



המרכז למחקר גרעיני נחל שורק

שטח בטיחות קרינה

דו"ח מחקר שב"ק 2009/05

הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל

המכון הלאומי לחקר הבנייה

דו"ח מחקר 2011513

מודל לקביעת מקדמי תקן 5098

ד"ר יאיר שמאי

שטח בטיחות קרינה

המרכז למחקר גרעיני נחל שורק

פרופ"ח קוסטה קובלר, ויטלי פריבן

המכון הלאומי לחקר הבנייה

הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

Copyright © 2009 by K. Kovler, V. Priven and Y. Shamai
National Coal Ash Board, the Technion Research and Development Foundation, Ltd, Haifa,
and Soreq Nuclear Research Center, Yavne

ממצאי דו"ח זה הושגו כתוצאה משלב של עבודת מחקר בלבד ואין להתבסס עליהם בקביעת היבטי בטיחות או היבטים מעשיים אחרים הקשורים בעבודה מעשית כלשהי. יש צורך לבדוק היבטים אלו באופן בלתי תלוי.

תקציר

כל מוצרי הבניה שמקורם בחומרים מקליפת כדור הארץ (חול, אבנים, מלט, לבנים וכו') מכילים יסודות ר"א טבעיים אשר פולטים קרינה. הרדיואיזוטופים העיקריים אשר נמצאים בחומרי המבנה הנם: אשלגן – 40 (K-40), רדיום – 226 (Ra-226) ותוצריו אשר הינם חלק משרשרת האורניום – 238 ולכן יש להתייחס להשפעה של כל הרדיואיזוטופים בשרשרת זו ותוריום – 232 (Th-232) אשר גם כן מתפרק לשרשרת של רדיואיזוטופים. ריכוזים אופייניים של רדיואיזוטופים אלה בחומרי מבנה נע בטווח של בקרלים בודדים עד מאות בקרלים לקילוגרם (Bq/kg). מנת הקרינה אשר מתקבלת מרדיואיזוטופים אלה הנה שילוב של קרינה חיצונית (קרינת גמא) וקרינה פנימית (שאיפה של גז ראדון ובנותיו, המתקבל מדעיכה של רדיום).

התוכנה שמתוארת בעבודה זו היא המשך למערכת Block שנבנתה לפני 5 שנים בשורק, המשמשת בסיס לעבודה הנוכחית.

התוכנה מאפשרת לחשב את מנת הקרינה השנתית (שהייה של 7000 שעות במבנה), אשר תתקבל בנקודה כלשהי בחדר כאשר ממדי החדר, צפיפות הקיר וריכוז החמרים הרדיואקטיביים בחומרי המבנה ידועים. כמו כן, התוכנה מאפשרת חישוב ריכוזים גבוליים של היסודות הרדיואקטיביים בחומרי המבנה, בהנחה של מנה שנתית מרבית מוגדרת במרכז החדר.

הכרת תודה

ברצוננו להודות למנהלת אפר פחם על הסיוע בביצוע העבודה.

תוכן עניינים

5.....	מבוא
5.....	1. חשוב קצב החשיפה ומנת הקרינה, במרחק מסוים מהקיר
10.....	2. חישוב הריכוז הגבולי של יסודות ר"א במבנה מגורים
11.....	3. תיאור כללי של תכנת Block2.0
11.....	מטרות התכנה
12.....	נתונים מובנים אשר נמצאים במאגר הזיכרון של התכנה
12.....	נתוני קלט
12.....	4. שלבי התכנה
12.....	בחירה במטרה הראשונה
13.....	בחירה במטרה השנייה
13.....	5. קביעת גודל voxel
14.....	6. קביעת עובי קירות בסיסי לחישוב המקדמים עבור התקן
15.....	7. בקרת ביצועי התוכנה
15.....	בדיקה ידנית עבור תיבה בודדת
18.....	בדיקה מול תוכנה קודמת (Block)
19.....	8. סיכום
20.....	נספח 1 - טבלאות סיכום נתונים
22.....	נספח 2 - טבלאות B.F.
23.....	נספח 3 - תכנת Block2.0
30.....	נספח 4 - דוגמאות לחישוב קרינת רקע (מנת הייחוס למודל)
32.....	נספח 5 - חלופות עבור חדר סטנדרטי בישראל
34.....	מקורות מידע

מבוא

כל מוצרי הבניה שמקורם בחומרים מקליפת כדור הארץ (חול, אבנים, מלט, לבנים וכו') מכילים יסודות ר"א טבעיים אשר פולטים קרינה. הרדיואיזוטופים העיקריים אשר נמצאים בחומרי המבנה הנם: אשלגן – 40 (K-40), רדיום – 226 (Ra-226) ותוצריו אשר הינם חלק משרשרת האורניום – 238 ולכן יש להתייחס להשפעה של כל הרדיואיזוטופים בשרשרת זו ותוריום – 232 (Th-232) אשר גם כן מתפרק לשרשרת של רדיואיזוטופים. ריכוזים אופייניים של רדיואיזוטופים אלה בחומרי מבנה נע בטווח של בקרלים בודדים עד מאות בקרלים לקילוגרם (Bq/kg). מנת הקרינה אשר מתקבלת מרדיואיזוטופים אלה הנה שילוב של קרינה חיצונית (קרינת גמא) וקרינה פנימית (שאיפה של גז ראדון ובנותיו, המתקבל מדעיכה של רדיום).

התוכנה שמתוארת בעבודה זו היא המשך למערכת Block שנבנתה לפני מספר שנים בשורק, המשמשת בסיס לעבודה הנוכחית¹. (מכאן גם שמה Block2.0).

תוכנת Block2.0 מחלקת את הבעיה לסכום של מקורות קטנים ביותר, עד שניתן לראותם כנקודה ע"י חלוקה של כל קיר לתיבות תלת ממדיות (voxels) בכל גודל רצוי. תוכנה זו מתחשבת בבליעה באותה תיבה ובכל אלה שלפניה, כולל זווית המעבר בהן, כוללת את ההיבנות (build up) של המנה בדרכה בתוך הבולע, וכוללת את כל קווי הגמא המוכרים מעל 20 keV ששכיחותם עולה על 1%.

התוכנה מאפשרת לחשב את מנת הקרינה השנתית (שהייה של 7000 שעות במבנה), אשר תתקבל בנקודה כלשהי בחדר כאשר ממדי החדר, צפיפות הקיר וריכוז החומרים הרדיואקטיביים בחומרי המבנה ידועים. כמו כן, התוכנה מאפשרת חישוב ריכוזים גבוליים של היסודות הרדיואקטיביים בחומרי המבנה, בהנחה של מנה שנתית מרבית מוגדרת במרכז החדר¹.

1. חשוב קצב החשיפה ומנת הקרינה, במרחק מסוים מהקיר

על מנת לחשב את קצב החשיפה שמתקבל מרדיואיזוטופים הנמצאים בקיר מסוים, נחלק את הקיר (שלושה ממדים) למספר רב של תיבות קטנות, כך שמנקודת ראות הגלאי, כל תיבה היא מקור נקודתי.

הנוסחה הכללית לחשוב קצב החשיפה ממקור נקודתי ממוגן הנה:

$$X \left(\frac{R}{h} \right) = \frac{A \cdot \Gamma_{\gamma}}{D^2} \cdot B \cdot e^{-\mu d} \quad (1.1)$$

כל איבר בנוסחה (1.1) ניתן לחשוב באופן הבא:

$$A = \frac{C \cdot \rho \cdot \Delta V}{3.7 \cdot 10^{10}} \quad (1.2)$$

A [Ci] - אקטיביות

C [Bq/kg] - ריכוז של רדיואיזוטופ ספציפי בתיבה

ρ [kg/m³] - צפיפות

$3.7 \cdot 10^{10}$ - מקדם מעבר מיחידות [Bq] ל [Ci]

ΔV [m³] - נפח תיבה

$$\Delta V = \Delta L \cdot \Delta b \cdot \Delta h \quad (1.3)$$

ΔV [m³] - נפח תיבה

ΔL [m³] - אורך תיבה

Δb [m³] - רוחב תיבה

Δh [m³] - גובה תיבה

$$\Gamma_{\gamma_j} = 0.52 \cdot f_j \cdot E_j \quad (1.4)$$

Γ_{γ_j} [R·m²/Ci·h] - קבוע גמא - ערך זה חושב מראש, על פי המשוואה הנ"ל והוא מופיע בנספח 1

(הנוסחה לקוחה מתוך²)

f_j - הסתברות להופעת קרן הגמא לכל דעיכה (פרקציה) - ערך זה מופיע בעבודה¹.

E_j [MeV] - אנרגיית פוטון הגמא - ערך זה מופיע בנספח 1.

f_j^* ו E_j נלקחו מתוך⁷

$$0.52 - \text{מקדם מעבר ליחידות} \left[\frac{R \cdot m^2}{Ci \cdot h} \right]$$

$$\mu = \frac{\mu}{\rho} \cdot \rho = \mu_m \cdot \rho \quad (1.5)$$

μ [1/m] - מקדם הנחתה ליניארי

$\mu_m = \mu/\rho$ [m²/kg] - מקדם הנחתה מסי - ערך זה מופיע בנספח 1 והוא נלקח מתוך מקור⁷.

ρ [kg/m³] - צפיפות מוצר הבנייה

$$B (E, R) \quad (1.6)$$

Buildup Factor – B – קבוע זה, תלוי באנרגיית הפוטון ובמספר הדרכים החופשיות הממוצעות אותן עובר פוטון מסוים, עד שהוא יוצא מהקיר. נספח 3 מכיל טבלאות מרחבות של קבוע ה- Buildup Factor, אשר מבוססות על טבלה 6.5.1 מתוך מקור⁷ ועל עבודה³.

$$R(mfp) = \mu \cdot d = \mu_m \cdot \rho \cdot d \quad (1.7)$$

R – מספר הדרכים החופשיות הממוצעות
 μ – מקדם ההנחתה, מחושב ע"י נוסחה 1.5
d – אורך המסלול בקיר, מחושב ע"י נוסחה 1.9

$$D_i^2 = (l_d - l_s)^2 + (m_d - m_s)^2 + (n_d - n_s)^2 \quad (1.8)$$

D_i [m²] – המרחק בין "נקודת ההתעניינות" לבין מרכז תיבת המקור.
 $P_d = (l_d, m_d, n_d)$ – נקודה זו מציגת את "נקודת ההתעניינות" ביחס לראשית הצירים.
 $P_s = (l_s, m_s, n_s)$ – נקודה זו מציגת מיקום מקור נקודתי, במרכז קובייה ספציפית בקיר, ביחס לראשית הצירים.

- הסבר מפורט לגבי אופן מציאת מרחק זה, מופיע בעבודה¹.

$$d = \frac{D_i \cdot l_s}{l_s + l_d} \quad (1.9)$$

d [m] – המרחק בין מקור נקודתי במרכז קובייה ספציפית בקיר, לבין נקודת היציאה מהקיר.

- הסבר מפורט לגבי אופן מציאת מרחק זה מופיע בנספח 1.

