

קרינה מייננת טבעית וראדון בממ"דים: ממצאי מחקר משותף טכניון – ממ"ג שורק

פרופ"ח קוסטה קובלר¹, פרופ"ח רחל בקר¹, גוסטבו חקין²

¹המכון הלאומי לחקר הבנייה, הפקולטה להנדסה אזרחית
וסביבתית, הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל

²המרכז למחקר גרעיני נחל שורק

הכרת תודה

- ד"ר ז'אן קוך
- גב' ליאור אפשטיין
- משרד הבינוי והשיכון
- מנהלת אפר פחם
- חברי ועדות הליווי
- דר' יאיר שמאי
- אינג' מר מיכאל
- אינג' רן מועלם
- אינג' נדב תימר
- מר זהר יונגרייס
- מר יואב יפה
- מר זכר פרילוצקי
- דר' אילה רונן
- מר מורדי חוטובלי
- מר נדב גליד
- מר שי כהן

תכנית ההרצאה

- מבוא
- מטרת המחקר
- בדיקות מעבדה
- בדיקות בבניין
- סיכום

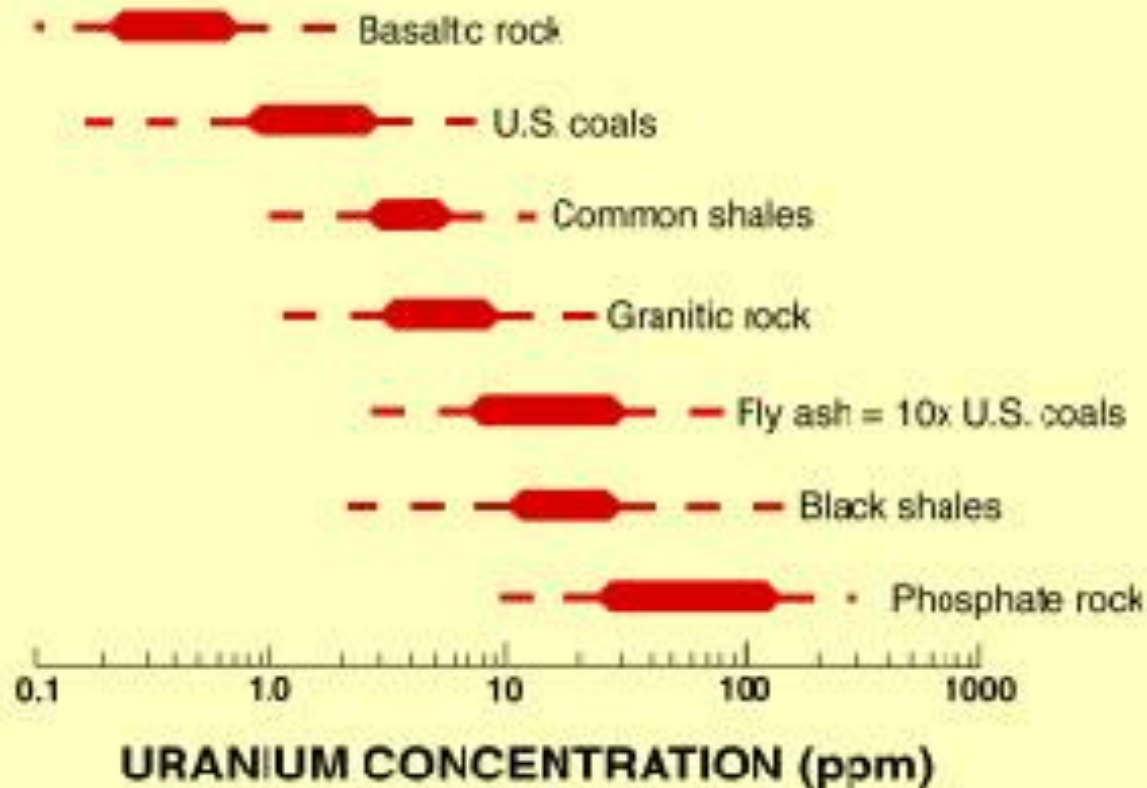
NATURAL RADIONUCLIDES

- The world-wide average concentrations of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K in the earth's crust:
40, 40 and 400 Bq/kg [RP-112 1999]

ENHANCED RADIOACTIVITY OF BY-PRODUCTS USED FOR CONSTRUCTION

- Construction industry uses large amounts of by-products from other industries with enhanced contents of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K
 - Phosphogypsum
 - Blast-furnace slag
 - Coal fly ash
 - Peat fly ash
 - Oil shale ash
- } Why ash ?

