

המרכז למחקר גרעיני נחל שורק
שטח בטיחות קרינה
תחום מדידות קרינה

בדיקות קרינה רדיואקטיבית בבלוקים אופייניים בישראל

ממצאי מדידות קצב פליטת רדון וריכוז רדיונוקלידים
בבלוק "אפור" ישראלי.

גוסטבו חקין, טל רימר, מנחם מרגליות ויאיר שמאי.

בדק ואישר: יאיר שמאי

תמוז תש"ס

יולי 2000

הוכן עפ"י הזמנת מנהלת אפר הפחם

תקציר

בעבודה זו נמדדו ריכוזי הרדיונוקלידים הטבעיים בבלוקים ישראלים שכיחים, וכן קצב פליטת הרדון מהם.

הערכים שנמצאו דומים לערכים שנמדדו במקומות אחרים בעולם על בלוקים ישראלים ואירופאים. ערכים אלה שימשו להערכת חשיפה האדם לקרינה עקב שהות רצופה בחדר בנוי מבלוקים אופייניים אלה בלבד ונמצא כי החשיפה השנתית מגורם זה במגורים היא כ- 0.05mSv .

1. מבוא:

בשנים האחרונות קיים עניין רב במדינת ישראל במקורות חשיפה מתמשכת לקרינה רדיואקטיבית במנות נמוכות כמו חשיפה לגז רדון ולקרינה מחומרי בנייה. חומרי בנייה עשויים לרוב מחומרי גלם טבעיים אשר מכילים ריכוזים שונים של חומרים רדיואקטיביים משרשרת הרדיום 226 (^{226}Ra), התוריום 232 (^{232}Th) ואשלגן 40 (^{40}K). גז רדון 222 (^{222}Rn) הוא תוצר בשרשרת של הרדיום 226 והיותו גז מאפשרת לו לחלחל מחומרי הבנייה לתוך החדר וכך להעלות את ריכוזו.

רדיונוקלידים טבעיים אלה הם פולטי קרינות α , β ו- γ אשר גורמות לחשיפה בשתי דרכים עיקריות: פנימית (בעיקר ע"י גז רדון ובנותיו) וחיצונית ע"י קרינת הגאמא.

הבקשות לאישור שימוש בחומרי גלם בעלי תכולת רדיונוקלידים טבעיים גבוהה יחסית של רדיונוקלידים אלה, ובמיוחד אפר פחם ופומיס, הביאו את הוועדה המייעצת בנושא אפר פחם של המשרד לאיכות הסביבה, לקבוע קריטריונים לאישור שימוש של חומרי ומוצרי בנייה. קריטריונים אלה מתבססים על חשיפת הציבור למנה אקוויולנטית שנתית מוגדרת, תוך הגדרת השימוש בחומרי גלם בעלי תכולת רדיונוקלידים טבעיים מוגברת, כ"עיסוק" (practice), לפי הכללים של תקן הבטיחות BSS 115 של הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה אטומית. הגדרתו כעיסוק מחייבת הצדקת השימוש (justification), אופטימיזציה (optimization) וקביעת מנה גבולית (dose constraint). הוצע על כן לקבוע מנה גבולית אשר תחושב כתוספת למנת הרקע הקיימת ממוצרי בנייה אופייניים בישראל. לשם כך יש להכין מידע על החשיפה בפועל ממוצרי הבנייה הנמצאים בשימוש שוטף.

מטרת עבודה זו היא לקבוע את המנה השנתית הנגרמת ע"י חומרי ומוצרי בנייה קיימים ע"י מדידת תכולת הרדיונוקלידים וקצב פליטת הרדון (exhalation rate) מהבלוקים. עבודה ראשונית על תכולת רדיונוקלידים בחומרי בנייה פורסמה ב-1999⁽¹⁾.

בהמשך מתוארות מדידות של קצב פליטת הרדון וריכוז רדיונוקלידים בבלוקים "אפורים".

2. שיטות מדידה:

מדידות קצב פליטת הרדון ותכולת רדיונוקלידים מבלוקים "אפורים" אופייניים אשר סופקו ע"י מנהלת אפר הפחם בוצעו במעבדות שטח בטיחות קרינה בממ"ג. בלוקים אלה מקורם במספר מפעלי בלוקים הפרוסים ברחבי המדינה על כן מקור חומרי הגלם ושיטות הייצור שונות בין הבלוקים השונים. הובאו למעבדה חמשה עשר בלוקים "אפורים" בגודל של 20 x 20 x 40 ס"מ בקירוב ובמשקלים שונים אשר סומנו ע"י הלקוח וזהותם אינה ידוע למעבדה. הבלוקים הושארו להתייבשות במשך חודש לאחר ייצורם, ע"פ המלצתו של דר' ק. קובלר מהטכניון.