לאחר הצבת כל האיברים אשר מופיעים בתוך נוסחה (1.1), מתקבלת המשוואה הבאה:

קצב חשיפה ממקור נקודתי מסוים בקיר נתון:

$$X_i \left(\frac{R}{h} \right) = \frac{C \cdot \rho \cdot \Delta V}{D_i^2 \cdot 3.7 \cdot 10^{10}} \sum_{j=1}^N \Gamma_\gamma \cdot B \cdot e^{-\mu_m \cdot \rho \cdot d} \quad (1.10)$$

N – מספר פליטות האנרגיה מקרינת גמא מסך כל הרדיואיזוטופים בכל השרשרת.

* האברים במשוואה אשר משתנים כתלות ב- j הם: Γ_γ ו- μ_m .

נעיר כאן, שכדי להתחשב באמנציה של ראדון בעת חישוב מנת הגמא, יש לזכור שהאמנציה מקטינה את ריכוז בנות הראדון בקיר. כלומר שיווי משקל אינו מתקיים בקיר. לכן את המנה משרשרת הרדיום יש לכפול ב- $(1-e)$ כאשר e - מקדם האמנציה.

קצב החשיפה שיתקבל מכל הקיר יהיה:

$$X\left(\frac{R}{h}\right) = \sum_{i=1}^M \frac{C \cdot \rho \cdot \Delta V}{D_i^2 \cdot 3.7 \cdot 10^{10}} \sum_{j=1}^N \Gamma_\gamma \cdot B \cdot e^{-\mu_m \cdot \rho \cdot d} \quad (1.11)$$

M – מספר התיבות אשר מרכיבות את כל הקיר.

קצב החשיפה שיתקבל מכל הקיר בתוספת מקדם תיקון פתחים יהיה:

$$X\left(\frac{R}{h}\right) = \left[\sum_{i=1}^M \frac{C \cdot \rho \cdot \Delta V}{D_i^2 \cdot 3.7 \cdot 10^{10}} \sum_{j=1}^N \Gamma_\gamma \cdot B \cdot e^{-\mu_m \cdot \rho \cdot d} \right] \cdot F_k \quad (1.12)$$

F_k – הינו מקדם תיקון פתחים. יש להשתמש במקדם זה כאשר הקיר אינו "מלא" (חלון, דלת). קבוע זה הוא מספר בין 0 ל- 1 וניתן לחשבו באמצעות הנוסחה הבאה:

$$F_k = 1 - \frac{S_g}{S_k} \quad (1.13)$$

S_g [m²] – שטח החלונות והדלתות באותו קיר

S_k [m²] – שטח קיר

המנה החיצונית השנתית שתתקבל מהיסודות הר"א Th-232, K-40 ובנותיו ו- Ra-226

ובנותיו (בהנחה ש Th-232 ו Ra-226 נמצאים בשווי משקל עם בנותיהם), הנמצאים בחומרי מבנה, בחדר מסוים תהיה:

(1.14)

$$D\left(\frac{mSv}{Y}\right) = \sum_{k=1}^6 \left\{ \left[\sum_{i=1}^M \frac{C_k \cdot \rho_k \cdot \Delta V}{D_i^2 \cdot 3.7 \cdot 10^{10}} \sum_{j=1}^N \Gamma_\gamma \cdot B \cdot e^{-\mu_m \cdot \rho \cdot d} \right] \cdot 4.263 \cdot 10^4 \cdot F_k \right\}$$

$k=1, \dots, 6$: שש הפאות מהן בנוי החדר.

* ההכפלה במספר $4.263 \cdot 10^4$ נובעת ממעבר יחידות:

$$\frac{R}{h} \cdot 0.87 \frac{Rad}{R} \cdot 0.7 \frac{rem}{Rad} \cdot 10 \frac{mSv}{Rem} \cdot 7000 \frac{h}{y} = 4.263 \cdot 10^4 \frac{mSv}{y}$$

- מוצנעת בתוך מספר זה ההנחה שהאדם שוהה במבנה 7000 שעות בשנה (ראה מקור⁴).
- המספר 0.87 נלקח מתוך⁵.

כפי שהערנו לעיל יש לכפול את ריכוז האיזוטופ רדיום ב $1-e$ בשל בריחת הראדון מהקיר.

המנה הפנימית השנתית שתתקבל מהיסוד הר"א Ra-226 ובנותיו (בהנחה של שווי משקל), הנמצא בחומרי מבנה, בחדר מסוים תהיה:

$$D(Rn) = 0.017 \cdot C(Rn) \quad (1.15)$$

$D(Rn)$ [mSv/y] – תרומת הראדון למנת הקרינה האפקטיבית השנתית⁴.
 0.017 [(mSv/y)/(Bq/m³)] – מקדם המנה. מספר המבטא את מנת הקרינה המחויבת המוסכמת (Dose Convention) שתתקבל מנשימת אוויר עם ראדון בריכוז של 1 Bq/m^3 .
 $C(Rn)$ [Bq/m³] – תרומת שש פאות החדר לריכוז גז הראדון בחדר.

$$C(Rn) = \sum_{k=1}^6 \frac{S_k}{V} \cdot e_m \cdot C_k(Ra) \cdot \lambda \cdot \rho_k \cdot \frac{b_k}{2} \cdot \frac{1}{vent} \quad (1.16)$$

e_m – אמנציה (כפי שמוגדר בתיי 5098) – החלק היחסי מתוך הראדון, הנוצר בתוך מוצר בנייה שמצליח לצאת מחוץ למוצר.

λ – קבוע דעיכה של ראדון $\left(\lambda = 7.6 \cdot 10^{-3} \frac{1}{h} \right)$

ρ_k [kg/m³] – צפיפות קיר מסוים

b_k [m] – עובי קיר מסוים

$C_k(Ra)$ [Bq/kg] – ריכוז Ra בקיר מסוים

$vent$ [1/h] – מספר תחלופות האוויר במבנה לשעה.

S_k [m²] – שטח קיר מסוים

V [m³] – נפח החדר

- משוואה זו נובעת משווי משקל בין כמות הראדון הנוצרת בקיר ומפעפת לחדר, לבין הכמות שדולפת מהחדר בשל תחלופת האוויר (כל עוד החדר אינו אטום במיוחד וקצב האובדן, עקב דעיכת הראדון, זניח לעומת הסילוק בשל תחלופת האוויר). כמו כן מניחים שמחצית מכמות הראדון שנפלט מהקיר נכנסת לחדר ומחציתה נפלטת מחוץ לחדר⁶.

נציב משוואה (1.16) בתוך משוואה (1.15), נציב את קבוע דעיכת הראדון ונקבל:

$$(1.17) D(Rn) = \sum_{k=1}^6 6.46 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{S_k}{V} \cdot e_m \cdot \rho_k \cdot b_k \cdot C_k(Ra) \cdot \frac{1}{vent}$$

2. חישוב הריכוז הגבולי של יסודות ר"א במבנה מגורים

בראשית הדרך הוועדה המקצועית תורתית לפיקוח על הקרינה בישראל המליצה כי התוספת המרבית של מנת הקרינה האפקטיבית השנתית, המתקבלת במבנה מגורים מחומרי המבנה, כתוצאה מקרינת גמא ומראדון גם יחד, לא תהיה גדולה מ- 0.3 mSv/y. ערך זה הינו בתוספת למנת הקרינה האפקטיבית השנתית המתקבלת ממוצר ייחוס.

מנת הקרינה האפקטיבית השנתית המתקבלת בחדר הטיפוסי הבנוי מבטון (ממ"ד) הינה 1.1

mSv/y. היא מורכבת מ- 0.25 mSv/y של קרינת גמא וכ- 0.85 mSv/y של קרינת מראדון.

החדר הסטנדרטי אשר הומלץ לצרכי חישובי תקנים הוא בשטח $3 \times 3 \text{ m}^2$, גובה 2.7 m

ומקדם תיקון פתחים כללי של 0.94.

ערך מנת הרקע מראדון נובע ממדידות ארוכות טווח אשר בוצעו ע"י ממ"ג שורק בחדרי ממ"ד בקומות עליונות של בניינים אשר הראו שריכוז הראדון הממוצע הוא כ-50 בקרל למ"ק. ערך מנת הגמא תלוי בריכוזי היסודות הרדיואקטיביים בחומרי הבנייה ובעובי הקירות, בעיקר. ניקח בתור דוגמה חדר ממ"ד המשמש כחדר שינה. כידוע, ממ"ד בנוי מבטון מסיבי בכל פאות המעטפת, הן בקירות והן ברצפה ובתקרה. נניח שצפיפות הבטון היא כ-2,400 ק"ג למ"ק ושפתחים (חלון ודלת) מהווים כ-6% משטח המעטפת. בהנחה שריכוזי רדיום, תוריום ואשלגן בבטון הם 15, 30 ו-50 בקרל לק"ג בהתאמה, והעובי הממוצע של קירות המעטפת הוא 0.2 מ', המנה ממקרינת גמא מחישובינו בכלי שפותח בחדר שווה ל-0.2 mSv/y. כאשר ריכוז הרדיום מגיע ל-50 בקרל לק"ג, או כאשר עובי הקירות שווה ל-0.25 מ', המנה ממקרינת גמא עולה ל-0.25 mSv/y. כבסיס לחישובינו בהמשך, נניח שמנת הקרינה האפקטיבית השנתית המתקבלת בחדר הטיפוסי הבנוי מבטון (ממ"ד) הינה 1.1 mSv/y, והיא מורכבת מ- 0.25 mSv/y של קרינת גמא וכ- 0.85 mSv/y של קרינת מראדון. מנה זו תשתמש כ"מנת ייחוס".

ערכי המנה השנתית ניתנים לשנוי בתוכנה על פי המשוואה הבאה:

$$D_{total} = D_{ref} + D_b \quad (2.1)$$

D_{total} [mSv/y] – מנת הקרינה האפקטיבית השנתית המתקבלת במבנה מגורים, כתוצאה מקרינת גמא ומראדון גם יחד.

D_{ref} [mSv/y] - מנת הקרינה האפקטיבית השנתית המתקבלת בחדר הבנוי ממוצר הייחוס.

D_b [mSv/y] - התוספת המרבית של מנת הקרינה האפקטיבית השנתית מקרינת גמא וראדון גם יחד, המתקבלת ממוצר בנייה כלשהו.

חישוב המנה החיצונית השנתית המתקבלת בחדר (ארבעה קירות, רצפה ותקרה), כתוצאה

מהרדיואיזוטופים ^{226}Ra , ^{232}Th ו- ^{40}K , תתבצע ע"י הצבת ריכוז של 1 Bq/kg במשוואה

$$1.14. \text{ בדרך זו נקבל את האיבר } D_{ext} \left(1 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}\right)$$

הריכוז הגבולי של ^{226}Ra , ^{232}Th או ^{40}K בחומרי מבנה הינו:

$$C_i \left(\frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right) = \frac{D_{total}}{D_{ext} \left(1 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}\right)} \quad (2.2)$$

C_i [Bq/kg] – ריכוז מירבי של רדיואיזוטופ i , בחומרי מבנה.

