



שטח בטיחות קרינה

תחום מדידות קרינה

אבן מאסו הבונים הייתה לראש פינה (תהילים קי"ח)

היבטים רדיולוגיים של השימוש באפר פחם בתעשיית הבנייה, בתשתיות, בחקלאות וביישומים אחרים

שאלות ותשובות

טוביה שלזינגר וז'אן קוד

מהדורה מעודכנת

אלול התשע"ד

ספטמבר 2014

חוברת זו הוכנה על פי הזמנת מנהלת אפר הפחם

רקע

ההיבטים הרדיולוגיים של השימוש באפר פחם במוצרי בנייה (דהיינו היבטים הקשורים בקרינה הנפלטת ממוצרים אלה) זוכים בשנים האחרונות לתשומת לב גוברת בקהילה המקצועית העוסקת בהגנת העובדים והציבור מקרינה והדי השיח הזה מגיעים לאחרונה גם לתקשורת ההמונית.

פחם מהווה מקור אנרגיה מרכזי לייצור חשמל בישראל. לצד היתרונות של השימוש בפחם לייצור חשמל, מקור אנרגיה זה גורם לבעיה סביבתית בשל האפר הנוצר כמוצר לוואי של השריפה. כל טון של פחם הנשרף מותיר אחריו 40-150 ק"ג אפר (בהתאם לסוג הפחם ומקורו). משמעות עובדה זו היא שבישראל נוצרים מדי שנה מעל ל-1.2 מיליון טונות של אפר פחם. האפר מכיל עקבות של מתכות כבדות וחומרים רדיואקטיביים טבעיים (להלן חומרים ר"א), המקשים מסיבות סביבתיות על סילוק האפר כפסולת בדרכים קונבנציונאליות. אחד הפתרונות לבעיה זו הוא שימוש באפר הפחם למטרות מועילות בצורה ידידותית לסביבה.

במדינות רבות בעולם וגם בישראל נעשה שימוש באפר פחם בתעשיית הבנייה, בחקלאות וכחומר גלם למילוי קרקע (landfill) בתשתיות לכבישים ושטחי בנייה. זמינות אפר הפחם פותרת במקרים רבים את בעיית המחסור בחול ובאגרגטים לצורכי מילוי קרקע והכנת מוצרי בטון.

מול היתרונות שפורטו לעיל כרוכים היישומים האלה גם בקשיים מסוימים. יישום אפר הפחם בתעשיית הבנייה עלול לגרום לתוספת פוטנציאלית, אמנם קטנה, לחשיפת האוכלוסייה לקרינה מייננת שמקורה בחומרים הר"א הטבעיים, הנמצאים באפר פחם בריכוזים גבוהים יחסית לריכוזיהם בקרקע רגילה. חשיפה לקרינה מייננת במנות גבוהות כרוכה בסיכונים בריאותיים מוכחים. מקובל כי הסיכונים האלה קיימים, אם כי בסבירות נמוכה, גם כשהאדם נחשף למנות קרינה נמוכות.

החומרים הר"א העיקריים שבאפר הפחם (כבכל הקרקעות) הם הרדיואיזוטופים אשלגן-40 (^{40}K), רדיום-226 (^{226}Ra), ותוריום-232 (^{232}Th). ריכוזי האקטיביות של הרדיואיזוטופים האלה באפר הפחם משתנים בהתאם למקור כריית הפחם, אך בדרך כלל הם בטווח של עשרות עד מאות בקרל לקילוגרם (Bq/kg). ריכוזים אלה גבוהים במידה ניכרת מריכוזי החומרים בקרקע רגילה (ראה להלן).

הרשויות המוסמכות בישראל (משרד הכלכלה, רשויות התכנון והבנייה והמשרד להגנת הסביבה) מתנות את ההיתרים ליישומים השונים של אפר הפחם בעמידה בדרישות התקן הבינלאומי להגנה מקרינה (IAEA 1996), דהיינו עמידה בדרישות ההצדקה (justification) והאופטימיזציה (optimization), כפי שנקבעו על ידי הוועדה הבינלאומית להגנה רדיולוגית (ICRP, 1991) וקבלת נתונים על סיכוני הקרינה הכרוכים ביישומים אלה (ראה הסבר קצר על מושגי ההצדקה והאופטימיזציה בנספח א לחוברת זו). השימוש באפר פחם בתעשיית הבנייה (ייצור בלוקים ובטון

מוכן) מותנה בעמידת מוצרי הבנייה האלה בדרישות התקן הישראלי ת.י. 5098, העוסק בהגבלת תכולת חומרים רדיואקטיביים טבעיים במוצרי בנייה (מכון התקנים 2009)*.

השימוש הטכנולוגי באפר למטרות שונות במקום סילוקו כפסולת יכול לשרת על כן שלוש מטרות במקביל:

1. מניעת מפגע סביבתי.
2. הוזלת מוצרי הבנייה עקב ניצול הפסולת כתחליף לחומרי גלם תעשייתיים.
3. תרומה לצמצום כריית חומרי גלם המצויים במחסור ולהקטנת פגיעה בסביבה הנגרמת על ידי כרייה מואצת זו.

הציבור הרחב וקהילת העוסקים בתעשיית הבנייה מוטרדים מהסיכונים הפוטנציאליים שבשימוש באפר פחם ומתקשים בהבנת התקן הנ"ל ובמציאת הדרכים המעשיות לבחינת העמידה של מוצר בנייה ספציפי בדרישות התקן הזה. הציבור גם אמביוולנטי ביחס לשימוש באפר פחם: מחד גיסא הוא רוצה לתת יד לפתרון המטרד הסביבתי הנגרם על ידי יצירת הכמויות הגדולות של אפר פחם הנוצרות בגלל השימוש במקור אנרגיה זמין וזול. מאידך גיסא, כצרכן מוצרי בנייה, חושש אותו ציבור מן הסיכון, האמיתי או המדומה, שהוא נוטל על עצמו, על ידי בנייה (או רכישה) של מבנים המכילים מוצרי בנייה עתירי אפר פחם.

ליצרנים, לקבלנים ולבעלי המקצוע בתחומי עבודות העפר והתשתית ובתעשיית הבנייה, שאינם מצויים ברזי המונחים המדעיים והטכניים, ולאזרח המעוניין לרכוש בית או דירה, קשה לעקוב אחרי הפרסומים המקצועיים בנושא. הם מתעניינים בעיקר בשאלה עד כמה השימוש באפר פחם אכן טומן בחובו סכנה בריאותית. מה פתאום דנים, דווקא עכשיו, בשימוש באפר פחם בתעשיית הבנייה ובתשתיות? מה מקור אפר הפחם? למה משתמשים בו היום יותר מבעבר? מהו ת.י. 5098? כיצד להבטיח שמוצר בנייה מסוים עומד בדרישות התקן?

על שאלות אלה וכמותן מנסים מחברי חוברת זו לענות בשפה פשוטה ובקצרה ככל האפשר. המידע המוצג בחוברת זו מבוסס על ספרות מדעית וטכנית ועל המלצות/הנחיות הוועדה המקצועית-תורתית לבטיחות קרינה הפועלת מטעם משרדי הממשלה (משרד הבריאות, משרד העבודה והרווחה, המשרד לאיכות הסביבה והוועדה לאנרגיה אטומית). רשימה חלקית של המקורות מובאת בסוף החוברת. פרטים על מחברי החוברת ועל תחומי עיסוקם ומומחיותם יוכל הקורא למצוא בנספח ב' לחוברת זו. שאלות הבהרה ניתן להציג למחברי החוברת בפקס: 08-9434696 או 02-9309478.

* חלק ממינוחי ההגנה מקרינה בהמלצות ה-ICRP משנת 1991 ובתקן הבינלאומי להגנה מקרינה משנת 1996 הוחלפו במינוחים חדשים בהמלצות המעודכנות של הוועדה משנת 2007 ובתקן הבינלאומי המעודכן, שנגזר מהמלצות אלה ופורסם בשנת 2011. למרות זאת אנחנו משתמשים בחוברת שו"ת זו במינוח הישן כיוון שהמינוחים החדשים טרם הוטמעו בתקינה ובתחיקה הבינלאומית והישראלית וכיוון שהשינויים במינוח הם סמנטיים ואין לשינויים אלה השפעה על ההנחיות המעשיות לבקרה על יישומי אפר פחם. בין המינוחים שבוטלו או עברו שינוי נזכיר כאן את המצבים/פעילויות שכונו בהמלצות ה-ICRP משנת 1991 "עיסוק" (practice) ו-"התערבות" (intervention) והוחלפו במושגים החדשים existing exposure situation ו-planned exposure situation, בהתאמה.

רשימת השאלות

1. כיצד נוצר אפר הפחם מהסוג המשמש כחומר מילוי בתשתיות וכמרכיב של מוצרי בנייה?
2. אילו סוגי אפר נוצרים בתהליך השריפה?
3. מהם יישומי אפר הפחם בתחום הבנייה והעבודות הציבוריות?
4. מהו ההרכב הכימי של אפר הפחם?
5. מדוע האפר מכיל חומרים רדיואקטיביים?
6. האם זו תופעה כלל עולמית?
7. מהם ריכוזי האקטיביות של הרדיואיזוטופים האלה בקרקע?
8. מהם ריכוזיהם במוצרי בנייה?
9. מה משמעות המונח אקטיביות ומה פירוש הגודל Bq בטבלאות 1, 2 ו-3?
10. מהו ריכוז האקטיביות של החומרים הרדיואקטיביים האלה בפחם ובאפר?
11. אילו קרינות נפלטות מהאפר?
12. מדוע קוראים לקרינות מסוג זה קרינה מייננת?
13. מדוע חוששים מקרינה מייננת?
14. האם קרינות כאלה נפלטות גם מחומרי גלם אחרים המשמשים לבנייה (חול, אבנים, מלט, זיפזיף וכו')?
15. אם כן, האם השימוש באפר הפחם עלול לגרום למעשה רק להגדלה מסוימת של החשיפה לקרינה טבעית הנפלטת בכל מקרה מכל מוצרי הבנייה?
16. כיצד ניתן לדעת מהו ריכוז הרדיואיזוטופים הספציפיים שהוזכרו לעיל במוצר הבנייה המכיל אפר פחם?
17. כיצד נחשפים לקרינה שמקורה בחומרים רדיואקטיביים?
18. ממה מורכבת הקרינה הטבעית ומהם מקורותיה?
19. האם החשיפה לקרינה טבעית בישראל גבוהה, שווה או נמוכה מהחשיפה לקרינה טבעית בארצות אחרות?
20. האם הקרינה הטבעית נתונה תחת בקרה?
21. מה ההשפעה של הנחיות אלו על יישומי אפר פחם בישראל?
22. מה זה מיליסיוורט ומה פירוש המושג "המנה האפקטיבית" שהוזכר בשאלה 18 לעיל?
23. לעיל הוזכר הרדון כמקור קרינה טבעי. איך בעיית החומרים הרדיואקטיביים במוצרי בנייה קשורה לבעיית גז הרדון ומהי בעיה זו?
24. מה קובע את רמת ריכוזי הרדון במבנה המשמש למגורים?
25. האם הרשויות בישראל מטילות הגבלות על ריכוזי הגז רדון במבני מגורים?
26. מה מתכוונים במונח רמת פעולה בהקשר לסיכוני הרדון?
27. מהו הריכוז האופייני של רדון במבנים צמודי קרקע בישראל?
28. איזה חלק מריכוז זה מקורו בחומרי הבנייה?
29. האם רמת הפעולה לביצוע פעולות להפחתת הרדון שנקבעה בישראל גבוהה או נמוכה מרמות הפעולה שנקבעו באירופה? בארה"ב?

30. מהם הסיכונים הבריאותיים של חשיפה לקרינה מייננת ומהן ההגבלות שהוטלו על חשיפה כזו ברמה הבינלאומית?
31. האם הרשויות מטילות הגבלות גם על החשיפה ממקורות קרינה אחרים ומהן ההגבלות?
32. בתשובה לשאלות קודמות הוזכר שיש אזורים גיאוגרפיים שונים בעולם שתושביהם חשופים לקרינת רקע גבוהה בהרבה מזו שבישראל. האם לעובדה זו השפעה על התחלואה בסרטן באזורים אלה?
33. מהי תוספת מנת הקרינה האפקטיבית הצפויה לבני אדם שיגורו בבתים הבנויים מחומרי בנייה המכילים אפר פחם? מה גודלה של תוספת זו ביחס לקרינת הרקע הטבעי בישראל?
34. ואיך זה משתווה עם מנת הקרינה שאנו סופגים בתהליכי אבחון וטיפול רפואי?
35. מהו תקן ישראלי ת.י. 5098?
36. אילו הגבלות הוטלו על ידי הרשויות בישראל על תוספת המנה הנגרמת על ידי חומרים רדיואקטיביים במוצרי בנייה?
37. כיצד מופעלת ההגבלה הזו באופן מעשי?
38. על איזה בסיס נקבעה הגבלה זו?
39. ביחס למה מודדים את תוספת המנה?
40. מה מנת הקרינה הנגרמת לדייר במבנה העשוי ממוצרי הבנייה הנפוצים בישראל?
41. האם בכל העולם מוטלות הגבלות על תוספת המנה הנגרמת לאוכלוסייה על ידי מוצרי בנייה?
42. מהו אינדקס הקרינה המוזכר בתקן?
43. בתקן מדובר על האקסהלציה ועל האמנציה של רדון ממוצר הבנייה. מהם שני מושגים אלה?
44. מה קובע את מידת האמנציה מהמוצר?
45. מהם אחוזי האמנציה של הרדון ממוצרי בנייה המכילים אפר פחם בהשוואה לאותם מוצרים שאינם מכילים אפר פחם?
46. מה הסיבה להבדל זה?
47. כלומר, האם ככל שאחוז אפר הפחם יגדל, יקטן אחוז האמנציה של הרדון מהמוצר?
48. אם כן, כדאי אולי להוסיף יותר ויותר אפר פחם למוצר כדי להפחית את מנת הקרינה מרדון?
49. כיצד משתמשים בתקן ת"י 5098 ומה השלכותיו על תעשיית הבנייה בישראל?
50. אילו בדיקות יש לעשות למוצר בנייה וכיצד נעזרים בטבלאות האלה לבחינת העמידה של מוצר בנייה בדרישות ת"י 5098?
51. האם ההגבלות שנקבעו בארצות אחרות דומות, מחמירות או מקלות ביחס להגבלות שהוטלו בישראל?
52. מה עוד שונה בהמלצות האלה?
53. האם אינדקס הקרינה יכול לשמש מדד לרמת הסיכון מקרינה הנפלטת ממוצר בנייה?
54. למה נקבע אינדקס קרינה בכלל ולמה הוא נקבע לפי הערכים הכמותיים הספציפיים שבתקן ת.י. 5098?

