



המשרד להגנת הסביבה
وزارة حماية البيئة
Ministry of Environmental Protection
שלום עם הסביבה
מדינת ישראל
המשרד להגנת הסביבה
אגף מניעת רעש וקרינה

☎ 02-6495869 ☎ 02-6495870
✉ רח' כנפי נשרים 3, ת"ד 34033, ירושלים 95464

כ"ז/תמוז/תשע"ו
02 אוגוסט 2016
גרסה 5

הנחיה 2

בדיקת ריכוז ראדון במבנים

1. כללי

מסמך זה מפרט את שיטת הבדיקה של ריכוז גז ראדון במבנים ע"י בדיקות בטווח קצר וארוך. למרות ששיטת הבדיקה הינה אחידה בכל מבנה, ריכוז הראדון המרבי המותר (רמת הפעולה) הינה שונה עבור בציבור הרחב (200 בקרל/מ"ק) ובמקומות עבודה (500 בקרל/מ"ק) – ראה הנחיה מס' 1.

קיימים שני מקורות לחדירת גז הראדון למבנים: חדירה מן הקרקע, ופליטה מחומרי הבנייה. את ריכוז הראדון מודדים ביחידות של "בקרל למטר מעוקב" (בקרל/מ"ק), כאשר "בקרל" הוא קצב התפרקות רדיואקטיבי של אטום אחד לשנייה. בהתאם לעקרונות של בטיחות קרינה, יש להקטין את ריכוז הראדון במבנים המשתמשים לשהיית האדם כאשר הוא גבוה מ-"רמת הפעולה". בישראל, המשרד להגנת הסביבה קבע שהערך של רמת הפעולה יהיה 200 בקרל/מ"ק במגורים ובמוסדות חינוך. כדי להשוות את ריכוז הראדון הקיים במבנים עם רמת הפעולה, יש למדוד אותו בטווח ארוך של 3 חודשים לפחות בתנאי מחיה רגילים.

לרוב, הגורם הראשי לריכוז ראדון במבנים הגבוה מרמת הפעולה הוא חדירה מן הקרקע, בעיקר בחדרים צמודי קרקע. פליטת הראדון מחומר הבנייה היא נמוכה יותר, כך שאם ראדון אינו חודר מן הקרקע אין לצפות לריכוז ראדון גבוה מרמת הפעולה בתנאי אוורור רגילים. למרות זאת, בתנאים של רמת אוורור מאוד קטנה, פליטת הראדון מחומר הבנייה (בעיקר מבטון מסיבי) יכולה לגרום לריכוז ראדון גבוה מרמת הפעולה.

ריכוז הראדון בחדר סגור תלוי במקור הראדון ובמידת האטימות של הדלתות והחלונות:

1. חדר בעלי סגירה "רגילה" (רוב החדרים), ללא איטום בדלת ובחלון, שמאפשר תחלופת אוויר סבירה לשהיית האדם גם במצב סגור (בגלל זה נתן לסגור את החדר בלילה).
2. חדר בעל סגירה "כמעט הרמטית", עם ו בדלת ו \ או בחלון, שמאפשר תחלופת אוויר נמוכה.
3. חדר בעל סגירה "הרמטית" (ממ"ד, מקלט וכדומה), עם איטום מוחלט בדלת ובחלון, לא מאפשר תחלופת אוויר. בגלל זה יש להשתמש בחדר במצב פתוח ולסגור אותו רק במשך זמן מוגבל של מספר שעות, רק במצב חירום).

טבלה 1 מגדירה דרכים שונות לסגירת חדר, ללא פתח אוורור או סוג אוורור אחר, כפונקציה של קצב תחלופת ראדון באוויר וסוג האיטום בדלת ובחלון.

סוג	סגירת החדר	רמת אוורור (לשעה)	רמת איטום
1	רגילה	0.1-0.3	ללא איטום בדלת ובחלון
2	כמעט הרמטית	0.1-0	עם איטום בדלת ו \ או בחלון
3	הרמטית	0	עם איטום מוחלט בדלת ובחלון

טבלה 1. סגירת החדר, רמת אוורור (קצב תחלופת אוויר האופייני בחדר סגור) ורמת האיטום של החדר.

יש להדגיש: בגלל המסה הגדולה יותר של הראדון יחסית לאוויר שמשפיעה על הדיפוזיה שלו באוויר, קצב תחלופת הראדון באוויר הנו נמוך יחסית לקצב תחלופת האוויר. לכן, כאשר מתייחסים להלן ל"תחלופת אוויר", הכוונה היא לתחלופת ראדון באוויר. שיטת המדידה של קצב תחלופת הראדון באוויר מפורטת בהנחיה מס' 3. המודל הפיסיקלי של ראדון בחדר (הנחיה מס' 5) מאפשר להעריך את ריכוז הראדון בחדר כפונקציה של אקטיביות המקורות וקצב תחלופת האוויר.

לרוב, בתנאי מחיה רגילים (שילוב של תנאים סגורים ופתוחים במשך היממה), קצב תחלופת האוויר משתנה בין 0.1 (סגירת החדר בלילה) ל-2 בשעה (פתיחת החדר ביום). ניתן להעריך, בהתאם לתוצאות בדיקה במבנים, שבתנאי מחיה רגילים קצב תחלופת האוויר הממוצע הנו 0.3 לשעה.

2. שיטות לבדיקות ראדון

2.1 בדיקה ארוכת טווח

ריכוז הראדון הנמדד בתנאים פתוחים משתנה מיום ליום, כפונקציה של תנאי האוויר של החדר ומוג האוויר. כדי לוודא תוצאה אמינה, מבצעים בדיקה זו בפרק זמן ארוך, לפחות 3 חודשים, בתנאי מחיה רגילים. בדיקה זו קובעת אם ריכוז הראדון בחדר הנו תקין (נמוך מרמת הפעולה) או לא תקין (גבוה מרמת הפעולה).

2.2 בדיקה קצרת טווח

בגלל חדירה (אפשרית) של ראדון מן הקרקע, ריכוז הראדון בחדר צמוד קרקע יכול להיות גבוה. כדי למנוע חשיפה מיותרת של האדם לריכוז ראדון גבוה עד לסיום הבדיקה הארוכה, יש לבצע קודם בדיקה קצרת טווח. בדיקה זו מבצעים בחדרים צמודי קרקע בלבד בתנאים סגורים במשך 3 עד 7 ימים, ועל פיה קובעים אם יש צורך בפעולות מידיות להפחתת ריכוז הראדון (מיטיגציה) או לא.

בהתאם לבדיקה הקצרה, אם הריכוז הנמדד היה נמוך מ"הסף לפעולות שיפור מידיות", אין לצפות לריכוז ראדון גבוה בתנאים פתוחים, ואפשר לבצע בדיקה ארוכת טווח. אם ריכוז הנמדד בתנאים סגורים עובר את הסף, יש לבצע פעולות שיפור בפרק זמן מוקצב.

מגדירים את הסף לפעולות שיפור מידיות כריכוז הראדון הקיים בחדר בתנאים סגורים, שאמור לרדת לרמה של 200 / 500 בקרל/מ"ק במגורים / מקומות עבודה בהתאמה, בתנאים פתוחים, עם קצב תחלופת אוויר 0.3 לשעה. הסף לפעולות שיפור תלוי בסוג הגלאי, בזמן הבדיקה עם גלאי זה ובקצב תחלופת האוויר בחדר הנבדק.

2.3 אי ודאות של הבדיקה

כמו בכל מדידה פיסיקאלית, תוצאת המדידה של ריכוז ראדון (קצרת טווח או ארוכת טווח) כוללת: ריכוז הראדון הנמדד ואי הודאות שלו, כשהם נמדדים ע"י הגלאי עצמו או ע"י המעבדה שמבצעת את הפיתוח של הגלאי. במדידת ריכוז ראדון מגדירים את אי הודאות של המדידה כסטייה תקן (standard deviation) אחד. עם הגדרה זו, רמת הסמך (confidence level) של המדידה היא 68%.

2.4 השוואה בין תוצאת הבדיקה וסף הייחוס

לצורך מתן החלטה לגבי ממצאי הבדיקה, בבדיקה קצרת טווח ובבדיקה ארוכת טווח, יש להשוות את ריכוז הנמדד עם סף ייחוס מסוים (ראה פרק 3). סף זה נקרא:

- הסף לפעולות שיפור מידיות, בבדיקה קצרת טווח.

▪ רמת הפעולה, בבדיקה ארוכת טווח.

מכיוון שריכוז הראדון הנמדד ע"י הגלאי לא שווה בדיוק לריכוז האמיתי בחדר, יש להתייחס לריכוז הנמדד ביחד עם אי הודאות שלו.

לדוגמה, אם מודדים במגורים בבדיקה ארוכת טווח ריכוז ראדון 195 בקרלומ"ק עם אי ודאות 10% (כלומר 195 ± 19.5 בקרלומ"ק), אז יש לצפות שהריכוז האמיתי בחדר יהיה בין 175.5 - 214.5 בקרלומ"ק. בבדיקה זו סף הייחוס הוא רמת פעולה 200 בקרלומ"ק. במצב זה, הסיכון שריכוז האמיתי בחדר הנו נמוך \ גבוה מרמת הפעולה הנו 60% \ 40%, בהתאמה. במצב זה :

- אם לא מתייחסים לאי הודאות של המדידה ומשווים את הריכוז הנמדד לרמת הפעולה, ניתן להחליט שהריכוז האמיתי בחדר הנו "תקין" (נמוך מרמת הפעולה) כאשר קיים סיכון סביר - 40% שהריכוז האמיתי אינו תקין (גבוה מרמת הפעולה).
- אם מתייחסים לאי הודאות של המדידה ומשווים את החיבור בין ריכוז הנמדד עם אי הודאות שלו לרמת הפעולה, הסיכון לתת החלטה "תקין" יורד ל- 23%.

בהתאם לעיקרון "זהירות מונעת" של בטיחות הקרינה, כדי להקטין את הסיכון לתת החלטה "מתחת לסף" כאשר קיים סיכון סביר שהוא "מעל הסף" יש לחבר את הריכוז הנמדד עם אי הודאות שלו ולהשוות חיבור זה לסף הייחוס.