להלן תיאור שיטות המדידה:

2.1 מדידות קצב פליטת רדון: המדידה מבוססת על גישתו של Chao⁽²⁾ הגורסת מדידת פליטת הרדון ממוצר הבנייה, אך במצב של שווי משקל, תוך התחשבות באותן פיאות הרלוונטיות לקיר הבניה ולא לבלוק הבודד.

קצב פליטת הרדון (אקסהלציה) הוא מספר אטומי הרדון (ביחידות של בקרל) ליחידת שטח ליחידת זמן הנפלטים מהבלוק.

$$E = \frac{\lambda \cdot N}{S} \quad (1)$$

כאשר S הוא שטח האקסהלציה ו- N מספר אטומי הרדון הנפלטים בשנייה. שטח האקסהלציה הוא שטח הפיאות הקדמית והאחורית של הבלוק היות ואלה היחידות היכולות לפלוט רדון אל מחוץ לבלוק כאשר הוא במקומו בקיר, שכן פיאות הבלוק הבאות במגע עם בלוק אחר בקיר, פולטות וקולטות מספר שווה של אטומי רדון משיקולי סימטריה. במדידת קצב האקסהלציה במעבדה, גז הרדון, יברח דרך צדדים לא רלוונטיים בקיר. על כן במערכת מדידה מעבדתית נאטמו ארבע הפאות הצדדיות בחומר פלסטי אוטם ונצבעו בצבע אקרילי על מנת לדמות, עד כמה שניתן, את מצב הבלוק בקיר. הפיאות החשופות שמהן בעיקר נפלט הרדון הן כאמור הקדמית והאחורית.

מערכת המדידה כוללת בלוק בודד הארוז במיכל דומה לו בנפחו, עם מארז פחם פעיל (activated charcoal canister) בתוך המיכל. המערכת מושארת למשך 21 יום להשגת שווי משקל. הנפח הכלוא במיכל קטן מאד יחסית ל- 50 ליטר הנפח האפקטיבי של מארז הפחם הפעיל. על כן כל גז הרדון שבנפח נמצא בתוך המארז. במצב שווי משקל קצב כניסת אטומי רדון למארז הפחם שווה לקצב ההסתלקות – שהיא הדעיכה הרדיואקטיבית.

$$Rn_{in} = Rn_{out} \quad (2)$$

כאשר Rn_{in} הוא האקסהלציה, ו- Rn_{out} מורכב מדעיכה רדיואקטיבית, בגלל היות המערכת אטומה ואין דליפת רדון מחוץ למערכת. אז

$$Rn_{out} = A_{Rn} \quad (3)$$

A_{Rn} היא האקטיביות נטו (לא הריכוז) מתוקנת לזמן החשיפה במארז הפחם הפעיל ביחידות בקרל.

$$A_{Rn} = \frac{(A_{tot} - A_{bg})}{e^{-\lambda t_w}} \quad (4)$$

כאשר A_{tot} היא האקטיביות הכללית שנמדדה במארז הפחם, A_{bg} היא אקטיביות רקע של המארז ו- t_w זמן המתנה מסוף ספיגת הרדון במארז עד למנייתו.

$$E = \frac{\lambda \cdot A_{Rn}}{S} \quad \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^2 \text{ sec}} \right] \quad (5)$$

כאמור שטח האקסהלציה S הוא שטח הפיאות הקדמית והאחורית של הבלוק, שהן היחידות היכולות לתרום לריכוז הרדון בחדר מגורים.

מארז פחם פעיל הכולל 27 גרם פחם פעיל (המסוגלים לשאוב כ- 54 ליטר אויר) הונח על הבלוק אך לא כלפיו על מנת למנוע "יניקה" מאולצת של הרדון מתוך הבלוק וכך אולי להגביר את קצב פליטת הרדון. בתוך מערכת המדידה פוזרו בין 400 ל- 600 גרם סיליקה ג'ל על מנת ללכוד את הלחות שבמערכת ובכך למנוע שהלחות תיספג במארז פחם פעיל וכך להוריד את יעילותו. בסוף החשיפה הסיליקה ג'ל נשקל ונמדדה כמות הרדון בו.

