



הועדה לאנרגיה
אטומית
המרכז למחקר
גרעיני, שורק



נציבות המים
אגף איכות מים



המחלקה לקרקע
ומים, הפקולטה
לחקלאות,
רחובות,
האוניברסיטה
העברית



מו"פ ערבה
דרומית,
יטבתה

השפעת ריכוזים גבוהים של רדיוס במי השקיה על תוצרת חקלאית

דו"ח מס' 2

אפי טריפלר ואורי שני

מו"פ ערבה דרומית, יוטבתה
המחלקה לקרקע ומים, הפקולטה לחקלאות, רחובות

נעמה גזית-יערי, גוסטבו חקין, ז'אן קוך, נורית קניון וזהר יונגרייס
שטח בטיחות קרינה, המרכז למחקר גרעיני שורק, יבנה

מרץ 2006

אדר תשס"ו

הוכן עפ"י הזמנת אגף איכות המים בנציבות המים

1. מבוא

הימצאות איזוטופים של רדיום במספר בארות בערבה הדרומית, בערבה התיכונה וברמת הנגב בריכוז העולה על המותר בתקנות מי שתייה הובילה לאפשרות השבתת פעולתן של הבארות ולספקות באשר לאפשרות השימוש במים אלו ללא טיפול לשתייה מחד, ולהשקיית גידולים חקלאיים מאידך [חקין ושו"ת, 2005]. היות ומקורות המים הראויים לשתייה ולחקלאות באזור הערבה הדרומית, הערבה התיכונה ורמת הנגב מוגבלים, תרומת המים מקידוחים אלה למשק המים בדרום הארץ גדולה. מסיבה זו יש חשיבות רבה לבחינת ההשפעה של השקיה במים עשירים ברדיום על הצטברותו בבית השרשים של גידולים חקלאיים ובמיוחד בצמחים עצמם. בנוסף, שיעור ההתאדות השנתית בערבה ובנגב הדרומי גבוהים מאד, כמות המשקעים נמוכה ולכן צריכת המים של הגידולים החקלאיים באזורים אלו גבוהה מאד והיא מסופקת על-ידי השקיה בלבד.

בדו"ח ראשון שפורסם במסגרת עבודה זו (גזית-יערי ושו"ת, 2005), נעשה ניסיון לבחון תהליכי מעבר של רדיום ממי השקיה אל גידול חקלאי נבחר, צמח המלפפון. יש חשיבות רבה לבחינת ההשפעה של השקיה במים עשירים ברדיום על הצטברותו בקרקע ובחלקי הצמח השונים. ריכוז הרדיום שמקורו טבעי במספר קידוחים בערבה ובנגב הוא מעל למותר בתקנות איכות מי שתייה. מכאן שמטרת העבודה לעזור בקבלת ההחלטה לגבי אפשרויות השימוש במים אלה, בין היתר על להשקיית גידולים חקלאיים. המסקנות העיקריות העולות מן הדו"ח הראשון בעבודה זו נובעות גם מניסוי מבוקר במערך ליזימטרים שתואר בדו"ח 1 (גזית-יערי ושות', 2005) בעקבות מחזור גידול אחד של צמחי מלפפון, ובנוסף לכך מבדיקות קרקע ותוצרת חקלאית ישירות בשדה (ירקות, פירות ודגים) שנעשו בנוסף לניסויים הכמותיים.

מסקנות הניסוי הראשון שנעשה בליזימטרים במו"פ יטבתה, בצמחי מלפפון שהושקו במים מסומנים ברדיום, מי שיזפון ובמי ביקורת, מצביעות על כך שריכוז הרדיום בעלים היה ביחס ישר לריכוזם במי ההשקיה. הריכוז בפרי היה נמוך הרבה יותר ואף נמוך ממגבלות משרד הבריאות. נראה כי בעיית הצטברות רדיום בחלקי צמח משווקים גדולה בהרבה בגידולי עלים (לדוגמא: בצל, חסה, כרוביים, ארטישוק וצמחי תבלין). ריכוז גבוה ייתכן גם בשורשים.

נמצא כי הרדיום נספח (ואולי שוקע) בקרקע והתרכז ב- 15 הס"מ העליונים של הקרקע וריכוזו במי הנקז כלומר במים שירדו מתחת לבית השורשים היה זניח. מכאן שבמהלך שנות השקיה ברדיום ריכוזו בקרקע בשכבת השורשים ילך ויעלה. בניסוי הראשון ריכוז הרדיום בעלים היה פרופורציונלי לריכוזו במי ההשקיה. היות וריכוזו בתמיסת הקרקע כנראה יעלה עם השנים נראה שגם ריכוזו בצמח עלול לעלות.

בעבודה הנוכחית נמשכת בחינת שאלת ההשקיה במים בעלי ריכוז גבוה של רדיום על ריכוז הרדיום בתוצרת החקלאית, והשלכותיה הרדיולוגיות וסוגיית הצטברות הרדיום בקרקע.

בדו"ח זה מתואר ביצוע ניסוי מבוקר של גידול מלונים באמצעות מערך של ליזימטרים, אותם כלי גידול מבוקרים שניתן לעקוב אחר מאזן המים בהם. כמו כן, נמסרות תוצאות ניסוי שדה בתוצרת חקלאית מחלקה ניסויית בקיבוץ נאות סמדר.

בפרק 2 מובא הסבר מפורט על מערכות המדידה ושיטות האנליזה, פרק 3 מפרט את תוצאות המדידות, ניתוח התוצאות ניתן בפרק 4, ובפרק 5 מובאות המסקנות מהניסוי.

2. שיטות

במסגרת מחזור הגידול השני הופעלה שיטת ניסוי הכוללת את אותם ליזימטרים מעונת המחקר הראשונה. מבנה הניסוי היה דומה וכלל 3 רמות של ריכוז רדיום בתמיסת ההשקיה בשלוש חזרות, סה"כ 9 ליזימטרים. ליזימטרים אלו הם מיכל קרקע המונח על גבי מאזניים. ליזימטר כגון זה מהווה כלי חשוב בחקר יחסי קרקע- צמח- מים היות והוא מאפשר לבצע ניסוי מבוקר באופן מלא כולל מאזן מלא של מים ורדיום.

