מדינת ישראל
המשרד להגנת הסביבה
אגף מניעת רעש וקרינה

רח' כנפי נשרים 3, ת"ד 34033, ירושלים 95464 ☎ 6495869- 02 🖷 649587002-02
www.sviva.gov.il

י"ב/ניסן/תשס"ט
06 אפריל 2009
גרסה 3

הנחיה 1

מדיניות המשרד בנוגע לטיפול בממצאי בדיקות ראדון

1. כללי

היסוד ראדון (^{222}Rn) הוא גז רדיואקטיבי אציל, חסר ריח, טעם וצבע. בגלל חוסר פעילות כימית עם רוב החומרים, הוא יכול לחדור בקלות מהקרקע לתוך המבנים. ניתן לגלות אותו ולמדוד את ריכוזו רק באמצעות גלאים מיוחדים. הראדון נובע מההתפרקות הרדיואקטיבית של היסוד ראדיום (^{226}Ra), הקיים בכל סוגי הקרקע וכמובן בחומרי בנייה העשויים מאדמה.

בכל בית, אפילו המאוורר ביותר, קיים ראדון, כיוון שכל סוג קרקע וחומר בנייה המכיל אדמה פולט ראדון. על אף הפליטה העצומה של ראדון מהקרקע, בגלל הנפח הענק של האטמוספרה ריכוז הראדון באוויר הפתוח הנו נמוך יחסית, בממוצע 5-10 בקרל/מ"ק. הוא תלוי במזג אוויר, בעונה ובשעה (בדרך כלל עולה בלילה יורד ביום).

ככלל, ריכוז הראדון בבתים, יחסית לאוויר הפתוח, הנו גבוה יותר בגלל רמת אוורור נמוכה יותר. הוא משתנה במשך היממה ובמשך השנה, בגלל שינויים בתנאי הסביבה ובמזג האוויר. הוא גם משתנה מאזור לאזור בגלל הריכוז השונה של ראדיום בקרקע.

חדירת ראדון מהקרקע (דרך אי אטימות של תשתית המבנה) הוא הגורם הראשי לריכוז ראדון לא תקין במבנים. ריכוז יחסית קטן נובע מפליטו מחומרי בניה. בישראל חובה לבדוק פליטת הראדון ממומרי בניה. תקן 5098 "תכולת יסודות רדיואקטיביים טבעיים במוצרי בניה" ממכון התקנים הישראלי, מגביל את פליטת הראדון (אמנציה) ממוצרי בניה המאושרים לבניה, כדי שריכוז ראדון במבנים יהיה תקין, בתנאיי אוורור נורמאליים וללא חדירה משמעותית מהקרקע.

הראדון גורם לחשיפה מתמשכת של הריאות לקרינה מיוננת אלפא, שעלולה לגרום לסרטן. לרוב, מנת הקרינה לא נובעת מהראדון עצמו אלא מבנותיו קצרות החיים. הן נוצרות מהתפרקותו וקיימות באוויר כאטומים חופשיים או כנספחים לחלקיקי אבק. כאשר נושמים את האוויר, חלק מהבנות מגיעות לריאות.

מגדירים את ריכוז הראדון באוויר כקצב התפרקות רדיואקטיבי (או אקטיביות) של אטומי הראדון הנמצאים ביחידת נפח אוויר. מודדים אותו ביחידות של בקרל למטר מעוקב, כאשר בקרל הוא יחידת אקטיביות ומשמעותה התפרקות של אטום ראדון אחד בשנייה.

כדי להגן על האוכלוסייה מפני ראדון קבע המשרד להגנת הסביבה, בהתאם להמלצות הוועדה הבין-לאומית להגנה מקרינה - ICRP [1], כי "רמת הפעולה", דהיינו ריכוז הראדון המרבי המותר בבתי מגורים, תהיה 200 בקרל/מ"ק. כאשר הממוצע השנתי של ריכוז הראדון בחדר, בתנאי מחיה רגילים, עולה על רמת הפעולה, יש לבצע פעולות להקטנתו.

כדי שריכוז הראדון בחדר ייצג את הממוצע השנתי, שניתן להשוות עם רמת הפעולה, יש למדוד אותו במשך 3 חודשים לפחות (באופן מעשי בין 3 ל- 6 חודשים) בתנאי מחיה רגילים.

ריכוז הראדון בבית תלוי בגורמים רבים וביניהם:

1. **הקרקע**: ריכוז הראדיום, פליטת הראדון מהקרקע, לחץ האוויר, טמפרטורה ולחות.
2. **האטמוספרה**: תנועות האוויר, לחץ האוויר, הטמפרטורה, הלחות, מזג האוויר וכו'.
3. **פרטים בבניין**: חומר הבנייה ושיטת הבנייה, עובי הרצפה או הקירות צמודי הקרקע.
4. **פתחים בקרקע**: צנרת מים, גז, ביוב, חשמל, שברים או סדקים ברצפה וכו'.
5. **המפלס במבנה**: מרתף, קומה צמודת קרקע, קומה עליונה.
6. **אטימות המבנה:** אטימות החלונות והדלתות, פתחי אוורור.
7. **הרגלי אוורור**: תדירות פתיחה וסגירה של דלתות וחלונות, הפעלת מערכת האוורור.
8. **חומרי בנייה**: קצב האקסהלציה (כמות הראדון הנפלט מיחידת שטח ביחידת זמן) מהקירות, מהרצפה ומהתקרה, עובי הקירות וכו'.