המערכת נמצאת בלחץ אטמוספרי ובטמפרטורה השוררים במעבדה במשך המדידה האורכת 21 יום, כאמור, הזמן הדרוש להבטיח שווי משקל.

2.2. מדידת תכולת רדיונוקלידים: מדידות תכולת הרדיונוקלידים בבלוקים בוצעה לאחר ריסוק הבלוקים לגרגירים בגודל קטן מ- 2 מ"מ, יבוש הדוגמא במשך לילה בטמפרטורה של 105 מעלות בתנור מאוור (ElectroTherm), הומוגניזציה, שקילה ואטימת הדוגמא במיכל פוליאטילן גלילי של 250 מ"ל בגובה 6.5 ס"מ וקוטר 7 ס"מ למשך שלושה שבועות לקבלת שווי משקל סקולרי של ה- ^{226}Ra , ^{222}Rn ובנותיו.

מדידת תכולת הרדיונוקלידים ^{40}K , ^{226}Ra ו- ^{232}Th פולטי הגאמא נעשתה באמצעות ספקטרומטר גאמא מכויל מסוג HPGe בעל יעילות יחסית של 60% ורזולוציה אנרגטית של 1.95keV באנרגיה של 1332 keV, מחובר למגבר מודל 672 וספק מתח, כולם תוצרת חברת EG&G Ortec. הספקטרום נאגר ב- 8192 ערוצים אשר פוענחו באמצעות תוכנת אנליזה מסוג PCA III מחברת Tenelec Inc. הגלאי כויל באמצעות מקור כיוול בנפח ובצפיפות דומה לדוגמאות מבוסס על עפרת אורניום בריכוז של 330.7 mg/kg שסימונה S13 שסופקה ע"י הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה אטומית. זמן מדידה אופייני לדוגמא הוא כ- 20 שעות.

3. תוצאות:

נמדדו 15 בלוקים "אפורים" ממפעלים שונים בארץ אשר סומנו ע"י הלקוח. 12 בלוקים התקבלו בשלב ראשון וסימונם: 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, "אבן וסיד", "אחים סעידה" ו"שפרעם". 3 בלוקים התקבלו מאוחר יותר וסומנו אף הם ע"י הלקוח וסימונם: 3, 5 ו"רביד". כפי שניתן להתרשם שני בלוקים שונים סומנו כמס' 3. על כן החלפנו את הסימון של הבלוק מספר 3 שהתקבל במשלוח השני (לשם זיהוי זה בלוק שהתעכב בשל בדיקתו באוניברסיטת תל אביב) והפכנו אותו ל- 13.

3.1. מדידות קצב פליטת רדון: מדידת קצב פליטת הרדון התבצעה בשתי סדרות של מדידות, האחת על שנים עשר בלוקים במקביל והשנייה על שלשת הבלוקים הנוספים, כאשר בשתי הסדרות תהליך הספיחה ארך 21 יום. הטמפרטורה הממוצעת נשמרה במעבדה בסביבות 20 מעלות והלחות היחסית בחדר השתנתה במשך זמן החשיפה בין 20% עד 70%. כזכור, בתא בו נערכה הספיחה הלחות נמוכה, בשל סופחי הלחות בתוכו.

הונחו מעל אחת משתי הפיאות החשופות של הבלוק 3 מארזי פחם פעיל, המסוגלים לשאוב כ- 160 ליטר אוויר. לשם בדיקה שהמערכת בה מבוצעת הספיחה אינה דולפת, או שדולפת מעט, נעטפו שלוש מן המערכות בעטיפת פוליאטילן נוספת, ובין שתי העטיפות הונח מארז פחם פעיל נוסף. ממדידת גלאים אלה מתברר שהדליפה היא $1\% \pm 5\%$. על כן כל תוצאות מדידותינו תוקנו ל- 5% הפסדים אלה. כאמור בסעיף 2.1, בתוך מערכת המדידה פוזרו בין 400 ל- 600 גרם סליקה ג'ל על מנת ללכוד את הלחות שבמערכת ובכך למנוע שהלחות תיספג בפחם הפעיל וכך להוריד את יעילותו. בסוף החשיפה הסליקה ג'ל נשקל ונמדדה כמות הרדון בו. אקטיביות זו נמצאה קטנה מ- 0.8% מאקטיביות הרדון במארז פחם פעיל. ניתן לסכם שהסליקה ג'ל לא לכד רדון באופן משמעותי על חשבון הפחם הפעיל.