3. אופן ביצוע בדיקות ראדון

3.1 בדיקה ארוכת טווח

בדיקה ארוכת טווח מבצעים בכל הקומות, במשך 3 חודשים לפחות, בתנאי מחיה רגילים. כעיקרון, קיים סיכון קטן לחדירת ראדון קרקעי לקומות עליונות. מכיוון שבדיקה קצרת טווח מיועדת לגלות חדירת ראדון מהקרקע, אין לבצע בדיקה קצרת טווח בקומות העליונות. כעיקרון, מקור הראדון בקומות העליונות הנו אקסהלציה (פליטה) מחומר הבנייה. מקור זה הנו מספיק חלש כך שיש לצפות ריכוז ראדון תקין בתנאים של אוורור רגיל. לכן, כעיקרון, אין צורך לבצע בדיקת ראדון בקומות עליונות. אם, מסיבה כל שהיא רוצים לבדוק, יש לבדוק ע"י הבדיקה ארוכת הטווח בתנאי מחיה רגילים (פתוחים).

כאשר החיבור בין הריכוז הנמדד ואי הודאות שלו יהיה :

- נמוך מרמת הפעולה (200 / 500 בקרלומ"ק במגורים / מקום עבודה, בהתאמה) – יש לדווח שריכוז הראדון הנו תקין ואין צורך בפעולות שיפור.
- גבוה מרמת הפעולה (200 / 500 בקרלומ"ק במגורים / מקום עבודה, בהתאמה) – יש לדווח שריכוז הראדון אינו תקין ויש לבצע פעולות שיפור בזמן מוקצב.

אם הריכוז הנמדד אינו תקין, יש לבצע פעולות להפחתתו. כדי למנוע חשיפה מיותרת של האדם, יש לקבוע את פרק הזמן המוקצב עד לסיום העבודות שיפור לפי הנוסחה (ראה הנחיה מס' 1) :

במגורים :

$$(1) \quad T_{mit} = \frac{3,500}{C_{open}}$$

במקום עבודה :

$$(1') \quad T_{mit} = \frac{10,000}{C_{open}}$$

כאשר C_{open} הנו ריכוז הראדון הנמדד בבדיקה ארוכת טווח (ביחידות של בקרלומ"ק) ו- T_{mit} הנו פרק הזמן המוקצב עד סיום העבודות שיפור (ביחידות של חודשים).

במשך עבודות השיפור יש לבצע בדיקות קצרות טווח בתנאים סגורים כדי לבדוק את הצלחתם להפחתת הריכוז. אחרי סיום העבודות יש לבדוק שוב את ריכוז הראדון באותו חדר באמצעות בדיקה ארוכת טווח.

3.2 בדיקה קצרת טווח

מבצעים בדיקה זו בחדר צמוד קרקע במשך 3 עד 7 ימים בתנאים של דלתות וחלונות סגורים. יש להבטיח את סגירתם במשך הבדיקה על ידי מדבקה. אם קיימים בחדר אמצעי אוורור (פתחים, מפוחים, מזגנים וכד') או אמצעים להפחתת מקור הראדון (mitigation), שאמורים לפעול גם בתנאי מחיה רגילים, אין להפסק, לסגור או לאטום אותם. כלומר, אין לשנות את התנאים שאמורים להשפיע על ריכוז הראדון בחדר, חוץ מסגירת דלת וחלון. בשיטה זו, כל התנאים שאמורים להשפיע על ריכוז הראדון בחדר בבדיקה ארוכת טווח יהיו זהים לתנאים בבדיקה קצרת טווח, חוץ לסגירת דלת וחלון.

ככלל, אין צורך לבצע בדיקה קצרת טווח בחדר שלא ניתן לסגור ע"י דלת וחלון. בחדר כזה מומלץ לבצע ישירות בדיקה ארוכת טווח. אם מדובר בחדר צמוד קרקע באזור מועד לראדון בקרקע, יש לבדוק מי הוא מספר המינימאלי של חדרים ללא דלתות קבועות ביניהם שניתן לסגור ביחד, לדוגמה סלון ביחד עם חדר צמוד(ים) ללא דלת ביניהם. במצב זה, יש למקם גלאי ראדון בכל חדר בשימוש לשהיית אדם.

לצורך ביצוע עבודה להקטנת ריכוז ראדון (mitigation) בלבד, כלומר לצורך גילוי וערכת אקטיביות של מקור הראדון בחדר שנמצה בשלב בנייה או שיפוץ, ניתן לבצע בדיקה קצרת טווח כאשר סוגרים אותו במשך הבדיקה ע"י יריעות פלסטיק אטומות לראדון ובודקים את ריכוז הראדון בכל חדר בשיטה המפורטת בפרק 3.4.

מטרת הבדיקה היא גילוי מידי של ריכוז גבוה (שנובע ממקור ראדון גבוה, בדרך כלל חדירת ראדון מן הקרקע), שעלול לגרום לריכוז ראדון בבית הגבוה מרמת הפעולה, בתנאי מחיה רגילים. בדיקה זו, שמתבצעת בתנאים קיצוניים, לא אמורה לגלות את המצב (תקין או לא) של ריכוז הראדון בחדר. סגירת החדר מיועדת רק להקטין את רמת האוורור במשך הבדיקה כדי להגדיל את ריכוז הראדון, להבטיח מדידה מדויקת יותר ולספק מידע על מדור הראדון.

בבדיקה זו ריכוז הראדון הנמדד תלוי ברמת האיטום של החדר: כאשר מקור הראדון הוא קבוע וקצב תחלופת האוויר קטן, הריכוז הנמדד גדל. לכן, כדי לנבא את הריכוז הצפוי בתנאי מחיה רגילים ולברר אם יש צורך לבצע פעולות שיפור מידיות, יש לבדוק את קצב תחלופת האוויר בחדר. מבצעים בדיקה זו באמצעות גלאי לניטור רציף או גלאים פסיביים, בשיטה המפורטת בפרק 3.3.

כדי לבדוק את הצורך בפעולות שיפור מידיות יש להשוות את הריכוז הנמדד עם הסף לפעולות שיפור מידיות. אם החיבור בין הריכוז הנמדד ואי הודאות שלו יהיה:

- נמוך מהסף לפעולות שיפור מידיות, יש לבצע מיד בדיקה ארוכת טווח.
- גבוה מהסף לפעולות שיפור מידיות, יש לבצע פעולות מידיות להקטנת הריכוז בזמן מוקצב.

הסף לפעולות שיפור מידיות C_{mit} (מחושב בהנחיה מס' 3) נתון בטבלאות 2 ו-3 עבור מגורים ובטבלאות 4 ו-5 עבור מקום עבודה, כפונקציה של קצב תחלופת האוויר ומשך זמן הבדיקה, עבור גלאי שמודד את הריכוז בסוף הבדיקה ואת הריכוז הממוצע במשך הבדיקה, בהתאמה.

אם יש לבצע פעולות שיפור, מחשבים את הזמן המוקצב לסיום עבודות (בחודשים) כלהלן:

במגורים:

$$(2) \quad T_{mit} = \frac{3,500}{C_{open}^{pred}}$$

במקום עבודה:

$$(2') \quad T_{mit} = \frac{10,000}{C_{open}^{pred}}$$

כאשר C_{open}^{pred} (בקרל/מ"ק) הנו הריכוז הצפוי בתנאי מחיה רגילים :

$$(3) \quad C_{open}^{pred} = C_{closed}^{max} \cdot \frac{0.00755 + \lambda_v}{0.00755 + 0.3}$$

כאשר 0.00755 (לשעה) הנו הקבוע של דעיכת ראדון, λ_v הנו קצב תחלופת אוויר לשעה ו- C_{closed}^{max} (בקרל/מ"ק) הנו הריכוז המרבי הצפוי בבדיקה הקצרה, מחושב לפי הנוסחה :

$$(4) \quad C_{closed}^{max} = F_{eq}(t) \cdot C_{closed}(t)$$

כאשר C_{closed} הנו הריכוז הנמדד בזמן הבדיקה t בין 3-7 ימים ו- F_{eq} הנו פקטור הרוויה נתון בטבלות 6 ו-7, לפי סוג הגלאי, קצב תחלופות אוויר ופרק זמן הבדיקה. הערך שלו הינו בלתי תלוי ברמת הפעולה. מחשבים אותו, לפי סוג הגלאי, בעזרת טבלות 2,3 (או 4,5) על יד חלוקת הערך שמופיע בעמודה "אין סופי" בערך המתאים לזמן הבדיקה.

במשך עבודות השיפור יש לבצע בדיקות קצרות טווח בתנאים סגורים כדי לבדוק את הצלחתם להפחתת הריכוז. אחרי סיום עבודות השיפור יש לבדוק שוב את ריכוז הראדון בחדר על ידי בדיקה ארוכת טווח.

3.3 בדיקה של קצב תחלופת אוויר

בדיקה זו היא חלק אינטגרלי של הבדיקה קצרת הטווח בתנאים סגורים בחדר צמוד קרקע. בהתאם למודל הפיסיקלי של ראדון בחדר סגור צמוד קרקע (הנחיה מס' 5) ריכוז הראדון הנו פרופורציונאלי לאקטיביות המקורות ראדון (חדירה מן קרקע ופליטה מחומר בנייה) והפוך פרופורציונאלי לקצב תחלופות האוויר. לצורך בדיקת ריכוז ראדון בסוגים השוני של החדרים המפורטים בטבלה 1, סגורים את החדר ע"י דלת וחלון. במידה שלא קיים פתחי אוורור אחרים, יש להניח את הערך של קצב תחלופות האוויר כלהלן (ראה תרשים 2 או 4) :

1. בחדר בעל סגירה "רגילה" יש להניח, ללא מדידה, רמת אוורור 0.1 תחלופות אוויר לשעה.
2. בחדר בעל סגירה "כמעט הרמטית" (ראה טבלה 1) יש למדוד ריכוז הראדון ע"י בדיקה קצרת טווח. אחר כך יש לבחור :

- א. אם החיבור בין הריכוז הנמדד ואי הודאות שלו הנו נמוך מהסף לפעולות שיפור מידיות בחדר רגיל (לפי 0.1 תחלופות אוויר לשעה), יש לבצע בדיקה ארוכת טווח.
- ב. אם החיבור בין הריכוז הנמדד ואי הודאות שלו הנו גבוה מהסף לפעולות שיפור מידיות בחדר רגיל (לפי 0.1 תחלופות אוויר לשעה), יש לבצע בדיקה של קצב תחלופות האוויר. אחר כך, יש לבחור :

- i. אם החיבור בין הריכוז הנמדד ואי הודאות שלו הנו נמוך מהסף לפעולות שיפור מידיות המתאים לקצב תחלופות אוויר הנמדד לעיל, יש לבצע בדיקה ארוכת טווח.
- ii. אם החיבור בין הריכוז הנמדד ואי הודאות שלו הנו גבוה מהסף לפעולות שיפור מידיות המתאים לקצב תחלופות אוויר הנמדד לעיל, יש לבצע פעולות שיפור בזמן מוקצב (מחושב בפרק 3.2).

