

**הסעה והתפלגות של רדיו-נוקלידים המגיעים בהשקיה בצמחים****Transport and partitioning of radio-nuclides applied by irrigation in plants**

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות

ע"י

אמנון שוורץ המכון למדעי הצמח וגנטיקה בחקלאות, הפקולטה לחקלאות מזון וסביבה, האוניברסיטה  
העברית

רון זליגמן המכון למדעי הצמח וגנטיקה בחקלאות, הפקולטה לחקלאות מזון וסביבה, האוניברסיטה  
העברית

אשר בר-טל המכון למדעי קרקע, מים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי  
אורי ירמיהו המכון למדעי קרקע ומים, מרכז מחקר גילת

*Amnon Schwartz, The Smith Institute of Plant Sciences and Genetics in Agriculture; Faculty of  
Agriculture, Food and Environment in Rehovot; The Hebrew University of Jerusalem, Israel*

*Ron Seligmann, The Smith Institute of Plant Sciences and Genetics in Agriculture; Faculty of  
Agriculture, Food and Environment in Rehovot; The Hebrew University of Jerusalem, Israel*

*Asher Bar-Tal, Institute of Soil, Water and Environmental Sciences; Volcani Center; ARO,  
Israel*

*Uri Yermiyahu, Soil Science; Gilat Research Center; ARO, Israel*

אפריל 2010

הממצאים בדו"ח זה הינם תוצאות ניסויים ואינם מהווים המלצות לחקלאים

חתימת החוקר הראשי: \_\_\_\_\_

**תקציר**

מטרת המחקר הנוכחי הייתה לפתח שיטות לזיהוי קליטה של רדיום או של חומר קורן גמא בצמח, ובמידת האפשר לפתח שיטה שתאפשר ביצוע מדידה זו בתנאי שדה. לצורך כך הקמנו שני מערכי ניסוי משלימים תוך שימוש בסטרונציום המדמה תנועת רדיום:

1) בניסוי הראשון בחנו קליטה של סטרונציום ע"י השורש השלם ולא כמקובל בניסויי קליטה לתאים בקטעי שורש מנותקים. הניסויים נערכו בצמחי עגבנייה שגודלו בהידרופוניקה כאשר לפני הניסוי הוסר הנוף כ- 7 ס"מ מעל צוואר השורש ואל הגדם הוצמדה מערכת יניקה המפעילה מתח דומה לזה השורר בעצה של הצמח השלם. לתמיסת הגידול הוספו סטרונציום וסידן ובאמצעות מערכת היניקה דגמנו, תוך הפעלת טיפולים שונים על מערכת השורשים, את מוהל העצה "הנשאב" מהגדם בזמנים קבועים.

2) החלק השני של המחקר כלל פיתוח מערכת למדידה של חומר קורן הנקלט באמצעות השורש "ומוסע" בצמח השלם. חלק זה של הניסוי בוצע בשת"פ עם חברת "רותם תעשיות", חברת היישום של הכור הגרעיני בנגב. החברה פיתחה גלאים רגישים במיוחד למדידה של קרינת גמא ובמחקר הנוכחי פיתחנו אמצעים טכניים וקונצפטואליים לשימוש בגלאים אלו למדידת של קרינת גמא מחלקי הצמח השלם במקום גידולו הטבעי. במהלך הניסוי מוקמו גלאים אלה לאורך גבעול צמח עגבנייה ומול פרי ופטוטר עלה. לתמיסת ההזנה הוספנו רדיו-נוקלאיד מתאים של סטרונציום ועקבנו אחר התפשטותו בצמח. המדידות בוצעו במרווחי זמן קצרים ולאורך מספר ימים. במקביל למדידת פיזור החומר הקורן נמדדה הדיות בצמח סמוך על מנת לבחון את הקשר בין תנועת המים לתנועת החומר הקורן. כל הצמחים גודלו בתנאי אקלים מבוקרים ובהידרופוניקה מאווררת. סטרונציום (מדמה רדיום) שהוסף לתמיסת המזון נקלט בשורש ועלה במעלה הגבעול במקביל לתנועת המים. נמצא כי האופיין היומי של תנועת הסטרונציום בצמח מורכב יותר מאופיין תנועת המים וזאת כנראה בשל תהליכי פריקה \ טעינה וספיחה \ שחרור אל ומתוך הרקמות המקיפות את העצה. שיתוף הפעולה עם רותם תעשיות נמשך ואנו מקווים כי בעקבות המחקר הנוכחי ניתן יהיה להציע מכשיר שיאפשר מדידה בשדה, בצמח הבלתי מנותק, של קרינת גמא שמקורה ברדיום או בכל חומר קורן גמא אחר.

**מבוא**

גורמים גיאוכימיים מביאים להימצאות איזוטופים שונים של רדיום במי בארות מסוימות בדרום הארץ. לאחרונה נמצאו איזוטופים אלו במספר בארות בריכוז העולה על המותר בתקנות מי שתייה, עובדה הפוסלת את המים לשתיה ומעלה ספקות באשר לאפשרות השימוש במים אלו להשקיית גידולים חקלאיים. הידע הקיים כיום על קליטת הרדיום על ידי הצמח, תנועתו והתפלגותו לאיברי הצמח השונים אינו מספק להבנת תהליכים אלה ובוודאי שלא לצורך הערכת הסיכונים תחת ממשקי גידול שונים ו/או לפיתוח ממשקים המאפשרים גידול חקלאי בתנאים הר"מ.

ההנחה המקובלת היא שכניסת היונים המינרלים אל עצת השורש מבוקרת לפחות ע"י קרום ביולוגי אחד ברקמת האנדודרמיס. הנחה זו נבחנה מחדש במספר מחקרים בשנים האחרונות ונמצא כי גם בשורשים שאינם "פצועים", מים ומומסים עשויים להגיע אל העצה במסלול הבין-תאי מבלי שעברו "סינון" דרך קרום ביולוגי. החלק היחסי של היונים המגיע אל העצה בלא שעברו דרך קרום ביולוגי שונה בין מין למין ומותנה בגורמים חיצוניים פיסיקליים ופיסילוגיים. ממצאים אלו הופכים את המחקר בקליטת יונים למורכב יותר, שכן לא ניתן להסתפק בלימוד מנגנוני הקליטה אל תוך תאי השורש ברקמות מבודדות או בקטעי שורש מנותקים ויש לבחון את קליטת היונים בשורש הבלתי מנותק תוך יצירת תנאים דומים ככל האפשר לתנאי השדה.

בנוסף התברר כי בעוד שרוב המחקרים העוסקים בקליטת רדיום לצמח עשו שימוש במדד כללי של יחס ההעברה (יחס הריכוז בקרקע לזה שבצמח), הראו מחקרים בודדים כי הרדיום מתרכז בעיקר בעלווה ופחות בפרי. בכך דומה הרדיום לסידן שאופן תנועתו והתפלגותו מקושר למהלך זרימת המים בצמח הנובעת מדיות. עם זאת, למרות הידע הרב הקיים על סידן ממנו ניתן להשליך על הרדיום, העדויות הינן ברובן עקיפות מאחר ועיקר תנועת הסידן והרדיום היא בעצה אשר המוהל שלה מצוי תחת מתח וכל ניסיון מדידה חודרני מסתיים בהפרעת הזרימה.

הרדיום הינו בעל רעילות גבוהה ופולט קרינה למשך זמן ארוך יחסית, והשימוש בו לצרכי מחקר מוגבל. אנו בחרנו להמיר את הרדיום בסטרונציום הדומה לו מבחינה כימית וחשמלית ושכיחותו בטבע נמוכה בדרך כלל. לסטרונציום איזוטופ יציב ( $^{88}\text{Sr}$ ) המאפשר עריכת ניסויי קליטה בקלות יחסית וכן איזוטופ קורן גמא ( $^{85}\text{Sr}$ ) שסוג ועוצמת קרינתו מאפשרים מעקב חיצוני אחר תנועתו.

המערכות שפותחו במסגרת המחקר הנוכחי מאפשרות: (א) בחינת השפעת גורמים שונים בסביבת השורש על קליטת סטרונציום המשמש כנתב לרדיום במערכת שורשים שלמה תוך יצירת תנאים המדמים דיות (ב) מעקב אחר תנועת והתפלגות סטרונציום כנתב לרדיום בצמח שלם וחי בדרך לא-חודרנית, אשר אינה מפרה את תנאי הזרימה בצמח.

עיקרי הניסויים וכלל התוצאותקליטה

צמחי עגבנייה בלתי מסיימים (הזרע, זן 870) גודלו בפיטוטרון הפקולטה בתנאי אקלים מבוקרים (28 ו- 22 מעלות צלסיוס יום ולילה בהתאמה). כל צמח גדל בדלי בנפח 5 ליטר המכיל תמיסת הזנה מאווררת (תמונה 1 א ו- ב).



