

הצעת מחקר למנהלת אפר פחם ולמשרד הבינוי והשיכון

שפיעת ראדון מבטונים המכילים אפר פחם

ד"ר ז'אן קוך וגוסטבו חקין
ממ"ג שורק

פרופ"ח קוסטה קובלר ופרופ"ח רחל בקר
המכון הלאומי לחקר הבנייה - הפקולטה
להנדסה אזרחית וסביבתית, טכניון

1. מבוא

תהליך שרפת הפחם בתחנות כח גורם להתרכזות של המרכיבים האנאורגניים באפר, ובכללם המרכיבים הרדיואקטיביים. הרדיואיזוטופים העיקריים הנמצאים באפר פחם הם: אשלגן-40 (^{40}K), ורדיואיזוטופים משרשרת הדעיכה של האורניום-238 (^{238}U) ובמיוחד המקטע המתחיל ברדיום-226 (^{226}Ra) ותוצרי הדעיכה שלו והתוריום-232 (^{232}Th) ותוצרי הדעיכה שלו. אחד השימושים הנפוצים ביותר בעולם של אפר פחם הוא בתעשיית הבנייה. מוצרי בנייה המכילים רדיואיזוטופים טבעיים חושפים את דיירי המבנים לקרינה מייננת [1]. חשיפה זו יכולה להיות חשיפה חיצונית שמקורה בקרינת הגמא הנפלטת מהרדיואיזוטופים הנ"ל ותוצרי הדעיכה שלהם וחשיפה פנימית מנשימת גז ראדון (^{222}Rn) ותוצרי הדעיכה שלו. הוכח במחקרים אפידמיולוגיים שחשיפה מתמשכת של בני אדם לריכוזים גבוהים של ראדון (כמו אלה השוררים במכרות תת-קרקעיים) מעלה את הסיכוי של הנחשף לחלות בסרטן הריאה [2]. עקרונות ההגנה מקרינה המקובלים בעולם, כפי שהוגדרו ע"י גופים בינלאומיים כמו IAEA, WHO, ICRP ואחרים, גורסים כי הנזקים ההסתברותיים של הקרינה המייננת הם מצטברים (ועלולים להופיע שנים רבות לאחר החשיפה) ולא קיימת מנת סף להופעתם. על כן הרשויות מגבילות, עד כמה שניתן, את החשיפה לגז ראדון והריכוז המרבי בחדרים.

כאשר מקור הראדון הוא הקרקע מתחת למבנה, הרשויות ממליצות להתערב במידה וריכוז הראדון בחדר עולה על רמת פעולה (רמה שמעליה מומלץ לבצע פעולות הנדסיות ותכנוניות להורדת הריכוז). כאשר מקור הראדון הוא במוצרי הבנייה או במקור המים אין אחדות דעים לגבי הגישה שיש לנקות על מנת להגביל את ריכוז הראדון בחדר [1].

בשנים האחרונות גוברת ההתעניינות בהגבלת החשיפה ממקורות טבעיים שונים ובנייהם החשיפה לקרינה שמקורה במוצרי בנייה [3, 4]. גישה זו מתגברת לאור העובדה של השימוש ההולך וגובר של מוצרי לואי תעשייתיים המכילים ריכוזי גבוהים יחסית של רדיואיזוטופים טבעיים (TENORM¹).