55. האם מוצר בנייה שאינדקס הקרינה שלו נמוך יותר הוא "בריא" יותר?
56. האם התקן חל על חומרי גלם לבנייה?
57. האם התקן חל על מרצפות קרמיקה ועל ציפויי שיש וקרמיקה על קירות (במטבחים, בחדרי אמבטיה וכו')?
58. היכן ניתן לקבל הסברים ובהברות לתקן?
59. האם יש להעדיף מוצר העומד בתקן שאינדקס הקרינה שלו נמוך ביחס למוצר אחר שאף הוא עומד בתקן?
60. מהם יישומי אפר פחם בחקלאות ובגינון והאם הם עלולים לגרום לחשיפה לקרינה?
61. מהם יישומי אפר פחם בסלילת דרכים ובתשתיות למבנים והאם הם עלולים לגרום לחשיפה לקרינה?



1. כיצד נוצר אפר הפחם מהסוג המשמש כחומר מילוי בתשתיות וכמרכיב של מוצרי בנייה?

אפר הפחם בו משתמשים בישראל כחומר מילוי לתשתיות של כבישים ומסילות ברזל וכחומר גלם המוסף למלט ולמוצרי בטון (בטון מוכן ובלוקים) נוצר בתחנות הכוח לייצור חשמל המשתמשות בפחם כדלק. לפי אומדנים שנתיים צריכת הפחם לייצור חשמל בישראל עולה על 12 מיליון טונות לשנה. עיקר הפחם (~95%) מיובא לישראל מדרום אפריקה, קולומביה, אינדונזיה (עד 2013) ורוסיה, והיתר מאוסטרליה. כל טון של פחם הנשרף מותיר אחריו 40-150 ק"ג אפר (בהתאם לסוג הפחם ומקורו). בפועל צפויים להיווצר בישראל מדי שנה כ- 1.3-1.4 מיליון טונות של אפר פחם.

לרשימת השאלות

2. אילו סוגי אפר נוצרים בתהליך השריפה?

את אפר הפחם הנוצר בתנורי השריפה לייצור קיטור בתחנות הכוח נוהגים לסווג בדרך כלל לשני סוגים: אפר תחתית (bottom ash) ואפר מרחף (fly ash). אפר התחתית, המהווה כ- 10% בלבד מן האפר הנוצר בשריפת הפחם, מורכב מחלקיקים גדולים יחסית (גודל טיפוסי 1-10 מילימטר) השוקעים בתחתית תנורי השריפה. האפר המרחף, כשמו כן הוא, מורכב מחלקיקים עדינים יותר (חציון של כ- 20 מיקרומטר) הנאספים ברובם במתקני שיקוע אלקטרוסטטיים (Electro-Static Precipitators- ESP) בדרכם של גזי הפליטה אל ארובת תנור השריפה.

לרשימת השאלות

3. מהם יישומי אפר הפחם בתחום הבנייה והעבודות הציבוריות?

ניתן לנצל את אפר הפחם למטרות מועילות רבות. ניתן להשתמש באפר כחומר יעיל למילוי קרקע (landfill) בתשתיות לכבישים ומשטחים מרוצפים, למילוי סוללות עפר, כמצע למשטחי דשא וגינות נוי, כתוסף לצמנט, כתחליף לאגרגטים (aggregates) או לחול בבטון מוכן ובבטון המשמש לייצור בלוקים תרמיים.

לרשימת השאלות

4. מהו ההרכב הכימי של אפר הפחם?

האפר מורכב בדרך כלל מסיליקטים (תחמוצות סיליקון), תרכובות אשלגן ואלומיניום וקרבוניטים (תחמוצות סידן). האפר מכיל גם תרכובות ברזל ועקבות של מתכות אחרות, בחלקן רעילות (ארסן, בריום, ונדיום, כסף, כרום, כספית, מוליבדן, מנגן, נחושת, ניקל, סלניום, עופרת, אבץ, קדמיום וקובלט). החלק היחסי של המתכות האלה באפר הוא קטן ומגיע לסדר גודל של עד מאות חלקים למיליון. כמו כן מכיל האפר, בכמויות זעירות, איזוטופים של חומרים רדיואקטיביים טבעיים (הקרויים רדיואיזוטופים). חומר רדיואקטיבי מאופיין בחוסר יציבות ובפליטה של קרינה הנגרמת מהתפרקותו.

הרדיואיזוטופים העיקריים שבאפר הפחם (ובמוצרי בנייה) הם רדיום-226 (^{226}Ra), תוריום-232 (^{232}Th) ואשלגן-40 (^{40}K) (המספרים הנלווים לשמות האיזוטופים מבטאים את משקלם האטומי). רדיואיזוטופים אלה משויכים בפרסומים מקצועיים מסוימים לקבוצת חומרים רדיואקטיביים

בשם NORM (Naturally Occurring Radioactive Material) או קרויים בפרסומים אחרים Radioisotopes of Natural Origin. הרדיואיזוטופים האלה ובנותיהם הרדיואקטיביות פולטים שלושה סוגי קרינה, דהיינו חלקיקי אלפא וביתא וקרינת גמא. החלק היחסי (המשקלי) של הרדיואיזוטופים האלה באפר נמדד בחלקים למיליון ואף פחות.

לרשימת השאלות

5. מדוע האפר מכיל חומרים רדיואקטיביים?

האפר מכיל את הרדיואיזוטופים האלה כיוון שהפחם, שממנו נוצר האפר בתהליך השריפה, מכיל אותם. תהליך השריפה (בטמפרטורה של כ-1500°C) הופך את רוב המרכיב הפחמני של הפחם לדו-תחמוצת הפחמן (CO₂) ומותיר בתוך האפר את המינרלים, את המתכות וגם את הרדיואיזוטופים שהוזכרו לעיל. ריכוזי הרדיואיזוטופים באפר גבוהים על כן בהרבה מריכוזיהם בפחם. השריפה גורמת להעלאת ריכוזי הרדיואיזוטופים באפר פי 6 עד 15 ביחס לריכוזיהם בפחם. פקטורי העשרה לא בהכרח תואמים את אחוז האפר בפחם מאחר והם תלויים בפרמטרים שונים כגון יעילות השריפה, תכונות הפחם המסוים ועוד.

לרשימת השאלות

6. האם זו תופעה כלל עולמית?

כן. הפחם נוצר בקרקע מחומרים אורגניים בתהליך שנמשך מיליוני שנים. הקרקע מורכבת ממספר רב של יסודות ותרכובות והיא מכילה ריכוזים גבוהים של סיליקון, אלומיניום, פחמן וסידן וריכוזים נמוכים יותר של ברזל ומתכות אחרות. כל קרקע מכילה גם ריכוזים נמוכים מאוד של החומרים הרדיואקטיביים הטבעיים בכלל ושל הרדיואיזוטופים הספציפיים שהוזכרו לעיל בפרט. אין כמעט קרקע על כדור הארץ שאין בה ריכוז זה או אחר של החומרים הרדיואקטיביים האלה.

לרשימת השאלות

7. מהם ריכוזי האקטיביות של הרדיואיזוטופים האלה בקרקע?

הריכוזים משתנים מסוג קרקע למשנהו, בהתאם לסלע האם ממנו נוצרה הקרקע. יש גם הבדלים גדולים בריכוזי החומרים האלה באותו סוג קרקע באזורים גיאוגרפיים שונים. בטבלה 1 להלן מוצגים הערכים הממוצעים של ריכוזי אשלגן-40 (⁴⁰K), רדיום-226 (²²⁶Ra) ותוריום-232 (²³²Th), כפי שנמדדו בקרקעות באזורים שונים בישראל. הנתונים שבטבלה 1 מבוססים על מדידות בשדה שנערכו בשנים 1999-2000 על ידי צוות חוקרים משטח בטיחות קרינה במרכז למחקר גרעיני נחל שורק (Haquin, 2002).

טבלה 1. ריכוזי אקטיביות ממוצעים של אשלגן-40, רדיום-226, ותוריום-232 בקרקעות באזורים שונים בישראל. מתוך אסמכתא (Haquin, 2002), סוג הקרקע לא אופיין.

ריכוז הרדיואיזוטופים [Bq/kg] (ערך ממוצע)			אזור
²³² Th	²²⁶ Ra	⁴⁰ K	
11	74	114	ערבה
9	78	110	בקעת ים המלח
13	345	111	אזורי הפוספט
15	32	176	הנגב הדרומי
29	27	272	הנגב הצפוני
20	18	209	הרי יהודה
13	12	114	מישור החוף (צפון)
26	24	129	הגליל התחתון
9	20	174	הגולן

לרשימת השאלות

8. מה ריכוזיהם במוצרי בנייה?

רדיום-226 (²²⁶Ra), תוריום-232 (²³²Th) ואשלגן-40 (⁴⁰K) הם הרדיואיזוטופים הטבעיים העיקריים גם במוצרי בנייה. בטבלה 2 להלן מוצגים ריכוזים ממוצעים שלהם בחומרי בנייה מקובלים באירופה (EC, 1999). בטבלה 3 מוצגים להשוואה ריכוזי אקטיביות ממוצעים של הרדיואיזוטופים האלה במוצרי בנייה אחדים בישראל וחומרי הגלם הנפוצים בשימוש (שלזינגר 2002, 2008; חקין וחובריו, 2005; קובלר וחובריו, 2011; מנהלת אפר פחם, 2013).

טבלה 2. ריכוזי אקטיביות אופייניים של אשלגן-40, רדיום-226, ותוריום-232 בחומרי בנייה מקובלים במדינות האיחוד האירופי. מתוך אסמכתא (EC, 1999).

ריכוזי הרדיואיזוטופים (Bq/kg)			חומר הבנייה
²³² Th	²²⁶ Ra	⁴⁰ K	
30	40	400	בטון (concrete)
50	50	670	לבני חרסית (clay bricks)
10	10	330	לבני חול-גיר (sand-lime bricks)
20	390	60	פוספו-גבס (phospho-gypsum)
10	10	80	גבס טבעי (natural gypsum)

טבלה 3. ריכוזי אקטיביות אופייניים של אשלגן-40, רדיום-226, ותוריום-232 במוצרי בנייה אחדים בישראל (א), ובחומרי הגלם הנפוצים בשימוש בישראל (ב) (שלזינגר, 2002, 2008; חקין וחובריו, 2005; קובלר וחובריו, 2011; מנהלת אפר פחם, 2013).

ריכוזים אופייניים של חומרים ר"א (ממוצע)			
(Bq/kg)			
²³² Th	²²⁶ Ra	⁴⁰ K	רדיואיזוטופ
א. מוצרי בנייה			
4	17	40	בלוק בטון
58	25	56	בלוק בטון עם אפר פחם
7	28	50	בטון רגיל ללא אפר ¹
16	37	55	בטון עם ~6% אפר פחם ¹
5	37	43	בטון רגיל ללא אפר ²
11	37	66	בטון עם ~5% אפר פחם ²
108	109	203	בלוק תרמי (70% אפר פחם)
ב. חומרי גלם			
1	12	6	אגרגט אבן גיר
1	39	13	אגרגט דולומיט
7	22	181	אגרגט חלוקים
9	13	93	חול
23	71	111	צמנט CEM I
30	60	123	צמנט CEM II

(1) קובלר וחוברין, 2011; (2) מנהלת אפר פחם, 2013.

* CEM I - ללא אפר פחם; CEM II - מכיל עד 10% אפר פחם מרחף.

לרשימת השאלות

9. מה משמעות המונח אקטיביות ומה פירוש הגודל Bq בטבלאות 1, 2 ו- 3?

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 ²²⁶Ra שהופק לראשונה על ידי הזוג Pierre & Marie Curie, שעל שמם נקראה היחידה הזו).

לרשימת השאלות

10. מהו ריכוז האקטיביות של החומרים הרדיואקטיביים האלה בפחם ובאפר?

