



שטח בטיחות קרינה תחום מדידות קרינה

מושגי יסוד בקרינה מייננת ממקורות טבעיים¹

מקורות קרינה טבעיים

חומרים הנכרים מהקרקע והסלע, בכללם חומרים המשמשים לבניית בתים, מכילים יסודות רדיואקטיביים טבעיים המצויים בקליפת כדור הארץ.

הרדיואיזוטופים העיקריים במוצרי בנייה הם **רדיום-226 (^{226}Ra)**, **תוריום-232 (^{232}Th)** ו**אשלגן-40 (^{40}K)** (המספרים הנלווים לשמות האיזוטופים מבטאים את משקלם האטומי).

רדיואיזוטופים מאופיינים בחוסר יציבות ובפליטה של קרינה בעת התפרקותם. הרדיואיזוטופים שבמוצרי הבנייה ובנותיהם הרדיואקטיביות פולטים שלושה סוגי קרינה, דהיינו חלקיקי אלפא וביטא וקרינת גמא.

החלק היחסי (המשקלי) של הרדיואיזוטופים האלה באפר פחם נמדד בחלקים למיליון ואף פחות. את כמות החומר הרדיואקטיבי נוהגים להגדיר על פי קצב התרחשות תהליך ההתפרקות הרדיואקטיבית בתוך החומר. קצב זה קרוי האקטיביות.

האקטיביות נמדדת ביחידות **בקרל (becquerel)**, על שם המדען הצרפתי Henri Becquerel שגילה את תופעת הרדיואקטיביות בשנת 1896. בקרל אחד מוגדר כהתפרקות אחת בשנייה. את היחידה מסמנים בקיצור באותיות **Bq**. ריכוז האקטיביות נמדד ביחידות של בקרל לק"ג (**Bq/kg**). אם אומרים למשל שריכוז הרדיום 226 בתוך קרקע מסוימת הוא 30 Bq/kg פירושו הדבר הוא שבכל קילוגרם של הקרקע מתפרקים 30 אטומי רדיום 226 בכל שנייה. כל אטום של רדיום 226 שעובר את תהליך ההתפרקות פולט חלקיק אלפא והופך בעקבות התהליך לאטום של הגז רדון 222.

(בעבר היה מקובל למדוד את האקטיביות ביחידות **קירי (curie)**). קירי אחד הוגדר ככמות חומר רדיואקטיבי העובר 3.7×10^{10} התפרקות בשנייה. זהו קצב ההתפרקות בגרם אחד של ^{226}Ra שהופק לראשונה על ידי הזוג Pierre & Marie Curie, שעל שמם נקראה היחידה הזו).

מנת קרינה "ביולוגית" (מנה שקולה ומנה אפקטיבית)

ההשפעה הביולוגית של חשיפת גוף האדם לקרינה מייננת תלויה ראשית כל בכמות האנרגיה הנספגת ביחידת מסה של הרקמה. לכמות זו אנו קוראים מנת הקרינה.

ההשפעה הביולוגית תלויה גם בסוג הקרינה מחד ובסוג הרקמה שנחשפה מאידך. ההשפעה הביולוגית המזיקה לטווח ארוך של ספיגת מנת קרינה מסוימת מאלומת נויטרונים מהירים חמורה בהרבה מההשפעה של חשיפת אותה רקמה למנת אנרגיה זהה מקרינת גמא. כמו כן, אינה

¹ מתוך מדריך בעריכת פרופ' טוביה שלזינגר ודר' ז'אן קוד, ממ"ג-שורק
in/הסברה/קרינה ממוצרי אפר פחם

דומה השפעת חשיפת אצבע אחת למנת קרינה מסוימת להשפעה הנגרמת על ידי חשיפת מספר אברים או חשיפת הגוף כולו לאותה מנה.

מנת הקרינה נמדדת ביחידות הקרויות **גריי (gray)**. מנת קרינה של גריי אחד נגרמת על ידי ספיגת אנרגיה בכמות של **ג'אול (joule)** אחד לקילוגרם רקמה.