2.1 מערך הליזימטרים

לצורך הניסוי נבנו בתחנת הניסיונות ביוטבתה 9 ליזימטרים (איור 1) בנפח של 1.5 מ"ק כל אחד. הליזימטרים מולאו באפריל 2005, בקרקע מקומית שמאופיינת על-ידי ההרכב הרדיואקטיבי הבא: $^{226}\text{Ra}=21\pm 3 \text{ Bq/kg}$, $^{232}\text{Th}=12\pm 2 \text{ Bq/kg}$ ו- $^{40}\text{K}=114\pm 8 \text{ Bq/kg}$. כל ליזימטר הונח על גבי במת שקילה מרובעת המכילה מתמר שקילה בכל פינה (סה"כ 4 מתמרים). הצבת הליזימטרים על גבי משקלים מאפשרת עריכת מאזן מים מדויק. לכל ליזימטר הוקמה מערכת השקיה נפרדת.

בניסוי זה נבדקה התגובה של צמחי מלון (גידול הנמנה על הגידולים המצויים בסל הגידולים המקומי) להשקיה במים המכילים ריכוזים שונים של רדיום. סיבה נוספת לבחירתם של צמחי המלון לניסוי זה נבעה מהיותם עתירי יבול פרי ועלווה.

ב 20/05/2005 הליזימטרים עברו חיטוי במתיל ברומיד, לפי פרוטוקול הגידול המקובל. שבוע מאוחר יותר נשטפו הליזימטרים והקרקע עובדה והוכנה לשתילה. ב- 29/05/05 נשתלו 10 שתילי מלונים בכל ליזימטר. עם השתילה החל הניסוי שכלל 4 טיפולים המפורטים להלן.

1. גידול בשני ליזימטרים (1 ו- 2) קבלו טיפול השקיה ראשוני במים מועשרי רדיום, זהה לטיפול המתואר להלן בסעיף 2. שבועיים מיום השתילה הופסקה ההשקיה עד לתום הניסוי.

2. גידול נוסף (ליזימטר 3) הושקה במים מועשרי רדיום- בהם ריכוז ה- ^{226}Ra היה כ- 50Bq/l (אשר מוסף כמלח RaCl_2 מתוצרת חברת AEA מאנגליה)..

3. ליזימטרים 4, 5, ו-6 הושקו במי שיזפון 11- שריכוז ה- ^{226}Ra הוא כ- 1.8 Bq/l

4. ביקורת, בליזימטרים 7, 8 ו-9, הושקו במים מליחים ("מי קו") שמקורם בקידוחי יטבתה (ריכוז ^{226}Ra נמוך מאד כ- 0.04 Bq/l).

טיפולים 1,2 מטרנם היא לזרז את תהליך הצטברות הרדיום בקרקע על יד השקיה במים מועשרים ב- ^{226}Ra וכדי שניתן יהיה להעריך את הצטברותו בחלקי הצמח השונים כפונקציה של ריכוזו בתמיסת ההשקיה ובקרקע. באיור 1 מוצג מערך הליזימטרים ובטבלה 1 מובא ההרכב הכימי של מי הביקורת ושל המים המסומנים ברדיום.



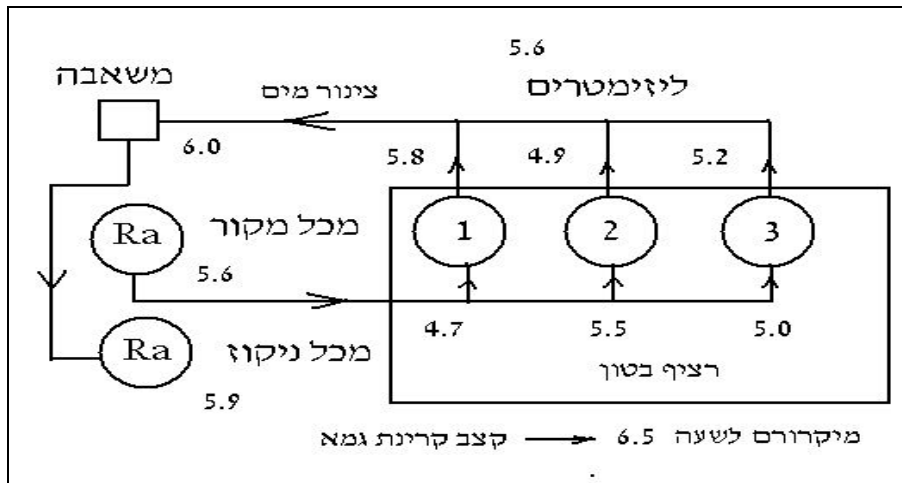
איור מס' 1: מבט על מערך תשעת הליזימטרים בהם גדלים צמחי המלון.

טבלה 1: ההרכב והתכונות הכימיות של המים המליחים בערבה הדרומית ("מי הקו").

יחידות	ערך	תכונה
-	7.5	pH
$\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$	3.5	EC
	ריכוז	יון
$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	640	Cl^{-}
$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	485	SO_4^{2-}
$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	205	Ca^{2+}
$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	105	Mg^{2+}
$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	12.1	Na^{+}
$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	0.4	K^{+}

2.2 ניהול ההשקיה

המערכת המושקת במים מסומנים ברדיום הוקמה תוך שימת דגש על היבטי בטיחות קרינה, ואישור אגף מניעת רעש וקרינה של המשרד לאיכות הסביבה, תוך הפרדה מוחלטת מהמערכות האחרות. המערכת לאיסוף ושקילה של מי הנקז עבור כל טיפול, כוללת צינורות הולכה, משאבות ואקום וברזי פיקוד, כאשר המערכות ממוחשבת לפיקוד שליטה, בקרה ודיווח. רישום סכימטי של מערכת ההשקיה, הנקז והליזימטרים ניתנת באיור 2, תוך ציון מדוד של קצב מנת הקרינה במקומות שונים במערכת, כפי שנמדדה בניסוי הראשון (אפריל 2005 בצמחי מלפפון).



איור 2: מראה סכימטי של מערכת הליזימטרים, ההשקיה והניקוז בטיפול הרדיום הגבוה. הספרות ליד כל אלמנט מציינות את קצב מנת קרינת הגמא (מיקרורם לשעה)

כמות ההשקיה חושבה מידי יום על מנת שמי הנקז יהוו שליש מכמות מי ההשקיה, ובכדי לא ליצור גירעון או עודף בתכולת הרטיבות. איסוף מי הנקז התבצע מידי יום וההשקיה התבצעה שלוש פעמים ביממה, בשעות האור. המדידות היומיות כללו אוופטרנספירציה פוטנציאלית מגיית התאדות סוג A (המדמה את התאדות המים מפני הקרקע ומהצמחים), אוופטרנספירציה מכל אחד מהליזימטרים, ומדידת המוליכות החשמלית של מי הנקז.

