

# שפיעת ראדון מבטונים המכילים אפר פחם

קוסטה קובלר רחל בקר גוסטבו חקין



המרכז למחקר גרעיני נחל שורק  
שטח בטיחות קרינה  
דו"ח מחקר שב"ק 4264



הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל  
המכון הלאומי לחקר הבנייה  
דו"ח מחקר 2012120

## שפיעת ראדון מבטונים המכילים אפר פחם

גוסטבו חקין, M.Sc

שטח בטיחות קרינה  
המרכז למחקר גרעיני נחל שורק

פרופ"ח קוסטה קובלר

פרופ"ח רחל בקר

המכון הלאומי לחקר הבנייה  
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית  
טכניון

בהשתתפות: ליאור אפשטיין וזהר יונגרייס (ממ"ג) וזכר פרילוצקי (טכניון)

מלווי מחקר:

אינג' רון שובל אינג' יוסי סיקולר ד"ר מוני בן-בסט אינג' נתן חילו אינג' חיים לב עמרי לולב  
דר' יאיר שמאי פרופ' טוביה שלזינגר דר' יעקב גילת אינג' גדעון אירוס פרופ' דן רבינא ז"ל

בהזמנת מנהלת אפר הפחם  
ומשרד הבינוי והשיכון  
הזמנה מס' 4500297526

Copyright © 2011 by K. Kovler, R. Becker, G. Haquin  
Ministry of Construction and Housing, National Coal Ash Board, the Technion Research and  
Development Foundation, Ltd, Haifa, and Nuclear Research Center, Yavne

## הכרת תודה

ברצוננו להודות לד"ר ז'אן קוך ולגב' ליאור אפשטיין אשר תרמו רבות בהכנת סקר הספרות (פרק 2), למשרד הבינוי והשיכון ולמנהלת אפר פחם על התמיכה בביצוע העבודה, לחברי ועדות הליווי, למר מיכאל סגל, טכנולוג ראשי של חברת סולל בונה, על הסיוע בהספקת בטון ממפעל, לאינג' רן מועלם ולאינג' נדב תימר מחברת דניה-סיבוס על הסיוע הלוגיסטי בעת ביצוע ניסויים בשטח, לד"ר יאיר שמאי על הערותיו במהלך כתיבת הדו"ח (פרקים 2 ו-5), למר יואב יפה מממ"ג שורק ולמר זכר פרילוצקי מהמכון הלאומי לחקר הבנייה (טכניון) על עזרתם בביצוע בדיקות המעבדה.

## תקציר

חומרים ומוצרי בנייה הכוללים מרכיבים מינרליים מכילים עקבות של יסודות רדיואקטיביים טבעיים שמקורם בסלעים ובאדמה. הרדיונוקלידים במוצרי הבנייה הם לרב רדיונוקלידים טבעיים משרשראות ההתפרקות של אורניום-238 ( $^{238}\text{U}$ ) ובמיוחד המקטע המתחיל ברדיום-226 ( $^{226}\text{Ra}$ ) ותוצרי הדעיכה שלו, תוריום-232 ( $^{232}\text{Th}$ ) ותוצרי הדעיכה שלו, והרדיונוקליד הטבעי אשלגן-40 ( $^{40}\text{K}$ ).

הוספת אפר פחם כתחליף לחול בתעשיית הבטון, הנובעת משיקולים סביבתיים וכלכליים, יכולה לגרום להגדלת ריכוז הרדיונוקלידים במוצרי הבנייה.

שאלת המחקר העיקרית הייתה, לפיכך, לבחון האם הוספת אפר הפחם לבטון משפיעה על שפיעת הראדון ממנו והאם הוספה זו עלולה להשפיע לרעה על החשיפה לקרינה של דיירי בניינים. בבניינים המאכלסים בני אדם, חדרי הממ"ד מכילים את כמויות הבטון הגדולות ביותר, וכן את החלון האטום ביותר. אי לכך, הם המועדים יותר מכל חדר אחר לחשיפה לראדון כאשר שוהים בהם זמן ממושך. מסיבה זו המחקר התמקד בחללים אלה.