הסיוורט (sievert ובקיצור Sv) היא יחידת מדידה של מנת הקרינה "הביולוגית" הקרויה מנה שקולה. מנת הקרינה השקולה נקבעת על ידי כמות האנרגיה הנספגת ביחידת מסה של הרקמה הביולוגית, כמתואר לעיל, ועל ידי סוג הקרינה הספציפי (הקובע את אופן העברת האנרגיה לרקמה). מנת קרינה של סיוורט שלם נחשבת למנה גבוהה מאוד. בהקשר לקרינת הרקע הטבעי מדובר בכמויות קרינה נמוכות בשניים או שלושה סדרי גודל. קרינת הרקע נמדדת במונחים של אלפיות הסיוורט (יחידה הקרויה מיליסיוורט ומסומנת **mSv**) לשנה. כשעוסקים בקצב המנה מקרינת הרקע הטבעי כמויות הקרינה מבוטאות לפעמים במונחים של מליונית הסיוורט (יחידה הקרויה מיקרוסיוורט שסימנה **µSv**) לשעה.

(יחידות המדידה של מנת הקרינה ומנת הקרינה הביולוגית קרויות על שם המדענים Louis H. Gray, מחלוצי מדע מדידת הקרינה, ו-Rolf M. Sievert שהיה בין מייסדי הוועדה הבינלאומית להגנה רדיולוגית, בשנות העשרים של המאה הקודמת).

המנה האפקטיבית היא מנת הקרינה הכל-גופית שהייתה גורמת לאותו סיכון (הנזק הביולוגי הצפוי) הנגרם בפועל על ידי החשיפה של אבר בודד או חלק מהגוף בלבד למנה מסוימת של קרינה. משתמשים במנה האפקטיבית בעיקר כאשר מדובר בחשיפה לקרינה פנימית הנגרמת על ידי התפלגות לא הומוגנית באברי הגוף של חומר רדיואקטיבי שחדר לגוף דרך הנשימה או דרך האכילה.

את המנה האפקטיבית מחשבים ממנת הקרינה שהאברים השונים ספגו באמצעות מקדמי שקלול שנקבעו (על בסיס הניסיון המעשי) לכל אחד מאברי הגוף החשובים. מקדם השקלול לריאות, למשל, הוא 0.12. משמעות הדבר היא שמנת קרינה של 100 מיליסיוורט לריאות גורמת לאותו סיכון שהיה נגרם על ידי חשיפת הגוף כולו למנת קרינה של 12 מיליסיוורט ($100 \times 0.12 = 12$).

חשיפה לקרינה ממקורות טבעיים

מבחינים בדרך כלל בין שני אופני חשיפה:

חשיפה חיצונית - זוהי חשיפה הנגרמת לאדם ממקור קרינה שמחוץ לגופו. החלקיקים או הפוטונים הנפלטים מהחומר הרדיואקטיבי שבתוך מוצר הבניה, למשל, פוגעים בגוף האדם הנחשף וחודרים לתוך גופו בהתאם ליכולת החדירה שלהם.

חשיפה פנימית - זוהי חשיפה הנגרמת על ידי חומרים רדיואקטיביים שחדרו לגוף האדם, כתוצאה מנשימת אויר המכיל חומרים רדיואקטיביים (כגון גז הרדון ובנותיו הרדיואקטיביות המרחפים באוויר הננשם) ו/או חדירת חומרים רדיואקטיביים לדרכי העיכול (באמצעות אכילת מזון המכיל חומרים רדיואקטיביים).

נוהגים לסווג את הקרינה הטבעית לשלושה סוגים עיקריים:

1. קרינה קוסמית 2. קרינת קרקע 3. קרינה פנימית.

הקרינה הקוסמית מגיעה לכדור הארץ מן החלל החיצון. זוהי קרינה המורכבת מחלקיקים שונים (בעיקר פרוטונים) הנושאים אנרגיה גבוהה והחודרים לאטמוספירה העוטפת את כדור הארץ. בחלפם דרך האטמוספירה יוצרים חלקיקים מהירים אלה קרינה משנית על ידי יינון ואינטראקציות גרעיניות. הקרינה המשנית הנוצרת בדרך זו מורכבת מאלקטרונים, נויטרונים, חלקיקים אלמנטריים אחרים וקרינה אלקטרומגנטית. עוצמת הקרינה הקוסמית משתנה ממקום למקום על פני כדור הארץ, והיא תלויה בין השאר בעצמת השדה המגנטי של כדור הארץ באותו מקום.