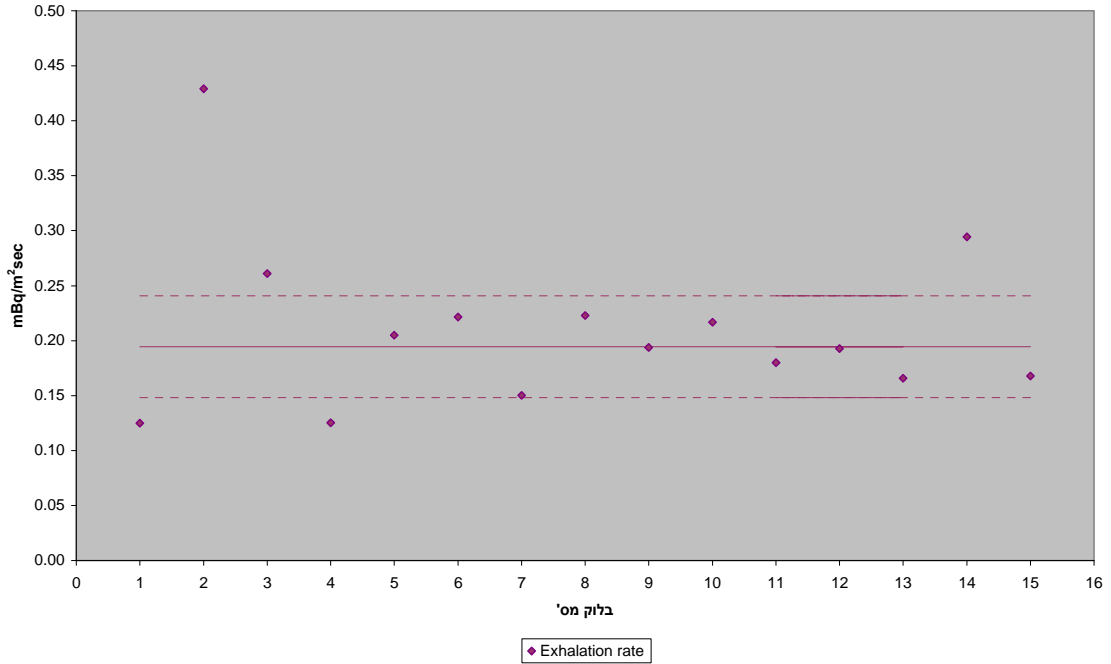
מארזי פחם פעיל נמדדו במערכת ספקטרומטריה גאמא לקביעת אקטיביות הרדון בהם ע"י מדידת האקטיביות של בנות הרדון ^{214}Bi ו- ^{214}Pb . משך מניית כל מארז פחם פעיל ערכה כחצי שעה, על פי נוהל העבודה של מעבדת המנייה.

בטבלה מס' 1 מובאות תוצאות קצב פליטת הרדון מהבלוקים השונים.

בלוק מס'	Exhalation rate (mBq/m ² sec)
1	0.12 ± 0.03
2	0.43 ± 0.10
3	0.26 ± 0.05
4	0.13 ± 0.03
5	0.21 ± 0.04
6	0.22 ± 0.04
7	0.15 ± 0.03
8	0.22 ± 0.04
9	0.19 ± 0.04
10	0.22 ± 0.06
11 (רביד)	0.18 ± 0.04
12 (אבן וסיד)	0.19 ± 0.04
13	0.17 ± 0.03
14 (אחים סעידה)	0.29 ± 0.06
15 (שפרעם)	0.17 ± 0.03

טבלה מס' 1: קצב פליטת הרדון שנמדד מהבלוקים.

מהטבלה הנ"ל ניתן לראות שקצב האקסהלציה מהבלוקים נע בין $0.12 - 0.29 \text{ mBq/m}^2\text{sec}$ למעט בלוק מס' 2 שהוא גבוה מהערך הממוצע $0.21 \pm 0.08 \text{ mBq/m}^2\text{sec}$. אם נתייחס לבלוק מס' 2 כמקרה מיוחד ונסלקו מהחישוב, אז ממוצע קצב פליטת הרדון בבלוקים "אפורים" הוא $0.19 \pm 0.05 \text{ mBq/m}^2\text{sec}$.
בציור מס' 1 מוצגות התוצאות באופן גרפי יחד עם הממוצע.



