

דו"ח סופי לתוכנית מחקר מספר 06-0501-301
פיתוח דרכים למזעור נזקי בורון בצמחים
Chives response to recycling of the irrigation water
מוגשת למדען הראשי של משרד החקלאות

ע"י

אורי ירמיהו ואלון בן גל, מינהל המחקר החקלאי, מרכז מחקר גילת.

בו-חיים גוזל, מכון ולקני, מינהל המחקר החקלאי

Yermiyahu U., Ben-Gal A. Gilat Research Center, Agricultural Research Organization, Mobile Post
Negev, Israel, 85280. Email: uri4@agri.gov.il.
Ben-Himm G. Volkani Center, Agricultural Research Organization

יולי 2009

תמוז תשס"ט

הממצאים בדו"ח זה הינם תוצאות ניסויים.
הניסויים מהווים המלצות לחקלאים: לא
חתימת החוקר _____:

1. תקציר

בורון הינו יסוד קורט חיוני לצמח, אשר השפעתו חיובית בתחום צר מאוד של ריכוזים בתמיסת הקרקע. בריכוזים גבוהים מערך סף נתון הוא רעיל לצמח. בישראל קיימת בעיה של רעילות בורון בעיקר באזור הנגב והבקעה. רעילות של בורון היא תוצאה של השקיה במים שמכילים בורון או בבורון שקיים באופן טבעי בקרקע. קרקעות הנגב ובקעת הירדן עשירות בבורון וסימני רעילות של בורון נצפים בהדרים בנגב ובגפנים בבקעת הירדן. השימוש ההולך וגובר במי קולחים וכן הפעלת מתקני ההתפלה יכולים להעלות את ריכוז הבורון במי ההשקיה בכל שטחי החקלאות בארץ. מטרת המחקר היא למצוא דרכים להקטין קליטת בורון ע"י צמחים ולצמצם את הנזקים הנגרמים לצמחים מקליטה עודפת. במהלך המחקר התבצע ניסויים לבחינת השפעת גורמים שונים על קליטת בורון. הניסויים כמתוכנן התבצעו בתנאים מבוקרים בתמיסות מזון ובעציצים בחממה. עם העליה בחומציות מי ההשקיה ישנה עליה בקליטת הבורון. בדיקות אזוטופים של בורון מצביעות על כך שהמנגנון המעורב הוא ההשפעה על מיני הבורון שבתמיסת הגידול. ניסויים שנעשו על צמחים בעלי הרכב ממברנות שונה לא מצביעים על מגמה אחידה וברורה. השפעה של תדירות ההשקיה על קליטת בורון נלמדה במספר ניסויים לא נמצאה השפעה לתדירות ההשקיה על קליטת בורון ע"י צמחי עגבניה. מאידך קליטת הבורון הושפעה מאוד מהרכב המלחים וריכוזם. ככלל, עם העליה בריכוז המלחים קטנה הקליטה של בורון ללא תלות בסוג המלח.

2. מבוא ותאור הבעיה

בורון הינו יסוד קורט חיוני לצמח, אשר השפעתו חיובית בתחום צר מאוד של ריכוזים בתמיסת הקרקע. בריכוזים גבוהים מערך סף נתון הוא רעיל לצמח, ובריכוזים נמוכים מסף נתון הצמח סובל ממחסור. בורון נמצא בשני צורות בתמיסות מהולות: חומצה בורית ובורט. חומצה בורית הינה מולקולה נייטרלית והבורט מולקולה טעונה שלילית. היחס בין צורוני הבורון תלוי בחומציות. בערכי pH נמוכים מ-7.5 רוב הבורון נמצא כחומצה בורית ועם העליה ב-pH עולה ריכוז הבורט כאשר בערך 9.25 pH הריכוז בין חומצה בורית לבורט משתווה (Power and Woods, 1997). הבורון נקלט ע"י הצמח באופן פסיבי בצורת חומצה בורית והנתונים מראים שלמרות ריכוזי בורון שווים בתמיסה קליטתו שונה בצמחים שונים ובתנאי גידול שונים (Brown et al., 2002). חומציות תמיסת הגידול משפיעה על קליטת בורון כאשר עם הירידה בחומציות (ערכי 6 pH ומעלה) חלה ירידה בקליטת הבורון. באופן כללי, עקום הדיסוציאציה של חומצה בורית מתאים לעקום הקליטה של הבורון. עובדה זאת מחזקת את הטענה שהבורון נקלט בעיקר כחומצה בורית (Marschner 1995). דוגמא להשפעת החומציות על קליטת בורון התקבלה על ידינו בניסויים שהסתיימו לאחרונה (ירמיהו וח' 2005 א). מצאנו שהחמצת מי המצע ע"י שינוי יחס אמון/חנקן או הוספת חומצה גופרתית לתמיסת ההשקיה הורידה בצורה מובהקת את ריכוז הבורון בעלי עירית (ציור 1). לדוגמא, בגידול החורפי, הורדת ריכוז האמון במי ההשקיה מ-70% ל-26% גרמה לעליה בחומציות מי הנקז מערך pH של 7.7 ל-5.0 ובמקביל לירידה מובהקת בריכוז הבורון בעלים בשיעור של 17%. החמצת מי ההשקיה לערך של 5.0 pH הגבירה באופן מובהק את ריכוז הבורון בעלים בשיעור של 9% בלבד למרות שחומציות מי הנקז בשתי השיטות היתה דומה. בתנאים אלו, נראה שהחמצת מי המצע ע"י שינוי ביחסי אמון/חנקן יעילה יותר מהחמצת מי ההשקיה. בשתי השיטות העליה בקליטת הבורון הגבירה באופן מובהק את שיעור הקצוות הצרובים בעלי העירית בשיעור של 41-46%. בגידול עירית בתקופת הקיץ התקבלו תוצאות דומות ביחס לקליטת הבורון ושיעור הקצוות הצרובים. בטיפולים המוחמצים שיעור הקצוות היה גבוהה בכ-25% בהשוואה לטיפולי ההיקש. הרחקת הקצוות היבשים בעירית הינה הוצאה שלעיתים מבטלת את רווחיות הגידול. בשני הניסויים שהוצגו ריכוז הבורון במי הברז היה נמוך ברמה של כ-0.03 מלימולר ולמרות זאת, הירידה בקליטת הבורון ע"י שינוי

בחומציות מי המצע הפחיתה את הקצוות הצרובים. יש להניח שברכיזוי בורון גבוהים יותר השפעת הטיפולים תתחזק.

גורם נוסף שמשפיע על קליטת בורון הוא נוכחות של מלחים שונים בתמיסת הגידול. בניסויים שהתבצעו בשנים האחרונות הראנו במגוון רחב של גידולים: פלפל, חיטה, הדסים, אפרסמון, גפן ועוד כי העלאת ריכוז נתרן כלורי הפחיתה את ריכוז הבורון בנוף (Yermiyahu et al., 2003), ירמיהו וח' 2005 ב). עבודה בשורשי חיטה שנחשפו לבורון לזמן קצר מצביעה על כך שלעליה בריכוז הנתרן הכלורי השפעה ישירה על קליטת הבורון ע"י השורשים (ירמיהו מידע אישי). המנגנון אינו ברור לגמרי וברור שאין מדובר על תחרות בין נתרן או כלוריד לבין הבורון מאחר והבורון נקלט כמולקולה בלתי טעונה בעוד האחרים נקלטים כיונים טעונים. הסבר אחר הינו שינויים בהרכב האניונים בציטופלסמה שמשרים פתיחת תעלות שמוציאות אניונים מהתא. בתוך הציטופלסמה בורט הוא הצורון העיקרי של הבורון ולפיכך הוא יכול להתנהג כשאר האניונים. מנגנון קליטת הבורון אינו ברור לגמרי אך מוסכם ע"י מרבית החוקרים שהדיפוסיה דרך ממברנות השורש בעיקר ברמת זמינות גבוהה היא הדרך העיקרית לקליטת בורון אשר מושפעת באופן משמעותי מהדיות (Brown et al., 2002). בעבודה במעבדה בשלפוחיות ממברנליות נמצא ששינוי בהרכב הממברנה, כגון שינוי כמות הסטרולים, שינוי בסוג השומנים הפולריים, אורך חומצות השומן ומידת רוויתן השפיע על קצב קליטת הבורון (Dordas and Brown 2000). לאחרונה יצרנו תאי וצמחי טבק בהם הוגברה דרגת אי הרוויה של חומצות השומן. בחינת גידול תאי הטבק בנוכחות בורון מצביעה על יתרון גדול לתאי הטבק המותמרים (BY-2-fad3 יחסית לתאי הביקורת (BY-2) (ציור 2).

קליטת הבורון בצמח נעשית מתמיסת הקרקע בלבד ונמצאת בתלות ישרה לריכוזו בתמיסה (Ryan et al., 1977). מקור הבורון בקרקע ממי השקיה או ממינרלים ראשוניים המצויים בקרקע (טורמלין לדוגמה). בדרך כלל ריכוזו בתמיסת הקרקע עולה עם רמת מליחותה. לתהליכי הספיחה והשחרור של בורון מהקרקע חשיבות רבה בקביעת ריכוז הבורון בתמיסת הקרקע. אתרי הספיחה בפאזה המוצקה משמשים מאגר המספק או קולט בורון מתמיסת הקרקע, בהתאם לאפיניות הקרקע לבורון ולשינוי הריכוז הבורון בתמיסה. ספיחה של בורון לקרקעות ולמרכיבי הקרקע השונים (מינרלי חרסיות, תחמוצות חופשיות וחומר אורגני) נלמדה בעבודות רבות (Keren and Mezuman, 1981; Keren et al., 1981). כמו כן ידועים השפעות של גורמים שונים כגון החומציות, ריכוז הבורון בתמיסה והחוזק היוני של התמיסה על ספיחת בורון (Couch and Grim, 1968; Keren and Bingham, 1985). עליה בחוזק היוני של תמיסת שווי המשקל העלתה את כמות הבורון הנספח ליחידת משקל של חרסיות וחומר אורגני (Yermiyahu et al., 1988). לחומציות השפעה משמעותית על שיעור ספיחת הבורון בקרקעות ובחומר אורגני. עם העליה בחומציות עד לערכי pH של כ-9.5 יש עליה בכמות הבורון הנספח ולאחר מכן מתחילה ירידה בספיחה. הגורמים לכך הם השינוי בצורוני הבורון ומקדמי הקשירה השונים של החומצה בורית והבורט (Keren and Bingham, 1985; Yermiyahu et al., 1995).