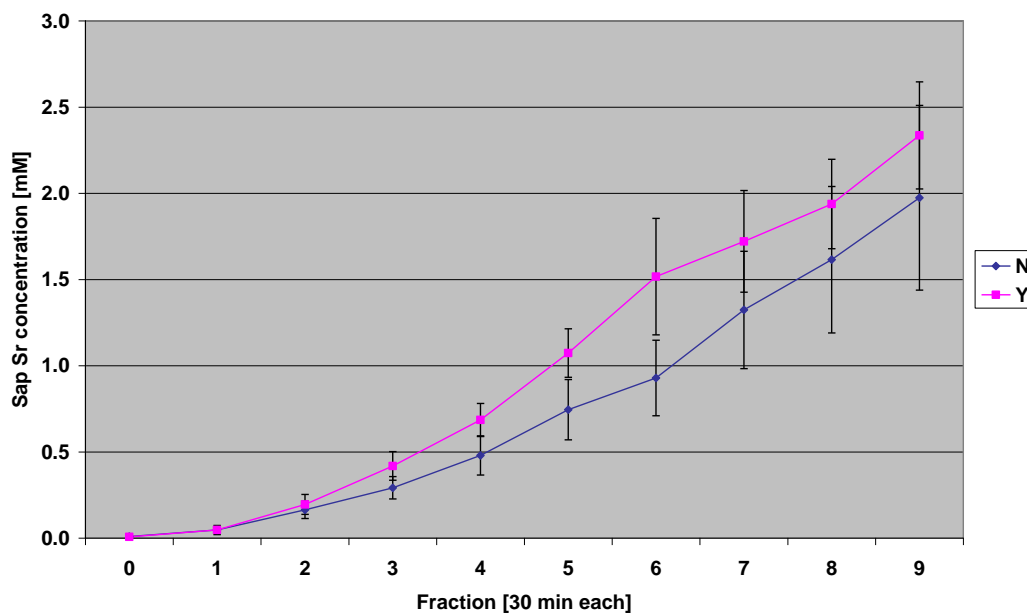
תמונה 1: מערכת השורשים (ימין) וצמחי העגבנייה (שמאל) לאחר כחודש מההעברה לגידול בהידרופוניקה

אחת לשבוע הוחלפה התמיסה בחדשה כאשר במהלך השבוע נעשה מילוי למלוא נפח הדלי לפי הצורך. לאחר כחודש, שלב בו התפרחת התחתונה חנטה פרי, הועברו הצמחים בשעות הבוקר לחדר עבודה נפרד וכוסו בשקיות לשם הפחתת מתח המים בעצה. לאחר כשעה נגדם הגבעול כ- 7 ס"מ מעל לנקודת ההסתעפות של השורשים ואל הגדם חוברה באמצעות שרוול סיליקון מערכת יניקה ייעודית המסוגלת להפעיל מתח של כ- 80 kPa ולגרום "לשאובה" של מוהל עצה ובכך לדמות דיות. איסוף מוהל העצה לצמח בוצע באמצעות מלכודת נוזלים בעלת מיכל הניתן להחלפה. לאחר הפעלת היניקה והתייצבות המערכת (כרבע שעה) הוחלפו מיכלי האיסוף בחדשים ואלה הוחלפו במרווחי זמן קבועים של חצי שעה. המוהל הנאסף נשקל, ודגימה ממנו נלקחה לאנליזה באמצעות ICP – למערכת זו ניתן לחבר במקביל עד ארבעה צמחים (תמונה 2).



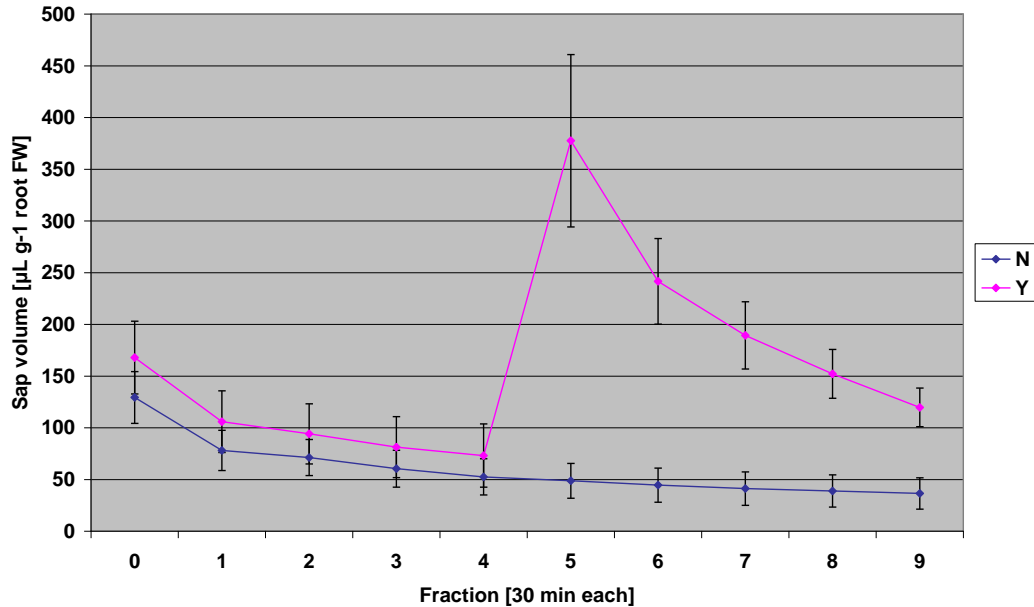
תמונה 2. מערכת איסוף מוהל תוך הדמית דיות – משאבת וקום אליה מחוברים במקביל 4 צמחים גדומי עלווה. בין המשאבה לכל גדם נמצאת מלכודת נוזלים בעלת מיכל הניתן להחלפה

**בחינת השפעת הגומלין בין סטרונציום לסידן – סידן (כסידן חנקתי) וסטרונציום (כסטרונציום חנקתי)**  
 בריכוז של 4 mM הוספו לתמיסת המזון יחד או לחוד. טיפול נוסף ללא הוספת יונים אלו שימש כביקורת. רמת החנקן החנקתי, העלולה להשפיע על המוליכות ההידראולית של השורש ועל הרכב היונים הנקלט, אוזנה באמצעות הוספת אשלגן חנקתי ו/או אשלגן כלורי ברמה המתאימה לטיפול כאשר רמת האשלגן המוסף נשמרה קבועה בכל הטיפולים. נציין כי תמיסת ההזנה כללה מראש סידן בריכוז של כ- 3 mM ואילו ריכוז הסטרונציום היה זניח. הוספת אחד היונים או שניהם יחד גרמה לפחיתה מובהקת במוליכות ההידראולית של השורשים בהשוואה לביקורת (לא מוצג). ריכוז היון עלה במוהל הצמח באופן קווי עם הזמן, והוספת סידן גרמה לקליטה מוגברת של סטרונציום (איור 1) ולהיפך (לא מוצג).



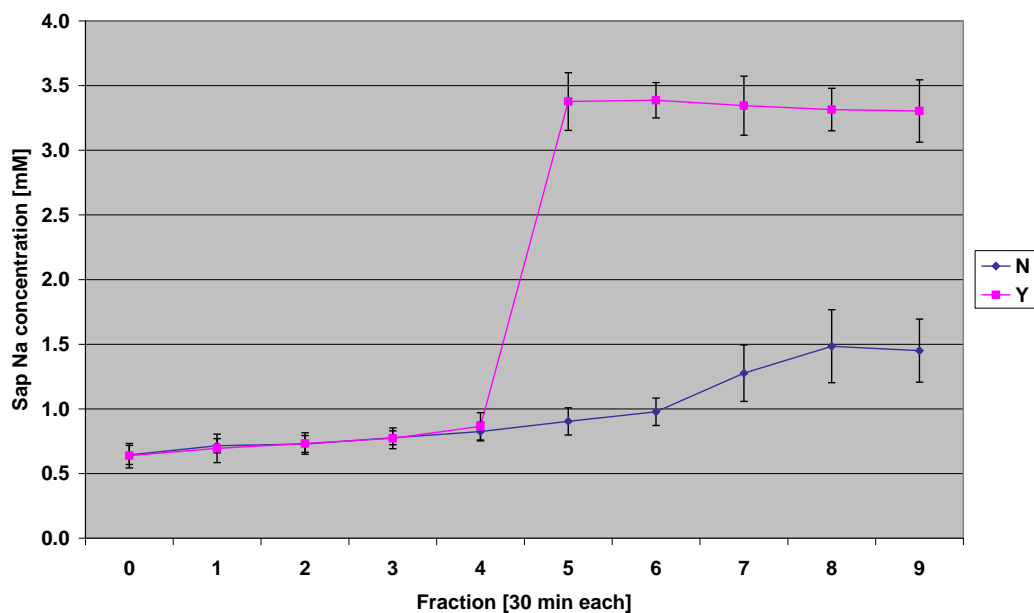
איור 1. ריכוז הסטרונציום במוהל הצמח הנשאב כתלות בזמן עם (Y) ובלי (N) תוספת סידן. היונים הוספו לאחר איסוף מקטע 0. הקווים האנכיים מסמלים את שגיאת התקן

**בחינת שלמות מערכת השורשים** – לאחר איסוף מקטע 0 הוספו לתמיסת המזון סטרונציום וסידן בריכוז של 4 mM. לאחר איסוף מקטע 4 בוצעו מספר חיתוכים אנכיים בצידי מערכת השורשים במטרה לדמות אפקט פציעה. כפי הנראה באיור 2, שפיעת שורשי הטיפול שנחתך התגברה מאוד לאחר החיתוך אולם פחתה במהירות לערכים קרובים לאלו שהיו לפניו כאשר שפיעת שורשי הטיפול שלא נחתך פחתה עם הזמן.