(מנת הקרינה האפקטיבית החיצונית הממוצעת שבני אדם החיים על כדור הארץ סופגים מקרינה קוסמית משנית זו נאמדת בכ- 0.3 – 0.4 מיליסיורט לשנה בגובה פני הים. בגובה של 10-12 ק"מ (גובה בו טסים רוב מטוסי הנוסעים) מנת הקרינה הקוסמית גדולה פי 15-20 מערכים אלה. ראה לעיל הסבר על מנת הקרינה האפקטיבית והיחידות בהן היא נמדדת).

קרינת הקרקע מקורה באיזוטופים רדיואקטיביים טבעיים המצויים בקרקע ושהוזכרו כבר לעיל (כגון התוריום והאורניום ותוצריהם והאשלגן-40 הנמצאים בקרקע ואף מתנשאים לאוויר וחודרים לשרשרת המזון). אין כמעט קרקע על כדור הארץ שאין בה ריכוז זה או אחר של החומרים הרדיואקטיביים האלה. הריכוזים משתנים מסוג קרקע למשנהו, בהתאם לסלע האם ממנו נוצרה הקרקע. גם חומרי הבנייה הקונבנציונליים שמקורם בקרקע מכילים, כאמור, חומרים רדיואקטיביים בכמות זו או אחרת, בהתאם לחומר הבניה הספציפי.

(מנת הקרינה החיצונית הממוצעת לאדם ממקורות אלה מגיעה לכ- 0.5 מיליסיורט לשנה, כאשר טווח הערכים הוא בין 0.3 ל- 1.5 מיליסיורט לשנה, בהתאם למקום ולסוג המבנה).

הקרינה הפנימית מתקבלת מהתפרקות של איזוטופים רדיואקטיביים הנמצאים בגוף האדם כתוצאה מחדירת חומרים רדיואקטיביים טבעיים או מלאכותיים לגוף האדם בדרכי הנשימה או דרך מערכת העיכול. חלק מחומרים אלה נקלטים לתוך אברי הגוף בהיותם רדיואיזוטופים של יסודות החיוניים לבניית הרקמות (כגון האשלגן והפחמן). גם אותם החומרים שהגוף לא זקוק להם והם יופרשו מהגוף יכולים לגרום לקרינה פנימית תוך מעברם בדרכי הנשימה או במערכת העיכול. המקורות העיקריים לקרינה הפנימית הם אשלגן-40 (^{40}K), איזוטופ רדיואקטיבי טבעי של האשלגן שהוזכר כבר לעיל, טריטיום (מימן רדיואקטיבי) ופחמן-14 המצויים בגופו של כל אדם. ^{226}Ra וחומרי הפירוק שלו חודרים בכמויות זעירות לגוף עם המזון ומי השתייה.

(מנת הקרינה האפקטיבית הפנימית המתקבלת מאשלגן-40 ושאר הרדיואיזוטופים בגופינו היא כ- 0.2 מיליסיורט לשנה. נוסף לכך אנו חשופים למנת קרינה אפקטיבית פנימית של כ- 0.8-1.2 מיליסיורט לשנה כתוצאה מנשימת הגז רדון ובנותיו, ראה להלן).

ולסיכום - הקרינה הטבעית הכוללת לה חשופה אוכלוסיית כדור הארץ היא מסדר גודל של כ- 1.5-3 מיליסיורט לשנה בממוצע, בהתאם לקו הרוחב הגיאוגרפי, לגובה מעל פני הים, לנוכחות מרבצי אורניום ותוריום בקרקע, ולחומרי הבניה בסביבה הקרובה.

באזורים ספציפיים על כדור הארץ מנת הקרינה האפקטיבית הכוללת מקרינת הרקע הטבעי יכולה להגיע גם ל- 5 מיליסיורט ואפילו ל- 8 מיליסיורט לשנה.

בארץ חשופה האוכלוסייה, לפי ההערכות הקיימות (טרם נערכו סקרים מפורטים), לקרינה טבעית הגורמת למנה אפקטיבית של כ- 1.8-2.0 מיליסיוורט בשנה, בממוצע. רמת הקרינה הטבעית בישראל נמוכה יחסית לרמה הממוצעת באירופה.