בגלל אופיה הבין-תחומי של סוגיית המחקר, הוא בוצע ע"י צוות שכלל חוקרים מהמרכז למחקר גרעיני - שורק ומהפקולטה להנדסה אזרחית בטכניון. המחקר לווה ע"י שתי וועדות ליווי מקצועיות, מטעם משרד הבינוי והשיכון ומטעם מנהלת אפר הפחם.

המחקר כלל מספר ערוצי פעילות: בדיקות מעבדה (לתכולת רדיונוקלידים ופליטת ראדון) של בטונים שהוכנו במעבדה ללא ועם אפר פחם בכמויות שונות; בדיקות הצטברות ריכוז ראדון בשישה ממ"דים של בניין, המוקם במרכז הארץ, תחת ההשפעה של מצבי סגירה שונים של החלון והדלת; בדיקות מעבדה (לתכולת רדיונוקלידים ופליטת ראדון) של הבטונים אשר נוצקו באלמנטי המעטפת של הממ"דים הללו; מדידות של תחלופת האוויר בממ"דים הללו בתנאי סגירה שונים של החלון והדלת; גיבוש מודלים חישוביים להערכת שפיעת ראדון בתנאי בדיקה והתפתחות הראדון בחדר בתנאי השירות, והקשר ביניהם; בחינה של התאמת המודל למדידות בפועל; על פי מכלול הממצאים, הערכה שמרנית של סיכוני החשיפה לראדון בחדרי ממ"ד בתנאי שירות אופייניים.

הממצאים העיקריים כוללים:

1. סקר הספרות הראה כי התקן הישראלי להגבלת רדיואקטיביות מחומרי בנייה, ת"י 5098, המבוסס על תוספת מנה מירבית של  $0.3 \text{ mSv}$  וכולל גם את שפיעת הראדון באינדקס האקטיביות, הוא המחמיר ביותר. לעומתו התקן האוסטרי, הכולל גם כן השפעה זו, מבוסס על מנה מירבית של  $1 \text{ mSv}$ , והתקן הדני, המבוסס על המנה של  $0.3 \text{ mSv}$ , אינו כולל את השפעת הראדון באינדקס. התקן הישראלי, ת"י 5098, כמו התקן האוסטרי, מתייחס למסה המשטחית (מסה ליחידת שטח) של החומר, ובזאת נותן ביטוי נכון יותר למוצרי בנייה בהתאם לצפיפות המוצר. התקנים הזרים, כגון RP-112 והתקן הדני, המתייחסים לכל החומרים כבעלי צפיפות אחידה (כ-  $2300 \text{ ק"ג למ"ק}$ ), מחמירים שלא לצורך עם החומרים הקלים יותר, ומקלים שלא כראוי עם החומרים הכבדים יותר.
2. במחקר פותח מודל אנליטי מרוכב לחישוב ישיר וסימולטני של השפיעה החופשית מקירות וריכוז הראדון הצפוי בבניין, אך זה זקוק לערכים של תכונות חומר פיסיקליות בסיסיות שאינם זמינים בדרך כלל. אי לכך יש להסתפק בחישוב מופרד, כאשר הגורם המקשר הוא קצב השפיעה החופשית מפני