URANIUM CONCENTRATION IN COAL FLY ASH AND COMMON ROCKS





ACTIVITY CONCENTRATIONS IN COMMON BUILDING MATERIALS AND INDUSTRIAL BY-PRODUCTS IN THE EU

Material	Typical activity concentration (Bq/kg)				Maximum activity concentration (Bq/kg)			
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	Ra-equivalent	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	Ra-equivalent
Most common building materials (may include by-products)								
Concrete	40	30	400	114	240	190	1600	635
Aerated and light-weight concrete	60	40	430	150	2600	190	1600	2995
Clay (red) bricks	50	50	670	173	200	200	2000	640
Sand-lime bricks	10	10	330	50	25	30	700	122
Natural building stones	60	60	640	195	500	310	4000	1251
Natural gypsum	10	10	80	30	70	100	200	228
Most common industrial by-products used in building materials								
Phosphogypsum	390	20	60	423	1100	160	300	1352
Blast furnace slag	270	70	240	388	2100	340	1000	2663
Coal fly ash	180	100	650	373	1100	300	1500	1644

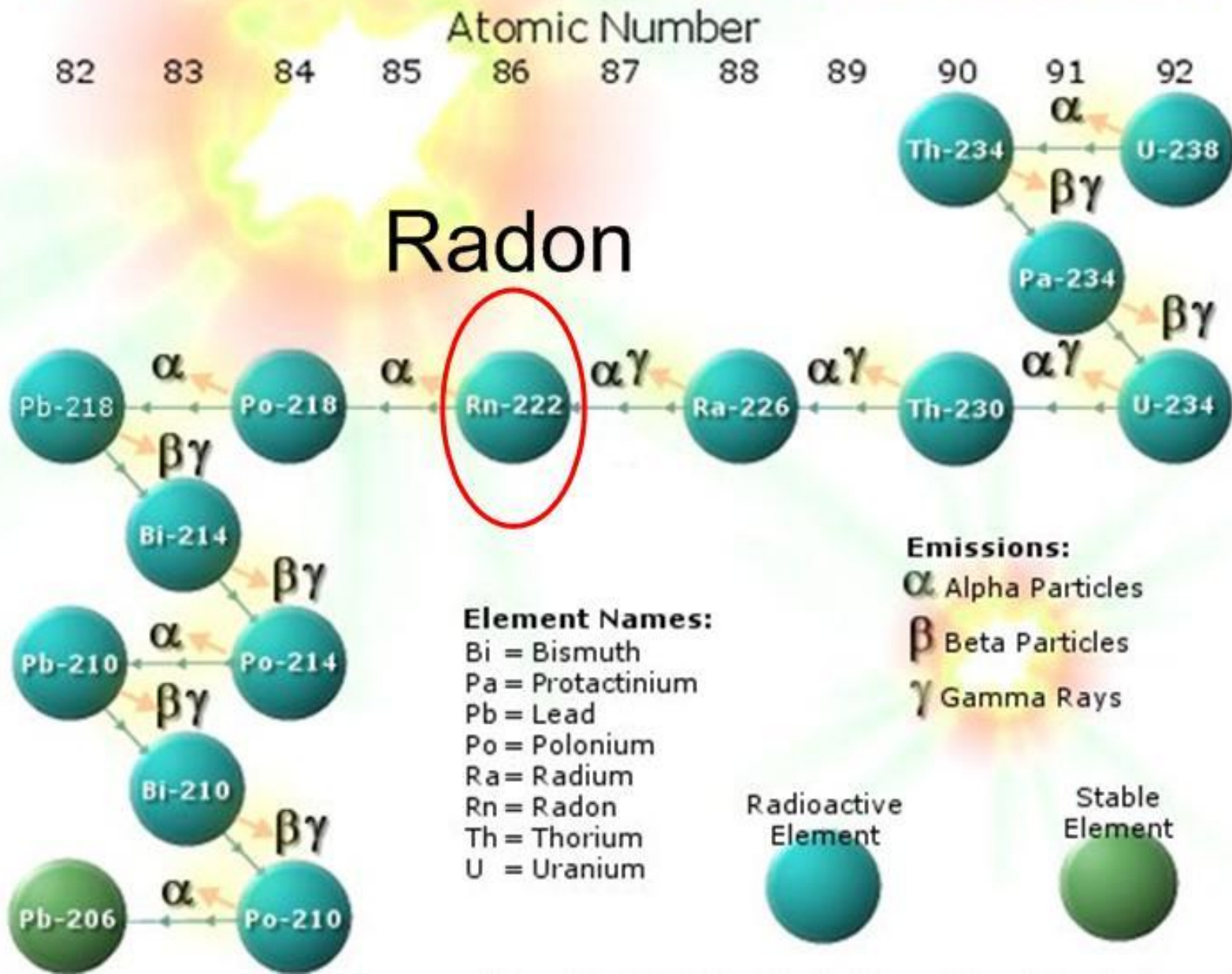
ROLE OF FLY ASH

- FA replaces part of cement
- Environmental benefits:
 - CO₂ reduction
 - Energy demand reduction
 - By-product utilization
- Economical benefits:
 - Cheaper cement

