

מידע כללי על ראדון

מנות חשיפה לקרינה מייננת

ידוע כי חשיפה לקרינה של הציבור לקרינה מייננת נוצרת על ידי שני סוגים עיקריים של מקורות קרינה - מלאכותיים (מעשה ידי אדם) וטבעיים. המקורות הטבעיים תמיד קיימים סביבנו. הם תורמים דומיננטיים לחשיפה של האוכלוסייה ומהווים מעל 80% ממנת הקרינה מכל מקורות הקרינה הידועים (United UNSCEAR, 2008). המקור החזק ביותר של קרינה טבעית הוא ראדון, המהווה 42% (1.3 מיליסיברט לשנה) של המנה הכוללת (3.0 מיליסיברט לשנה), ואילו המנה הממוצעת מתקבלת מבדיקות רפואיות אינה עולה על 20%, ותרומת הזיהום הנגרם על ידי תקלות טכנוגניות, למשל, תאונה צ'רנוביל, או ייצור אנרגיה בתחנת כוח גרעינית (כולל כריית אורניום) אינו עולה על 0.1% ו-0.01%, בהתאמה (UNSCEAR, 2008).

סיכוני ראדון בהשוואה לסיכוני משק הבית בארה"ב

תוצאות החשיפה לראדון מתבטאות בסיכון לסרטן הריאות. לדוגמה, ריכוז מוגבר של ראדון נחשב לגורם המקומי המסוכן ביותר בארה"ב, הסיכון למוות כתוצאה עת מחשיפה לראדון מוערך על ידי [Environmental Protection Agency - US EPA](https://www.epa.gov/radon/health-risk) (<https://www.epa.gov/radon/health-risk>) כ-21,000 מקרים בשנה (https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-02/documents/2012_a_citizens_guide_to_radon.pdf), בהשוואה לשיעור השנתי מסיכונים אחרים, כגון נהיגה בשיכור (17,400), נפילה בבית (8,000), טביעה (3,900) ושריפה (2,800). כמעט אותה תמותה התקבלה באיחוד האירופי (EU) על ידי תוצאות מחקר ב-13 [מדינות באירופה](https://www.bmj.com/content/bmj/330/7485/223.full.pdf) (<https://www.bmj.com/content/bmj/330/7485/223.full.pdf>). על פי World Health Organization (WHO), בין 3 ל-14% מסרטן הריאות נגרמת על ידי השפעת ראדון.

רמות ייחוס של ראדון באוויר פנים

החשיפה לראדון יכולה להיות מוסדרת ומופחתת, בניגוד למקורות קרינה אחרים, כגון קרינה קוסמית. לכן, בכל מדינות אירופה נקבעה רמת ייחוס ארצית, **המגבילה את הריכוז הממוצע השנתי של הראדון (AAIR)**. בהתאם להמלצות של האיחוד האירופי Council Directive (2013/59/Euratom 2014), רמת הייחוס היא 300 בקרל/מ"ק, כאשר ארגון הבריאות העולמי ממליץ להגביל את ריכוז הראדון הפנימי מתחת לרמה של 100 בקרל/מ"ק.

רמת הייחוס הנוכחית בישראל היא 200 בקרל/מ"ק עבור בנייני מגורים ו-500 בקרל/מ"ק עבור מקומות עבודה.

בדרך כלל, הריכוז החומר מתבטא כיחס של מסה לנפח. עם זאת, ראדון הוא מרכיב כימי נדיר ביותר; לדוגמה, המסה הגלובלית שלו באטמוספירה של כדור הארץ היא רק כ-2 ק"ג, כאשר משקלה של האטמוספירה כולה יותר מ- 10^{18} ק"ג. אף על פי כן, המסה הגלובלית הזעירה הזו של ראדון משחררת הרבה יותר אנרגיה מאשר צריכת האנרגיה החשמלית בישראל כולה. לא ניתן למדוד את הריכוז הזעיר כל כך של ראדון על ידי שקילה. לכן, במקום המסה, נמדד קצב הדעיכה של אטומי הראדון (אקטיביות), המתבטא בבקרל ("Bq") - התפוררות אחת לשנייה, שהוא נמצא ביחס ישיר למסה.