ריכוזי האקטיביות של החומרים האלה בפחם משתנה בהתאם למקום כריית הפחם אך בדרך כלל הוא בטווח הנע מבקרלים אחדים ועד עשרות בקרל לקילוגרם. ריכוזי החומרים הר"א באפר הם כאמור גבוהים יותר מריכוזיהם בפחם שממנו נוצר האפר. הריכוז באפר תלוי בין השאר גם בגודל חלקיקי האפר וביעילות תהליך השריפה. הריכוזים בדרך כלל גבוהים יותר באפר מרחף מאשר באפר תחתית המופקים מאותו פחם ובאותו תהליך שריפה.

בטבלה 4 מוצגים פרטים על ריכוזים אופייניים של אשלגן-40, רדיום-226 ותוריום-232 בפחם שיובא לישראל בשנים 2008-2013 ובאפר שנוצר מפחם שיובא בשנים 2004-2013.

טבלה 4. טווח ריכוזי האקטיביות וריכוזי האקטיביות הממוצעים בפחם ובאפר פחם מתחנות הכוח בחדרה ובאשקלון בשנים 2004-2013. מתוך אסמכתא (מנהלת אפר פחם, 2014).

אפר תחתית		אפר מרחף		פחם		
ריכוז	טווח	ריכוז	טווח	ריכוז	טווח	רדיו-איזוטופ
ממוצע (Bq/kg)	ריכוזים (Bq/kg)	ממוצע (Bq/kg)	ריכוזים (Bq/kg)	ממוצע (Bq/kg)	ריכוזים (Bq/kg)	
93	37-201	131	55-251	14	2-43	²²⁶ Ra
76	28-190	108	46-239	10	2-39	²³² Th
242	66-460	330	105-628	31	5-91	⁴⁰ K

לרשימת השאלות

11. אילו קרינות נפלטות מהאפר?

מאפר הפחם, כמו ממרבית הקרקעות כאמור לעיל, נפלטים אותם סוגי קרינה הנפלטים מהרדיואיזוטופים שהפחם, ולכן גם האפר, מכילים. הרדיואיזוטופים האלה ובנותיהם הרדיואקטיביות פולטים את שלושת סוגי הקרינות הגרעיניות, דהיינו חלקיקי אלפא וביתא וקרינת גמא.

(פרטים על סוגי קרינה ועל תופעת הרדיואקטיביות ניתן למצוא בספרי המדע הפופולריים. סקירה קצרה על סוגי הקרינה הגרעינית ועל ההבחנה בין קרינה חלקיקית וקרינת פוטונים מוצגת בחוברת "קרינה גרעינית" בהוצאת מכון ההדרכה על שם י. פייגה, ממ"ג שורק, יבנה 81800).

לרשימת השאלות

12. מדוע קוראים לקרינות מסוג זה קרינה מייננת?

הכינוי הזה ניתן לקרינות האלה בגלל יכולתן לגרום ליינון האטומים של התווך דרכו הן חולפות. 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 של הרקמה הביולוגית.

לרשימת השאלות

13. מדוע חוששים מקרינה מייננת?

תופעת היינון גורמת לשינויים באטומים והמולקולות המרכיבים את התא הביולוגי. כאשר השינוי מתרחש במולקולות 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.

לרשימת השאלות

14. האם קרינות כאלה נפלטות גם מחומרי גלם אחרים המשמשים לבנייה (חול, אבנים, מלט, זיפזיף וכו')?

כן. כאמור החומרים הרדיואקטיביים האלה מצויים למעשה, בריכוז זה או אחר, כמעט בכל חומרי הגלם לתעשיית הבנייה שמקורם בסלעים או בקרקע.

לרשימת השאלות

15. אם כן, האם השימוש באפר הפחם עלול לגרום למעשה רק להגדלה מסוימת של החשיפה לקרינה טבעית הנפלטת בכל מקרה מכל מוצרי הבנייה?

כן. לפיכך מטרת הבקרה על השימוש באפר פחם במוצרי בנייה (ראה להלן) היא לא למנוע חשיפה לקרינה מייננת, הקיימת ממילא בכל מוצרי הבנייה שמקורם בקרקע ובסלע, אלא רק להגביל את תוספת החשיפה הזו לערכים המקובלים במדינות המערב המפותחות.

לרשימת השאלות

16. כיצד ניתן לדעת מהו ריכוז הרדיואיזוטופים הספציפיים שהוזכרו לעיל במוצר בנייה המכיל אפר פחם?

ריכוז הרדיואיזוטופים במוצר בנייה מסוים נקבע באופן מוחלט על ידי ריכוז אותם הרדיואיזוטופים במרכיבי המוצר. אפר הפחם הוא אחד ממרכיבים אלה. אם יש לנו נתונים על ריכוזי הרדיואיזוטופים במרכיבי מוצר הבנייה ואם החלק היחסי (המשקלי) של כל מרכיב במוצר ידוע גם כן, ניתן לחשב באופן פשוט את הריכוז הצפוי במוצר. לדוגמא נניח שמכילים טונה אחת (1,000 ק"ג) של תערובת חומרי גלם להכנת בלוקים, כאשר המרכיבים הם:

- 300 ק"ג צמנט CEM I, עם ריכוז אקטיביות של 71 Bq/kg רדיום-226.
- 150 ק"ג חול ים, עם ריכוז אקטיביות של 13 Bq/kg רדיום-226.
- 500 ק"ג תערובת אפר פחם (מרחף ותחתית), עם ריכוז אקטיביות של 112 Bq/kg רדיום-226.
- 50 ליטר מים (מניחים כי ריכוז הרדיום-226 במים זניח ביחס לריכוזים הנ"ל).

בהנחה שהמים ייהפכו לחלק מהחומר המוצק של בלוק הבנייה (שיוכן מהתערובת), ריכוז אקטיביות הרדיום-226 הצפוי במוצר הוא: $79.25 \text{ Bq/kg} = (0.3 \times 71 + 0.15 \times 13 + 0.5 \times 112)$. ניתן לחשב באופן דומה את ריכוזי האקטיביות של שני הרדיואיזוטופים האחרים במוצר.

לרשימת השאלות

17. כיצד נחשפים לקרינה שמקורה בחומרים רדיואקטיביים?

מבחינים בדרך כלל בין שני אופני חשיפה לקרינה מהרדיואקטיביות שבתוך חומר כלשהו: **חשיפה חיצונית** - זוהי חשיפה הנגרמת לאדם ממקור קרינה שמחוץ לגופו. החלקיקים או הפוטונים הנפלטים מהחומר הרדיואקטיבי שבתוך מוצר הבנייה, 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 אוויר המכיל חומרים רדיואקטיביים (כגון גז הרדון ובנותיו הרדיואקטיביות המרחפים באוויר הנינשם) ו/או חדירת חומרים רדיואקטיביים לדרכי העיכול (באמצעות אכילת מזון המכיל חומרים רדיואקטיביים).

לרשימת השאלות

18. ממה מורכבת הקרינה הטבעית ומהם מקורותיה?

נוהגים לסווג את הקרינה הטבעית לשלושה סוגים עיקריים:
א. קרינה קוסמית **ב.** קרינת קרקע **ג.** קרינה פנימית.

א. הקרינה הקוסמית (cosmic radiation) מגיעה לכדור הארץ מן החלל החיצון. זוהי קרינה המורכבת מחלקיקים שונים (בעיקר פרוטונים) הנושאים אנרגיה גבוהה והחודרים לאטמוספירה העוטפת את כדור הארץ. בחולפם דרך האטמוספירה יוצרים חלקיקים אלה קרינה משנית על ידי ינון ואינטראקציות גרעיניות. הקרינה המשנית הנוצרת בדרך זו מורכבת מאלקטרונים, נויטרונים, חלקיקים אלמנטאריים אחרים וקרינה אלקטרומגנטית. הקרינה הקוסמית משתנה ממקום למקום על פני כדור הארץ, ועוצמתה תלויה בין השאר גם בעוצמת השדה המגנטי של כדור הארץ באותו מקום.

(מנת הקרינה האפקטיבית הממוצעת הכלל עולמית מחשיפה חיצונית לקרינה קוסמית נאמדת בכ- 0.4 מיליסיוורט לשנה (UNSCEAR, 2010). ראה בהמשך הסבר על מנת הקרינה האפקטיבית והיחידות בהן היא נמדדת).

ב. קרינת קרקע (terrestrial radiation) 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 הבנייה הספציפי וחומר הגלם ממנו הוא יוצר.

(מנת הקרינה הממוצעת הכלל עולמית מחשיפה חיצונית למקורות אלה מגיעה לכ- 0.5 מיליסיוורט לשנה, כאשר טווח הערכים הוא בין 0.3 ל- 1.0 מיליסיוורט לשנה (UNSCEAR, 2010), בהתאם לתכולת החומרים הרדיואקטיביים בקרקע ולסוג המבנה).

ג. הקרינה הפנימית (internal radiation) מתקבלת מהתפרקות של איזוטופים רדיואקטיביים הנמצאים בגוף האדם כתוצאה מחדירת חומרים רדיואקטיביים טבעיים 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, וכמו כן ^{226}Ra ו- ^{232}Th ותוצרי ההתפרקות שלהם החודרים בכמויות זעירות לגוף עם המזון ומי השתייה. (מנת הקרינה האפקטיבית הפנימית המתקבלת מאשלגן-40 ושאר הרדיואיזוטופים בגופנו היא כ- 0.3 מיליסיוורט לשנה (UNSCEAR, 2010). נוסף לכך אנו חשופים למנת קרינה אפקטיבית של כ- 1.3 מיליסיוורט לשנה כתוצאה מחשיפה פנימית עקב נשימת גז הרדון ובנותיו (UNSCEAR, 2010), ראה להלן).

ולסיכום - הקרינה הטבעית הכוללת לה חשופה אוכלוסיית כדור הארץ מסתכמת במנה אפקטיבית ממוצעת של כ- 2.4 מיליסיוורט לשנה.

בהתאם לתכולת החומרים הרדיואקטיביים בקרקע ולסוג הבנייה, תרומת הרדון יכולה להיות גבוהה יותר באופן משמעותי מהערך הממוצע שצוין לעיל. כך, באזורים ספציפיים על כדור הארץ מנת הקרינה האפקטיבית הכוללת מקרינת הקרקע הטבעי יכולה להגיע גם ל- 5 מיליסיוורט ואפילו ל- 8 מיליסיוורט לשנה.

לרשימת השאלות

19. האם החשיפה לקרינה טבעית בישראל גבוהה, שווה או נמוכה מהחשיפה לקרינה טבעית בארצות אחרות?

רמת הקרינה הטבעית בישראל נמוכה יחסית לרמה הממוצעת באירופה. מנת הקרינה האפקטיבית הממוצעת בארץ עומדת על 2 מיליסיוורט לשנה, כאשר טווח הערכים הוא 1.7-2.7 מיליסיוורט לשנה (כהנא, 2012).

לרשימת השאלות

20. האם הקרינה הטבעית נתונה תחת בקרה?

כן, אבל רק כאשר מדובר ברמות קרינה חריגות. באופן מעשי הבקרה מתבצעת בצורה עקיפה באמצעות תקנים ופיקוח על מוצרים מסוימים. הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה אטומית (סבא"א) קבעה הנחיות לבקרה על חשיפת טייסים וצוותי אוויר לקרינה קוסמית ועל יישומים מוגדרים של חומרי גלם עם ריכוזים חריגים של חומרים רדיואקטיביים ממקור טבעי. ההנחיות הוצגו בתקן הבינלאומי להגנה מקרינה ולבטיחות של מקורות קרינה שסוכנות זו פרסמה ב- 1996 (IAEA, 1996).

כדי לא לגרום להפרעה מיותרת בחיי הכלכלה ולסחר הבינלאומי הציע התקן הבינלאומי הני"ל לצמצם למינימום האפשרי את היקף הבקרה המנהלית והחוקית על חשיפת האוכלוסייה לקרינה מייננת ממקורות טבעיים ובפרט על חשיפתם לחומרי גלם עם ריכוזים נמוכים יחסית של חומרים רדיואקטיביים ממקור טבעי.

כאמצעי מנהלי ליישום אופטימאלי של הצמצום המוצע (בהיקף הבקרה) הציע התקן לפטור מדרישות רישום, רישוי ופיקוח חומרים ומוצרים בהם ריכוזי החומרים הרדיואקטיביים ממקור טבעי נמוכים מערכי סף שהוצגו בתקן. ערכים מעודכנים של ערכי הסף, הרלוונטיים גם ליישומי אפר פחם בתעשיית הבנייה פורסמו בשנת 2004 בטבלאות שהוצגו במדריך סבא"א RS-G-1.7 (IAEA, 2004). העקרונות וההנחיות שהוצגו במדריך סבא"א הנידון אושרו מחדש בתקן הבינלאומי המעודכן להגנה מקרינה שסבא"א פרסמה בשנת 2011 (IAEA, 2011). ההשלכות של הנחיות סבא"א והתקן הבינלאומי המעודכן על יישומי אפר פחם בתעשיית הבטון בישראל נידונות להלן.

[הסבר פרטני על מסמך RS-G-1.7 ועל מערכת המושגים של אי חלות (exclusion), פטור (exemption) ושחרור (clearance) המשמשים כאמצעי מנהלי ליישום מערכת הבקרה האופטימאלית מוצג במסמך "ההנחיות העדכניות של סבא"א להיקף הבקרה המינהלית על חומרים רדיואקטיביים ממקור טבעי (NORM), השלכות על הבקרה על אפר פחם ויישומי אפר פחם בישראל ועל ניצול האפר בתעשיית הבטון" (שלזינגר, 2012).]