חישוב המנה הפנימית השנתית המתקבלת בחדר (ארבעה קירות, רצפה ותקרה), כתוצאה

מהרדיואיזוטופ ^{222}Rn , תתבצע ע"י הצבת ריכוז של 1 Bq/kg וע"י הצבת מקדם אמנציה e_m -

$$\text{של } 100\% \text{ במשוואה } 1.17. \text{ בדרך זו נקבל את האיבר } D_{in} \left(1 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}\right)$$

הריכוז הגבולי של ^{222}Rn בחומרי מבנה הינו:

$$C_i \left(1 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}\right) = \frac{D_{total}}{D_{in} \left(1 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}, 100\%\right)} \quad (2.3)$$

3. תיאור כללי של תכנת Block2.0

מטרות התכנה

1. מציאת מנת הקרינה האפקטיבית (חיצונית+פנימית) השנתית המתקבלת במיקום כלשהו בחדר, על פי המשוואות שבפרק 1.
2. מציאת הריכוז הגבולי של היסודות הרדיואקטיביים: ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{222}Rn במוצרי בנייה, על פי המשוואות שבפרק 2.

נתונים מובנים אשר נמצאים במאגר הזיכרון של התכנה

1. טבלאות סיכום נתונים אשר מופיעות ומכילות אנרגיות, מקדמי הנחתה (μ_m) וקבועי גמא (Γ_γ) מוצגות בנספח 1 והן מתבססות על עבודות^{8,7}.
2. טבלאות מקדמי היבנות B.F מוצגות בנספח 2. הטבלאות המופיעות בנספח זה, עבור אנרגית גמא מעל 100 keV, הינן הרחבות של טבלאות אשר יוצרו ע"י ANSI/ANS-6.4.3. במקרה של אנרגיות גמא הנמוכות מ-100 keV, השתמשנו במקור³.

נתוני קלט

1. הגדרת ממדי החדר: אורך (y), רוחב (x), גובה (z).
2. הגדרת מספר החלוקות של פאות החדר (יצירת תיבות קטנות).
3. הגדרת מיקום נקודת ההתעניינות בחדר.
4. ריכוז (C_m) של רדיואיזוטופ m, בקיר (Bq/kg).
5. מספר תחלופות אוויר בשעה.
6. מקדם האמנציה (e) באחוזים, (הערה: הגדרת מונח זה לקוחה מהתקינה הישראלית, שאינה במדויק ההגדרה המדעית של המונח. "החלק של הגז הנוצר בחומר שמוצא את דרכו אל מחוץ מהקיר").
7. F_k - מקדם תיקון פתחים (שבר, המציין איזה חלק מהקיר מלא, המבטא את קיום הפתחים)
- במקרה של בחירה במטרה ראשונה, יש אפשרות להכניס לכל פאה של החדר מקדם תיקון פתחים אחר. במקרה של בחירה במטרה השנייה, לשש פאות החדר יהיה מקדם תיקון פתחים יחיד.
8. D_{ref} - מנת הקרינה האפקטיבית השנתית שתשמש כמנת ייחוס, שמעליה תתיר התוכנה תוספת קבועה (ראה להלן). בהמשך העבודה (נספח 4) הוצגו דוגמאות לחישוב מנה זו מתוך חישובי קצב מנה ממספר מוצרי ייחוס בחדר טיפוסי.
9. D_b - התוספת המרבית של מנת הקרינה האפקטיבית השנתית מקרינת גמא וראדון גם יחד, שאפשר לקבל ממוצר בניה כלשהו, מעל למנת הייחוס (mSv/y).

4. שלבי התכנה

בחירה במטרה הראשונה

התכנה קולטת את כל הנתונים ומתחילה לחשב את מנת הקרינה המתקבלת מקיר בודד (ה"דרומי"). לשם כך, התכנה מחלקת את הקיר למספר רב של תיבות, כפי שהוגדר ע"י המשתמש ומחשבת על פי המשוואות שבפרק 1 את מנת הקרינה המתקבלת משלושת הרדיואיזוטופים ובנותיהם. התוצאה נשמרת בתוך אוגר הקיר הדרומי i.south. לאחר מכן, התכנה חוזרת על

שלבים אלה עבור שאר הקירות + רצפה + תקרה, כאשר בסיום כל קיר, מנת הקרינה נשמרת באוגר המתאים. התוצאה הסופית אשר מתקבלת מהתוכנה הינה חיבור כל אוגרי הקירות + אוגר הרצפה + אוגר התקרה.

במטרה זו ניתן לבחור לחישוב מנת הקרינה מחדר עם קירות ורצפה זהים בתכונותיהם (צפיפות, עובי, ריכוזי רדיונוקלידים) או לחלופין לבחור בחישוב קיר בודד בעל תכונות ספציפיות.

בחירה במטרה השנייה

התכנה פועלת כמו במטרה הראשונה, כאשר ההבדלים הינם:

א. המשתמש אינו יכול להגדיר את ריכוז הרדיואיזוטופים, אלא התכנה מציבה באופן אוטומאטי

ריכוז של 1 Bq/kg עבור שלושת הרדיואיזוטופים ובנותיהם.

ב. מנות הקרינה שמתקבלות מכל רדיואיזוטופ ובנותיו נשמרות בשלושה אוגרים שונים: D(Th), D(Ra), D(K) (אין צבירה ברמה של קיר, אלא צבירה של כל רדיואיזוטופ לאורך כל הקירות, רצפה ותקרה).

ג. לאחר שהתכנה מוצאת את התרומה היחסית של כל רדיואיזוטופ ובנותיו למנת הקרינה האפקטיבית השנתית במרכז החדר, היא משתמשת בנוסחאות המופיעות בפרק 2 על מנת למצוא את הריכוז הגבולי של כל רדיואיזוטופ בחומרי המבנה.

5. קביעת גודל voxel

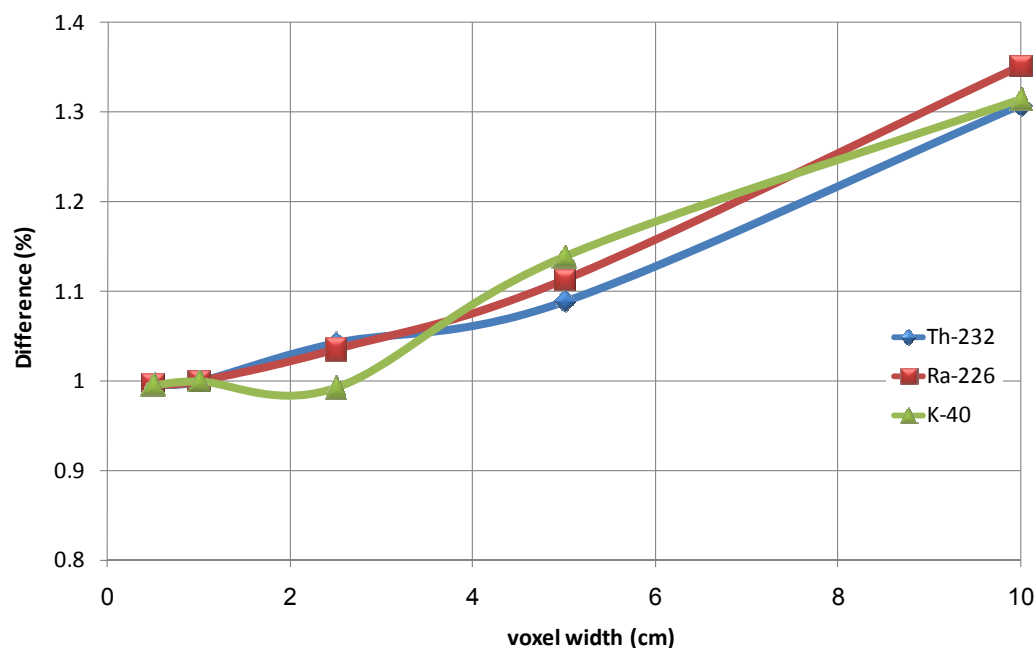
דרוש לבחור במידות אופטימליות של voxel בודד. ככל שהוא קטן יותר, דיוק החישוב טוב יותר.

הניתוח מראה שהמימד שמשפיע ביותר בחישוב מנת הקרינה הוא עובי ה-voxel מכיוון שכמות משמעותית של קרינה נבלעת בחומר הקיר, וככל שנחלק לעוביים קטנים יותר נקבל דיוק גבוה יותר.

לשם בדיקת הנושא בוצעו חישובים של ערכי מנה שנתית ליחידת רכוז אקטיביות ובאיור 1 מוצגים ההפרשים בין בחירות שונות של עובי.

ניתן לראות שהערכים מתכנסים בסביבה של עובי ה-voxel של 1 ס"מ (למשל, השינוי בין ערכי המקדמים בין עובי 1 ס"מ ו-0.5 ס"מ קטן מ-0.4%), לכן העובי הנבחר לחישובים הבאים נקבע 1 ס"מ.

באותו אופן נבדק, שעבור הממדים האחרים של הקירות, שהם עצמם כזכור מספר מטרים, הרגישות למימד ה-voxel נמוכה, ולכן בחרנו בגודל של 5 ס"מ.



איור 1 - שינוי בערכי מנה שנתית ליחידת ריכוז אקטיביות של Th-232, Ra-226 ו-K-40 כנגד עובי ה-voxel

6. קביעת עובי קירות בסיסי לחישוב המקדמים עבור התקן

למטרת חסכון בטבלאות ובחישובים, נהוג להשתמש ביחידות עובי המבוטאות במשקל ליחידת שטח. אולם מתברר שקיים הבדל מסוים בין חישוב מדויק, לכל עובי (ביחידות ליניאריות) ולכל צפיפות (ביחידות משקל ליחידת נפח), לבין חישוב לעובי המבוטא במשקל ליחידת שטח (טבלה 1). כתוצאה מהשוואה בין ערכי המקדמים לעובי קיר המשתנה בין 1...20 ס"מ, ניתן לקבוע שבחירת עובי קיר של 10 ס"מ מהווה פשרה סבירה ונותנת הבדלים עד ל-2% יחסית לקצוות טווח השתנות העובי (1 ס"מ ו-20 ס"מ). לכן, עובי הקיר הנבחר הוא 10 ס"מ.

טבלה 1 - ערכי ריכוז אקטיביות של רדיום Ra-226, תוריום Th-232 ואשלגן K-40 ליחידת מנה שנתית כתלות בעובי קיר

תוריום		רדיום		אשלגן		עובי קיר, ס"מ
יחסית לערך 10 ס"מ, %		יחסית לערך 10 ס"מ, %		יחסית לערך 10 ס"מ, %	אשלגן	
98.07	112.01	98.13	157.61	97.96	1419.4	1
100.00	114.21	100.00	160.62	100.00	1449.0	10
102.15	116.67	102.10	164.00	102.26	1481.8	20

7. בקרת ביצועי התוכנה

לצורך הבקרה בוצעו שתי בדיקות: (א) בדיקה ידנית עבור תיבה בודדת (Voxel) ו-(ב) בדיקה מול תוכנה קודמת (Block)¹.

בדיקה ידנית עבור תיבה בודדת

בעיה זו מציגה מקרה של תיבה בודדת, בעלת מימדים קטנים (מקור נקודתי) אשר נמצאת במרחק גדול ובקו ראייה ישיר (ללא זווית סטייה) מנקודת מדידת המנה.

