

מס' המחקר במשרד  
להגנת הסביבה  
9-7-1

המכון הלאומי לחקר הבנייה  
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית  
טכניון – מכון טכנולוגי לישראל

### **אורך דיפוזיה של ראדון בחומרי איטום**

### **Radon diffusion length in sealing materials**

דו"ח שנתי  
שנה ראשונה

**מוגש ע"י**

**חוקר ראשי:**

פרופ"ח קוסטה קובלר                      טכניון-מכון טכנולוגי לישראל

### **חוקרים נוספים:**

טכניון – מכון טכנולוגי לישראל

זכר פרילוצקי M.Sc.  
נתן לביא  
שמואל לוינסון M.Sc.

**מוגש למדען הראשי  
המשרד להגנת הסביבה**

תודות: ברצוננו להודות לד"ר עוזי גרמן מקמ"ג על הסיוע הנדיב במהלך ביצוע המחקר, לד"ר הישאם נסאר מהמשרד להגנת הסביבה על הערותיו המועילות, ולמשרד להגנת הסביבה על התמיכה הכספית.

מספר עמוד	תוכן עניינים
II	תקציר בעברית
2	תקציר באנגלית
6	Introduction
9	1 Radon Diffusion Length
11	2 Experimental
11	2.1 Installation
14	2.2 Materials
17	3 Testing Results
21	4 Calculation of Radon Diffusion Length
21	4.1 Assuming a non-linear concentration distribution across the partition
25	4.2 Assuming a linear concentration distribution across the partition
29	5 Radon Protection Degree
6	Comparison with the Literature Data on Radon Diffusion Length and
32	Discussion of Possible Sources of Measurement Errors
33	7 Conclusions
34	Acknowledgements
34	Bibliography
	Appendix A: Certificate on radon diffusion coefficient and radon diffusion length of bitumen-polymer membrane, issued by Prof. Gert Keller, Institute of
36	Biophysics, University of Saarland, Germany
	Appendix B: Certificate on radon diffusion coefficient and radon diffusion
37	length of bitumen-polymer membrane, issued by System Laboratory, Israel
	מילות מפתח: חומרי איטום, דיפוזיה, בדיקות, ראדון

### רשימת טבלאות

מספר עמוד	תוכן עניינים
10	Table 1. Experimental mean values of the diffusion coefficient and the diffusion length in popular building materials

### רשימת איורים

**מספר  
עמוד**

8	Figure 1. Uranium-238 (radium-226) series decay chain (Gilmore, 2008)
12	Figure 2. NIST polyethylene-encapsulated $^{226}\text{Ra}/^{222}\text{Rn}$ emanation standard SRM 4973
12	Figure 3. 0.1L chamber for the measurement of radon diffusion
13	Figure 4. Photo of the experimental setup for the determination of $^{222}\text{Rn}$ diffusion through sealing materials and example of the coating
14	Figure 5. Scheme of experimental setup: radon gas released from source in small chamber diffuses via sample of coating or bituminous material; detector measures radon concentration in chamber
15	Figure 6. Samples of cardboard and paint coatings on top of it
17	Figure 7. Sample of BM 3/250
17	Figure 8. Samples of BM 4/180 (left) and BM 5/180 (right)
18	Figure 9. Growth of radon concentrations in the test chamber as a result of radon diffusion through two kinds of coatings manufactured by Producer 2: P2-2 (primer only) and P2-8 (high-flexible layer only)
19	Figure 10. Radon concentration growth in the test chamber with radon calibrated source
20	Figure 11. Radon concentration growth in the test chamber as a result of $^{222}\text{Rn}$ diffusion throughout paint coatings
21	Figure 12. Radon concentration growth in the test chamber as a result of $^{222}\text{Rn}$ diffusion throughout bituminous sealing materials
23	Figure 13. Thickness to radon diffusion length ratio for different sealing materials calculated assuming a non-linear distribution across the partition, averaged for the first 24 hours of the test
24	Figure 14. Thickness to radon diffusion length ratio for coatings calculated assuming a non-linear concentration distribution across the partition vs. time
24	Figure 15. Thickness to radon diffusion length ratio for bituminous materials calculated assuming a non-linear concentration distribution across the partition vs. time
27	Figure 16. Thickness to radon diffusion length ratio calculated for coatings assuming a linear distribution of radon concentrations across the partition, vs. time
28	Figure 17. Thickness to radon diffusion length ratio calculated for bituminous materials assuming a linear distribution of radon concentrations across the partition, vs. time
29	Figure 18. Thickness to radon diffusion length ratio for different sealing materials calculated assuming a linear distribution across the partition, averaged for the first 24 hours of the test
30	Figure 19. Average protection degree against radon gas for paint coatings and bituminous sealing materials
31	Figure 20. Radon protection degree for different paint coatings vs. time
31	Figure 21. Radon protection degree for bituminous sealing materials vs. time