מאזן המים חושב לפי משוואה 1:

$$ET = I - D - dW \quad (1)$$

כאשר:

ET הוא שיעור האוופטרנספירציה.

I במ"מ ליח' שטח, הוא כמות מי ההשקיה,

dW הוא השינוי באוגר המים בליזימטר

ו- D היא כמות הנקז במ"מ ליח' שטח.

איור 3 מתאר את פירוט מאזן מים לכל טיפול השקיה וכולל כמויות ההשקיה (IR), אוופטרנספירציה (T) והשינוי באוגר המים בליזימטר (del W).

2.3 דיגום הקרקע והתוצרת החקלאית

פרופיל הקרקע (גלעין קרקע) נדגם באמצעות שימוש במקדח כוס משונן בקצהו מתוצרת Eijkelkamp (Eijkelkamp Agrisearch Equipment. NL). מראה של מקדח הקרקע והקרקע שנדגמה באמצעותו מוצג בתמונה 2.

הדיגום בוצע לעומק של כ- 60 ס"מ, בהפרדה של 15 ס"מ עומק לכל דוגמא. כמו כן, נדגם פרופיל ביקורת באזור המצוי בין הטפטפות. הקרקע נשקלה מיד לאחר הדיגום ולאחר יבוש בתנור 105°C לקביעת תכולת רטיבות המדגם. ריכוזי הקטיונים העיקריים במי מיצוי העיסה הרוויה של הקרקע (סידן, נתרן ומגנזיום) והאניונים (כלוריד וסולפאט) נבדקו בשיטות סטנדרטיות (ספקטרופוטומטר וכלורידומטר, בהתאמה).

התוצרת החקלאית, צמחי מלון, פירות ועלוה, נאספו XX ימים לאחר השתילה. התוצרת מכל ליזימטר בנפרד הופרדה לפירות ועלוה.



תמונה 2: מקדח הקרקע ודוגמת הקרקע שנדגמה באמצעותו.

2.4 מדידות רדיואקטיביות

שיטת המדידה וכימות ריכוז הרדיום בדוגמאות מתבססת על ספקטרומטרית קרינת גאמא הנפלטת הן מרדיואיזוטופי הרדיום (^{226}Ra , ^{228}Ra ו- ^{224}Ra) והן מתוצרי הדעיכה שלהם הנמצאים בשווי משקל סקולרי עימם. מדידת ריכוז ה- ^{226}Ra בדוגמאות הנוזליות בוצעה בשיטת ספיחת הרדיום בסיבי MnO_2 ומניית האקטיביות בסיבים בספקטרומטרית קרינת גאמא (חקין ושו"ת, 2005).

דוגמאות הקרקע הוכנו למדידה על-ידי יבוש, הומוגניזציה, סינון בנפה לחלקיקים בגודל 1 מ"מ ואיטום הדוגמא במיכל מדידה סטנדרטי למשך שלשה שבועות לפחות על מנת לקבל שווי משקל סקולרי בין הראדון ובנותיו הפולטות קרינת גאמא. דוגמאות התוצרת החקלאית (עלים ופירות) במשקל של עד כ- 2 ק"ג יובשו בתנור ונשרפו עד אפר בטמפרטורה של 450°C . האפר נאטם במיכל מדידה סטנדרטי למשך 3 שבועות.

מהימנות שיטת ספקטרומטרית גאמא נבחנה בתרגילי השוואה בינלאומיים ודווחה בעבר [חקין ושו"ת 2004].

2.5 מודל לתיאור תנועת רדיום בקרקע

לתיאור וחיזוי תנועת הרדיום בקרקע בה גדלים צמחים, המושקית במים המכילים רדיום, נבחרה חבילת התוכנה HYDRUS- 1D (Simunek et al., 1998). תוכנה זו מבוססת על מודל נומרי המתאר תנועה סימולטנית של מים ויונים בתווך נקבובי. כמו כן, מאפשרת תוכנה זו לבצע סימולציות של ריאקציות שטח פנים של מוצקים, לדוגמה, ספיחה של יונים על פני הפאזה המוצקה.

משוואה 2 הינה משוואת ההסעה (transport) של נוזל בתווך נקבובי בה משתמשת התוכנה HYDRUS- 1D לתיאור שטפי מים בקרקע. משוואה זו מתבססת על משוואת Richards (1931), החד-מימדית, המאגדת את עקרון שימור המאסה ושימור האנרגיה:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - A(z, t, T_p) \quad [2]$$

כאשר:

θ הינה תכולת הרטיבות הנפחית, t הוא הזמן, z הוא המרחק על פני הציר האנכי, $K(h)$ היא המוליכות ההידראולית $([L \cdot T^{-1}])$, h הפוטנציאל המטריצי ו- A הוא איבר הקליטה של מים אל הצמח $([L \cdot T^{-1}])$ ו- T_p הינה הדיות הפוטנציאלית $([L])$.

משוואה 1 נפתרת בליווי תנאי התחלה הבאים:

$(h(z, 0))$, התנאי בשפה התחתונה ($z=L$) ותנאי השטף בשפה עליונה ($z=0$):

$$\begin{aligned}
 h(z, 0) &= \text{const} & \text{at } 0 \leq z \leq L \\
 \left. \begin{aligned}
 \left| K \frac{\partial h}{\partial z} - K \right| &\leq E & \text{at } z = 0 \\
 \frac{\partial h}{\partial z} &= 0 & \text{at } z = L
 \end{aligned} \right\} & \text{at } t > 0
 \end{aligned} \quad [3]$$

תנאי ההתחלה היה פירוס אחיד של הפוטנציאל המטריצי: 40 cm-. תנאי הגבול העליון גורס כי השטף אינו יכול להיות גדול מ- E שהינו השטף המכסימלי של אוופוטרכנספירציה או השקיה. תנאי הגבול התחתון מניח גרדיינט יחידה, כלומר, שטף המים העוזב את הפרופיל הנבחן שווה למוליכות ההידראולית באותו עומק.