¹ International Commission for Radiation Protection

² The World Health Organization

³ International Atomic Energy Agency

⁷ Technologically Enhanced Natural Occurring Radioactive Materials

השימוש באפר פחם בתעשיית הבנייה בארץ הינו משמעותי והוא מוגדר בתקן ישראלי ת"י 1 "צמנט: צמנט רגיל" (מאומץ מתוך EN 197-1) כחומר המתקבל באמצעות שיקוע אלקטרוסטטי או מכאני של חלקיקי אבק מתוך גזי פליטה של תנורים המוזנים באפר מרוסק [5]. למעשה, אפר הפחם הינו תוצר לוואי של שריפת הפחם בתעשיית הפקת החשמל. מדי שנה כמויות רבות של אפר פחם, אשר מאופיין בריכוזים גבוהים יחסית של רדיואיזוטופים ומתכות כבדות, נוצרות בתחנות כוח תרמיות. ניצול אפר הפחם בענפים שונים נובע בעיקר מסיבות כלכליות, אקולוגיות וטכנולוגיות. השימוש באפר פחם בתעשיית הבנייה גובר עם השנים, ועל פי התחזית של מנהלת אפר הפחם בשנת 2008 עשוי להגיע ל-1,400,000 טון בשנה [6]. כחלק מאסטרטגיית הניצול והמחזור, אפר פחם משמש כתוסף במוצרי ובחומרי בניה רבים (צמנט, בטון, בלוקים וכד'). כמו-כן, מקובל בארץ השימוש באפר הפחם כתחליף לחלק מצמנט הפורטלנד שבבטון הודות לתכונותיו הפוצולניות של האפר. בנוסף, מפתחים גם שימושים נוספים אשר בהם תכולת האפר גבוהה בהרבה, למשל בטונים בהם האפר מהווה גם תחליף לחלק מהחול (חול דקיק, בעיקר), בטונים אשר בהם חלק ניכר מהצמנט מוחלף באפר פחם, בטונים מאגרגט קל מאפר פחם, אשר בהם רוב האגרגט מוחלף באפר, מוצרים קרמיים לציפוי בניינים ומוצרים נוספים.

במחקרים שבוצעו בשנים האחרונות במכון הלאומי לחקר הבנייה בשיתוף פעולה עם אגף הקרינה של המשרד לאיכות הסביבה וחברת החשמל לישראל [7, 8] נבדקו תכולת רדיואיזוטופים, אמנציה וקצב שפיעת הראדון בחומרי גלם לייצור בטון (צמנט, אגרגטים, אפר פחם), דגמי בטון, דגמי עיסה צמנטית ומוצרי בניה (בלוקים). מטרת המחקרים הייתה לבדוק את האספקטים והשפעות של תוספת אפר פחם מקומי (מתחנת הכוח בחדרה) על הרדיואקטיביות של מוצרי בניה. בין היתר, הוסקו מסקנות הבאות:

- בטונים ועיסות צמנטיות המכילות אפר פחם אכן מאופיינות בתכולת רדיואיזוטופים גבוהה יותר מאשר אותם החומרים ללא אפר.
- שיעור פליטת הראדון של אפר הפחם נמוך, למרות התכולה הגבוהה ביותר של ^{226}Ra , זאת כנראה כתוצאה מהיווצרות המבנה הזכוכיתי של חלקיקי החומר אשר מתקבל בטמפרטורות גבוהות של תהליכי הייצור.
- למרות תכולת ^{226}Ra גבוהה יחסית נצפתה ירידה בקצב שפיעת הראדון בבטונים ובמוצרי בנייה שהכילו אפר פחם. תופעה זו מנומקת, בין היתר, על ידי העובדה ששיעור האמנציה של צמנט נמצא 7.65% לעומת שיעור האמנציה של אפר פחם בסך 0.52% בלבד [9].
- נתגלה שקיים קשר בין גיל החומר הצמנטי לבין קצב שפיעת הראדון מתוכו [9]. אחת הסיבות האפשריות היא תגובה פוצולנית איטית של האפר, הגורמת לכך שחלקיקי הרבים עוד לא הפכו להיות חלק אינטגרלי של הגל הצמנטי החדש בבטון בעל תכולות אפר גדולות יחסית, לכן אטומי רדיום-226 עדיין "כלואים" בחלקיקי האפר המקוריים. הסיבה לכך אינה ברורה, ונדרשים חקירה וניתוח נוספים כדי להסבירה.