הסברים נוספים ניתן למצוא בהנחיה מס' 8 .

2. סקרים ראדון בישראל

בשנה 1993 ביצה המכון הגיאולוגי היחד עם המרכז למחקר גרעיני שורק סקר ראדון ביחידות סלע בישראל. הסקר מצא ריכוזים גבוהים של ראדון בסלע מסוג חבורת הר הצופים.

בשנת 1998 ביצע המשרד להגנת הסביבה סקר ראדון ראשון בישראל. בוצעו כ- 1,600 בדיקות ארוכות טווח בחדרי מגורים צמודי קרקע. בהסתמך על עיבוד תוצאות הסקר נקבעו ריכוז ראדון ממוצע של 47 בקרל/מ"ק, וכמה אזורי "תוחלת גבוהה לראדון" (תג"ר). אזור תג"ר (או מועד לראדון) הנו אזור בעל ריכוז ראדון גבוה יותר בקרקע, ולכן באזורים כאלה קיים סיכון רב יותר להימצאות ראדון במבנים. לפי ההגדרה של ICRP [1], זהו אזור שבו לפחות באחוז אחד מהמבנים מצויים ריכוזי ראדון גבוהים פי 10 מהממוצע הארצי. לפי הסקר, האזורים האלו הם: ירושלים, מעלה אדומים, ערד וכרמיאל.

בשנה 1998 ביצע המשרד להגנת הסביבה ביחד עם המכון הגיאולוגי והמרכז למחקר גרעיני שורק סקר של קרינת גמא מהקרקע. הסקר מצא קורלציה בין הקרינה גמא מהקרקע והסלע מסוג חבורת הר הצופים.

בשנה 2006 ביצה המשרד להגנת הסביבה סקר של ריכוז ראדיום (האב של ראדון) בקרקע. מבוסס על הקורלציה בין המפה הגיאולוגי ומפת הקרינה הנ"ל ועל בדיקות של קרינה גמא ותכולת ראדיום בקרקע, הגדיר המשרד להגנת הסביבה מספר נוסף של אזורים מועדים לראדון בקרקע. רשימת הישובים הינה מפורטת בנספח ב'.

3. אזורים מועדים לראדון

האזורים שבהם "תוחלת גבוהה לראדון" (תג"ר), הוגדרו במסגרת הסקר ראדון ארצי 1998 והסקר ראדיום בקרקע בשנה 2006. באזורים האלו חובה להגן על המבנים מפני חדירת ראדון מהקרקע, כבר בשלב הבנייה, ולבצע בדיקות ראדון עבור אישור כניסה לבית חדש (טופס 4). המפקח על הבדיקות ועל העבודות להגנת המבנים מפני ראדון מטעם הרשות המקומית הוא גם בעל מינוי למפקח מטעם המשרד להגנת הסביבה.

היתרי בנייה יכללו מפרט ותנאים בהתייחס לנוהל בנייה מאולץ ("פרט הגנה מפני ראדון"). אם יש צורך להתאים את דרישות הפרט לתנאים ספציפיים של המבנים, מומלץ להיעזר במפרט טכני של המשרד להגנת הסביבה [4] או בתקנים של EPA [5] ו- [6].

אם אחרי הבדיקות עבור אישור כניסה ריכוז הראדון יהיה גבוה מרמת הפעולה, יחליט המפקח המקומי באילו אמצעים לנקוט כדי למנוע חדירת ראדון.

4. רמת הפעולה ותדירות הבדיקות

4.1. רמת הפעולה

רמת הפעולה היא ריכוז הראדון המרבי המותר (התקין) במבנים, נמדד בטווח ארוך של 3 חודשים לפחות, בתנאי מחייה רגילים. אם ריכוז הראדון הנמדד בתנאים אלה עולה על רמת הפעולה, מומלץ לבצע פעולות להקטנתו פחות מרמת הפעולה. רמת הפעולה בישראל, לפי קביעת המשרד להגנת הסביבה ובהתאם לתקנים הבין לאומים [1,3], היא 200 בקרל/מ"ק והיא מתייחסת לבניינים בהם תתכן שהייה רצופה וממושכת של הציבור הרחב , לרבות: בנייני מגורים, מוסדות בריאות (בתי חולים) מוסדות ציבוריות (עם גישה של הציבור הרחב), מוסדות חינוך (בתי ספר, גני ילדים) וכ"ד.

חשיפת האדם לקרינת הראדון היא פרופורציונאלית לריכוז הראדון ולזמן שהיית האדם בריכוז זה (ראה פרקים 5-8). מכיוון שזמן שחיית האדם במקום עבודה הינו כמעט פי 2 יותר קצר כמו במגורים, התקנים [3] קובעים "רמת הפעולה במקום עבודה" כמעט פי 2 יותר גבוהה כמו רמת הפעולה מגורים. המשרד התעשייה והמסחר (תמ"ת) קבעה, בהתאם לתקנים אלה, רמת הפעולה במקומות עבודה בישראל 500 בקרל\מ"ק.