לרשימת השאלות

21. מה ההשפעה של הנחיות אלו על יישומי אפר פחם בישראל?

ריכוזי האקטיביות המרביים של הרדיואיזוטופים באפר (ראה טבלה 4, שאלה 10 לעיל) נמוכים מריכוזי הסף שפורטו במדריך סבא"א (ריכוז אקטיביות של 10 בקרל לגרם עבור אשלגן-40 ושל 1 בקרל לגרם עבור כל רדיואיזוטופ בשרשרת הדעיכה של אורניום). על כן העיסוק באפר ויישומי האפר פטורים למעשה מדרישות בטיחות קרינה (רישום, רישוי ובקרה). יחד עם זה, היות ואפר הפחם בישראל מיושם כמרכיב בחומרי הגלם לבטון ומוצרי הבטון, וכיוון שעובדים ודיירים במבנים העשויים מאותם חומרים עלולים להיחשף למנות נמוכות של קרינה מייננת שמקורה באפר, נדרשת בקרה מנהלית מסוימת להבטחת הגבלה של האוכלוסייה לקרינה מייננת. לפי התקן הבינלאומי להגנה מקרינה בקרה כזו נדרשת גם כשהמקור עצמו (במקרה זה אפר פחם) פטור מדרישות רישום ורישוי. בהקשר למוצרי בטון בקרה זו מבוצעת בישראל באמצעות ת"י 5098 המגביל את ריכוזי הרדיואיזוטופים ממקור טבעי בתערובות הבטון. (ראה פירוט בנושא ת"י 5098 בשאלה 35 במסמך זה להלן).

לרשימת השאלות

22. מה זה מיליסיוורט ומה פירוש המושג "המנה האפקטיבית" שהוזכר בשאלה 18 לעיל?

ההשפעה הביולוגית של חשיפת גוף האדם לקרינה מייננת תלויה ראשית כל בכמות האנרגיה הנספגת ביחידת מסה של הרקמה. לכמות זו אנו קוראים מנת הקרינה הנבלעת או פשוט מנת הקרינה. ההשפעה הביולוגית תלויה בסוג הקרינה שנספגה מחד ובסוג הרקמה שנחשפה מאידך. הנזק הביולוגי לטווח ארוך של מנת קרינה נבלעת מסוימת מאלומת נויטרונים מהירים חמור בהרבה מהנזק של חשיפת אותה רקמה למנת קרינה זהה מקרינת גמא. כמו כן, אינה דומה השפעת חשיפת אצבע אחת למנת קרינה מסוימת להשפעה הנגרמת על ידי חשיפת מספר אברים או חשיפת הגוף כולו לאותה מנה. מנת הקרינה הנבלעת 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** ו**בקיזור Sv**) היא יחידת מדידה של מנת הקרינה "הביולוגית" הקרויה *מנה שקולה* (*equivalent dose*). 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 בכשלושה סדרי גודל. קרינת הרקע נמדדת במונחים של אלפיות הסיוורט לשנה. אלפית הסיוורט קרויה **מיליסיוורט** ומסומנת **mSv**. כשעוסקים בקצב המנה מקרינת הרקע הטבעי כמויות הקרינה מבוטאות לפעמים במונחים של מיליונית הסיוורט (יחידה הקרויה **מיקרוסיוורט** שסימנה μSv) לשעה. (יחידות המדידה של מנת הקרינה ומנת הקרינה השקולה קרויות בהתאמה על שם המדען הבריטי Louis H. Gray, מחלוצי מדע מדידת הקרינה, והמדען השוודי Rolf M. Sievert שהיה בין מייסדי הוועדה הבינלאומית להגנה רדיולוגית, בשנות העשרים של המאה הקודמת).

המנה האפקטיבית (*effective dose*) היא מנת הקרינה הכל-גופית שהייתה גורמת לאותו סיכון (הנזק הביולוגי הצפוי) הנגרם בפועל על ידי החשיפה של איבר בודד או חלק מהגוף בלבד למנה מסוימת של קרינה. משתמשים במנה האפקטיבית בעיקר כאשר מדובר בחשיפה 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 בלבד גורמת לאותו סיכון שהיה נגרם על ידי חשיפת הגוף כולו למנת קרינה של 12 מיליסיוורט ($100 \times 0.12 = 12$).

לרשימת השאלות

23. לעיל הוזכר הרדון כמקור קרינה טבעי. איך בעיית החומרים הרדיואקטיביים במוצרי בנייה קשורה לבעיית גז הרדון ומהי בעיה זו?

מבין שלושת הרדיואיזוטופים שהוזכרו לעיל רק הרדיום-226 (^{226}Ra) קשור לבעיית הרדון. הקשר נובע מכך שרדיום-226, הוא "האב" של רדון-222 (^{222}Ra) המכונה בקיצור רדון, והנוצר בתהליך ההתפרקות הרדיואקטיבית של רדיום-226. הרדון הוא גז אציל ולכן לא כולו נשאר במקום בו הוא נוצר בתוך הקרקע או מוצר הבנייה (המכיל את הרדיום-226). חלק מהגז שנוצר (עד כ- 5%) מחלחל מתוך הקרקע לאוויר החופשי שמעל הקרקע ו/או מהקרקע שמתחת למבנה (או ממוצר בנייה שבקירות המבנה) אל חלל המבנה. 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 הנינשם. 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 הסיכון לחלות בסרטן ריאות. על כן מוטלות הגבלות על ריכוזי הגז רדון במבני מגורים ובמבנים המשמשים לעבודה.

יצוין כי עיקר הרדון במבנים צמודי קרקע ובקומת הקרקע של מבני קומות מקורו בקרקע שמתחת למבנה ולא במוצר הבנייה ממנו המבנה עשוי.

לרשימת השאלות

24. מה קובע את רמת ריכוזי הרדון במבנה המשמש למגורים?

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, וביניהם ריכוז רדיום-226 בחומרי הגלם מהם עשויים קירות המבנה, תקרתו ורצפתו.

לרשימת השאלות

25. האם הרשויות בישראל מטילות הגבלות על ריכוזי הגז רדון במבני מגורים?

כן. תקנות התכנון והבנייה (חלק כ"ב: הגנת מבנים מפני גז רדון, תיקון משנת תשס"ט-2008) קובעות רמת פעולה של 200 בקרל למ"ק אוויר (ממוצע שנתי, בהנחת קצב תחלופת אוויר של 0.3 מ"ק בשעה) לריכוזי הגז רדון במבנים. עם זאת, ריכוזי גז הרדון המרבי המותר עפ"י תקנות אלו מחושב כפונקציה של קצב תחלופת האוויר (לשעה) בחדר ומשך זמן הבדיקה (מספר ימים). נוסף על מגבלת ריכוז הרדון באוויר, קיימות גם הנחיות ודרישות שמטרתן לספק הגנה מפני חדירת הרדון, מתכנון הבניין באופן שימנע הצטברות הרדון בתוכו, דרך ניטור הרדון באזורים בעלי פוטנציאל רדון גבוה (ריכוז רדיום בקרקע גבוה מ-50 בקרל לק"ג) ובאזורים בעלי פוטנציאל נמוך (ריכוז רדיום בקרקע נמוך מ-50 בקרל לק"ג) ועד התקנת מערכת לשאיבת הרדון מחוץ לבניין (באזורי פוטנציאל גבוה).

לרשימת השאלות

26. מה מתכוונים במונח רמת פעולה בהקשר לסיכוני הרדון?

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.

לרשימת השאלות

27. מהו הריכוז האופייני של רדון במבנים צמודי קרקע בישראל?

מדידות שנערכו באלפי בתים צמודי קרקע בישראל מצביעות על ריכוזי רדון ממוצעים של כ-40 Bq/m^3 .

לרשימת השאלות

28. איזה חלק מריכוז זה מקורו בחומרי הבנייה?

חלק הרדון שמקורו בחומרי בנייה בבתיים צמודי קרקע נמוך בדרך כלל מ- 10% מתרומת כלל מקורות הרדון שמחוץ למבנה (הקרקע והאוויר החופשי שבחוץ).

לרשימת השאלות

29. האם רמת הפעולה לביצוע פעולות להפחתת הרדון שנקבעה בישראל גבוהה או נמוכה מרמות הפעולה שנקבעו באירופה? בארה"ב?

רמת הפעולה שנקבעה בישראל דומה לרמה שנקבעה ברוב המדינות החברות באיחוד האירופי. חלק ממדינות אירופה מקלות יותר ונקבעו בהן רמות פעולה גבוהות יותר. רמת הפעולה בארה"ב נמוכה קצת יותר (בכ- 25%).

לרשימת השאלות

30. מהם הסיכונים הבריאותיים של חשיפה לקרינה מייננת ומהן ההגבלות שהוטלו על חשיפה כזו ברמה הבינלאומית?

חשיפת בני אדם לקרינה מייננת עלולה לגרום להם נזקים בריאותיים. למנות הקרינה הנמוכות בהן אנו עוסקים (מתחת ל- 0.1 סיוורט) אין השפעה מיידית, אך יש חשש להשפעות מאוחרות. בין ההשפעות האפשריות גרימת מחלות ממאירות העלולות להופיע כעבור שנים ספורות ועד עשרות שנים לאחר החשיפה. ההשפעות האלה הוכחו רק באוכלוסיות שנחשפו למנות בינוניות עד גבוהות של קרינה, מסדר גודל של מאות ועד אלפי מיליסיוורט, תוך זמן קצר (למשל האוכלוסייה שנחשפה לקרינה עקב הטלת הפצצות האטומיות בהירושימה ונגסאקי). יש הטוענים, אף כי אין לכך הוכחה אפידמיולוגית, כי להשפעות המאוחרות מסוג זה אין מנת סף תחתונה ויש סיכוי, הגם שהוא קטן מאד, שהן תופענה גם באוכלוסיות שנחשפו למנות קרינה נמוכות הרבה יותר (סדר גודל של עשרות מיליסיוורט לשנה) באופן כרוני, כלומר בחשיפה קבועה ומתמשכת לאורך שנים. 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 Commission on Radiological Protection). ועדה 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 בנייה) 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 בנייה כפי שנוסחו בתקן הישראלי ת"י 5098, הנידון להלן.

לרשימת השאלות

31. האם הרשויות מטילות הגבלות גם על החשיפה ממקורות קרינה אחרים ומהן ההגבלות?

הוועדה שהוזכרה לעיל המליצה להגביל את חשיפת העובדים והאוכלוסייה לקרינה מייננת. חשיפת עובדים לא תעלה לפי המלצות אלה על מנה אפקטיבית ממוצעת של 20 מיליסיוורט בשנה, מכל מקורות הקרינה התעסוקתית. את חשיפת בני אדם מן הציבור הכללי המליצה הוועדה

להגביל למנה אפקטיבית של 1 מיליסיוורט לשנה (מעל הרקע הטבעי) מכל המקורות הניתנים לבקרה. כאמור לעיל 0.3 מיליסיוורט מתוך התוספת המרבית הזו "הוקצו" לחומרי הבנייה.

לרשימת השאלות

32. בתשובה לשאלות קודמות הוזכר שיש אזורים גיאוגרפיים שונים בעולם שתושביהם חשופים לקרינת רקע גבוהה בהרבה מזו שבישראל. האם לעובדה זו השפעה על התחלואה בסרטן באזורים אלה?

לא ניתן לענות על שאלה זו 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, הבדלים שהסיבה להם יכולה להיות קשורה לגורמים שהוזכרו לעיל.

לרשימת השאלות

33. מהי תוספת מנת הקרינה האפקטיבית הצפויה לבני אדם שיגורו בבתים הבנויים מחומרי בנייה המכילים אפר פחם? מה גודלה של תוספת זו ביחס לקרינת הרקע הטבעי בישראל?

התוספת נאמדת ב- 0.03-0.09 מיליסיוורט לשנה (חקין, 2012) למוצרי בנייה עתירי אפר פחם העומדים בדרישות התקן הישראלי 5098 (ראה להלן). תוספת זו יש להשוות למנת הקרינה הנובעת מהרקע הטבעי בישראל הנאמדת כאמור בכ- 1.7-2.7 מיליסיוורט לשנה (כהנא, 2012).

לרשימת השאלות

34. ואיך זה משתווה עם מנת הקרינה שאנו סופגים בתהליכי אבחון וטיפול רפואי?

מנת הקרינה לאברי הגוף הנחשפים בתהליכי שיקוף וצילומי רנטגן, למשל, מגיעה למנה של 0.3-3 מיליסיוורט ויותר בהתאם לסוג הבדיקה. בסריקות סי.טי. (CT) סופג האזור הנחשף בגוף מנת קרינה של 40-80 מיליסיוורט לתהליך. יש להדגיש כי בבדיקות אלה נחשפים רק חלקי גוף ואברים בודדים. ההשוואה הנכונה היא למנה האפקטיבית (מושג שהוסבר לעיל). בחלק מתהליכי האבחון והטיפול הרפואי הנ"ל גם מנה זו גבוהה למדי. המנה האפקטיבית מגיעה לכ- 0.05-0.5 מיליסיוורט לתהליך שיקוף או צילום רנטגן קונבנציונלי בודד ולכ- 1-10 מיליסיוורט ויותר לתהליך בודד בסריקות סי.טי.

לרשימת השאלות

35. מהו תקן ישראלי ת.י. 5098?