השימוש העיקרי באפר פחם בבנייה הוא בצמנט, בבטונים ובבלוקים למיניהם. ניתן להשתמש באפר כתחליף לחלק מצמנט הפורטלנד, כאשר מחליף האפר כ- 10% (לפי ת"י 1 "צמנט פורטלנד") עד 35% מהצמנט (לפי התקן האירופי EN 197-1-2000, כאשר האחוזים הגבוהים יותר של אפר הפחם מותרים בצמנט מסוג CEM II B-V או CEM II B-M). כיום מפתחים גם שימושים נוספים על בסיס אפר הפחם, למשל בטונים בהם האפר מהווה גם תחליף לחלק מהחול, בטונים אשר בהם חלק ניכר מהצמנט מוחלף

באפר פחם, בטונים מאגרנט קל מאפר פחם, אשר בהם רוב האגרנט מוחלף באפר, מוצרים קרמיים לציפוי בניינים ומוצרים נוספים. יש לציין שהשיטה הרגילה להוספת אפר הפחם בבטון מובא כתחליף של חול דקיק אינה גורמת לעליה משמעותית של תכולתו בבטון.

מספר מחקרים בעולם הראו כי הוספת אפר פחם לבטונים אינו מעלה את מקדם שפיעת הראדון ליחידת ריכוז אקטיביות של ^{226}Ra במוצר ואלו אף מקטין אותו [10, 11]. עקב כך ניתן לצפות שתכולת האפר יכולה להיות עוד יותר גדולה מזו הנהוגה כיום (כ- 150 ק"ג למ"ק), תוך עמידה בקריטריונים של הגנה מקרינה. הסיבה העיקרית להקטנה השפיעה היחסית היא ככל הנראה כליאת הראדון בחלקיקי האפר הזכוכיתיים. הנוצרים בטמפרטורות גבוהות בתהליך שרפת הפחם. סיבה נוספת היא השינוי שעושה האפר במיקרו-מבנה של הבטון כתוצאה מתגובה פוצולנית המתרחשת בין האפר ואחד ממוצרי ההידרציה של צמנט פורטלנד – מימת הסיידן. המבנה הצפוף הזה מונע "בריחת" אטומי הראדון לנקבי הבטון. כמו-כן, יתכן, כפי שדווח בספרות, קצב פליטת הראדון במוצרים עם האפר הולך וקטן עם הזמן בצורה משמעותית ובתלות בלחות הסביבתית [11, 12, 13].

התופעות הנ"ל נחקרו ודווחו בספרות אולם קיים פער ידע בקביעת ההשפעה הכללית על מנת הקרינה החיצונית והפנימית של שימוש בכמויות שונות של אפר פחם בבטון. הערכת החשיפה החיצונית הינה מטלה פשוטה יחסית נעשית ע"י הפעלת מודלים של חישוב המנה בחדר ועל ידי מדידות קצב המנה במבנים. הערכת החשיפה הפנימית מנשימת גז ראדון שמקורו במוצר הבנייה המכיל אפר פחם הינה סוגייה מסובכת יותר משתי סיבות:

1. התחשבות בכל הפרמטרים המשפיעים על ריכוז הראדון בחדר וביניהם רמת תחלופות האוויר בחדר, מיזוג אוויר וכו'.
2. מדידה קצב פליטת הראדון האמיתי בחדר המתחשב בתופעת הדיפוזיה החוזרת (back diffusion).
3. קשר בין מדידות מעבדתיות לקצב פליטת הראדון מהקיר.

מאמצים ניכרים הושקעו בתקופה האחרונה במדינת ישראל על ידי גופים שונים העוסקים בהיבטי הקרינה הרדיואקטיבית ממוצרי בנייה: המשרד להגנת הסביבה, חברת החשמל, הטכניון, המרכז למחקר גרעיני שורק, מנהלת אפר הפחם, הקריה למחקר גרעיני בדימונה, הועדה לאנרגיה אטומית ובמוסדות אחרים, בקידום המודעות, ההערכות והתקינה בנושא. יחד עם זאת, יש להשלים את המחקר המקדים שישמש בקביעת התקן כמו מאגר נתונים מסודר על תכולת רדיואיזוטופים בחומרי הבנייה הנפוצים בארץ, וסוגיות נוספות כמו שיטת מדידת ראדון מקובלת ותוכנת חישוב המנה בחדר.