מקורות של ראדון

[המקור העיקרי של ראדון בבניינים הוא הקרקע מתחת ליסודות](https://m.facebook.com/story.php?story_fbid=414719398953022&id=220634478)

https://m.facebook.com/story.php?story_fbid=414719398953022&id=220634478
(361516), שבה נוצר ללא הפסקה ריכוז גדול יותר או פחות של ראדון, בהתאם לתכונות הקרקע: ריכוז של אורניום אב או רדיום, צפיפות הקרקע ונקבוביות, נוכחות של סדקים וכו'. לכן, ראדון בקומות קרקע ובמרתפים הוא בדרך כלל גבוה יותר מאשר בקומות העליונות. מקור נוסף של ראדון הוא חומרי בניין שעשויים ממינרלים המופקים מקרום כדור הארץ. אם המבנה מוגן באופן אמין מפני חדירה של ראדון מקרקע ושפיעה מחומרי בניין, ריכוז הראדון הפנימי הוא בדרך כלל נמצא בטווח של 10 - 50 בקרל/מ"ק, שאינו מסוכן. אם ההגנה על הבניין מראדון חסרה (זה קורה לעתים קרובות בבניינים ישנים), הראדון הפנימי עלול לחרוג מעל 300 בקרל/מ"ק, מה שמייצג סכנה חמורה לתושבים, משום שאנשים מבליים בבית כ-80% מחייהם.

עקרונות להפחתת ראדון פנימי (מיטיגציה)

גורם הראדון נלקח בחשבון בעת תכנון ובנייה של מבנים יחסית לאחרונה. כדי להבטיח את בטיחות הקרינה של דיירי הבניין, מתחשבים הן בסיכון הפוטנציאלי של הראדון בקרקע באתר הבנייה והן בקרינה מחומרי בניין. בבניית מבנים באזורים רגישים לראדון נוטים באמצעי הגנה פסיבית (ללא צריכת חשמל), כגון:

(i) חיבור מיוחד בין רכיבי המרתף ולוחות הרצפה, המונע את כניסת הראדון של הקרקע לתוך המבנה, כפי שמבא [במצגת](#),

(ii) השימוש בחומרי איטום בעלי מקדם דיפוזיה נמוך של ראדון בבניית מרתף וריצוף של קומת הקרקע,

(iii) איטום סביב צנרת, קווי תקשורת הנדסית ואינסטלציה מתחת לקרקע,

(iv) במהלך בניית היסודות, הנחת חומר בעל חדירות אוויר גבוהה או תעלות ניקוז לתוך הקרקע כדי לאפשר אוורור, אם אמצעי הגנה פסיבית אינם מספיקים.

עבור מבנים קיימים עם רמות גבוהות של ראדון, מיושמים בדרך כלל אמצעים פעילים להגנה מפני ראדון, הנקראים "מיטיגציה". ההשפעה הגדולה ביותר מושגת על ידי יצירת לחץ מופחת מתחת ליסוד המבנה או מתחת לרצפת קומת הקרקע, כפי שמוצג [במצגת](#). בנוסף, פתרון יעיל יכול להיות ביצוע של אספקה או הוצאת אוורור עם התקנה בו זמנית של דלתות הרמטיות, מיקומן תלוי בכוח ופריסה מרחבית של מקורות הראדון בקרקע.

הבעיה של מדידה ובקרה על ריכוזי ראדון במבנים

לראדון חסר צבע וריח, לכן ניתן רק למדוד את ריכוז האקטיביות שלו באוויר. בארצות הברית, בריטניה ושוודיה החלו לפני כ-25 שנה מדידות רחבות היקף של ריכוזי ראדון. עם זאת, למרות הניסיון הבינלאומי הנרחב, עדיין לא קיימת שיטה מקובלת להעריך את אי-וודאות של ממוצע עקב השתנות ריכוזי ראדון בזמן, ולא תקן אחיד או פרוטוקול מדידה מוסכם לקביעת ערך ה-AAIR עם מרווח ביטחון מוגדר.