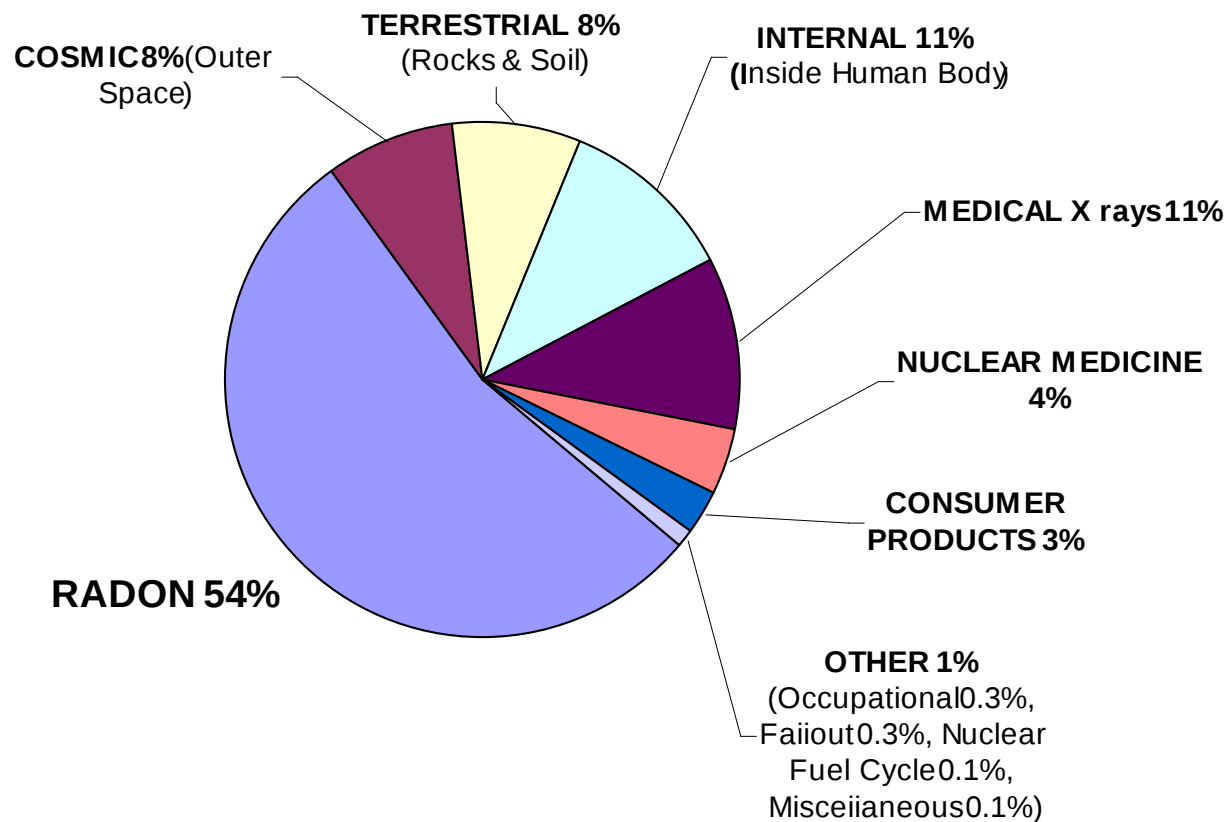
COAL FLY ASH

- Radiological considerations:
 - When used as the main component of building material, may result in enhanced exposure to γ -radiation
 - Radon emanation power is low
 - Radon emanation of FA concrete?