המשוואה החד- מימדית לתיאור התנועה התפלגות ריכוז הרדיום בתמיסת הקרקע (יכונה במשוואה זו בלעדית C), ניתנת להלן:

$$\theta \cdot R \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\theta \cdot D \left(\frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial qC}{\partial z} \quad [4]$$

כאשר:

D הינו מקדם הדיספרסיה של הקרקע ($[L^2 \cdot T^{-1}]$), q הינו שטף המים בקרקע ($[L \cdot T^{-1}]$). R הינו מקדם העיכוב (Retardation factor) המושפע מתכולת הרטיבות ומאיזותרמת הספיחה המבטאת את הקשר בין ריכוז היון בתמיסה (C) ($[mol \cdot L^{-3}]$) ובין הכמות הספוחה (S) ($[mol \cdot M^{-3}]$), R נתון על ידי משוואה 5:

$$R = \frac{\rho_b \cdot K_d \cdot C}{\theta} \quad [5]$$

כאשר ρ_b הינו הצפיפות הגושית של הקרקע ($[M^3 \cdot L^{-3}]$). ממשוואה 5 משתמע שהקשר בין C ל- R הינו ליניארי המתחיל מראשית הצירים ובעל שיפוע K_d שהינו קבוע החלוקה ($[L^3 \cdot M^{-3}]$). נציין כי סילוק הרדיום עקב דעיכה רדיואקטיבית שלו הוזנחה בשל מחצית החיים הארוכה מאד שלו (1600 שנה). פתרון משוואה 4 מחייב הגדרת תנאי התחלה ותנאי שפה באותו אופן כפי שהוגדרו עבור משוואה 2:

$$\left. \begin{aligned}
 C(z, 0) &= 0 & \text{at } 0 \leq z \leq L \\
 -\theta \cdot D \frac{\partial C}{\partial z} + q \cdot C &= q_0 \cdot C_0 & \text{at } z = 0 \\
 \theta \cdot D \frac{\partial C}{\partial z} &= 0 & \text{at } z = L
 \end{aligned} \right\} \text{at } t > 0 \quad [6]$$

טבלה 2 מסכמת את הפרמטרים המכאניים והפיזיקאליים עבור הקרקע המקומית עליה גדלו צמחי המלון. כמו כן, בטבלה מצוינים ערכי קבוע הדיספרסיה האורכית (λ) וקבוע החלוקה, בהם נעשה שימוש בסימולציה.

הרצת המודל כללה הניחה גידול אביבי, למשך 60 יום, בהשקיה יומית בשיעור של 13 מ"מ ליום (130% משיעור ההתאדות הפוטנציאלית- 10 מ"מ ליום). בוצעו שתי סימולציות, האחת עם ריכוז של פי 100 ממי שיזפון ($160 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$). והשניה עם ריכוז רדיום זהה ללא נוכחות צמחים ($T=0$). חישוב פקטור המעבר מאקטיביות ביחידות של Bq ליחידות של ריכוז מולרי (M) בוצע לפי משוואה 7:

$$[M] = \frac{[Bq \cdot \text{l}^{-1}]}{\ln(2)/t_{1/2}} \cdot A \quad [7]$$

כאשר $t_{1/2}$ הינו זמן מחצית החיים של ^{226}Ra (בשניות) ו- A הינו מספר אבוגדרו ($6.02 \cdot 10^{23}$ אטומים במול).

תכונה		ערך	יחידות	מקור
הרכב מכאני (%)	חול	83		Shani et al. (1992)
	סילט	8		
	חרסית	9		
חומר אורגני (%)		1.3		
תכולת רטיבות נפחית ברוויה		0.36		
תכולת רטיבות נפחית שאריתית		0.03		
מוליכות הידראולית ברוויה (Ks)		360	$\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$	
קבועי משוואות 4,5	λ	100	cm	
	K_d	0.36	$\text{cm}^3 \cdot \text{Kg}^{-1}$	

טבלה מס' 2: הפרמטרים המכאניים והפיזיקאליים עבור הקרקע המקומית עליה גדלו צמחי המלון.

3. תוצאות

3.1 דגימה

קטיף הליזימטרים בוצע בתחילת חודש יולי לאחר 42 ימי גידול. נדגמו עלים ופירות, וכן פרופיל הקרקע בארבע שכבות בעלות 15 ס"מ עובי כל אחת לצורך בדיקות הצטברות. בנוסף, נדגמה פרופיל ביקורת משולי האזור הרואי של בצל הטפטפת בליזימטר מייצג אחד.

3.2 מדידות רדיואקטיביות

תוצאות מדידות הרדיואקטיביות של התוצרת החקלאית מובאות בטבלה מס' 3 ו- 4 (פירות ועלים), וטבלה מס' 5 (דגימות הקרקע). איור 4 מציג בצורה גרפית את השתנות ריכוז הרדיונוקלידים בפרופיל הקרקע. תוצאות התוצרת מבוטאות ביחידות של בקרל/ק"ג תוצרת, בדיקות הקרקע ביחידות בקרל/ק"ג על בסיס חומר יבש.

טבלה מס' 3: ריכוז רדיונוקלידים טבעיים בעלי מלון [Bq/kg].

^{226}Ra	מס' ליזימטר	מס' מעבדה
65.89±2.47	3	SF3704
0.80±0.08	4	SF3851
0.87±0.07	5	SF3951
0.91±0.08	6	SF3977