במסגרת מאמצים אלה, שני גופים בעלי ניסיון רב בסוגיות הנדונות, הטכניון וממ"ג שורק ביחד, מציעים לבצע מחקר מקיף ע"מ לתת מענה לסוגייה של תוספת המנה לדייר עקב שימוש באפר פחם בבטון.

2. מטרות המחקר

בעבודה הנוכחית מוצע לטפל במוצרי בנייה סופיים מצמנט פורטלנד המכילים אפר פחם, ובמאפייני שפיעת הראדון מהם. הגישה הזאת התקבלה בתקן ישראלי ת"י 5098 "תכולת חומרים רדיואקטיביים במוצרי בניין", אשר נמצא היום ברוויזיה. הכנת דגמי בטון מיוחדים עם תכולות שונות של אפר פחם ויחסים שונים של מים/חומרי מליטה יסייעו בהשגת יעדי המחקר.

במחקר המוצע יבחנו הסוגיות הבאות:

1. סקר ספרות בנושאים הבאים:

- א. פליטת ראדון ממוצרי בנייה המכילים אפר פחם.
- ב. שיטות מדידת שפיעת ראדון במעבדה.
- ג. תקינה בנושא ר"א טבעית מחומרי בנייה.

2. שפיעת ראדון מבטון המכיל אפר פחם:

- א. מדידות ראדון בממ"דים בנויים מבטונים עם ובלי אפר פחם.
- ב. מדידת פליטת ראדון במעבדה מקוביות בטון מהם עשויים הממ"דים.

המחקר יעסוק במוצרי בנייה בעלי תכולת אפר פחם עד כ-150 ק"ג למ"ק. המדידה תתבצע הן במעבדה והן באתרי בנייה. לשם בדיקות באתרים ייבחרו חדרי ממ"ד או ממ"ק בהם הרכב תערובות הבטון ברכיבי רצפה, תקרה ובקירות יהיה אחיד וידוע. המדידה במעבדה תתבצע בתנאים מבוקרים.

מטרות המדידות במסגרת המחקר הן כדלקמן:

בדיקות חומרים במעבדה

- לחקור השפעת תכולת שונות של אפר פחם, מ-0 ועד לכ-150 ק"ג למ"ק של, במוצרים צמנטיים על קצב שפיעת הראדון מהבטון.
- לבנות מאגר נתונים על תכולת החומרים הרדיואקטיביים ועל קצב שפיעת הראדון של החומרים הנ"ל בחומרים צמנטיים.
- לחקור השפעת גילם של מוצרי הבנייה על קצב שפיעת הראדון מתוכם.
- לחקור השפעת חוזק החומרים שמכילים אפר פחם והשפעת תכולת אפר הפחם על מאפייני הקרינה.

מדידה בבניינים

- לבדוק את המתאם בין מודל חישובי לחיזוי ריכוז הראדון בחלל נתון לבין מדידות בפועל בבניינים.
- למדוד את קצב פליטת הראדון האמיתי מקיר בחדר.
- לבחון את האפשרות לחזות את ריכוז הראדון בחללי הבניין על סמך מדידות מעבדתיות של שפיעת ראדון מחומרי הבנייה.

3. שיטת המחקר

3.1 בדיקות מעבדה

3.1.1 בדיקות פליטת ראדון מקוביות בטון

שפיעת ראדון מחומרי הבנייה: לכל תערובת בטון יבוצעו בדיקות מעבדתיות לשפיעת ראדון בגיל 28 יום, 90 יום, חצי שנה, ושנה. מספר הבדיקות 24, משך הבדיקה לפחות 4 ימים כ"א (ניתן לבצע 3 בדיקות במקביל)

3.1.2 בדיקות תכולת רדיואיזוטופים טבעיים בבטון

הבדיקות יעשו בשיטה של ספקטרומטרית גאמא ברזולוציה גבוהה בהתאם לשיטה תקנית. מספר הבדיקות 6, משך הבדיקה לפחות 25 ימים לדוגמא (ניתן לבצע מספר בדיקות במקביל)

