

השפעת העשרה ב- CO_2 על הגידול, היבול וקצב קיבוע הפחמן בתות שדה הגדל בחממות

חוקרים שותפים:

אמנון שורץ, חיים קיגל - הפקולטה לחקלאות האוניברסיטה העברית
מתן אלי, שבתאי כהן, חנה יחזקאל, דוד שמואל - מו"פ דרום. שבתאי כהן, מו"פ דרום, חוות הבשור

תקציר:

השפעת העשרה ב- CO_2 על יבול תות שדה מהזן 328 הגדל בחממות על מצעים מנותקים במארזים תלויים נבחן במו"פ דרום, חוות הבשור. שיטת הגידול מאפשרת ניצול מרבי של שטח החממה, ומומלץ לצופף את השתילה ל- 11 שתילים למטר רץ ו- 65 ס"מ בין השורות שפירושו כ- 17000 צמחים לדונם. ההיפותזה שנבחנה: העשרה ב- CO_2 בשיטת הגידול אינטנסיבי היא אמצעי יעיל להשגת תוספת יבול בעל משמעות כלכלית. חלל החממה הועשר ב- CO_2 עד לריכוז של 900 ± 50 ppm בשעות שבהן טמפרטורת האוויר בחממה נמוכה מ- $28^\circ C$ ושטף הקרינה הפוטוסינתטית גבוה מ- $50 \mu mol m^{-2} s^{-1}$. הופעלו שני טיפולי העשרה ב- CO_2 וטיפול ביקורת. הטיפול הראשון "העשרת בוקר ואחר הצהרים", שקיבל את השם "העשרת קצוות". הטיפול השני כלל העשרה במשך כל שעות האור שהופסקה כאשר הטמפרטורה עלתה לערך הסף של $28^\circ C$, כונה באיורים "העשרה בפולסים" משום שבימים חמים, החל משעות הבוקר המאוחרות, היה צורך להפסיק את ההעשרה ולאורר את החממה לעיתים תכופות. משך העשרה היומי השתנה על כן, במהלך הגידול והיה תלוי בתנאי הסביבה. הפרי נקטף בקטעם שסומנו מראש מוין ונסקל. נתקבל הבדל מובהק בגובה היבול בין טיפולי העשרה לבין הביקורת. נתקבלה עליה בשיעור של 30% ביבול מסוג א' הראוי ליצוא. מדידות איכות הפרי וכושר ההשתמרות שנערכו במחלקה לאחסון במכון וולקני מצביעות על כך שלא קיים הבדל בכל מדדי האיכות שנבדקו בין הפרי שמקורו בטיפולי העשרה ב- CO_2 לבין הפרי מטיפול הביקורת. מדידות קצב קיבוע הפחמן מצביעות על עליה גדולה בקצב קיבוע הפחמן במהלך העשרה הן בשעות הבוקר והן אחרי הצהרים. להערכתנו תוצאות הניסויים שנערכו בשנה האחרונה מחזקות את התוצאות המוקדמות משתי שנות הניסוי הראשונות ומאשרות את ההיפותזה שהעשרה ב- CO_2 בישום עפ"י ערכי סף של טמפרטורה ושטף קרינה מגדילה את יבול תות השדה הגדל בחממות ובמארזים תלויים.

מבוא ותיאור הבעיה:

הגדלת ריכוז ה- CO_2 באוויר החממה עד ל-1000-800ppm הוא אמצעי שכיח להגדלת היבול בגידולי ירקות ופרחים. הבסיס הפיסיולוגי להגדלת היבול בעקבות העשרה ב- CO_2 מקורו בעובדה שכושרו של האנזים RuBP-carboxylase (רוביסקו) לקשור CO_2 בתהליך הפוטוסינתזה עולה עם עליית ריכוז ה- CO_2 עד ל-900ppm בקירוב. בנוסף, הגדלת ריכוז ה- CO_2 בכלורופלסטים מפחיתה גם את קצב "נשימת האור" (פוטורספירציה) ועקב כך גדל קצב הקיבוע הפחמן נטו. וכן, ריכוז CO_2 גבוה עשוי להקטין את מוליכות הפיוניות ועקב כך את קצב הטרנספירציה מבלי לפגוע באופן משמעותי בדיפוזיה של CO_2 אל תוך העלה (הגדלת יעילות ניצול המים, WUE).

אנו ערים לשוני המהותי בין העלות הכלכלית של העשרה ב- CO_2 בישראל לבין עלות העשרה באזורים בעלי אקלים קר משלנו. בארצות בהן האקלים קר יותר ניתן להחזיק את החממה סגורה בשעות היום וכתוצאה מכך כמות ה- CO_2 הדרושה על מנת לשמור על ריכוז CO_2 קבוע אינה גבוהה, בעוד שתנאי האקלים בארץ מחייבים אוורור תכוף של החממה בשעות היום להורדת הטמפרטורה, תהליך המגדיל את צריכת ה- CO_2 . אוורור החממה ע"י החלפת האוויר גורמים למעשה "לבזבז" של CO_2 , ועל כן כמות הגז הנדרשת להעשרה רציפה עד 900ppm גבוהה בארץ מאשר בארצות בעלות אקלים קר יותר בהן אוורור החממה איננו מתחלף באופן תדיר.

ה- CO_2 המשמש להעשרה עשוי להתקבל בייצור תעשייתי, " CO_2 קר" (קרח יבש) או עשוי להתקבל משרפפת גז בישראל בתוך החממה " CO_2 חם". CO_2 קר מסופק ע"י היצרנים במיכלים ומוזרם בלחץ לחממה באופן מבוקר. יתרונו של ה- CO_2 "קר" הוא בניקיונו, וחסרונו במחירו הגבוה. המקור העיקרי ל- CO_2 בארצות רבות הוא שריפת גז באמצעות מבער (תנור) המוצב בחממה. חסרונו של השיטה נובע מהעובדה ששריפת גז בלתי נקי עלולה להזרים לחלל החממה גזים בלתי רצויים וכן כי הפעלת המבער עלולה להעלות את הטמפרטורה והלחות היחסית בחממה. יתרונו של שיטת העשרה ב- " CO_2 חם" הוא במחיר הנמוך יחסית ובפשטות ההפעלה.

יעילות ההעשרה ב- CO_2 באירופה בחודשי החורף מוגבלת באופן יחסי ליעילות העשרה ב- CO_2 אצלנו, בשל הימים הקצרים ושטפי הקרינה הפוטוסינתטית הנמוכים יותר. שטפי הקרינה הפוטוסינתטית השוררים בארץ בחודשי החורף מהווים יתרון גדול מבחינת הצמיחה בכלל ומאפשרים ניצול יעיל של תוספת ה- CO_2 המסופקת לחלל החממה.