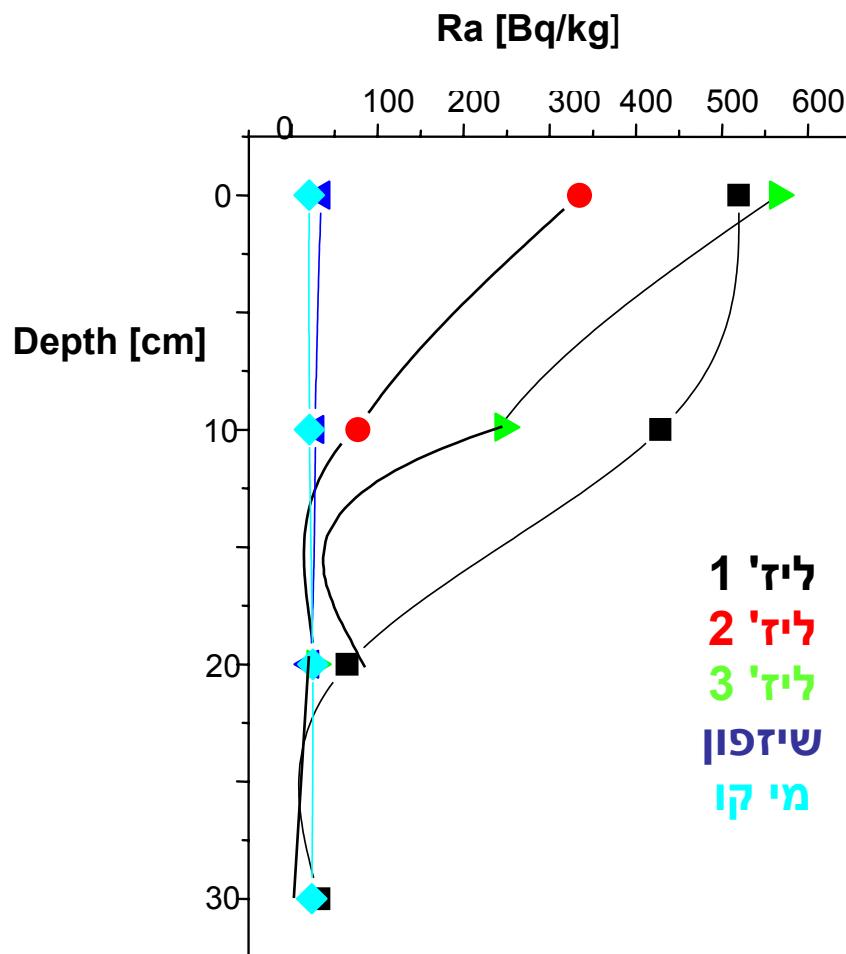
טבלה מס' 4: ריכוז רדיונוקלידים טבעיים במלון (פירות) [Bq/kg].

^{226}Ra	מס' ליזימטר	מס' מעבדה
2.56±0.09	3	SF3773
<0.33	4	SF3774
<0.15	5	SF3778
<0.13	6	SF3775
<0.12	7	SF3809
<0.3	8	SF3810
<0.17	9	SF3852

טבלה מס' 5: ריכוז רדיונוקלידים בקרקע ביחידות Bq/kg יבש.

מס' ליזימטר	מ"ס 0-10	מ"ס 10-20	מ"ס 20-35	מ"ס 35-50
1	518.62±11.28	427.61±9.49	64.34±2.14	31.51±1.64
2	333.68±7.98	76.15±2.71		
3	564.39±13.29	71.63±2.77	26.81±1.74	
5	34.01±2.99	27.11±1.23	21.46±1.92	
8	19.7±0.94	20.27±1.09	24.12±1.97	22.98±1.1
בקרה ליז' 3	36.94±1.87	55.32±2.47		25.98±2.39

דוגמאות רקע של הקרקע הן דוגמאות שלא הושקו במי השקיית הגידולים החקלאיים ולכן לא צפויה תוספת לריכוז הרדיום הקיים בקרקע.



איור 4: ריכוז רדיונוקלידים בקרקע בניסוי מלונים [Bq/kg].

בנוסף נדגמה חלקה ניסויית בקיבוץ נאות סמדר בה נשתלו שתילי תירס ועגבניות. הגידולים הושקו באפון סדיר ואולם עקב פגעי מזג-אוויר התיבשו השתילים והיבול אף נקטף טרם זמנו. תוצאות בדיקת הפירות והקרקע מובאות בטבלאות 6 ו-7 בהתאמה.

טבלה מס' 6: ריכוז רדיונוקלידים טבעיים בתוצרת חקלאית בנאות סמדר [Bq/kg].

^{226}Ra	גידול
<0.12	תירס
<0.17	עגבניות שרי

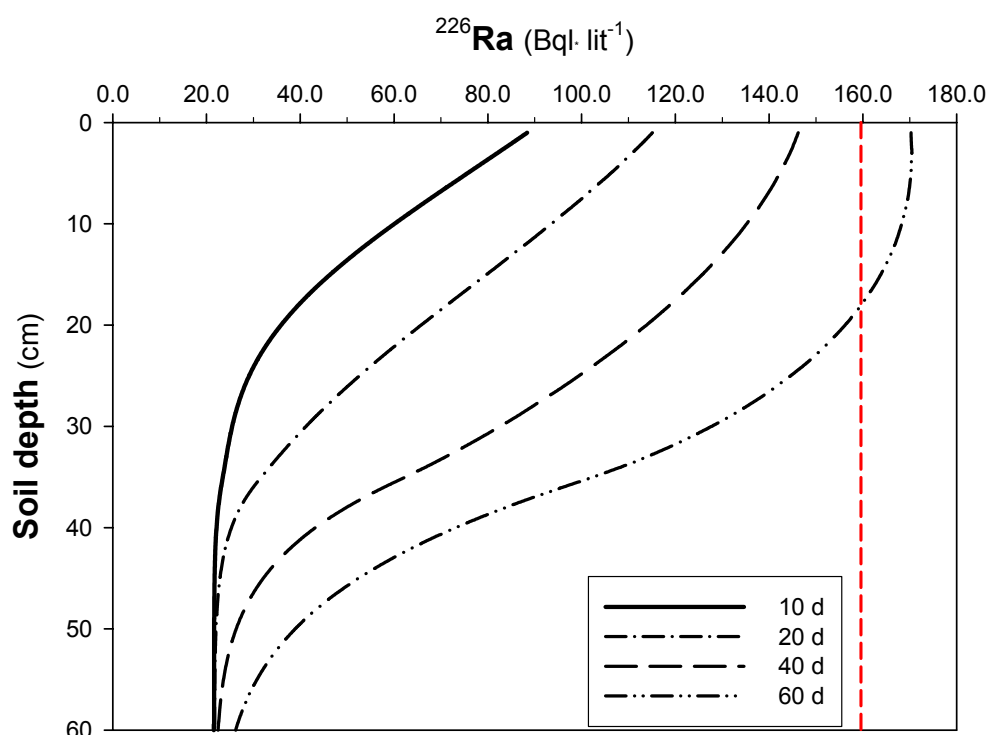
טבלה מס' 7: ריכוז רדיונוקלידים בקרקע בחלקה ניסויית בקיבוץ נאות סמדר ביחידות Bq/kg

יבש.