הבעיה עם קביעת אמינה של ערך ה-AAIR נובעת מזה שלריכוז ראדון השתנות משמעותית בזמן - יומית, שבועית ועונתית. כמובן, ניתן להגיע לאומדן המדויק ביותר של ה-AAIR, אם המדידות מתבצעות במהלך שנה שלמה. כמובן, העלייה של משך המדידה נוטה להקטין את אי-הוודאות של

AAIR. עם זאת, ברוב המקרים של המכריע של (למשל, בארה"ב), מודדים ראדון באמצעות בדיקות קצרות הטווח (George, 2015). זאת בשל העובדה כי ערך ה-AAIR ברוב הבניינים הוא הרבה יותר נמוך מאשר רמת הייחוס, כי הערך הרגיל של AAIR ברחבי העולם הוא כ-30 בקרל/מ"ק בלבד (UNSCEAR, 2006). במקרים אלה, אי-הוודאות הגבוהה של ה-AAIR (אפילו ב-100% או יותר) מקובלת לחלוטין על בדיקת ראדון קצרה, ולכן אין צורך במדידות לטווח ארוך. עם זאת, הדיוק של הערכת AAIR על בסיס בדיקות לטווח קצר שונה בשל חוסר עקביות במשך הבדיקה, אשר יכול להיות דקות, ימים או אפילו חודשים (International Atomic Energy Agency, IAEA- (TECDOC-1810, 2017). אי-הוודאות של ה-AAIR על בסיס בדיקות ארוכות טווח (מספר חודשים עד שנה) נמוכה מזו של בדיקות לטווח קצר, אך גם אינה ידועה.

סקירה של התפתחות פרוטוקולי מדידת ראדון בבתי בארה"ב, משנת 1993 (EPA, 1993,) עד 1997 (ANSI / AARST MAH, 2014) מראה כי אבטחת האיכות מסדירה את אי-הוודאות הקשורה אך ורק למהלך מדידת ריכוז הראדון. יחד עם זאת, בעיה נוספת, משמעותית הרבה יותר, הקשורה להערכת אי-הוודאות הנובעת מהשתנות של ראדון בזמן, לא נדונה לעומק, והיא עדיין לא נפתרה. המסמכים הלאומיים של ארה"ב (ANSI / AARST MAH, 2014, EPA,) (1993, 1997), תקן הבינלאומי (ISO 11665-8, 2012), פרסומים (IAEA, 2013, 2015, 2017) - אף אחד ממסמכים אלה אינו דן באי-הוודאות של AAIR וכיצד היא תלויה במשך המדידה. הפרויקט הנוכחי "MetroRADON" EURAMET עוסק באי-הוודאות של התקני ראדון בלבד (10-30%), אך אינו מביא בחשבון את אי-הוודאות כתוצאה מהשתנות הראדון בזמן.

מקדמי תיקון למקדם שוני זמני של ראדון בהתחשב במצב ומשך המדידה מדווחים במאמר שפורסם לאחרונה ע"י חוקרי צוות המחקר הנוכחי (Tsapalov & Kovler, 2018). מקדם זה מבטא את אי-הוודאות של הראדון הזמנית ונע בין 0 (אם משך הבדיקה הוא שנה אחת, אך ללא וריאציות שנתיות) ל-100% או אפילו יותר מ-200% (אם הבדיקה קצרה מ-60 או 2 ימים, בהתאמה). עם זאת, הגדלת משך ומספר המדידות כדי להשיג ערכים של מקדם זה נמוך מ-20 (25% אינה רלוונטית. כלומר, הערכה מדויקת יותר של רמת ה-AAIR, תהיה בלתי הולמת - בשל קיומם של שינויים שנתיים לרמת ה-AAIR עצמה. בממוצע, ערך ה-AAIR משתנה משנה לשנה בטווח בין 14% (Bochicchio et al, 2009) עד 26% (Steck, 2009) ויכול להגיע עד ל-40% (Hunter et al, 2005, Lubin et al, 2005).

עקרון מדידה ובקרה על ערכי הראדון הממוצעים השנתיים

ניתן לגבש את העיקרון הכללי של בקרה על ראדון באופן פשוט ככל האפשר ולקבוע את רווח הסמך של AAIR בטווח מ $\bar{C} - U(\bar{C})$ ל $\bar{C} + U(\bar{C})$ (או טווח מ 0 ל $\bar{C} + U(\bar{C})$ אם $U(\bar{C}) > \bar{C}$) ולהשוות את הגבולות של מרווח זה עם רמת הייחוס על פי שלושת הקריטריונים הבאים:

קריטריון 1. ערך ה-AAIR אינו עולה מעל רמת הייחוס, אם התנאי (1) מתקיים; אז המדידות מופסקות, ואין צורך באמצעי הגנה.

$$\bar{C} + U(\bar{C}) \leq C_{RL} \text{ or } k \cdot C(t) \cdot \left[1 + \sqrt{K_V(t)^2 + U_D^2} \right] \leq C_{RL}, \quad (1)$$