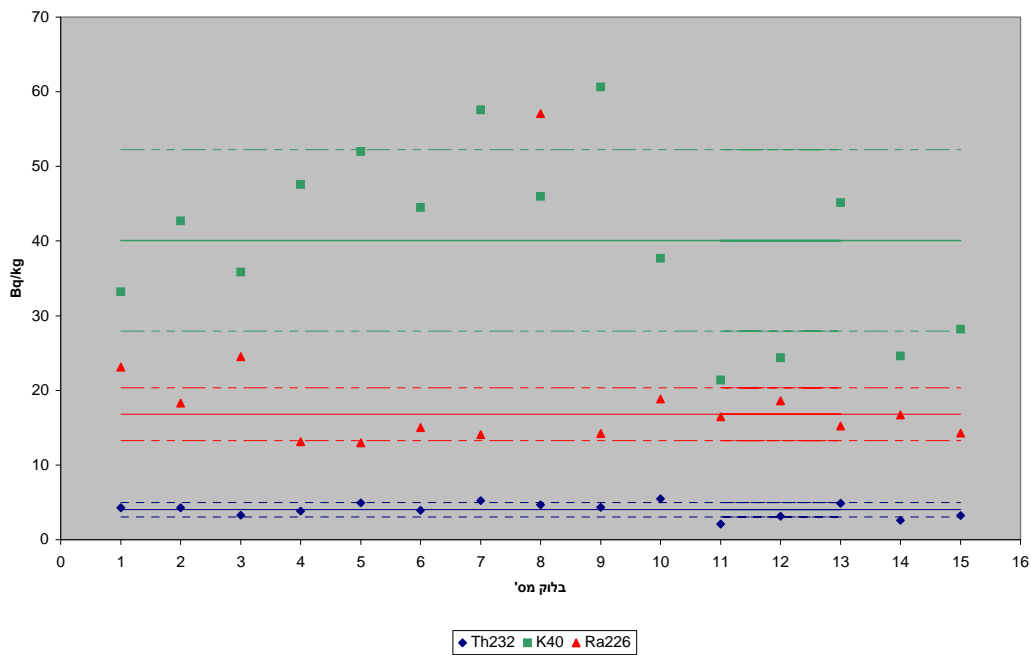
ציור מס' 1: קצב האקסהלציה מהבלוקים וערך הממוצע וסטיית התקן אחת.

3.2. מידת תכולת רדיונוקלידים: הרדיונוקלידים הטבעיים נקבעו ע"י קווי גאמא אופייניים באנרגיות שונות: ^{40}K עבור 1460.8keV , ^{226}Ra באמצעות הקווים 186.1keV , קווי ה- ^{214}Bi : 609.3keV , 1120.2keV ו- 1764.5keV ו- ^{214}Pb : 295.2keV ו- 351.9keV . ^{232}Th נקבע באמצעות קווי גאמא של ^{228}Ac : 911.2keV ו- 968.9keV , ^{212}Pb : 238.6keV ו- ^{208}Tl : 583.2keV ו- 2614.5keV . ריכוז האקטיביות נקבע ע"י ממוצע משוקלל מהאקטיביות המתקבלת מכל אחד מהקווים הנ"ל. בטבלה מס' 2 מוצגות תוצאות ריכוז רדיונוקלידים מהבלוקים השונים.

בלוק מס'	Activity concentration (Bq/kg)			Humidity
	Ra226	Th232	K40	(%)
1	23 ± 1.2	4 ± 0.3	33 ± 1.7	0.9
2	18 ± 1.0	4 ± 0.3	43 ± 2.2	2.1
3	25 ± 1.3	3 ± 0.3	36 ± 1.8	2.4
4	13 ± 0.7	4 ± 0.3	48 ± 2.5	0.9
5	13 ± 0.7	5 ± 0.4	52 ± 2.7	2.0
6	15 ± 0.8	4 ± 0.3	44 ± 2.5	1.1
7	14 ± 0.8	5 ± 0.4	58 ± 3.0	2.0
8	57 ± 3.0	5 ± 0.4	46 ± 2.4	1.1
9	14 ± 0.8	4 ± 0.3	61 ± 2.9	1.5
10	19 ± 1.0	5 ± 0.4	38 ± 2.0	1.2
11 (רביד)	16 ± 0.9	2 ± 0.3	21 ± 1.1	2.5
12 (אבן וסיד)	19 ± 1.0	3 ± 0.3	24 ± 1.3	1.5
13	15 ± 0.8	5 ± 0.4	45 ± 2.5	2.7
14 (אחים סעידה)	17 ± 0.9	3 ± 0.3	25 ± 1.3	1.7
15 (שפרעם)	14 ± 0.7	3 ± 0.3	28 ± 1.5	1.2