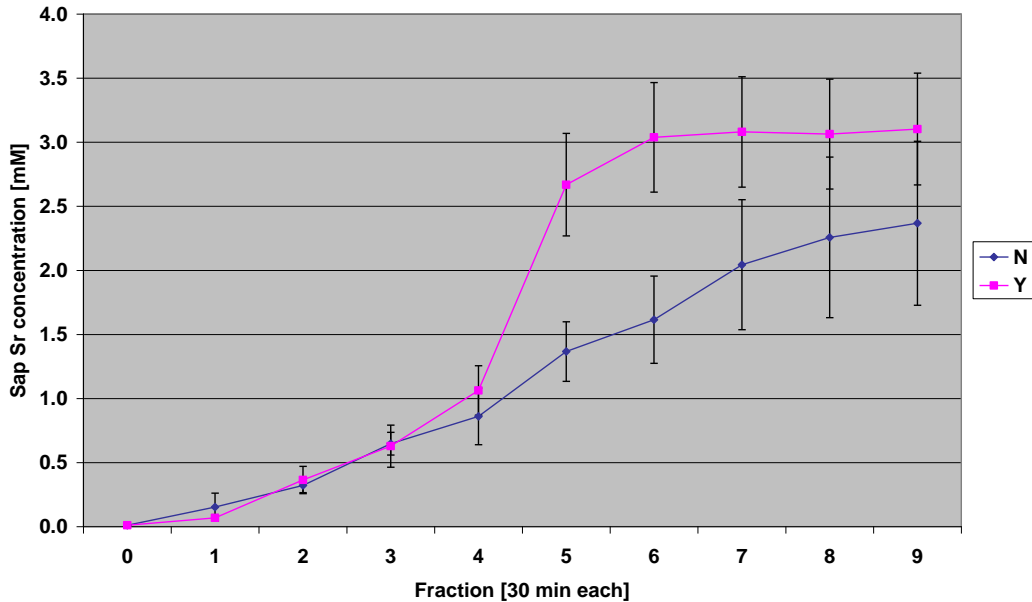
איור 2. שפיעת מוהל מערכת השורשים כתלות בזמן. הסידן והסטרונציום הוספו לאחר איסוף מקטע 0 (טיפולים Y ו-N) וחיתוך מערכת השורשים נעשה לאחר איסוף מקטע 4 (טיפול Y). הקווים האנכיים מסמלים את שגיאת התקן

ריכוז הנתרן במוהל מוצג באיור 3. יון הנתרן שמר על ריכוז נמוך עד למועד החיתוך בכל הטיפולים (כ-20% מרמתו בתמיסה) ושימש עבורנו כסמן לתקינות הביולוגית והמכנית של מערכת השורשים. עם חיתוך השורש עלה הריכוז בטיפול זה לכ-85% לערך מרמתו בתמיסת ההזנה. הטיפול שלא נחתך עלה מעט יחסית והגיע עד לכ-35% מרמתו בתמיסת ההזנה.



איור 3. ריכוז הנתרן במוהל הצמח הנשאב כתלות בזמן (מקרא הטיפולים באיור 2)

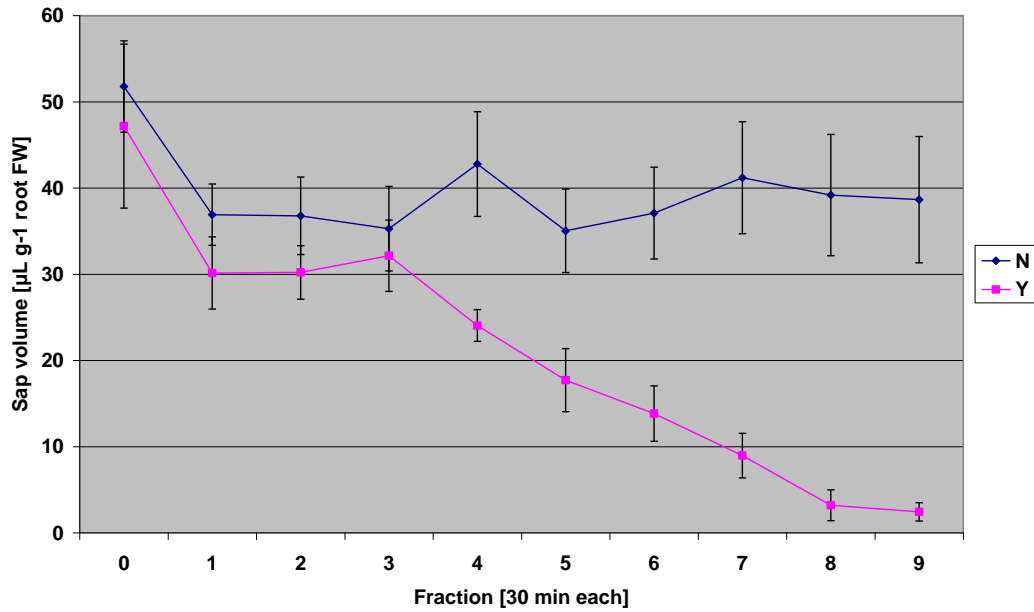
ריכוז הסטרונציום עלה במהלך הזמן באופן קווי עד למועד חיתוך השורשים כאשר החיתוך הזניק את רמתו במוהל לכ- 75% מרמתו בתמיסת ההזנה תוך כשעה (מקטע 6). בזמן זה היה ריכוז הסטרונציום ללא חיתוך השורש כ- 40% בלבד מרמתו בתמיסה (איור 4).



איור 4. ריכוז הסטרונציום במוהל הצמח הנשאב כתלות בזמן (מקרא הטיפולים באיור 2)

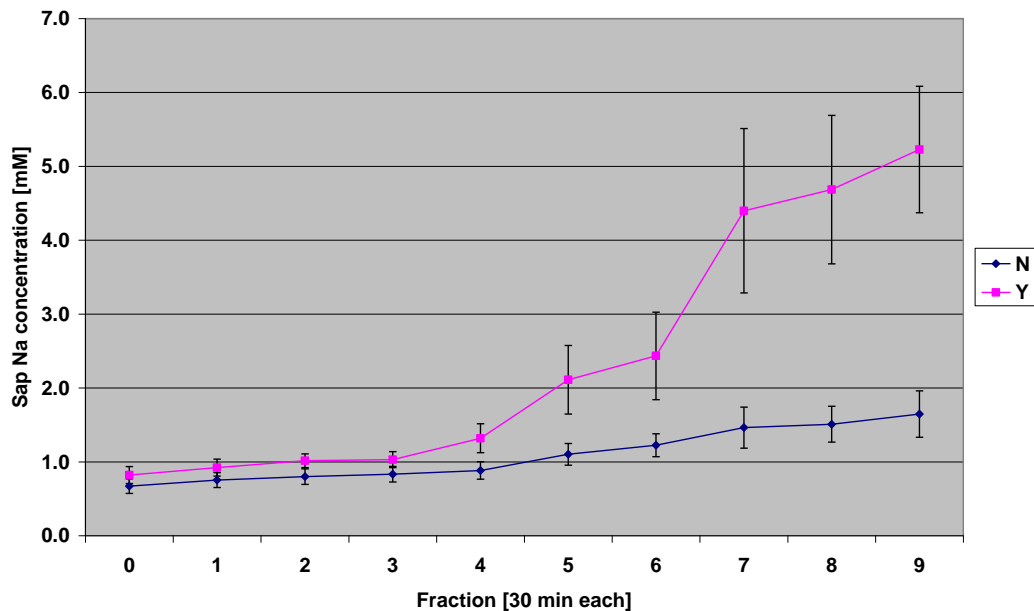
**קירור** – הזרמת מים בטמפרטורה של  $5^{\circ}\text{C}$  סביב מערכת השורשים דרך סליל ייעודי העשוי צנרת נחושת לוותה בירידה במוליכות ההידראולית כאשר חימום מחדש לכ-  $20^{\circ}\text{C}$  העלה אותה לרמתה הקודמת. לעומת זאת, ריכוז הסטרונציום עלה בצורה ברורה מתחילת הקירור והגיע לכ- 40% יותר מרמתו בטיפול שלא עבר קירור וחימום מחדש כלומר לקירור השפעה רבה יותר על קליטת המים מאשר על קליטת הסטרונציום (לא מוצג מפאת חוסר מקום).