גורם נוסף הקובע את ריכוז הבורון בתמיסת הקרקע הוא היכולת לדחוק את הבורון אל מתחת לשכבת בית השורשים. בורון כחומצה בורית או כבורט נע עם זרם המים בקרקע. כמות המים הדרושה לשטיפה של בורון יכולה לנוע ממאות אלפי מ"מ מים בהתאם לרמת הבורון בקרקע, סוג הקרקע, שיטת השטיפה ועומק החתך השטוף הדרוש. כמות המים הדרושה לשטיפה הבורון בקרקעות בקעת הירדן גבוהה עד כדי פי שלושה בהשוואה לכלוריד (יוטל 1990). נראה שבקרקעות הלס שבנגב המערבי כמות המים שדרושה לשטיפת הבורון גבוהה אף יותר. באזור הנגב המערבי הושקו מאז שנות השבעים עשרות אלפי דונמים במים

מליחים נתרניים (מוליכות חשמלית של 3-5.5 דציסימנס למ') שמכילים גם בורון ברמה של 2-3.5 ח"מ. הגידול העיקרי בחלקות אלו היה כותנה שידוע כצמח עמיד למליחות ובורון. הקרקעות באזור זה הם קרקע לס עם כמות ממוצעת של גשם חורפי בשיעור של 200-350 מ"מ. בגלל ירידה בהכנסות מגידול הכותנה החלו בשנים האחרונות לגדל בחלקות הללו גידולים אחרים כגון אגוזי אדמה ותפוח"א אשר מושקים במים בעל איכות טובה (1 דציסימנס למ' ובורון 0.02-0.03 מילימולר). תופעות של התייבשות עלים, פגיעה בגידול וביבול התרמילים באגוזי אדמה נצפו בעיקר בחלקות אלו. במשך שתי עונות גידול (2001-2003) נערך על ידנו מעקב קרקעי וצמחי בחלקות עם היסטוריה של השקיה במים מליחים לעומת חלקות שהושקו במים בעל איכות טובה יותר. באופן כללי, הפרופיל של ריכוז המלחים הכללי בקרקע בתחילת עונת הגידול היה דומה בין שתי החלקות עד לעומק של 90 ס"מ. ריכוז מלחים גבוהה יותר נמצא רק בעומק רב יותר בחלקה עם ההיסטוריה המלוחה (5 דציסימנס למ' במצוי עיסה רוויה) לעומת החלקה עם ההיסטוריה של השקיה במים טובים (2 דציסימנס למ'). בסוף עונת הגידול צומצמו גם הבדלים אלו. לעומת זאת, ריכוז הבורון בקרקע עם ההיסטוריה המלוחה היה גבוהה בשיעור ניכר בהשוואה לקרקע שבחלקה שהושקתה במים טובים, 1.2-2 ח"מ לעומת 0.3-0.5 ח"מ בעיסה רוויה, בהתאמה. לאורך מרבית הגידול ריכוז הכלוריד והנתרן בעלים היה דומה בצמחים שגדלו בשתי החלקות. ריכוזים גבוהים במעט של יסודות אלו התקבלו רק לקראת סוף הגידול בחלקה עם ההיסטוריה המלוחה. ריכוזי הבורון בעלים בחלקה עם ההיסטוריה המלוחה היו גבוהים בשיעור ניכר בהשוואה לחלקה השניה 150-250 לעומת 50-90 מ"ג לק"ג, בהתאמה. משקל החומר היבש במרבית עונת הגידול בצמחים שנדגמו בחלקה עם ההיסטוריה המלוחה היה נמוך בממוצע ב-21% מאשר הצמחים מהחלקה השניה. יבול התרמילים היה פחות ב-38% בחלקה עם ההיסטוריה המלוחה לעומת החלקה השניה. באופן כללי, המגמות בכל הפרמטרים שנבדקו בשנת 2003 דומות לאלו של 2001. תוצאות אלו מצביעות על כך שהגורם העיקרי לפגיעה בגידול הוא הבורון שנשאר בקרקע שנקלט ע"י הצמחים מצטבר בעלים וגורם גם לירידה ביבול התרמילים. מכאן, שלטווח רחוק הבעיה העיקרית של השקיה במים מליחים המכילים בורון הינה הצטברות של הבורון בקרקע. מימשק גידול מתאים ומשקעים יכולים להרחיק מלחים כגון נתרן כלורי משכבת בית השורשים. לעומת זאת, את הבורון שנספח לקרקע קשה יותר לשטוף וגם שנים רבות לאחר יישומו הוא יכול לגרום לנזק לצמחים. כמות המים הדרושה לשטיפתו אינה נמצא ולכן נשאלת השאלה האם ניתן לצמצם את השפעת הבורון שבקרקע באמצעים אחרים כגון התאמת ממשק השקיה.

השפעת ממשק ההשקיה על קליטת בורון הוא נושא שלא נבחן עד היום בצורה מעמיקה. לכמות המים המושקת ותדירות ההשקיה יכולה להיות השפעה על קליטת הבורון בשתי דרכים. הדרך הראשונה היא השפעה ישירה על הצמח. במרבית הצמחים, הבורון נע בזרם הקסילם בלבד ולכן זמינות גבוהה של מים יכולה להניע את הבורון מהשורשים לנוף ובכך לשמור על הפרש ריכוזים גבוהה בין הריכוז בתוך התאים לסביבה החיצונית וע"י כך להגביר את הדיפוזיה של הבורון לתוך התאים. הדרך השניה היא השפעה עקיפה דרך שינוי בריכוז הבורון בתמיסת הקרקע. מאחר והבורון נקלט באופן ישר וחיובי לריכוזו בתמיסת הקרקע עליה בריכוזו גם באופן זמני בגלל תהליכי ייבוש לדוגמא, עשויה להגדיל את קליטתו. לעומת זאת, הירידה בזמינות המים עשויה להקטין את קליטתו במנגנון שהוסבר למעלה. התוצאה הסופית תהיה תלויה בתרומה של כל מרכיב. גורם עיקרי שישפע הוא סוג הקרקע. מאחר ותהליכי הספיחה והשחרור למרכיבי הקרקע הם הגורמים העיקריים שקובעים את ריכוז הבורון בתמיסת הקרקע ותלויים מאוד בסוג הקרקע. בקרקעות קלות בהן הספיחה של הבורון קטנה, התייבשות הקרקע מעלה את ריכוז הבורון בתמיסת הקרקע. בקרקעות כבדות תהליכי הספיחה והשחרור של הבורון ממתנים את שינוי הבורון בתמיסת הקרקע. בשנים האחרונות פותחו אביזרי השקיה המאפשרים השקיה במספר רב מאוד של פעמים. ההשפעה של תדירות ההשקיה על קליטת בורון לא נבחנה עד כה. ההיפותזה של המחקר היא שהגדלת תדירות ההשקיה תקטין את קליטת הבורון ע"י

הצמחים בעיקר באלו שגדלים בקרקעות קלות או במצעים מנותקים. גורם נוסף בממשק ההשקיה הוא כמות המים המושקת. השקיה ברמות מים גבוהות מגדילה את כמות הבורון המיושם ואת הצטברותו בקרקע. לפיכך, יש יתרון בהקטנת כמות המים המושקת מעבר לחסכון במים. נכון להיום מומלץ להגדיל את מנת ההשקיה באותם מקומות שהמים מכילים בורון. לדעתנו בממשק השקיה שיכלול תדירות גבוהה אין צורך להגדיל את מנת המים היומית ואולי אפילו עדיף להקטינה במידה מסויימת ולהקטין ע"י את קליטת הבורון. מטרה המחקר היא למצוא דרכים להקטין קליטת בורון ע"י צמחים ולצמצם את הנזקים הנגרמים לצמחים מקליטה עודפת. מטרת המשנה:

1. לבחון את ההשפעה של חומציות מי ההשקיה והרכב המלחים על קליטת בורון.
2. לבחון את תדירות ההשקיה על קליטת בורון.
3. לבחון את התרומה של הרכב ממברנת הפלסמה על קליטת בורון.

3. חומרים ושיטות

3.1 ניסויים לבחינת השפעת חומציות תמיסת הגידול על קליטת בורון

זרעי עגבניה מזן MP1 הושרו ב-0.5% אקונומיקה למשך חמש דקות ונשטפו במי ברז מספר רב של פעמים. לאחר מכן הושרו הזרעים ב-10 מילימולר סידן כלורי לשלוש שעות. הזרעים הונבטו על מצע פרלייט בחדר גידול בטמפרטורה של 25 מעלות צלזיוס והושקו בתמיסת דשן. לאחר מספר שבועות, שתילים בגודל אחיד נשטפו להרחקת הפרלייט והועברו לבקבוקי ארלנמייר אשר הכילו תמיסות מאווררות. הבקבוקים בנפח של 5 לי נעטפו בנייר כסף על מנת למנוע חשיפת השורשים לאור. בכל בקבוק גודל צמח אחד. השתילים גודלו בחדר גידול חשוף לאור טבעי ומוסת טמפרטורה של 25 ± 1 מעלות צלזיוס ביום ו- 15 ± 1 מעלות צלזיוס בלילה. לפני העברת השתילים הובאו התמיסות ל-pH הרצוי ע"י KOH או HCl בהתאם לצורך. להערכת הדיות נשקלו הבקבוקים בתחילת הניסוי ובסיומו. שני בקבוקים ללא צמחים הוצבו על מנת להעריך את האוופורציה מפני שטח הבקבוקים. במהלך הניסוי נבדקה החומציות פעם ביום לפחות ובהמשך מספר פעמים ביום והחומציות תוקנה בכל פעם בעזרת KOH או HCl לערך הרצוי. בתום הניסוי הופרדו השורשים מהנוף. נשקלו ואחר שטיפה במים מזוקקים יובשו בתנור ב-60 מעלות צלזיוס. העלים והשורשים היבשים נשקלו נטחנו ונקבע בהם ריכוז הבורון. כל טיפול הכיל לפחות 3 חזרות, הניסוי הוצב במבנה של בלוקים באקראי. בניסוי נבחנו 5 רמות pH 5, 6, 7, 8 ו-9 ברמת בורון אחת של 2 ח"מ. תמיסות מהניסוי לפני ואחרי גידול הצמחים וכן דוגמאות של שורשים ועלים טחונים נשלחו לצרפת למעבדה של ד"ר קלאופמן וולפרם ב- BRGM לבדיקת איזוטופים של בורון.