טבלה 1 מפרטת את רמת הפעולה לפי השימוש בבניין בהתאם לקביעה של המשרד הממשלתי האחראי.

מס'	שימוש בבניין	רמת הפעולה	תדירות הבדיקה
		בקרל\מ"ק	שנים
1	מגורים	200	5
2	מוסד ציבורי	200	5
3	מוסד חינוך	200	3
4	מקום עבודה	500	5

טבלה 1. רמת הפעולה ותדירות הבדיקות ראדון בחדרים צמודי קרקע לפי שימוש בבניין.

4.2. תדירות הבדיקות

הגורם הראשי להמצאות הראדון במבנים הוא חדירתו מן הקרקע (ראה הנחיה מס' 8). כמות יותר קטן של ראדון נפלט מחומר הבניה שמקורו בקרקע (בטון, בלוקים בניה וכ"ד). ריכוז הראדון בחדר הינו פרופורציונאלי לעוצמת המקור והפוך פרופורציונאלי לקצב תחלופות אוויר בחדר (ראה פרק 12 הנחיות מס' 6-2 ו- 8).

מכיוון שבודקים ראדון עבור בריאות האדם, מבצעים את הבדיקה בחדר מאוכלס. אין סיבה לבדוק ראדון בחדרים לא מאוכלסים באופן שוטף (מחסנים וכ"ד). כדי לוודא ריכוז ראדון תקין בחדר יש למנוע את חדירתו מן הקרקע ולהבטיח רמת אוורור נורמאלי לשהיית האדם. פליטת הראדון מחומרי בניה בלבד יכולה לגרום לריכוז ראדון לא תקין אם רמת אוורור של החדר הינה מאוד נמוכה. לכן, כדי לוודא ריכוז ראדון תקין, יש לפתוח את חלונות כל יום, מלבד אם קיים אוורור מאולץ.

כדי לוודא ריכוז תקין בבית, מומלץ לבצע בדיקת ראדון מיד אחרי סיום הבניה ואחרי כל שינוי במצב הבניין שאמור להגדיל את ריכוז הראדון, לדוגמה:

- <u>עבודות ביסודות הבניין</u> שאמורים לפתוח מסלולים להידרת הראדון מן הקרקע: פתחים לקרקע עבור צנרת מים, חשמל, ביוב וכו', רצפה פתוחה לקרקע, חורים או שברים בקירות צמודי קרקע או ברצפה, סדקים בחומר האיטום סביב צנרת מים, חשמל, ביוב, בחיבורים בין קירות ורצפה, עבודות בלתי תקינות עבור הרחבת הבניין (חוסר איטום בין הקירות ורצפה, רצפה דקה), וכו',
- <u>שינויים במערכת אוורור של הבניין</u> שאמורים להקטין את הקצב של תחלופות האוויר: ביטול (סגירה קבוע) של חלונות, פתחי אוורור, הפחתת (כולל הפסקת) האוורור המאולץ, התקנת במערכות אוורור שלא מחליפות את האוויר בפנימי עם האוויר החיצוני וכו',
- <u>תופעות טביעות</u>: הזדקנות הבניין, רעידת אדמה, ייצור סדקים בחיבור בין קירות ורצפה בגלל טרמיטים וכ"ד.

טבלה 1 מפרטת את התדירות של בדיקות ראדון המומלצת לפי השימוש בבניין. תדירות זה מתייחסת בעיקר לחדרים צמודי קרקע. יש לבדוק, עם עדיפות ראשונית, את החדרים תת קרקעיים (מרתפים, מקלטים וכ"ד), במיוחד באזורים המועדים לראדון בקרקע (ראה פרק 3). בחדרים אלה, התופעות היכולות לגרום לריכוז ראדון לא תקין הם: חדירת ראדון מן הקרקע, פליטת ראדון מקירות בנויות מבטון עבה ביחד עם רמת אוורור נמוכה.

ככלל, בקומות העליונות, בגלל הסיכון הנמוך להדירת ראדון מן הקרקע ורמת אוורור יותר גבוה, אין סיבה לבצע בדיקות ראדון.

5. תקנים להגנת הציבור והעובדים מפני ראדון

כדי לצמצם את חשיפת האוכלוסייה לקרינה מיננת אימץ המשרד להגנת הסביבה את ההמלצות של הוועדה הבין-לאומית להגנה מקרינה - ICRP [1] ו-[2]. בנושא הספציפי של ראדון אימץ המשרד את הפרסום ICRP-65 [3].