בארצות מרכז וצפון אירופה וכן בקנדה העשרה של חממות תות שדה ב- CO_2 היא שיטה מקובלת להגדלת היבול ולשיפור איכותו. בשנים האחרונות נעשה בארץ ניסיון מחודש להגדיל את שטחי הגידול בחממות, במצעים מנותקים ובטמפרטורה מבוקרת. שיטת הגידול בחממות, במצעים מנותקים, תלויים, תוארה ע"י שבתאי כהן וחובריו בדו"ח למדען הראשי של משרד החקלאות 1999 וכן בפרסום של שה"ם - "המלצות לגידול תות שדה במצעים מנותקים". מלבד השיפור האגרוטכני, נעשה מאמץ מתמיד לבחינה של זנים חדשים ונחקרים אמצעים להכוונת הפריחה לקבלת יבול במועדים מועדפים. בחורף 2000/2001 ובחורף 2001/02 היה היקף הגידול במצעים מנותקים בחממות 130 ו-110 דונם בהתאמה.

ההשפעה של העשרת תות שדה ב- CO₂ נבחנה בארץ כבר בשנות השבעים, ע"י צבי אנוך וחובריו (Enoch et al.1976). ממצאי המחקר, שנערך אז במכון וולקני, העלו כי תוספת CO₂ למשך שבע שעות ביום, בתקופה שבין נובמבר לבין מחצית אפריל, בריכוזים של 900, 1500, ו- 3000 ppm הגדילה את היבול בשיעור של 43%, 31% ו- 51% בהתאמה. למרות הממצאים של אנוך וחובריו לא אומצה העשרה ב- CO₂ ע"י מגדלי תות שדה בעיקר בשל העובדה שמרבית הגידול במשך השנים נעשה על הקרקע במנהרות נמוכות והניסיונות לגדול תות שדה במחממות לא שרד את המשברים הכלכליים שעבר הענף. היוזמה לבחינה מחודשת של היעילות הכלכלית של העשרה ב- CO₂ נובעת מהעובדה שבשנים האחרונות חוזרים מספר חקלאים לגדל תות שדה בחממות עבירות בשיטות גידול מתקדמות יותר. בשיטת הגידול הצפוף "במארזים תלויים" מתקבל ניצול מיטבי של שטח החממה, דבר שהתבטא בהגדלה משמעותית של היבול לדונם עקב בהגדלה של מספר הצמחים ל- 17,000 לדונם. המעבר לגידול בחממה עשויה לאפשר בקרה טובה יותר של גורמי הסביבה כולל העשרה ב- CO₂. להגדלת השליטה בתנאי הסביבה בחממה יש כמובן מחיר כלכלי אשר יש לבחון אותו למול התוספת הצפויה של היבול. התוצאות מוצגות כאן הן למעשה התוצאות של שנת מחקר שלישית של תכנית מחקר שמטרתה לבחון את השפעת העשרה ב- CO₂ על יבול תות שדה הגדל בחממות. התוצאות של שתי שנות המחקר הראשונות פורסמו בדו"ח למדען הראשי של משרד החקלאות וכן בדו"ח המחקר של מו"פ דרום בשנת 2002. להערכתנו התוצאות שהושגו בשלוש שנות המחקר, למרות השונות ביניהן, מצביעות על כי שהעשרה ב- CO₂ עשויה לתרום לתוספת מובהקת של היבול ורווחיות המגדלים.

מטרות המחקר בשנה השלישית לאור תוצאות שתי השנים הראשונות.

בשנת המחקר הראשונה בחננו את השפעת העשרה ב- CO₂ "חס" ו"קר" על באספקה על בסיס "ערכי סף" של טמפרטורה וקרינה על היבול וקצב קיבוע הפחמן בתות שדה הגדל בחממות בגידול במצע מנותק, במארזים תלויים. הן בשנת המחקר הראשונה והן בשנייה נתקבלה תוספת יבול מובהקת בטיפול העשרה לעומת הביקורת (ראה דו"ח למדען הראשי של משרד החקלאות 2000-2002). מסקנה אופרטיבית מתוצאות שנת המחקר הראשונה הייתה שיש צורך לבחון אמצעים להקטנת עלות העשרה ב- CO₂. העלות הגבוהה נבעה מהצורך לאוורר את החממה לעיתים תכופות כדי למנוע עליית הטמפרטורה. אוורור תכוף של החממה בעיקר בשעות הצהריים גרם "לבזבוז" CO₂ שעלותו גבוהה. לפיכך כבר בשנת המחקר השנייה זנחנו את השימוש בגז "קר" שעלותו גבוהה ונעשה שימוש בגז "חס" בלבד. לא מצאנו הבדל מובהק בגובה היבול בין חממות שהועשרו ב- CO₂ "קר" לבין חממות שהועשרו ב- CO₂ "חס". בנוסף על כך הוספנו כבר בשנת המחקר השנייה טיפול שכונה העשרת "קצוות" ובמהלכו ניתנה העשרה ב- CO₂ בשעות הבוקר ואחה"צ בלבד, מתוך הנחה שהטמפרטורה בחממה לא תגיע בשעות אלו "לטמפרטורת הסף" הדורשת אוורור. או שמספר הפעמים שבהם יידרש אוורור יהיה קטן. ואכן כבר בשנת המחקר השנייה נמצא ש"העשרת הקצוות" גרמה לתוספת יבול ולחיסכון בשימוש בגז. בשנה השלישית (הנוכחית), עליה נמסר הדו"ח) חזרנו על ניסוי העשרת קצוות בהשוואה להעשרה בפולסים או להעשרה רציפה במטרה לבסס את הממצאים של שתי השנים הראשונות. ואכן בשנה השלישית לא נמצא הבדל מובהק בגובה היבול בין העשרת קצוות לבין העשרה בפולסים לעומת זאת קיים בין שני הטיפולים הבדל גדול בעלות העשרה.