3.2 ניסויים לבחינת הרכב המלחים בתמיסת הגידול על קליטת בורון

זרעי פלפל מזן מאור שימשו לניסויים. המערכת שתוארה עבור גידול העגבניה שימשה לגידול הפלפל. אלא שהפלפל גודל בארלנמיירים בנפח של 1 לי צבועים בשחור. pH תמיסת הגידול היה 6 והשתנה בחצי יחידה מקסימום במהלך הגידול. הצמחים גודלו בשלב ראשון בתמיסה אחידה לאחר יומיים הועברו לתמיסה שהכילה את הטיפול המתאים. מידי יום הוספה תמיסה להשלמת המים שנקלטו ע"י הצמחים. לאחר שבוע הוחלפו תמיסות הגידול. משך הגידול בתמיסת הטיפול היה 14 יום. כל הניסויים נערכו במבנה של בלוקים ב-5 חזרות. חומציות וריכוז בורון נקבעו בתמיסות הגידול בתום הניסוי. בתום כל ניסוי צמחים פורקו ונקבע בורון בשורשים ובעלים לאחר שריפה יבשה בשיטה של אזומטיין H-. במהלך המחקר נערכו כ-20 ניסויי גידול בהם גודלו צמחי פלפל בריכוז והרכב שונה של מלחים. המלחים שנבחנו היו נתון כלורי, סידן כלורי, אשלגן כלורי,

נתרן גופריתי ואשלגן גופריתי כל אחד מהמלחים במספר ניסויים. בדו"ח יוצגו תוצאות עיקריות של הניסויים.

3.3 ניסויים לבחינת ההשפעה של ממשק ההשקיה על קליטת בורון

במהלך המחקר נעשו 4 ניסויים בהם נבחנה תדירות ההשקיה על קליטת בורון. צמחי עגבניה נשתלו בעציצים בנפח 2 ל' במצע פרלייט וגדלו בחממה במרכז מחקר גילת. נבחנו 2 משתנים: תדירות השקיה בשלוש רמות (השקיה פעם ביום או פעם ביומים, 4 פעמים ביום, והשקיה רציפה), בורון בתמיסת הגידול בשלוש רמות (0.2, 1 ו-10 ח"מ). הניסוי דו גורמי מאוזן כלומר 9 טיפולים. ריכוזי הבורון שנבחרו לטיפולים מייצגים מצב של הזנה רצויה, עודפת ורמה רעילה. כל הטיפולים דושנו בעזרת דשן נוזלי מסחרי (N, P_2O_5, K_2O ; 7:3:7) ברמה של ליטר לקוב אליהם הוספה חומצה בורית ברמה הרצויה. ערך ההגבה במי הטפטפת היה בסביבות 7 והמוליכות החשמלית כ-1 דציסימנס למ'. במהלך הגידול נאספו מי נקז ונמדדו בהם ערך ההגבה, מוליכות חשמלית ובורון. השקיה ניתנה כך שיהיה נקז בנפח של כ-50%. ההשקיה נעשתה במערכת של תמיסות סופיות מבוקרת ע"י ברזים חשמלים ומחשב השקיה. הטיפול הרציף התבצע ע"י מיכל שהוזן בנפח המים הרצוי שסיפק מים בצורה רציפה במהלך כ-10 שעות. הניסויים הוצבו במבנה של בלוקים באקראי ב-8 חזרות. צמחים נשתלו במועדים סוף יוני 2007, ספטמבר 2007, מאי 2008 ו-יולי 2008. גידול בכל ניסוי נמשך בין 4 ל-5 שבועות. במהלך הגידול הוסרו הפרחים. בתום הגידול הצמחים נקצרו והפרדו גבעולים משורשים ושורשים נשטפו מהפרלייט. חלקי הצמח נשקלו לפני ואחרי ייבוש ב-60 מעלות צלזיוס. ריכוזי הבורון בעלים נקבעו בשיטה של אזומטיין-H.

3.4 ניסויים לבחינת השפעת ההשפעה של הרכב ממברנת הפלסמה על קליטת בורון

עגבניה מזן MPI ועגבניה טרנסגנית שפותחה במעבדתנו (גוזל בן-חיים) בה הועלתה דרגת אי הרוויה של חומצות השומן בממברנות התא (בעיקר החומצה הלינולנית), במיוחד בשורשים, שימשו בניסויים בתמיסות מזון באותה מערכת ששימשה במטרה 1. הצמחים גדלו במיכלים של 1 ל' שנצבעו בשחור. הצמחים גודלו ב-5 ריכוזי בורון בטווח רחב מתחום של גבול המחסור עד לרעילות 0.2, 1, 5, 10 ו-20 ח"מ בורון. בכל ניסוי יהיו 10 טיפולים (5 ריכוזי בורון $2 \times$ סוגי צמחים). ניסוי הוצב במבנה של בלוקים באקראי ב-5 חזרות. בתום כל ניסוי יקבע משקל הצמחים, ריכוז הבורון הכללי בשורשים וריכוז הבורון בנוף. הניסוי נמשך שבוע במהלכו נקבעה כמות התמיסה שנצרכה ע"י הצמחים. ערך ההגבה של תמיסת הגידול היה כ-6.0 המוליכות החשמלית היתה 0.72 דציסימנס למ'. הניסוי התבצע שלוש פעמים.

קביעת בורון – בורון בתמיסה נקבע בשיטת ה- (Azomethine-H) (Gupta and Stewart, 1975). קביעת בורון בריקמה צמחית נעשתה בשיטת שריפה יבשה: שריפה בטמפרטורה של 550 מעלות צלזיוס, למשך 4 שעות, המסת האפר בחומצה מלחית בריכוז של NI, סינון וקביעת בורון בשיטה שצוינה למעלה עבור תמיסה מימית.

4. תוצאות

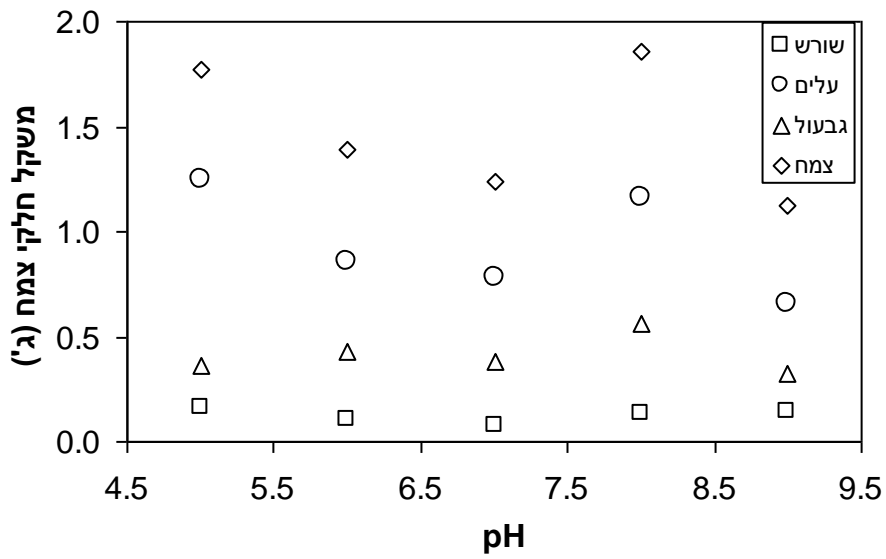
4.1 בחינת השפעת חומציות תמיסת הגידול על קליטת בורון

בשלב ראשון נערכו ניסויים שמטרתם היתה לקבוע את התנאים המתאימים לביצוע הניסויים: תנאי הגידול (נפח מיכלי הגידול) ומשך ביצוע הניסוי. שמירה חומציות קבועה של תמיסת הגידול מהווה בעיה מאחר והצמח משפיע על תמיסת הגידול הוא יכול להוריד או לעלות את החומציות כתלות בהרכב תמיסת

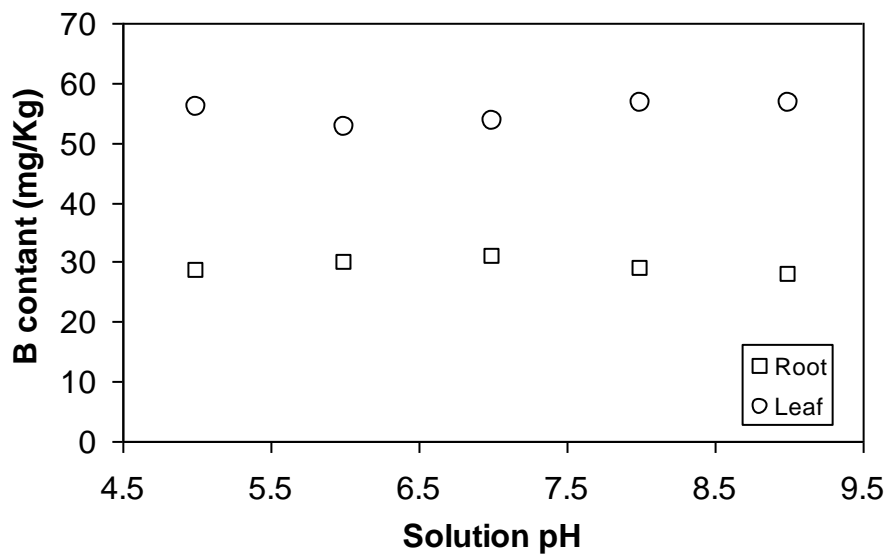
ההזנה, גודלו, תנאי הסביבה ומשך הניסוי. בנוסף על מנת לראות הבדלים בקליטת הבורון יש צורך לקבוע את ריכוז הבורון שאליו נחשפים הצמחים ומשך החשיפה. בורון מצטבר בצמח ולפיכך עם הארכת משך הגידול ההבדלים גדלים. בורון אינו יכול להיות רדיואקטיבי ולכן ישנו קושי בלימוד כמותי בריכוזים נמוכים של בורון ו/או בחשיפה לזמן קצר. בורון נמצא בטבע בצורה של איזוטופים B^{10} ו- B^{11} . היחס בין האיזוטופים של הבורון בשני צורני הבורון (ח' בורית או בורט) אינו קבוע. תכונה זאת נוצלה על ידינו על מנת ללמוד על אופי קליטת הבורון כחומצה בורית או בורט. בדיקות האיזוטופיות נעשו בצרפת ב-BRGM ע"י ד"ר קלאופמן. מאחר והלימוד נעשה ע"י השינויים ביחס בין האיזוטופים בתמיסה ובצמח אין יכול להוסיף תמיסות במהלך הגידול. בשלב השני נערכו ארבע ניסויים ברמות שונות של בורון. בסה"כ נערכו שני ניסויים בריכוז בורון של 0.2 ח"מ ושני ניסויים נוספים ברמה של כ-2.0 ח"מ בורון. בדו"ח יוצגו תוצאות של ניסוי אחד בכל רמת בורון. בניסויים הראשונים נקבעו נפחי הגידול הדרושים ומשך הגידול. נערך ניסוי בו גודלו צמחים בנפח של 1 ל' למשך שבוע במספר ערכי הגבה (5-10). התברר שלא ניתן לשמור על ערך ההגבה הרצוי גם כאשר נעשו תיקוני pH מספר פעמים ביום. לפיכך, עברנו לגדל את הצמחים בנפח של 5 ל'. גם במערכת זאת נתקלנו בבעיה כאשר צמחים שגדלו ב-pH 9 ומעלה נפגעו בצורה משמעותית וחלקם אף מתו לאחר מספר ימי חשיפה. הסיבה העיקרית היתה כנראה רעילות של אמוניה בגלל נוכחות אמון במערכת הגידול. לפיכך, הניסויים הבאים התבצעו כאשר החנקן בתמיסת הגידול היה כניטרט בלבד.