המשרד להגנת הסביבה מסמיך בודקי ראדון ללא הגבלה על שימוש המבנה, כלומר למגורים, למקומות עבודה, למוסדות חינוך, למוסדות ציבור וכו'. אף על פי ששיטת הבדיקה היא אחידה בכל המבנים, רמת הפעולה יכולה להיות שונה, בהתאם לבעלות המבנה ושימוש במבנה. לדוגמה, כאשר בודקים ראדון במבני מגורים יש להסתמך על רמת הפעולה של המשרד להגנת הסביבה של 200 בקרל\מ"ק אוויר עבור הציבור הרחב, כאשר בודקים ראדון במקומות עבודה יש להסתמך על רמת הפעולה של משרד התעשייה והמסחר (תמ"ת). כדי להדגיש את ההבדל בין חשיפת לראדון במגורים ובמקום עבודה, באסמכתאות אנו מביאים את דרישות הפרסום ICRP-65 [3], המומלץ למגורים ומקומות עבודה.

הפרסום ICRP-65 מגביל את מנת הקרינה מראדון לערך קטן מ- 3 מיליסיוורט לשנה במבני מגורים ובמקומות עבודה. כיוון שזמן השהייה שונה במגורים ובמקומות עבודה (7,000 / 2,000 שעות לשנה), רמת הפעולה תהיה 200 / 500 בקרל/מ"ק, בהתאמה. הסיכון הבריאותי פרופורציונלי למנת הקרינה. לכן, למרות הספים השונים, הסיכון הבריאותי יהיה אחיד בבתי מגורים ובמקומות עבודה (טבלה 2).

שהייה	ER	רמת פעולה	זמן שהייה	מנת קרינה מוסכמת	סיכון בריאותי
		בקרל\מ"ק	שעות	מיליסיוורט \ רמת עבוד- חודש	עבור חשיפה של רמת עבודה-חודש
		Bq/m^3	hours	(mSv/WLM)	(WLM^{-1})
במגורים	0.4	200	7,000	4	0.0003
במקום עבודה	0.4	500	2,000	5	0.0003

טבלה 2. גורם שיווי משקל של בנות הראדון (ER), רמת הפעולה, זמן שהייה, מנת הקרינה המוסכמת (dose convention) והסיכון הבריאותי, במגורים ובמקומות עבודה, בהתאם לפרסום של ICRP-65

מגדירים את החשיפה לראדון כמכפלה של: גורם שיווי המשקל של בנות הראדון, ריכוז הראדון הממוצע ופרק זמן השהייה. מודדים ביחידות של רמת עבודה-חודש (WLM), השווה למכפלה של: גורם שיווי משקל = 1, ריכוז = 3,700 בקרל/מ"ק ופרק זמן = 170 שעות.

בהתאם לפרסום של ICRP-65 מחלקים את מקומות העבודה לשני סוגים:

- במקום עבודה "רגיל" (לדוגמה משרדים) ריכוז הראדון חייב להיות נמוך מרמת הפעולה, שהיא 500 בקרל/מ"ק. במקום עבודה זה קיימת אפשרות להקטין את ריכוז הראדון לערך נמוך מרמת הפעולה, באמצעים פשוטים יחסית. לכן, התקינה קובעת אך ורק את הסף המרבי של הריכוז המותר (רמת הפעולה), ולא נדרש פיקוח מפורט על החשיפה.

- במקומות עבודה "מיוחדים" (לדוגמה עבודה במכרות), שבהם ריכוז הראדון הנו גבוה והקטנתו אינה מוצדקת, התקינה מחייבת את המעסיק להגן על העובד על ידי פיקוח על החשיפה, כלומר ניטור של ריכוז הראדון או מנת הקרינה.

6. מנת הקרינה מחשיפה לראדון

לפי הפרסום של ICRP-65 [3], מנת הקרינה השנתית לאדם פרופורציונלית לריכוז הראדון הממוצע:

במגורים

$$D_{home}\ (mSv/y) = 0.017 \cdot C\ (Bq/m^3) \qquad (1)$$

במקום עבודה

$$D_{work}(mSv/y) = 0.0064 \cdot C(Bq/m^3) \qquad (2)$$

כאשר:

D_{home} = מנת הקרינה לאדם במגורים, ביחידות מיליסיוורט לשנה

D_{work} = מנת הקרינה לאדם במקום עבודה, ביחידות מיליסיוורט לשנה

C = ריכוז הראדון הנמדד בטווח ארוך ובתנאי מחיה רגילים, ביחידות בקרל/מ״ק

0.017 = מנת הקרינה השנתית במגורים, ביחידת מיליסיוורט לשנה עבור 1 בקרל/מ״ק [3]

0.0064 = מנת הקרינה השנתית במקום עבודה, ביחידת מיליסיוורט לשנה עבור 1 בקרל/מ״ק [3]

7. הסיכון הבריאותי בחשיפה לראדון

לפי פרסום של ICRP-65 [3], הסיכוי למות מסרטן ריאות כתוצאה מחשיפה לראדון הוא 0.0003 מחשיפה ל״רמת עבודה-חודש״ (WLM) אחד. הסיכון הבריאותי לחשיפה של N ״רמות עבודה – חודש״ הוא:

$$Risk = \frac{0.0003}{WLM} \cdot N\ (WLM) \qquad (3)$$

מחשבים את המספר N של ״רמות עבודה – חודש״ לפי הנוסחה:

$$N\ (WLM) = ER\ \frac{C\ (Bq/m^3) \cdot T\ (h)}{3700\ \ Bq/m^3 \cdot 170\ h} \qquad (4)$$