**שניקת תעלות המים** – כספית ידועה כחומר המסוגל להקטין את מוליכותן של תעלות המים בקרום התא. הוספת כספית כלורית בריכוז המקובל בספרות ( $0.5\text{ mM}$ ) לאחר איסוף מקטע 3 התבטאה בעלייה מהירה במוליכות ההידראולית, הגעת נוזל עכור אל מערכת האיסוף ולעלייה מהירה ברמת הנתרן במוהל כנראה עקב גרימת נזק לקרומי התאים (לא מוצג). אי לכך, ערכנו ניסוי נוסף בו הופחת ריכוז הכספית בסדר גודל ל-  $0.05\text{ mM}$ . ריכוז זה גרם לפחיתה במוליכות ההידראולית כמצופה (איור 5).



איור 5. שפיעת מוהל מערכת השורשים עם הזמן. הסידן והסטרונציום הוספו לאחר איסוף מקטע 0 (טיפולים Y ו-N) והוספת הכספית הכלורית נעשה לאחר איסוף מקטע 3 (טיפול Y). הקווים האנכיים מסמלים את שגיאת התקן.

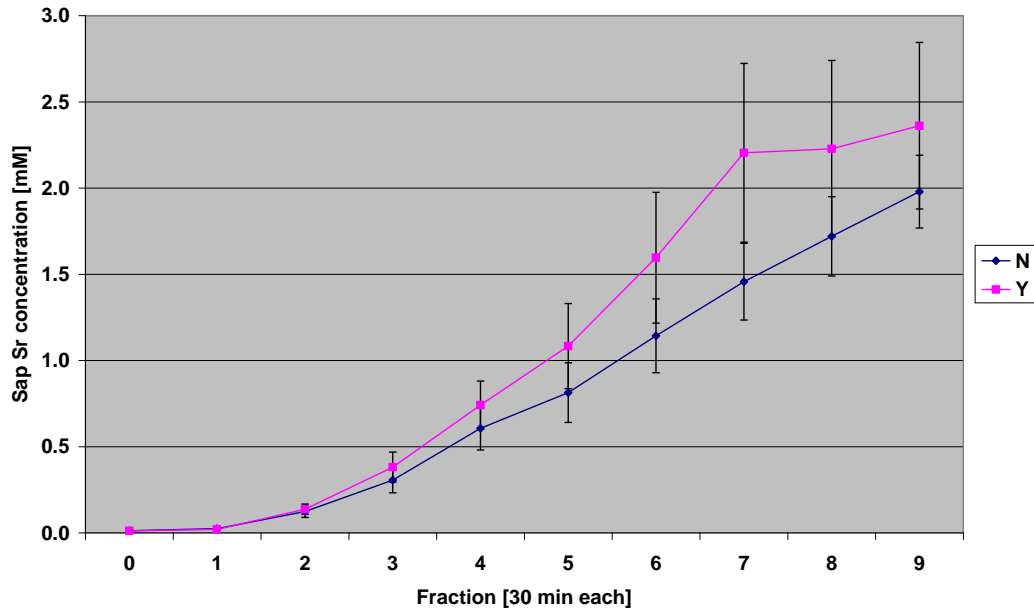
עם הוספת הכספית לאחר איסוף מקטע 3 עלה ריכוז הנתרן במוהל הנשאב בהדרגה ואף עבר בסוף הניסוי את ריכוזו בתמיסה, כנראה בשל קריסה ביולוגית של המערך הסימפלסטי ופריקת הנתרן האגור במערכת (איור 6).



איור 6. ריכוז הנתרן במוהל הצמח הנשאב כתלות בזמן (מקרא הטיפולים באיור 5)

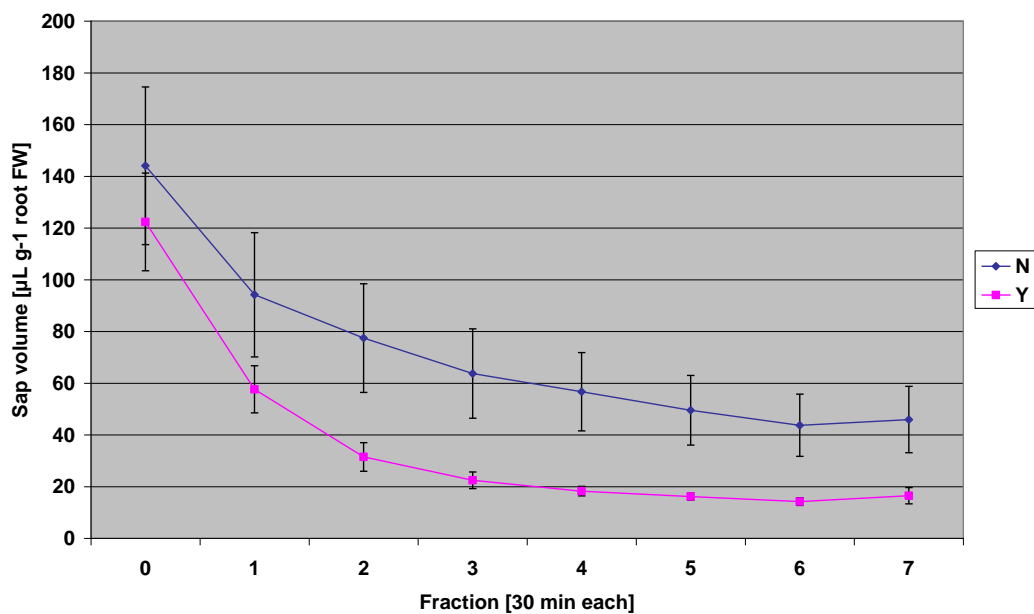
ריכוז הסטרונציום עלה באופן יחסי לריכוזו בטיפול ללא מתן כספית (איור 7). ניתן להסיק מכך כי הפגיעה במוליכות ההידראולית הייתה גדולה מהפגיעה בקליטת הסטרונציום וואו שהסטרונציום המצוי בתמיסה פרץ את המערכת הקרומית בדומה לנתרן.





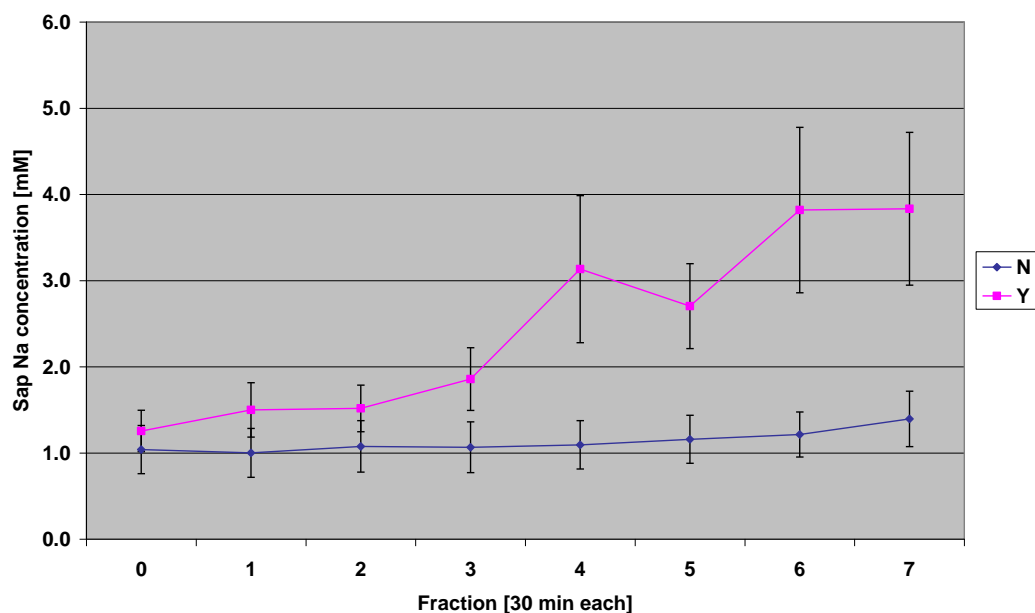
איור 7. ריכוז הסטרונציום במוהל הצמח הנשאב כתלות בזמן (מקרא הטיפולים באיור 5)

**פגיעה בפוטנציאל הממברנה** – הפרוטונופור CCCP הוסף לתמיסת ההזנה בריכוז של 0.01 mM במטרה לשבש את פעולת המשאבות והתעלות שפעילותן תלויה בקיומו של מפל פוטנטיים בין שני צידי של קרום התא. ניתן לראות באיור 8 כי הוספתו (לאחר איסוף מקטע 0) גרמה לפחיתה בנפח המוהל הנשאב יחסית לטיפול הביקורת.