תיאור מקיף של הפעלת המחקר 2002/2003

הניסויים בוצעו במו"פ דרום בחוות הבשור בשלוש חממות נפרדות שבהן קיימת בקרת אקלים חלקית: CO₂ סופק ע"י שריפת גז בישול באמצעות מבערים סטנדרטיים לאספקת CO₂. אוויר החממה הועשר ב-CO₂ בשעות היום, עד לריכוז מקסימאלי של 900 ppm. ההעשרה ב-CO₂ החלה בשעות הבוקר כאשר שטף הקרינה הפוטוסינתטית בגובה הצמחים עלה על $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{sec}^{-1}$ ופסקה בשעות אחה"צ כאשר שטף הקרינה ירד מהערך הני"ל. במשך היום פסקה הזרמת ה-CO₂, באופן אוטומטי, כאשר הטמפרטורה עברה את טמפרטורת הסף של 28°C או שהלחות היחסית עלתה על 90%. כעשר דקות לאחר הפסקת הזרמת ה-CO₂ מתחיל אוורור של החממה להורדת הטמפרטורה. כאשר הטמפרטורה ירדה ל-25°C בקרוב, פוסקת פעולת המאווררים ואספקת ה-CO₂ מתחדשת. בלילות, במידת הצורך, הופעלה מערכת חימום כדי למנוע את ירידת טמפרטורת האוויר אל מתחת ל-14°C. באיורים 3,4 מוצגים תנאי האקלים בשעות היום בחממה שבה בוצעה העשרה ב-CO₂ ביום מדגמי, ב-3.1.2003. ניתן להבחין שההעשרה החלה ב-6:45 בבוקר, כאשר שטף הקרינה הגיע לסף שנקבע ופסקה ב-17:15. רציפות העשרה נקטעה בכל פעם שהטמפרטורה הגיעה ל-28°C בקרוב. החל מ-10:30 ועד 15:00 הופעלו המאווררים למשך כ-15 דקות בכל פעם שהטמפרטורה התקרבה ל-28°C. לפני הפעלת המאווררים הופסקה אספקת ה-CO₂ וחודשה שנית כאשר טמפרטורת האוויר בחממה ירדה ל-25°C בקרוב. התנאים ששררו באותו יום מחוץ לחממה מאפיינים רבים מימי החורף באזור הבשור, שבהם העננות מועטה והטמפרטורה גבוהה יחסית. ימים ללא עננות וטמפרטורת סביבה נמוכה עשויים להתאים במיוחד להעשרה ב-CO₂, שכן ניתן לקיים העשרה מתמשכת בלא צורך באוורור.

תות השדה נשתל בערוגות תלויות בתאריך – 20.9.03, במרווחי שתילה של 11 צמחים למטר שורה בהתאמה. המרווח בין השורות עמד על 65 ס"מ בכל הטיפולים. השתילה בוצעה במארזי קל-קר מתוצרת חברת קל-קר קיבוץ עין כרמל. רוחב הערוגה התלויה 10 ס"מ ועומקה 9 ס"מ, נפח מצע הגידול כ-9 ליטר למטר רץ. מצע הגידול כלל 85% קליפות קוקוס ו-15% פוליסטירן. שלוחת הטפטוף נפרסה על גבי המצע לאורך המארזים. ניתנה השקיה במספר פולסים מדי יום, החל משלושה פולסים של 2 מ"ק לדונם בתקופה הסמוכה לשתילה ועד 6 פולסים ליום באביב. הצמחים דושנו בדשן מור 6 : 2.5 : 4 (N,P,K) מתוצרת חברת דשנים וחומרים כימיים בריכוז שבין 80-100 ppm חנקן צרוף. השתילים מהזן שמספרו 328 נקנו במשתלת קדש-ברנע. עומד הצמחים לדונם בחלקה שבה 11 צמחים למטר רץ הוא כ-17,000. העובדה שהצמחים גדלו במארזים תלויים אפשרה לרווח את השורות, באופן זמני, לצורך מעבר בזמן הקטיף, ריסוס או הסרת עלים שהזדקנו.

שנת המחקר 2002/2003

לאחר שבשנת המחקר הראשונה הוכחנו שלהעשרה באמצעות CO₂ קר הייתה השפעה מובהקת על גובה היבול הוחלט לבחון בשנה השנייה והשלישית את יעילות העשרה ב-CO₂ חסם שעלותו נמוכה יותר. המחקר בעונת 2002/2003 כלל שני טיפולי העשרה ב-CO₂ וטיפול הביקורת. הטיפול הראשון שכונה

"העשרת קצוות" כלל העשרה ב- CO₂ חם בשעות הבוקר ואחר הצהרים בלבד על בסיס ערכי סף של טמפרטורה ושטף קרינה. אספקת ה- CO₂ פסקה והחממה נפתחה לאוורור כאשר הטמפרטורה היגיע ל- 28°C. העשרה החלה בשעה 6:00 בבוקר ונמשכה עד 9:30 והחלה שינית בשעה 15:30 ונמשכה עד 17:30 אחר הצהריים. טיפול ההעשרה השני שכונה "העשרה בפולסים" זהה לזה שבוצע בעונות 2000/2002. העשרה ב- CO₂ התקיימה במהלך כל שעות היום כל עוד הטמפרטורה אינה עולה על טמפרטורת סף של 28°C. כל אימת שהטמפרטורה הגיע ל- 28°C פסקה הזרמת הגז והחממה אווררה להורדת הטמפרטורה (ראה תיאור מפורט למעלה). תות שדה מהזן 328 נשתל בשלוש החממות ב- 20.9.2002 בעומד של 11 שתילים למטר רץ. המרווח בין המארזים התלויים 65 ס"מ. מצע הגידול, ההזנה, ההשקיה ובקרת האקלים כפי שתואר לעונות 2000/02. במהלך הניסוי בוצע מעקב רצוף אחר פריסת היבול.

תוצאות:

גובה היבול

היבול נאסף ונשקל באופן נפרד בשישה קטעים בני שלושה מטר כ"א ששימשו כחזרות. מיקומם של הקטעים הנדגמים נקבע בהגרלה. העשרה ב- CO₂ הן בהעשרת בוקר ואחה"צ "קצוות" והן בעשרה במשך כל שעות היום בטיפול "הפולסים" תרמו לתוספת יבול מובהקת בשיעור של 24% ו- 30% בהתאמה (איור מס' 1, טבלה מס' 1). פריסת היבול מסוג א' מוצגת באיור מס' 2. נראה כי תוספת היבול מתחלקת באופן דומה על פני כל העונה. ההבדל בין המדדים האקלימיים (טמפרטורה, ולחות יחסית) היו קטנים מכדי ליחס להם את העלייה המשמעותית ביבול.

עלות השימוש בגז לעונת הגידול 2002-2003 איור מס' 5:

העשרה בפולסים- 11440 ₪ לדונם

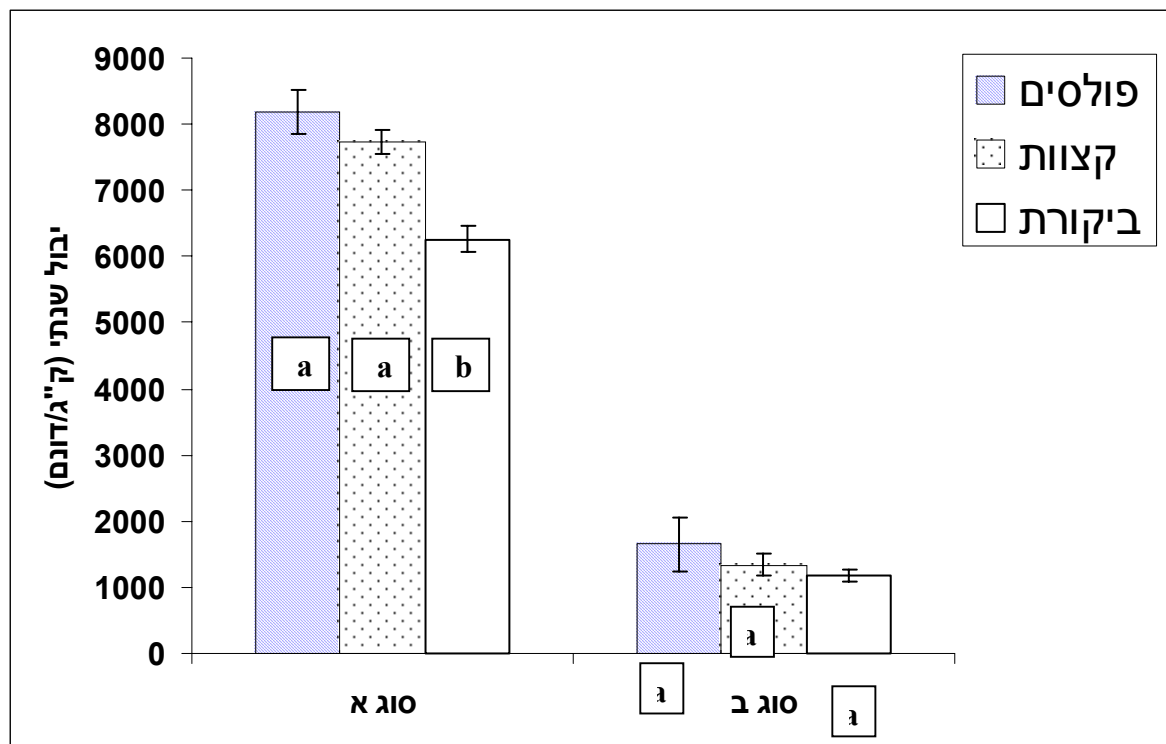
והעשרת קצוות- 6629 ₪ לדונם.

עלות הגז בהעשרה בפולסים גבוהה ב-43% מאשר עלות הגז בהעשרת קצוות. לעומת זאת ההבדל בגובה היבול בין שני הטיפולים היה בלתי מובהק. ניתן על כן להסיק שהעשרת קצוות יעילה יותר ועדיפה מבחינה כלכלית.

תנאי הסביבה בחממות הטיפול ובביקורת

על מנת לבדוד את ההשפעה של ההעשרה ב- CO₂ מהשפעות טמפרטורה או קרינה, הותקנה בשלוש החממות מערכת בקרת טמפרטורה, מדידת לחות ובקרת ריכוז ה- CO₂ (בחממת הביקורת מדידת CO₂ בלבד). באיורים 3 ו-4 מוצגים המהלכים היומיים של שינוי הטמפרטורה הלחות היחסית (%) וריכוז CO₂ ביום מיצג בחורף 2003. מערכת החימום הופעלה בשעות הלילה כאשר הטמפרטורה ירדה מתחת לסף של 14°C. בשעות היום לא נדרשה הפעלה של מערכת החימום. בשעות היום התבצעה בקרת הטמפרטורה בחממות ע"י הפעלת מאווררים להכנסת אוויר וכן ע"י פתיחה חלקית של הווילונות. באיור מס' 4 ניתן לראות שריכוז ה- CO₂ בחממת הביקורת נע בין 250 לבין 320ppm, ריכוז נמוך מהריכוז הסביבתי

העומד על 350-360ppm. הריכוז הנמוך מקורו בעובדה שהצמחים מנצלים את ה- CO_2 בחלל החממה וחילוף האוויר עם הסביבה איטי. כפי שהוצג באיור מס' 1 בשנת המחקר הנוכחית לא נתקבל הבדל מובהק בגובה היבול בין טיפול "העשרת קצוות" לבין העשרה "בפולסים". באיור 3 (למטה) נראה כי בטיפול קצוות התקיימה העשרה רציפה עד 10 בבוקר ולאחר 15:00 ועד הערב. לעומת זאת בטיפול הפולסים איור 3 (למעלה) החל מהשעה עשר בקירוב היה צורך להפסיק את העשרה לעיתים תכופות משום שהטמפרטורה הגיע לטמפרטורת הסף של- 28°C ולמעשה ריכוז ה- CO_2 לא הגיע בין 10:00 ל-15:00 לריכוז המטרה של 900ppm למרות שהמבערים הופעלו. לסיכום, בימים בעלי שטף קרינה גבוה וטמפרטורה גבוה עלות ההעשרה בשעות הצהריים גבוהה משום שחלק גדול מה- CO_2 "מתבזבז" בשעה שהחממה מאווררת לייצוב הטמפרטורה.



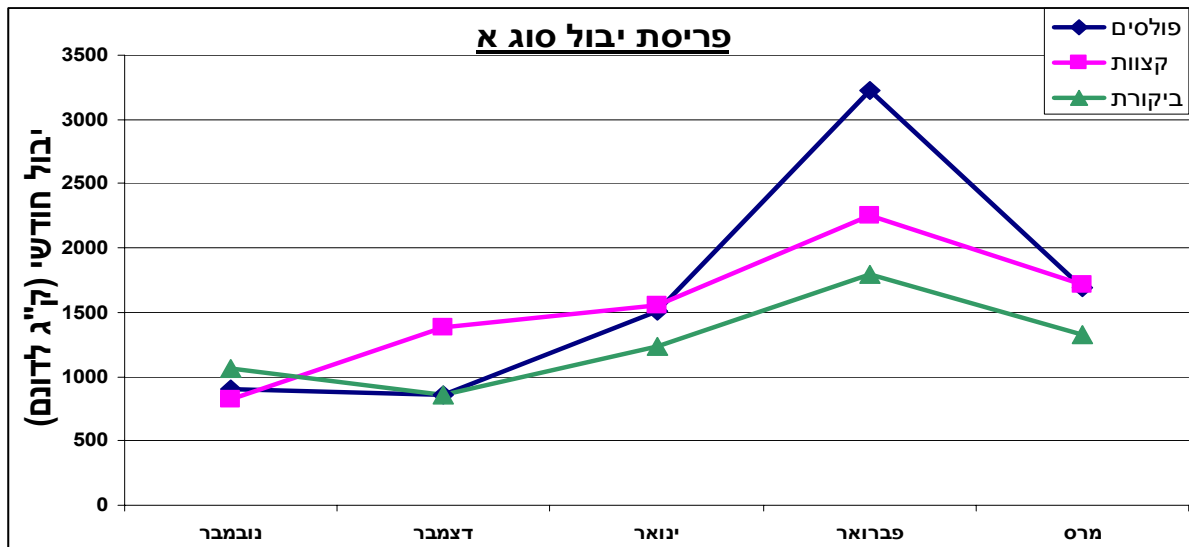
איור מס' 1

השפעת העשרה ב- CO_2 על גובה יבול תות שדה מהזן 328 הגדל בחממה בחוות הבשור. סה"כ היבול בין חודש דצמבר לחודש מרץ בשני טיפולי העשרה ובטיפול הביקורת. מוצגים היבול מסוג א' והיבול מסוג ב'. בטיפול המוגדר העשרה "בפולסים" סופק CO_2 במהלך כל שעות היום, כל עוד הטמפרטורה בחממה לא עלתה על ערך סף של 28°C . כאשר הטמפרטורה עלתה לערך הסף פסקה אספקת ה- CO_2 והופעלו מאווררים להחלפת אוויר החממה להורדת הטמפרטורה. אספקת ה- CO_2 חודשה כאשר הטמפרטורה ירדה ל- 25°C בקירוב. בטיפול המוגדר "העשרת קצוות" סופק CO_2 בשעות הבוקר ואחר הצהריים בלבד. גם בשעות אלו הופסקה העשרה והחל שלב של אוורור כאשר הטמפרטורה הגיע לסף של 28°C .