Uranium²³⁸ Decay Chain



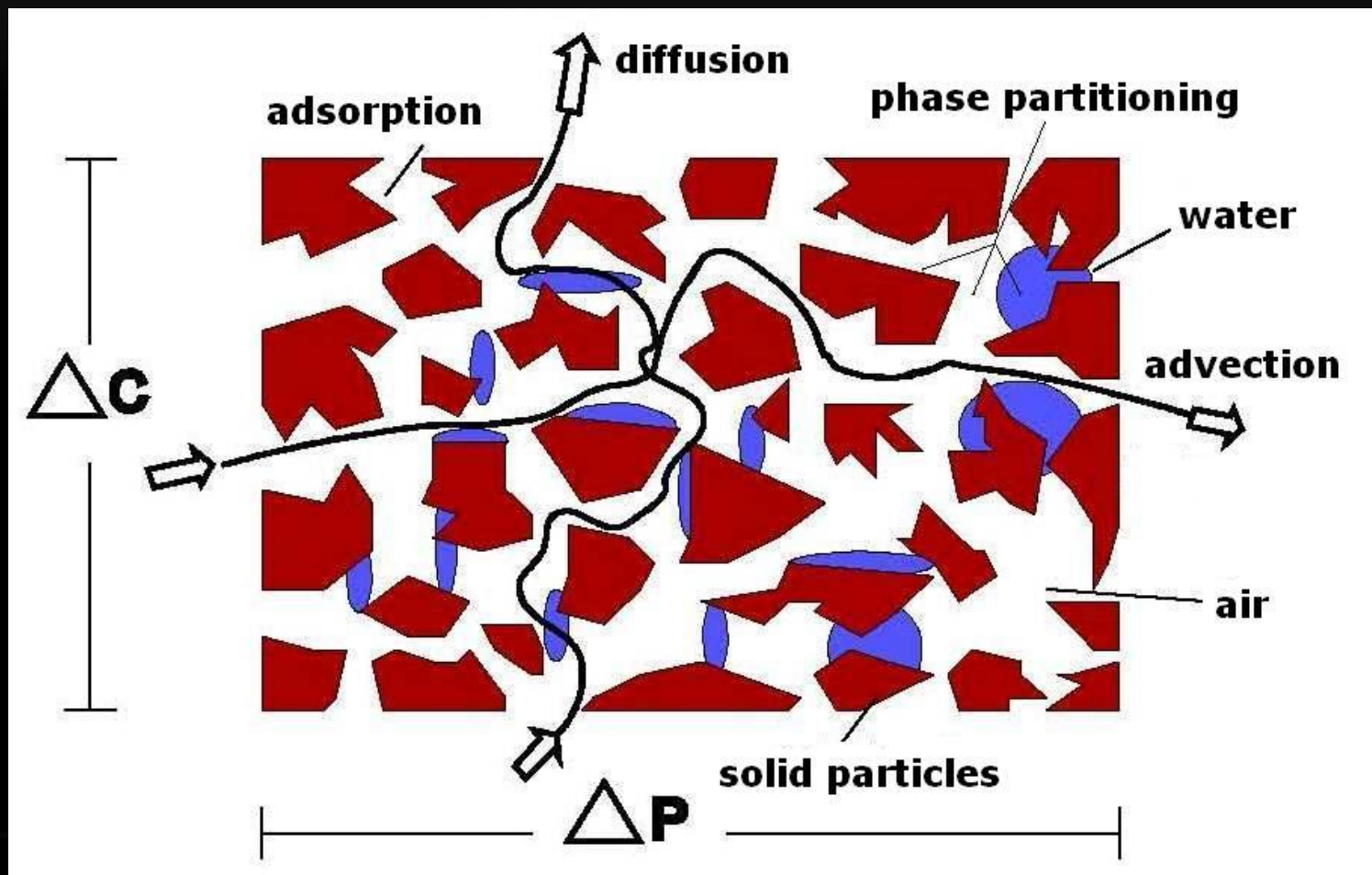
54% OF HEALTH PROBLEMS FROM RADIOACTIVITY IS CAUSED BY RADON



RADIATION EXPOSURE

- External (direct gamma radiation)
- Internal (inhalation of radon and its progeny, mainly)