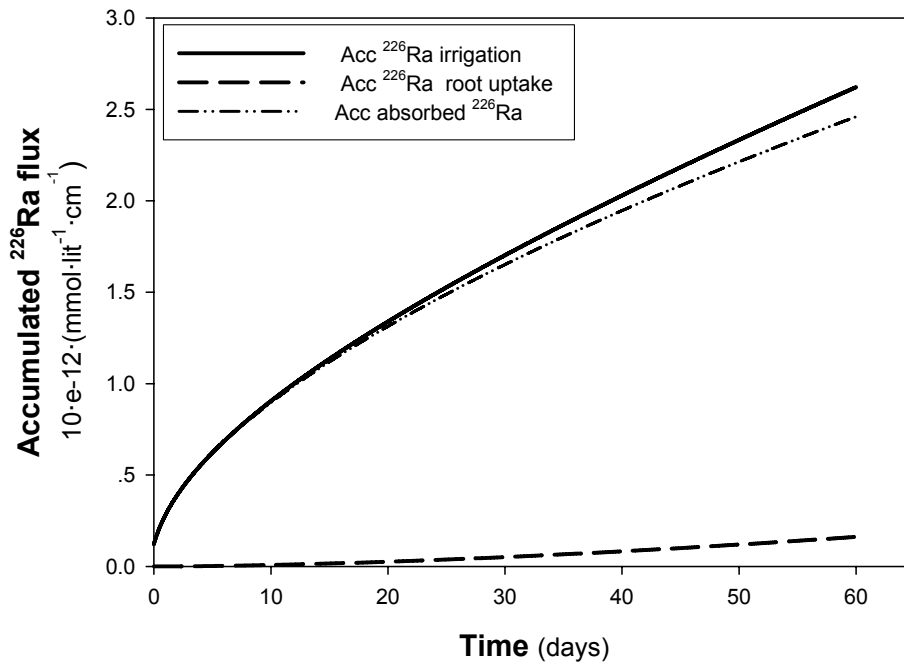
^{226}Ra	מס' מעבדה	
43.66 ± 1.80	S3909	עם השקיה
43.846 ± 1.58	S3910	רקע

3.2 תוצאות מודל נומרי

איור 5 מציג את פרופיל ריכוז הרדיום בתמיסת הקרקע המושקת במים מועשרי רדיום, בזמנים מצטברים שונים. מאיור זה נראה כי בדומה לתוצאות שהתקבלו בניסוי המלונים (איור 4), הרדיום מצטבר בשכבת הקרקע העליונה (0 - 20 ס"מ) וכי בעומק (< 20 ס"מ) ריכוז הרדיום שווה לריכוז הרקע. הספיחה של הרדיום המגיע ממי ההשקיה גורמת לריכוז מכסימלי בתמיסת הקרקע שאינו גבוה באופן ניכר מריכוז הרדיום במי ההשקיה. יתכן כי המצאות שורשים הקולטים מים לצמח גורמת להתרכזות הארעית של הרדיום בתמיסת הקרקע וכתוצאה מכך לספיחה מואצת לחלקיקי הקרקע. באיור 6 מוצגים השטפים המצטברים של הרדיום במערכת. נראה שהשטפים הדומיננטים הם שטף הרדיום המגיע עם מי ההשקיה והשטף אל הפאזה הסופחת. שטפים אלו גבוהים בכסדר גודל מהשטף אל הצמח. הרדיום היוצא דרך מי הנקז אינו מוצג היות ומכפלת ריכוז הרדיום בעומק בשטף מי הנקז נמוך בכשני סדרי גודל משטף הרדיום לקרקע ממי ההשקיה ומהשטף אל הפאזה הסופחת.



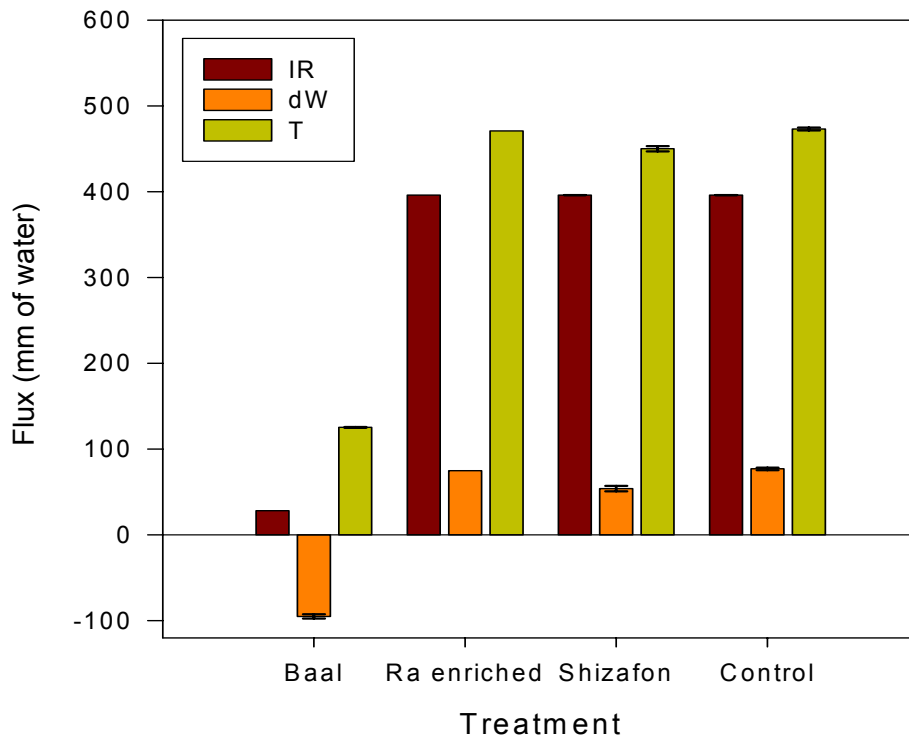
איור 5: ריכוז הרדיום בפרופיל הקרקע. כל תו מורה על זמן שונה. הקו האדום האנכי מסמל את ריכוז הרדיום במי ההשקיה.