משקל ח"י של שורש, גבעול ועלים כתלות בחומציות מי ההשקיה מוצגים בציר 1. השפעת החומציות על הגידול אינה במגמה אחידה בניחות הסטטיסטי אין הבדל מובהק בין הטיפולים ביחס למשקל ח"י של אף איבר. בציר 2 מוצגים ריכוזי הבורון בשורש ובנוף כתלות בטיפולים. ריכוז הבורון בשורשים הינו כחצי מריכוז הבורון בנוף. ריכוז הבורון בתמיסה היה 0.4 ח"מ והצמחים גדלו למשך שבעה ימים. בתנאים אלו נראה שלחומציות אין השפעה על הצטברות הבורון בשורשים או בנוף.

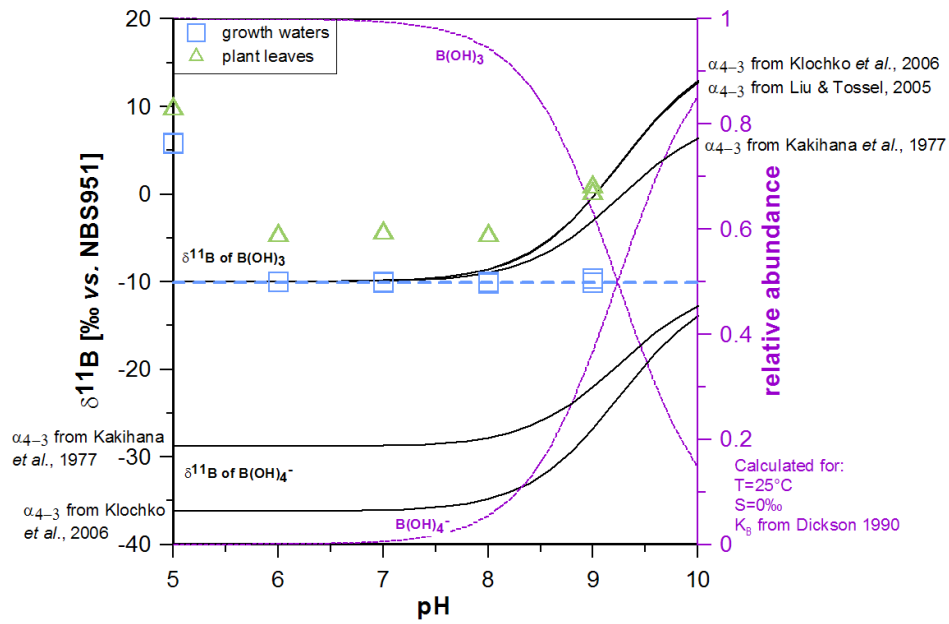
בציר 3 מוצגת השתנות ריכוזי ח' בורית ובורט כנגד החומציות במי ההשקיה כמו כן מוצג שיעור של B^{11} בתמיסת הגידול ובצמח. בריכוז pH נמוך בו חומצה בורית דומיננטית ניתן לראות שהפרקצונציה האיזוטופית קבועה. בתנאי חומציות אלו עיקר הבורון כחומצה בורית שהיא מועשרת ב- B^{11} ולכן הערך נשאר קבוע. לעומת זאת ב-pH 9 בו ריכוז החומצה הבורית שווה בערך לריכוז הבורט ניתן לראות כי ירידה בשיעור האיזוטופ של B^{11} . בציר 4 מוצג יחס של B^{11} בצמח כנגד שיעורו בתמיסה וניתן לראות העשרה שלו בצמח בהשוואה לתמיסה. תוצאות אלו מצביעות על כך שבורון נקלט בעיקר כחומצה בורית ולא כבורט. על מנת לבדוק האם קליטת בורון בריכוז גבוהה מתנהגת באופן דומה לזו שהתקבלה בריכוז הנמוך נערכו ניסויים בהם נחשפו צמחי עגבניה לריכוז בורון של 2.0 ח"מ. בציר 5 מוצגים ריכוזי הבורון בשורש ובנוף כתלות בטיפולים בשני ניסויים המייצגים ריכוז גבוה ונמוך של בורון. ריכוז הבורון בשורשים נמוך באופן משמעותי מזה שבנוף. בציר 6 מוצגת השתנות ריכוזי ח' בורית ובורט כנגד החומציות במי ההשקיה כמו כן מוצג שיעור של B^{11} בתמיסת הגידול ובצמח בניסוי ברמת הבורון הגבוה. באופן כללי, תוצאות שהתקבלו בריכוז הבורון הגבוה דומים לאלו של בורון בריכוז הנמוך. בריכוז pH נמוך בו חומצה בורית דומיננטית ניתן לראות שהפרקצונציה האיזוטופית קבועה. בתנאי חומציות אלו עיקר הבורון כחומצה בורית שהיא מועשרת ב- B^{11} ולכן הערך נשאר קבוע. לעומת זאת ב-pH 9 בו ריכוז החומצה הבורית שווה בערך לריכוז הבורט ניתן לראות כי ירידה בשיעור האיזוטופ של B^{11} . בציר 7 מוצג יחס של B^{11} בצמח כנגד שיעורו בתמיסה וניתן לראות העשרה שלו בצמח בהשוואה לתמיסה. תוצאות אלו מצביעות על כך שבורון נקלט בעיקר כחומצה בורית ולא כבורט ללא תלות בריכוז הבורון בתמיסת הגידול.



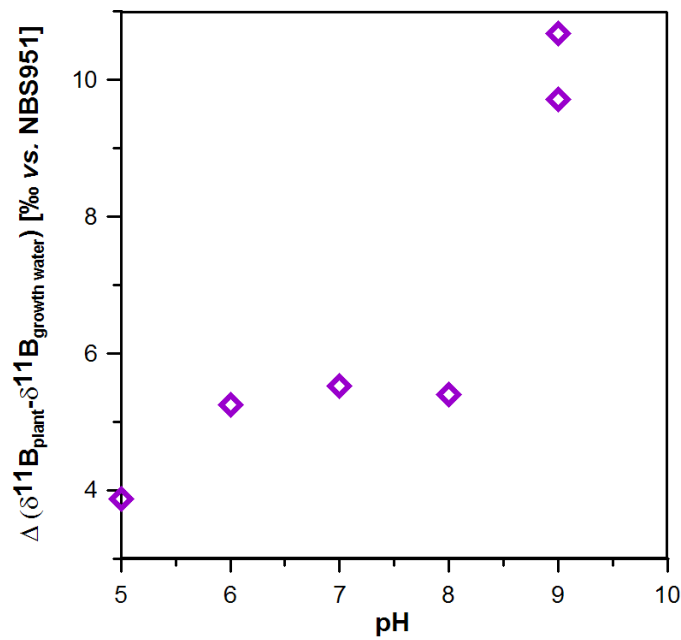
ציור 1. משקל ח"י של חלקי צמח עגבניה כתלות בחומציות תמיסת הגידול. עגבניה גדלה למשך שבוע בתמיסת גידול בנוכחות 0.2 ח"מ בורון.



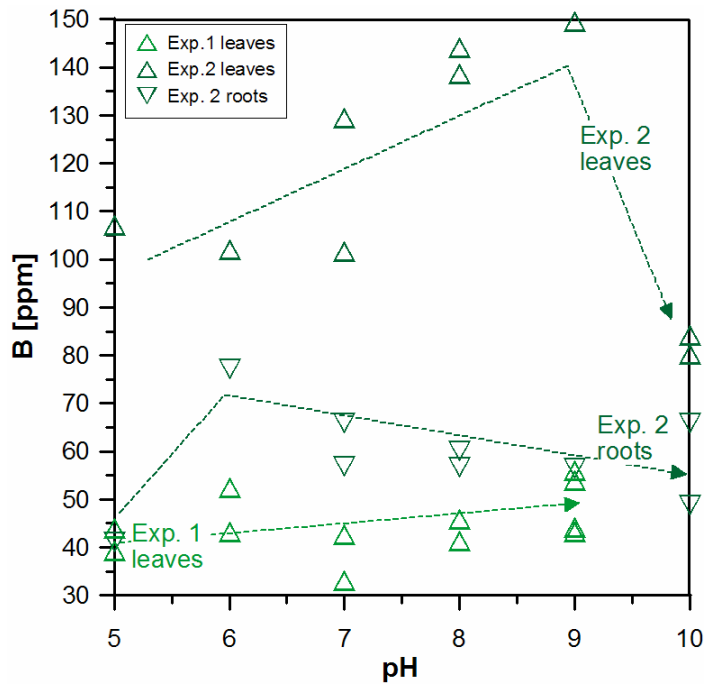
ציור 2. תכולת בורון כללי בשורשים ובעלים של עגבניה כתלות בחומציות תמיסת הגידול. עגבניה גדלה למשך שבוע בתמיסת גידול בנוכחות 0.2 ח"מ בורון.