2013187

## **אורך דיפוזיה של ראדון בחומרי איטום**

**פרופ"ח קוסטה קובלר**      **זכר פרילוצקי M.Sc.**

**שמואל לוינסון M.Sc.**      **נתן לביא**

בהזמנת המשרד להגנת הסביבה

הזמנה מס' 9-7-1

Copyright © 2012 by K. Kovler, Z. Prilutsky, S. Levinson and N. Lavi  
the Ministry of Environmental Protection and the Technion Research and Development  
Foundation, Ltd., Haifa

## **אורך דיפוזיה של ראדון בחומרי איטום**

**קוסטה קובלר    זכר פרילוצקי    שמואל לוינסון    נתן לביא**

למען הסר ספק מודגש בזאת כי החוקר, מוסד הטכניון למחקר ולפיתוח בע"מ והטכניון המכון הטכנולוגי לישראל – אינם ולא יהיו אחראים לכל פגיעה ו/או נזק ו/או הוצאות ו/או הפסד, מכל סוג ומין, שנגרם או עלול להיגרם לרכוש ו/או לגוף, כתוצאה ישירה או עקיפה, למקבל הדו"ח או לצד ג' כלשהו, עקב דו"ח זה או בהקשר אליו, לרבות בשל יישום האמור בו.

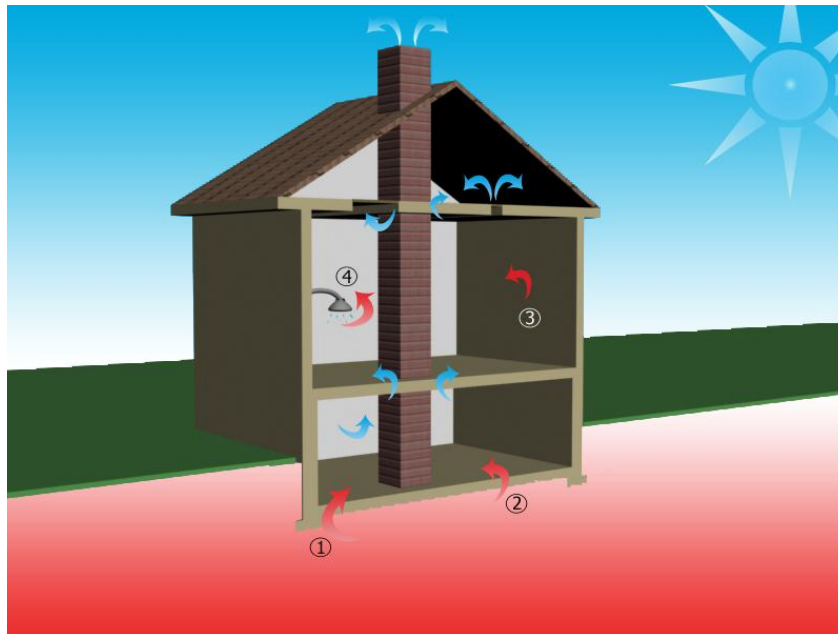
**הכרת תודה**

ברצוננו להודות לד"ר עוזי גרמן מקמ"ג על הסיוע הנדיב במהלך ביצוע המחקר, לד"ר הישאם נסאר מהמשרד להגנת הסביבה על הערותיו המועילות, ולמשרד להגנת הסביבה על התמיכה הכספית.