איור 6: שטפי הרדיום בקרקע. הקו הרציף, המקווקו והמנוקד מסמלים את שטפי הרדיום בהשקיה, שטף הקליטה לצמח והשטף לפאזה המוצקה, בהתאמה.

3.2.1 מאזני מים

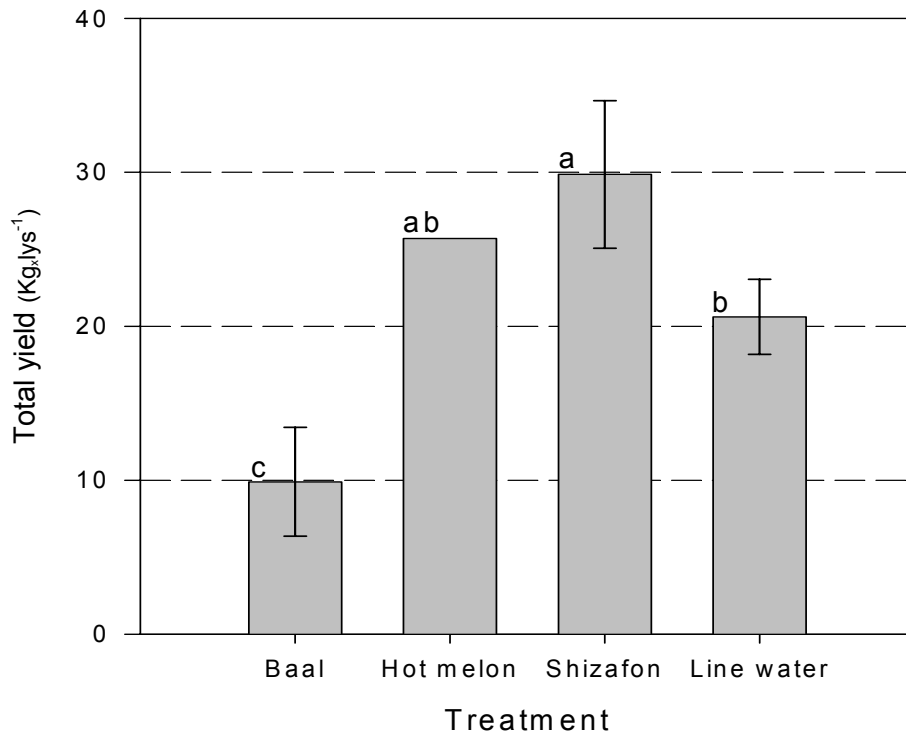
חישוב מאזן המים לכל תקופת הניסוי על פי משוואה 1 מוצג באיור 7. ניתן לראות מאיור זה ששיעורי ההשקיה, האופוטורנספירציה והשינוי במשקל דומים בטיפול הביקורת, מי שיזפון והמים שהועשרו ברדיום. האופוטורנספירציה הממוצעת המצטברת הייתה 460 מ"מ לליזימטר, כלומר 33 מ"מ לצמח. שיעור הנקז היה כ- 30% משיעור ההשקיה. גירעון המים בניסוי ($del W$) היה חיובי ועמד על 8% מכמות ההשקיה. כמות ההשקיה שנתנה לטיפול הבעל הייתה קטנה ולכן מקור המים הנוסף ממנו קלטו הצמחים מים היה מאוגר הקרקע ($del W$). הקליטה מאוגר המים בקרקע גרמה לגרעון של 90 מ"מ מים מהפרופיל.



איור 7: פירוט מאזן מים לכל טיפול הכולל נפחי ההשקיה (IR), אופוטנספירציה (T) והשינוי באוגר המים בליזימטר (dW).

3.2.2. יבול

גרף היבול הכולל (ביומאסה ופרי) בטיפולים השונים מוצג באיור 8. היבול הנמוך ביותר התקבל בטיפול הבעל בו הושקו הצמחים במים מועשרים ברדיום עד לשבועיים מיום השתילה ובהמשך הם גדלו ללא השקיה. מכאן נובע כי הסיבה ליבול הנמוך היא מעקת מים בה נמצאו הצמחים. מאיור זה נראה כי בטיפול עם מי שיזפון התקבל היבול הגבוה ביותר, בהשוואה לטיפול הביקורת ולטיפול שהכיל מים מועשרים ברדיום. אולם אין אנו משייכים את הסיבה לכך לריכוז הרדיום. נשללה האפשרות להשפעה של מליחות המים במקורות השונים, היות ומדידות מוליכות חשמלית שבוצעו מידי שבוע הראו ערכי מליחות חשמלית דומה ($2.9 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$).



איור 8: יבול הפרי בטיפולים השונים. אותיות לועזיות שונות מצביעות על הבדל ברמת מובהקות של 95% במבחן Least significant difference (LSD).

4. ניתוח תוצאות

4.1 ניסוי ליזימטרים

4.2.1 מאזן מים

חישוב מאזן המים לכל תקופת הניסוי על פי משוואה 1 מוצג באיור 7. ניתן לראות מאיור זה ששיעורי ההשקיה, האופוטורנספירציה והשינוי במשקל בשלושה טיפולים דומים, אך משתנים עבור גידול הבעל. האופוטורנספירציה הממוצעת המצטברת הייתה 470 מ"מ לליזימטר, בעוד בגידול הבעל היתה האופוטורנספירציה 130 מ"מ. שיעור הנקז היה כ- 30% משיעור ההשקיה. גירעון המים בניסוי (del W) היה חיובי, אך ערכו היה זניח ועמד על 8% מכמות ההשקיה.

4.2.2 רדיואקטיביות בתוצרת חקלאית

בדומה לניסוי הראשון בצמחי המלפפון גם בניסוי זה התוצאות מצביעות על כך שהרדיום מتركז בעיקר בעלים. בעלים של הצמחים שהושקו בתמיסה המסומנת התקבל ריכוז רדיום גבוה פי 80 מאשר בעלים של הצמחים שהושקו במי שיזפון (66 Bq/l לעומת 0.85 Bq/l) וזאת בהתאמה טובה להבדל בריכוז הרדיום בין שני מקורות מי ההשקיה. הצטברות הרדיום היא בעיקר בעלים ופחות בפרי (66 Bq/l)

לעומת 2.6 Bq/l בניסוי השקיה במים מסומנים רדיואקטיבית ו- 0.85 Bq/l לעומת ערכים המתחת לגבול הגילוי בפרי בניסוי בהשקיה במי שיזפון). נראה שגם בצמחי המלון קיימת טרנסלוקציה מועטה של רדיום בין העלים לפרי בדומה לתוצאות שהתקבלו בצמחי המלפפון בניסוי הראשון.