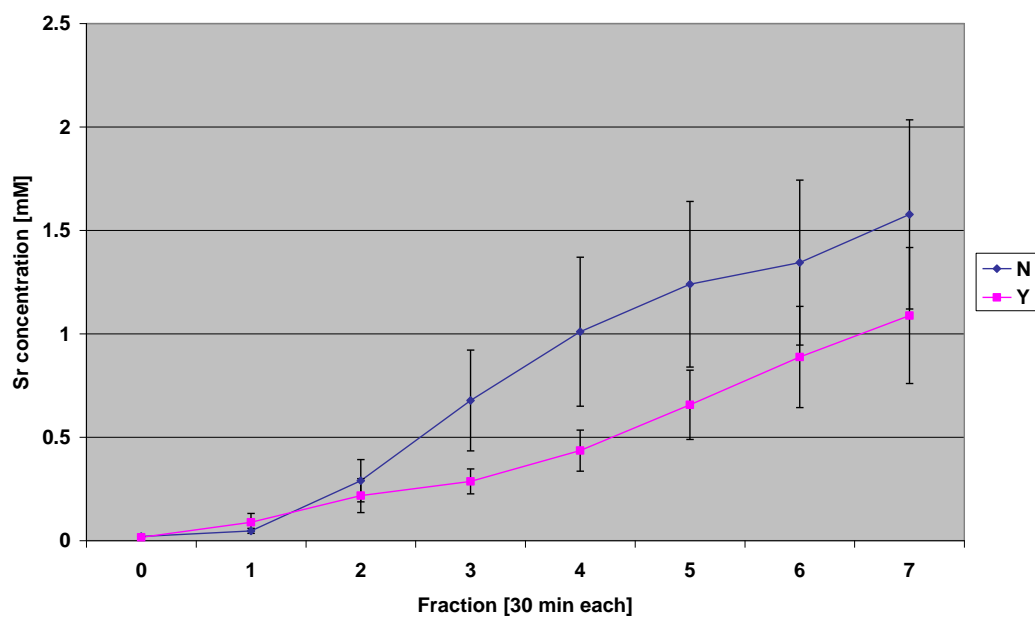
איור 8. שפיעת מוהל מערכת השורשים עם הזמן. הסידן והסטרונציום וכן ה- CCCP הוספו לאחר איסוף מקטע 0 - טיפולים Y ו- N וטיפול Y בהתאמה. הקווים האנכיים מסמלים את שגיאת התקן

ריכוז הנתרן במוהל מוצג באיור 9. בעוד שבטיפול בו לא הוסף CCCP שמר הנתרן על רמה נמוכה ואחידה יחסית, טיפול ה- CCCP הראה עלייה מהירה עד לרמתו בתמיסת ההזנה. מאחר ונתרן מורחק מהשורש באופן אקטיבי, ניתן להניח שעוכבה פעילותם של מנגנונים קרומיים צורכי אנרגיה האחראיים על הרחקתו.



איור 9. ריכוז הנתרן במוהל הצמח הנשאב כתלות בזמן (מקרא הטיפולים באיור 8)

ריכוז הסטרונציום מוצג באיור 10. בשונה מהתגובה לכספית, נראה כי השימוש במעכב המטבולי CCCP גרם לפחיתה יחסית בריכוז הסטרונציום כלומר ההשפעה על קליטת היון הייתה חזקה יותר מהשפעתו על קליטת המים.



איור 10. ריכוז הסטרונציום במוהל הצמח הנשאב כתלות בזמן (מקרא הטיפולים באיור 8)

**מחסור בחמצן** – הפסקת בעבוע האוויר לתמיסת הגידול התבטאה בדעיכה מהירה ולאחריה התגברות בשפיעה של מוהל העצה אשר לוותה בקבלת מוהל עכור במבחנות האיסוף. מאחר שבמקביל עלתה רמת הנתרן במוהל בקצב מהיר אנו מסיקים כי תקינותם הביולוגית של התאים ולאחריה תקינותם המכאנית נפגעה. מסקנה זו מתבססת גם על ההתכנסות המהירה של היונים הנבדקים השונים, וסטרוניציום ביניהם, לרמתם בתמיסת ההזנה (לא מוצג).

**מליחות** – הוספת נתרן כלורי (50 mM) לתמיסת ההזנה גרמה לפחיתה מהירה בשפיעת הצמח ולעליה מהירה בריכוז הנתרן במוהל. בדומה לנתרן עלו ריכוזי כל היונים שנבחנו (מגניון, אשלגן, סידן וסטרוניציום) לערכים הגבוהים פי 2 ו-3 מריכוזם בתמיסה. יתכן כי בעוד שהמוליכות ההידראולית של הצמח למים נפגעה, קליטת היונים הר"מ מעלה לא נפגעה במידה שווה ומכאן נובעת העלייה היחסית שלהם במוהל. סביר להניח כי עליית הריכוז בשלב מאוחר יותר נבעה גם מפריצת קרומי התא למעבר יונים (לא מוצג).

### הסעה והתפלגות

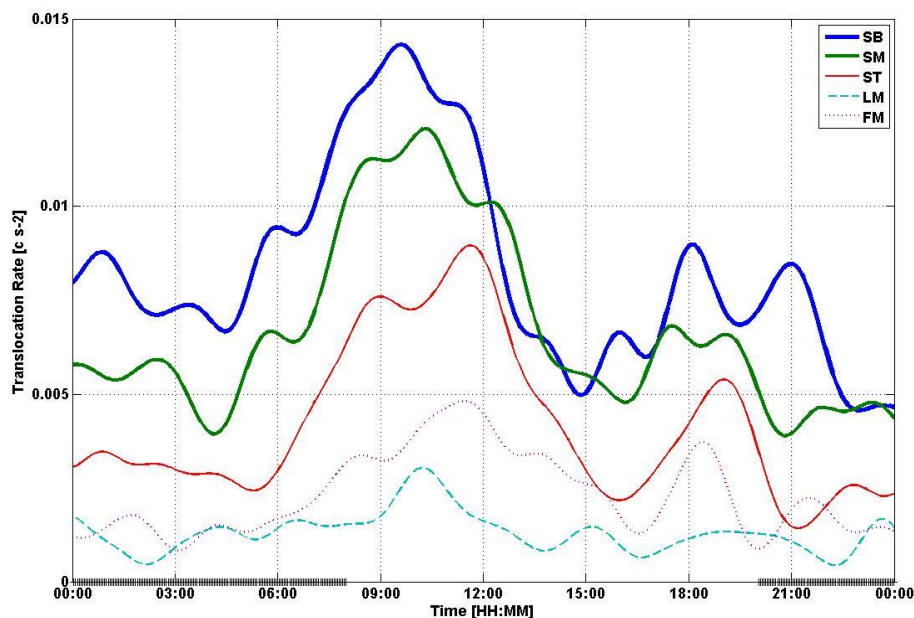
מערכת למדידת קרינת גמה הכוללת חמישה גלאים רגישים (RP-11, רותם תעשיות, ישראל), קופסת תקשורת ותוכנה ייעודית המאפשרת התבוננות בזמן אמת בתוצאות המדידה פותחה והוקמה בעזרת חברת "רותם תעשיות" המהווה את הזרוע האזרחית של קמ"ג. מערך הגלאים הורכב כך שניתן להתאים את מיקום הגלאים מול נקודות נבחרות בצמח ועל ראש כל גלאי הותקן מגן עופרת מפני קרינה צידית בעל פתח קדמי המתאים לצורת איבר הצמח הנמדד. צמחי עגבנייה גודלו כמוזכר קודם אולם למשך של כ-3 חודשים עד להיותם בעלי שלוש קומות פרי. כשבוע לפני תחילת הניסוי הועברו הצמחים מדליי הגידול למשורות בנפח 2 ליטר כדי להפחית את נפח התמיסה הרדיו-אקטיבית שיש לסלק באופן מבוקר לאחר הניסוי. בתחילת הניסוי הועברו 2 צמחים לחדר עבודה ייעודי לקרינה בו הטמפרטורה נשמרה על 24 ו-16 מעלות צלסיוס יום ולילה בהתאמה והתאורה נעשתה באמצעות מנורת סודיום בלחץ גבוה בין השעות 08:00 ל-20:00. צמח אחד הועמד בתוך מעצרה על משקל (תדאה-הנטלי, ישראל) המחובר ליחידת מדידה אוגרת נתונים (CR10, Campbell Scientific, Utah, US). הצמח השני שיועד לחומר הקורן הושם אף הוא במעצרה ומערך הגלאים מוקם מולו. שלושה גלאים הוצמדו אל הגבעול המרכזי – אחד מתחת לכל קומת הפרי. הגלאי הרביעי הוצמד לטרף העלה המורכב מול קומת הפרי השנייה והגלאי האחרון הוצמד לפרי הראשון בקומת הפרי השנייה (איור 11).