טבלה מס' 1

השפעת טיפולי העשרה ב- CO_2 על תוספת היבול ב-% מעל הביקורת. דצמבר - מרץ

הטיפול	סוג א	סוג ב
פולסים	30.7	40.6
קצוות	23.4	14.2



איור מס' 2

השפעת טיפולי העשרה ב- CO_2 על פריסת היבול מסוג א' לאורך העונה (למעלה) ועל היבול המצטבר לאורך כל העונה (למטה). בטיפול המוגדר "פולסים" נמשכה העשרה ב- CO_2 במשך כל שעות היום, כל עוד הטמפרטורה נמוכה מ- $28^{\circ}C$, כאשר הטמפרטורה הגיע לערך הסף הופסקה העשרה והופעל האוורור. עם ירידת הטמפרטורה חודשה העשרה. בטיפול המוגדר "קצוות" ניתנה העשרה ב- CO_2 בשעות הבוקר ואחרי הצהרים בלבד כולל הפסקות לאוורור כאשר הטמפרטורה עלתה על $28^{\circ}C$.

בדיקות איכות והשתמרות

בדיקות האיכות (טבלאות 2,3) שבוצעו מלמדות שלא קיים הבדל מובהק במדדי איכות הפרי וכושר השתמרות של הפרי בין טיפולי העשרה ב- CO_2 לבין טיפול הביקורת. הבדיקות בוצעו במעבדתו של ד"ר ויקטור רודוף במחלקה לאחסון במנהל המחקר החקלאי. נעשה שימוש בשיטות הבדיקה סטנדרטיות ומדדי האיכות הם כמקובל לתות שדה בשנים האחרונות. תוצאות דומות הנוגעות לאיכות הפרי פורסמו מניסויים דומים בארצות בהן העשרה ב- CO_2 היא פרקטיקה מקובלת.

טבלה מס' 2.

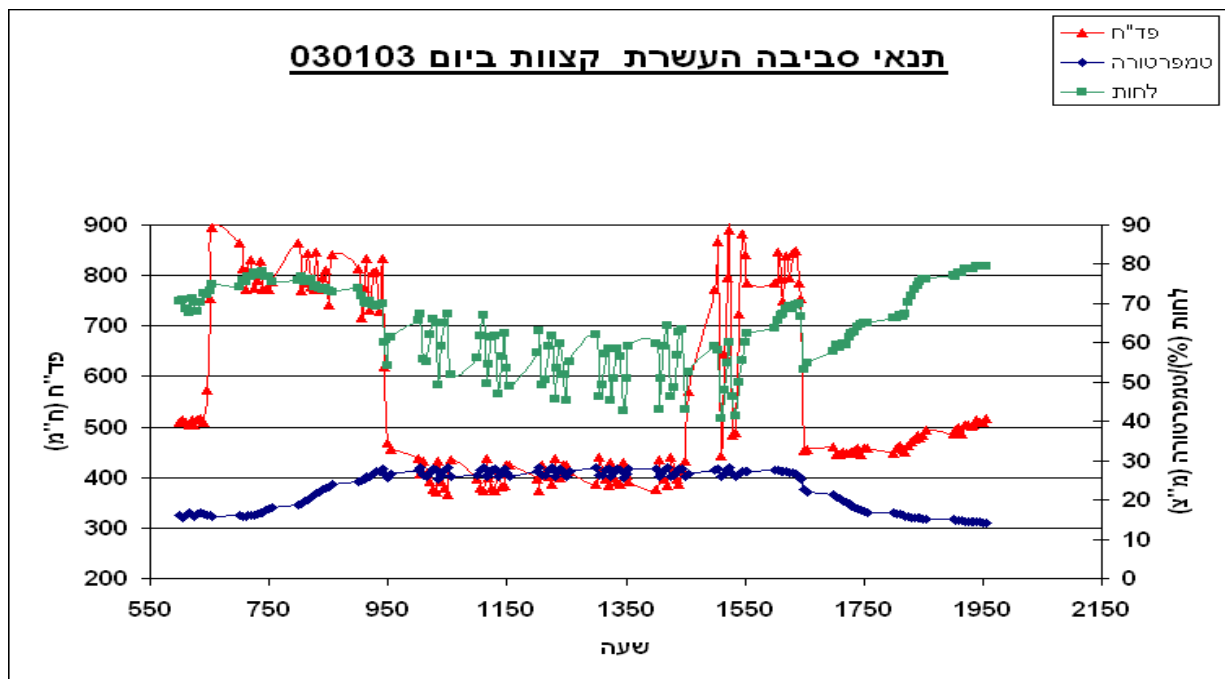
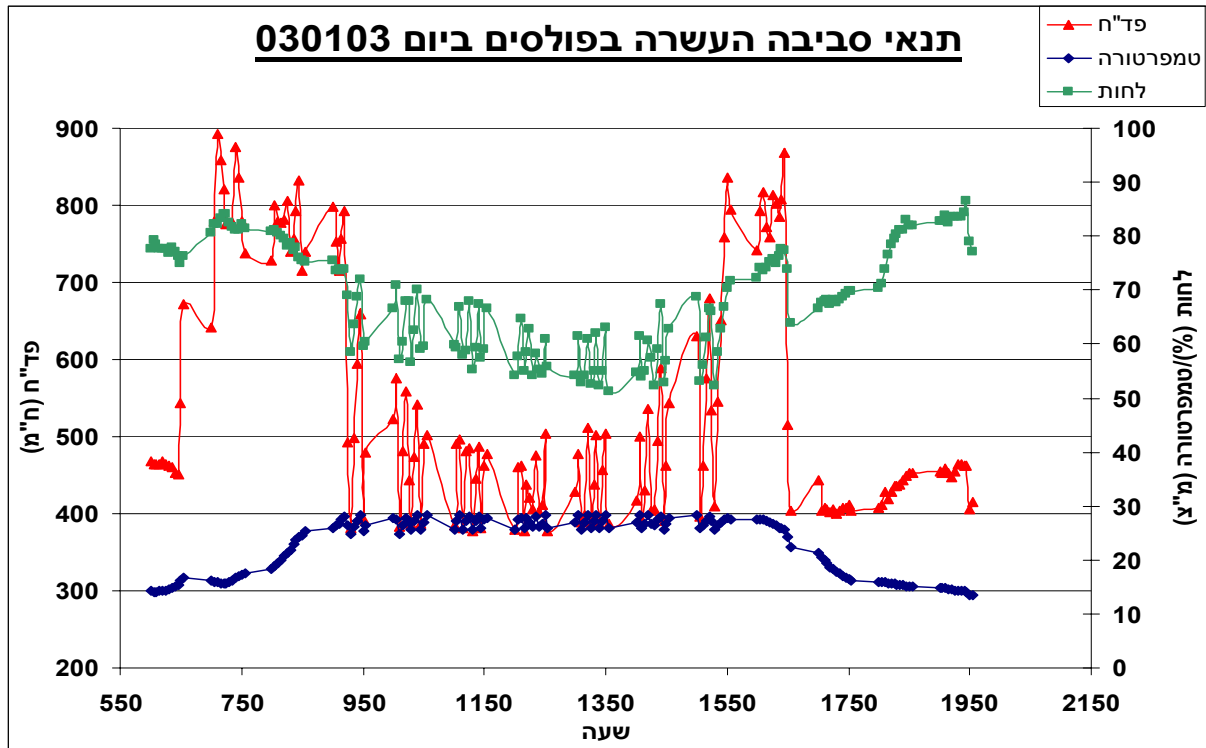
השפעת טיפולי העשרה ב- CO_2 ("פולסים" ו-"קצוות") על איכות הפרי.