4.2.3 השפעות בריאותיות של צריכת התוצרת החקלאית

ריכוז הרדיום בפרי המלון נמצא מתחת לסף הגילוי של מערכת המדידה במקרה של ליזימטרים שהושקו במי שיזפון ובמי קו ולכן המנה הצפויה זניחה. לעומת זאת ריכוז הרדיום בעלים גבוה יותר עבור הצמחים שהושקו במים מסומנים אך עבור צמחי המלון שהושקו במי שיזפון ובמי קו הריכוז זניח.

4.2.4 הצטברות רדיואקטיביות בקרקע

מדוגמאות פרופילי הקרקע רואים כי בניסוי זה בדומה לניסוי בצמחי המלפפון ריכוז הרדיואקטיביות עשוי להשתנות בטווח רחב בין פני השטח לעומק. הריכוז בליזימטרים שהושקו במים מסומנים (ליז' 1-3) (איור 3) גבוה בפני השטח (0-20 ס"מ) לעומת הרקע הקיים בקרקע. מתוך תוצאות האנליזות ובהתחשב בפרופיל הבקרה שנילקח רחוק יותר מחור הטפטפת ניתן ללמוד כי עיקר האקטיביות בליזימטרים שהושקו במים מסומנים ברדיום מתרכזת באזור הרדיואקטיביות של הטפטפת, אזור ה"שלולית" של הטפטפת, האזור הקרוב לצמח. תוצאות האנליזה של מי הנקז מצביעות על כך שמי הנקז אינם מכילים רדיום (מעל לגבול הגילוי של המדידה), מה שמאשש את הסברה שהקרקע סופחת את הרדיום שאינו מוצא דרכו אל הצמח. עיקר הרדיום (מעל 95%) נספח בפני השטח (0-20 ס"מ עליונים) של הקרקע. כמות זניחה בלבד מסך כל הרדיום מצאה דרכה אל הצמח- לעלים ולפרי.

4.1 בדיקת גידולי שדה בחלקה ניסויית בנאות סמדר

בדיקות התוצרת החקלאית מראות כי בעגבניות ובקלחי תירס לא נמדדו ריכוזי רדיום מעל לגבול הגילוי של מערכת המדידה, בדומה למדידות שבוצעו עבור המשרד לאיכות הסביבה במרכז ובצפון הארץ (לביא, 2005).

4.1.2 השפעות בריאותיות של צריכת התוצרת החקלאית

ברב התוצרת החקלאית שנבדקה ריכוז הרדיום נמוך מגבול הגילוי של המערכת ולכן מנת הקרינה הצפויה מצריכת המוצרים זניחה.

4.1.3 הצטברות רדיואקטיביות בקרקע

בבדיקות הקרקע שבוצעה בנאות סמדר בחלקה הניסויית נמצא, כצפוי וכפי שהתקבל בליזימטרים 4 עד 6, כי הרדיואקטיביות במצע הגידול דומה לרדיואקטיביות הטבעית בקרקע המקומית (טבלה 7).

5. מסקנות והמלצות

בעבודה זו נעשה ניסיון לבחון תהליכי מעבר של רדיום ממי השקיה אל גידול חקלאי נבחר, צמח המלון. העבודה הנוכחית נעשתה בעקבות הדו"ח הראשון בעקבותיו המלצנו לבדוק עודף הצטברות רדיום בעלווה לעומת הפרי בצמחי עלווה ושורש נוספים כגון חסה, פטרוזיליה, בצל, כרוביים, ארטישוק וצמחי תבלין. המלון הוא גידול שנמנה על סל הגידולים האופייני לאזור הערבה ומתאפיין בגידול מהיר. ניסוי איזותרמת ספיחה בוצע לקרקע המילוי בליזימטרים. תוצאות ניסוי זה מאפשרות הפעלת מודל נומרי לתיאור וחיזוי תנועת רדיום בקרקע עליה גדלים צמחים המושקית במים המכילים רדיום. כיוול והפעלה ראשונית של המודל על תקופת זמן של 60 יום (מחזור גידול אחד)

בהמשך המחקר נרצה לבדוק את ההשפעה המצטברת של ריכוז הרדיום בתמיסת הקרקע על ידי השקיה במי שיזפון באותו ליזימטר שהושקה קודם במים עם ריכוז רדיום גבוה. במצב זה הצמח "יראה" קרקע אקוויולנטית לקרקע שהושקתה בריכוז של מי שיזפון במשך שנים רבות. בנוסף לכך, יוצג מודל נומרי לתיאור זרימת מים, תהליכי הסעה וספיחה של רדיום וקליטה שלו על ידי הצמח לתקופות ארוכות של שנים, ובכך יאפשר תחזית לגבי תוצאות ההשקיה במים עשירי הרדיום על ההצטברות בקרקע לאורך שנים.

6. ביבליוגרפיה

Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids in porous media. *Physics*, 1, 318-333

Šimůnek, J., Šejna, M. and Van Genuchten, M.T., 1998. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media: version 2.0. IGWMC-TPS-70. International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden.

Shani, U., L. M., Dudley, and R. J., Hanks. 1992. Model of boron movement in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 56:1365-1370.

. ICRP,2000, Protection of the Public in Situations of Prolonged Radiation Exposure. ICRP Publication 82, Pergamon Press, Oxford.

תקנות משרד הבריאות, ורסנו, ר. וינג, ג'. קווים מנחים לרמות מקובלות של רדיונוקלידים במזון במצב רגיעה לטווח ארוך. חוזר מיום 21 לפברואר, 2005.

חקין, ג., פרי, נ., אלחנני, ש., קור, ז', ברושי, ל., יונגרייס, ז., גזית-יערי, נ., רימר, ט., פנקרטוב, א., חקין, ג., יונגרייס ז. וברושי ל. מבחן השוואתי QAP0403 לשנת 2004, דו"ח ב"ק 05, 2004.

גזית-יערי נ., חקין ג., קורן ז', קניון נ. ויונגרייס ז., השפעת ריכוזים גבוהים של רדיום במי השקייה על תוצרת חקלאית, דו"ח ב"ק 23, 2005.