נתונים

- קובייה בגודל: $0.01 \cdot 0.01 \cdot 0.01 \text{ m}$
- מיקום "נקודת ההתעניינות" ביחס לקובייה: $P_d(1, 5 \cdot 10^{-3}, 5 \cdot 10^{-3}) \text{ m}$
- ריכוז שלושת הרדיואיזוטופים ובנותיהם: $C_m = 100 \text{ Bq/kg}$
- צפיפות הקיר: $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
- מקדם תיקון לקיר: $F_k = 1$

* מכיוון שהחישוב מבוצע עבור קובייה קטנה ולא עבור חדר, אין התחשבות בתרומת הראדון.

מטרה:

מציאת מנת החשיפה האפקטיבית השנתית שתתקבל במרחק מטר אחד, באמצעות חישוב ידני ושימוש בתוכנת Block.

חישוב ידני:

מיקום "נקודת ההתעניינות" ביחס לראשית הצירים: $P_d(l_d, m_d, n_d) = (1, 5 \cdot 10^{-3}, 5 \cdot 10^{-3})$

מיקום מקור נקודתי, במרכז קובייה ספציפית בקיר, ביחס לראשית הצירים:

$$P_s = \left(-\frac{\Delta b}{2}, \frac{\Delta L}{2}, \frac{\Delta h}{2}\right) = (l_s, m_s, n_s) = (-5 \cdot 10^{-3}, 5 \cdot 10^{-3}, 5 \cdot 10^{-3})$$

$$\Delta V = \Delta L \cdot \Delta b \cdot \Delta h = (0.01)^3 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \text{נפח voxel בודד:}$$

$$A = \left(\frac{C_m \cdot \rho \cdot \Delta V \cdot 4.263 \cdot 10^4}{3.7 \cdot 10^{10}}\right) = 1.152 \cdot 10^{-7}$$

$$D_i^2 = (l_d - l_s)^2 + (m_d - m_s)^2 + (n_d - n_s)^2 = (1 + 5 \cdot 10^{-3})^2 = 1.010025 \text{ m}^2$$

$$d = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

מציאת תרומת K-40 למנת החשיפה האפקטיבית:

$$R(mfp) = \mu_m \cdot \rho \cdot d = 0.0264$$

$$B(1.461, 0.0264) = 1.0204$$

$$D(k - 40) = \frac{A}{D_i^2} \sum_{j=1}^N \Gamma_\gamma \cdot B \cdot e^{-\mu_m \cdot \rho \cdot d} = 9.1941 \cdot 10^{-9} \text{ mSv/y}$$

תרומה של Th-232 ושל Ra-226 ובנותיהם למנת החשיפה האפקטיבית באמצעות חישוב ידני מובאת בטבלה 2 ובטבלה 3, בהתאם.

טבלה 2 - מציאת תרומת Th-232 ובנותיו למנת החשיפה האפקטיבית באמצעות חישוב ידני

N	E(MeV)	R(mfp)	B(E, R)	Γ_γ	$\Gamma_\gamma \cdot B \cdot e^{-R}$
1	7.5520E-01	0.0365	1.0337	4.1060E-03	4.0922E-03
2	9.9450E-02	0.0854	1.1496	6.6890E-04	7.0602E-04
3	7.7220E-01	0.0361	1.0331	6.1880E-03	6.1662E-03
4	1.0500E-01	0.085	1.1505	8.7450E-04	9.2413E-04
5	8.3550E-01	0.0348	1.0308	7.5320E-03	7.4984E-03
6	1.6300E+00	0.025	1.0188	1.5680E-02	1.5580E-02
7	8.9950E-02	0.0925	1.1181	9.9100E-04	1.0101E-03
8	4.0950E-01	0.0475	1.0566	4.5120E-03	4.5462E-03
9	1.2910E-01	0.0762	1.1316	1.8470E-03	1.9367E-03
10	3.2760E-01	0.052	1.0699	5.4390E-03	5.5243E-03
11	9.3350E-02	0.0899	1.1301	1.6800E-03	1.7353E-03
12	1.5880E+00	0.0253	1.0192	2.9090E-02	2.8908E-02
13	2.7020E-01	0.0562	1.0818	5.0270E-03	5.1410E-03
14	9.4780E-01	0.0328	1.0274	2.0160E-02	2.0044E-02
15	2.0930E-01	0.0617	1.0971	4.7920E-03	4.9427E-03
16	4.6300E-01	0.0452	1.0493	1.0600E-02	1.0631E-02
17	7.9470E-01	0.0356	1.0323	1.8990E-02	1.8918E-02
18	9.6460E-01	0.0325	1.0270	2.5950E-02	2.5798E-02
19	3.3830E-01	0.0514	1.0681	1.9850E-02	2.0140E-02
20	9.6910E-01	0.0324	1.0269	8.3210E-02	8.2724E-02
21	9.1110E-01	0.0353	1.0299	1.3040E-01	1.2964E-01
22	8.4260E-02	0.0997	1.0992	5.2670E-04	5.2401E-04
23	2.4100E-01	0.0588	1.0890	4.9170E-03	5.0488E-03
24	3.0010E-01	0.0535	1.0748	5.2810E-03	5.3803E-03
25	8.7300E-02	0.0945	1.1082	3.6240E-03	3.6540E-03
26	7.4880E-02	0.1094	1.0587	4.1360E-03	3.9250E-03
27	7.7110E-02	0.1053	1.0677	7.1710E-03	6.8912E-03
28	2.3860E-01	0.059	1.0896	5.5040E-02	5.6536E-02
29	7.8550E-01	0.0358	1.0326	7.9910E-03	7.9613E-03
30	1.6210E+00	0.0251	1.0189	2.3020E-02	2.2874E-02
31	7.2720E-01	0.0372	1.0346	4.4440E-02	4.4299E-02
32	8.4900E-02	0.0963	1.0987	2.4170E-04	2.4118E-04
33	7.6310E-01	0.0364	1.0334	2.3330E-03	2.3247E-03

34	7.2800E-02	0.1131	1.0494	2.7620E-04	2.5885E-04
35	7.4970E-02	0.1091	1.0590	4.8050E-04	4.5626E-04
36	2.7740E-01	0.0555	1.0800	3.5170E-03	3.5933E-03
37	8.6040E-01	0.0343	1.0299	2.0000E-02	1.9903E-02
38	5.1080E-01	0.0435	1.0443	2.0500E-02	2.0497E-02
39	5.8310E-01	0.041	1.0411	9.1770E-02	9.1704E-02
40	2.6150E+00	0.0199	1.0134	4.8700E-01	4.8380E-01
				סכום	1.1765E+00

$$\sum_{j=1}^{40} \Gamma_{\gamma} \cdot B \cdot e^{-R} = 1.1765$$

$$D(Th-232) = \frac{A}{D_i^2} \cdot \sum_{j=1}^{40} \Gamma_{\gamma} \cdot B \cdot e^{-R} = 1.3421 \cdot 10^{-7} \text{ mSv/Y}$$

טבלה 3 - מציאת תרומת Ra-226 ובנותיו למנת החשיפה האפקטיבית באמצעות חישוב ידני

N	E(MeV)	R(mfp)	B(E, R)	Γ_{γ}	$\Gamma_{\gamma} \cdot B \cdot e^{-R}$
1	1.86E-01	0.0645	1.1045	3.16E-03	3.2670E-03
2	7.86E-01	0.0358	1.0326	4.45E-03	4.4315E-03
3	5.32E-02	0.1663	1.0000	3.04E-04	2.5734E-04
4	8.73E-02	0.0945	1.1082	2.11E-03	2.1224E-03
5	7.48E-02	0.1091	1.0582	2.40E-03	2.2781E-03
6	2.15E-01	0.0612	1.0957	8.32E-03	8.5750E-03
7	7.71E-02	0.1055	1.0679	4.17E-03	4.0044E-03
8	2.95E-01	0.0525	1.0739	2.94E-02	2.9907E-02
9	3.52E-01	0.0507	1.0659	6.77E-02	6.8543E-02
10	1.66E+00	0.0248	1.0186	9.91E-03	9.8451E-03
11	2.12E+00	0.0219	1.0154	1.29E-02	1.2765E-02
12	8.06E-01	0.0355	1.0320	5.14E-03	5.1165E-03
13	1.40E+00	0.0271	1.0211	1.01E-02	1.0008E-02
14	1.28E+00	0.0285	1.0225	9.80E-03	9.7340E-03
15	2.45E+00	0.0203	1.0139	1.97E-02	1.9592E-02
16	6.66E-01	0.0388	1.0372	5.39E-03	5.3817E-03
17	1.16E+00	0.0300	1.0238	1.01E-02	1.0065E-02
18	1.85E+00	0.0246	1.0179	2.00E-02	1.9834E-02
19	1.51E+00	0.0260	1.0199	1.73E-02	1.7201E-02
20	1.41E+00	0.0271	1.0211	1.81E-02	1.7978E-02
21	1.73E+00	0.0243	1.0180	2.65E-02	2.6369E-02
22	9.34E-01	0.0330	1.0277	1.55E-02	1.5392E-02
23	1.16E+00	0.0300	1.0238	2.10E-02	2.0845E-02
24	1.38E+00	0.0274	1.0214	2.92E-02	2.9039E-02
25	2.20E+00	0.0216	1.0151	5.67E-02	5.6366E-02

26	7.68E-01	0.0362	1.0332	2.00E-02	1.9949E-02
27	1.24E+00	0.0290	1.0228	3.80E-02	3.7755E-02
28	1.12E+00	0.0304	1.0243	8.77E-02	8.7102E-02
29	1.77E+00	0.0240	1.0177	1.44E-01	1.4347E-01
30	6.09E-01	0.0402	1.0399	1.46E-01	1.4554E-01
31	4.65E-02	0.2152	1.0000	9.73E-04	7.8453E-04
				סכום	8.4352E-01

$$\sum_{j=1}^{31} \Gamma_j \cdot B \cdot e^{-R} = 0.84352$$

$$D(Ra-226) = \frac{A}{D_i} \cdot \sum_{j=1}^{31} \Gamma_j \cdot B \cdot e^{-R} = 9.6223 \cdot 10^{-8} \text{ mSv/y}$$

המנה הכוללת המתקבלת באמצעות חישוב ידני הינה:

$$D_t = D(K-40) + D(Th-232) + D(Ra-226) = 2.3963 \cdot 10^{-7} \text{ mSv/y}$$

טבלה 4 מראה את השוואה בין תוצאות החישוב הידני לבין תוצאות תוכנת Block.

טבלה 4 - השוואה בין תוצאות החישוב הידני לבין תוצאות תוכנת Block

מנת החשיפה האפקטיבית השנתית שתתקבל מהקובייה ע"י הגלאי [mSv/y]		
תוכנת Block	חישוב ידני	רדיונוקליד
$9.1940 \cdot 10^{-9}$	$9.1941 \cdot 10^{-9}$	K - 40
$1.3421 \cdot 10^{-7}$	$1.3421 \cdot 10^{-7}$	Th - 232
$9.6224 \cdot 10^{-8}$	$9.6223 \cdot 10^{-8}$	Ra - 226
$2.3962 \cdot 10^{-7}$	$2.3962 \cdot 10^{-7}$	K, Th, Ra

לסיכום, ההתאמה בין החישוב הידני לתוכנה מושלמת עד כדי הספרה הרביעית אחרי הנקודה. השגיאה נובעת מחוסר דיוק בחישוב הידני (עיגול הספרה הרביעית אחרי הנקודה).