איור 11: מערך הגלאים ומיקומם מול הצמח הנמדד (ימין) ומגן הקרינה הציידית וגבעול הצמח המוצמד אליו (משמאל).

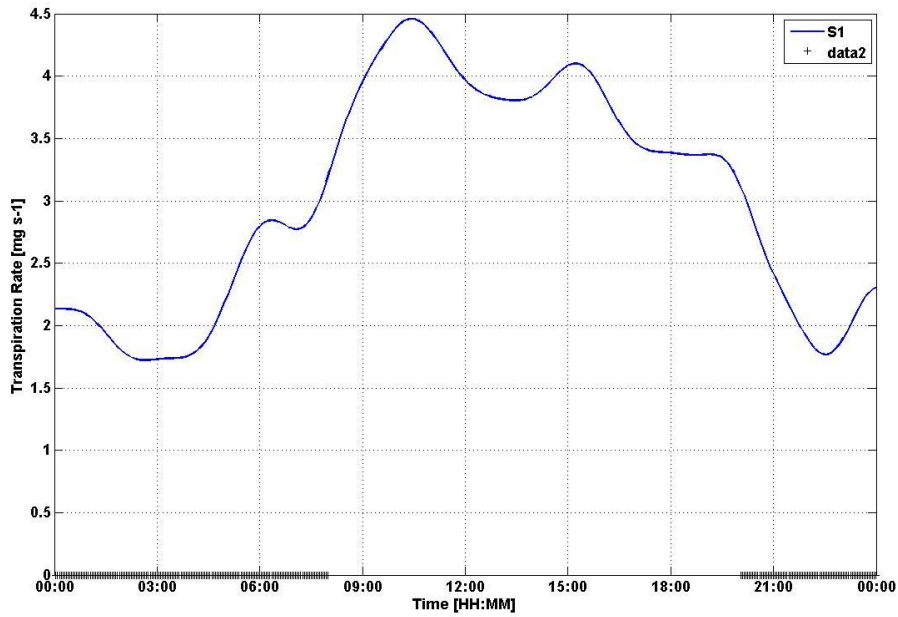
המדידות החלו בצהרי היום כאשר המשקל נמדד כל דקה ומדידות הקרינה נערכו כל 3 שניות. בשעה 13:00 הוסף לתמיסת ההזנה של הצמח איזוטופ יציב של סטרונציום לקבלת ריכוז של 4 mM בתמיסת ההזנה ( $^{88}\text{Sr}$  כסטרונציום חנקתי) ומיד לאחר מכן הוסף רדיו-נוקלאיד קורן גמה של סטרונציום בעל פעילות קרינה של 0.25 מילי-קירי ( $^{85}\text{Sr}$  כסטרונציום כלורי, Perkin Elmer, US). ניסוי זה נערך בארבע חזרות ומאחר ותוצאותיהן היו דומות נציג חזרה אחת.

ניתוח תוצאות המדידות נעשה באמצעות תוכנת MATLAB וכלל שימוש באלגוריתמים מתקדמים לעיבוד אותות. להדגשת השינויים בעוצמת הקרינה גזרנו את ערכי הגלאים השונים בזמן לקבלת קצב מעבר הסטרונציום. למחרת יום יישום הסטרונציום לתמיסה בה שהו השורשים נמדדו 3 גלי קרינה עיקריים (איור 12). ניתן לראות כי עוצמת הקרינה של הגל הראשון החלה לעלות בגלאי הגבעול בזה אחר זה עם כיוון זרימת המים (מלמטה למעלה) עוד לפני הדלקת התאורה (06:00) והגיעה לשיאה ב-10:00 לערך בגלאי התחתון. לאחר שיא זה הובחנה פחיתה מהירה שלאחריה גל נוסף ששיאו ב-18:00. גל נוסף (שלישי) הובחן בגלאי הגבעול בלבד ושיאו ב-21:00, כשעה לאחר כיבוי התאורה. קצב המעבר היה קשור למיקום הגלאי כאשר גלאי הגבעול המרכזי היו בעלי קצב המעבר החזק ביותר (תחתון, אמצעי ועליון בסדר יורד) ולאחריהם גלאי הפרי ולבסוף העלה. מאחר והיינו מצפים כי גלאי הפרי יהיה בעל הערך היחסי הנמוך ביותר מכל הגלאים נציין שבלוק העופרת המגן על גלאי זה הינו בעל גיאומטריה שונה (פתח עגול ורחב במקום מלבן צר) הגורמת לקליטה מוגברת יחסית של קרינה.



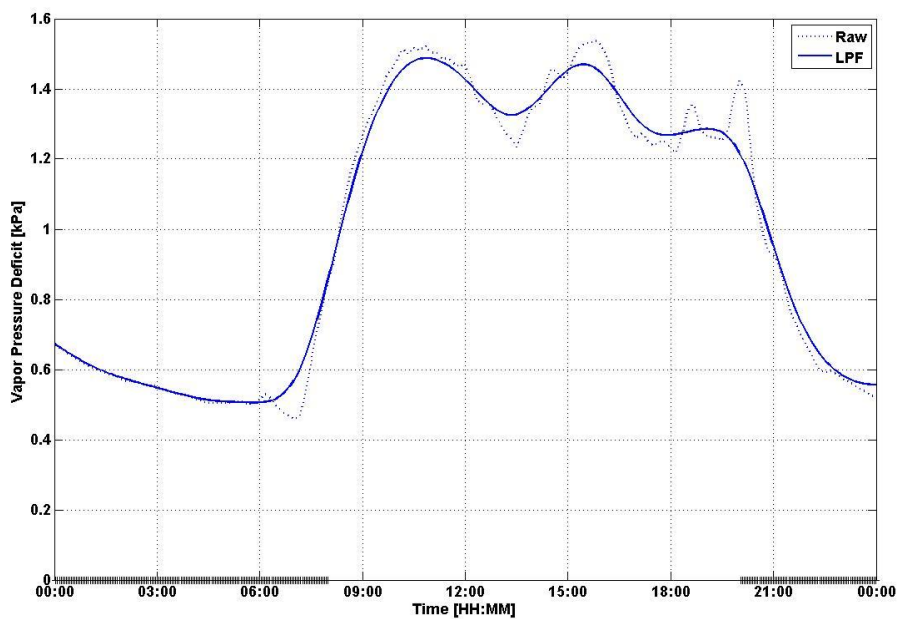
איור 12. קצב שינוי רמת הקרינה הנמדדת בכל אחד מהגלאים [מניית לשנייה<sup>2</sup>]. SB, SM ו-ST – גבעול מתחת קומת פרי 1, 2 ו-3 בהתאמה. LM – טרף עלה סמוך לקומת פרי 2. FM – פרי ראשון בקומה 2.

מהלך קצב הדיות באותו יום שהתקבל מגזירת ערכי אובדן המשקל של צמח סמוך מוצג באיור 13. ניתן לראות כי בתחילת היום קיים מתאם טוב בין קצב הדיות לקצב הולכת היון (שעות 06:00 ו-10:00) כאשר בהמשך היום הקשר בין תנועת המים לתנועת היון נפגם.