## תקציר מנהלים

המחקר "דיפוזיית ראדון בחומרי איטום" עוסק בחקירה של חדירת ראדון ( $^{222}\text{Rn}$ ) דרך חומרי איטום שונים. כידוע, גז ראדון ממקורות טבעיים מצטבר בניינים, בעיקר באזורים מוגבלים כדוגמת עליות גג ויסודות. גז ראדון הינו אחראי לרוב החשיפה של הציבור לקרינה מיננת ומסווג כחומר מסרטן לבני האדם. על כן ראדון נחשב למזהם משמעותי המשפיע על איכות האוויר בתוך מבנים בכל רחבי העולם. בכדי למנוע חדירת ראדון למרתפים ולחדרים של מבנים יש צורך בחומרי איטום מיוחדים. בחירת החומר המגן תלויה באורך דיפוזיית הראדון של החומר. נהוג לקבל עובי גדול משלושה אורכי דיפוזיית ראדון בחומרים כמספקים אטימות מפני ראדון (מנקודת המבט של ההנדסה).

ראדון-222 הנו גז אציל חסר ריח וצבע, אשר נוצר כתוצאה מהתפרקות רדיואקטיבית של היסוד רדיום-226 הנמצא בכמויות שונות בקרקע ובחומרי הבנייה. בשל היותו גז אציל הוא נודד מהמקום שבו נוצר, בעיקר - דרך סדקים ברצפה וסביב צנרת המים אל תוך הבניין. בדרך כלל, הראדון חודר אל תוך המבנה כתוצאה מהפרשי לחץ האוויר (באמצעות קונוקציה או פילטרציה) וכן כתוצאה מהפרש ריכוזי בקרקע ובאוויר (באמצעות דיפוזיה). מקורות הראדון בבניין באופן כללי מתוארים סכמתית באיור 1.



איור 1. מקורות הראדון בבניין (קובלר, לויט, & פרבלוב, המדריך להגנת בניינים חדשים בפני גז ראדון, 2005).

יש לציין שמנגנון הפילטרציה מן הקרקע (1) נחשב למקור העיקרי של הראדון בתוך הבניין (85% - 90%), בשעה שהדיפוזיה דרך רכיבי מבנה (2) מהווה מקור קטן יחסית (סה"כ 2% - 5%). הדיפוזיה היא מעבר אטומי הגז דרך חומר כלשהו עקב הפרשי ריכוזים. זהו אך מנגנון משני של חדירת הגז ראדון למבנים, מכיוון שרוב חומרי הבנייה והאיטום המפרידים בין חללי המגורים ומקור הראדון (קרקע) הינם בעלי עובי גדול יחסית מאורך דיפוזיה של הגז ראדון.



### III

בנוסף לשני המקורות הנ"ל, קיימת גם שפיעה מחומרי בניה מינראליים (3) (10% - 15%) וממים ביניים (4) (1% - 2%).

ניתן לסווג את השיטות להגנת הבניין בפני הראדון לשיטות אקטיביות ופסיביות, ובהתאם לכך יסווג גם הפתרונות ההנדסיים הפרטניים.

ההגנה הפסיבית מבוססת על שיפור ההתנגדות של החיבורים והרכיבים במעטפת הבניין, על מנת לחסום את מעבר הראדון מהמקור אל תוך חדרי המבנה באמצעות דיפוזיה או קונוקציה. הגנה פסיבית הנה חסכנית בתחזוקה ואינה צורכת אנרגיה כלל.

הגנה אקטיבית מפחיתה את עומס הראדון על המבנה באמצעות דילול מאולץ של ריכוזי הראדון מתוך הבניין לאטמוספירה. ההגנה האקטיבית תמיד מכילה מערכות לאוורור מאולץ והיא כרוכה בקיומו של מקור אספקת האנרגיה ובתחזוקה. יתרונותיה של ההגנה האקטיבית הן באפשרויות לויסות. כתוצאה מכך, כושר ההגנה של המערכות האקטיביות הנו יעיל יותר. הניסיון בארץ ובחו"ל מלמד כי אין צורך בהגנה אקטיבית בכל פרויקט בנייה חדש, ובהגנה זו יש להשתמש במקרים מיוחדים בלבד, כאשר המערכת הפסיבית אינה מספיקה. נוסף על כן, מערכות אקטיביות תמיד מכילות מרכיבים של מערכות פסיביות (קובלר & פרבלוב, עקרונות הגנת בנייני מגורים בפני גז הראדון, 2004).