בדיקה מול תוכנה קודמת (Block)

הבדיקה בוצעה באותם תנאים כמו שהיו בעבודה¹.

בוצעו 5 חישובים לפי מקדם אמנציה 0.03 עבור מספר ערכי מסה ליחידת שטח (מ-50 עד 250

ק"ג למ"ר) ותוצאותיהם מוצגות בטבלה 5.

טבלה 5 - השוואה בין שתי גרסאות התוכנה

סטייה	Ra226		סטייה	Th232		סטייה	K40		מסה
	רדיום			תוריום			אשלגן		
%	block	block2.0	%	block	block2.0	%	block	block2.0	[ק"ג למ"ר]
-0.87	337	340	-0.93	347	350	-0.55	5129	5157	50
-0.76	175	176	-0.98	183	185	-0.44	2701	2713	100
-0.74	122	123	-0.40	131	132	-0.42	1907	1915	150
-0.75	96	97	-0.90	105	106	-0.45	1520	1527	200
-0.32	81	81	-0.27	91	91	-0.51	1296	1303	250

ניתן לראות, שהסטיות אינן עולות על 1%. לדעתנו, הסטיות נובעות משיטות האינטרפולציה השונות שנעשו למקדם היבנות. בגרסה האחרונה של התוכנה בוצעה אינטרפולציה ריבועית.

8. סיכום

שודרגה תכנת Block שפותחה בממ"ג שורק בשנת 2004 אשר מיועדת לחישוב מנת הקרינה הנובעת מחומרים רדיואקטיביים טבעיים בחומרי מבנה¹. במודל התוכנה מחולקת הבעיה לסכום של מקורות קטנים בתאים קטנים המהווים את נפח כל הקירות (Voxels), תוך התחשבות בבליעה ובהיבנות שבמעבר פוטונים דרך הקיר, כולל כל זוויות היציאה. התוכנה נכתבה בצורה המאפשרת לחשב מנות בחדר הבנוי מכל הרכב רצוי, בכל עובי רצוי ובכל מיקום של נקודת הבוחן. בנוסף, התוכנה מאפשרת לחשב ריכוזים גבוליים של היסודות הרדיואקטיביים בחומרי המבנה של הקיר, הנקבעים על פי מנות מרביות שניתן לקבען כקלט לתוכנה.

נספח 1 - טבלאות סיכום נתונים

K - 40

	E_γ [MeV]	μ/ρ (Concrete) [kg/cm ²]	$\Gamma(E)$ [Ci-hr/R-m ²]
1	1.461E+00	5.280E-03	8.110E-02

Th - 232

	E_γ [MeV]	μ/ρ (Concrete) [Kg/m ²]	$\Gamma(E)$ [Ci-hr/R-m ²]
1	7.552E-01	7.310E-03	4.106E-03
2	9.945E-02	1.708E-02	6.689E-04
3	7.722E-01	7.220E-03	6.188E-03
4	1.050E-01	1.700E-02	8.745E-04
5	8.355E-01	6.960E-03	7.532E-03
6	1.630E+00	5.000E-03	1.568E-02
7	8.995E-02	1.850E-02	9.910E-04
8	4.095E-01	9.500E-03	4.512E-03
9	1.291E-01	1.525E-02	1.847E-03
10	3.276E-01	1.039E-02	5.439E-03
11	9.335E-02	1.799E-02	1.680E-03
12	1.588E+00	5.060E-03	2.909E-02
13	2.702E-01	1.123E-02	5.027E-03
14	9.478E-01	6.560E-03	2.016E-02
15	2.093E-01	1.233E-02	4.792E-03
16	4.630E-01	9.040E-03	1.060E-02
17	7.947E-01	7.110E-03	1.899E-02
18	9.646E-01	6.490E-03	2.595E-02
19	3.383E-01	1.027E-02	1.985E-02
20	9.691E-01	6.480E-03	8.321E-02
21	9.111E-01	7.070E-03	1.304E-01
22	8.426E-02	1.994E-02	5.267E-04
23	2.410E-01	1.176E-02	4.917E-03
24	3.001E-01	1.070E-02	5.281E-03
25	8.730E-02	1.890E-02	3.624E-03
26	7.488E-02	2.187E-02	4.136E-03
27	7.711E-02	2.105E-02	7.171E-03
28	2.386E-01	1.180E-02	5.504E-02
29	7.855E-01	7.160E-03	7.991E-03
30	1.621E+00	5.020E-03	2.302E-02

31	7.272E-01	7.440E-03	4.444E-02
32	8.490E-02	1.925E-02	2.417E-04
33	7.631E-01	7.270E-03	2.333E-03
34	7.280E-02	2.262E-02	2.762E-04
35	7.497E-02	2.182E-02	4.805E-04
36	2.774E-01	1.110E-02	3.517E-03
37	8.604E-01	6.870E-03	2.000E-02
38	5.108E-01	8.700E-03	2.050E-02
39	5.831E-01	8.200E-03	9.177E-02
40	2.615E+00	3.970E-03	0.487E+00

Ra - 226

	E_{γ} [MeV]	$\mu/\rho(\text{Concrete})$ [kg/m ²]	$\Gamma(E)$ [Ci-hr/ R-m ²]
1	1.862E-01	1.291E-02	3.155E-03
2	7.859E-01	7.160E-03	4.448E-03
3	5.323E-02	3.326E-02	3.039E-04
4	8.730E-02	1.890E-02	2.105E-03
5	7.482E-02	2.182E-02	2.401E-03
6	2.150E-01	1.223E-02	8.320E-03
7	7.711E-02	2.109E-02	4.167E-03
8	2.952E-01	1.050E-02	2.935E-02
9	3.519E-01	1.014E-02	6.765E-02
10	1.661E+00	4.960E-03	9.908E-03
11	2.119E+00	4.380E-03	1.285E-02
12	8.062E-01	7.090E-03	5.137E-03
13	1.402E+00	5.420E-03	1.007E-02
14	1.281E+00	5.710E-03	9.795E-03
15	2.448E+00	4.060E-03	1.972E-02
16	6.655E-01	7.750E-03	5.394E-03
17	1.155E+00	6.000E-03	1.013E-02
18	1.847E+00	4.920E-03	1.997E-02
19	1.509E+00	5.190E-03	1.731E-02
20	1.408E+00	5.420E-03	1.809E-02
21	1.730E+00	4.860E-03	2.654E-02
22	9.341E-01	6.600E-03	1.548E-02
23	1.158E+00	6.000E-03	2.098E-02
24	1.378E+00	5.480E-03	2.922E-02
25	2.204E+00	4.310E-03	5.674E-02
26	7.684E-01	7.240E-03	2.002E-02
27	1.238E+00	5.800E-03	3.800E-02
28	1.120E+00	6.080E-03	8.766E-02
29	1.765E+00	4.810E-03	1.444E-01
30	6.093E-01	8.040E-03	1.457E-01
31	4.650E-02	4.303E-02	9.729E-04

נספח 2 - טבלאות B.F.

R(mfp)	Energy(MeV)										
	0.02	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.5	1	1	1.89	1.81	1.73	1.65	1.57	1.55	1.52	1.5	1.47
1	1.15	1.89	2.78	2.65	2.53	2.4	2.27	2.21	2.15	2.1	2.04
2	1.22	2.58	4.63	4.48	4.33	4.18	4.03	3.87	3.71	3.56	3.4
3	1.28	3.26	6.63	6.54	6.45	6.35	6.26	5.95	5.64	5.34	5.03
4	1.34	3.93	8.8	8.84	8.89	8.93	8.97	8.46	7.95	7.44	6.93
5	1.4	4.61	11.1	11.38	11.65	11.93	12.2	11.43	10.65	9.88	9.1
6	1.45	5.44	13.6	14.18	14.75	15.33	15.9	14.8	13.7	12.6	11.5
7	1.5	6.28	16.3	17.28	18.25	19.23	20.2	18.7	17.2	15.7	14.2
8	1.55	7.11	19.2	20.65	22.1	23.55	25	23.04	21.08	19.12	17.16
10	1.64	8.78	25.6	28.3	31	33.7	36.4	33.26	30.12	26.98	23.84
15	1.87	16.24	44.9	52.58	60.25	67.92	75.6	67.92	60.24	52.56	44.88
20	2.1	23.7	69.1	84.58	100.05	115.53	131	116.22	101.44	86.66	71.88
25	2.32	37.95	97.9	124.18	150.45	176.73	203	178.42	153.84	129.26	104.68
30	2.53	52.2	131	170.75	210.5	250.25	290	253.2	216.4	179.6	142.8
35	2.74	78.1	170	227.25	284.5	341.75	399	346	293	240	187
40	2.95	104	214	291.25	368.5	445.75	523	451.2	379.4	307.6	235.8

R(mfp)	Energy(MeV)										
	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
0.5	1.45	1.44	1.43	1.426	1.418	1.41	1.402	1.394	1.386	1.378	1.37
1	1.98	1.96	1.94	1.917	1.896	1.875	1.854	1.833	1.812	1.791	1.77
2	3.24	3.18	3.12	3.063	3.004	2.945	2.886	2.827	2.768	2.709	2.65
3	4.72	4.61	4.5	4.384	4.272	4.16	4.048	3.936	3.824	3.712	3.6
4	6.42	6.24	6.06	5.877	5.696	5.515	5.334	5.153	4.972	4.791	4.61
5	8.33	8.07	7.8	7.535	7.27	7.005	6.74	6.475	6.21	5.945	5.68
6	10.4	10.04	9.68	9.32	8.96	8.6	8.24	7.88	7.52	7.16	6.8
7	12.7	12.23	11.75	11.281	10.808	10.335	9.862	9.389	8.916	8.443	7.97
8	15.2	14.6	14	13.394	12.792	12.19	11.588	10.986	10.384	9.782	9.18
10	20.7	19.8	18.9	18	17.1	16.2	15.3	14.4	13.5	12.6	11.7
15	37.2	35.34	33.48	31.62	29.76	27.9	26.04	24.18	22.32	20.46	18.6
20	57.1	53.99	50.88	47.77	44.66	41.55	38.44	35.33	32.22	29.11	26
25	80.1	75.48	70.86	66.24	61.62	57	52.38	47.76	43.14	38.52	33.9
30	106	99.62	93.24	86.86	80.48	74.1	67.72	61.34	54.96	48.58	42.2
35	134	125.69	117.38	109.07	100.76	92.45	84.14	75.83	67.52	59.21	50.9
40	164	153.58	143.16	132.74	122.32	111.9	101.48	91.06	80.64	70.22	59.8