רדון כמקור לקרינה טבעית

מבין שלושת הרדיואיזוטופים שהוזכרו לעיל רק הרדיום-226 קשור לבעיית הרדון. הקשר נובע מכך שרדיום-226 הוא "האב" של רדון-222, המכונה בקיצור רדון, והנוצר בתהליך ההתפרקות הרדיואקטיבית של רדיום-226. הרדון הוא גז אציל ולכן לא כולו נשאר במקום בו הוא נוצר בתוך מוצר הבניה (המכיל את הרדיום-226). חלק מהגז שנוצר (עד כ- 5%) מחלחל מתוך מוצר הבניה אל חלל המבנה העשוי מהמוצר. גז הרדון הוא קצר חיים והוא דועך על ידי פליטת קרינת אלפא ו"מוליד" בתהליך התפרקותו שרשרת של 4 רדיואיזוטופים קצרי חיים הנוצרים זה מזה והמכונים "בנות הרדון". בנות הרדון נספחות אל חלקיקי האבק שבאוויר ונשאבות אל תוך מערכת הנשימה של האדם יחד עם האוויר הננשם. בהיותן בתוך הריאות והסמפונות פולטות בנות הרדון במשך תהליך התפרקותן את הקרינות האופייניות לכל אחת מהן, כולל קרינת אלפא הנפלטת מחלק מהן. מקובל כי החשיפה לרדון ובנות הרדון מעלה את סיכויי האדם הנחשף לחלות בסרטן ריאות. על כן מוטלות הגבלות על ריכוזי הגז רדון במבני מגורים ובמבנים המשמשים לעבודה. יצוין כי עיקר הרדון ברב מבני המגורים מקורו בקרקע שמתחת למבנה ולא במוצר הבניה ממנו המבנה עשוי.

ריכוז הרדון במבנה נקבע על ידי גורמים רבים: קצב שפיעת הרדון מהקרקע עליו בנוי המבנה, סוג הרצפה וחדירותה לרדון העולה מן הקרקע, קצב שפיעת הרדון מקירות המבנה, קצב חילופי האוויר במבנה וגורמים נוספים.

המשרד להגנת הסביבה קבע רמת פעולה של 200 Bq/m^3 (ממוצע שנתי) לריכוזי הגז רדון במבני מגורים, בתי ספר ומבני ציבור.

רמת הפעולה היא ערך ריכוזי הגז במבנה שמעליו יש לנקוט אמצעים להורדת הריכוזים. בהקשר הנידון רמת פעולה של 200 Bq/m^3 (ממוצע שנתי) פירושה שאם הריכוז השנתי הממוצע של הגז רדון במבנה מגורים עולה על 200 Bq/m^3 יש לבצע פעולות שיגרמו להפחתת ריכוזי הרדון. הפעולות האלה קרויות פעולות שיפור. פעולות השיפור המקובלות הן: אוורור מאולץ, אטימת הרצפה, אטימת הקירות (באמצעות צבעים מיוחדים) וכדומה. רמת הפעולה שנקבעה בישראל דומה לרמה שנקבעה ברב הארצות החברות באיחוד האירופי. חלק ממדינות אירופה מקלות יותר ונקבעו בהן רמות פעולה גבוהות יותר. רמת הפעולה בארה"ב נמוכה קצת יותר (בכ-25%).

מדידות שנערכו באלפי בתים צמודי קרקע בישראל מצביעים על ריכוזי רדון ממוצעים של כ- $40-50 \text{ Bq/m}^3$. החלק מריכוז זה שמקורו בחומרי בנייה נמוך בדרך כלל מ-10%.

רב הרדון הנוצר בתוך מוצר הבניה נשאר כלוא בתוך המטריצה של המוצר עד לדעיכתו. בנות הרדון הנוצרות בתוך המוצר הן המקור לקרינת הגמא הנפלטת מהמוצר והמיוחסת לרדיום-226. חלק קטן מן הרדון הנוצר במוצר הבניה מחלחל החוצה. קצב שפיעת הרדון מיחידת שטח של מוצר הבניה (או מיחידת שטח של הקיר הבנוי ממוצר הבניה) מכונה **האקסהלציה (exhalation)**.