למערכת האיטום בבניין מגורים תפקיד חשוב בהגנה פסיבית. כאמור, ראדון נכנס ברובו אל חללי הבניין מהקרע. לכן, בטרם קביעת הרכיבים למיגון מפני חדירת ראדון ובחירת החומרים למטרות הללו, יש לתת את הדעת על מיקום שכבת האיטום. באופן דומה לבידוד תרמי ואיטום נגד רטיבות, מטרת ההגנה הפסיבית מפני ראדון היא יצירת חלל מבודד מהקרע.

אחד הפתרונות ההנדסיים המקובלים בהגנה הפסיבית הוא התקנת ממבראנה. הממבראנה מהווה שכבת סרט (יריעה) של חומר איטום בפני חדירת גזים שמונחת על פני רכיב נושא של קיר המרתף, הרצפה או התקרה. הממבראנה ממלאת את תפקיד הציפוי.

פוליאטילן הינו חומר איטום הנפוץ ביותר ליצור הממבראנה. הוא משווק בעוביים שונים, בין 0.3 מ"מ ועד ל-1.0 מ"מ. ניתן לשריין את הפוליאטילן באמצעות רשת פוליאטילן בעל צפיפות גבוהה, פוליפרופילן או פוליאסטר - לשם שיפור עמידותה המכאנית של הממבראנה בעת הבנייה. חדירות הממבראנה קטנה, כאשר משתמשים בה בשילוב עם שכבה נוספת העשויה רדיד אלומיניום. עובי הממבראנות העשויות פוליאטילן מחוזק באמצעות רדיד אלומיניום נע בין 0.3 ו-0.8 מ"מ. בנוסף לשכבה מרדיד אלומיניום, ניתן להשתמש בשכבה ביטומנית; במקרה זה עובי הממבראנה נע בין 0.3 ו-1.5 מ"מ. בכל מקרה, יש להקפיד על עובי מינימאלי של פוליאטילן לקבלת ממבראנה עמידה, והוא 0.3 מ"מ.

בנוסף לממבראנות עשויות פוליאטילן, ניתן להשתמש בחומר ביטומני, המיושם בצורת יריעות, במריחה או בהתזה, אך בעוביים יותר גדולים מאשר פוליאטילן, עד ל-3...5 מ"מ.

לאחרונה פותחו ממבראנות ביטומניות-פולימריות משופרות בצורת יריעות בעובי של 3...5 מ"מ. בפרויקט נבדקו מספר ממבראנות ביטומניות-פולימריות בעובי של 3 ו-4 מ"מ המשולבות עם פולימר מסוג SBS והמשוריינות עם פוליאסטר בעל צפיפות שונה, מ-170 ועד 250 גר' למ"ר:

.BM 4/170 ,BM 3/250 ,BM 5/180 ,BM 4/180

כמו-כן, פותחו חומרים ביטומניים בעלי גמישות על (עד 2000%) אשר מיושמים בהתזה. ממבראנה אחת מסוג זה (High Flexible Bituminous Membrane – HFBM) נבדקה בעבודה.

בנוסף לממבראנה, על מנת לאטום סדקים, תפרים, פתחי תקשורת ואינסטלציה במעטפת הבניין משתמשים בחומרי איטום נוספים. האיטום מתבצע בכיוון תנועת הראדון מהמקור לחדר המבנה באמצעות קצפים מתנפחים, דבקים, חומרים גמישים וחומרים פלסטיים (קובלר, לויט, & פרבלוב, המדריך להגנת בניינים חדשים בפני גז ראדון, 2005). מספר חברות ישראליות מייצרות צבעים בעלי כושר איטום בפני גזים, לרבות גז ראדון. בעבודה הנוכחית נבדקו 2 סוגי צבע מתוצרת חברה 1 (P1-2, P1-1) ו-7 סוגי צבע מתוצרת חברה 2 (P2-8, P2-7, P2-6, P2-5, P2-4, P2-3, P2-2).