R(mfp)	Energy(MeV)										
	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3	
0.5	1.366	1.362	1.358	1.354	1.35	1.346	1.342	1.338	1.334	1.33	
1	1.76	1.75	1.74	1.73	1.72	1.71	1.7	1.69	1.68	1.67	
2	2.623	2.596	2.569	2.542	2.515	2.488	2.461	2.434	2.407	2.38	
3	3.549	3.498	3.447	3.396	3.345	3.294	3.243	3.192	3.141	3.09	
4	4.533	4.456	4.379	4.302	4.225	4.148	4.071	3.994	3.917	3.84	
5	5.573	5.466	5.359	5.252	5.145	5.038	4.931	4.824	4.717	4.61	
6	6.66	6.52	6.38	6.24	6.1	5.96	5.82	5.68	5.54	5.4	
7	7.793	7.616	7.439	7.262	7.085	6.908	6.731	6.554	6.377	6.2	
8	8.965	8.75	8.535	8.32	8.105	7.89	7.675	7.46	7.245	7.03	
10	11.401	11.102	10.803	10.504	10.205	9.906	9.607	9.308	9.009	8.71	
15	18.05	17.5	16.95	16.4	15.85	15.3	14.75	14.2	13.65	13.1	
20	25.17	24.34	23.51	22.68	21.85	21.02	20.19	19.36	18.53	17.7	
25	32.76	31.62	30.48	29.34	28.2	27.06	25.92	24.78	23.64	22.5	
30	40.72	39.24	37.76	36.28	34.8	33.32	31.84	30.36	28.88	27.4	
35	49.05	47.2	45.35	43.5	41.65	39.8	37.95	36.1	34.25	32.4	
40	57.56	55.32	53.08	50.84	48.6	46.36	44.12	41.88	39.64	37.4	

נספח 3 - תכנת Block2.0

להלן הטקסט הראשי של התכנה בצירוף 6 פונקציות בהן היא משתמשת

```
% Main of Block2.0
% התוכנה מחשבת ריכוזים גבוליים של היסודות הר"א בזומרי המבנה, בהינתן
% מנה שנתית מרבית מוגדרת, במרכז החדר
clc
clear all
close all
t0=fix(clock); % זמן תחילת ההרצה
fid=fopen('BLOCK2_Results.out','w'); % יצירת קובץ תוצאות
fprintf(fid,'Date: %2i.%2i.%2i Time: %2i:%2i:%2i\n',t0);
disp('*****')
disp('* Program BLOCK2.0 *')
fprintf('* Date: %2i.%2i.%2i Time: %2i:%2i:%2i *\n',t0);
disp('*****')
disp(' ')
disp('Dimensions of room:')
L=input('enter length [m] :'); % מידות החדר.
B=input('enter width [m] :'); % רוחב
H=input('enter height [m] :'); % גובה
disp(' ')
Xs=L/2; % קואורדינטות "נקודת ההתעניינות"
Ys=B/2; % במערכת הגלובלית
Zs=H/2;

disp('What do you want to calculate?')
disp('For dose from a whole room - press "d"')
disp('For dose from a single wall - press "w"')
disp('For calculation of coefficients - press "c"')
choice=input(' ', 's');
while (choice~='c' && choice~='d' && choice~='w') % בדיקת קלט
    disp(' ')
    disp('Error. Please enter "c" or "w" or "d"')
    disp('For dose from specific room - press "d"')
    disp('For dose from a single wall - press "w"')
    disp('For calculate of coefficients - press "c"')
    choice=input(' ', 's');
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if (choice=='d' || choice=='w') % חישוב מנה מקיר או מחדר שלם
    b=input('enter average thickness of walls/floor [cm] : ');
    b=b/100; % מעבר למטרים
    % גודל תיבה בודדת
    disp('Default size of single voxel is 5x5xthickness/10 [cm]')
    ans1=input('Do you want to change default settings of single voxel
press "y"/"n" : ', 's');
    if ans1=='y'
        voxel
        Lvoxel=input('enter length of voxel [cm] :')/100; % מידות
        Hvoxel=input('enter height of voxel [cm] :')/100; % גובה
```

```

        bvoxel=input('enter width of voxel [cm] :')/100; % רוחב voxel
    else
        Lvoxel=0.05; % אורך תיבה
        Hvoxel=0.05; % גובה תיבה
        bvoxel=b/10; % עובי תיבה
    end
    CmRa=input('enter concentration of Ra-226 [Bq/kg] : ');%
    (Bq/kg) ריכוז נמדד של רדיואיזוטופ ספציפי, בקיר
    CmTh=input('enter concentration of Th-232 [Bq/kg] : ');
    CmK= input('enter concentration of K-40 [Bq/kg] : ');
    e=input('enter emanation rate [%] : ')/100;
    % מקדם אמנציה
    ro=input('enter average density of walls [kg/m^3] : ');
    % צפיפות
    disp('Default value of reduction coefficient of openings is 94%')
    % מקדם פתחים
    ans1=input('Do you want to change it? press "y"/"n" : ','s');
    if ans1=='y'
        Fk=input('enter reduction coefficient of openings [%] : ');
    else
        Fk=0.94;
    end

    if (choice=='d')
        fprintf('\nworking...\n\n');

    [D_K,D_Ra,D_Th]=Droom(L,B,H,b,Xs,Ys,Zs,Lvoxel,Hvoxel,bvoxel,ro,CmK,CmRa,CmTh,Fk); % חישוב מנת הקרינה בחדר מכל אחד מהרדיואיזוטופים
        disp('          Room dose ')
        fprintf(fid,'\n          Room dose:\n');
        Sk=2*(L*H+B*H+L*B); % שטח מעטפת החדר
    else % wall dose
        L=input('enter length of wall[m] : '); % אורך
        H=input('enter height of wall[m] : '); % גובה
        Sk=L*H; % שטח קיר
        fprintf('\nworking...\n\n')

    [D_k,D_ra,D_th]=Dside(B,H,b,Xs,Ys,Zs,Lvoxel,Hvoxel,bvoxel,ro,CmK,CmRa,CmTh);
        D_K=4*D_k*42630*Fk; % רבע קיר כפול 4
        D_Ra=4*D_ra*42630*Fk; % ההנחות הן מטעמי סימטריה
        D_Th=4*D_th*42630*Fk;
        disp('          Wall/floor dose')
        fprintf(fid,'\n          Wall/floor dose \n');
    end

    V=L*B*H; % נפח החדר
    vent=0.5; % מספר החלפות אוויר בשעה
    D_Rn=0.0000646*(Sk/V)*e*ro*b*CmRa/vent; % נוסחא 1.17
    D_Ra=(1-e)*D_Ra; % הפחתת האמנציה
    D_total=D_K+D_Ra+D_Th;
    disp(' ')
    fprintf(fid,'Total gamma dose : %10.5f [mSv/yr] \n', D_total);
    fprintf(fid,'Dose from Ra-226 : %10.5f [mSv/yr] \n', D_Ra);
    fprintf(fid,'Dose from Th-232 : %10.5f [mSv/yr] \n', D_Th);
    fprintf(fid,'Dose from K-40 : %10.5f [mSv/yr] \n', D_K);
    fprintf(fid,'Dose from Rn-222 : %10.5f [mSv/yr] \n', D_Rn);
    fprintf(fid,'Total gamma dose : %10.5f [mSv/yr] \n', D_total);
    fprintf(fid,'Dose from Ra-226 : %10.5f [mSv/yr] \n', D_Ra);

```



```

fprintf('Dose from Th-232      : %10.5f [mSv/yr] \n', D_Th)
fprintf('Dose from K-40       : %10.5f [mSv/yr] \n', D_K)
fprintf('Dose from Rn-222     : %10.5f [mSv/yr] \n', D_Rn)
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if (choice=='c')          % חישוב מנה מחדר הנקלט
    disp('Default size of single voxel is 5x5x1 [cm] (for thickness
of walls of 10cm)')      % גודל תיבה בודדת
    b=0.1;                % עובי הקיר
    ans1=input('Do you want to change default settings of single voxel
press "y"/"n" : ','s');
    if ans1=='y'
        lvoxel=input('enter length of voxel [cm] :')/100;      % מידות
voxel
        Hvoxel=input('enter height of voxel [cm] :')/100;      % גובה
        bvoxel=input('enter width of voxel [cm] :')/100;      % רוחב
    else
        lvoxel=0.05;      % אורך תיבה
        Hvoxel=0.05;      % גובה תיבה
        bvoxel=b/10;      % עובי תיבה
    end

CmK= 1;          % ריכוז נמדד של רדיואיזוטופ ספציפי, בקיר (Bq/kg)
CmRa=1;
CmTh=1;

disp('Default value of reduction coefficient of openings is 94 %')
% מקדם פתחים
ans1=input('Do you want to change it? press "y"/"n" : ','s');
if ans1=='y'
    Fk=input('enter reduction coefficient of openings [%] : ');
else
    Fk=0.94;
end

Dref=1.1;        % מנת קרינת הרקע גאמה+רדון
disp('Default value of reference dose is 1.1 mSv/y')      %
% מקדם פתחים
ans1=input('Do you want to change it? press "y"/"n" : ','s');
if ans1=='y'
    Dref=input('enter reference dose [mSv/y] : ');
end

Db=0.3;          % התוספת המרבית של מנת הקרינה האפקטיבית השנתית מקרינת גמא
ורדון שאפשר לקבל ממוצר בניה כלשהו, בהשוואה למנת הקרינה האפקטיבית
המתקבלת ממוצר הייחוס (mSv/y).
disp('Default value of extra dose is 0.3 mSv/y')          % מקדם פתחים
ans1=input('Do you want to change it? press "y"/"n" : ','s');
if ans1=='y'
    Dref=input('enter extra dose [mSv/y] : ');
end

D_total=Dref+Db; % סה"כ המנה המותרת

ro=[100,200,300,400,500,1000,1500,2000,2500,3000,3500,4000,4500,5000,
5500,6000,7000,8000,9000,10000];
n=length(ro);

```

```

fprintf(fid, '          Coefficients:\n');
fprintf('\n          Coefficients:\n');
for i=1:n

[D_K,D_Ra,D_Th]=Droom(L,B,H,b,Xs,Ys,Zs,Lvoxel,Hvoxel,bvoxel,ro(i),CmK
,CmRa,CmTh,Fk); % חישוב מנת הקרינה בחדר מכל אחד מהרדיואיזוטופים
Cmax_K(i)=D_total/D_K; % ריכוזים מקסימליים מותרים
Cmax_Ra(i)=D_total/D_Ra;
Cmax_Th(i)=D_total/D_Th;
V=L*B*H; % נפח החדר
vent=0.5; % מספר החלפות אוויר בשעה
Sk=2*(L*H+B*H+L*B); % שטח מעטפת החדר
e=1;
D_Rn=0.0000646*(Sk/V)*e*ro(i)*b*CmRa/vent; % נוסחא 1.17
Cmax_Rn(i)=D_total/D_Rn;
masa_per_sqr_mtr(i)=ro(i)*b; % שטח מסה ליחידת
fprintf('density density/area K-40 Ra-226
Th-232 Rn-222 \n')
format short g

[,masa_per_sqr_mtr(i),Cmax_K(i),Cmax_Ra(i),Cmax_Th(i),Cmax_Rn(i)]
end
masa_per_sqr_mtr1=masa_per_sqr_mtr'; % שחלוף
Cmax_Ra1=Cmax_Ra';
Cmax_K1=Cmax_K';
Cmax_Th1=Cmax_Th';
Cmax_Rn1=Cmax_Rn';
fprintf(fid, ' density/area K-40 Ra-226
Th-232 Rn-222 \n');
fprintf('density/area K-40 Ra-226 Th-232
Rn-222 \n')
for i=1:n
fprintf(fid, ' %8i %8g %20g
%10g %10g
\n',masa_per_sqr_mtr1(i),Cmax_K1(i),Cmax_Ra1(i),Cmax_Th1(i),Cmax_Rn1(i));
fprintf(' %5i %8g %10g %10g %10g
\n',masa_per_sqr_mtr1(i),Cmax_K1(i),Cmax_Ra1(i),Cmax_Th1(i),Cmax_Rn(i))
end
end

t1=fix(clock) % זמן סוף ההרצה\
dt=t1-t0 % משך ההרצה
pause
fclose(fid);

פונקציה 1:
function
[D_K,D_Ra,D_Th]=Droom(L,B,H,b,Xs,Ys,Zs,Lvoxel,Hvoxel,bvoxel,ro,CmK,Cm
Ra,CmTh,Fk)
% חישוב מנת הקרינה בחדר ע"י זימון פונקציה של פאה בודדת תוך התאמת
פרמטרים
% רצפה. הפונקציית מחזירה את מנות הקרינה לפי כל אחד משלושת\תקרה\לקיר
% היסודות הר"א
% קיצור דרך קטן שאני עושה כדי להאיץ את התוכנית
% אני מניח שהקירות סימטריים ביחס למרכז וכך גם התקרה והרצפה

[D_k(1),D_ra(1),D_th(1)]=Dside(B,H,b,Xs,Ys,Zs,Lvoxel,Hvoxel,bvoxel,ro
,CmK,CmRa,CmTh); % west wall