ת"י 5098, שפורסם תחת הכותר "תכולת יסודות רדיואקטיביים טבעיים במוצרי בנייה", מטיל הגבלות על ריכוזי שלושה רדיואיזוטופים טבעיים (^{232}Th , ^{226}Ra ו- ^{40}K) במוצרי בנייה. מטרת התקן היא להבטיח כי חשיפת בני אדם שיגורו במבנים הבנויים ממוצרים אלה לא תעלה על הגבולות שנקבעו. יש להבהיר כי התקן אינו מתיימר להבחין בין רמה "בטוחה" לרמה "מסוכנת", אלא לאפשר בקרה מסודרת של הרשויות על ריכוז הרדיואיזוטופים ממקור טבעי במוצרי בנייה, מבלי לפגוע באפשרות להשתמש ברוב המוחלט של מוצרי הבנייה המיוצרים בישראל מחומרי גלם מקומיים.

לרשימת השאלות

36. אילו הגבלות הוטלו על ידי הרשויות בישראל על תוספת המנה הנגרמת על ידי חומרים רדיואקטיביים במוצרי בנייה?

תוספת מנת הקרינה מחומרים רדיואקטיביים במוצרי בנייה בישראל מוגבלת על ידי ת"י 5098 ל-0.3 מיליסיוורט בשנה לדייר השוהה 7,000 שעות בשנה (כ-80% מהזמן) במבנה שקירותיו, רצפתו ותקרתו עשויים ממוצר בנייה מסוים. תוספת המנה הנ"ל כוללת חשיפה לקרינה חיצונית ונשימת רדון ובנות רדון שמקורם במוצר הבנייה. מבחינה זו מחמיר התקן, כאמור לעיל בתשובה לשאלה 31 לעיל, בהשוואה למקובל בעולם.

לרשימת השאלות

37. כיצד מופעלת ההגבלה הזו באופן מעשי?

כל מוצר בנייה חייב לעמוד בדרישות תקן ישראלי ת"י 5098. הגבלת תוספת המנה ל-0.3 מיליסיוורט לשנה משמשת בסיס לחישוב אינדקסי ריכוז האקטיביות שהוצגו בתקן הנ"ל. אולם יש להבהיר כי החדר המשמש הנחת יסוד לתחשיב עשוי בכל 6 פאותיו מהמוצר הנבדק, בעוד החדר הנפוץ בנוי ממוצרי בנייה מגוונים – כבדים כדוגמת הבטון, המהווה בדרך כלל כ-75% ממסת המבנה, וקלים יותר, כדוגמת בלוק הבטון או בלוקי הבידוד.

לרשימת השאלות

38. על איזה בסיס נקבעה הגבלה זו?

על בסיס המלצות הוועדה הבינלאומית להגנה רדיולוגית משנת 1999 כמפורט בתשובה לשאלה 30 לעיל.

לרשימת השאלות

39. ביחס למה מודדים את תוספת המנה?

ביחס למנת הקרינה (רמת ייחוס) הצפויה לדיירי מבנה סטנדרטי (חדר שממדיו 3 מ' \times 3 מ' \times 2.7 מ') ללא קירות פנימיים הבנוי בכל שש פאותיו מחומרי בנייה בעלי תכולת יסודות רדיואקטיביים טבעיים שהיו אופייניים בישראל בסוף שנות התשעים של המאה הקודמת. בת"י 5098 נקבעו דרגות למנת הקרינה (במיליסיוורט לשנה) שביחס אליה מחשבים את תוספת המנה, על פי המסה המרחבית (ק"ג/מ"ק) של מוצר הבנייה ממנו עשוי החדר, כמפורט בטבלה שלהלן:

מנת ייחוס כוללת	מרדון	מקרינת גמא	מסה מרחבית
1.10	0.85	0.25	> 1500
0.55	0.35	0.20	1500 - 600
0.50	0.35	0.15	< 600

ההבחנה בין משפחות המוצרים על פי צפיפותם נובעת מהעובדה שישנו קשר ישר בין צפיפות המוצר וריכוז היסודות הרדיואקטיביים שבו – בשני מוצרים העשויים אותם חומרי גלם, ריכוז היסודות, ובהתאם גם רמת קרינת הגמא, יהיו גבוהים יותר במוצר הכבד יותר. מאידך גיסא היחס בין צפיפות המוצר ושפיעת הרדון ממנו (בריכוז רדיום נתון), בדרך כלל הפוך. זאת משום שגז הרדון מפעפע ומוצא דרכו מחוץ למוצר דרך חללים ותעלות זעירות, ששיעורן במוצרים צפופים נמוך יחסית. לפיכך, הואיל והתקן איננו קובע תכולה מרבית מוחלטת אלא מגביל את תוספת המנה בהשוואה למנת ייחוס נתונה והואיל ושתי המנות תלויות בצפיפות, בקרת התוספת באמצעות אינדקס הקרינה אף היא תלויה בה (ראה הסבר על אינדקס הקרינה בשאלה 42 להלן).

בהקשר זה יש לציין כי במדינות רבות בעולם, ובכלל זה בחלק גדול ממדינות אירופה, תוספת המנה מחושבת ביחס לקרינת הרקע הטבעי הכוללת. להבדל זה משמעות ניכרת במידת ההחמרה בדרישות התקן הישראלי בהשוואה להמלצות המקובלות בעולם (ראה להלן בשאלות 51 ו-52).

לרשימת השאלות

40. מה מנת הקרינה הנגרמת לדייר במבנה העשוי ממוצרי הבנייה הנפוצים בישראל?

מבדיקות תערובות בטון נפוצות בישראל (מסה מרחבית 2400 ~ ק"ג/מ"ק) שנעשתה ב-2009 עולה כי מנת הקרינה הכוללת נעה מ-0.41 ועד 0.98 מיליסיוורט לשנה.

לרשימת השאלות

41. האם בכל העולם מוטלות הגבלות על תוספת המנה הנגרמת לאוכלוסייה על ידי מוצרי בנייה?

ככל הידוע לנו עדיין לא. אולם הגבלות כאלה הוטלו לאחרונה במדינות אחדות באירופה. נציבות האיחוד האירופי (European Commission) פרסמה בשנת 1999 המלצות למדינות האיחוד ביחס להגבלות שיש להטיל על מנת הקרינה לאוכלוסייה ממוצרי בנייה (EC, 1999). לאחרונה (נובמבר 2012) עודכנו ההמלצות ובכוונת הנציבות לתת להן בקרוב תוקף של תקן מחייב במדינות הקהילה.

לרשימת השאלות

42. מהו אינדקס הקרינה המוזכר בתקן?

אינדקס הקרינה הוא ביטוי מתמטי המתאר את התרומה של כל אחד משלושת הרדיואיזוטופים הטבעיים (אשלגן-40, רדיום-226 ותוריום-232 ובנותיהם) למנת הקרינה הכוללת הצפויה לדיירי מבנה שקירותיו, רצפתו ותקרתו עשויים ממוצר הבנייה שעמידתו בתקן נבחנת.

אינדקס הקרינה שסומן באות I מוגדר כ:

$$I = C(^{40}\text{K})/A(^{40}\text{K}) + (1-e) \cdot C(^{226}\text{Ra})/A(^{226}\text{Ra}) + C(^{232}\text{Th})/A(^{232}\text{Th}) + e \cdot C(^{226}\text{Ra})/A(^{222}\text{Rn})$$
 בביטוי זה $C(^{40}\text{K})$, $C(^{226}\text{Ra})$ ו- $C(^{232}\text{Th})$ הם ריכוזי האקטיביות של אשלגן-40, רדיום-226 ותוריום-232 במוצר הבנייה, בהתאמה, ביחידות Bq/kg, $A(^{40}\text{K})$, $A(^{226}\text{Ra})$ ו- $A(^{232}\text{Th})$ הם ריכוזי האקטיביות הגבוליים של כל אחד משלושת הרדיואיזוטופים האלה (באותן יחידות) שלפי התקן ניתן לכלול במוצר, ו- e היא האמנציה של רדון-222 (ראה הסבר על האמנציה בתשובה לשאלה 43 להלן).

ריכוז האקטיביות הגבולי של רדיואיזוטופ מסוים מוגדר כך שבהימצאו במוצר בריכוז זה לבדו (כלומר ללא נוכחות החומרים הרדיואקטיביים האחרים במוצר) יגרום לדיירי מבנה הבנוי ממוצר זה מנת קרינה שנתית השווה למנה הגבולית ממוצרי בנייה שנקבעה לבני אדם מן הציבור. בתקן ת.י. 5098 מנה גבולית זו היא, כאמור, תלויה במסה המרחבית של מוצר הבנייה ונעה בין 0.8 ל-1.4 מיליסיוורט לשנה והיא מורכבת ממנת הייחוס של 0.5 ו-1.1 מיליסיוורט לשנה בהתאמה, ומתוספת מנה של 0.3 מיליסיוורט הנגרמת על ידי החומרים הר"א במוצר הבנייה.

להמחשת המובן של הביטוי המתמטי שלעיל נניח, למשל, שריכוז אקטיביות התוריום-232 במוצר בנייה מסוים בפועל (נניח לצורך הדוגמא: מוצר בעל מסה מרחבית גדולה מ-1,500 ק"ג/מ"ק) הוא 30 בקרל לק"ג $(C(^{232}\text{Th}) = 30 \text{ Bq/kg})$. אם הריכוז הגבולי של תוריום-232 שנקבע בתקן לאותו מוצר הוא, נניח, 290 בקרל לק"ג $(A(^{232}\text{Th}) = 290 \text{ Bq/kg})$, אזי היחס בין הריכוז בפועל לריכוז הגבולי הוא 0.1 $(C(^{232}\text{Th})/A(^{232}\text{Th}) = 30/290 = 0.1)$.

משמעות הדבר היא שתוריום-232 שבמוצר הספציפי הזה גורם לבדו למנת קרינה שנתית המגיעה לעשירית מ-1.4 מיליסיוורט (דהיינו 0.14 מיליסיוורט לשנה) לדיירי המבנה הבנוי ממוצר זה.

לרשימת השאלות

43. בתקן מדובר על האקסהלציה ועל האמנציה של רדון ממוצר הבנייה. מהם שני מושגים אלה?

רוב הרדון הנוצר בתוך מוצר הבנייה 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 הבנייה מחלחל החוצה. קצב שפיעת הרדון מיחידת שטח של מוצר הבנייה (או מיחידת שטח של הקיר הבנוי ממוצר הבנייה) מכונה **אקסהלציה (exhalation)**. האקסהלציה נמדדת ביחידות בקרל למטר מרובע לשנייה $(\text{Bq/m}^2 \cdot \text{s})$, או בקרל למטר מרובע לשעה $(\text{Bq/m}^2 \cdot \text{h})$.

בהקשר לחישובי מנת הקרינה שמקורה בחומרי בנייה, **האמנציה (emanation)** מוגדרת כחלק היחסי מהרדון הנוצר בתוך מוצר הבנייה המחלחל אל מחוץ למוצר. כשמדובר בקיר חיזוני של מבנה רק כמחצית מכמות זו תמצא את דרכה אל תוך המבנה והשאר ייפלט לאוויר שמחוץ למבנה. האמנציה מבוטאת לפעמים גם באחוזים. אם למשל האמנציה ממוצר בנייה מסוים היא 5%, אזי במונחי ת"י 5098 נכתוב $e = 0.05$. משמעות הדבר היא ש-95% מהרדון הנוצר במוצר

הבנייה נשאר כלוא בתוכו, דועך שם והבנות הרדיואקטיביות הנולדות מדעיכה זו והכלואות בתוך המוצר גורמות לקרינה חיצונית לדיירי המבנה.

לרשימת השאלות

44. ומה קובע את מידת האמנציה מהמוצר?

האמנציה נקבעת על ידי ממדי מוצר הבנייה ועל ידי הנקבוביות (porosity) של החומר המוצק ממנו עשוי המוצר. היא מושפעת גם על ידי תנאי הסביבה (טמפרטורה, לחות יחסית וכו'). להלן נידונה ההשפעה של הוספת אפר פחם למוצר הבנייה על מידת האמנציה ממנו.

לרשימת השאלות

45. מהם אחוזי האמנציה של הרדון ממוצרי בנייה המכילים אפר פחם בהשוואה לאותם מוצרים שאינם מכילים אפר פחם?

האמנציה ממוצרי בנייה (בלוקים, בטון וכו') המיוצרים בישראל והמכילים אפר פחם קטנה בדרך כלל פי 5 עד פי 10 מהאמנציה ממוצרים דומים (מרגליות וחובריו, 1998), כלומר בעלי צפיפות, מבנה וממדים גיאומטריים דומים שאינם מכילים אפר פחם (האמנציה היא גודל יחסי ולכן עקרונית היא אינה תלויה בריכוז האקטיביות של רדיום-226 במוצר, כל עוד הרדיום מהווה אחוז זניח מאוד מהמוצר). חיזוק לטענה זו התקבל בממצאי בדיקות מעבדה שבוצעו במסגרת מחקר לבחינת השפעת אפר פחם על שפיעת רדון מבטונים שהוכנו במעבדה ומבטונים בממ"דים (קובלר וחובריו, 2011). בדיקות הבטונים שהוכנו במעבדה בממ"ג-שורק הראו שריכוז הרדיונוקלידים, ובמיוחד ריכוז ה- ^{226}Ra וה- ^{232}Th בבטון שהכיל אפר היה כצפוי גבוה יותר מאשר בבטון ללא אפר, אולם האמנציה מהבטון ללא אפר היתה גבוהה יותר לעומת בטון עם 75 ו-150 ק"ג אפר למ"ק ב-7-25 אחוז ו-10-46 אחוז, בהתאמה. ממצאים דומים התקבלו בבדיקות בטונים שיוצקו במפעל: מקדם האמנציה בבטון ללא אפר היה גבוה ב-14-68 אחוז ועד 55% לעומת בטון עם אפר בבדיקות בממ"ג-שורק ובמעבדת NRG בהולנד, בהתאמה. יחד עם זאת, התופעה לא אובחנה באופן מובהק במדידות בממ"דים, כנראה בשל הבדלים בשיטת מדידת הרדון בין שתי המעבדות.