כאשר:

ER = גורם שיווי משקל של בנות הראדון (0.4)

C = ריכוז הראדון הממוצע (בקרל/מ״ק)

T = פרק זמן החשיפה (שעות)

לדוגמה: לפי סקר ישראל 1998, ריכוז הראדון הממוצע בחדר מגורים צמוד קרקע הוא 47 בקרל/מ״ק. הסיכון לחשיפת האדם בריכוז זה במשך שנה, בהנחה של 7,000 שעות שהייה, עם גורם שיווי משקל הבנות 0.4, יהיה:

$$Risk = \frac{0.0003}{WLM} \cdot \frac{0.4 \cdot 47\ Bq/m^3 \cdot 7000\ h}{3700\ \ Bq/m^3 \cdot 170\ h} = \frac{0.0003}{WLM} \cdot 0.21\ WLM = 0.000063 \qquad (5)$$

8. פעולות להקטנת ריכוז הראדון במבנים

חובה על בעל היתר לבדיקות ראדון להמליץ, בהתאם לתוצאות בדיקתו, על הצורך בפעולות שיפור. מומלץ שעבודות אלה יבוצעו על ידי מומחה. כאשר מבצעים עבודות שיפור, מומלץ לבחור את השיטה המבטיחה את ריכוז הראדון הנמוך ביותר יחסית לרמת הפעולה.

הזמן המוקצב לפעולות שיפור: כדי למנוע חשיפת האדם למנת קרינה גבוהה מחמישה מיליסיוורט, המספר המרבי של החודשים עד לסיום עבודות השיפור יהיה:

במגורים:

$$T_{mit}^{home}\ (month) = \frac{3,500}{C(Bq\backslash m^3)} \qquad (6)$$

במקום עבודה:

$$T_{mit}^{work}\ (month) = \frac{10,000}{C(Bq\backslash m^3)} \qquad (7)$$

כאשר C הנו ריכוז הראדון הנמדד ביחידות בקרל/מ״ק, בטווח ארוך של 3 חודשים לפחות, בתנאי מחיה רגילים. כדי לצמצם את החשיפה מומלץ שהעבודה תבוצע, אם אפשר, בפרקי זמן קצרים יותר.

9. ריכוז ראדון המחייב פינוי מידי של הבית

בריכוז ראדון גבוה מ- 60,000 בקרל/מ״ק, שנמדד בתנאי מחיה רגילים, יפנה הדייר את הבית בתוך 3 ימים, כדי למנוע את חשיפתו ליותר מ- 10 מיליסיוורט.

10. ביצוע בדיקת ראדון

בדיקות גז ראדון יבוצעו אך ורק על ידי בעל היתר מטעם המשרד להגנת הסביבה ובהתאם להנחיות המשרד. המשרד מפרסם באתר האינטרנט רשימה מעודכנת של בודקי ראדון. על הבודק להזדהות בפני מקבל השירות באמצעות תעודה אישית עם תמונה, ולבצע את הבדיקות על פי הנחיות המשרד, בשיטות בדיקה וגלאים המאושרים על ידי הממונה. רשימת ההנחיות לבדיקת ראדון מפורטת בנספח א׳.

11. אופן ביצוע בדיקות ראדון

את הראדון בודקים בבדיקות קצרות טווח ובבדיקות ארוכות טווח. החדר הנבדק יהיה תקין אך ורק אם הריכוז הנמדד בטווח ארוך של 3 חודשים לפחות בתנאי מחיה רגילים, יהיה נמוך מרמת הפעולה. אם הריכוז הנמדד בבדיקת ארוכת טווח יהיה גבוה מרמת הפעולה, יש להתייחס עליו כלא תקין.

- בהתאם לתוצאת הבדיקה הארוכה במגורים:

- אם החיבור בין ריכוז הנמדד והאי ודאות שלו יהיה גבוה מ- 200 בקרל/מ״ק, יש לבצע פעולות שיפור בזמן מוקצב T_{mit}^{home} .
- אם החיבור בין ריכוז הנמדד והאי ודאות שלו יהיה נמוך מ- 200 בקרל/מ״ק, החדר הנו תקין ואין צורך לבצע פעולות שיפור.

- בהתאם לתוצאת הבדיקה הארוכה במקומות עבודה:

- אם החיבור בין ריכוז הנמדד והאי ודאות שלו יהיה גבוה מ- 500 בקרל/מ״ק, יש לבצע פעולות שיפור בזמן מוקצב T_{mit}^{work} .
- אם החיבור בין ריכוז הנמדד והאי ודאות שלו יהיה נמוך מ- 500 בקרל/מ״ק, החדר הנו תקין ואין צורך לבצע פעולות שיפור.

אם נמצא שריכוז הראדון בחדר שנבדק תקינה, אך נעשו שינוים העלולים להשפיע על ריכוז הראדון, כמו פתיחת מסלולים בקרקע (שברים ברצפה, התקנת צינורות מים, חשמל, ביוב וכו׳) או הפחתת רמת האוורור (איטום החלון או הדלת, שינויים במערכת האוורור וכו׳), מומלץ לבצע בדיקה נוספת. ככלל, מומלץ לבצע בדיקות עם התדירות המפורטות בהנחיה מס׳ 1.