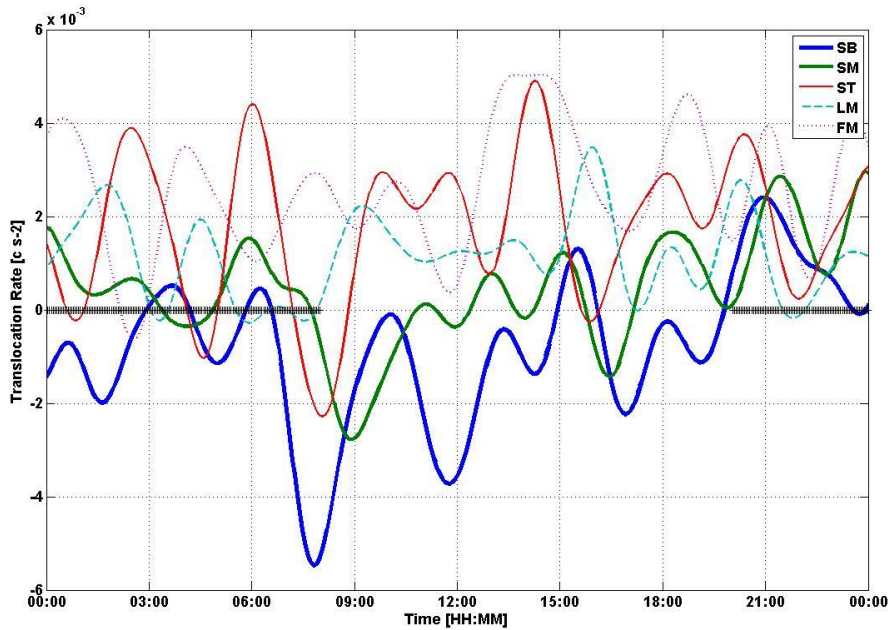
איור 13. קצב הדיות של צמח סמוך

הדרישה האטמוספרית להתאדות (ולדיות) על פי מדד גירעון לחץ האדים (VPD) בחדר מוצג באיור 14. ניתן להבחין כי למעט השיא הראשון בקצב הדיות (איור 12) יש מתאם טוב בין קצב הדיות ל- VPD. נציין שאופי השתנות ה- VPD נובע מדרך בקרת האקלים בחדר (מיזוג).



איור 14. גרעון לחץ האדים בקרבת הצמח. Raw הינו האות המקורי ו-LPF הוא האות המוחלק.

עם חלוף הזמן הלך ופחת קצב המעבר בגלאים אשר במעלה הזרימה (גלאי הגזע התחתון) עד אשר הפך שלילי כאשר במורד הזרימה קצב זה הלך ועלה. אופיין קצב התנועה ביום העשירי לאחר הוספת היון הרדיו-אקטיבי (איור 15) מראה כי בחיישן התחתון בגזע ישנו תהליך של שטיפה ההופך להצטברות רק עם רדת "החשיכה" כאשר תהליך השטיפה קצר יותר בחיישן הגזע המרכזי ומופיע רק עם תחילת היום בחיישן הגזע העליון.



איור 15. קצב הובלת היון ביום העשירי ממתן הסטרונציום הקורן.

התופעות המתוארות מעלה נצפו באופן דומה במספר צמחים (חזרות).

### דיון ומסקנות

פיתוח מערכת מדמת דיות באמצעות הפעלת יניקה מבסיס הגבעול לאחר הסרת הנוף מאפשרת בחינה של הקשר בין קליטת היונים לקליטת המים במערכת השורשים השלמה. בשלב זה ניתן לומר כי הטיפולים שהשפיעו על מערך הבקרה התאי השפיעו הן על תנועת המים והן על קליטת סטרונציום (וסידן) אם כי לא באותה מידה ומכאן ניתן לומר כי צמידות קליטת הוסידן והסטרונציום למים הינה חלקית וכי קליטה מסוימת של יונים אלה נעשית דרך הנתב המבוקר הכרוך בחציית קרומי תאים (לפחות של תאי האנדודרמיס) וחלקה האחר דרך הנתב הלא מבוקר.

בחינת הסעת והתפלגות יון הסטרונציום הקורן המדמה רדיום (וסידן), והדיות הציגה הקבלה בתנועת המים והיון בשעות הבוקר בלבד. את חוסר הצמידות בהמשך היום והאופי המורכב של הסעת היון ניתן לקשר לתהליכים כימיים של ספיחה ושחרור היון אל רקמת הצמח ולתהליכים ביולוגיים של פריקה וטעינה. דיות הצמח השלם הקבילה במהלך היום לערכי VPD בסביבת הצמח כמצופה למעט גל טרום תאורה אשר ניתן לשייכו לפתיחת פיוניות מוקדמת הנובעת מאות פנימי. ניסוי הסעה והתפלגות נוסף

שיכלול בחינת גורמים המשפיעים על הקליטה במערכת השורשים, בהתבסס על הנתונים שנאספו בצמח גדום, ובחינת השפעת אור ו-VPD מקומי המופעלים על חלקו העילי של הצמח מתוכנן להיערך השנה.

המוהל הזורם בעצה מצוי בתנאי תת לחץ (מתח) ולכן קשה יחסית לדגום אותו. מתח המים בעצה נבנה כתוצאה מההפרש בין שטף המים הנקלטים ע"י השורש לבין השטף המים המתאדה מהצמח בתהליך הטרנספירציה וכתוצאה מכוחות האדהזיה והקוהזיה הנובעים מהמבנה הקוטבי של מולקולות המים. כאשר מסירים את הנוף מבלי לפגוע במערכת השורשים מתח המים בעצה מתפוגג באופן מידי אך למרות זאת מוהל עצה ימשיך לעלות מהשורש ולטפטף משטח החתך של הגדם כתוצאה מתופעה המוכרת "לחץ השורש". מוהל זה שימש במקרים רבים אמצעי למדידת הרכב החומרים המוסעים בעצה. נשאלת השאלה האם הרכב היונים וחומרים אחרים העולים באמצעות לחץ השורש זהה להרכב המוהל הנקלט ומוסע אל הנוף כאשר בעצה שורר מתח, כבצמח הבלתי מנותק? גורם עיקרי לתופעת "לחץ השורש" הוא אוסמוטי, תנועה אוסמוטית של מים אל העצה לאחר שזו "נטענה" באופן אקטיבי ביונים. האפקט האוסמוטי נובע מהעובדה שקליפת השורש והאנדודרמיס מתפקדים כקרום חדיר למחצה המפריד בין שני מדורים: סביבת השורש מצד אחד ומוהל העצה מהצד השני. בשנים האחרונות נמצא שקליפת השורש והאנדודרמיס אינם מהווים מערכת אוסמוטית "מושלמת" כלומר קיימים מעברים אפופלסטיים רבים בין סביבת השורש והעצה. ערכו של ה- $\sigma$  reflection coefficient של האנדודרמיס הוא כ-0.5 בעוד בקרום ביולוגי מושלם הערך הוא 1 ובקרום מחורר הערך הוא 0. משמעות הדבר היא שחלק מהתמיסה הנטענת לעצה "דולפת" חזרה לקליפה עוד בשורש. כמו כן, כאשר בצמח השלם שורר מתח בעצה, תמיסה עשויה "להישאב" אל תוך העצה במסלול אפופלסטי מבלי שחצתה קרומים ביולוגיים. לפיכך הרכב היונים במוהל שעולה בעצה אל גדם הגבעול באמצעות לחץ שורש בלבד עלול להיות שונה מזה שיעלה בעצה בצמח השלם.

במחקר הנוכחי התגברנו על בעיה זו לאחר פיתוח המערכת המתוארת למעלה שבאמצעותה הפעלנו על גדם גבעול העגבנייה מתח מבוקר באמצעות מערכת שאיבה עם אפשרות לאסוף את מוהל העצה בזמנים או נפחים קבועים. מערכת היניקה יוצרת מתח מתון בעצה, נמוך משמעותית מזה שמתפתח בצמח בתנאי עקת יובש אך גדול מספיק לאפשר קליטה של מים ומינרלים בתנאים דומים ככל האפשר לאלה המופעלים בצמח השלם.

פיתוח מערכת מדמת דיות באמצעות הפעלת יניקה מבסיס הגבעול לאחר הסרת הנוף מאפשרת בחינה של הקשר בין קליטת היונים לקליטת המים בשורש השלם הבלתי מנותק. בשלב זה ניתן לומר כי הטיפולים שהשפיעו על מערך הבקרה התאי השפיעו הן על תנועת המים והן על קליטת סטרונציום (וסידן) אם כי לא באותה מידה ומכאן ניתן לומר כי צמידות קליטת הוסידן והסטרונציום למים הינה חלקית וכי קליטה מסוימת של יונים אלה נעשית דרך הנתבי המבוקר הכרוך בחציית קרומי תאים (לפחות של תאי האנדודרמיס) וחלקה האחר דרך הנתבי הלא מבוקר.

שימוש בנתבים רדיואקטיביים לחקר מנגנונים פיסיוולוגיים ומסלולים ביוכימיים בצמח נעשה כבר למעלה ממאה שנים. מרבית המחקר מבוצע באמצעות נתבים המסומנים ביסודות קורני קרינת בטא. המדידה נעשית ע"י העברת קטעי רקמה לנוזל סנטילציה או לאחר מיצוי החומר הקורן מהרקמה ומדידה בתוך נוזל סנטילציה. מיקרורדיוגרפיה היא שיטה נוספת ללימוד אופי הפיזור של החומר הקורן. בשיטה זו מניחים חלקי צמח על גבי נייר צילום למשך מספר ימים ומקבלים את תמונת הפיזור החומר הקורן על גבי נייר הצילום. במהלך השנים פורסמו שיטות מגוונות נוספות למדידה של קרינת בטא מהצמח השלם ע"י שימוש באמצעי צילום ייחודיים.