3. בחדר בעל סגירה "הרמטית" יש להניח רמת אוויר 0 תחלופות אוויר לשעה.

לגבי חדר שבו קיימים פתחי אוורור (חוץ מדלת וחלון) יש לבדוק אותו כחדר "רגיל", דהיינו יש להניח רמת אוורור 0.1 תחלופות אוויר לשעה.

שיטת הבדיקה הנ"ל בחדר כמעט הרמטי מבוססת על העובדה שבחדר כזה רמת האוורור יכולה להשתנות בטווח מאוד רחב, בין 0.1 עד 0 תחלופות אוויר לשעה, כפונקציה של רמת האיטום. כתוצאה מכך, כאשר רמת האוורור קטנת מ 0.1 עד 0, ריכוז הראדון גודל בפקטור ענק, דהיינו $0.10755/0.00755=14$. לכן, ריכוז

הראדון הנמדד בתנאים סגורים יכול להיות גבוה, למרות שבתנאים פתוחים (מחיה רגילים) הוא נמוך. בגלל זה חדר בעל סגירה "כמעט הרמטית" דורש בדיקה מיוחדת: כדי להחליט, אם יש צורך לבצע פעולות שיפור מידיות, יש להעריך ביחד עם ריכוז הראדון גם את הקצב של תחלופות אוויר.

מכוון שבחדר "כמעט הרמטי" יש לצפות קצב תחלופות אוויר יותר קטן כמו בחדר "רגיל", דהיינו קטן מ-0.1 תחלופות אוויר לשעה, הסף לפעולות שיפור מידיות בחדר כזה יהיה גבוה יחסית לסף המתאים לחדר רגיל (ראה טבלות 2,3 או 4,5, לפי רמת הפעולה). כתוצאה לכך:

- אם ריכוז הראדון הנמדד בחדר כמעט הרמטי יהיה נמוך מהסף לפעולות שיפור מידיות המתאים לרמת אוורור 0.1 תחלופות אוויר לשעה, הריכוז הצפוי בתנאים מחייה רגילים יהיה קטן מרמת הפעולה ולכן אין צורך למדוד רמת האוורור, אלא יש לבצע בדיקה ארוכת טווח.
- אם ריכוז הראדון הנמדד בחדר כמעט הרמטי יהיה גבוה מהסף לפעולות שיפור מידיות המתאים לרמת אוורור 0.1 תחלופות אוויר לשעה, אין אפשרות להעריך את הריכוז הצפוי בתנאים מחייה רגילים ללא מדידה ממש על רמת האוורור (ראה נוסחה (3) הני"ל). לכן, יש למדוד את רמת האוורור בחדר ולבחור מטבלאות 2,3 או 4,5 (לפי רמת הפעולה), בהתאם לרמת האוורור, את הסף לפעולות שיפור מידיות. לבסוף, יש להשוות את הריכוז הנמדד לסף זה ולהחליט האם יש לבצע פעולות שיפור מידיות או בדיקה ארוכת טווח.

לסיכום, כאשר בודקים חדר מסוג "כמעט הרמטי", יש לבצע בדיקה של רמת האוורור רק אם ריכוז הראדון הנמדד בחדר הנו גבוה מהסף לפעולות שיפור מידיות המתאים לחדר "רגיל" (עם רמת אוורור 0.1 תחלופות אוויר לשעה).

תרשים זרימה 2 ו-4 (לפי רמת הפעולה), מראה איך לתת את ההמלצה לגבי ממצאי הבדיקה, בהתאם לרמת האוורור בחדר סגור.

מודדים את הקצב של תחלופות "ראדון באוויר" על ידי גלאי שמודד ריכוז ראדון, בהתאם לשיטות המפורטות בהנחיה מס' 3. אף על פי שמודדים את ריכוז הראדון, תוצאת הבדיקה אינה תלויה בריכוז הראדון. רמת האוורור תלויה ברמת האיטום ובנפח החדר (ראה הנחיה מס' 5). לכן, ניתן לבצע את הבדיקה של קצב תחלופות אוויר גם בחדר אחר עם אותו סוג האיטום בדלת ובחלון ועם אותו נפח כמו בחדר הנבדק. כאשר מבצעים סידרה של בדיקות של ריכוז ראדון בחדרים דומים, כאשר ניתן להניח קצב תחלופות אוויר דומה בכל החדרים, ניתן למדוד רמת האוורור בחדר "אופייני" אחד ולהניח שאותו קצב תחלופות אוויר קיים בכל החדרים מאותו סוג.

ניתן למדוד את הקצב של תחלופות אוויר על ידי בדיקה אחד במשך 4-7 ימים עם גלאי לנטור רציף ישר בחדר הנבדק צמוד קרקע או על ידי שתי בדיקות ע"י גלאים פסיביים בחדר אופייני שאינו צמוד קרקע.

3.3.1 בדיקה של קצב תחלופות אוורור על ידי גלאי רציף

בדיקה זו, באמצעות גלאי (מכשיר) לנטור רציף של ריכוז הראדון, כל שעה, במשך 4-7 ימים בתנאים סגורים, ישר בחדר הנבדק צמוד קרקע, הינה השיטה המומלצת. כאשר משך זמן הבדיקה יהיה יותר ארוך (מומלץ), האמינות של הבדיקה תהיה יותר גבוהה. גלאי זה מאפשר למדוד את עליית הריכוז, מיד אחרי סגירת החדר. מהעקומה של הריכוז הנמדד כפונקציה של זמן המדידה ניתן לחשב, בהתאם להנחיה מס' 3, את הקצב של תחלופות אוויר. מבצעים את החישוב ע"י גיליון אקסל "הנחיות" מהמשרד להגנת הסביבה.

היתרון של השיטה הוא שניתן לתת המלצה לגבי ממצאי הבדיקה מיד. תוצאת הנטור מאפשרת להעריך את הקצב של תחלופות אוויר ואת הריכוז הראדון המרבי בחדר. בעזרצ הטבלות 2,3 או 4,5 (לפי רמת הפעולה), ניתן לתת מיד את המלצה על ממצאי הבדיקה: האם יש לבצע פעולות שיפור מידיות או יש לבצע בדיקה ארוכת טווח. מומלץ לבצע את הבדיקה של קצב תחלופות אוויר ישר בחדר נבדק, אבל, ניתן למדוד אותו גם בחדר אופייני.

בנוסף, הבדיקה ע"י גלאי רציף מאפשרת, בהתאם למודל הפיסיקלי המפורט בהנחיה מס' 5, להעריך את האקטיביות של מקורות הראדון בחדר, עניין חשוב אם יש לתכנן פטרונות להקטנת ריכוז הראדון.

3.3.2 בדיקה של קצב תחלופות אוורור על ידי גלאי פסיבי

ניתן לבצע את הבדיקה של קצב תחלופות אוויר גם באמצעות שתי בדיקות חוזרות, במשך 3 ו-7 ימים, על ידי שתי גלאים פסיביים, בחדר אופייני. בדיקה זו הינה יותר מסובכת ואינה מומלצת. כדי להניח שקיים אותו קצב תחלופות אוויר, בחדר הנבדק ובחדר האופייני, יש לוודא שהם דומים מבחינת האיטום בדלת ובחלון ומבחינת הנפח.

החיסרון הראשון של השיטה הוא שיש לבחור חדר האופייני ללא קשר ישיר לקרקע (מומלץ בקומה העליונה), כדי למנוע את המצב (שיכול לקרות בחדר צמוד קרקע) שאקטיביות המקור הראדון משתנה במשך הבדיקה. במצב הזה שיטת הבדיקה, שמניח אקטיביות קבוע של מקור הראדון, לא מבטיחה מדידה מדויקת.

החיסרון השני של השיטה הוא שיש לבצע, כדי לתת המלצה עבור חדר הצמוד קרקע הנבדק, בדיקה קצרת טווח נוספת בחדר הזה. לכן, יש לבצע שלושה בדיקות שדורשים זמן, גלאים ועבודה.

3.4 הערכה של מקור הראדון

אם הריכוז הנמדד בבדיקה קצרה עובר את הסף לפעולות שיפור מיידיות, מומלץ לבצע עבודות להקטנתו בזמן המוקצב. כדי לתכנן את הפתרון האופטימלי יש להעריך את האקטיביות של מקורות הראדון, כלומר את האקטיביות שנובעת מחומר הבנייה ומן הקרקע. יש לבצע הערכה זו בעזרת המודל הפיסיקלי (לפי הנחיות מס' 5). יש לבצע את המדידה של ריכוז הראדון בחדר סגור באמצעות גלאי לנטור רציף ואת החישוב בעזרת הגיליון אקסל "הנחיות" מהמשרד להגנת הסביבה.

3.5 הנחת הגלאי בחדר

בוחרים את המיקום של הגלאי בחדר כדי להבטיח מדידה אמינה של ריכוז הראדון הנחשף ע"י האדם ולמנוע כל דבר שיכול להשפיע באופן שלילי של שיטת המדידה של הגלאי ולכן, להקטין את אמינות המדידה. הבודק אחראי למקם את הגלאי והדייר אחראי לשמור למקום זה.

מכיוון שסכנת הראדון נובע מחדירתו מהקרקע, מומלץ למקם את הגלאי במפלס הכי נמוך בבית, בחדר משומש ע"י האדם כמגורים או מקום עבודה. אין סיבה לבדוק ראדון בחדרים שאינם בשימוש (חדרים סגורים רוב הזמן, מרתפים, מחסנים וכ"ד). ככלל, אין סיבה לבדוק חדרים מאווררים היטב (שירותים, אמבטיה, מטבח, מרפסת, חדר כניסה לבית וכ"ד) או חדרים סגורים רוב הזמן (חדר ארונות, מחסן וכ"ד). יש למקם את הגלאי בחדר מאוכלס באופן שוטף (סלון, חדר שינה, חדר ילדים וכ"ד).

מומלץ למקם גלאי אחד בכל חדר. בחדרים גדולים מומלץ למקם גלאי אחד בשטח רצפה של 40 מ"ר. לכן, במקרה של חדר גדול מ-80 מ"ק יש למקם 2 גלאים. יש למקם את הגלאי במקום עם פוטנציאל הכי גבוה להמצאות גז ראדון, כלומר קרוב לפתחים לקרקע ורחוק מפתחי אוורור.