טבלה מס' 2: ריכוזי רדיונוקלידים הטבעיים שנמדדו בבלוקים. השגיאה המצוינת היא סטיית תקן אחת וכוללת את השגיאה במניה, הפיזור בין הקווים השונים והשגיאה בשקילה.

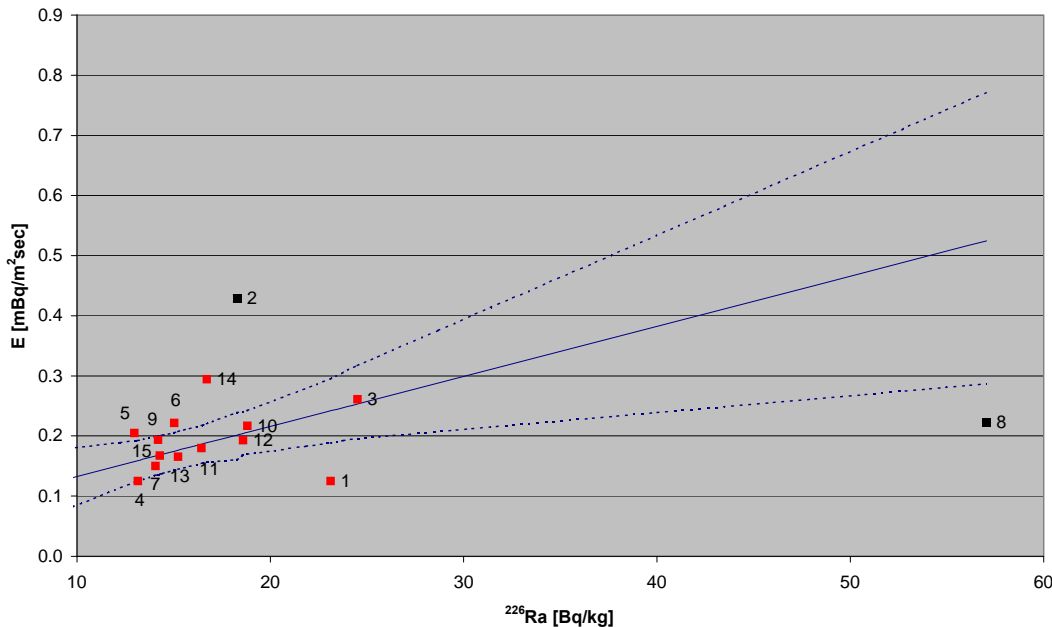
מהטבלה הנ"ל מתקבל שריכוזי הרדיונוקלידים משתנים וערכיהם נעים עבור ^{40}K בין $21 - 61 \text{ Bq/kg}$ עם ערך ממוצע של $40 \pm 12 \text{ Bq/kg}$. ריכוזי ^{226}Ra נעים בין $13 - 25 \text{ Bq/kg}$ פרט לבלוק מס' 8 שבו הריכוז גבוה פי 3 בערך ממוצע יתר הקבוצה. הממוצע עם בלוק מס' 8 הם $19 \pm 11 \text{ Bq/kg}$ ואילו ללא בלוק זה $17 \pm 4 \text{ Bq/kg}$. ריכוזי ה- ^{232}Th נעים בין $2 - 5 \text{ Bq/kg}$ עם ערך ממוצע של $4 \pm 1 \text{ Bq/kg}$. בציר מס' 2 מוצגות התוצאות באופן גרפי יחד עם הממוצעים.



ציור מס' 2: ריכוזי ה- ^{40}K , ^{226}Ra ו- ^{232}Th בבלוקים שונים וערך ממוצע וסטיית התקן.