האקסהלציה נמדדת ביחידת בקרל למטר מרובע לשנייה ($Bq/m^2 \cdot s$), או בקרל למטר מרובע לשעה ($Bq/m^2 \cdot h$).

בהקשר לחישובי מנת הקרינה שבתקן הישראלי ת.י. 5098 (להלן בהסבר ההגבלות על החשיפה לקרינה מייננת), **האמנציה (emanation)** מוגדרת כחלק היחסי מהרדון הנוצר בתוך מוצר הבניה המחלחל אל מחוץ למוצר. כשמדובר בקיר חיצוני של מבנה רק כמחצית מכמות זו תמצא את דרכה אל תוך המבנה והשאר יתפזר באוויר שמחוץ למבנה. האמנציה מבוטאת לפעמים גם באחוזים. אם למשל האמנציה ממוצר בניה מסוים היא 5%, אזי משמעות הדבר הוא ש-95% מהרדון הנוצר במוצר הבניה נשאר כלוא בתוכו, דועך שם והבנות הרדיואקטיביות הנולדות מדעיכה זו והכלואות בתוך המוצר גורמות לקרינה חיצונית לדיירי המבנה. לצורכי התקן מניחים כי מחצית מחמשת האחוזים של הרדון מוצאת את דרכה לתוך חלל המבנה והיא זמינה לגרום לחשיפה פנימית לדיירים על ידי חדירתה לדרכי הנשימה.

האמנציה נקבעת על ידי ממדי מוצר הבניה ועל ידי הנקבוביות (porosity) של החומר המוצק ממנו עשוי המוצר.

סיכונים בריאותיים בחשיפה לקרינה מייננת

חשיפת בני אדם לקרינה מייננת עלולה לגרום להם נזקים בריאותיים. קרינה מייננת מכונה כך בגלל יכולתה לגרום ליינון האטומים של התווך דרכו היא חולפת. המילה **יינון (ionization)** משמשת לתיאור התופעה של הרחקת אלקטרון מהאטום על ידי הסטתו מהמסלול בו הוא חג סביב גרעין האטום. בהקשר הבריאותי קרינה מייננת היא קרינה המסוגלת לגרום ליינון האטומים והמולקולות המרכיבים את התא הביולוגי, ועקב כך לשינויים בהם. כאשר השינוי מתרחש במולקולת ה-DNA שבגרעין התא אומרים שקרתה מוטציה בתא. לפעמים, תא עם מוטציה כזו יכול לעבור שינויים נוספים במהלך התפתחותו לאחר התרחשות המוטציה ולהפוך, לאחר דורות רבים של התחלקות, לתא ממאיר.

למנות הקרינה הנמוכות בהן אנו עוסקים (מתחת ל-0.1 סיוורט) אין ככל הנראה השפעה מיידית, אך יש חשש להשפעות מאוחרות. בין ההשפעות האפשריות גרימת מחלות ממאירות 2-40 שנה לאחר החשיפה. ההשפעות האלה הוכחו רק באוכלוסיות שנחשפו למנות גבוהות של קרינה מסדר גודל של מאות ועד אלפי מיליסיוורט תוך זמן קצר (למשל בהפצצה האטומית בהירושימה ונגסקי). יש הטוענים, אף כי אין לכך הוכחה אפידמיולוגית, כי להשפעות המאוחרות מסוג זה אין מנת סף תחתונה ויש סיכוי, הגם שקטן מאד, שהן תופענה גם באוכלוסיות שנחשפו למנות קרינה נמוכות הרבה יתר (סדר גודל של עשרות מיליסיוורט לשנה) באופן כרוני, כלומר בחשיפה קבועה ומתמשכת לאורך שנים.