מומלץ למקם את הגלאי, במידה האפשרית במקום מרכזי בחדר, בגובה 0.5 – 2.5 מ' לפחות מהרצפה (גובה הנשימה), במרחק כ-2 מ' לפחות מאמצעי אוורור (דלת, חלון, מאוורר, פתחי אוורור, מיזוג אוויר, מערכות אוורור וכ"ד), רחוק מהשפעה של זרימת אוויר, מקורות חום, קור או לחות. יש למקם אותו במרחק כ-10 ס"מ לפחות מחפצים (ספרים, בגדים, וילונות וכ"ד). יש למנוע התערבות עם הגלאי ע"י מקבל השירות (פתיחה, נזק, שינוי המקום, כיסוי על ידי חפצים וכ"ד).

במקרה של אתרים גדולים מורכבים ממספר יחידות בנייה ו / או יותר מפלסים ללא דלת ביניכם, איפה ניתן לצפות ריכוז ראדון לא הומוגני (לדוגמה, בגלל חדירת ראדון מהקרקע או רמת אוורור שונה) ניתן למקם יותר גלאים. ניתן למקם יותר גלאים באתר הבדיקה גם במסגרת עבודות מיטיגציה לצורך גילוי המיקום לחדירת הראדון מהקרקע.

3.6 בדיקת אתרים גדולים

במקרה של אתרים במבנים עם שטח / נפח הרבה יותר גדולים יחסית לחדרים הרגילים במגורים (לדוגמה: אולמות ספורט, קולנוע, תיאטרון, אירועים, תעשייה, מסחר, מסעדות, מחסנים, פרוזדורים, חניונים וכ"ד) ריכוז ראדון יהיה תלוי בגיאומטריה של האתר, בפוטנציאל לחדירת ראדון מהקרקע, בחומר הבנייה, במספר ובשטח ובמיקום של פתחי אוורור, ברמת האוורור הטבעי והמאולץ, בהרגלי שימוש באתר ע"י האדם וכ"ד. במצב זה לא ניתן לקבוע מראש את מספר הגלאים הנדרשים למדידת ריכוז הראדון. ולכן כדישה מינימאלית, יש למקם לפחות 5 גלאים, אחד באמצע וארבע בקצות האולם, במקומות עם הפוטנציאל הכי גבוה להצטברות ראדון (קרוב למיקום הפוטנציאלי לחדירת ראדון מהקרקע ורחוק

מפתחי אוורור). באחריות הבודק המוסמך לקבוע את המספר האופטימאלי של גלאים הנדרשים כדי להבטיח בדיקת ריכוז ראדון בכל מקום באתר עם פוטנציאל לשהיית אדם.

3.7 בדיקת ראדון לפני אכלוס בבניין חדש

לפני אכלוס בבניין חדש (קבלת טופס 4) יש לבדוק ריכוז הראדון בהתאם לתקנות התכנון והבנייה (בקשה להיתר, תנאים ואגרות) (תיקון) התשס"ט – 2008. במצב זה יש לבצע בדיקה קצרת טווח בתנאים סגורים בחדר המיועד לשהיית אדם. באזור מועד לראדון בקרקע (כמוגדר בהנחיה מס 1) יש לבדוק את כל החדרים צמודי הקרקע. באזור שאינו מועד לראדון בקרקע, יש לבדוק רק חדר אחד תת-קרקעי עם רמת אוורור הכי נמוכה. יש לבצע את הבדיקה באמצעות בודק שהוסמך ע"י המשרד להגנת הסביבה בשיטה המפורטת במסמך זה. בדיקה זו מיועדת לגלות, כבר לפני אכלוס המבנה, האם קיימת חדירה משמעותית של ראדון מהקרקע. במידה והיא קיימת, יש לבצע פעולות שיפור מידיות בחדר ולאחר מכן לבדוק שוב עד שריכוז הראדון בחדר תקין. בדיקת הראדון הינה באחריות הרשות המקומית שנותנת אישור אכלוס.

כאשר בודקים ראדון במבנה לפני האכלוס, לא ניתן לבצע בדיקה ארוכת טווח, מכיוון שיש לבצע בדיקה זו בתנאי מחייה רגילים, והם תלויים באופן השימוש בחדרים (בעיקר ברמת האוורור) על ידי הדייר, אשר משתנה מדייר לדייר. בדרך כלל, לשם זהירות מונעת, מומלץ לבצע גם בדיקה ארוכת טווח אחרי האכלוס. בדרך כלל, באזורים מועדים לראדון בקרקע, הרשות המקומית אשר אחראית למתן אישור האכלוס, דורשת מהבונה לבצע גם בדיקה ארוכת טווח אחרי אכלוס המבנה. במידה ואחרי בדיקה זו ריכוז הראדון בחדר מסוים אינו תקין, יש לבצע פעולות שיפור ולבדוק שוב עד שהריכוז תקין.

4. רשימת ההנחיות

מידע מפורט על שיטות לבדיקה מופיע בהנחיות הבאות:

1. מדיניות המשרד לטיפול בממצאי בדיקות ראדון
2. בדיקת ריכוז ראדון במבנים
3. בדיקת ריכוז ראדון בחדר כפונקציה של רמת האוורור
4. בדיקת ריכוז ראדון 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
9. תוכנית אבטחת איכות הגלאים
10. בבדיקת ריכוז ראדון על ידי גלאי אלקטרט
11. בבדיקת ריכוז ראדון על ידי גלאי פחם פעיל
12. בבדיקת ריכוז ראדון על ידי גלאי עקבות התפרקות גרעינית

5. דוגמאות

1. בדיקה של קצב תחלופת האוויר בתנאים סגורים

אם מקור הראדון הנו קבוע במשך הבדיקה, ריכוז הראדון עולה לפי פונקציה אקספוננציאלית (EXP) ומגיע לערך המרבי (95% מערך רוויה) אחרי זמן T_{eq} . בהתאם למודל הפיסיקלי של הראדון בחדר (הנחיה מס' 3), מעריכים את הקצב של תחלופת האוויר לפי הנוסחה:

$$\lambda_v = \frac{3}{T_{eq}} - 0.00755$$

מבצעים בדיקה זו בחדר סגור, באמצעות גלאי לניטור רציף שמודד את ריכוז הראדון בכל שעה. לדוגמה, אם T_{eq} שווה ל-12 שעות, קצב תחלופת האוויר יהיה 0.24 לשעה.

2. הערכה של קצב תחלופת האוויר בתנאי מחיה רגילים

בתנאי מחיה רגילים, הקצב של תחלופת האוויר (למעשה – תחלופת ראדון באוויר) הנו 0.3 לשעה. איך מעריכים אותו?

בלילה, כאשר סוגרים חדר רגיל, ריכוז הראדון מתחיל לעלות ומגיע לרוויה (ריכוז מרבי) בתוך זמן הרוויה $T_{eq} = 12-24$ שעות. מפרק זמן זה מחשבים (ראה דוגמה 1) את קצב תחלופת האוויר $\lambda_v = 0.1 - 0.2$ לשעה, בממוצע 0.15 לשעה. במשך היום, בתנאים פתוחים, קצב תחלופת האוויר הוא גדול יותר. לפי המודל הפיסיקלי של ריכוז ראדון בחדר (הנחיה מס' 5) הממוצע ב- 24 שעות יהיה פי שניים גדול יותר כמו בלילה, כלומר כ- 0.3 תחלופות אוויר לשעה.

3. ריכוז הראדון בחדר לא דורש פעולות שיפור מידיות

נניח שמודדים בחדר סגור במשך 3 ימים, עם גלאי אלקטרט, ריכוז ראדון 900 בקרל/מ"ק עם אי ודאות יחסית של 10%. אי הוודאות האבסולוטי הוא $0.1 \cdot 900 = 90$ בקרל/מ"ק. בנוסף, מודדים קצב תחלופת אוויר 0.03 לשעה. בטבלה 3 רואים את הסף למיטיגציה 1,073 בקרל/מ"ק. כיוון שהסכום בין הריכוז הנמדד ואי הוודאות, 990 בקרל/מ"ק, נמוך מ- 1,073 בקרל/מ"ק, אין לבצע מיטיגציה מידית אלא יש לבצע בדיקה ארוכת טווח.

4. ריכוז הראדון בחדר דורש פעולות שיפור מידיות

נניח שמודדים בחדר סגור במשך 3 ימים, עם גלאי אלקטרט, ריכוז ראדון 1,100 בקרל/מ"ק עם אי ודאות של 10%. בנוסף, מעריכים את קצב תחלופת האוויר 0.03 לשעה. בטבלה 3 רואים את הסף למיטיגציה 1,073 בקרל/מ"ק. כיוון שהריכוז הנמדד גבוה מסף זה, יש לבצע מיטיגציה מידית.

מה יהיה הזמן המרבי לביצוע המיטיגציה? בעזרת טבלה 3 מחשבים את פקטור הרוויה בין הריכוז המרבי אחרי זמן אין סופי והריכוז הנמדד אחרי 3 ימים, שמתאים לתחלופת אוויר של 0.03, ומקבלים:

$$F_{eq} = \frac{1073}{1638} = 1.53$$

לכן, אם מודדים ריכוז של 1,100 אחרי 3 ימים, הריכוז המרבי יהיה:

$$C_{closed}^{max} = 1.53 \cdot 1100 = 1683$$

מחשבים את הריכוז הצפוי בתנאי מחיה רגילים עם תחלופת אוויר 0.3 לשעה. מנוסחה 3 מקבלים:

$$C_{open} = 1683 \cdot \frac{0.03 + 0.00755}{0.3 + 0.00755} = 205$$

לבסוף, מחשבים את הזמן המרבי למיטיגציה, לפי נוסחה 2:

$$T_{mit} = \frac{3500}{205} = 17$$

לסיכום, יש לבצע מיטיגציה בפרק זמן של 17 חודשים.

6. שאלות ותשובות

א. מה מקור הראדון בממ"ד?

ראדון הוא גז רדיואקטיבי חסר צבע, ריח או טעם, הנוצר מהתפרקות ראדיום-226 שנמצא בכל סוגי הקרקעות בריכוזים שונים. לאחר היווצרות הראדון בקרקע הוא נע כלפי מעלה ועלול לחדור למבנים.