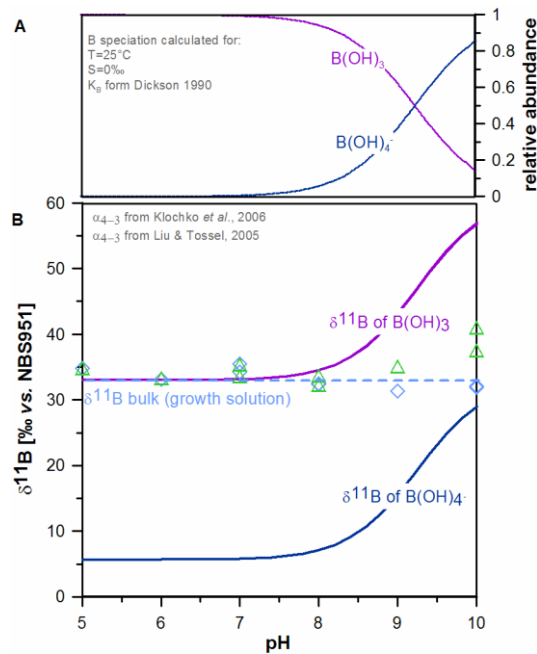
ציור 3. תכולת שיעור של ^{11}B בתמיסת הגידול ובעלים של צמחי עגבניה כתלות בחומציות תמיסת הגידול. עגבניה גדלה למשך שבוע בתמיסת גידול בנוכחות 0.2 ח"מ בורון.



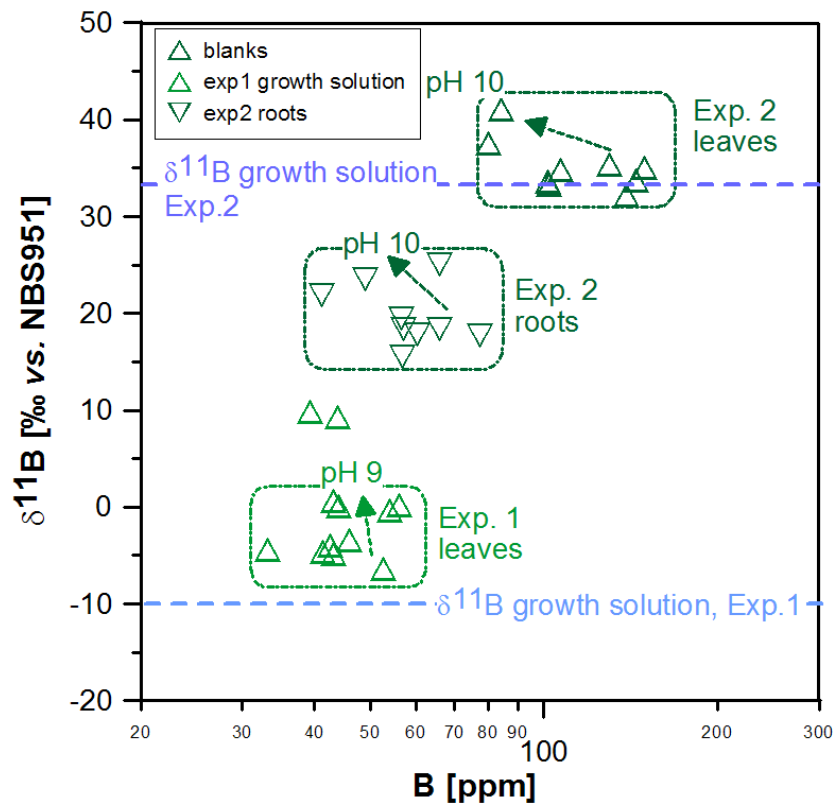
ציור 4. יחס בין ^{11}B בצמח ובתמיסת הגידול בצמחי עגבניה כתלות בחומציות תמיסת הגידול. עגבניה גדלה למשך שבוע בתמיסת גידול בנוכחות 0.2 ח"מ בורון.



ציור 5. תכולת בורון כללי בשורשים ובעלים של עגבניה כתלות בחומציות תמיסת הגידול. עגבניה גדלה למשך שבוע בתמיסת גידול בנוכחות 0.2 ח"מ בורון (ניסוי 1) ו-2.0 ח"מ (ניסוי 2).



ציור 6. תכולת שיעור של ^{11}B בתמיסת הגידול ובעלים של צמחי עגבניה כתלות בחומציות תמיסת הגידול. עגבניה גדלה למשך שבוע בתמיסת גידול בנוכחות 2.0 ח"מ בורון.



ציור 7. יחס בין ¹¹B בצמח ובתמיסת הגידול בצמחי עגבניה כתלות בחומציות תמיסת הגידול. עגבניה גדלה למשך שבוע בתמיסת גידול בנוכחות 0.2 ח"מ בורון (ניסוי 1) ו-2.0 ח"מ (ניסוי 2).

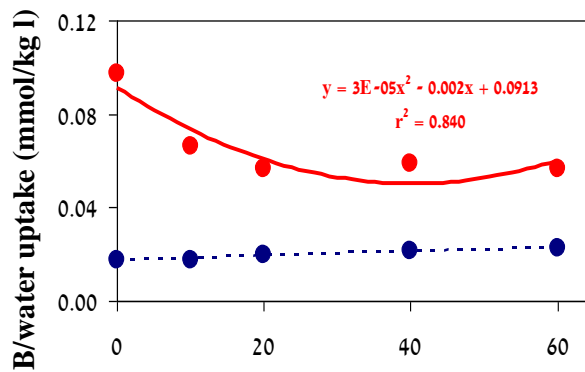
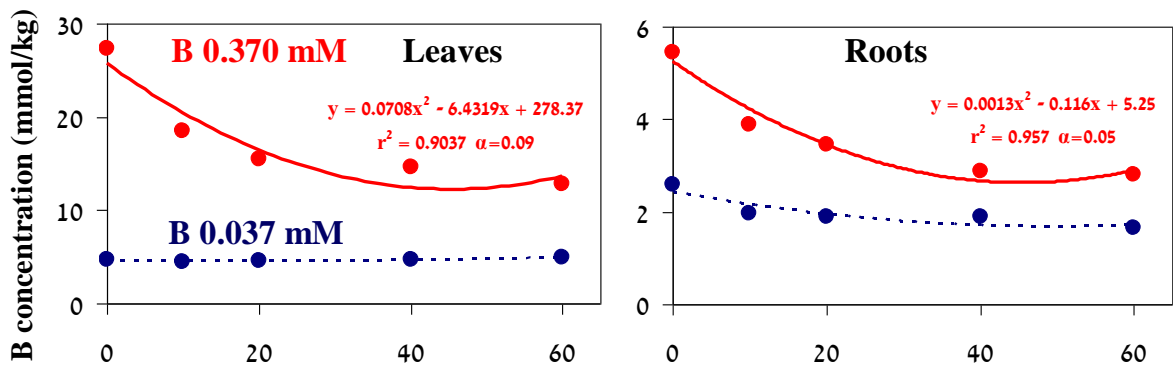
4.2 השפעת הרכב מלחים על קליטת בורון

במהלך הניסויים נלמדה השפעת סוג והרכב המלח על קליטת בורון. בניסויים הראשונים נמצא שריכוז הבורון בשורש ובעלים מושפע מריכוז נתון כלורי וריכוז הבורון שבתמיסת הגידול. עליה ברמת נתון כלורי בתמיסת הגידול מפחיתה את ריכוז הבורון בשורשים ובנוף בעיקר ברמת הבורון הגבוהה. ברמת בורון נמוכה (0.4 ח"מ) עליה בריכוז הנתון הכלורי השפיעה על ריכוז הבורון בעיקר בשורשים. בולטת העובדה שהשפעת הנתון הכלורי על ריכוז הבורון בעלים הולכת ופוחתת עם העליה בריכוז המלח בתמיסת הגידול (ציור 8). במערכת שנבחנה ניתן לכמות את המים שנצרכו ע"י הצמחים. בציור 8 מוצג היחס בין כמות הבורון לכמות המים שנקלטו ע"י הצמחים. ניתן לראות שהיחס הולך ויורד עם העליה בריכוז נתון כלורי כאשר ריכוז הבורון בתמיסת הגידול גבוהה ואילו אינו משתנה כאשר ריכוז הבורון בתמיסת הגידול נמוך.

השפעת ריכוז אשלגן כלורי על ריכוז בורון בעלים מוצגת בציור 9. ניתן לראות שבדומה לנתון כלורי עליה בריכוז אשלגן כלורי בתמיסת הגידול מפחיתה את ריכוז הבורון בנוף בעיקר ברמת בורון גבוהה. באופן כללי, המגמות שהתקבלו עבור אשלגן כלורי ביחס לריכוזו בשורשים ויחס קליטת בורון לקליטת מים היו זהות לאלו שהתקבלו עבור נתון כלורי (ציורים 8 ו-9). תוצאה זאת מעידה על כך שההשפעה של נתון כלורי ואשלגן כלורי דומות. בחינה ישירה לכך נעשתה בניסוי בו נשמר ערך קבוע של סכום ריכוזי האשלגן הכלורי ונתון כלורי בערך של 30 מילימולר. תוצאות הראו שריכוז הבורון בעלים נשמר קבוע ללא תלות ביחס המלחים (ציור 10).

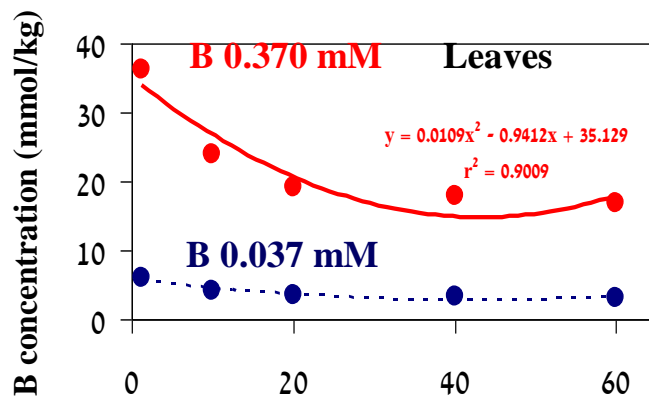
השפעת ריכוז סידן כלורי על הצטברות הבורון בעלים נבחנה כאשר תחום ריכוזי הסידן היו עד 5 מילימולר. ניתן לראות שעם העליה בריכוז הסידן הכלורי בתמיסת הגידול קטן ריכוז הבורון בעלים. כאשר עוצמת הירידה פוחתת עם העליה בריכוז המלח (ציור 11). תוספת נתרן כלורי מפחיתה את ריכוז הבורון בעלים בכל רמת סידן נתונה. ריכוזי הנתרן הכלורי שנבחרו הינם 20 ו-40 מילימולר על מנת למנוע עד כמה שאפשר פגיעה בגידול.