בחדר צמוד קרקע יש לבצע, לפני בדיקה הארוכה, בדיקה קצרה של 3 עד 7 ימים בתנאים של דלת וחלון סגורים, כדי למנוע חשיפה מיותרת של האדם במשך הבדיקה הארוכה. ריכוז הראדון הנמדד בבדיקה זו אינו מיועד להשוואה עם רמת הפעולה, אלא לקבוע את הצורך בפעולות שיפור מידיות.

שיטת הבדיקה הקצרה מפורטת בהנחיה מס׳ 2. כעיקרון, יש להשוות את הריכוז הנמדד עם הסף לפעולות שיפור מידיות. סף זה תלוי בערך של רמת הפעולה, בסוג הגלאי, בזמן הבדיקה ובקצב תחלופת הראדון באוויר בחדר סגור. מודדים את הגורם האחרון על פי ההנחיות מס׳ 3 ו- 4.

בהתאם לתוצאת הבדיקה הקצרה:

- אם הריכוז הנמדד גבוה מהסף לפעולות שיפור, יש לבצע שיפורים בזמן מוקצב.
- אם הריכוז הנמדד נמוך מהסף לפעולות שיפור, יש לבצע מיד בדיקה ארוכת טווח.

הערות:

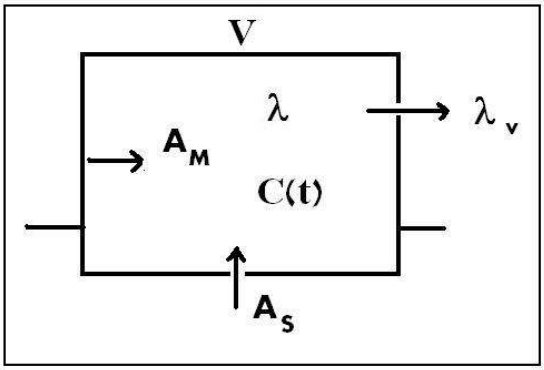
- באזורים שאינם מוגדרים כאזורי מועדים לראדון (או "תוחלת גבוהה לראדון" - תג"ר), ריכוז הראדון שיכול לחדור מהקרקע הנו בדרך כלל קטן. במקרה זה, ניתן לבצע ישירות, עם אישור של מקבל השירות, בדיקה ארוכת טווח. בנוסף, נותן השירות חייב לבדוק שבחדר הנבדק אין פתיחה לקרקע.
- כיוון שבחורף הבית פחות מאוורר יחסית לקיץ, ריכוז הראדון הנמדד בבדיקה ארוכה בחורף יכול להיות גבוה יחסית לקיץ. לצורך בדיקת ראדון מגדירים:
  - תקופת הקיץ בין **1 באפריל** עד **30 בספטמבר**,
  - תקופת החורף בין **1 באוקטובר עד 31 במרס**.

  אם לפחות **חצי** מפרק זמן הבדיקה הארוכה יהיה בקיץ והחיבור בין ריכוז הנמדד ובאי ודאות שלו יהיה:
  - גבוה מ- **150** בקרל/מ"ק במקום ציבורי ,
  - גבוה מ- **450** בקרל\מ"ק במקום עבודה,

  מומלץ לבצע בדיקה חוזרת בחורף.
- בכל בדיקה של ריכוז ראדון קיים גורם של אי ודאות. לצורך ההשוואה בין הריכוז הנמדד ורמת הפעולה (בבדיקה ארוכה) והסף לפעולות שיפור מידיות (בבדיקה קצרה), יש לחבר לריכוז הנמדד את אי הוודאות שלו (ראה הנחיה מס' 2).
- אם, בהתאם לבדיקה הקצרה או הארוכה, יש לבצע פעולות להקטנת ריכוז הראדון, יבצע הבודק הערכה של מקור הראדון בהתאם למודל הפיסיקלי המפורט בהנחיה מס' 5.

12. המודל הפיסיקלי של ריכוז ראדון בחדר

ניתן לחשב את ריכוז הראדון הצפוי בחדר כפונקציה של אקטיביות המקורות הראדון ורמת האוורור, בעזרת המודל הפיסיקלי המפורט בהנחיה מס' 5 . המודל מאפשר לחשב את הסף לפעולות שיפור מידיות ולהעריך את מקורות הראדון בחדר. תרשים 1 מראה את עקרון המודל.



תרשים 1. הפרמטרים הבסיסיים במודל הפיסיקלי של ראדון בחדר.