כאשר:

\bar{C} - הוא הערך AAI הנמדד או המחושב, בקרל/מ"ק;

C_{RL} - היא רמת הייחוס, בקרל/מ"ק;

$U(\bar{C})$ - היא אי-הוודאות של ה-AAIR, בקרל/מ"ק;

$C(t)$ - הוא ריכוז הראדון הממוצע הנמדד בתוך תקופת הזמן של t , בקרל/מ"ק;

k - הוא מקדם תיקון (rel), תוך התחשבות בהשפעה של גורמים סביבתיים על ההתנהגות "הצפויה" של ראדון פנימי בתנאי בדיקה מסוימים, שבהם ראדון מתנהג עם הסתברות נתונה על פי התפלגות ידועה (שנקבעה בניסוי); אם הסימנים של ההתנהגות הצפויה של ראדון לא נקבעו, אז מניחים $k = 1$;

$K_V(t)$ - הוא מקדם שוני זמני של ראדון, או אי-ודאות ראדון הזמנית (rel); הוא תלוי במצב ובמשך המדידות המשטנה מ-0 (אם $t = 1$ שנה, אך ללא התחשבות בשינויים בין שנה ושנה) ליותר מ-200% (אם 2 ימים $t <$); מקדם זה מבטא את הערך של סטיית החריגה מ-AAIR וערכיו ניתנים במאמר [\(צפלו וקובלר, 2018\)](#);

U_D - הוא אי-הוודאות של מכשיר הראדון (rel) או אי-הוודאות היחסית של הערך של $C(t)$, שהוא בדרך כלל בטווח (10-30)%.

קריטריון 2. ה-AAIR עולה מעל רמת הייחוס, אם התנאי (2) מתקיים; אז המדידות נעצרות, ופעילויות שיפור (מיטיגציה) מתבצעות.

$$\bar{C} - U(\bar{C}) > C_{RL} \quad \text{or} \quad k \cdot C(t) \cdot \left[1 - \sqrt{K_V(t)^2 + U_D^2} \right] > C_{RL},$$

(2)

קריטריון 3. אם שני התנאים (1) ו-(2) לא יתקיימו, אז המשך המדידות מוביל למצב כאשר אחד התנאים האלה יתקיים, כי הפרמטרים $C(t)$ ו $K_V(t)$ תלויים במדידות המשך, בעוד הערכים של $K_V(t)$ תמיד נמצאים בירידה. אם, מתוצאות המדידות הנוספות, התנאים (1) ו-(2) עדיין אינם מתמלאים, מומלץ להניח כי ה-AAIR עולה על רמת הייחוס.

לפיכך, הפרמטר $K_V(t)$ מייצג את החלק החשוב של אי-ודאות ה-AAIR - במיוחד במהלך המדידות לטווח הקצר, כאשר המצב $U_D^2 \gg K_V(t)^2$ מתקיים בדרך כלל. כמו כן, יש לקחת בחשבון שבתנאי בדיקה מסוימים הערכים $K_V(t)$ יכולים להיות מופחתים על ידי הפעלת מקדם k .

עיקרון המוצע מבוסס על המלצות (ISO / IEC Guide 98-3, 2008) ומבטיח בקרת איכות אמינה עבור בדיקות ראדון מנקודת המבט המטרולוגית, ללא תלות בהתקנים ובשיטות למדידת ריכוז הפעילות של הראדון. בעיקרון זה פשוט וברור נעשה שימוש נרחב עבור בקרת איכות במדדים מדעיים ותעשייתיים, אך עדיין לא נעשה שימוש בו בבדיקת ראדון.

עיקרון זה הוא הצעד הראשון לפתח תקן ואסטרטגיה אוניברסליים ופרוטוקול מדידה יעיל עבור בקרה על ראדון, על בסיס גישה מדעית. משמעות הדבר היא כי ניתן לקבוע את פרוטוקול המדידה המתאים ביותר (אופטימלי) ואמין על ידי כימות גורמים חשובים כגון: (א) רמת הסיכון הפוטנציאלי של הראדון בשטח, (ב) המספר המתוכנן של מבנים העומדים להיבדק באזור זה, (ג) זמן ומשאבים כספיים, (ד) התקני ראדון זמינים, ללא קשר לעיקרון המדידה וכו'. לעיקרון הנ"ל חשיבות גדולה במיוחד עבור סקרים המוניים שנערכים לשם זיהוי מבנים בעלי ריכוז ראדון גבוה, העולה על רמת הייחוס.