בעת האחרונה הושקעו במדינת ישראל מאמצים ניכרים בקידום המודעות, ההערכות והתקינה בהגנה מקרינה מייננת טבעית בבנייני מגורים, ובפרט בהגנת בנייני מגורים בפני חדירת גז ראדון. במסגרת מאמצים אלה, פרסם משרד הפנים (בסיוע של המשרד להגנת הסביבה) לראשונה בישראל את "תקנות התכנון והבניה, תשס"ח – 2008, חלק כ"א: הגנת מבנים מפני גז ראדון". התקנות קובעות בין היתר ש"בכל בנין יש לבצע הגנה מפני חדירת ראדון באמצעות איטום נגד ראדון סביב כל הצנרת החודרת מהקרקע לתוך המבנה ואיטום מפני חדירת ראדון של כל תפרי החיבור בין הרצפה לקיר, תפרי התפשטות ותפרי הפסקת יציקה האיטום ייעשה באמצעות חומרי איטום שקיבלו אישור של מעבדה מוסמכת".

אף על פי האמור לעיל, טרם נעשה סקר שיטתי ומקיף של כושר ההגנה בפני גז ראדון של כלל חומרי האיטום בישראל. קיימים נתונים חלקיים בלבד בנוגע לסדר גודל של אורך הדיפוזיה. בנוסף לכך, בישראל אין עדיין שיטה תקינה לבדיקת חומרי איטום בפני גזים, לרבות גז ראדון. על מנת להשלים את החסר, יש לפתח ולאשר שיטות אלה בעתיד (לדוגמא, באמצעות הרחבת ת"י 4175 אשר קובע שיטות בבדיקת הראדון). לאחר מכן אפשר יהיה להסמיך את המעבדות לפעילות זו.

אחת השיטות המקובלות לבדיקת כושר ההגנה של חומרי האיטום בפני חדירת ראדון היא בבדיקת אורך דיפוזיה של ראדון דרך החומר, לפיה יתבצע הסקר המוצע (ראה תיאור שיטת הבדיקה בסעיף ט"ז). החוקר הראשי היה מן הראשונים בחקר אורך הדיפוזיה של ראדון בחומרי בנייה (לרבות, חומרי איטום) בארץ (פרבלוב & קובלר, 2002). יחד עם זאת, לשיטה שהוצעה (המבוססת על מתקן בדיקה מסוים) קיימים כמה חסרונות ומגבלות: (א) הבדיקה דורשת מספר ימים; (ב) קוטר הדוגמה צריך להיות 15 - 20 ס"מ לפחות; (ג) מקור הראדון אינו בהכרח מקור מכויל; כתוצאה מכך, תכונותיו יכולים להשתנות מבדיקה לבדיקה, ויש לקחת את זה בחשבון.

בהתחשב במגבלות הנ"ל, מחברי הדו"ח החליטו פיתחו מתקן בדיקה משוכלל המתבסס על שימוש במקור ראדון מכויל, תא מיוחד בעל נפח קטן יחסית כדי ליצור ריכוזי ראדון גבוהים בו תוך זמן קצר – של יממה אחת בלבד.