הופעה כללית		צבע פרי	עלי גביע	ריזופוס		סימני לחץ		טיפול
סטיית תקן	%			סטיית תקן	%	סטיית תקן	%	
0.2	2.88	3.75	1.73	2.8	1.43	8.6	79.7	פולסים
0.3	2.38	3.75	1.75	8.1	9.26	13.2	73.25	קצוות
0.3	2.84	3.75	1.75	4.2	2.13	11.5	74.1	ביקורת

טבלה מס' 3.

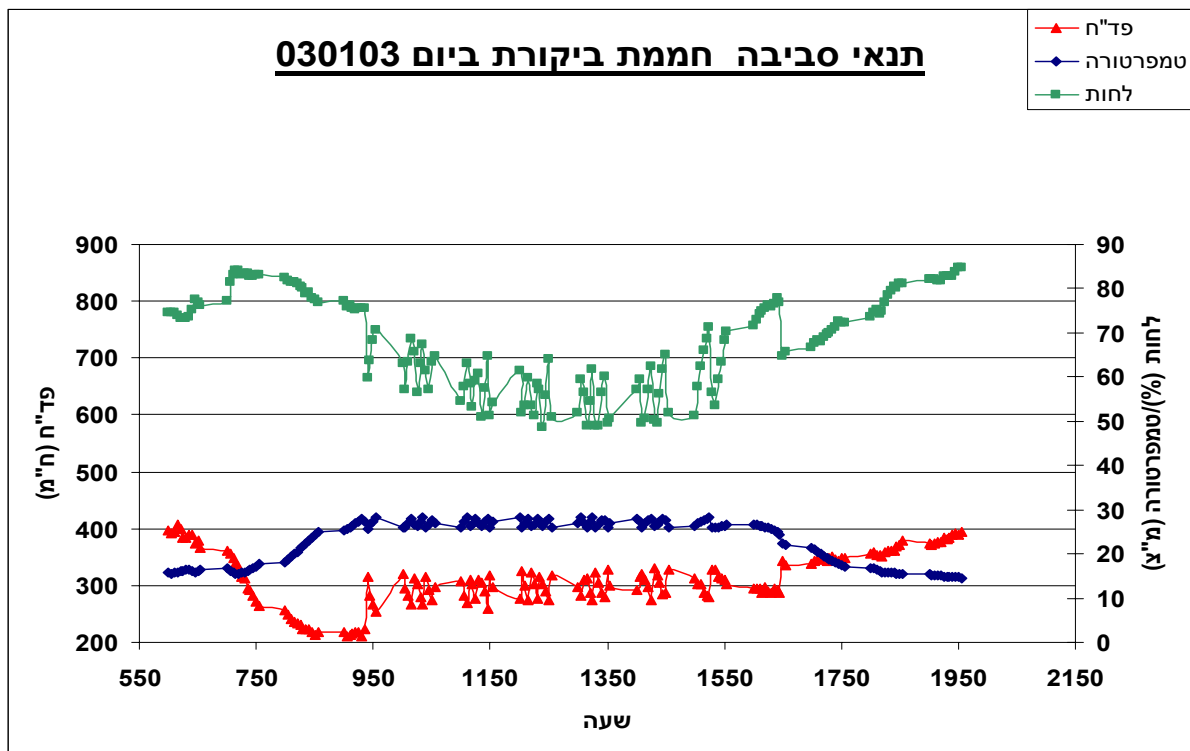
השפעת אחסון למשך 8 ימים על מדדי איכות הפרי. סיכום תוצאות בדיקת אורך חיי מדף בפרי שנקטף ביום 31/03/03, בזמן 0 (ביום הקטיף) ולאחר אחסון (4 ימים ב 5 מ"צ ועוד 4 ימים ב 12 מ"צ).

לאחר אחסון					זמן 0					טיפול
חומציות	כמ"מ		מוצקות		חומציות	כמ"מ		מוצקות		
	ס. תקן	%	ס. תקן	%		ס.תקן	%	ס. תקן	ניוטון	
0.87	0.5	6.84	0.2	2.32	0.9	0.3	7.32	0.2	2.26	פולסים
0.89	0.8	6.92	0.3	1.82	0.76	0.6	6.74	0.3	1.74	קצוות
0.83	0.5	5.13	0.3	1.8	0.71	0.3	5.9	0.3	1.86	ביקורת



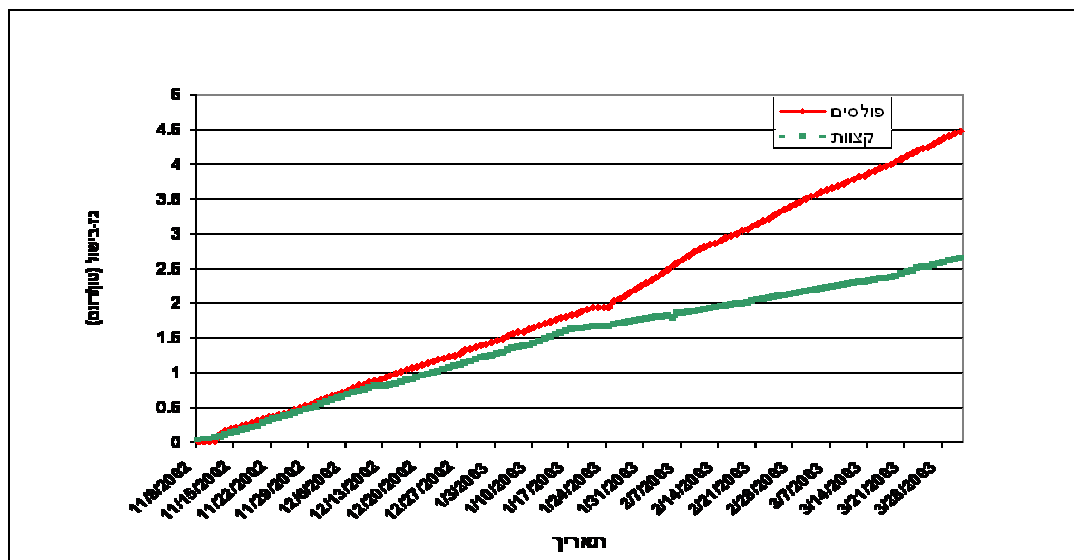
איור מס 3.

