע מבטאות את מיקום המסה העיקרית של השורשים. ריכוזי החמצן בשכבת החצץ: 35-40 ס"מ, היו גבוהים ב- 2-3% בטיפול הפלריג בהשוואה לטיפול הרשת. ירידה זו בטיפול הרשת ניתן ליחס לנשימת שורשים. לחילופין הריכוזים בשכבות 15-20 ס"מ היו נמוכים בטיפול הפלריג באותה המידה. מצב זה מבטא את יכולת הצמח לווסת קליטת חמצן מאזורי זמינות משתנה, כול עוד ערכי החמצן האווירני אינם נופלים מ- 10%.

חישני TDR שמוקמו בעומקים שונים סיפקו נתונים רציפים לאוגר נתונים במהלך כל חודש מאי בתקופה מוקדמת יותר נערכו קריאות נקודתיות. הקושי בפענוח התוצאות נובע מהעובדה שהקריאה מושפעת הן ממליחות התמיסה והן מתכולת הרטיבות.

הטנסיומטרים נפרצו לעיתים רבות. נראה שכמות המים המועטה הקיימת בצינורית מהווה בעיה. עד עומק 30 ס"מ העומד בטיפולים בהם מוקם מחסום קפילרי היה גבוהה מזה שבביקורת או בתעלת ההזנה. בשכבת החצץ קריאת הטנסיומטר אינה מבטאת עומד מטריצי אלא קריאה באוויר שהייתה נמוכה מזו שבביקורת.

הטרמוקפלים לא סיפקו ערכי אמת משום שלא כוילו כראוי לפני החדרתם לקרקע. ערכי החנקן במי ההשקיה ובנקז מצביעים על כך שבתקופת החורף ריכוז חנקן בטפטפת של 60 ח"מ התיר שארית בנקז של 20 ח"מ, כאשר מנות ההשקיה עלו ריכוז החנקן בנקז עלה אף הוא. לסיכום, מתקן הליזימטרים סיפק נתונים רבים שלא ניתן לקבלם מניסוי בחלקות בקרקע. דימיון הצמחים לחלקות הקרקע נובע הן מהתאמת התנאים בבית השורשים והן מאופן ההצבה. כאשר קיים דמיון טוב ניתן להשתמש בערכים הנמדדים בליזימטרים לכיול מודל לחיזוי קליטת המים על ידי הצמח ותנועת המים והמומסים במרחב. ניסוי זה הכיל מספר קטן של ליזימטרים ועל כן נקודה זו לא עמדה למבחן אמיתי.

- Hillel, D. 1980. Fundamentals of soil physics. Academic Press, New York.
- Millington, R.J. 1959. Gas diffusion in porous media. *Science* (Washington, DC) 130: 100-102.
- Moldrup, P., Olesen T., Gamst J., Schjonning P., Yamaguchi T. and Rolston D.E. 2000. Predicting the gas diffusion coefficient in repacked soil: Water- induced linear reduction model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1588-1594.
- Morard, P., Lacoste L. and Silvestre J. 2000. Effect of oxygen deficiency on uptake of water and mineral nutrients by tomato plants in soilless culture. *J. of Plant Nutrition* 23: 1063-1078.
- Soffer, H., Burger, D.W. and Lieth, J.H 1991. Plant growth and development of *Chrysanthemum* and *Ficus* in aero-hydroponics: response to low dissolved oxygen concentrations. *Sci. Hort.* 45: 287-294.
- Vasili, E.T, Scott B. and Or D. 2005. Continuous soil carbon dioxide and oxygen measurements and estimation of gradient-based gaseous flux. *Vadose Zone Journal* 4: 1161-1169.