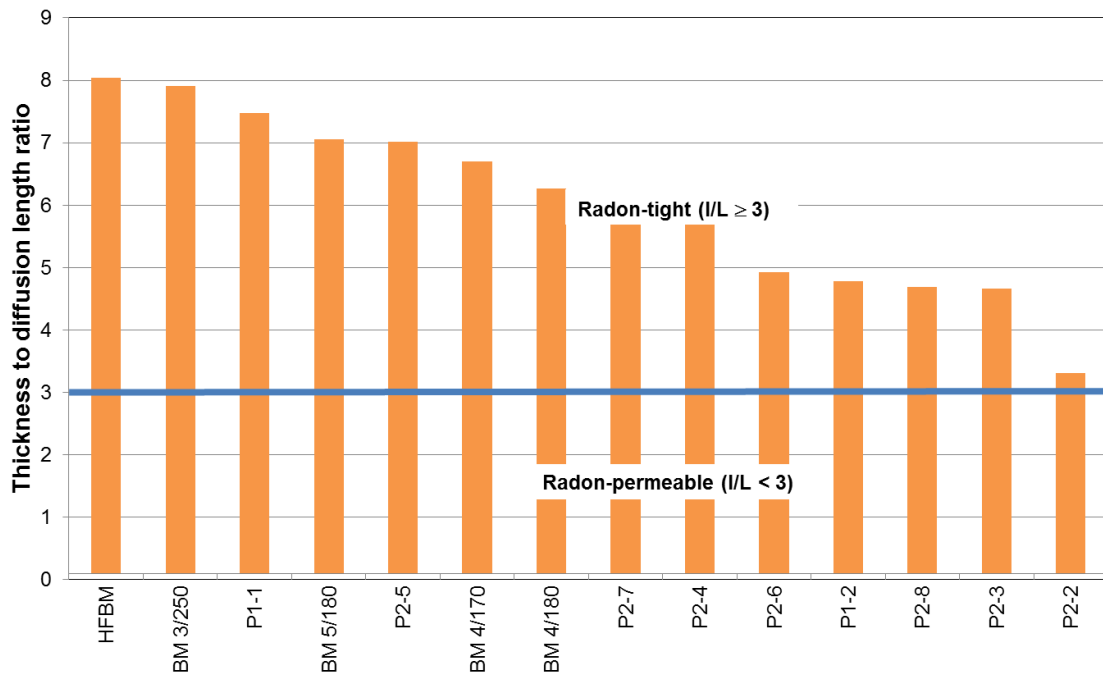
ניסויי דיפוזיית ראדון נעשו במכון הלאומי לחקר הבנייה, הפקולטה להנדסה אזרחית, הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל, חיפה. נעשה שימוש בקפסולה המכילה מקור פוליאיתילן מכויל מיוחד SRM 4973

המכיל סך של 500.6 בקרל של  $^{226}\text{Ra}$  עם יחס אמנציה בשיווי משקל של 0.877. המקור מיוצר ע"י NIST (National Institute of Standards and Technology, USA) כמקור מכויל לגז ראדון. המדידות התבצעו באמצעות גלאי הקרינה לגז ראדון מסוג "SUN Nuclear 1029 (CRM-Continuous Radon Monitor)". במחקר זה נבחנו תשעה סוגים שונים של ציפויים שניתן לעשות בהם שימוש לאיטום ראדון, בעלי עובי של בערך 0.7 מ"מ וחמישה חומרים ביטומניים שונים בעוביים של 3 – 5 מ"מ.

חישוב אורך דיפוזית ראדון בחומרי האיטום נעשה בהנחת התפלגות לינארית ולא לינארית של ריכוזי ראדון בחתך חומר האיטום הנבדק.

במחקר נתגלה ששיטת החישוב המבוססת על הנחת התפלגות ריכוזי ראדון לינארית בחתך המוצר סובלת מחסרונות הבאים: (א) חייבים למדוד במדויק את עובי המוצר, וזה לא קל כאשר למוצרי איטום אין עובי קבוע; (ב) ככל שעובי המוצר גדול יותר, גם השגיאה בדרך כלל גדולה יותר.

באיור 2 מוצגים יחסים בין עובי המוצר ואורך דיפוזיה של ראדון בו, כאשר מוצרי איטום בעלי היחס הגבוה מ-3 נחשבים למעשה כמוצרים בלתי חדירים לראדון.