- השטח של הקיר,  $E_{ow}$ . ערך זה ניתן לקבל מבדיקה ישירה של קצב השפיעה החופשית,  $E_0$ , מדגם המייצג את קיר הבניין על פי הבדיקות המפורטות בת"י 5098, והכפלתו ב- 3.76.
3. הנחה שתחלופת האוויר אפסית וזניחה מותרת רק כאשר מתקבל:  $\lambda_{eff} \approx \lambda_{Rn}$ . במקרים אלה הנוסחאות לחישוב פשוטות מאוד. אם תנאי זה אינו מתקיים, יש לבצע את החישובים תוך התייחסות למודל המדויק יותר, הכולל את כל הביטויים בהם מופיעה תחלופת האוויר בחלל או בתא. הממצאים בדו"ח מבוססים על כלל זה.
4. השוואה של תחלופת האוויר שנמדדה בשיטה ישירה (באמצעות דעיכה של גז  $SF_6$ ), עם הערכים שהתקבלו מההפרש בין קצב הדעיכה האפקטיבי של הראדון לבין קצב הדעיכה הפיסיקלי הראתה סדרי גודל דומים אך ערכים שאינם דומים מספיק. ההבדלים מוסברים בחלקם בלבד ע"י הדיפוסיה החוזרת, שהסתבר בבירור שאינה זניחה. הערך שהתקבל עבור מקדם מעבר הראדון בשפה,  $\beta_{Rn}$ , לא היה קבוע ולא ניתן להגיע למסקנה לגבי ערכו בגלל הפיזור הגדול של הערכים. גם בספרות אין ערכים מוסכמים עבור גודל זה.
5. אימות המודל התקבל על ידי השוואת השוואת הערכים שהתקבלו עבור קצב השפיעה החופשית מהקיר,  $E_{ow}$ , בשני אופנים בלתי תלויים: (1) על פי תוצאות המדידות של דגמי החומרים מהם נוצקו מעטפת הממ"ד במעבדה ו- (2) על פי תוצאות השימוש במודל החדר והצבה של ריכוז הראדון כנגד הזמן, כפי שנמדד בממ"ד. המתאם בין הערכים היה מצוין (6.5 – 9.2 בקרל למ"ר לשעה מבדיקה מעבדתית של דגמי הבטונים שנוצקו באתר, ו- 5.9 – 11.7 בקרל למ"ר לשעה מהחישוב באמצעות מודל החדר).
6. בדיקות הבטונים שהוכנו במעבדה הראו שכצפוי, ריכוז הרדיונוקלידים, ובמיוחד ריכוז ה-  $^{226}Ra$  וה-  $^{232}Th$  בבטון המכיל אפר גבוה יותר מאשר בבטון ללא אפר ב- 22-36% ו- 55-110% בהתאמה, כאשר ההדירות הגבוהה בתוצאות מראה על הומוגניות גדולה של התערובות. לעומת זאת, מקדם מקדם האמנציה של הראדון נטה לקטון עם העלייה בתכולת האפר בבטון. כמו כן, נצפה שאשפיה לקויה (יום אחד בלבד) גרמה להפחתה גדולה יותר במקדם האמנציה.
7. הבדיקות המעבדתיות של דגמי הבטונים הראו שקצב השפיעה החופשית של ראדון ומקדם האמנציה מבטון ללא אפר היו גבוהים יותר לעומת בטון עם אפר (בכ- 18-37%, ו- 13-66%, בהתאמה). לעומת זאת, מניתוח המדידות של ריכוז הראדון בממ"דים לא התקבלה השפעה מובהקת של סוג הבטון על קצב השפיעה החופשית המחושבת. כמו כן, לא ניתן היה להבחין במגמה חד משמעית של השפעת גיל הבטון על מקדם האמנציה למרות שרוב תערובות הבטון שנבדקו (מלבד התערובות בעלת תכולת אפר פחם של 150 ק"ג למ"ק שעברה אשפיה תקנית) מראות נטייה להפחתה קטנה של האמנציה עם הגיל. הפיזור הכללי של התוצאות, עקב ריבוי הגורמים הבלתי מבוקרים הקיימים בפועל בבניין ומשפיעים עליהן, כולל ההשפעה של שיטת החישוב, היה גדול יותר מטווח ההשפעה של נוכחות אפר הפחם בבטון.
8. במדידה הישירה של תחלופת האוויר באמצעות גז  $SF_6$  בשני ממ"דים התקבל כי במצב האטום לחלוטין, כאשר חלון הממ"ד ודלת הפלדה היו סגורים היטב, תחלופת האוויר הייתה נמוכה מאוד ואף נמוכה מערך מקדם הדעיכה הפיסיקלי של ראדון. בתרחיש המדמה את המצב האטום ביותר בתנאי שירות רגילים, חלון ממ"ד ודלת עץ סגורים, תחלופת האוויר הייתה 0.13 עד 0.261 שעה<sup>-1</sup>. בכל יתר התרחישים, המדמים מצבי שירות שונים מבחינת מצב החלון ודלת העץ, תחלופת האוויר שהתקבלה הייתה תמיד גדולה מ- 1.0 שעה<sup>-1</sup> והגיעה עד עשרות רבות של תחלופות אוויר לשעה.