המגמות הדומות של קליטת בורון והצטברותו בעלים בנוכחות שלושת מלחי הכלוריד מרמזות על כך שהגורם הינו כלוריד. בציור 12 מוצגים ריכוזי הבורון בעלים כנגד ריכוז הכלוריד בתמיסת הגידול בניסוי בו נבחנה ההשפעה המשולבת של סידן כלורי ונתרן כלורי. ניתן לראות שריכוז הבורון בעלים נמצא במתאם טוב עם ריכוז הכלוריד במי ההשקיה ללא תלות במקור הכלוריד (סידן כלורי או נתרן כלורי). אופי התגובה הינו אקספוננציאלי כאשר עוצמת התגובה פוחתת עם העליה בריכוז הכלוריד. מכאן, שהשפעת המלחים/הכלוריד משמעותית יותר בריכוז מלחים/כלוריד נמוך ועוצמתו קטנה עם העליה בריכוז המלח/כלוריד. על סמך הממצאים הללו לא ניתן להצביע על הגורם הישיר כלומר מליחות כללית או כלוריד מאחר ובכל המלחים שנבחנו עד כה האניון היה כלוריד. לפיכך, נערכו 4 ניסויים בהם נבחנו 4 סוגי מלחים שהורכבו משני קטיונים אשלגן ונתרן וכלוריד וסולפט. שני הקטיונים שנלמדו הינם חד ערכים לעומת זאת הכלוריד הינו חד ערכי והסולפט דו ערכי לפיכך הסולפט נלמד בשתי רמות אחת השווה במולריות לכלוריד ואחת השווה בנורמליות לכלוריד. תוצאות הניסוי מוצגות בציור 13. ריכוזי המלחים שנבחרו היו נמוכים על מנת לפגוע מעט ככול האפשר בגידול הצמחים. הסידן בטיפול הביקורת היה 0.5 מילימולר והוסף ע"י סידן חנקתי כך שבביקורת לא היה כלל כלוריד. תוצאות מצביעות על כך שתוספת מלחי סולפט כאשלגן או נתרן הפחיתה את ריכוז הבורון בעלים ובשורשים בשיעור דומה למלחי הכלוריד. ריכוז הבורון בעלים בטיפול הביקורת היה כ-340 מ"ג לק"ג ח"י ובכל שאר הטיפולים ריכוז הבורון בעלים היה בתחום של בין 210 ל-260 מ"ג לק"ג ח"י ללא תלות בהרכב המלח. תוצאות אלו מצביעות על כך שהעלאת ריכוז הסולפט בדומה לכלוריד מקטינה את קליטת הבורון והצטברותו בנוף ושהשפעת הכלוריד אינה ייחודית. העובדה שהעלאת המליחות מקטינה את הצטברות הבורון בנוף יכולה אם כך להיות מיוחסת לריכוז המלחים הכללית ולא להשפעה המיוחדת לריכוז הכלוריד. כפי שהוצג בציור 11. ישנה סבירות גבוהה ביותר שהשפעה הינה דרך קליטת המים אך יש צורך להמשיך ולחקור את הנושא על מנת להצביע על המנגנון הישיר להסבר התופעה שתוארה.



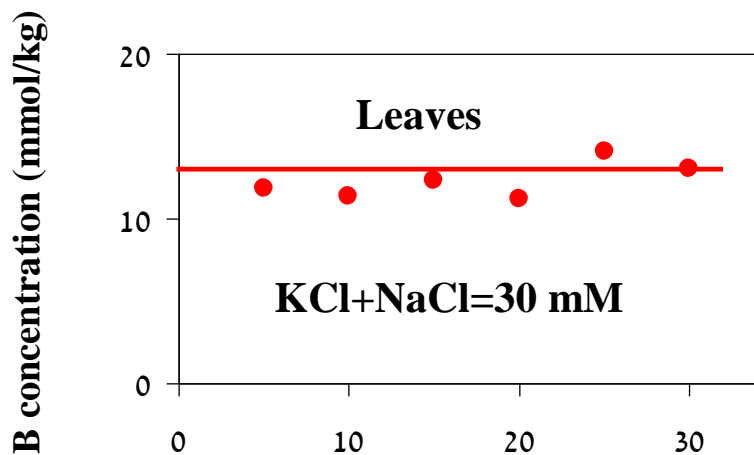
NaCl concentration in growth solution (mM)

ציור 8. ריכוז בורון בעלים ובשורשים של צמחי פלפל ויחס קליטת של מים לבורון כתלות בריכוז נתרן כלורי בתמיסת הגידול בשתי רמות בורון.



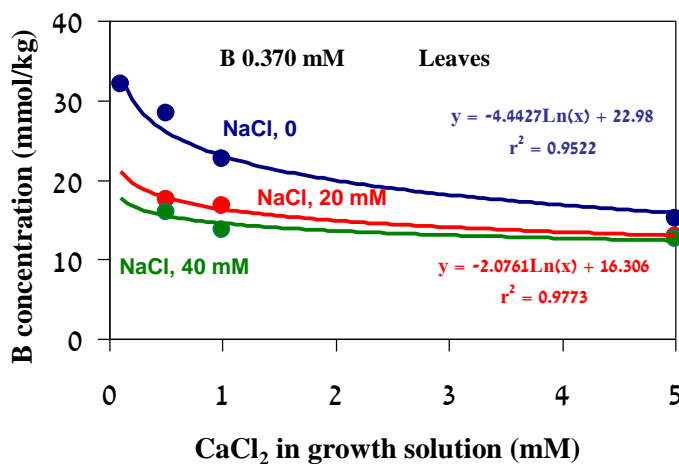
KCl in growth solution (mM)

ציור 9. ריכוז בורון בעלים של צמחי פלפל כתלות בריכוז אשלגן כלורי בתמיסת הגידול בשתי רמות בורון.

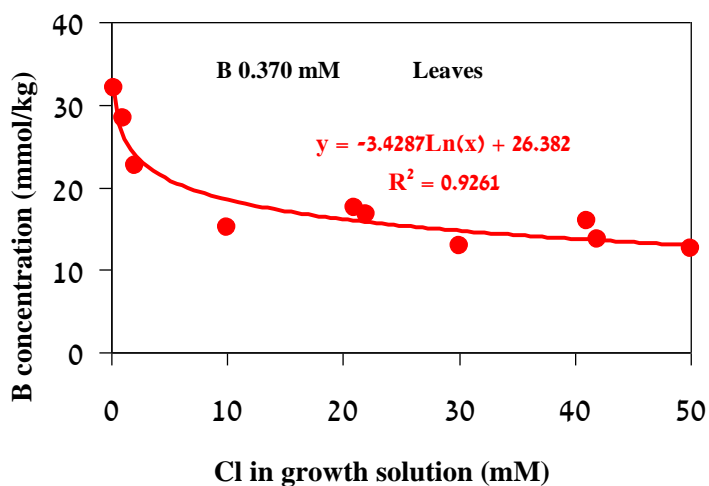


ציור 10. ריכוז הבורון בעלים של צמחי פלפל כתלות ביחס משתנה בין ריכוז אשלגן כלורי ונתרן כלורי בתמיסת הגידול. סך הריכוז של שני המלחים 30 מילימולר. ריכוז הבורון בתמיסת הגידול 4 ח"מ.

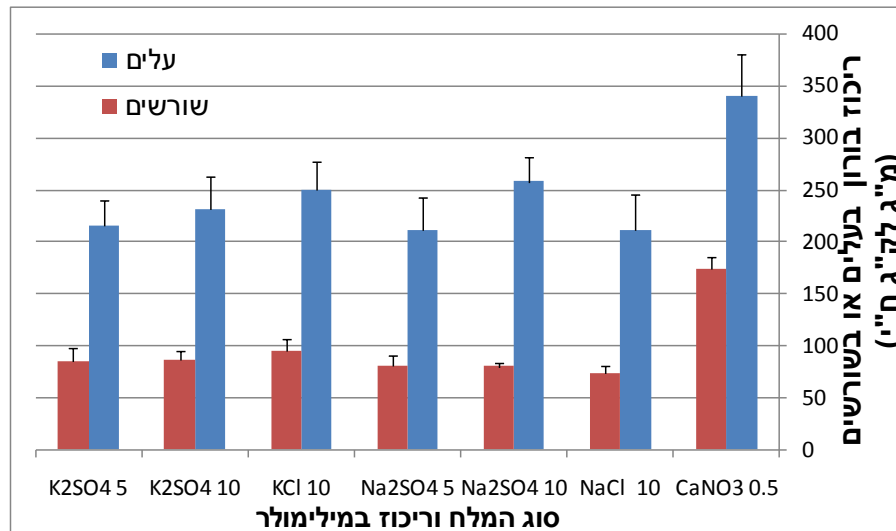
KCl in growth solution (mM)



ציור 11. ריכוז הבורון בעלים של צמחי פלפל כתלות בריכוז סידן כלורי בשלוש רמות של נתרן כלורי בתמיסת הגידול. ריכוז הבורון בתמיסת הגידול 4 ח"מ.



ציור 12. ריכוז הבורון בעלים של צמחי פלפל כתלות בריכוז כלוריד במערכת שמכילה סידן כלורי ונתרן כלורי בתמיסת הגידול. ריכוז הבורון בתמיסת הגידול 4 ח"מ.



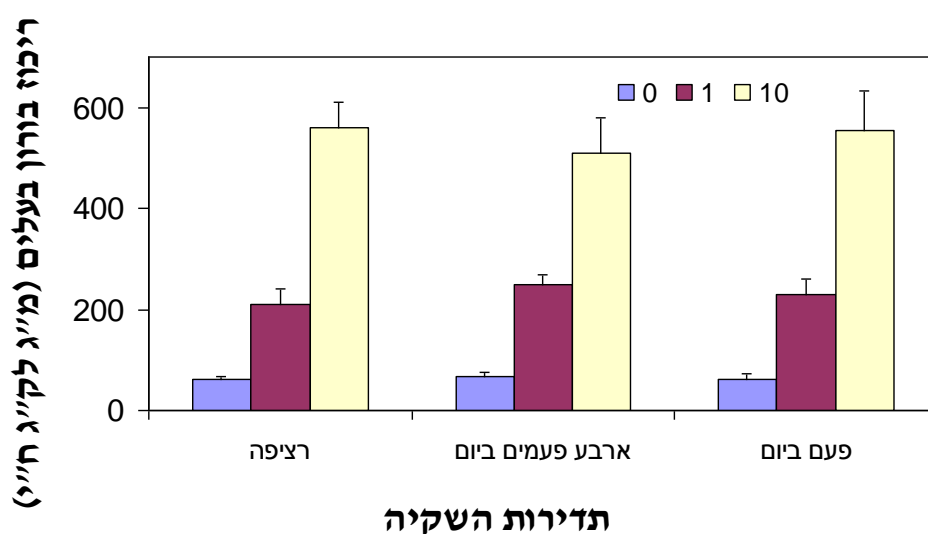
ציור 13. ריכוז הבורון בעלים ושורשים של צמחי פלפל כתלות בריכוז והרכב מלחים במערכת בתמיסת הגידול. ריכוז הבורון בתמיסת הגידול 4 ח"מ.