לשאלה האם לקרינת רקע גבוהה באזורים מסוימים בעולם יש השפעה על תחלואת הסרטן, לא ניתן לענות באופן חד משמעי. במחקרים אפידמיולוגיים השוואתיים רבים שבוצעו ברחבי העולם לא נצפתה עליה בתחלואה בסרטן שניתן לייחס אותה לקרינה הטבעית הגבוהה יחסית. אך אין בעובדה זו הוכחה שההשפעה אינה קיימת. ההבדלים בשכיחות התחלואה בסרטן (הנגרם ללא קשר עם חשיפה חריגה לקרינה מייננת) במדינות שונות ובאזורים גיאוגרפיים שונים בעולם גבוהים למדי ומקורם בגורמים רבים המצויים בסביבה הטבעית, בסביבה הטכנולוגית, בגורמים

תורשתיים ובאורח החיים של בני האדם. גם אם הטענה האומרת שהשפעות סרטניות של חשיפה לקרינה מייננת קיימות אפילו במנות נמוכות היא נכונה, הרי תוספת התחלואה המשוערת כתוצאה מהחשיפה הכרונית לקרינה מייננת, באזורים בהם קרינת הרקע הטבעי גבוהה באופן יחסי, קטנה בהרבה מהבדלים שנצפו בשכיחות התחלואה בסרטן שהוזכרו לעיל.

יתר על כן, כנגד ההערכה המקובלת על מרבית המומחים בעולם כי תוספת חשיפה לקרינה גורמת לתוספת תחלואה, יש טענה שגוף האדם מנצל לטובה את חשיפתו לקרינה מייננת במנות נמוכות ובקצבי מנה נמוכים כדי לחסן את עצמו מפני חשיפה לקרינה מייננת במנות גבוהות יותר. תופעה זו קרויה "הורמזיס" על ידי קרינה (**radiation hormesis**) והיא נחקרת בשני העשורים האחרונים.

הגבלות על החשיפה לקרינה מייננת

כדי להיות בצד הבטוח נקבעו הגבלות מוסכמות לחשיפת עובדים ובני אדם מן הציבור לקרינה מייננת גם במנות נמוכות וקצבי מנה נמוכים. הגוף המקצועי הבינלאומי המקובל, הממליץ על ההגבלות האלה, הוא הוועדה הבינלאומית להגנה רדיולוגית (ICRP - International Committee for Radiation Protection). וועדה זו המליצה בשנת 1999 להגביל את תוספת מנת הקרינה (מעל לרקע הטבעי הרגיל), הנגרמת על ידי חשיפה כרונית של אוכלוסיות גדולות לקרינה מייננת מכלל המקורות הניתנים לבקרה, למנה אפקטיבית של 1 מיליסיוורט לשנה. את החשיפה לקרינה ממקור בודד (כגון מחומרים רדיואקטיביים במוצרי בניה) המליצה הוועדה להגביל למנה אפקטיבית של 0.3 מיליסיוורט לשנה. המלצה זו (**ICRP 1999**), שאומצה על ידי הרשויות בישראל, היא הבסיס להגבלות על ריכוזי החומרים הרדיואקטיביים הטבעיים במוצרי בניה כפי שנוסחו בתקן הישראלי ת.י. 5098.

ת"י 5098 שפורסם תחת הכותרת "תכולת יסודות רדיואקטיביים טבעיים במוצרי בנייה" מטיל הגבלות על ריכוזי שלושה רדיואיזוטופים טבעיים (^{226}Ra , ^{232}Th ו- ^{40}K) במוצרי בניה. מטרת התקן היא להבטיח כי חשיפת בני אדם שיגורו במבנים הבנויים ממוצרים אלה לא תעלה על הגבולות שנקבעו. תוספת מנת הקרינה מחומרים רדיואקטיביים במוצרי בניה בישראל הוגבלה ל-0.3 מיליסיוורט בשנה לדייר השוהה 7,000 שעות בשנה (כ-80% מהזמן) במבנה שקירותיו, רצפתו ותקרתו עשויים ממוצר בניה המכיל את החומרים הרדיואקטיביים הנדונים בריכוז זה או אחר. תוספת המנה הנ"ל כוללת חשיפה לקרינה חיצונית ונשימת רדון ובנות רדון שמקורם במוצר הבניה.

יש להבהיר כי התקן אינו מתיימר להבחין בין רמה "בטוחה" לרמה "מסוכנת", אלא לאפשר בקרה מסודרת של הרשויות על ריכוז הרדיואיזוטופים ממקורות טבעיים במוצרי בניה, מבלי לפגוע באפשרות להשתמש ברב המוחלט של מוצרי הבניה המיוצרים בישראל מחומרי גלם מקומיים.