4. ניתוח הממצאים:

4.1 תלות רדיום – קצב אקסהלציה: גז הרדון הוא תוצר התפרקות ישיר של ה- ^{226}Ra . על כן ניסינו למצוא קשר או תלות בין קצב האקסהלציה של הרדון מהבלוק לריכוז ה- ^{226}Ra . קצב פליטת הרדון מהבלוק תלוי בגורמים נוספים כמו נקבוביות פנימית של הבלוק, הרכב כימי וכו' שאנו לא נכנס אליהם. בציור מס' 3 מתואר קשר זה על ידי קו רגרסיה ליניארית בין שני המשתנים.



ציור מס' 3: קשר בין קצב האקסהלציה וריכוז הרדיום בבלוקים כולל גבולות סמך (confidence level) של 95%. בלוקים 8 ו-2 הוצאו מחיפוש אחר קשר ליניארי זה.

המשוואה המתקבלת לפי הקריטריון של ריבועים מינימליים היא:

$$E_{Rn} = 0.04948734 + 0.00832801 * C_{Ra}$$

עם מקדם קורלציה $R = 0.677$, האומר כי הקשר קיים אך הוא אינו חזק במיוחד. כלומר קיימות תכונות נוספות לבלוק המשפיעות חזק על קצב פליטת הרדון ממנו.

4.2 השפעות רדיולוגיות: קצב האקסהלציה הממוצע מבלוקים "אפורים" נמצא כ- 0.18 ± 0.07 mBq/m²sec. ערך זה דומה לקצב האקסהלציה מבלוקים מסחריים ישראלים שנמדדו ב- NGD-KVI בהולנד⁽³⁾ וערכו אף באותו סדר גודל מבלוקים אופייניים באירופה.

ריכוז הרדיונוקלידים הממוצע בבלוקים "אפורים" נמצא עבור ^{40}K 40 ± 12 Bq/kg, עבור ^{226}Ra 17 ± 4 Bq/kg ועבור ^{232}Th 4 ± 1 Bq/kg. ערכים אלה דומים ואף נמוכים מהריכוזים האופייניים במוצרי בנייה אחרים בישראל כגון בלוק פומיס, בטון, קרמיקות שונות וכו'⁽¹⁾.

נחשב כעת את החשיפה השנתית של דייר בחדר של $2.7 \times 3 \times 3$ מ', השווה בו 80% מהזמן, כאשר 30% משטח הקירות מהווה חלונות ודלתות, ללא ציפוי של טיח, קרמיקה ו/או מוצרים אחרים בקירות, בתקרה וברצפה, העומד במרכז החדר.

4.2.1 ריכוז רדון: ריכוז הרדון בחדר, ללא תרומה מרדון שמקורו בקרקע, מוגדר כרדון הנכנס בו מהקירות, הרצפה והתקרה התלוי בקצב האקסהלציה של הקירות, פחות הרדון היוצא את החדר

בתחלופות האוויר בו ובדעיכה רדיואקטיבית של הרדון. לכן שינוי ריכוז הרדון בחדר כפונקציה של הזמן הוא :

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{E \cdot S}{V} - C(t) \cdot (\lambda + \lambda_v) \quad (6)$$

כאשר $C(t)$ ריכוז רדון בחדר, E קצב האקסהלציה של הרדון, S שטח פנים של החדר, V נפח החדר, λ קבוע הדעיכה של הרדון ($2.1 \times 10^{-6} \text{ sec}$) ו- λ_v קבוע חילופי אויר [sec^{-1}]. בשווי משקל מתקיים

$$\frac{dC(t)}{dt} = 0 \quad (6.1)$$

על כן ריכוז הרדון בחדר בתנאי שווי משקל

$$C(t) = \frac{E \cdot S}{V \cdot (\lambda + \lambda_v)} \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^2 \cdot \text{sec}} \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{sec}}{\text{m}^3} \right] = \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right] \quad (7)$$

בתנאי מדינתנו מקובל כי קצב תחלופות האוויר הוא 0.5-2 תחלופות בשעה. כמספר מייצג נניח תחלופה אחת בשעה ($1/3600 \text{ sec}^{-1}$). לכן אם נציב במשוואה 7 נקבל:

$$C(t) = \frac{0.18 \text{mBq} / \text{m}^2 \cdot \text{sec} \cdot 50.4 \text{m}^2}{23.4 \text{m}^3 \cdot \left(\frac{1}{3600 \text{sec}} + 2.10 \cdot 10^{-6} \right)} = 1.3 \text{ Bq/m}^3$$

הקשר בין ריכוז הרדון בבית מגורים לחשיפה האדם הוא 0.017mSv/y לכל 1 Bq/m^3 , על כן דייר בחדר הנ"ל נחשף ל- 0.022mSv בשנה מרדון הנפלט מהבלוקים האפורים.