4.3 השפעת תדירות ההשקיה של על קליטת בורון

במהלך המחקר התבצעו 4 ניסויים שהיו זהים מבחינת הטיפולים. הניסוי הראשון שימש להכרת המערכת וכוילה. מאחר ולא היה הבדל משמעותי בין הניסויים יוצגו תוצאות מניסויים ספטמבר 2007 ומאי 2008. ככלל, לאורך כל תקופת הגידול, ערך ההגבה של מי הנקז והמוליכות החשמלית היו גבוהים בכחצי יחידה ועד כ- 20% ממי ההשקיה, בהתאמה. ריכוזי הבורון הממוצעים במי ההשקיה היו: 0.22, 1.1 ו-9.5 ח"מ עבור שלושת רמות הבורון שנבחנו בניסוי ספטמבר 2007. בטבלה 1. מרוכזים פרמטרים שונים לאפיון גידול: מספר עלים, אורך גבעול ומשקלי חלקי הצמח לניסוי ספטמבר 2008. בניתוח דו גורמי לא נמצא כל הבדל בין הצמחים ביחס לגודלם. מכאן, שטיפולי ההשקיה והבורון לא השפיעו על הגידול. ריכוז הבורון בעלים הושפע רק מטיפולי הבורון אך לא מטיפולי התדירות. מאחר ולא היתה השפעת גומלין בין גורמי הניסוי ניתן להתייחס לממוצעי טיפולי התדירות שהיו: 239.1, 212.8 ו-247.5 מיליג' בורון לק"ג ח"י (לא נבדלו ביניהם) עבור רמת תדירות נמוכה, בינונית וגבוהה, בהתאמה. טיפולי הבורון היו B121.9 ו-C513.4 מיליג' בורון לק"ג ח"י (אותיות שונות מייצגות הבדל מובהק ברמת מובהקות של 0.05) עבור רמת בורון נמוכה, בינונית וגבוהה, בהתאמה. בציור 14 מוצגים תוצאות ריכוזי הבורון בעלים לניסוי מאי 2008. ובדומה לניסויים האחרים ממצאי ניסוי זה דומים אם כי ריכוזי הבורון בעלים היו שונים בין הניסויים. הניסויים תוכננו כך שהגידול של הצמחים לא יפגע מריכוז בורון. אכן גידול הצמחים בריכוז של 9.5 ח"מ למשך 4-5 שבועות לא פגע בגידול. מאידך, ישנה הצטברות של בורון בשורשים ובנוף עם העליה בריכוזו במי ההשקיה אשר אינה מושפעת מהתדירות ההשקיה. תוצאות אלו מצביעות על כך שההנחה שלשינוי בריכוז הבורון עם הזמן בין ההשקיות תהיה השפעה על קליטתו והצטברותו בעלים אינה נכונה.

טבלה 1. תוצאות גידול וריכוז הבורון בעלים של צמחי עגבניה שהושקו בתדירות שונה. תוצאות מניסוי ספטמבר 2007. התוצאות מייצגות ממוצע של 8 חזרות. אין הבדל מובהק בין הטיפולים בכל הפרמטרים שנמדדו. בנייתוח דו גורמי ריכוז הבורון בעלים נבדל רק ברמת הבורון בעלים.

| טיפול מספר | בורון (ח"מ) | תדירות | מס' עלים | אורך גיבעול סמ | משקל רטוב | | | משקל יבש | | | בורון בעלים מיקרוג' ג' | |
|------------|-------------|------------|----------|----------------|-----------|----------|------|----------|----------|------|------------------------|-------|
| | | | | | עלים | גבעול ג' | שורש | עלים | גבעול ג' | שורש | | |
| 1 | 0.2 | רציפה | 11.4 | 43.9 | 39.0 | 22.6 | 4.0 | 3.63 | 1.12 | 0.18 | 4.93 | 60.1 |
| 2 | 1.1 | רציפה | 11.3 | 45.9 | 46.1 | 25.1 | 5.4 | 4.26 | 1.35 | 0.23 | 5.83 | 130.6 |
| 3 | 9.5 | רציפה | 11.4 | 43.8 | 45.4 | 22.6 | 4.8 | 4.07 | 1.24 | 0.24 | 5.55 | 526.7 |
| 4 | 0.2 | פעמים ביום | 11.4 | 42.3 | 36.6 | 19.9 | 4.6 | 3.33 | 0.98 | 0.19 | 4.50 | 68.9 |
| 5 | 1.1 | פעמים ביום | 10.8 | 39.3 | 33.1 | 16.9 | 4.5 | 2.97 | 0.83 | 0.16 | 3.96 | 110.2 |
| 6 | 9.5 | פעמים ביום | 11.0 | 45.3 | 41.9 | 22.5 | 5.2 | 3.76 | 1.37 | 0.29 | 5.41 | 459.4 |
| 7 | 0.2 | פעם ביום | 11.5 | 46.4 | 40.4 | 22.2 | 4.7 | 3.72 | 1.25 | 0.28 | 5.25 | 63.3 |
| 8 | 1.1 | פעם ביום | 11.0 | 42.0 | 35.3 | 19.3 | 4.9 | 3.21 | 0.99 | 0.27 | 4.48 | 125.0 |
| 9 | 9.5 | פעם ביום | 10.3 | 39.3 | 35.9 | 19.3 | 5.2 | 3.32 | 1.04 | 0.28 | 4.63 | 554.2 |

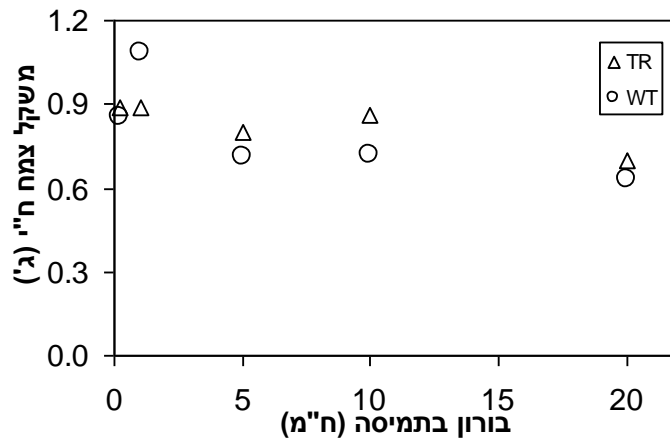


ציור 14. ריכוז הבורון בצמחי עגבניה כתלות בתדירות ההשקיה בשלוש רמות בורון מוסף. תוצאות התקבלו בניסוי מאי 2008.

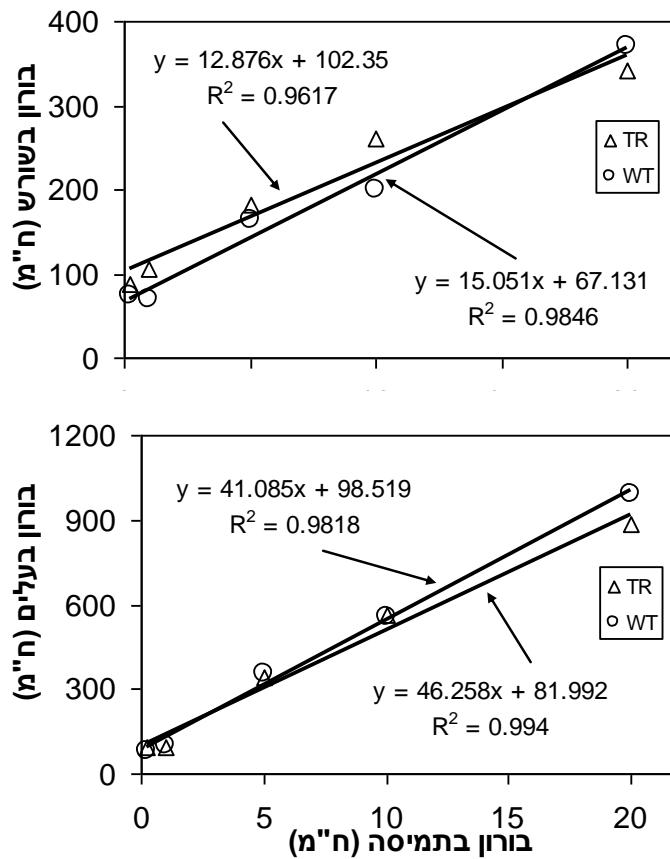
4.4 השפעה הרכב ממברנת הפלסמה על קליטת בורון

ניסויי הגידול לבחינת השפעת הרכב ממברנת הפלסמה על קליטת בורון נעשו במספר מועדים. מטרה העיקרית היה להשוות בין שני סוגי הצמחי. התברר שלגודל הצמח יכולה להיות השפעה על התהליכים הנמדדים ולכן בדו"ח הנוכחי יוצגו רק תוצאות ניסוי אחד בו גודל הצמחים בתחילת הניסוי היה דומה. משקל ח"י של צמחי עגבניה מזן MPI וצמחי MPI טרנסגנים שגדלו שבוע בתמיסת מזון בריכוזי בורון שונים מוצגים בציור 51. באופן כללי סימני רעילות של בורון החלו להופיע בעלים שגדלו בריכוז של 20 ח"מ בורון יומיים שלושה מחשיפתם לבורון. סימנים פחות חמורים הופיעו גם בריכוזי בורון של 10 ח"מ. ריכוז הבורון לא השפיע באופן מובהק על גידול הצמחים עד לריכוז של 10 ח"מ. בריכוז של 20 ח"מ חלה פחיתה בגידול הצמחים שהתבטאה בירידה של 25% משקל ח"י בהשוואה לטיפול עם ריכוז הבורון הנמוך ביותר. ריכוז הבורון בשורש ובעלים נמצאה במתאם קווי ישר מובהק לריכוז הבורון בתמיסת הגידול. כאשר כצפוי ריכוז הבורון בשורשים נמוך באופן משמעותי בהשוואה לריכוז הבורון בעלים. קווי המתאם של צמחי MPI והצמחים הטרנסגניים אינם נבדלים ביניהם (ציור 16). ידיעכת הטרנספירציה של הצמחים, ריכוז

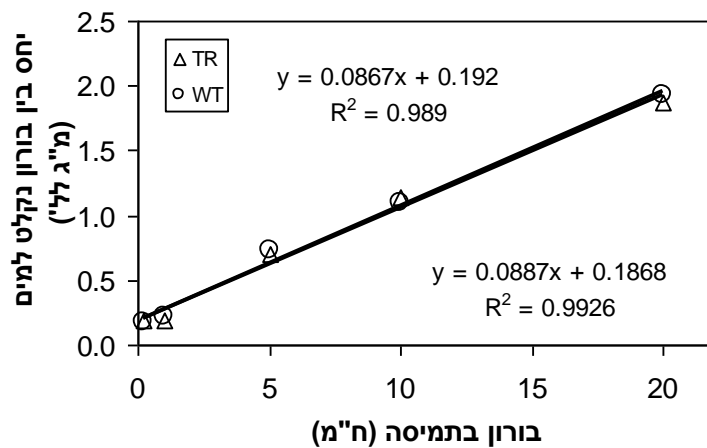
הבורון ומשקל חיי של העלים מאפשרת חישוב של היחס בין כמות הבורון שנקלטת ליחידת מים שנקלטת (ציור 17). עם העליה בריכוז הבורון עולה יחס קליטת הבורון לקליטת המים כאשר אין הבדל בין צמח MP1 לצמח הטרוסגני.