חומר הגלם העיקרי למוצרי הבנייה השונים הוא האדמה. מכיוון שבקרקע נמצא ראדיום-226, גם מוצרי הבנייה מכילים חומר זה. כלומר, הימצאות הראדיום במוצרי בנייה מהווה מקור נוסף להימצאות ראדון במבנים.

ב. כיצד נוצר גז ראדון בממ"ד?

כאמור, בכל מוצרי הבנייה שמכילים אדמה מצוי המרכיב הכימי (ראדיום-226) היוצר את גז הראדון. פליטת הגז מהקירות היא תהליך אטי והכמות הנפלטת – קטנה. עם זאת, בשל מסת החומר והרכב הבטון שממנו עשוי הממ"ד, פליטת ראדון מבטון בממ"דים גבוהה פי כחמישה מהפליטה מקיר רגיל הבנוי בלוקים. יש לזכור כי פליטת ראדון היא תהליך הקיים גם בקירות וברצפה בחדרים רגילים.

ג. מהי התופעה הפיסיקלית של הצטברות ראדון בחדר סגור?

יש לציין שבכל חדר סגור, אשר אינו סגור הרמטית, קיימת תחלופת אוויר שגורמת לדילול הראדון בתוך האוויר, ולכן להקטנת ריכוזו. לכן, המודל הפיסיקלי הבא מתאים לכל חדר עם מקור ראדון קבוע בזמן, כמו פליטת ראדון מהקירות.

לפני הבדיקה יש לפתוח את הדלתות והחלונות כדי לוודא ריכוז ראדון אפסי. אחרי סגירת החדר, ריכוז הראדון הנובע מהקירות עולה, לפי הנוסחה:

$$C(t) = C_{\max} \{1 - \exp[-(\lambda + \lambda_v) t]\} \quad (1א)$$

כאשר:

$$\begin{aligned} t &= \text{הזמן אחרי סגירת החדר (שעות)} \\ C(t) &= \text{הריכוז בחדר בזמן } t \text{ אחרי סגירת החדר (בקרל/מ"ק)} \\ C_{\max} &= \text{הריכוז המרבי בחדר בתנאי הרוויה (בזמן אין סוף } t = \infty \text{) (בקרל/מ"ק)} \\ \lambda &= \text{קבוע דעיכת הרדיואקטיביות של הראדון } 0.00755 \text{ לשעה} \\ \lambda v &= \text{קצב תחלופת האוויר בחדר במצב סגור לשעה} \end{aligned}$$

נובע מנוסחה (1א) שפרק הזמן המוקצב לריכוז הראדון להגיע ל- 95% מרמת הרוויה הוא:

$$T_{eq} = \frac{3}{\lambda + \lambda_v} \quad (2א)$$

לכן, אחרי סגירת החדר, ריכוז הראדון עולה ומגיע לרוויה מהר יותר כאשר קצב תחלופת האוויר גבוה יותר. כמובן, הוא מגיע לריכוז מרבי נמוך יותר. לדוגמה, בחדר רגיל "ישן", הסגור בצורה רגילה (ללא איטום בדלת והחלון), עם רמת אוויר כ- 0.2 תחלופות לשעה, ריכוז הראדון מגיע לרוויה (95% מ- $C_{\max}$) במשך 15 שעות. אבל בממ"ד, כאשר קצב תחלופת האוויר הנו אפסי, עליית הריכוז "צריכה" 17 ימים. אחרי היום הראשון מגיע הריכוז לכ- 200 בקרל/מ"ק. יש לציין שלפי ההוראות של פיקוד העורף הזמן המרבי שמותר לאדם לשהות בממ"ד סגור הרמטית הוא 6 שעות. בזמן זה ריכוז הראדון המרבי יהיה כ- 80 בקרל/מ"ק. אם הריכוז ההתחלתי בממ"ד היה אפסי, הריכוז הממוצע אחרי 6 שעות, שקובע את הסיכון הבריאותי, יהיה כ- 40 בקרל/מ"ק, כלומר דומה לממוצע הארצי של 47 בקרל/מ"ק בחדר רגיל צמוד קרקע (לפי סקר ישראל 1998).

הריכוז המרבי האפשרי בחדר סגור הוא:

$$C_{\max} = \frac{ES}{(\lambda + \lambda_v)V} \quad (3א)$$

כאשר:

$$\begin{aligned} E &= \text{קצב פליטת הראדון (אקסהלציה) מהקירות (בקרל/מ"ר/שעה)} \\ S &= \text{שטח פולט ראדון בחדר (מ"ר)} \\ V &= \text{נפח החדר (מ"ק)} \end{aligned}$$

כאשר "בקרל" הוא יחידת מדידה של קצב התפרקות רדיואקטיבית ושווה להתפרקות אחת לשנייה.

נובע מנוסחה (א2) שריכוז הראדון בחדר הנו פרופורציונאלי לקצב פליטת ראדון מהקירות, והפוך פרופורציונלי לקצב החלפת האוויר.

הקצב של תחלופת האוויר בחדר סגור קובע באופן משמעותי את ריכוז הראדון. לדוגמה, ריכוז הראדון בחדר סגור הרמטית (עם אפס תחלופות אוויר לשעה) יהיה גבוה פי 25 יחסית לאותו חדר הסגור בצורה רגילה (עם 0.2 תחלופות אוויר לשעה).

הנוסחה (א3) מסבירה למה ריכוז הראדון הנמדד בממ"ד בתנאים של סגירה הרמטית הנו גבוה, ובתנאים פתוחים הוא נמוך:

- קצב פליטת הראדון E מהבטון המסיבי של הממ"ד הוא כ- 5 בקרל/מ"ר/שעה.
- היחס בין שטח פולט ראדון S ונפח V של חדר הממ"ד S/V הנו כ-2.
- רמת האוורור בתנאי מחיה רגילים (ממוצע של 24 שעות) λ_v היא כ- 0.3 תחלופות לשעה.

לכן, ריכוז הראדון בתנאים סגורים הרמטית יהיה 1,324 בקרל/מ"ק ובתנאי מחיה רגילים יהיה 33 בקרל/מ"ק.

לסיכום, ריכוז הראדון בממ"ד הנובע מחומר הבנייה הנו תקין, כיוון שריכוז הראדון המרבי המותר במבנים בתנאי מחיה רגילים הוא 200 בקרל/מ"ק.

ד. האם ריכוז הראדון בממ"דים הנו גבוה?

הראדון עלול להצטבר בחדרים שאין בהם אוורור, לדוגמה בממ"ד כאשר הוא סגור הרמטית. בבדיקות של ממ"דים בתנאי מחיה רגילים, כולל פתיחה של חלון או דלת, נמצאו ריכוזי ראדון נמוכים שאינם מהווים סכנה בריאותית. הראדון, כמו כל גז אחר, מתפזר בקלות באוויר. אם פותחים דלת של ממ"ד שהיה סגור הרמטית תקופה ארוכה, הראדון מתפזר מיד בתוך הדירה ומגיע לריכוז הנמוך בדירה.

ה. האם נדרשת בדיקת ראדון בחדרים ובממ"דים שאינם צמודים לקרקע?

כעיקרון, בקומות גבוהות (ללא קשר לקרקע) אין סיבה לבדיקות ראדון. אם מעוניינים לבצע בדיקה - יש לבצע בדיקה ארוכת טווח בתנאי מחיה רגילים.

ו. כיצד בודקים את ריכוזי הראדון בחדר רגיל צמוד קרקע?

בחדר רגיל הצמוד לקרקע, קיימת אפשרות לחדירת ראדון מהקרקע. בחדר שכזה יש לבצע בדיקה קצרת טווח, הכוללת סגירה מוחלטת של החדר.

ז. כיצד בודקים את ריכוז הראדון בחדרים אטומים צמודי קרקע?

כעיקרון, בממ"ד הצמוד לקרקע קיימת אפשרות של חדירת ראדון מהקרקע. כדי לבדוק אפשרות זו יש לבצע בתחילה בדיקה קצרת טווח, הכוללת סגירה מוחלטת של החדר.

כיוון שפליטת הראדון מהקירות היא תופעה מוכרת היטב, ניתן לצפות את ריכוז הראדון ממקור זה. לכן, הבדיקה מאפשרת להעריך אם קיימת חדירה משמעותית מהקרקע או לא.

הבדיקה של ריכוז הראדון בחדר, יחד עם הבדיקה של פליטת הראדון מחומרי הבנייה (קירות, רצפה, תקרה, וכד'), מאפשרת להעריך את עצמת המקורות בנפרד - חומר הבנייה והקרקע.

כאשר בממ"ד צמוד קרקע אין חדירה מן הקרקע או שהממ"ד אינו צמוד קרקע, מקור הראדון היחיד הוא הפליטה מהקירות. אחרי סגירת החדר, ריכוז הראדון בחדר עולה בגלל הפליטה הנמשכת מהקירות. מקור זה הנו קבוע בזמן והעצמה שלו מוכרת היטב. כיוון שלא קיים אוורור, האיבוד היחיד של הראדון בחדר הנו ההתפרקות הרדיואקטיבית שלו. זמן מחצית החיים של הראדון הוא ארוך יחסית (3.8 ימים), ולכן קצב האיבוד הוא קטן מאוד (0.00755 לשעה), יחסית, לדוגמה, לקצב תחלופת האוויר בחדר בעל סגירה רגילה (0.1 לשעה). עקב כך, ריכוז הראדון בחדר סגור הרמטית יכול להגיע לערך גבוה, וכמובן תהליך זה

לוקח הרבה זמן. בממ"ד סגור הרמטית ריכוז הראדון מגיע לערך הרוויה (המרבי) כ-2,000 בקרל/מ"ק רק אחרי 17 ימים. במצב הרוויה קצב פליטת הראדון מהקיר שווה לקצב התפרקותו הרדיואקטיבי. למרות זאת, ריכוז הראדון באותו חדר בתנאי האוורור הקיימים באופן טבעי בכל בית (כ-0.3 תחלופות לשעה) יהיה תקין, כלומר פחות מרמת הפעולה של 200 בקרל/מ"ק.

כאשר הממ"ד הנו צמוד קרקע, בנוסף לפליטת הראדון מהקירות קיימת אפשרות לחדירת ראדון מן הקרקע. זו הסיבה העיקרית לכך שבדקים ממ"דים צמודי קרקע בתנאים סגורים. אם לא קיימת חדירה מהקרקע, כלומר כל הראדון בממ"ד נובע מחומר הבנייה, ריכוז הראדון הצפוי יהיה נמוך מ-2,000 בקרל/מ"ק (ראה שאלה ג') בדיוק כמו בממ"ד קומתי.