```

```

t_first_wall=fix(clock)
%[D_k(2),D_ra(2),D_th(2)]=Dside(B,H,b,L-Xs,B-
Ys,Zs,Lvoxel,Hvoxel,bvoxel,ro,CmK,CmRa,CmTh); % east wall
%t_second_wall=fix(clock)
[D_k(3),D_ra(3),D_th(3)]=Dside(L,H,b,Ys,L-
Xs,Zs,Lvoxel,Hvoxel,bvoxel,ro,CmK,CmRa,CmTh); % south wall
t_third_wall=fix(clock)
%[D_k(4),D_ra(4),D_th(4)]=Dside(L,H,b,B-
Ys,Xs,Zs,Lvoxel,Hvoxel,bvoxel,ro,CmK,CmRa,CmTh); % north wall
%t_fourth_wall=fix(clock)

[D_k(5),D_ra(5),D_th(5)]=Dside(B,L,b,Zs,Xs,Ys,Lvoxel,Hvoxel,bvoxel,ro
,CmK,CmRa,CmTh); % bottom
t_floor=fix(clock)
%[D_k(6),D_ra(6),D_th(6)]=Dside(B,L,b,H-
Zs,Ys,Xs,Lvoxel,Hvoxel,bvoxel,ro,CmK,CmRa,CmTh); % top
%t_top=fix(clock)

% סכימה של כל המנות והכפלה במקדם פתחים ומעבר יחידות
D_K=8*(D_k(1)+D_k(3)+D_k(5))*42630*Fk; % רבע קיר כפול 4 וכפול 2
(הקירות, רבע רצפה כפול 4 כפול 2)
D_Ra=8*(D_ra(1)+D_ra(3)+D_ra(5))*42630*Fk; % ההנחות הן מטעמי
סימטריה
D_Th=8*(D_th(1)+D_th(3)+D_th(5))*42630*Fk;
End

:פונקציה 2:
% הפונקציה מקבלת מידות של פאה בחדר, צפיפות, גודל קוביה בודדת,
% נקודת
% ההתעניינות" מקדם פתחים ואת כמיות הרדיואיזוטופים לפי הא"ב"
function
[D_K,D_Ra,D_Th]=Dside(L,H,b,Xs,Ys,Zs,Lvoxel,Hvoxel,bvoxel,ro,CmK,CmR,
CmTh)
sqr=@(a) a.^2; % "בריבוע"
K=40;
D_K=0;
Ra=226; % סימון מוסכם שלי לרדיום
D_Ra=0;
Th=232;
D_Th=0;
dV=Lvoxel*Hvoxel*bvoxel; % נפח תיבה
for x=(-b+bvoxel/2):bvoxel:(-bvoxel/2) % לולאה שרצה על עומק
הקיר
fprintf('.')
for y=(Lvoxel/2):Lvoxel:(L/2-Lvoxel/2) % לולאה שרצה על
אורך הקיר
for z=(Hvoxel/2):Hvoxel:(H/2-Hvoxel/2) % לולאה שרצה על
גובה הקיר
Dsqr=sqr(Xs-x)+sqr(Ys-y)+sqr(Zs-z); % בריבוע D
d=(sqrt(Dsqr)*(-x))/(Xs-x); % חישוב
D_K=D_K+(CmK*ro*dV
)/(Dsqr*3.7*10^10))*SigmaGamma(K,ro,d); % חישוב מנת הקריה המתקבלת
מכל אחד מהיסודות הרדיואקטיביים

D_Ra=D_Ra+((CmRa*ro*dV)/(Dsqr*3.7*10^10))*SigmaGamma(Ra,ro,d);

D_Th=D_Th+((CmTh*ro*dV)/(Dsqr*3.7*10^10))*SigmaGamma(Th,ro,d);
end
end

```

```

end
end

:3 פונקציה
function [Sigma]=SigmaGamma (RadioIzotop,ro,d) % שמחשבת סך פונקציה
הכל פליטות האנרגיה מקרינת גמא מטך כל הרדיואיזוטופים בכל שרשרת של
רדיואיזוטופ מסוים ומרחק נתון של מסלול בתוך הקיר
load B_ER.txt
if RadioIzotop==40 % סימון מוסכם
שלי לאשלגן
load Gamma_B_mium_K.txt % טעינת קובץ הקבועים
של אשלגן
Gamma_B_mium=Gamma_B_mium_K; % הצבת נתוני האשלגן בנתונים
הכללים
end
if RadioIzotop==226 % סימון מוסכם
שלי לרדיום
load Gamma_B_mium_Ra.txt
Gamma_B_mium=Gamma_B_mium_Ra;
end
if RadioIzotop==232 % סימון מוסכם
שלי לטוריום
load Gamma_B_mium_Th.txt
Gamma_B_mium=Gamma_B_mium_Th;
end
Sigma=0;
[N,m]=size(Gamma_B_mium);
for i=1:N % סכימת מכפלות קבועי ונתוני רדיואיזוטופ ספציפי
R=Gamma_B_mium(i,3)*ro*d; % calculation of R
B=B_E_R(RadioIzotop,i,R,B_ER); % calculation of B
Sigma=Sigma+Gamma_B_mium(i,1)*B*exp(-R);
end
end
end

```

```

:4 פונקציה
function [B]=B_E_R(RadioIzotop,i,R,B_ER)
if RadioIzotop==40 % סימון מוסכם
שלי לאשלגן
load E_K.txt % טעינת קובץ
הקבועים של אשלגן
E=E_K(i); % הצבת נתוני
האשלגן בנתונים הכללים
end
if RadioIzotop==226 % סימון מוסכם
שלי לרדיום
load E_Ra.txt
E=E_Ra(i);
end
if RadioIzotop==232 % סימון מוסכם
שלי לטוריום
load E_Th.txt
E=E_Th(i);
end
[m,n]=size(B_ER); % גבוליים R מציאת ערכי
j=3;
for j=3:m
if R<=B_ER(j,1)
break

```

```

        end
    end
    R1=j-1;
    R2=j;
    R3=j+1;
    l_R=B_ER(R2,1)-B_ER(R1,1);
    l_Ry=R-B_ER(R1,1);
    j=3;
    for j=3:n % מציאת ערכי אנרגיה גבוליים
        if E<=B_ER(1,j)
            break
        end
    end
    E1=j-1;
    E2=j;
    l_E=B_ER(1,E2)-B_ER(1,E1);
    l_Ex=E-B_ER(1,E1);
    if R3<=18

B1=square_interpolation(R,B_ER(R1,1),B_ER(R1,E1),B_ER(R2,1),B_ER(R2,E
1),B_ER(R3,1),B_ER(R3,E1));

B2=square_interpolation(R,B_ER(R1,1),B_ER(R1,E2),B_ER(R2,1),B_ER(R2,E
2),B_ER(R3,1),B_ER(R3,E2));
    else
        B1=linear_interpolation(B_ER(R1,E1),B_ER(R1,E2),l_R,l_Ry);
% בעזרת אינטרפולציה ליניארית B מציאת
        B2=linear_interpolation(B_ER(R2,E1),B_ER(R2,E2),l_R,l_Ry);
    end

    B=linear_interpolation(B1,B2,l_E,l_Ex);
    if B<1
        B=1;
    End

פונקציה 5: אינטרפולציה ליניארית:
function [x]=linear_interpolation(a,b,l,l_a) % הפונקציה מקבלת 2
ביהנהם ומרחק עד נקודת הבינום המבושת ומבצעת אינטפולציה ערכים את המרחק
ליניארית לערך הביניים המבוקש
    x=a+l_a*(b-a)/l; % משולשים דומים

פונקציה 6: אינטרפולציה ריבועית:
function [Y]=square_interpolation(X,x1,y1,x2,y2,x3,y3)
Y=y1+((y2-y1)/(x2-x1))*(X-x1)+((y3-y2)/(x3-x2)-(y2-y1)/(x2-x1))*(X-
x1)*(X-x2)/(x3-x1);
end

```

נספח 4 - דוגמאות לחישוב קרינת רקע (מנת הייחוס למודל)

דוגמאות לערכי ריכוזי היסודות הרדיואקטיביים השכיחים במוצרי בנייה בארץ ניתנים בטבלה להלן:

חומר הבניה	צפיפות	Ra-226	Th-232	K-40
יחידות	kg/m ³	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg
בלוק בטון תאי - אוטוקלב	500	10	6	97
בלוק בטון חלול	1250	45	6	75
בלוק בטון חלול	1600	45	6	75
בלוק פומיס חלול	750	53	60	866
בטון	2350	30	15	50
בטון כולל גימור טרצו	2350	30	15	50
קרמיקה	2300	243	76	1130
מלט צמנט	2000	66	40	140
חול מהודק	1600	12	4	51

על סמך ערכים אלו ועל סמך **חלופות לחדר ייחוס** המוצגים בנספח 5, בעזרת התוכנה המתוארת כאן בלוק חושבו מנות קרינת הרקע בחדרים סטנדרטיים לפי החלופות הנ"ל. לדוגמה, ערכי מנת קרינת הגמא מוצגים בטבלה להלן:

מספר החלופה	תיאור החלופה	קירות חוץ	קירות פנים	רצפה/ תקרה	מנת קרינת הגמא השנתית [mSv/y]
1	חדר פינתי עם קירות חוץ עשויים בטון תאי מאושפר באוטוקלב	1ח	1פ	2רת	0.1607
2	חדר פינתי עם קירות חוץ עשויים מבלוקי בטון חלולים (1250 ק"ג למ"ק)	2ח	1פ	2רת	0.1862
3	חדר פינתי עם קירות חוץ עשויים מבלוקי בטון חלולים עם אגרגט פומיס (750 ק"ג למ"ק)	3ח	1פ	2רת	0.2405
4	חדר לא פינתי עם קירות חוץ מבלוקי פומיס	3ח	1פ	2רת	0.2210
5	חדר פינתי עם קירות חוץ לפי חלופה 4ח	4ח	1פ	2רת	0.1902
6	חדר פינתי עם קירות חוץ לפי חלופה 5ח	5ח	1פ	2רת	0.1928
7	ממ"ד עם קירות בעובי 20 ס"מ	20 ס"מ בטון	20 ס"מ בטון	2רת	0.1877