לאסטרטגיה של בקרת הראדון תבוצע אופטימיזציה בהתבסס על התפיסה הברורה כי לא כדאי למדוד בדייקנות גבוהה את ריכוז הראדון הנמוך (הרבה מתחת לרמת הייחוס), מכיון שזה יקר וצורך זמן רב. תפיסה זו רלוונטית במיוחד לסקרים המוניים, שכן ברוב המקרים רמות ה-AAIR נמוכות משמעותית מרמת הייחוס. לכן, בשלב הראשון של ניטור ראדון המוני, מומלץ להשתמש

במכשור זול ופשוט ובשיטות מדידה לטווח קצר, ולערב ילדים בבית הספר וסטודנטים. רק במקרים בהם רמת הייחוס עולה על תוצאות הסקר (המאופיינות באי-ודאות גבוהה), יש להשתמש בשיטות ארוכות יותר ובמדידות לטווח ארוך (שהן יקרות יותר) ולבצע מדידות באמצעות אנשי מקצוע בלבד.

שיטות מדידה של ראדון

המאפיין העיקרי במדידה של ראדון הוא משך הבדיקה, אשר יכול להיות מספר ימים או שבועות (מדידות לטווח קצר) או מספר חודשים (מדידות לטווח ארוך). הנפוצים ביותר הן השיטות הבאות:

א. שיטת ספיחת ראדון הפסיבית באמצעות הפחם הפעיל. משך הבדיקה: 3 – 6 ימים (מדידות לטווח קצר). הליך המדידה מורכב משלושה שלבים:

- שחזור הפחם הפעיל והכנת הדגימות,
- חשיפה פסיבית של הדגימות,
- מדידת אקטיביות הראדון באמצעות ספיחתו ע"י פחם פעיל וחישוב ריכוז הראדון בהתחשב בתנאי הדגימה. ספקטרומטר גמא או נצנץ נוזלי, או רדיומטר גמא-ביתא משמש למדידת אקטיביות הראדון בפחם.

יש לציין כי בארצות הברית בוצעו יותר מ-24 מיליון בדיקות ראדון בשיטת ספיחת הראדון, בעוד שחלקן של הבדיקות לטווח ארוך הוא כ-2% בלבד (George, 2015).

חוקרי צוות המחקר פיתחו שיטת המדידה הפסיבית באמצעות בקבוקונים קטנים (בעלי נפח של כ-20 מ"ל) [מסוג CF-13](#) המכילים 13 מ"ל פחם פעיל. נפח האוויר השקיל של CF-13 נע בין 10 ל-20 ליטר, בהתאם למשך החשיפה וללחות האוויר. השפעתה של לחות האוויר נלקחת בחשבון על ידי קביעת הגידול במסה של הבקבוקון על פני תקופת המבחן.

ב. שיטת האלקטרטים, המבוססת על מדידת ירידה במטען חשמלי של פני השטח של סרט טפלון במהלך הבדיקה. משך הבדיקה בדרך כלל נע בין מספר ימים למספר חודשים בהתאם לרמת ריכוז הראדון. הפחתת המטען של הסרט טפלון נובעת מיינון האוויר בתא הדגימה נוצר עקב קרינת אלפא של ראדון ובנותיו.

ג. שיטת המדידה באמצעות גלאי SSNTD (solid-state nuclear track detector) המבוסס על רישום צפיפות של סימני פגיעה (פגמים) על סרט דק כתוצאה מקרינת אלפא שנוצרת על ידי ראדון ובנותיו על פני תקופת הבדיקה בין חודש אחד לשנה (בדיקות ארוכות-טווח). הסרט ממוקם במיכל הדגימה, שאליו חודר הראדון על ידי דיפוזיה. לאחר החשיפה הסרט חרוט כימית כדי לשפר את הנראות של סימני הפגיעה.

ד. שיטת המדידה המתמשכת באמצעות ניטור ראדון בזמן, כאשר מרווח בין הקריאות יכול להשתנות משעה אחת עד למספר שעות, עם משך הבדיקה בלתי מוגבל למעשה. בתוך הגלאי משתמשים, בדרך כלל, בתא יינון או בגלאי מוליך למחצה הממוקם בתוך מיכל.