יש להבהיר שבדיקת ממ"ד קרקעי בתנאים סגורים הרמטית, כאשר החדר מנותק לחלוטין משאר חלקי הבית, לא מאפשרת להעריך את ריכוז הראדון בחדר בתנאי מחיה רגילים (שקובעים אם המצב תקין או לא תקין). ריכוז הראדון יהיה הפוך פרופורציונלי לרמת האוורור של הבית (ראה נוסחה א3). בנוסף, קיימת אפשרות להצטברות ראדון בממ"ד כאשר הגז לא נובע מהממ"ד עצמו, אלא מחדר אחר בבית. לכן, הבדיקה הקצרה מיועדת אך רק להעריך חדירה (אפשרית) מן הקרקע בממ"ד הנבדק. במקרה של חדירה גבוהה מהקרקע, כשניתן לצפות ריכוז לא תקין בתנאים פתוחים, יש לבצע פעולות מידיות לאטימת הממ"ד. אם המצב אינו דורש פעולות מידיות, ליתר ביטחון יש לבצע אחרי הבדיקה הקצרה בדיקה ארוכת טווח של 3 עד 6 חודשים, בתנאי מחיה רגילים.

ח. מי בודק ריכוזי ראדון בממ"ד?

רק בעל היתר מאת המשרד להגנת הסביבה לבדיקת ריכוזי ראדון, יכול לבצע בדיקה זו. על פי ההיתר הבדקים מחויבים לבצע בדיקה ארוכת טווח בממ"דים. כזכור, בדיקת ראדון קצרת טווח, שמבצעים רק בחדרים צמודי קרקע, מיועדת לגלות את המקור הקרקעי (אם קיים) ואת הצורך בפעולות שיפור מידיות. בדיקה קצרה בממ"ד אינה מיועדת לבדוק את ריכוזי הראדון שהאדם נחשף אליהם.

במתן ההיתר אין משום הסמכת הבדקים לבצע הערכת סיכונים, לפרש את הממצאים או ליעץ בנוגע לפתרונות בנושא ראדון. כמו כן, אין בהיתר משום אישור לתוצאות הבדיקה.

ט. המלצות כלליות

- בתנאי מחיה רגילים אין כל מניעה להשתמש בממ"ד למגורים ולשינה. תנאי מחיה רגילים כוללים אוורור סביר של הממ"ד (למשל על ידי פתיחת דלת או חלון).
- בבתים אשר מסיבה כלשהי רמת האוורור בהם נמוכה מאוד, כדי להפחית את פליטת הראדון מחומרי הבנייה ניתן לצבוע את החדר בצבע מיוחד ובתנאי שהוא עומד בתקן השימוש במגורים.
- מומלץ לבדוק שנותן השירות הנו בעל היתר בתוקף למתן שירותי בדיקת גז ראדון של המשרד להגנת הסביבה.
- במשך הבדיקה אסור לגעת בגלאים.
- בחלק מהרשויות המקומיות קיים נוהל אכלוס לדירות חדשות (טופס 4), המפרט את דרישות הבנייה והבדיקות הנדרשות. מומלץ לבדוק את הנושא עם הרשות המקומית.

טבלה 2. **בדיקה במגורים** : ריכוז הראדון עבור מיטיגציה $C_{mit}(t)$ כפונקציה של קצב אוורור λ_v וזמן הבדיקה t , עבור גלאי שמודד את הריכוז הסופי, לדוגמה פחם פעיל (AC) או ניטור רציף (CRM).

מגורים - גלאי פחם פעיל או לניטור רציף						
זמן הבדיקה						קצב אוורור
t (ימים)						λ_v (לשעה)
אין סופי	7	6	5	4	3	
8144	5854	5399	4854	4200	3416	0
7192	5483	5093	4615	4028	3307	0.001
6439	5145	4812	4393	3865	3202	0.002
5829	4839	4554	4186	3712	3102	0.003
5324	4560	4316	3993	3568	3007	0.004
4900	4305	4096	3814	3432	2915	0.005
4539	4073	3894	3646	3303	2828	0.006
4227	3860	3707	3490	3181	2744	0.007
3955	3665	3534	3343	3066	2664	0.008
3716	3486	3373	3206	2958	2588	0.009
3504	3321	3225	3078	2855	2514	0.01
2232	2211	2190	2151	2074	1925	0.02
1638	1635	1631	1620	1593	1528	0.03
1294	1293	1292	1289	1280	1251	0.04
1069	1069	1069	1068	1065	1052	0.05
911	911	911	910	909	904	0.06
793	793	793	793	793	790	0.07
703	703	703	703	702	701	0.08
631	631	631	631	630	630	0.09
572	572	572	572	572	572	0.1
296	296	296	296	296	296	0.2
200	200	200	200	200	200	0.3
151	151	151	151	151	151	0.4
121	121	121	121	121	121	0.5
101	101	101	101	101	101	0.6
87	87	87	87	87	87	0.7
76	76	76	76	76	76	0.8
68	68	68	68	68	68	0.9
61	61	61	61	61	61	1

טבלה 3. **בדיקה במגורים**: ריכוז הראדון עבור מיטיגציה $C_{mit}(t)$ כפונקציה של קצב תחלופת אוויר λ_v וזמן הבדיקה t , עבור גלאי שמודד את הריכוז הממוצע, לדוגמה אלקטרט (EL) או בעקבות התפרקות גרעינית (AT).

מגורים - גלאי אלקטרט או בעקבות התפרקות גרעינית						
קצב אוורור						זמן הבדיקה
λ_v (לשעה)						t (ימים)
3	4	5	6	7	אין סופי	
1862	2352	2789	3180	3530	8144	0
1822	2286	2695	3057	3376	7192	0.001
1783	2224	2607	2941	3233	6439	0.002
1746	2164	2523	2832	3099	5829	0.003
1709	2107	2444	2730	2975	5324	0.004
1674	2052	2368	2634	2859	4900	0.005
1640	2000	2297	2543	2750	4539	0.006
1608	1950	2229	2458	2648	4227	0.007
1576	1901	2164	2377	2552	3955	0.008
1545	1855	2102	2301	2463	3716	0.009
1515	1810	2043	2229	2378	3504	0.01
1262	1448	1582	1680	1755	2232	0.02
1073	1196	1279	1336	1379	1638	0.03
928	1013	1068	1105	1132	1294	0.04
815	876	914	940	958	1069	0.05
725	770	798	817	830	911	0.06
652	687	708	722	732	793	0.07
591	619	636	647	655	703	0.08
541	563	577	586	592	631	0.09
498	517	528	535	540	572	0.1
277	281	284	286	288	296	0.2
191	193	195	195	196	200	0.3
146	147	148	148	149	151	0.4
118	119	119	119	120	121	0.5
99	100	100	100	100	101	0.6
85	86	86	86	86	87	0.7
75	75	75	75	76	76	0.8
67	67	67	67	67	68	0.9
60	60	61	61	61	61	1

טבלה 4. **בדיקה במקום עבודה** : ריכוז הראדון עבור מיטיגציה $C_{mit}(t)$ כפונקציה של קצב אוורור λ_v וזמן הבדיקה t , עבור גלאי שמודד את הריכוז הסופי, לדוגמה (AC) או ניטור רציף (CRM).

מקום עבודה - גלאי פחם פעיל או לניטור רציף						
זמן הבדיקה						קצב אוורור
t (ימים)						λ_v (לשעה)
אין סופי	7	6	5	4	3	
20361	14636	13498	12135	10500	8540	0
17980	13707	12733	11537	10069	8267	0.001
16098	12863	12030	10982	9664	8006	0.002
14572	12097	11384	10465	9281	7756	0.003
13311	11400	10789	9983	8920	7517	0.004
12251	10764	10241	9534	8579	7289	0.005
11347	10182	9735	9115	8258	7070	0.006
10567	9650	9267	8724	7953	6861	0.007
9887	9162	8834	8358	7666	6661	0.008
9290	8714	8433	8016	7394	6469	0.009
8761	8302	8061	7695	7136	6285	0.01
5581	5527	5476	5377	5185	4814	0.02
4095	4088	4077	4050	3984	3821	0.03
3234	3233	3230	3223	3200	3128	0.04
2672	2672	2671	2669	2661	2630	0.05
2276	2276	2276	2276	2273	2259	0.06
1983	1983	1983	1983	1982	1975	0.07
1756	1756	1756	1756	1756	1753	0.08
1576	1576	1576	1576	1576	1575	0.09
1430	1430	1430	1430	1430	1429	0.1
741	741	741	741	741	741	0.2
500	500	500	500	500	500	0.3
377	377	377	377	377	377	0.4
303	303	303	303	303	303	0.5
253	253	253	253	253	253	0.6
217	217	217	217	217	217	0.7
190	190	190	190	190	190	0.8
169	169	169	169	169	169	0.9
153	153	153	153	153	153	1

טבלה 5. **בדיקה במקום עבודה** : ריכוז הראדון עבור מיטיגציה $C_{mit}(t)$ כפונקציה של קצב תחלופת אוויר λ_v וזמן הבדיקה t , עבור גלאי שמודד את הריכוז הממוצע, לדוגמה אלקטרט (EL) או בעקבות התפרקות גרעינית (AT).