לרשימת השאלות

46. מה הסיבה להבדל זה?

מקור ההבדל הוא במבנה הגבישי של המוצר. במוצרי בנייה קונבנציונליים הרדיום נמצא בגרגרי המלט ובאגרגטים. החלק היחסי מהרדון הנוצר בגרגרים אלה והחופשי לנוע ולחלחל אל תוך החללים שבתוך מטריצת החומר המוצק של מוצר הבנייה ומשם אל מחוץ למוצר גבוה יחסית. אפר הפחם הוא תוצאה של שריפת פחם בטמפרטורה גבוהה של כ-1,500 מעלות צלסיוס. האפר הנוצר בדרך זו הוא חומר זגוגיתי הכולא בתוכו את אטומי רדיום-226 ואת רוב רובו של גז הרדון הנוצר בתהליך הדעיכה של אטומים אלה. האמנציה מהמוצר היא על כן נמוכה הרבה יותר. יתר על כן, כיוון שהאפר המרחף, שהינו אבקה דקיקה שגודל הגרגרים שלה נמדד במיקרונים, מחליף בבטון בעיקר את החול שגודל הגרגרים שלו נמדד במילימטרים, הוא גורם לציפוף הבטון ולהקטנת החללים המאפשרים תנועת גזים ולפיכך הוא גורם להקטנת הסיכוי שגז הרדון יחלחל אל מחוץ לקיר.

לרשימת השאלות

47. כלומר, האם ככל שאחוז אפר הפחם יגדל, יקטן אחוז האמנציה של הרדון מהמוצר?

זה כנראה נכון באופן כללי. ראה הערה לעיל בשאלה 45.

לרשימת השאלות

48. אם כן, כדאי אולי להוסיף יותר ויותר אפר פחם למוצר כדי להפחית את מנת הקרינה מרדון?

זה נכון רק לכאורה, כי הוספת אפר פחם תפחית אמנם את אחוז האמנציה, כלומר את החלק היחסי מסך כל הרדון שמחלחל החוצה מהמוצר. אך בו בזמן תוספת אפר הפחם תגדיל את ריכוז האקטיביות של רדיום-226 והרדיואיזוטופים האחרים במוצר ולכן גם את הקרינה החיצונית. תרומת הרדון למנה הכוללת מהמוצר לא עולה בדרך כלל על 15%-20%. לכן הגדלת כמות האפר במוצר עלולה להגדיל את מנת הקרינה החיצונית, ולהפחית רק חלק מתרומת הרדון. התוצאה במקרה כזה תהיה עלייה במנת הקרינה הכללית.

לרשימת השאלות

49. כיצד משתמשים בתקן ת"י 5098 ומה השלכותיו על תעשיית הבנייה בישראל?

התקן קובע כאמור כי אינדקס הקרינה I של כל דוגמא שתילקח ממוצר בנייה לא יהיה גדול מ-1. אינדקס הקרינה, שהוזכר כבר לעיל, מוגדר כ-:

$$I = C(^{40}\text{K})/A(^{40}\text{K}) + (1-e) \cdot C(^{226}\text{Ra})/A(^{226}\text{Ra}) + C(^{232}\text{Th})/A(^{232}\text{Th}) + e \cdot C(^{226}\text{Ra})/A(^{222}\text{Rn})$$

בתקן מוצגת טבלה של ערכי הריכוזים הגבוליים $A(^{40}\text{K})$, $A(^{226}\text{Ra})$ ו- $A(^{232}\text{Th})$ שעבורם מתקיים $I \leq 1$ למוצר בנייה ממנו בנוי חדר בעל מידות סטנדרטיות של 3 מ' × 3 מ' × 2.7 מ', ומקדם תיקון פתחים כללי של 0.94 המציין איזה חלק במעטפת החדר מלא, כלומר ללא פתחים (חלון ודלת), המהווים כ- 6% משטח המעטפת. הריכוזים הגבוליים $A(^{40}\text{K})$, $A(^{226}\text{Ra})$ ו- $A(^{232}\text{Th})$, חושבו בתלות בפרמטרים הבאים: עובי המוצר, צפיפות המוצר ומקדם האמנציה של הרדון מהמוצר, עבור הטווחים הבאים.

עובי מוצר: מדוד. במידה וגדול מ-0.2 מ' מניחים שהוא 0.2 מ'

מסה ליחידת שטח: 10-800 kg/m²

אמנציה: הערך המחושב מתוצאת המדידה. הנחות המחדל במקרה של הימנעות ממדידה – 0.06, 0.07, 0.12 למוצרים בעלי מסה מרחבית נמוכה, בינונית וגבוהה (כמוגדר בתשובה לשאלה 39) בהתאמה.

(נזכיר כאן כי פרמטרים אלה קובעים למעשה את קצב החשיפה לקרינה חיצונית ואת ריכוזי הרדון במבנה הנגרמים על ידי המוצר).

טבלה 5 להלן היא העתק של 2 שורות מהטבלה בתקן שהוזכרה לעיל, והיא מציגה את ערכי הריכוזים הגבוליים הממלאים את התנאי $I \leq 1$ עבור מוצרי בנייה שעוביים 0.2 מ' (20 ס"מ) ומסתם ליחידת שטח היא בטווח 450-500 ק"ג ל-מ².

טבלה 5. ערכי הריכוזים הגבוליים הממלאים את התנאי $I \leq 1$ עבור מוצרי בנייה שעוביים 0.2 מ' (20 ס"מ) ומסתם ליחידת שטח היא בטווח 500-450 ק"ג ל-מ².

A(²²⁶ Ra)	A(²²² Rn)	A(²³² Th)	A(⁴⁰ K)	מסה משטחית ממוצעת (ק"ג/מ"ר)
Bq/kg				
421	11.6	298	4150	450
407	10.4	287	3990	500

לרשימת השאלות

50. אילו בדיקות יש לעשות למוצר בנייה וכיצד נעזרים בטבלאות האלה לבחינת העמידה של מוצר בנייה בדרישות ת"י 5098?

נציג כאן שתי דוגמאות שבחינתן אפשרית באמצעות הטבלה שהוצגה לעיל.

דוגמא א. נניח שאנו מעוניינים לבחון עמידת בלוקי בטון המכילים 6% אפר פחם בדרישות התקן.

נתוני מוצר הבנייה הספציפי הזה הם:

- ממדים: עובי 20 ס"מ, רוחב 40 ס"מ, גובה 10 ס"מ
- צפיפות: 2,250 ק"ג למ"ק
- מסה ליחידת שטח: 450 ק"ג למ"ר
- אמנציה: 13% (כפי שנמדד במעבדה)
- ריכוזי שלושת הרדיואיזוטופים (כפי שנמדדו במעבדה):
 $^{40}\text{K} - 110 \text{ Bq/kg}$, $^{226}\text{Ra} - 37 \text{ Bq/kg}$, $^{232}\text{Th} - 15 \text{ Bq/kg}$

לפי השורה האחרונה שבטבלה שהוצגה לעיל, והלקוחה מתוך ת"י 5098, אמת המידה לעמידה בדרישות התקן של מוצר בנייה שעוביו 20 ס"מ, מסתו ליחידת שטח 500 ק"ג ל-מ³ וערך האמנציה שלו 13%, היא קיום אי השוויון:

$$C(^{40}\text{K})/3990 + (1-0.13) \times C(^{226}\text{Ra})/407 + C(^{232}\text{Th})/287 + 0.13 \times C(^{226}\text{Ra})/10.4 \leq 1$$

הצבת ערכי $C(^{40}\text{K})$, $C(^{226}\text{Ra})$ ו- $C(^{232}\text{Th})$ כפי שנמדדו בבטון באגף שמאל של אי השוויון נותנת:

$$110 / 3990 + 32.2 / 407 + 15 / 287 + 4.8 / 407 = 0.596$$

כיוון שהתוצאה קטנה מ- 1.0 הבטון הספציפי הזה עומד בדרישות התקן.

התוצאה של החישוב הזה מצביעה עוד על כך שמנת הקרינה לבני אדם שיגורו במבנה בעל קירות, רצפה ותקרה העשויים מהבטון עם האפיונים שהוצגו לעיל, צפויה להגיע לכ- 0.83 (0.596×1.4) מיליסיורט לשנה, כתוצאה מהחומרים הר"א הטבעיים שבבטון.

דוגמא ב. מעוניינים לבחון עמידת בלוקי בנייה תרמיים המכילים 60% אפר פחם בדרישות התקן.

נתוני מוצר הבנייה הספציפי הזה הם:

- עובי המוצר: 20 ס"מ

- צפיפות (צפיפות אפקטיבית בהתחשב בחללים שבבלוק) : 800 ק"ג למ"ק
- מסה ליחידת שטח : 160 ק"ג למ"ר ($800 \text{ kg/m}^3 \times 0.2 \text{ m}$)
- אמנציה : 1.2 % (כפי שנמדד במעבדה)
- ריכוזי שלושת הרדיואיזוטופים (כפי שנמדדו במעבדה) :
 $^{40}\text{K} - 205 \text{ Bq/m}^3$, $^{226}\text{Ra} - 105 \text{ Bq/m}^3$, $^{232}\text{Th} - 98 \text{ Bq/m}^3$

לפי טבלת הריכוזים הגבוליים בת"י 5098 שהוצגה לעיל, המסה המשטחית הנ"ל נמצאת כערך ביניים בין הערכים המוצגים בטבלה. לאחר אינטרפולציה ליניארית בין ערכים סמוכים אמת המידה לעמידה בדרישות התקן של מוצר בנייה שעוביו 20 ס"מ, צפיפותו 800 ק"ג למ³ וערך האמנציה שלו 1%, היא קיום אי השוויון:

$$C(^{40}\text{K})/8063 + (1-0.012) \times C(^{226}\text{Ra})/773 + C(^{232}\text{Th})/555 + 0.012 \times C(^{226}\text{Ra})/33 \leq 0.6$$

הצבת ערכי $C(^{40}\text{K})$, $C(^{226}\text{Ra})$ ו- $C(^{232}\text{Th})$ כפי שנמדדו בבלוק התרמי באגף שמאל של אי השוויון נותנת:

$$205 / 8063 + 103.74 / 210 + 98 / 205 + 1.26 / 33 = 0.374$$

לכן, בלוק תרמי כזה עומד גם כן בדרישות התקן.

לרשימת השאלות

51. האם ההגבלות שנקבעו בארצות אחרות דומות, מחמירות או מקלות ביחס להגבלות שהוטלו בישראל?

השוואת ת.י. 5098 לתקנים האירופיים מראה כי התקן הישראלי מחמיר במידה ניכרת לעומת התקנים האירופיים. ההחמרה באה לידי ביטוי בשתי דרכים:

1. תוספת מנת הקרינה השנתית המרבית המותרת (המכונה בעגה המקצועית **חסם מנה, dose constraint) ממוצר הבנייה מעל לרמת הייחוס (reference level), הוגבלה בתקן הישראלי ל- 0.3 מיליסיוורט לאדם לשנה, שזהו הערך התחתון (המחמיר) בטווח 0.3-1 מיליסיוורט לשנה שנקבע בהמלצות ICRP (2000). גם התקן הדני מבוסס על חסם מנה של 0.3 מיליסיוורט לשנה ממוצרי בנייה ונחשב יחד עם ת.י. 5098 כמחמיר ביותר. עם זאת, הדרישות בדנמרק קלות יותר מאשר בישראל, שכן בדנמרק מוצרי בנייה התורמים פחות מ- 0.3 מיליסיוורט מעל מנת הרקע וסוגים רבים של מוצרי בנייה העשויים מחומרי גלם מקומיים, כבטונים עם אגרגט טבעי, פטורים מבקרה ללא התייחסות לרדון שמקורו במוצר הבנייה (קובלר וחובריו, 2011);**

2. תוספת המנה כוללת בישראל, בנוסף לקרינת הגמא (שמקורה, כאמור, בתכולת כלל היסודות הרדיואקטיביים בחומר), גם את תרומת שפיעת הרדון (שמקורו ברדיום-226 שבמוצר הבנייה) לתוך חדר המגורים, בעוד בתקנים אחרים בעולם אין התייחסות לרדון. דוגמאות לכך הוא התקן הדני שציין לעיל והתקנים בווייטנאם ופינלנד המבוססים על חסם מנה של 1 מיליסיוורט מקרינת גמא ממוצרי הבנייה לשנה, למעט מדינה אחת- אוסטרליה, שם חסם המנה כולל רדון. יחד עם זאת חסם המנה בתקן האוסטרלי גבוה יותר (1 מיליסיוורט לעומת 0.3 מיליסיוורט בתקן הישראלי) ולכן תקן זה מחמיר פחות (קובלר וחובריו, 2011).