3.2 מדידות בבניינים

3.2.1 מדידות ראדון בתנאים אטומים

המחקר יכלול מדידות ב-15 חדרי ממ"ד הכוללות 3 תערובות שונות עם ובל א.פ. (6 חדרים), 2 חזרות בכל חדר ו-3 ממ"דים זהים הפונים לכוונים שונים (לדוגמא מערב, מזרח וצפון). הממ"דים יהיו בקומות עליונות במספר בניינים לא מאוכלסים, בשלב שלפני ריצוף וטיח. הבניינים יהיו בעלי תוכנית אדריכלית דומה ככל האפשר על מנת להבטיח שתחלופת האוויר דומות. לצורך המחקר יידרש בכל בניין 2 ממ"דים שנבנו מתערובת בטון ללא אפר פחם כתחליף לחול, ובניין שני עם 2 ממ"דים, בעל תוכנית אדריכלית דומה, שבטון הממ"דים בו הוא עם אפר פחם כתחליף לחול. בכל ממ"ד תותקן דלת וחלון פנימיים המבטיחים את אטימות הממ"ד. מספר הבדיקות 15, משך הבדיקה לפחות 5 ימים כל אחת. כמו כן יבוצעו מדידות של מנת הקרינה החיצונית בממ"ד אטום ופתוח.

3.2.2 מדידות תחלופת אוויר וראדון

המחקר יכלול מדידות תחלופת אוויר אופייניות בממ"דים במצבי אוורור שונים, ומדידות של ריכוז הראדון במצבים הנ"ל.

- תחלופת אוויר אופיינית בממ"דים: הבדיקות יעשו ב-2 ממ"דים שכבר אוכלסו. בכל ממ"ד תיבדק תחלופת האוויר המתקבלת בשני מצבים של דלת הממ"ד (פתוחה, סגורה) ובמספר מצבים של החלון: חלון פתוח לגמרי, חלון חצי סגור, חלון סגור עם ידית לא נעולה, חלון סגור עם ידית נעולה לחלוטין. המדידות יעשו בשיטת הפרשי לחצים או באמצעות גז עקיבה (CO_2 או SF_6). יימדדו בזמן מדידת תחלופת האוויר התנאים המטאורולוגיים באוויר החוץ (טמפרטורה, לחות יחסית, מהירות רוח וכיוונה) ובאוויר הפנים (טמפרטורה, לחות יחסית, מהירות תנועת אוויר). מספר בדיקות 14 בדיקות.

- ריכוז ראדון בחלל הממ"ד: בדיקת ריכוז הראדון בכל ממ"ד תבוצע באמצעות מספר אלקטרטים בחדר, וכן באמצעות מכשיר מדידה לניטור רציף. במקביל ייבדק גם ריכוז הראדון באוויר החוץ (סמוך לחלון) באמצעות אלקטרטים. הבדיקות יעשו בשני מצבים מאפיינים בלבד: דלת החדר פתוחה והחלון פתוח בחציו, ודלת פתוחה והחלון סגור עם נעילת הידית, בהתאם לשינויים שיחולו בתחלופות האוויר שיימדדו במצבי הסגירה השונים של החלון, יוחלט האם יש צורך במדידת ריכוז הראדון

במצבים נוספים. מספר הבדיקות 4 אולם יתכן כי ידרשו יותר בדיקות בהתאם לתוצאות בדיקות תחלופות אוויר.

- שפיעת ראדון מחומרי הבנייה: לכל תערובת בטון של הממ"דים יבוצעו בדיקות מעבדתיות לשפיעת ראדון בגיל 28 יום, 90 יום, חצי שנה, ושנה.