9. הערכה שמרנית של ריכוז הראדון הצפוי בממ"דים אופייניים בתנאי שירות רגילים הראתה, שאפילו אם תחלופת האוויר בתקופה זו היא 0.1 שעה<sup>-1</sup> וקצב שפיעת הראדון מכל אלמנטי המעטפת של הממ"ד הוא 12 בקרל למ"ר לשעה, ריכוז הראדון המירבי לא יעלה על 150 בקרל למ"ק, ובממוצע שנתי, אף אם מצב זה יחזור כל לילה, הערך יהיה קטן מ-60 בקרל למ"ק. בהתחשב בעובדה שבדיקות הבטונים הראו שקצב השפיעה החופשית לא עלה על הערך הנ"ל באף מקרה, ומשום שתחלופת אוויר כה נמוכה תגרום בדרך כלל לפתיחת חלון או דלת היות שהיא גורמת להצטברות לחות גדולה באוויר החדר, להיווצרות עיבוי על פני החלון, ולתחושת אי נעימות וחוסר נוחות בחדר, סביר להניח שהתנאים האלה לא יתקיימו במצבי שירות רגילים, ומהווים מבחינה זו מצב גבולי נדיר. במצב השירות הסביר יותר, כאשר תחלופת האוויר אינה קטנה מ-0.25 שעה<sup>-1</sup>, הריכוז המירבי שהתקבל לא עלה על 90 בקרל למ"ק, ובממוצע שנתי הערך יהיה קטן מ-35 בקרל למ"ק לשנה. יתר על כן, אפילו בתנאי התמגנות, בהם נלקח בחשבון שעקב דרגת האיטום הגבוהה במיוחד תחלופת האוויר עלולה לרדת ל-0, הריכוז המירבי המוערך אחרי 5 שעות בחדר האטום לא עלה על 130 בקרל למ"ק, דבר שאושר גם ע"י כל המדידות בבניין במצב זה.

מכאן אנו מסיקים כי שפיעת ראדון מכל סוגי הבטון שנבדקו במחקר זה (בין אם הוא כולל אפר פחם, ובין אם לא) לא עלולה לגרום לריכוז ראדון העולה על רמת הפעולה (200 בקרל/מ"ק), לא בתנאי שירות רגילים בהם מקפידים שלא לאטום את הממ"ד יתר על המידה (מבטיחים תחלופת אוויר שאינה קטנה מ-0.25 לשעה כל העת) ולא בתנאי התמגנות, אפילו אם אלה נמשכים מספר שעות. תוספת אפר הפחם לבטון, כמחליף חול ו/או צמנט, בשעורים המקובלים בישראל (עד לכ-150 ק"ג למ"ק) לא הגדילה את החשיפה לגז ראדון. בהתאם לכך, ניתן להכליל ולומר שמסקנה זו חלה גם על כל בטון אחר, שנבדק במעבדה לפי ת"י 5098 באמצעות דגמי מנסרה (20ס"מX10ס"מX10ס"מ) חשופים מכל הצדדים ומתקבל עבורו ערך קצב שפיעה חופשית בתנאי הבדיקה:  $E_0 > 3.2$  בקרל למ"ר לשעה, וערך מתורגם לתנאי קיר בבניין:  $E_{ow} > 12$  בקרל למ"ר לשעה.