ריכוז CO_2 , הטמפרטורה והלחות היחסית ששררו בחממות הטיפול ביום מדגמי 3.1.03. למעלה חממה שבה בוצעה העשרה במהלך כל שעות היום כל עוד הטמפרטורה לא עלתה $28^\circ C$ (ערך הסף). למטה העשר ב- CO_2 בשעות הבוקר ואחר הצהרים בלבד.



איור מס 4.

ריכוז CO_2 , הטמפרטורה והלחות היחסית ששררו בחממת הביקורת ביום מדגמי 3.1.03



איור 5.

מהלך מצטבר של צריכת גז הבישול (טון לדונם) שנשרף לצורך העשרת אוויר החממה ב- CO_2 . שחור "העשרה בפולסים" במהלך כל שעות היום, אפור "העשרת קצוות" שבו סופק CO_2 בבוקר ואחרי הצהריים בלבד.

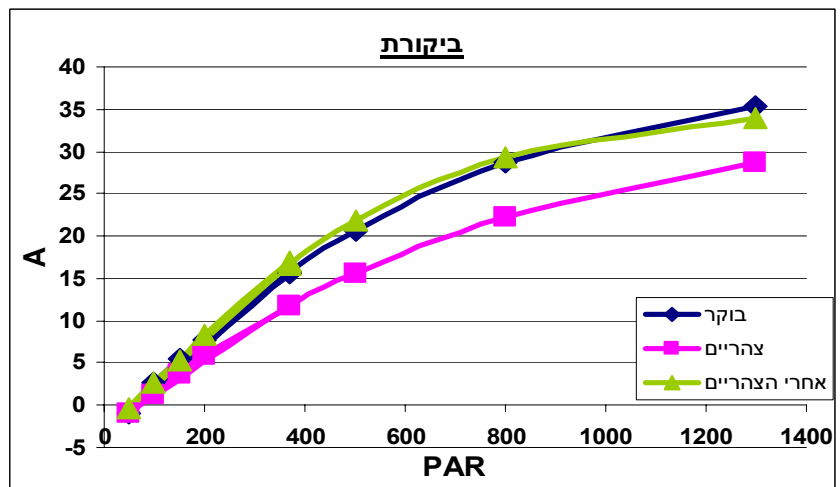
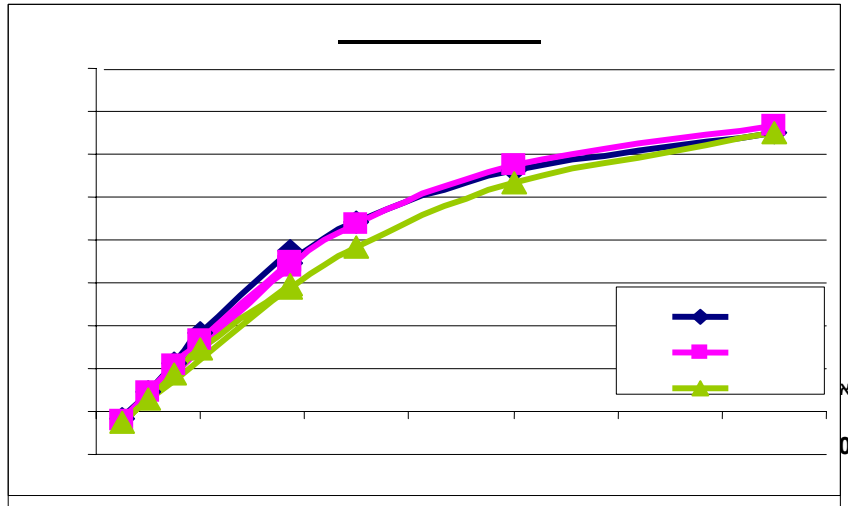
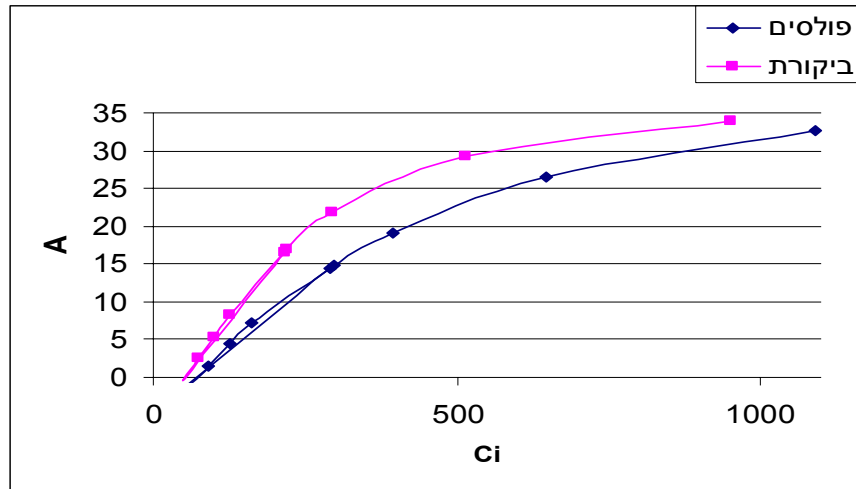
ההשפעה של העשרה ב- CO₂ על קצב קיבוע הפחמן.

הבסיס הפיסיולוגי לתוספת היבול בגידולים חקלאיים בעקבות העשרה ב- CO₂ קשור לעובדה שהעלאת ריכוז ה- CO₂ מגדילה את קצב קיבוע הפחמן נטו ועקב כך גם את קצב צבירת הביו-מסה של הצמח. למרות שבטווח הקצר (ימים) חשיפת העלים של מרבית מיני הצמחים לריכוזים עולים של CO₂ גורמת לעליה בקצב קיבוע הפחמן, הרי חוקרים רבים הראו שהעלייה בקצב קיבוע הפחמן עשויה להיות זמנית בלבד ולאחריה חוזר קצב קיבוע הפחמן לרמה המקורית (Bowes, 1991). התופעה כונתה ע"י החוקרים אקלימציה (Acclimation). ההסבר לתופעה הוא כנראה בדיכוי קצב קיבוע הפחמן כתוצאה מצבירת "עודף" של תוצרי פוטוסינתזה. צבירת תוצרי פוטוסינתזה בעלה בעיקר בצורת עמילן גורמת, בתהליך של היזון חוזר, לירידה בקצב קיבוע הפחמן. נמצא שיעילות ניצול תוספת ה- CO₂ בתנאים של העשרה מתמשכת תלויה הן בגורמים סביבתיים והן במצבו הפיסיולוגי של הצמח. הסתגלות (Acclimation) צמחים לריכוזי CO₂ גבוהים מתרחשת בצמחים שבהם לא קיימים מבלעים פעילים המסוגלים לקלוט את תוספת הסוכרים או שקיימת בהם מגבלה של הובלת הסוכרים אל המובלעים. במינים שבהם הוכח שקיימת "הסתגלות" כנ"ל ההשקעה בטכנולוגיית העשרה ב- CO₂ מיותרת. מכאן החשיבות הרבה למתן מענה לשאלה האם קיים ניצול מיטבי ומתמשך של תוספת ה- CO₂ או שמה התרחש בצמחי תות-שדה תהליך של הסתגלות.