שתי סיבות לכך שבחדר צמוד קרקע ריכוז הראדון גדל:

- חדירה מן הקרקע
- פליטה מחומרי בנייה

ושתי סיבות לכך שהריכוז קטן:

- החלפת האוויר
- דעיכה רדיואקטיבית

הריכוז המרבי של הראדון (במצב רוויה) יהיה:

$$C_{max}^{v} = \frac{\lambda_v}{\lambda+\lambda_v} C_{out} + \frac{\lambda}{\lambda+\lambda_v} C_{max}^{0} \qquad (8)$$

עם

$$C_{max}^{0} = \frac{A_S + A_M}{V} \qquad (9)$$

כאשר:

C_{max}^{v} = ריכוז בתנאים של קצב תחלופת אוויר λ_v (בקרל/מ״ק)

C_{max}^{0} = ריכוז בתנאים של קצב תחלופת אוויר אפס (בקרל/מ״ק)

C_{out} = ריכוז באוויר החיצוני (בקרל/מ״ק)

A_S = אקטיביות של המקור הקרקעי (בקרל)

A_M = אקטיביות של המקור - חומר בנייה (בקרל)

V = נפח החדר (מ״ק)

λ_v = קצב תחלופת ראדון באוויר (לשעה)

λ = קבוע דעיכת ראדון (0.00755 לשעה).

המודל מאפשר להעריך, אחרי ניטור רציף של ריכוז הראדון בחדר, את קצב תחלופת הראדון באוויר. הוא מתאר תופעת דיפוזיה של אטומי ראדון באוויר מהחדר החוצה ו/ או זרימת האוויר דרך החדר. לכן הוא שונה מקצב תחלופת האוויר (ללא התייחסות לראדון) הנמדד בשיטות אחרות, ויש למדוד אותו באמצעות גלאי לניטור רציף (CRM), של ריכוז הראדון.

- האקטיביות מהקרקע A_S מתארת את מספר אטומי הראדון הנכנסים לחדר מהקרקע בכל שנייה. היא פרופורציונלית למכפלה של הקצב הממוצע של האקסהלציה מן הקרקע E_S ושטח החדר הפתוח לקרקע (לדוגמה, החיבור בין רצפה וקירות) S_S:

$$A_S = \frac{E_S\, S_S}{\lambda} \qquad (10)$$

קצב האקסהלציה מן הקרקע E_S הנו פרופורציונלי לריכוז הראדון בקרקע תחת הבית. ריכוז הראדון בקרקע אינו קבוע במשך הזמן, אלא הוא משתנה כפונקציה של תנאים אטמוספריים ומזג אוויר.

- האקטיביות מחומר הבנייה A_S מתארת את מספר אטומי הראדון הנכנסים לחדר מחומר הבנייה בכל שנייה. היא פרופורציונלית למכפלה של קצב האקסהלציה הממוצע מחומר הבנייה E_M והשטח הפולט ראדון בחדר S_M:

$$A_M = \frac{E_M\, S_M}{\lambda} \qquad (11)$$

האקטיביות מחומר הבנייה A_M קבועה במשך הזמן, חוץ משינויים קטנים בגלל שינוי התנאים הסביבתיים. היא נמוכה יחסית, כך שבתנאי מחיה רגילים ריכוז הראדון בחדר יהיה נמוך מרמת הפעולה.

בחדר צמוד קרקע, ריכוז ראדון גבוה נובע לרוב מהקרקע, בגלל האקטיביות הגבוהה יחסית לאקטיביות מחומר הבנייה.

חשוב לשים לב, בהתאם לנוסחה (8), שריכוז הראדון הפוך פרופורציונלי לקצב תחלופת האוויר λ_v. לכן, הריכוז בחדר יכול להיות גבוה, למרות אקטיביות מקורות קטנה יחסית, אם קצב תחלופת האוויר יהיה נמוך. תופעה זו קיימת בחדר סגור הרמטית (ממ״ד, מקלט) או בחדרים בעלי איטום מיוחד בחלונות ובדלתות.

בבדיקה קצרת טווח של ריכוז הראדון בחדר, ללא שינוים גדולים בתנאים האטמוספריים בזמן הבדיקה, קצב האקסהלציה מן הקרקע E_S אמור להיות קבוע (אם מתרחשת לפתע חדירה מהקרקע, המודל הפיסיקלי יהיה מסובך יותר). במצב זה, אחרי סגירת החדר, ריכוז הראדון אמור לעלות לפי הנוסחה:

$$C(t) = C_0 \exp[-(\lambda+\lambda_v)t] + C^v_{max}\{1-\exp[-(\lambda+\lambda_v)t]\} \quad (12)$$

כאשר:

t = פרק זמן הבדיקה אחרי סגירת החדר (שעות)

C_0 = ריכוז הראדון בחדר בזמן סגירה (בקרל/מ״ק)

ניתן לראות מהנוסחאות (8) ו- (12) שקצב תחלופת האוויר λ_v משפיע על הריכוז C(t) כלהלן:

- אם λ_v הנו גדול, הריכוז המרבי C_{max}^v יהיה קטן והריכוז C(t) יתייצב מהר
- אם λ_v הנו קטן, הריכוז המרבי C_{max}^v יהיה גדול והריכוז C(t) יתייצב לאט

נוסחה (12) מאפשרת להגדיר את זמן הרוויה של הריכוז, הנדרש כדי להגיע ל- 95% מהערך המרבי:

$$T_{eq} = \frac{3}{\lambda+\lambda_v} \quad (13)$$

בהתאם לקצב תחלופת האוויר, ניתן לחלק את הסגירה של החדר לשלושת המצבים המפורטים בטבלה 3.