4. תכנית העבודה

1. סקר ספרות של מאפייני הקרינה במוצרי הבנייה העשויים מאפר פחם ושל התקנות הקיימות.
2. סקר ספרות של שיטות בדיקה לפליטת ראדון ממוצרי בנייה.
3. סקר ספרות של שיטות הבדיקה לפליטת הראדון ממוצרי הבנייה בתנאי מעבדה.
4. הכנת תכנית ניסויים מפורטת. ביצוע יציקות בהתאם לתערובות שמהם נבנו בניינים..
5. בדיקת ריכוז רדיואיזוטופים טבעיים ביציקות הבטון.
6. בדיקות קצב שפיעת הארדון מקוביות בטון בגודל של 10x10x20 ס"מ עם ובלי אפר פחם. ריכוז האפר ייקבע בתיאום עם מנהלת אפר הפחם ועם אגודת ייצרני בטון מובא המשתמשים כיום באפר הפחם בתור מרכיב מוצריהם. המדידות יבוצעו בגילאי בטון שונים כמפורט לעיל.
7. ניתוח ממצאי הבדיקות, חקר השפעת גיל החומר, יחסי מים לחומר מליטה ותכולת אפר הפחם בתערובות צמנטיות בעלות תכולה שונות של אפר פחם על מאפייני הקרינה.
8. פיתוח מודל אנליטי לחיזוי ריכוז הראדון בחלל נתון לבין מדידות בפועל בבניינים.
9. בדיקות ראדון ותחלופות אוויר בממ"דים.
10. אימות המודל.
11. הכנת דו"ח המחקר בסיום העבודה.

5. לוח הזמנים לביצוע המחקר ואבני דרך

1. סקר ספרות – סיום 4 חודשים מהתחלת המחקר (0).
2. תכנון המדידות – סיום 6 חודשים מ-0.
3. מדידות מעבדה – 15 חודשים מ-0.
4. מדידות ממ"דים – 6 חודשים מתחילת המדידות (בהתאם לזמינות הבניינים).
5. פיתוח מודל – סיום 6 חודשים מ-0.
6. אימות המודל – התחלה לאחר קבלת תוצאות מדידה בממ"ד אחד וסיום כחודשיים לאחר תום המדידות בבניינים.
7. סיכום המחקר – 24 חודשים מ-0.

6. מקורות מידע

- ¹ Haquin G., Natural Radioactivity and Radon in Building Materials , Keynote lecture IRPA 12 International Congress, Buenos Aires, 2008.
- ² INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Protection Against Radon-222 At Home And At Work. Publication 65, Pergamon Elsevier, (1993).
- ³ INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Protection of the Public in Situations of Prolonged Radiation Exposure, Publication 82, Elsevier Science B.V, (1999).
- ⁴ INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Scope of Radiological Protection Control Measures, Publication 104, Elsevier Science B.V. (2007).
- ⁵ תקן ישראלי - ת"י 1 "צמנט פוטלנד: צמנט רגיל", מכון התקנים הישראלי, תל-אביב, נובמבר 2002.
- ⁶ http://www.coal-ash.co.il/fr_tech.html
- ⁷ Kovler, K., Perevalov, A., Steiner, V. and Metzger, L.A., Radon exhalation of cementitious materials made with coal fly ash. Part 1. Scientific background and testing of the cement and fly ash emanation, *Journal of Environmental Radioactivity* 82 (2005).
- ⁸ Kovler, K., Perevalov, A., Levit A., Steiner, V. and Metzger, L.A., Radon exhalation of cementitious materials made with coal fly ash. Part 2. Testing hardened cement - fly ash pastes, *Journal of Environmental Radioactivity* 82 (2005).
- ⁹ ק. קובלר, א. פרבלוב, שפיעת ראדון במוצרי בנייה מאפר פחם, דו"ח מחקר בהזמנת חברת החשמל לישראל בע"מ, המכון הלאומי לחקר הבנייה, טכניון, חיפה, 2003, 44 עמ'.
- ¹⁰ E. Stranden, Assessment of the radiological impact of using fly ash in cement, *Health Physics*, 44, pp. 145-150, 1983
- ¹¹ L.M.M. Roelofs and L.C. Scholten, The effect of aging, humidity and fly-ash additive on the radon exhalation from concrete, *Health Physics* 67 (3), pp. 266-271, 1994
- ¹² K. Ulbak, N. Jonassen, K. Baekman, Radon exhalation from samples of concrete with different porosities and fly-ash additives, *Radiation Protection Dosimetry*, 7, pp. 45-48, 1984
- ¹³ E. Stranden, A. K. Kolstad and B. Lind, Radon exhalation: Moisture and temperature dependence, *Health Physics*, 47, pp. 480-484, 1984