4.2.2. ריכוז רדיונוקלידים: ריכוז הרדיונוקלידים בחדר תורם לחשיפה החיצונית מקרינת גאמא הנפלטת מהרדיונוקלידים ^{226}Ra , ^{40}K ו- ^{232}Th ובנותיו. קרינת גאמא זו מקורה בקירות החדר עובי הקיר, צפיפות הבלוקים ושטח הפנים של החדר ישפיעו הן כמקור קרינה והן כמנחת קרינה היוצאת ממנו. קצב החשיפה במרחק מטר מקיר (4) היא:

$$D(R/h) = \sum_{i,j} \pi \cdot K_i(E_i) \cdot \rho \cdot C_j \cdot y_i \cdot \int_0^d \exp(-\mu \cdot x) \cdot \ln \left(\frac{r^2 + (1+x)^2}{(1+x)^2} \right) dx \quad (8)$$

כאשר $D(R/h)$ הוא קצב החשיפה, $K_i(E_i)$ מקדם קצב חשיפה ספציפי לאנרגיה E_i , ρ צפיפות הקיר (הבלוקים), C_j ריכוז רדיונוקליד j , y_i שכיחות פליטת גאמא, μ מקדם הנחתה ליניארי, x עובי הקיר ו- r רדיוס הקיר (קירוב לעגול). החשיפה השנתית לקרינה חיצונית בחדר בגודל $3 \times 3 \times 2.7$ מ"ק, הבנוי מבלוקים בעובי 20 ס"מ וצפיפות 900 kg/m^3 היא 0.033mSv/y .

לסיכום החשיפה השנתית החיצונית והפנימית של דייר בחדר הנ"ל היא 0.055mSv מהבלוקים שבמבנה. מנה זו נמוכה ב- 50% מתוספת המנה המחושבת הצפויה בחדר עשוי מבטון מועשר אפר פחם (5).

אך יתכן כי ערך זה לוקה בחסר בהשוואה לחדר סטנדרטי מהסיבה שחדר סטנדרטי בנוי גם מבטון, ציפויים שונים וכו' שכפי שפורסם ⁽¹⁾, ⁽⁵⁾ קצב האקסהלציה וריכוז הרדיונוקלידים בהם גבוה בהרבה מהערכים הממוצעים של בלוקים "אפורים".

הבעת תודה

תודת עורכי עבודה זו נתונה לדר' אלי שטרן מהוועדה לאנרגיה אטומית על תרומתו להכנת מתווה הניסוי, לדר' קוסטה קובלר מהמכון לחקר הבנייה בטכניון על הערותיו המקצועיות במהלך העבודה הניסיונית ולדר' יאיר גרוף מהמרכז למחקר גרעיני בנחל שורק על ביצוע חישובי החשיפה החיצונית.

-
1. Kovler K., Haquin G., Ne'eman E. and Lavi N.; *Limitation on the Concentration of Radioactive Elements in Building Materials available in Israel*, הכנס ה-20 של האגודות הגרעיניות בישראל, ים המלח 1999.
 2. Chao C.Y.H. and Tung T.C.W., *Radon Emanation of Building Materials – Impact of Back Diffusion and Difference Between One-Dimensional and Three-Dimensional tests*, Health Physics V. 76 No 6, 1999.
 3. Van der Graaf E.R. and Cozmuta I., *Determination of Radon Release Rate and Activity Concentrations of Natural Radionuclides in Two Types of Building Materials Received from YTONG Ltd. Israel*, Nuclear Geophysics Division, S52, 1999.
 4. Grof Y., Schlesinger T., Hareuveni R. and Margalioth M., *Limitation on the Concentration of Radioactive Elements in the Building Materials: The Influence of the Construction Factors and of the Physical Properties of the Product on the Dose*, The Second Regional Mediterranean Congress on Radiation Protection, Tel Aviv 1997.
 5. מרגליות מ., אבן ע., חקין ג. ושמשי ש., *אפר פחם - ההיבטים הרדיולוגיים של יישומו כתוסף לבטון*, דו"ח ב"ק 3/98, 1998.