מקום עבודה - גלאי אלקטרט או בעקבות התפרקות גרעינית						
קצב אוורור						זמן הבדיקה
λ_v (לשעה)						t (ימים)
3	4	5	6	7	אין סופי	
4655	5879	6972	7949	8826	20361	0
4555	5716	6739	7641	8441	17980	0.001
4458	5560	6518	7352	8082	16098	0.002
4364	5411	6308	7081	7749	14572	0.003
4274	5268	6110	6825	7437	13311	0.004
4186	5131	5921	6585	7147	12251	0.005
4101	5000	5742	6358	6874	11347	0.006
4019	4874	5571	6145	6620	10567	0.007
3939	4753	5409	5943	6381	9887	0.008
3862	4637	5255	5752	6156	9290	0.009
3788	4526	5108	5572	5946	8761	0.01
3621	4375	4955	5387	5781	8234	0.02
3155	3621	3955	4201	4387	5581	0.03
2682	2990	3196	3341	3447	4095	0.04
2320	2533	2669	2762	2829	3234	0.05
2037	2190	2285	2350	2396	2672	0.06
1812	1926	1996	2042	2076	2276	0.07
1629	1717	1770	1805	1831	1983	0.08
1478	1547	1589	1617	1637	1756	0.09
1352	1408	1442	1464	1480	1576	0.1
1245	1291	1319	1337	1351	1430	0.2
691	704	711	716	720	741	0.3
477	483	486	489	490	500	0.4
364	368	370	371	372	377	0.5
295	297	298	299	299	303	0.6
247	249	250	250	251	253	0.7
213	214	215	215	216	217	0.8
187	188	188	189	189	190	0.9
167	167	168	168	168	169	1
151	151	151	151	152	153	

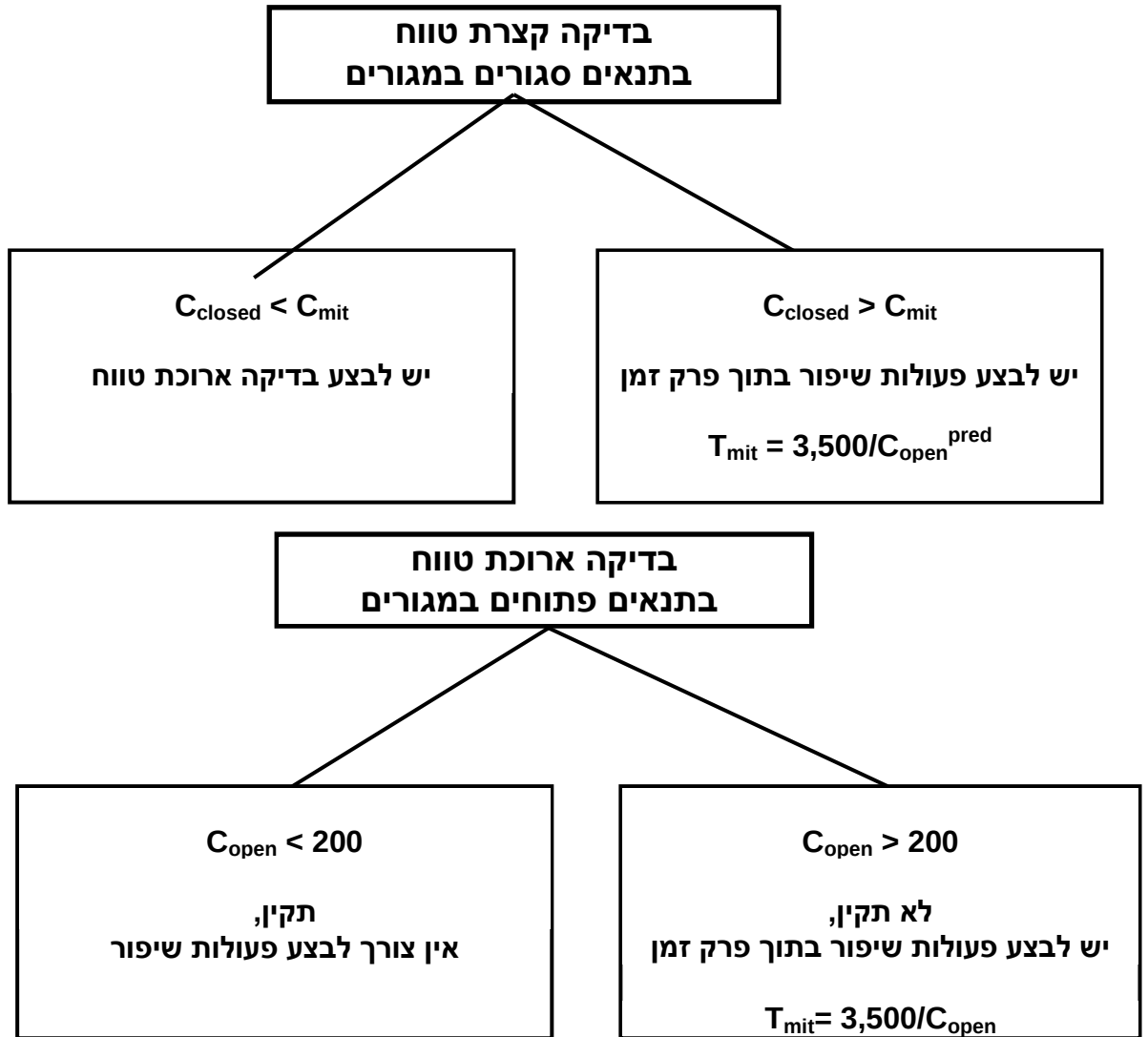
טבלה 6. פקטור ה-"רוויה" $F_{eq}(t)$ כפונקציה של קצב אוורור λ_v וזמן הבדיקה t , עבור גלאי שמודד את הריכוז בסוף הבדיקה, לדוגמה פחם פעיל (AC) או ניטור רציף (CRM).

גלאי פחם פעיל או לניטור רציף						
זמן הבדיקה						קצב אוורור
t (ימים)						λ_v (לשעה)
אין סופי	7	6	5	4	3	
1.0	1.4	1.5	1.7	1.9	2.4	0
1.0	1.3	1.4	1.6	1.8	2.2	0.001
1.0	1.3	1.3	1.5	1.7	2.0	0.002
1.0	1.2	1.3	1.4	1.6	1.9	0.003
1.0	1.2	1.2	1.3	1.5	1.8	0.004
1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.7	0.005
1.0	1.1	1.2	1.2	1.4	1.6	0.006
1.0	1.1	1.1	1.2	1.3	1.5	0.007
1.0	1.1	1.1	1.2	1.3	1.5	0.008
1.0	1.1	1.1	1.2	1.3	1.4	0.009
1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.4	0.01
1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.2	0.02
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	0.03
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.04
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.05
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.06
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.07
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.08
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.09
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.1
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.3
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.4
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.7
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1

טבלה 7. פקטור ה-"רוויה" $F_{eq}(t)$ כפונקציה של קצב תחלופת אוויר λ_v וזמן הבדיקה t , עבור גלאי שמוודד את הריכוז הממוצע במשך הבדיקה, לדוגמה אלקטרט (EL) או בעקבות התפרקות גרעינית (AT).

גלאי אלקטרט או בעקבות התפרקות גרעינית						
זמן הבדיקה						קצב אוורור
t (ימים)						λ_v (לשעה)
אין סופי	7	6	5	4	3	
1.0	2.3	2.6	2.9	3.5	4.4	0
1.0	2.1	2.4	2.7	3.1	3.9	0.001
1.0	2.0	2.2	2.5	2.9	3.6	0.002
1.0	1.9	2.1	2.3	2.7	3.3	0.003
1.0	1.8	2.0	2.2	2.5	3.1	0.004
1.0	1.7	1.9	2.1	2.4	2.9	0.005
1.0	1.7	1.8	2.0	2.3	2.8	0.006
1.0	1.6	1.7	1.9	2.2	2.6	0.007
1.0	1.5	1.7	1.8	2.1	2.5	0.008
1.0	1.5	1.6	1.8	2.0	2.4	0.009
1.0	1.5	1.6	1.7	1.9	2.3	0.01
1.0	1.3	1.3	1.4	1.5	1.8	0.02
1.0	1.2	1.2	1.3	1.4	1.5	0.03
1.0	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4	0.04
1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	0.05
1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.3	0.06
1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	0.07
1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	0.08
1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	0.09
1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	0.1
1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.2
1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	0.3
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.4
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.7
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1

תרשים זרימה 1
בדיקת גז ראדון במגורים

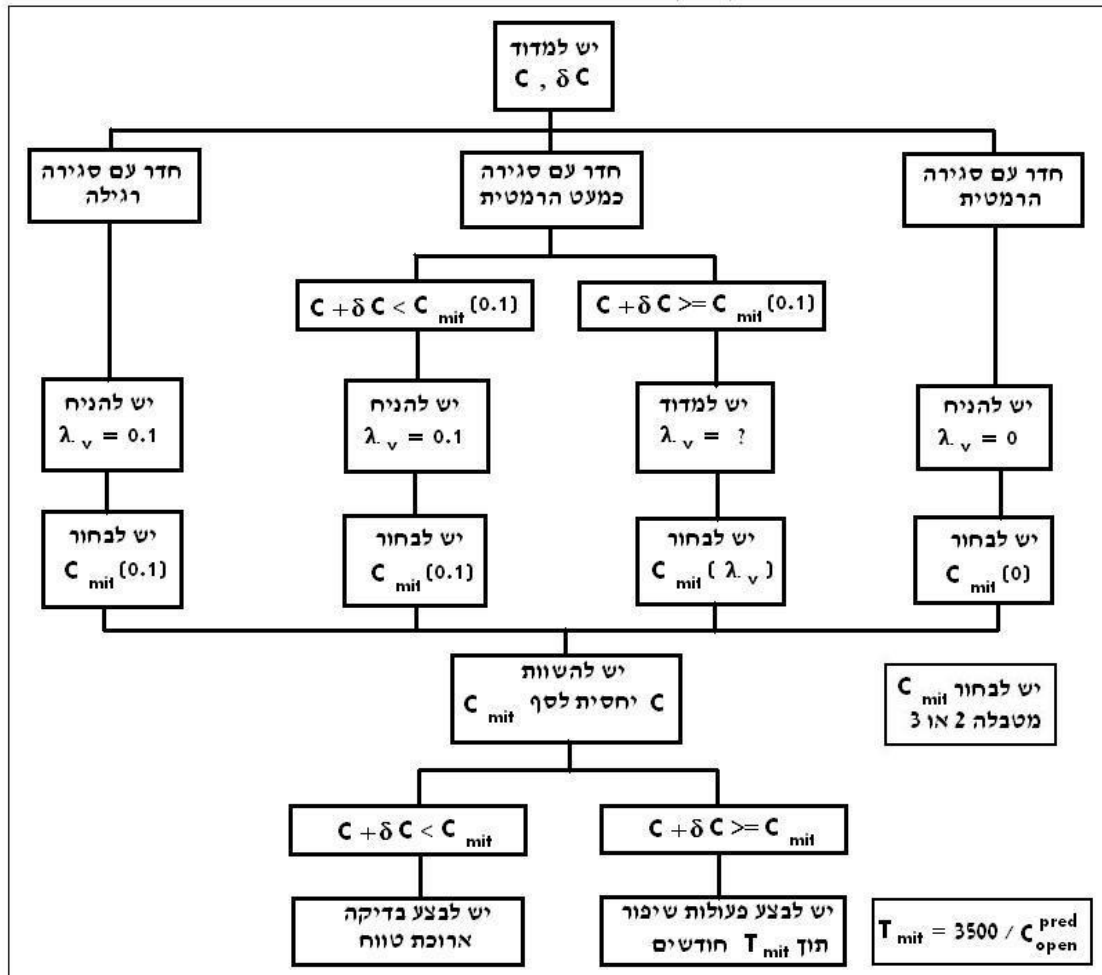


יחידה	הגדרה	סימן
בקר/מ ³	ריכוז נמדד בתנאים סגורים	C _{closed}
בקר/מ ³	ריכוז מינימלי בתנאים סגורים עבור פעולות שיפור	C _{mit}
בקר/מ ³	ריכוז צפוי בתנאים פתוחים בהתאם לריכוז הנמדד בתנאים סגורים	C _{open} ^{pred}
בקר/מ ³	ריכוז נמדד בתנאים פתוחים	C _{open}
חודשים	זמן מרבי לפעולות שיפור	T _{mit}