ציור 15. משקל חיי ל צמחי עגבניה כתלות בריכוז הבורון בתמיסת הגידול. TR מייצג צמח טרוסגני WT מייצג צמח MP1.



ציור 16. ריכוז הבורון בשורש ובעלים כתלות בריכוז הבורון בתמיסת הגידול. TR מייצג צמח טרוסגני WT מייצג צמח MP1.



ציור 17. יחס בין בורון למים שנקלט ע"י צמח עגבניה כתלות בריכוז הבורון בתמיסת הגידול. TR מייצג צמח טרנסגני WT מייצג צמח MP1.

5. סיכום

מטרת המחקר היתה למצוא דרכים שונות להקטין את קליטת הבורון על ידי צמחים. בתחילה התמקדנו בניסויים מבוקרים לבחינת השפעת החומציות והרכב הממברנות על קליטת בורון. שינויים ב-pH תמיסת בטווח רחב לא התבטאו בבדיקות הבורון הכללי אך בבדיקות האיזוטופים של בורון ניתן ללמוד שעיקר הבורון נקלט כחומצה בורית ולא בורט. בספרות אכן מקובל להניח שזו הדרך העיקרית בה הבורון נקלט אך השיטה שבוצעה במחקר זה הוכיחה באופן ישיר את הטענה המקובלת. טענה אחרת שנבדקה היא שלהרכב הממברנה יש חשיבות בקליטת הבורון. מקובל לחשוב שחלק מקליטת הבורון נעשית בדיפוזיה דרך ממברנת הפלסמה. ולכן, שינויים בהרכבה ישפיעו על קליטת בורון. הבחינה נעשתה ע"י שימוש בצמח טרנסגני מועשר בחומצות שומן לא רוויות ונראה שתכונה זאת אינה משפיעה על קליטת המים, הבורון, הצטברותו ויחס קליטת מים לבורון. יש להמשיך לבחון נושא זה גם בחשיפה לעקות מאחר ויכול להיות שעוצמת התבטאות ההבדלים בין הצמחים תתחזק בחשיפה לעקות. בניסויי החממה שבחנו את השפעת תדירות ההשקיה על קליטת בורון ברמות שונות של בורון לא נמצא כל השפעה על תדירות על קליטת בורון ע"י צמחי פלפל.

בניסויים מבוקרים בהם גודלו צמחי פלפל בתמיסות מזון נלמדה ההשפעה של הרכב המלחים בתמיסת הגידול. בדומה לעבודות קודמות בהם הראינו שעליה במליחות משפיעה על הצטברות הבורון בצמח נמצאו ממצאים דומים גם בעבודה הנוכחית. בשלב ראשון נבחנו הרכבים שונים של מלחי כלוריד ונמצא שבשלושת המלחים שנבחנו: אשלגן, נתרן וסידן הצטברות הבורון בצמח דומה ומגיבה לריכוז הכלוריד שבתמיסת הגידול. בשלב השני בו נערכו ניסויים בהם נכחו מלחי כלוריד ומלחי גופרה פחתה קליטת הבורון באופן דומה. ממצאים אלו מצביעים על כך שהתופעה של ירידה בקליטת הבורון בנוכחות מלחים הינה רחבה יותר ואינה קשורה בהכרח ליון מסוים. סביר להניח שהיא קשורה בקליטת המים ומעבר הבורון אל הנוף. נושא שיהיה צורך לחקור בהמשך.

- יוטל, י. 1990. שטיפת בורון וכלוריד בקרקע בקעת הירדן כתלות בקצב חידור המים. עבודת גמר האוניברסיטה העברית ירושלים.
- ירמיהו, א., א. פיינגולד, י. אלדניפירי, מ. טרגמן, ד. שמואל, ג. רשף, ה. מנור, מ. ברונר, ש. סוריאנו, ד. מור. 2005 א. השפעת יסודות ההזנה על היבול והאיכות של עירית ובזיל. דו"ח סופי מוגש למשרד המדען הראשי במשרד החקלאות ולמועצת הירקות.
- ירמיהו, א., א. פיינגולד, פ. סריג, א. סטרומזה, ר. קרון, ש. סוריאנו, א. צפילביץ. 2005 ב רעילות בורון בכרם. דו"ח סופי מוגש למשרד המדען הראשי במשרד החקלאות ולמועצת הירקות.
- boron concentration on boron uptake and growth of wheat. *Plant and Soil*. 97:345-351.
- Brown PH, Bellaloui N, Sah RN, Bassil E, Hu H (2002) Uptake and transport of boron. In: Boron in Plant and Animal Nutrition. eds. Goldbach HE, Rerkaem B, Winner MA, Brown PH, Thellier M, Bell RW, Kluwer Academic/Plenum Plenum, NY pp 87-102.
- Dordas C, Chrispeels MJ, Brown PH (2000) Permeability and channel-mediated transport of boric acid across membrane vesicles isolated from squash roots. *Plant Physiol* 124: 1349-1361.
- Gupta, S.K., and J.W.B. Stewart. 1975. The extraction and determination of plant-available boron in soils. *Schw. Landw. Forsch.* 14:153-169.
- Keren, R., and U. Mezuman. 1981. Boron adsorption by clay minerals using a phenomenological equation. *Clays and clay min.* 29:198-204.
- Keren, R., and F.T. Bingham. 1985. Boron in water, soil and plants. *Adv. Soil Sci.* 1:229-276.
- Keren, R., R.G. Gast, and B. Bar-Yosef. 1981. pH-dependent boron adsorption by Na-montmorillonite. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:45-48.
- Marschner H, 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2nd ed. Germany: Academic Press.
- Power, P.P., and W.G. Woods. 1997. The chemistry of boron and its speciation in plants. *Plant and Soil* 193: 1-13.
- Ryan, J., S. Miyamoto, and J.L. Stroehlein. 1977. Relation of solute and sorbed boron to the boron hazard in irrigation water. *Plant and Soil* 47:253-256.
- Yermiyahu, U., R. Keren, and Y. Chen. 1988. Boron sorption on composted organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:1309-1313.
- Yermiyahu, U., R. Keren, and Y. Chen. 1995. Boron sorption by soil in the presence of organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:405-409.
- Yermiyahu, U., Keren, R., Finegold, I., Cohen, Y., Yehezkel, H., Shmoel, D. (2003). Response of pepper to boron and salinity under greenhouse conditions.

סיכום

מטרות המחקר

מטרת המחקר היא למצוא דרכים להקטין קליטת בורון ע"י צמחים ולצמצם את הנזקים הנגרמים לצמחים מקליטה עודפת.

עיקרי הניסויים והתוצאות

בניסויים מבוקרים לבחינת השפעת החומציות והרכב הממברנות על קליטת בורון. שינויים ב-pH תמיסת בטווח רחב לא התבטאו בבדיקות הבורון הכללי אך בבדיקות האיזוטופים של בורון ניתן ללמוד שעיקר הבורון נקלט כחומצה בורית ולא בורט. בספרות אכן מקובל להניח שזו הדרך העיקרית בה הבורון נקלט אך השיטה שבוצעה במחקר זה הוכיחה באופן ישיר את הטענה המקובלת. להרכב הממברנה יש חשיבות בקליטת הבורון. מקובל לחשוב שחלק מקליטת הבורון נעשית בדיפוזיה דרך ממברנת הפלסמה. ולכן, שינויים בהרכבה ישפיעו על קליטת בורון. הבחינה נעשתה ע"י שימוש בצמח טרנסגני מועשר בחומצות שומן לא רוויות ונראה שתכונה זאת אינה משפיעה על קליטת המים, הבורון, הצטברותו ויחס קליטת מים לבורון. בניסויי החממה שבחנו את השפעת תדירות ההשקיה על קליטת בורון ברמות שונות של בורון לא נמצא כל השפעה על תדירות על קליטת בורון ע"י צמחי פלפל. בניסויים מבוקרים בהם גודלו צמחי פלפל בתמיסות מזון נלמדה ההשפעה של הרכב המלחים בתמיסת הגידול. עליה במליחות משפיעה על הצטברות הבורון בצמח בניסויים בהם נכחו מלחי כלוריד ומלחי גופרה פחתה קליטת הבורון באופן דומה.

המסקנות המדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו

קליטת הבורון היא בעיקרה כחומצה בורית. הירידה בקליטת בורון ע"י הצמח הינה כתוצאה מעליה במליחות. לתדירות ההשקיה לא היתה השפעה על קליטת הבורון בפלפל שגדל בפרלייט. קליטת הבורון ומים בצמח טרנסגני מועשר בחומצות שומן לא רוויות היתה דומה לזו של צמח שאינו מועשר.

הבעיות שנותרו לפתרון

יש להמשיך את המחקר בנושאים שנלמדו בתנאים שונים בנוסף לניסויים במערכות גידול נוספות. להבין את מנגנון של פחיתה בקליטה בנוכחות מלח

פרסום והפצת החומר

תוצאות המחקר הוצגו בפברואר 2008 בכנס בירושלים.