* חלופת חדרי ממ"ד נוספה לחלופות המובאות בנספח 5

יש לציין שמנת הקרינה תלויה בערכי הריכוז בחומר ובעובי המוצר. למשל, ערכי המנה בחדר ממ"ד הבנוי מקירות בעובי ממוצע של 25 ס"מ מבטון בעל תכולת רדיום, תוריום ואשלגן 50, 15 ו-50 בקרל לק"ג, ומקדם אמנציה של 10% ניתנים בטבלה להלן:

מנה מרדיום [mSv/y]	מנה מתוריום [mSv/y]	מנה מאשלגן [mSv/y]	מנה מראדון [mSv/y]	סה"כ מנת הרקע [mSv/y]
0.16	0.07	0.02	0.80	1.1

בהנחה שמנת הרקע הוא 1.1 mSv/y , המקדמים לחישוב מדד הקרינה I בתקן

$$I = (1 - e) \frac{[^{226}\text{Ra}]}{A(^{226}\text{Ra})} + \frac{e[^{226}\text{Ra}]}{A(^{222}\text{Rn})} + \frac{[^{232}\text{Th}]}{A(^{232}\text{Th})} + \frac{[^{40}\text{K}]}{A(^{40}\text{K})}$$

יהיו כלהלן :

$A(^{226}\text{Ra})$	$A(^{222}\text{Rn})$	$A(^{232}\text{Th})$	$A(^{40}\text{K})$	מסה ליחידת שטח $\rho \delta$ (ק"ג למ"ר)
10437	522.4	7483	109290	10
5243	261.2	3760	55088	20
3516	174.1	2522	37038	30
2656	130.6	1905	28026	40
2142	104.5	1537	22630	50
1130	52.2	811	11906	100
804	34.8	577	8403	150
649	26.1	465	6701	200
560	20.9	400	5717	250
504	17.4	359	5089	300
466	14.9	332	4665	350
440	13.1	312	4365	400
421	11.6	298	4148	450
407	10.4	287	3986	500
397	9.5	279	3865	550
389	8.7	272	3772	600
378	7.5	264	3645	700
371	6.5	258	3568	800

נספח 5 - חלופות עבור חדר סטנדרטי בישראל

07/01/2004

לכבי: חברי הוועדה המרכזית לבניין.

הנדון: חלופות לחדר ייחוס עבור עבודת וועדת המומחים לת"י 5098

מצ"ב הצעה לחלופות עבור חדר סטנדרטי, עבור עבודתה של וועדת המומחים לת"י 5098, שיגדיר את החלופות השכיחות ביותר הקיימות כיום בבנייה הרגילה בישראל. ההצעה הוכנה יחד עם פרופ"ח קונסטנטין קובלר שהוא חבר הוועדה הנ"ל. כדי שחלופות אלה תהיינה מקובלות על כל חברי הוועדה, אודה לכם על העברת הערותיכם בפקס או בדוא"ל.

בכבוד רב



רחל.

חדר סטנדרטי:

מידות: אורך – 3.0 מ', רוחב – 3.0 מ', גובה – 2.7 מ' (שטח מעטפת: 50.4 מ"ר).
חלון: 1.2X1.2 מ' (שטח: 1.44 מ"ר), ינוכה משטח הקירות בעלי החתך לפי קיר חוץ.
דלת: 2.0X0.8 מ' (שטח: 1.6 מ"ר), ינוכה משטח הקירות בעלי החתך לפי קיר פנים.

יש לבדוק כל חלופה של רכיבים שלהלן עבור:
 א. חדר הכולל קיר חוץ אחד עם חלון, קיר פנים אחד עם דלת, ו-2 קירות פנים ללא פתחים.
 ב. חדר הכולל קיר חוץ אחד עם חלון, קיר חוץ אחד ללא חלון, קיר פנים אחד עם דלת, וקיר פנים אחד ללא פתחים.

מבנה האלמנטים החליפיים

קירות חוץ:

חלופה מס. 1:
קיר חוץ (מבפנים החוצה) ב- 85% משטח הקיר: 1 ס"מ טיח פנים סיד צמנט (1800 ק"ג למ"ק), 20 ס"מ בלוקי בטון תאי מאושפר באוטוקלב (500 ק"ג למ"ק), 2 ס"מ טיח חוץ (2000 ק"ג למ"ק).
רכיבי בטון בקירות החוץ ב- 15% משטח הקיר: 1 ס"מ טיח פנים סיד צמנט (1800 ק"ג למ"ק), 20 ס"מ בטון (2350 ק"ג למ"ק).

חלופה מס. 2:
קיר חוץ (מבפנים החוצה) ב- 85% משטח הקיר: 1 ס"מ טיח פנים סיד צמנט (1800 ק"ג למ"ק), 20 ס"מ בלוקי בטון חלולים (1250 ק"ג למ"ק), 2 ס"מ טיח חוץ (2000 ק"ג למ"ק).
רכיבי בטון בקירות החוץ ב- 15% משטח הקיר: 1 ס"מ טיח פנים סיד צמנט (1800 ק"ג למ"ק), 20 ס"מ בטון (2350 ק"ג למ"ק).

חלופה מס. 3:

קיר חוץ (מבפנים החוצה) ב- 85% משטח הקיר: 1 ס"מ טיח פנים סיד צמנט (1800 ק"ג למ"ק), 20 ס"מ בלוקי בטון חלולים עם אגרגט פומיס (750 ק"ג למ"ק), 2 ס"מ טיח חוץ (2000 ק"ג למ"ק).
רכיבי בטון בקירות החוץ ב- 15% משטח הקיר: 1 ס"מ טיח פנים סיד צמנט (1800 ק"ג למ"ק), 20 ס"מ בטון (2350 ק"ג למ"ק).

חלופה מס. 4:

קיר חוץ (מבפנים החוצה) 100% שטח הקיר: 12 ס"מ בטון (2350 ק"ג למ"ק), 3 ס"מ פוליסטירן מוקצף, 5 ס"מ בטון (2350 ק"ג למ"ק), 2 ס"מ אבן גיר (2600 ק"ג למ"ק).

חלופה מס. 5:

קיר חוץ (מבפנים החוצה) 100% שטח הקיר: 1.25 ס"מ לוח גבס (1000 ק"ג למ"ק), 5 ס"מ צמר זכוכית, 15 ס"מ בטון (2350 ק"ג למ"ק), 2 ס"מ אבן גיר (2600 ק"ג למ"ק).

קירות פנים:

חלופה מס. 1פ:

קיר פנים ב- 85% משטח הקיר: 1 ס"מ טיח פנים סיד צמנט (1800 ק"ג למ"ק), 7 ס"מ בלוק בטון חלול (1600 ק"ג למ"ק), 1 ס"מ טיח פנים סיד צמנט (1800 ק"ג למ"ק).
רכיבי בטון בקיר הפנים ב- 15% משטח קירות פנים וחוץ: 1 ס"מ טיח פנים סיד צמנט (1800 ק"ג למ"ק), 20 ס"מ בטון (2350 ק"ג למ"ק).

חלופה מס. 2פ:

קיר פנים ב- 100% משטח הקיר: 0.3 ס"מ טיח פנים צמנטי (2000 ק"ג למ"ק), 7 ס"מ בטון תאי (2350 ק"ג למ"ק), 0.3 ס"מ טיח צמנט (2000 ק"ג למ"ק).

אלמנטי רצפה/תקרה:

(כל הנתונים הם עבור רצפה - מלמעלה כלפי מטה. עבור התקרה יש לקחת אותן השכבות אך בסדר הפוך).

חלופה רת1:

רצפה: 4 ס"מ בטון (2350 ק"ג למ"ק, כולל גימור טרצו), 2 ס"מ מלט צמנטי (2000 ק"ג למ"ק), 6 ס"מ חול מהודק (1600 ק"ג למ"ק), 14 ס"מ בטון (2350 ק"ג למ"ק), 1 ס"מ טיח סיד צמנט (1800 ק"ג למ"ק).

חלופה רת2:

רצפה: 0.8 ס"מ קרמיקה (2300 ק"ג למ"ק), 2 ס"מ מלט צמנטי (2000 ק"ג למ"ק), 6 ס"מ חול מהודק מעורב בצמנט (1800 ק"ג למ"ק), 14 ס"מ בטון (2350 ק"ג למ"ק), 1 ס"מ טיח סיד צמנט (1800 ק"ג למ"ק).

אלה החלופות השכיחות ביותר, ובמציאות קיים למעשה כל צירוף שלהן.

מקורות מידע

- ¹ 2004 "תכנית בלוק", דו"ח 3440, ממ"ג שורק אורית שינדר
- ² Cember H., Introduction to Health Physics, 2nd edition, 1987
- ³ Chibani O., New Photon Exposure Buildup Factors, Nuclear Science and Engineering: 137, 215-225, 2001
- ⁴ ICRP Publication 65, Protection against Radon-222 at Work, V 23, 1993
- ⁵ ICRU Report 57, Conversion Coefficients for use in Radiological Protection Against External Radiation, 1998
- ⁶ טוביה שלזינגר, שחזור נתוני חישוב מנת הקרינה הנגרמת ע"י גז רדון ובנותיו שמקורם במוצר הבניה והקשר בין אמנציה ואקסהלציה בטבלאות שנמסרו ע"י ממג, לוועדה שעסקה בחיבור תקן 5098 דוח ממ"ג שורק, ינואר 2004,
- ⁷ Shleien B., Lester A., Kent B., Health Physics and Radiological Health, third edition, Williams & Wilkins, USA, 1998
- ⁸ NSRDS-NBS 29, Photon Cross Section, Attenuation Coefficients, and Energy Absorption Coefficients from 10 keV to 100 GeV, J. H. Hubbell, 1969

Program for determination of coefficients of the Standard 5098

Assoc. Professor Konstantin Kovler, Vitaliy Priven and Dr. Yair Shamai

Abstract

All building products made of materials extracted from the Earth crust (sand, stones, cement, bricks etc.) contain natural radioactive elements, the main of which are potassium K^{40} and those belonging to the radioactive chains of radium Ra^{226} and thorium Th^{232} . Typical activity concentrations of these radionuclides in building materials are within a few Bq/kg to hundreds Bq/kg. The annual dose from these radionuclides consists of the two parts: external (gamma) radiation and internal (inhalation) radiation produced by radon and its decay products.

The program described in the current work is a development of the Block program published by the Nuclear Research Center 5 years ago.

The program helps to calculate the annual radiation dose on the basis on occupancy time of 7,000 hours/year inside the buildings, which is absorbed in the certain location in the room of the given dimensions built of the materials with known density and radionuclide content. In addition, the program makes possible calculations of maximum activity concentrations of the natural radionuclides in building products assuming a certain annual radiation dose obtained in the center of the room.