השפעת העשרה ב- CO₂ על קצב קיבוע הפחמן נבחנה במהלך הגידול ע"י מדידות חילוף הגזים של העלים, באמצעות מערכת ניידת LI-6400. מהתוצאות שנתקבלו בשתי שנות המחקר הראשונות 2000-02 ניתן לראות שקצב קיבוע הפחמן בחממה שבה ניתנה העשרה ב- CO₂ קר היה גבוה ב- 72% מאשר בחממת הביקורת. הפסקת העשרה ב- CO₂ ואוורור החממה גרמו לירידה בריכוז CO₂ מ- 780 ppm ל- 321ppm ולירידה בקצב קיבוע הפחמן בשיעור של 85%. בחממה שבה סופק CO₂ ע"י שרפת גז היה ההבדל בקצב קיבוע הפחמן היה בשיעור של 45%. מוליכות הפיוניות הייתה מעט יותר גבוה בטיפולי העשרה מאשר בביקורת.

האפשרות שצמחי תות שדה שגדלו בריכוזי CO₂ גבוהים עברו הסתגלות לסביבתם החדשה והתאימו את קצב קיבוע הפחמן לריכוז ה- CO₂ הגבוה, נבחנה כבר בשנה שעברה ופעם נוספת השנה ע"י עריכת קווי תגובה ל- CO₂ (CO₂ response curves) בצמחים המטופלים וביקורת (איור 6). אקלימציה ל- CO₂ גבוה עלולה לגרום לכך שקצב קיבוע הפחמן בשעות שבהן לא מתקיימת העשרה יהיה נמוך מקצב הפוטוסינתזה של צמחים שלא הועשרו כלל. בדומה לממצאים של השנה שעברה ניתן לראות גם במדידות של השנה האחרונה (באיור 6) כי העשרה ב- CO₂ גרמה לאקלימציה מעטה בלבד, אשר באה לביטוי בעובדה שקו התגובה ל- CO₂ בצמחי חממת הביקורת היה גבוה במרבית הריכוזים מאשר קו התגובה ל- CO₂ בצמחי חממת ההעשרה. באיורי 6 ניתן לראות שהן הצמחים שטופלו ע"י העשרה ב- CO₂ והן הצמחים בחממת הביקורת הגיבו לריכוזים עולים של CO₂ וההבדל בין קווי התגובה היה קטן יחסית. להערכתנו האקלימציה המצומצמת נובעת מהעובדה שייצור הפירות מהווה מבלע חזק לסוכרים המובלים מהעלים אל הפרי. העובדה שלא מתרחש תהליך של הסתגלות ל- CO₂ מצביעה על יעילות הטיפול ועל כך

שבמהלך ההפסקות התכופות של העשרה, קצב קיבוע הפחמן לא היה נמוך במקבלי ה- CO_2 מזה של צמחי הביקורת.



איור מס 6

הקשר בין ריכוז ה- CO_2 הפנימי Ci לבין קצב קיבוע הפחמן A מוצג באיור העליון. הקשר בין שטף הקרינה הפוטוסינתטית PAR לבין קצב קיבוע הפחמן A בחממת טיפול העשרה בפולסים ובחממת הביקורת נמדדו בשלושה מועדים שונים במשך היום, בוקר צהרים ואחה"צ (בעמצע ולמטה).

קצב קיבוע הפחמן לאורך שעות היום.

השפעת העשרה ב- CO_2 על קצב קיבוע הפחמן בשעות אחר הצהרים. ידוע כי גם בצמחים הגדלים בתנאים מיטביים עשוי קצב קיבוע הפחמן לרדת בשעות אחר הצהריים לאחר שקיבעו פחמן באופן רציף במרבית שעות היום. הדבר עשוי לנבוע מהיזון חוזר כתוצאה מצבירת סוכרים או משינויים במאזן המים של הצמח הגורמים לסגירה חלקית של הפיוניות. לאור העובדה שאחד מטיפולי העשרה במחקר הנוכחי הוא "העשרת קצוות" כלומר העשרה ב- CO_2 בשעות הבוקר ואחר הצהרים בחננו את יעילות העשרה בשעות אחר הצהרים. באיור 6 מוצג הקשר בין קצב קיבוע הפחמן A לבין שטף הקרינה הפוטוסינתטית אליה נחשפו העלים במערכת המדידה. המדידות בוצעו בשעות הבוקר הצהרים ואחר הצהרים בחממת הביקורת ובחממת ההעשרה. מהתוצאות עולה כי קצב קיבוע הפחמן היה יעיל במידה דומה בשעות הבוקר ואחר הצהרים.

סיכום ומסקנות:

ניסוי העשרה ב- CO_2 בוצע למעשה במשך שלוש שנים רצופות. התוצאות של שנת המחקר השלישית מחזקות את התוצאות שנתקבלו בשתי שנות המחקר הראשונות (תוצאות פורסמו בדו"ח סופי שנמסר למדען בקיץ 2002). העשרה ב- CO_2 הגדילה את היבול הראוי ליצוא (מסוג א') באופן מובהק ב-30% מעל לטיפול הביקורת. הטיפול שכונה "העשרת קצוות" בוצע בשתי שנות המחקר האחרונות, בשנת המחקר האחרונה הוכחה יעילותו לעומת שיטת "העשרה בפולסים". גובה היבול שנתקבל בשתי השיטות לא נבדל באופן מובהק האחד מהשני לעומת זאת עלות העשרה בטיפול הקצוות הייתה זולה ב-40% בקירוב לעומת העשרה במשך כל היום שהופסקה לעיתים תכופות לשם הורדת הטמפרטורה. המסקנה העולה מהמחקר היא שלהעשרה ב- CO_2 עד לריכוז של 900ppm הייתה השפעה מובהקת שהתבטאה בעליה של 30% בקירוב בגובה היבול. לא נמצא הבדל באיכות הפרי וכושר השתמרותו בין טיפולי ההעשרה לבין טיפול הביקורת. לפיכך אנו ממליצים למגדלי תות שדה בחממות לאמץ בהדרגה את שיטת ההעשרה ב- CO_2 כאחת התשומות שעשויות להגדיל את רווחיות הגידול.