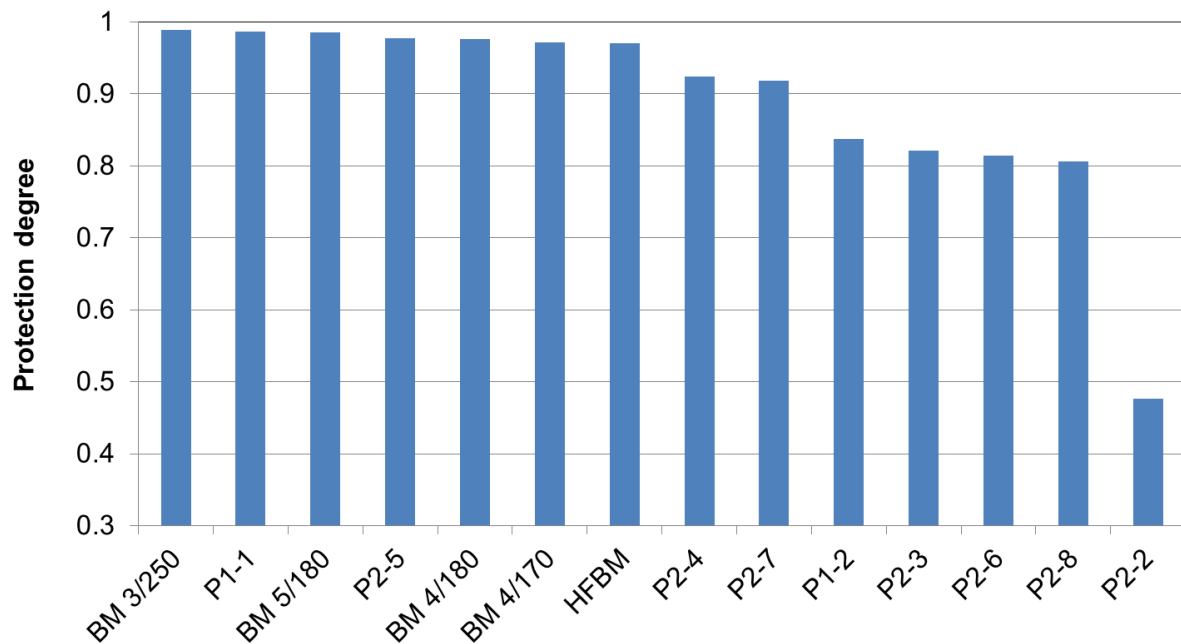


איור 2. יחסים בין עובי המוצר ואורך דיפוזיה של ראדון בו.

במקביל לערכים המחושבים של אורך דיפוזיה כתלות בזמן, שהראו פיזור יחסית רחב, הוצע להשתמש בפרמטר הנדסי חדש להערכת האיכויות המגינות של החומר – "רמת הגנה" (protection degree). השיטה

לחישוב רמת ההגנה פשוטה וניתן להמליץ עליה לקביעה פרקטית על איכויות הגנתיות של חומרי איטום כנגד חדירת הראדון בבדיקות מעבדה. פרמטר זה יכול לשרת ככלי מרכזי להערכת אטימות החומר לחדירות ראדון במבני מגורים.

באיור 3 מובאים ערכים של רמת הגנה בפני חדירת גז ראדון של חומרי איטום שונים אשר נבדקו בעבודה.



איור 3. רמת הגנה בפני חדירת גז ראדון של חומרי איטום אשר נבדקו בעבודה.

מחקר זה מראה כי לחומרים ביטומניים איכויות מצויינות כנגד חדירת ראדון. חלק מהציפויים נמצאו מעשית בלתי חדירים לראדון. הציפויים המכילים שכבות אקריליות מראים על איכויות הגנה טובות יותר, מאלה שאינם מכילים שכבות אלו.

יחד עם זאת, לא נחקרה בעבודה יציבות בזמן של התנגדות חומרי איטום שונים בפני גז ראדון, למרות שהתוצאות הראשונות של המחקר כבר הצביעו על נטייה לעליה של ערכי מקדם הדיפוזיה ושל אורך הדיפוזיה עם הזמן. כמו כן, בפרויקט הנוכחי לא נחקרה השפעתם של תנאי השפה ושל תנאי הסביבה על אורך דיפוזיה של ראדון בהם. הנושא דורש מחקר מעמיק נפרד.

התוצאות שהתקבלו במחקר הנוכחי יכולות לשמש כבסיס לחקירה נוספת של האיכויות המגינות של חומרי איטום אחרים.

**מקורות מידע**

פרבלוב, א', & קובלר, ק'. (2002). *בעיית הגז הראדון-222 בבניית מגורים*. חיפה: המכון הלאומי לחקר הבנייה, טכניון.

קובלר, ק', & פרבלוב, א'. (2004). *עקרונות הגנת בנייני מגורים בפני גז הראדון*. חיפה: המכון הלאומי לחקר הבנייה, טכניון.

קובלר, ק', לויט, א', & פרבלוב, א'. (2005). *המדריך להגנת בניינים חדשים בפני גז ראדון*. חיפה: המכון הלאומי לחקר הבנייה, טכניון.