סגירת החדר	**קצב תחלופת אוויר**	**זמן רוויה**
	(לשעה)	**(שעות)**
	λ_v	T_{eq}
רגילה	0.1-0.3	10-30
כמעט הרמטית	0.1-0	30-397
הרמטית	0	397

טבלה 3. הגדרה של סגירת החדר כפונקציה של קצב תחלופת האוויר.

בחדר רגיל, ללא איטום מיוחד בדלת ובחלון וללא פתחי אוורור אחרים, אפשר לקבוע באופן שמרני קצב תחלופת אוויר של 0.1 לשעה. בחדר הסגור כמעט הרמטית יש למדוד את הקצב של תחלופת האוויר λ_v. שיטת הבדיקה מפורטת בהנחיות מס׳ 3 ו- 4.

נוסחה (8) מאפשרת לציין את הקשר בין הריכוז הקיים בתנאים סגורים והריכוז הצפוי בתנאים פתוחים:

$$C^{max}_{closed} = C^{max}_{open}\frac{\lambda+0.3}{\lambda+\lambda_v} \quad (14)$$

כאשר:

C_{closed}^{max} = ריכוז מרבי בתנאים סגורים עם λ_v תחלופת אוויר לשעה (בקרל/מ״ק)

C_{open}^{max} = ריכוז מרבי בתנאים פתוחים עם 0.3 תחלופת אוויר לשעה (בקרל/מ״ק)

בהסתמך על נוסחה (14), מגדירים את הסף לפעולות שיפור מידיות כאשר הריכוז הצפוי בתנאים פתוחים ישווה לרמת הפעולה של 200 בקרל/מ״ק באתרים ציבוריים:

$$C_{mit} = 200\frac{\lambda+0.3}{\lambda+\lambda_v} \quad (15)$$

או לרמת הפעולה של 500 בקרל/מ״ק במקומות עבודה:

$$C_{mit} = 500\frac{\lambda + 0.3}{\lambda + \lambda_v} \qquad (15')$$

כאשר קצב תחלופת האוויר λ_v קטן, הסף לפעולות שיפור C_{mit} גדל, ללא תלות באקטיביות של מקורות הראדון. לכן, בהתאם לתוצאות הבדיקה הקצרה, ניתן לקבוע:

- אם הערך המרבי של הריכוז הנמדד גדול מ- C_{mit}, יש לבצע פעולות שיפור מידיות
- אם ערך המרבי של הריכוז הנמדד קטן מ- C_{mit}, יש לבצע בדיקה ארוכת טווח

בנוסף, המודל מאפשר להעריך את מקורות הראדון בחדר. כפי שניתן ללמוד מהנוסחאות (8-12), אחרי ניטור רציף של הריכוז $C(t)$, מדידה של קצב תחלופת האוויר λ_v ומדידה של קצב האקסהלציה מחומר הבנייה E_S, המודל מאפשר לחשב בנפרד את האקטיביות של הראדון מהקרקע A_S ומחומר הבנייה A_M. חישוב זה הוא קריטי לתכנון הפתרון האופטימלי לפעולות שיפור.

נספח א'

רשימת ההנחיות לבדיקת גז ראדון

1. מדיניות המשרד לטיפול בממצאי בדיקת ראדון
2. בדיקת ריכוז הראדון במבנים
3. בדיקת ריכוז הראדון בחדר כפונקציה של רמת האוורור
4. בדיקת ריכוז הראדון בחדר סגור הרמטית
5. חישוב של ריכוז הראדון בחדר - המודל הפיסיקלי
6. בדיקה של פליטת ראדון מחומרי בנייה ומהקרקע
7. חישוב אי הוודאות של הבדיקה
8. גז ראדון במבנים - שאלות ותשובות

נספח ב'

רשימת ישובים מועדים לגז ראדון בקרקע

מס'	שם הישוב
1	ירושלים
2	מעלה אדומים
3	ערד
4	כרמיאל
5	א.ת. מישור אדומים
6	נופי פרת
7	גבעה 468
8	כפר אדומים
9	אלון
10	מצפה חגית
11	מצפה יריחו
12	ורד יריחו
13	אלמוג
14	בית הערבה (החדש)

אסמכתאות

[1] ICRP-60 Recommendations of the International Commission on Radiation Protection, ICRP Publication 60, Annals of the ICRP 21 (13), Pergamon Press, Oxford and New York, 1990.

[2] BSS-115 International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series 115, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1996.

[3] ICRP-65 Protection against Radon-222 at Home and at Work, ICRP Publication 65, Sept. 1993.

[4] הנחיות למניעת חדירת גז ראדון למבנים, משרד להגנת הסביבה, www.sviva.gov.il.

[5] Radon mitigation standards, U.S. Environmental Protection Agency, EPA-402-R93-078, April 1994.

[6] Building Radon out, A step-by-step guide on how to build Radon-resistant homes, U.S. Environmental Protection Agency, EPA/402-K-01-002, April 2001.