במחקר הנוכחי השתמשנו בגלאי קרינת גמא רגישים ביותר, שפותחו ע"י חברת "רותם תעשיות" חברת היישום של קמ"ג, למעקב רציף אחר תנועת חומר קורן מהשורש לחלקי הצמח השונים. השימוש בגלאים מתאפשר לאחר הצמדת הגלאי לגבעול או לפטוטרט עלה באמצעות מתאם עשוי עופרת הממקד את הקריאה מהגבעול ומונע קליטה של קרינת רקע מהסביבה.

בחינת הסעת והתפלגות יון הסטרונציום הקורן המדמה רדיום (וסיזן), והדיות הציגה הקבלה בתנועת המים והיון בשעות הבוקר בלבד. את חוסר הצמידות בהמשך היום והאופי המורכב של הסעת היון ניתן לקשר לתהליכים כימיים של ספיחה ושחרור היון אל רקמת הצמח ולתהליכים ביולוגיים של פריקה וטעינה. דיות הצמח השלם הקבילה במהלך היום לערכי VPD בסביבת הצמח כמצופה למעט גל טרום תאורה אשר ניתן לשייכו לפתיחת פיוניות מוקדמת הנובעת מאות פנימי. ניסוי הסעה והתפלגות נוסף שיכלול בחינת גורמים המשפיעים על הקליטה במערכת השורשים, בהתבסס על הנתונים שנאספו בצמח גדום, ובחינת השפעת אור ו- VPD מקומי המופעלים על חלקו העילי של הצמח מתוכנן להיערך השנה.

למיטב ידיעתנו שיטת המדידה שבה נעשה שימוש במחקר הנוכחי היא חדשנית ונתאפשרה כתוצאה משיתוף הפעולה עם רותם תעשיות. בשלב הנוכחי של המחקר הוחל בתכנון מערכת מדידה ניידת הכוללת חישן ומערכת הפעלה ובקרה שתופעל ע"י מחשב נייד.

לסיכום: במסגרת המחקר הנוכחי מתבצעת עבודת הדוקטורט של רון זליגמן. המחקר מבוצע בשיתוף פעולה מלא בין מעבדה בפקולטה לחקלאות ובין מעבדה מכון וולקני. שתי מערכות המדידה שפותחו הם להערכתנו חדשניות ויאפשרו מדידה של יונים ומקרומולקולות נוספות המגיעות אל העצה של השורש במסלולים האפופלסטי והסימפלסטי וכן מעקב אחר תנועתם נוקלאוטידים קורני גמא בצמח השלם.

#### פרסומים מדעיים

- Seligmann R., Schwartz A., Bar-Tal A., Yermiyahu U., Tirosh D., Ifargan Y., Ovad S., Sarusi B. and Wengrowicz U. 2007. *Calcium translocation and whole plant transpiration, noninvasive measurements using radio-Strontium as tracer*. Proceedings of the 24<sup>th</sup> conference of the nuclear societies in Israel.
- Wengrowicz U., Tirosh D., Ifargan Y., Ovad S., Sarusi B., Bar-Tal A., Schwartz A. and Seligmann R. 2007. *Gamma Measurement System for Calculation of Calcium Transport in Tomato Plants*. Proceedings of the 24<sup>th</sup> conference of the nuclear societies in Israel.
- Seligmann R., Schwartz A., Bar-Tal A., Yermiyahu U., Tirosh D. and Wengrowicz U. 2009. *Calcium translocation and whole plant transpiration: spatial and temporal measurements using radio-Strontium as tracer*. Proceedings of the XVI International Plant Nutrition Colloquium 1349:1355
- Sade N., Gebretsadik M., Seligmann R., Schwartz A., Wallach R. and Moshelion M. 2010. *The Role of Tobacco Aquaporin1 in Improving Water Use Efficiency, Hydraulic Conductivity, and Yield Production Under Salt Stress*. Plant Physiology 152:245-254.



### 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 הפנייה לדו"ח אם נכללו בו נקודות נוספות לאלה שבסיכום.

מטרות המחקר תוך התייחסות לתוכנית העבודה.
מטרת המחקר הנוכחי הייתה לפתח שיטות לזיהוי קליטה של רדיום או של חומר קורן גמא לצמח, ובמידת האפשר לפתח שיטה שתאפשר ביצוע המדידה בתנאי שדה בצמח השלם. ייזום המחקר נבע מהצורך לזהות בצמחים חומר רדיו אקטיבי (קרינת גמא) שמקורה במי השקיה מבארות מזוהמים ברדיום או חומר קורן אחר. המחקר הייתה ללמוד על הגורמים המשפיעים על קליטת החומר הקורן ועל התפלגותו בצמח השלם.
עיקרי הניסויים והתוצאות.
קליטת מינרלים ומולקולות אחרות באמצעות מערכת שורשים שלמה (בלתי מנותקת) שונה מקליטה של אותם חומרים בתאי רקמות שורש מבודדות. חומרים שמתקשים לחצות קרומים של תאים חיים עשויים למרות זאת להגיע אל הנוף ואל הפרי בעקבות חדירה אל השורש במסלול אפופלסטי (ללא חציית ממבראנות, אפילו לא זו של תאי האנדודרמיס). מערכת הניסוי שבנינו בחלקו הראשון של המחקר מאפשר להפריד, במידה רבה של דיוק, בין חומרים שהגיעו אל מוהל העצה במסלול הסמפלסטי ואלו שהגיעו במסלול האפופלסטי.
מסקנות מדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו. האם הושגו מטרות המחקר לתקופת הדוח? באמצעות מערכות המדידה שפותחו נלמד הקשר בין קצב הקליטה המים לבין קצב קליטה של יונים (סטרונציום כמדמה רדיום) וכן של סידן. המעבר של חומרים מהקרקע עד לעצה של השורש במסלול האפופלסטי מאפשר חדירת מזהמים, מאקרומולקולות ויתכן אף חידקים. בחלק השני של המחקר פיתחנו בשתי"פ עם רותם תעשיות מערכת למדידה של חומר קורן ע"י הצמדה של גלאי קרינת גמא אל הגבעול בצמח השלם. למערכת המצויה בשלבי פיתוח מתקדמים, עשויה להיות חשיבות הן לצורכי מחקר בסיסי והן לגילוי on line של חדירת חומר קורן.
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? להערכתנו לחקירת התכונות של המסלולים האפופלסטיים המאפשרים כניסת חומרים אל השורש חשיבות רבה בהקשר של שימוש במי קולחים להשקיית גידולים וכן בהקשר להרכבם של מצעים מנותקים בעלי אופי אורגני וכן בהקשר לדישון של גידולים אורגניים. המחקר בנושא זה הוא להערכתנו בראשיתו.
הפיתוח של מערכת למדידה של תנועת חומרים קורני גמא בשתי"פ עם רותם תעשיות מצוי להערתנו בשלבים מתקדמים. בכוונתנו לבחון השפעת טיפולים נוספים ברמת העלווה וברמת השורש על קליטת רדיו-נוקליאידים. כמו-כן, בקרוב מתוכנן שלב ניסויים נוסף במטרה להגדיל את הניידות של המכשיר ולהתאימו לבקרה באמצעות מחשב נייד.
הפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח: <b>פרסומים בכתב</b> - ציטט ביבליוגרפי כמקובל בפרסום מאמר מדעי; <b>פנטטים</b> - יש לציין שם ומס' פטנט; <b>הרצאות וימי עיון</b> - יש לפרט מקום, תאריך, ציטוט ביבליוגרפי של התקציר כמקובל בפרסום מאמר מדעי.
Seligmann R. et al. (2007) Proceedings of the 24 <sup>th</sup> conference of the nuclear societies in Israel.
Wengrowicz U. et al. (2007) Proceedings of the 24 <sup>th</sup> conference of the nuclear societies in Israel.
Seligmann R. et al. (2009) Proceedings of the XVI Int. Plant Nutrition Colloquium 1349:1355
Sade N. et al. (2010) Plant Physiology 152:245-254
פרסום הדוח: אני ממליץ לפרסם את הדוח: (סמן אחת מהאופציות)
רק בספריות
ללא הגבלה (בספריות ובאינטרנט)
חסוי - לא לפרסם
האם בכוונתך להגיש תוכנית המשך בתום תקופת המחקר הנוכחי? כן* - לא -

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