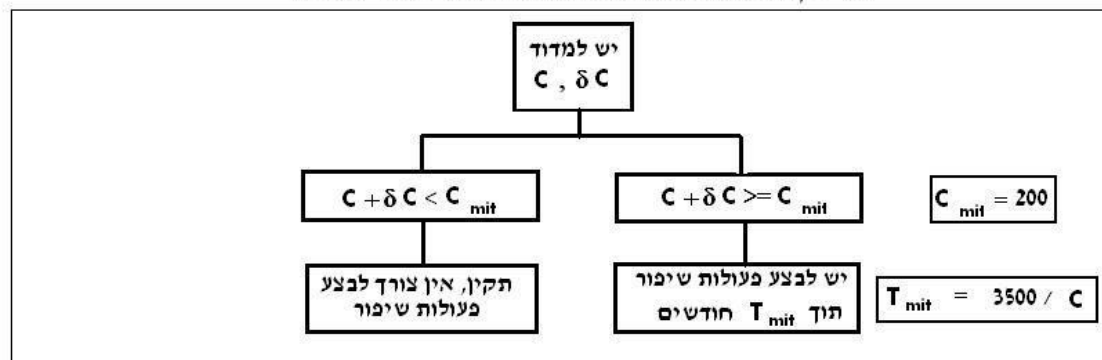
תרשים זרימה 2

בדיקת גז ראדון בחדר מגורים – לפי רמת אוורור של החדר

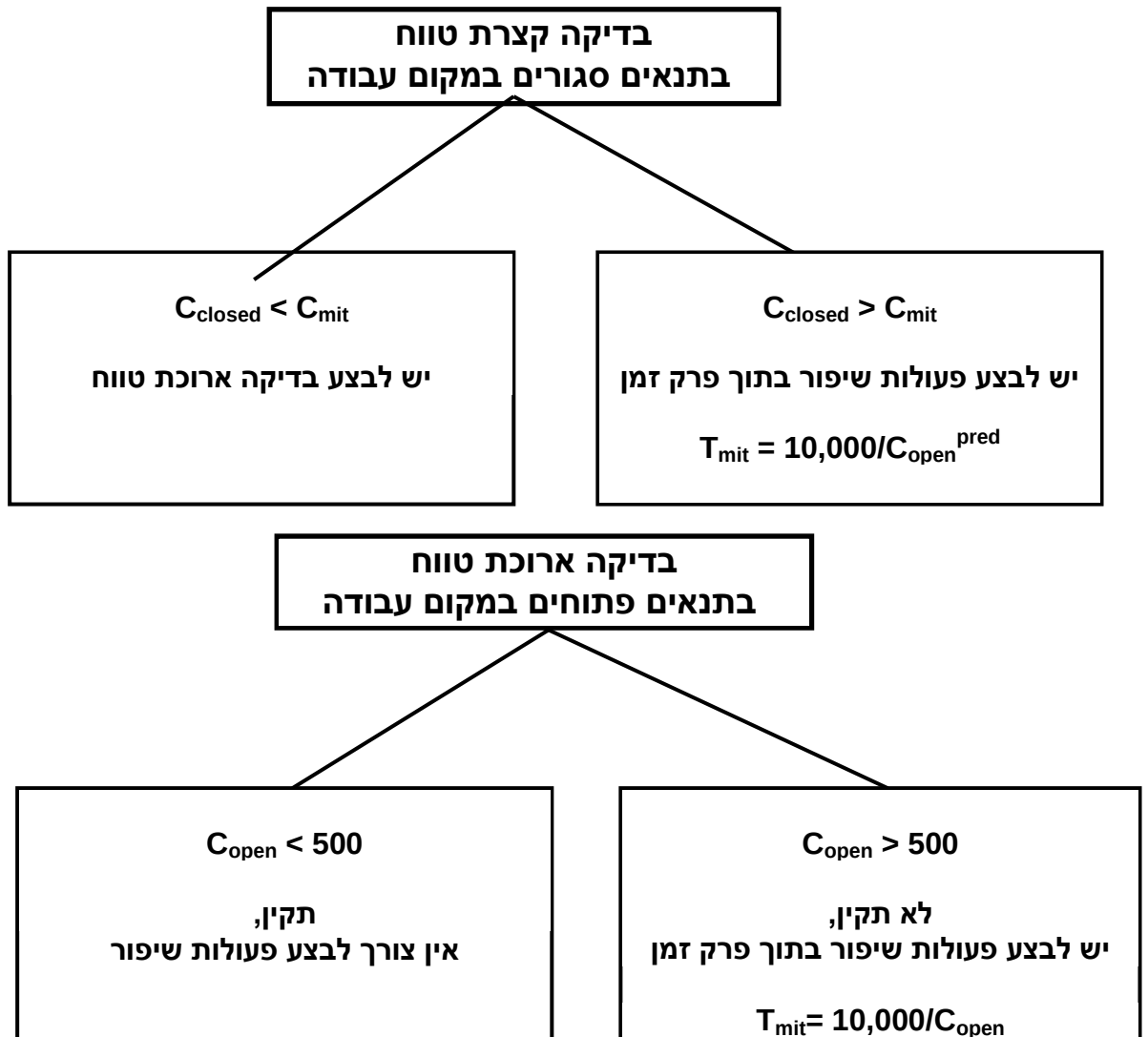
בדיקה קצרת טווח בתנאים סגורים במגורים



בדיקה ארוכת טווח בתנאים מחייה רגילים



תרשים זרימה 3 בדיקת גז ראדון במקום עבודה

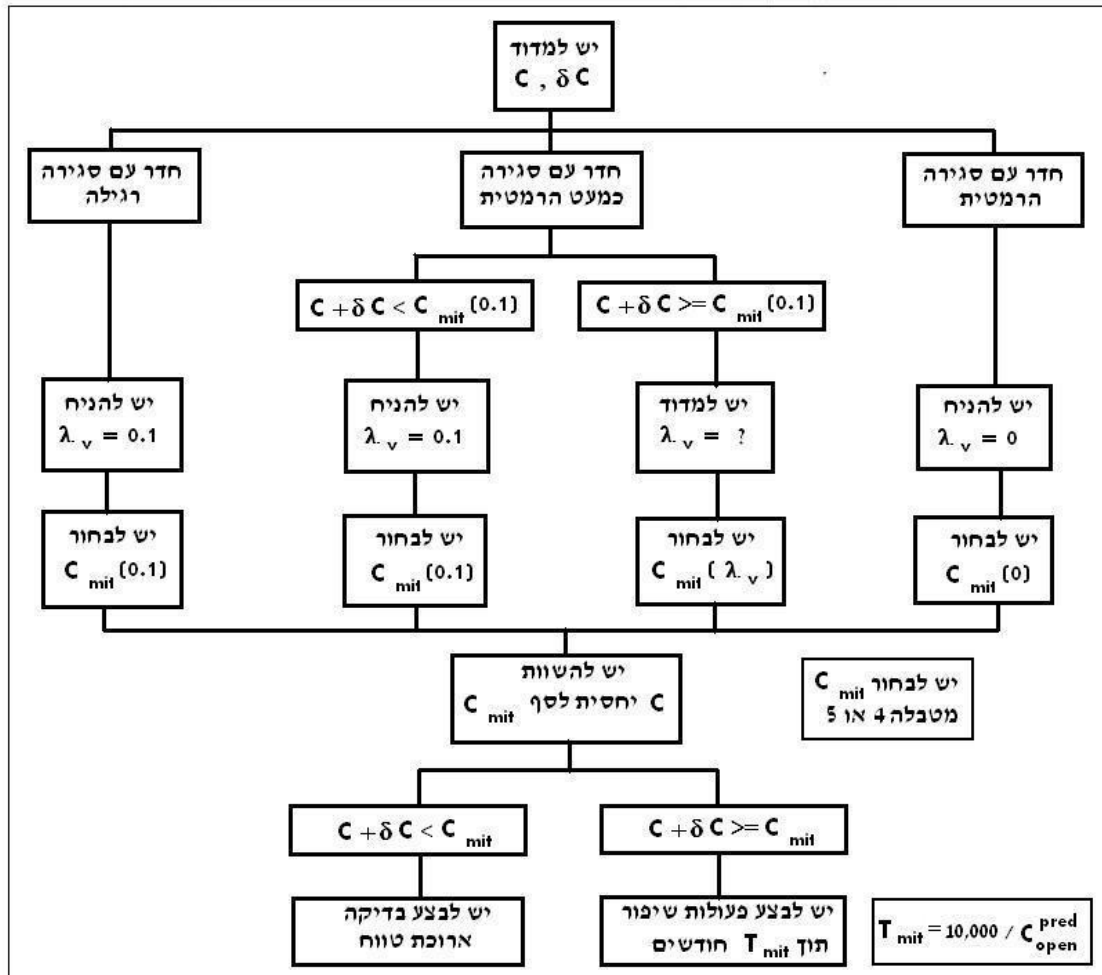


יחידה	הגדרה	סימן
בקרל/מ ³	ריכוז נמדד בתנאים סגורים	C _{closed}
בקרל/מ ³	ריכוז מינימלי בתנאים סגורים עבור פעולות שיפור	C _{mit}
בקרל/מ ³	ריכוז צפוי בתנאים פתוחים בהתאם לריכוז הנמדד בתנאים סגורים	C _{open} ^{pred}
בקרל/מ ³	ריכוז נמדד בתנאים פתוחים	C _{open}
חודשים	זמן מרבי לפעולות שיפור	T _{mit}

תרשים זרימה 4

בדיקת גז ראדון במקום עבודה – לפי רמת אוורור של החדר

בדיקה קצרת טווח בתנאים סגורים במקום עבודה



בדיקה ארוכת טווח בתנאים מחייה רגילים במקום עבודה