נראה ש"צוואר הבקבוק" בהגבלות על שימוש באפר פחם כמרכיב במוצרי בנייה עתירי אפר פחם לפי ת.י. 5098 הוא ריכוז ^{226}Ra באפר הפחם בגלל החשיפה הצפויה לרדון הנפלט מהמוצר. ההגבלות על השימוש באפר פחם חמורות יותר ככל שאחוז האמנציה של הרדון מהמוצר גבוה יותר. ההגבלות שוועדות מומחים של נציבות האיחוד האירופי הציעו להטיל על ריכוזי חומרים ר"א במוצרי בנייה בארצות האיחוד האירופי מתייחסות רק לקרינת הגמא. נושא הרדון מטופל בארצות אלה בנפרד בדרך של הטלת הגבלות על ריכוזו במבנים. לדעת הרשויות בארצות אלה, קשה לטפל בתוספת השולית של הרדון שמקורו בחומר הבנייה בנפרד מהטיפול הכללי ברדון שמקורו העיקרי בקרקע.

לרשימת השאלות

52. מה עוד שונה בהמלצות האלה?

באירופה משתמשים במנת ייחוס של כ- 0.5 מיליסיוורט לשנה (קצב מנה של 0.07 מיקרוסיוורט לשעה במשך 7,000 שעות בשנה), המשקפת התייחסות לכלל גורמי הקרינה ממקורות טבעיים ואינה מצטמצמת למוצר ייחוס נבחר. התייחסות שונה זו נובעת ככל הנראה מהעובדה שבארצות אלה קצב החשיפה לקרינה טבעית גבוה יותר. כמו כן, נלקחת בחשבון העובדה שהמבנה מנחית במידה רבה את רמת הקרינה ביחס לרקע בחוץ. לכן, לעומת מנה מרבית כוללת של 1.4 מיליסיוורט לשנה לפי התקן הישראלי (מנת ייחוס כוללת מרדון וקרינת גמא ותוספת הגבלת מנה ממוצרי בנייה. ראה שאלה 36), מדובר באירופה על מנה מרבית כוללת שבין 0.8 ל- 1.5 מיליסיוורט לשנה.

לרשימת השאלות

53. האם אינדקס הקרינה יכול לשמש מדד לרמת הסיכון מקרינה הנפלטת ממוצר בנייה?

באופן כללי כן, אבל ראה תשובה לשאלה מס' 54 להלן.

לרשימת השאלות

54. למה נקבע אינדקס קרינה בכלל ולמה הוא נקבע לפי הערכים הכמותיים הספציפיים שבתקן ת.י. 5098?

כמוסבר לעיל אינדקס הקרינה של מוצר בנייה יכול להוות מדד כמותי למנת הקרינה הצפויה לדיירי מבנים שייבנו ממוצר זה. באמצעות האינדקס ניתן להשוות מוצרים זה לזה. האינדקס יכול לשמש, והוא אכן משמש, פרמטר כמותי המאפשר לבחון האם מוצר בנייה עומד בהגבלות שהרשויות מטילות על מנת הקרינה שמקורה במוצרי בנייה ושניתן לחשוף לה בני אדם מן האוכלוסייה.

לרשימת השאלות

55. האם מוצר בנייה שאינדקס הקרינה שלו נמוך יותר הוא "בריא" יותר?

באופן כללי לא בהכרח. לא ברור כלל מה זה מוצר "בריא". מההיבט של סיכוני הקרינה נראה התשובה היא כן. אולם מנת הקרינה הצפויה מן המוצר היא רק אחד מן הפרמטרים הקובעים את

"בריאות" המוצר. האם מוצר שגורם למנת קרינה נמוכה קצת יותר אך מבודד פחות בחורף הקר הוא בריא יותר?

יתר על כן, לא ברור כלל אם הפחתה של קרינת הרקע לרמות הקרובות לאפס היא "בריאה". יש טענה שגוף האדם מנצל לטובה את חשיפתו לקרינה מייננת במנות נמוכות ובקצבי מנה נמוכים כדי לחסן את הגוף מפני חשיפה לקרינה מייננת במנות גבוהות יותר. תופעה זו קרויה "הורמזיס" על ידי קרינה (radiation hormesis) והיא נחקרת בשני העשורים האחרונים.

לרשימת השאלות

56. האם התקן חל על חומרי גלם לבנייה?

לא. בפרק א' של התקן נאמר במפורש כי התקן אינו חל על חומרי גלם לבנייה. הסיבה העיקרית לכך שהתקן חל על מוצרי בנייה אך אינו חל על חומרי גלם לבנייה היא העדר האפשרות לפקח על ביצוע תקן שיחול על חומרי גלם. אי המעשיות נובעת מהעובדה שרוב חומרי הגלם לבנייה יכולים לשמש גם לצרכים אחרים. כמו כן, החלק היחסי של חומר גלם ספציפי במוצר בנייה אינו ידוע ואינו קבוע. גם לא ידוע לאיזה מוצר ישמש חומר הגלם. למשל חומר גלם העשוי לגרום למנת קרינה גבוהה אם ישתמשו בו לבניית קירות בעובי של 40 ס"מ יגרום למנת קרינה הרבה יותר נמוכה אם ישתמשו בו לייצור לוחות ציפוי בעובי של 2 ס"מ בלבד.

לרשימת השאלות

57. האם התקן חל על מרצפות קרמיקה ועל ציפויי שיש וקרמיקה על קירות (במטבחים, בחדרי אמבטיה וכו')?

כן, מאחר ומוצרים אלו נחשבים למוצר בנייה (המיועד לחיפוי) העשוי חומר מינרלי שכולל בין היתר גם שיש וקרמיקה.

לרשימת השאלות

58. היכן ניתן לקבל הסברים והבהרות לתקן?

ניתן לקבל הבהרות אצל קבוצת בעלי מקצוע בשטח בטיחות קרינה, המרכז למחקר גרעיני נחל שורק, דואר יבנה - 81800, טל - 9434364 - 08, פקס - 9434696 - 08.

לרשימת השאלות

59. האם יש להעדיף מוצר העומד בתקן שאינדקס הקרינה שלו נמוך ביחס למוצר אחר שאף הוא עומד בתקן?

לא, אלא אם המוצר שאינדקס הקרינה שלו נמוך יותר עדיף בהתחשב במכלול תכונותיו (חוזק, בידוד תרמי, מחיר, קלות הטיפול בו, זמינות בעתיד, האחריות הניתנת מצד היצרן, תנאי הובלה וכו').

בדרך כלל מוצר העומד בתקן הוא כשר וטוב לשימוש. התשובה לשאלת העמידה בתקן היא כן או לא (לא מוכר סולם של עמידה בתקן, כלומר "עמידה יותר טובה" או "עמידה פחות טובה" בתקן).

לרשימת השאלות

60. מהם יישומי אפר פחם בחקלאות ובגינות והאם הם עלולים לגרום לחשיפה לקרינה?

אפר פחם תחתית הוא בעל תכונות מבנה ומרקם המכשירות אותו לשמש כמרכיב של מצעים לגידול צמחים בחקלאות ובגינות. השימושים האפשריים הם: מצע גידול במכלים ודליים בחממות ובעציצים במשתלות, כתחליף לטוף. האפר יכול לשמש גם כחומר מילוי בתשתית למדשאות במגרשי ספורט וגנים ציבוריים וכחומר ריפוד לבעלי חיים: רפתות, אורוות ומכלאות צאן ובקר ולולים. אפר מרחף משמש אף הוא לחקלאות. האפר (יחד עם סיד כבוי) מוסף לבוצת שפכים עירונית במתקן N-Viro (במס"א- בוצה מיוצבת בסיד ואפר פחם מרחף) למטרת ייצוב הבוצה בטרם שליחתה לפיזור בשדות חקלאיים. תרומת האפר לחקלאות ביישום זה הינה גם ישירה הואיל והאפר מהווה מקור למיקרו- ומקרו-נוטריינטים לצמח.

בממ"ג שורק נעשו הערכות שהצביעו על כך שתוספת מנת הקרינה לעובדים ולבני אדם מהציבור הכרוכה ביישומי אפר תחתית אלה צפויה להיות קטנה מ- 40 מיקרוסיורט לשנה, דהיינו תוספת של כ- 2% על קרינת הרקע הטבעי (ראה פרטים על הרקע הטבעי בשאלות 18, 19 ו- 22 לעיל). תוספת זו היא מסדר הגודל שכונה ע"י הוועדה הבינלאומית להגנה רדיולוגית מנה זניחה (trivial), הפטורה מפיקוח ובקרה. תוספת מנת הקרינה המתקבלת מהוספת אפר מרחף לקרקע באמצעות במס"א נמצאה אף נמוכה יותר, כ- 2.2 מיקרוסיורט לשנה, המוגדרת כאמור לעיל מנה זניחה. מנה זו חושבה בהנחות מחמירות על שיעור יישום הבוצה (5 טון/דונם) והאפר (2 טון/דונם) בקרקע ובחירת ריכוזי רדיונוקלידים מרביים באפר.

בבדיקות צמחים אכילים שגודלו על מצע המכיל אפר פחם תחתית לא נמצאה תוספת מובהקת לריכוז הרדיונוקלידים הטבעיים בתוצרת החקלאית לעומת תוצרת דומה שגדלה על מצע טוף. מסקנה דומה עולה מבדיקות חלב ורקמות של פרות שרצו על מצע אפר תחתית בהשוואה למצע רגיל. הריכוזים שנמדדו היו מתחת לגבול המדידה ובכל מקרה נמוכים מהסף המותר עפ"י משרד הבריאות (10 בקרל/ק"ג). תוספת המנה האקוויולנטית לאוכלוסייה הניזונה רק מגידולים כאלה בהנחות קיצוניות היא מסדר הגודל של המנה הטרוויאלית על פי ההנחות הבינלאומיות. בבדיקות תוצרת חקלאית של גידולים בקרקע מתוספת בבמס"א לא נמצאה תוספת לריכוז הרדיונוקלידים בהשוואה לגידולים על קרקע ביקורת. בהיבט הסביבתי של יישום במס"א באשר להשפעה על מי תהום, ריכוזי כל הרדיונוקלידים בתשטיפים מן האפר בעל הריכוזים הגבוהים ביותר נמצאו נמוכים מתקן מי שתייה בסדרי גודל אחדים.

ניתן לסכם שהשפעת אפר פחם המיושם בחקלאות על החשיפה לקרינה מייננת של העובדים והציבור זניחה ונמוכה באופן ניכר מהמגבלות הסביבתיות והבריאותיות.

לרשימת השאלות

61. מהם יישומי אפר פחם בסלילת דרכים ובתשתיות למבנים והאם הם עלולים לגרום לחשיפה לקרינה?

אפר הפחם משמש כחומר מילוי מבני בכבישים ובתשתיות שונות, לרבות תשתיות לבנייני מגורים. מסקירת ספרות מקצועית בינלאומית על תנאים סביבתיים ותקנים לשימוש באפר פחם בתשתיות, אשר נערכה ע"י קמ"ג (הקריה למחקר גרעיני), עולה כי לא קיימת בעיה רדיולוגית משמעותית משימוש באפר פחם בתשתיות. כמו כן, לא נמצא כי קיימת בעיה סביבתית

משמעותית עקב חדירת מתכות כבדות וחומרים ר"א למי התהום או לשרשרת המזון כתוצאה משימוש באפר פחם בתשתיות. בדיקות שנערכו ע"י האגף לקרינה במשרד לאיכות הסביבה העלו כי כיסוי סוללות אפר הפחם אשר מהוות תשתית לכבישים וחומר מילוי, ע"י שכבת אדמה או אספלט/בטון, מנחית את החשיפה לאוכלוסייה לערכי הרקע הטבעי.

שימוש באפר פחם כהכנת תשתית לבנייה של מבני מגורים בוצע לאחרונה בדרום הארץ לפי הנתונים שלהלן: מילוי של שקע בקרקע בעל שטח של כ- 15 דונם בשכבת אפר פחם תחתית בעובי של כ- 4.5 מטר והוספה של שכבת קרקע רגילה בעובי של כ- 1.5 מטר מעל שכבת אפר הפחם (מטרת שכבת הקרקע להנחית את מרבית תוספת הקרינה הנגרמת על ידי אפר הפחם). הערכה מדוקדקת שבוצעה לחישוב תוספת מנת הקרינה הצפויה לדיירי מבנים שייבנו על תשתית זו קבעה כי תוספת זו תהיה זניחה לחלוטין (אפילו לפי חישובים מחמירים) ותעמוד על כ- 1 מיקרוסיורט לשנה בלבד.

לרשימת השאלות

אסמכתאות ומקורות נוספים לעיון

אתר מנהלת אפר הפחם <http://ww.coal-ash.co.il>

גרוף, י. ושלינגר, ט., 2003. חישובי מנת קרינה לדיירי מבנים (כתוצאה מהימצאות חומרים רדיואקטיביים במוצרי הבנייה מהם עשוי המבנה).

הראובני, ר., שלינגר, ט. ומרגליות, מ., 1996. ההשלכות הרדיוולוגיות של השימוש באפר פחם כמרכיב של חומרי בנייה, דו"ח ממ"ג 2681, יוני 1996.

הראובני, ר., שלינגר, ט. ומרגליות, ט., 1997. הגבלות על תכולת חומרים ר"א במוצרי בנייה - הצעה לתקן ישראלי משופר. דו"ח ממ"ג 2682, פברואר 1997.

חקין, ג., רימר, ט., מרגליות, מ. ושמאי, י., 2000. בדיקות קרינה רדיואקטיבית בבלוקי בטון אופייניים בישראל (ממצאי מדידות קצב פליטת רדון וריכוז רדיונוקלידים בבלוק "אפור" בישראל. דו"ח שב"ק ממ"ג שורק, תמוז התש"ס, יולי 2000 (הוכן בהזמנת מנהלת אפר פחם).

חקין, ג., רימר, ט., מרגליות, מ. ושמאי, י., 2005. רדיואקטיביות טבעית בחומרי גלם לבנייה ממחצבות בישראל.

חקין, ג., 2012. מצגות במושב קרינה, סדנת היבטים סביבתיים של מנהלת אפר הפחם, דצמבר 2012. http://www.coal-ash.co.il/english/news_work_prog_2012.html

כהנא, ל., 2012. הערכת החשיפה של הציבור בישראל לקרינה מייננת ממקורות טבעיים. עבודה לקבלת תואר מגיסטר בהנדסה, אוניברסיטת בן גוריון בנגב. ממ"ג-שורק, פברואר 2012.

מכון התקנים, 2002. תקן ישראלי- ת"י 5098, תכולת חומרים רדיואקטיביים במוצרי בנייה, מכון התקנים הישראלי, כסלו התשס"ג, נובמבר 2002.

מנהלת אפר פחם, 2001. מכתב ממנהל מנהלת אפר פחם אל טוביה שלינגר, מיום 12.08.01.

מנהלת אפר פחם, 2013. סקר קרינה מתערובות בטון עם מקורות אפר שונים.

מרגליות, מ., שלינגר, ט. ושמאי, י., 1990. הגבלות על תכולת חומרים ר"א בחומרי בנייה ובמרכיביהם, הצעה לתקן ישראלי, מב"ק שורק, נובמבר 1990.

מרגליות, מ., אבן, ע., חקין, ג. ושמש, ש., 1998. אפר פחם – ההיבטים הרדיולוגיים של יישומו כתוסף לבטון (ממצאי מדידות במבנים מועשרי אפר פחם), דו"ח שב"ק 3/98, ממ"ג שורק, סיוון התשנ"ח, יוני 1998 (הוכן בהזמנת מנהלת אפר פחם).

קובלר, ק., 1999. ריכוז רדיונוקלידים ושקול הרדיום (Bq/kg) בחומרי בנייה ובמרכיביהם. המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון, ינואר 1999.

קובלר, ק., בקר, ר. וחקין, ג., 2011. שפיעת רדון מבטונים המכילים אפר פחם. דו"ח 201212, המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון, דו"ח שב"ק 4264, ממ"ג שורק.

http://www.coal-ash.co.il/research/Kovler_Haquin_Becker_2011_full.pdf

קוד, ז', 2002. הערכת החשיפה לקרינה מייננת עקב שימושים באפר פחם בחקלאות וגינות. דו"ח שב"ק ממ"ג שורק, פברואר 2002 (הוכן בהזמנת מנהלת אפר פחם).

http://www.coal-ash.co.il/research/Jan_Koch_2002_full.pdf

קוד, ז', 2010. הערכה של ההשלכות הרדיולוגיות של הוספת בוצה המכילה אפר פחם מרחף לקרקע. דו"ח שב"ק ממ"ג שורק, ינואר 2010 (הוכן בהזמנת מנהלת אפר פחם).

http://www.coal-ash.co.il/docs/Koch_RadiationExposeFromFASB_Appendix-6.pdf

שלינגר, ט., 2000. הבקרה על ריכוזי חומרים ר"א טבעיים במוצרי בנייה, באפר פחם ובפחם המיובא לישראל לשם צריכתו בתחנות כוח לייצור חשמל-היבטי בטיחות קרינה. היבטים טכניים ושיקולים חוקיים, כלכליים וציבוריים הנובעים מניצול אפר הפחם כחומר גלם במוצרי בנייה. חוות דעת בהוצאת המחבר, אלול התשס"ב, אוגוסט 2002.

שלינגר, ט., 2008. היבטים רדיולוגיים ומנהליים של העיסוק באפר פחם. חוות דעת, יולי 2008 (הוכנה בהזמנת מנהלת אפר פחם).

http://www.coal-ash.co.il/docs/RadiologicAspectsCoaAsh_Schles_Nov2008.pdf

שלינגר, ט., 2012. ההנחיות העדכניות של סבא"א להיקף הבקרה המינהלית על חומרים רדיואקטיביים ממקור טבעי. השלכות על הבקרה על אפר פחם ויישומי אפר פחם בישראל ועל ניצול האפר בתעשיית הבטון בפרט. בהוצאת מנהלת אפר פחם, יולי 2012.

http://www.coal-ash.co.il/research/IAEA-RadiologicSafeStand_Schles_July2012.pdf

תקנות התכנון והבניה (בקשה להיתר, תנאיו ואגרות) (תיקון) התשס"ט-2008.

https://www.osh.org.il/uploadfiles/takanot_radon_6716.pdf

EC, 1996. Council Directive 96/29/Euratom. Official Journal of the European Communities, Vol. 39, No. L 159, 29 June 1996. In: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L:1996:159:FULL&from=EN>

EC, 1997a. Recommendations for the Implementation of Title VII of the European Basic Safety Standards Directive (BSS) concerning significant increase in exposure due to natural radiation sources. Radiation Protection 88. In: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/088_en.pdf

EC, 1997b. Enhanced radioactivity of building materials. Radiation Protection 96. In:

http://www.google.co.il/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CBwQFjAA&url=http%3A%2F%2Fbookshop.europa.eu%2Fen%2Fenhanced-radioactivity-of-building-materials-pbCR2099446%2Fdownloads%2FCR-20-99-446-EN-C%2FCR2099446ENC_001.pdf%3Bpgid%3Dy8dIS7GUWMdSR0EAIMEUUsWb000NoaUgfEB%3Bsid%3DwZBtbjA0oD9tUmEjupfzyVIRjPNzHH1X3-I%3D%3FfileName%3DCR2099446ENC_001.pdf%26SKU%3DCR2099446ENC_PDF%26CatalogueNumber%3DCR-20-99-446-EN-C&ei=zPDEU4S4N8TG7AaXvoHADA&usg=AFQjCNEW1mtBUOF5bBYutRsrHDjEYzRBhQ&sig2=aaP71k5WL7NPaRq30aWmjQ&bvm=bv.70810081,d.ZGU

EC, 1999. Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials, Radiation Protection 112. In:

<https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/112.pdf>

Haquin, G., Dukhan, R. and Kloppfer, J., 2002. In Situ Gamma Spectroscopy Measurements of Environmental Radioactivity in Israel. Proceedings of the 21st Conference of the Nuclear Societies in Israel, May 22-23, 2002, Haifa, Israel.

Haquin, G., Koch, J. and Yungrais, Z., 2014. Radiation exposure from radionuclides of natural origin in agricultural uses of coal ash. NCAB International Workshop on Agricultural Coal Ash Uses, May 27th, 2014, Israel. http://coal-ash.co.il/sadna14/Haquin_RadExposure.pdf

IAEA, 1996. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, IAEA Safety Series 115, 1996. In: http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/@ed_protect/@protrav/@safework/documents/publication/wcms_152685.pdf

IAEA, 2004. Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance. Safety Guide No. RS-G-1.7. In: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1202_web.pdf

IAEA, 2014. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, General Safety Requirements Part 3, No. GSR Part 3. In: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/p1531interim_web.pdf

ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Annals of the ICRP 21 (1-3), Pergamon Press.

ICRP, 1999. Protection of the Public in Situations of Prolonged Radiation Exposure. ICRP Publication 82, Annals of the ICRP 29 (1-2), Pergamon Press.

ICRP, 2007. Scope of Radiological Protection Control Measures. ICRP Publication 104, Annals of the ICRP 37 (5), Elsevier.

Metzger, A., 1994. Aspects of Coal Ash Utilization in Building Materials. Report ECD-94-23, Environmental Unit, Israel Electric Corporation Ltd.

NCRP, 1987. Exposure of the Population in the United States and Canada from Natural Background Radiation, NCRP Rep. 94.

Neeman, E. and Steiner, V., 2000. Radionuclide Activity in Cement from Neshor Factory, Internal report, Ministry of the Environment, 7 July 2000.

OECD, 1979. Exposure to Radiation from the Natural Radioactivity in Building materials. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), Paris 1979.

<https://www.oecd-nea.org/rp/reports/1979/exposure-to-radiation-1979.pdf>

Schlesinger, T., 2001. Radiation Safety and Legal Aspects of Handling Coal Ash Produced in Israel Electric Corporation Power Stations – A statement of opinion, October 2001.

UNSCEAR, 1988. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly. In: http://www.unscear.org/docs/reports/1988/1988a_unscear.pdf

נספח א - שלושת העקרונות הבסיסיים של הגנת העובדים והציבור מקרינה מייננת, לפי המלצות הוועדה הבינלאומית להגנה רדיולוגית (ICRP)

המלצות ה-ICRP להגנת העובדים והציבור מקרינה מייננת משנת 2007, כמו קודמותיהן משנת 1991, מושתתות על שלושה עקרונות יסוד - הצדקה (justification), אופטימיזציה (optimization of radiation protection) והגבלת מנת הקרינה לפרט (individual dose limits). עקרונות אלה ניתן לסכם בקצרה כדלהלן:

א. הצדקה

עיקרון זה מתייחס לאמות המידה שישמשו בסיס להחלטת הרשויות להתיר שימוש בטכניקה או עיסוק ספציפיים הכרוכים בחשיפת בני אדם (עובדים או הציבור הרחב) לקרינה מייננת. אמות המידה לבחינת ההצדקה נקבעות לפי שיקולי סיכון תועלת, כאשר הכלל הוא שאין להתיר עיסוק שאין בו תועלת נטו לפרט ו/או לציבור.

ב. אופטימיזציה

העיקרון השני הוא עיקרון האופטימיזציה האומר כי העיסוק שניתן לו אישור יבוצע תוך מאמץ להפחית את החשיפה ככל הניתן (ALARA - As Low as Reasonably Achievable), תוך לקיחה בחשבון של הגורמים הכלכליים והחברתיים. הבסיס לאופטימיזציה של אמצעי ההגנה מקרינה הוא הערכת הנזק הבריאותי הכולל היכול להיגרם על ידי העיסוק הספציפי והשוואת נזק זה לעלותם של אמצעי ההגנה מקרינה שיש לנקוט כדי להפחית את החשיפה.

ג. הגבלת מנת הקרינה לפרט

לפי עיקרון זה יש לדאוג לכך שחשיפת בני אדם יחידים מכל מקורות הקרינה (שהשימוש בהם הוצדק וננקטו ביחס אליהם אמצעי ההגנה האופטימאליים) לא תעלה, בכל הנסיבות הצפויות, על הגבולות שייקבעו.

נספח ב - מי הם מחברי חוברת זו?

פרופסור טוביה שלזינגר כיהן בעבר (1980-2000) כראש התחום להגנה מקרינה בשטח בטיחות קרינה במרכז למחקר גרעיני שורק. היה בין מייסדי מכון ההדרכה ל שם י. פייגה בממ"ג ומנהל מכון זה שנים רבות. כיום הוא פרופסור מן המניין וחבר הסנאט של אוניברסיטת אריאל בשומרון ופרופסור (מן החוץ) בבית הספר לרפואה באוניברסיטת תל-אביב. הוא מומחה ביישומי קרינה מייננת ברפואה, בדוזימטריה (מדידה וחישוב של מנות קרינה) ובהערכת סיכוני קרינה מייננת בכלל וסיכוני רדון בפרט.

פרופ' שלזינגר נמנה על ראשוני הארגון הבינלאומי להגנה מקרינה (IRPA) וכיהן כחבר מועצת הארגון וסגן נשיא הארגון בשנים 1977-1988. היה בין מייסדי האגודה הישראלית להגנה מקרינה בסוף שנות הששים ונשיאה בקדנציות רבות. כיהן כנציג ישראל בקבוצות עבודה אחדות של הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה אטומית (IAEA) ומומחה מטעם המחלקה לסיוע טכני של סוכנות זו בשליחויות של הסוכנות לפיליפינים (1981, 1980) ולברזיל (1998). פרופ' שלזינגר פעל שנים רבות כמרכז הוועדה המקצועית-תורתית לבטיחות קרינה הפועלת ליד פורום המטה הבין משרדי להגנה מקרינה.

ד"ר ז'אן קוך – הוא מומחה להגנה מקרינה ולהערכת סיכונים רדיולוגיים וסביבתיים. החל משנת 2015 מכהן ד"ר קוך כמנהל שטח בטיחות קרינה בממ"ג שורק, ובשנים 2000-2015 שימש שם כראש תחום הגנה מקרינה. בין השנים 2002-2007 מונה ד"ר קוך כנציג ישראל בוועדה לתקני בטיחות בהובלה של חומרים רדיואקטיביים של הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה אטומית (IAEA). החל משנת 2008 הוא מונה כנציג ישראל בוועדה לתקני בטיחות קרינה של IAEA. ד"ר קוך משמש כמרצה בתכנית ללימודי סביבה של האוניברסיטה העברית בירושלים ובפקולטה להנדסה של אוניברסיטת תל-אביב. ד"ר קוך נמנה על צוות המרצים הקבוע של מכון ההדרכה על שם י. פייגה בממ"ג. החל משנת 2003 מכהן ד"ר קוך במועצת האגודה הישראלית להגנה מקרינה ושימש כנשיאה בשנים 2011-2013.