RADON TRANSPORT TERMINOLOGY



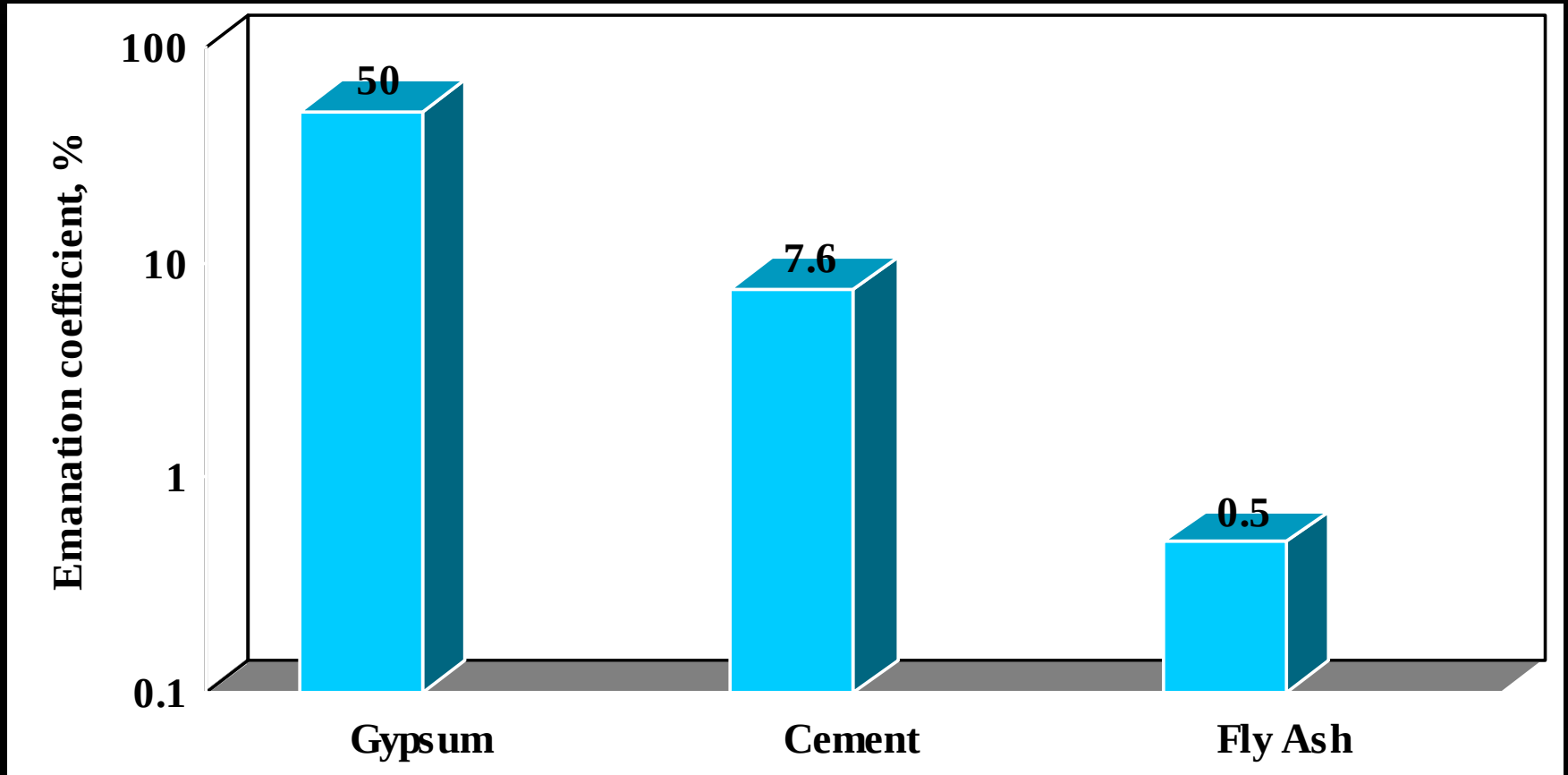
RADON TRANSPORT TERMINOLOGY

- The ratio of produced radon to escaped radon = *emanation coefficient*
- *Radon exhalation rate* - the macroscopic parameter, contains the combined information on radon generation and transport

EMANATION RATIO DEPENDS ON:

- Content of ^{226}Ra (radon parent)
- Microstructure, micro and nano-porosity
- Specific surface area
- Temperature
- Moisture

EMANATION COEFFICIENT



שימושי אפר פחם בארץ

- השימוש באפר פחם בתעשיית הבנייה בישראל גובר עם השנים, ועל פי מנהלת אפר הפחם בשנת 2008 הגיע ל-
1,400,000 טון בשנת 2011
- תחליף לחלק מהקלינקר בצמנט פורטלנד
- מחליף חלקי לחול בבטון

מטרת המחקר

- לברר האם הוספת אפר פחם לבטון עלולה להשפיע לרעה על החשיפה לקרינה של דיירי בניינים



מדוע נבחרו חדרי ממ"ד בקומות גבוהות לחקירת השפעת אפר הפחם על מאפייני הקרינה

- בנויים מקירות ותקרות עבים מבטון, כוללים את כמויות הבטון והאפר הגדולות בדירה
- כוללים חלון ודלת פלדה בעלי אטימות גבוהה במיוחד לאוויר
- משמשים כחדרי שינה לילדים, חדרי עבודה, חדרי משחקים
- מועדים יותר מכל חדר אחר לחשיפה לראדון כאשר שוהים בהם זמן ממושך

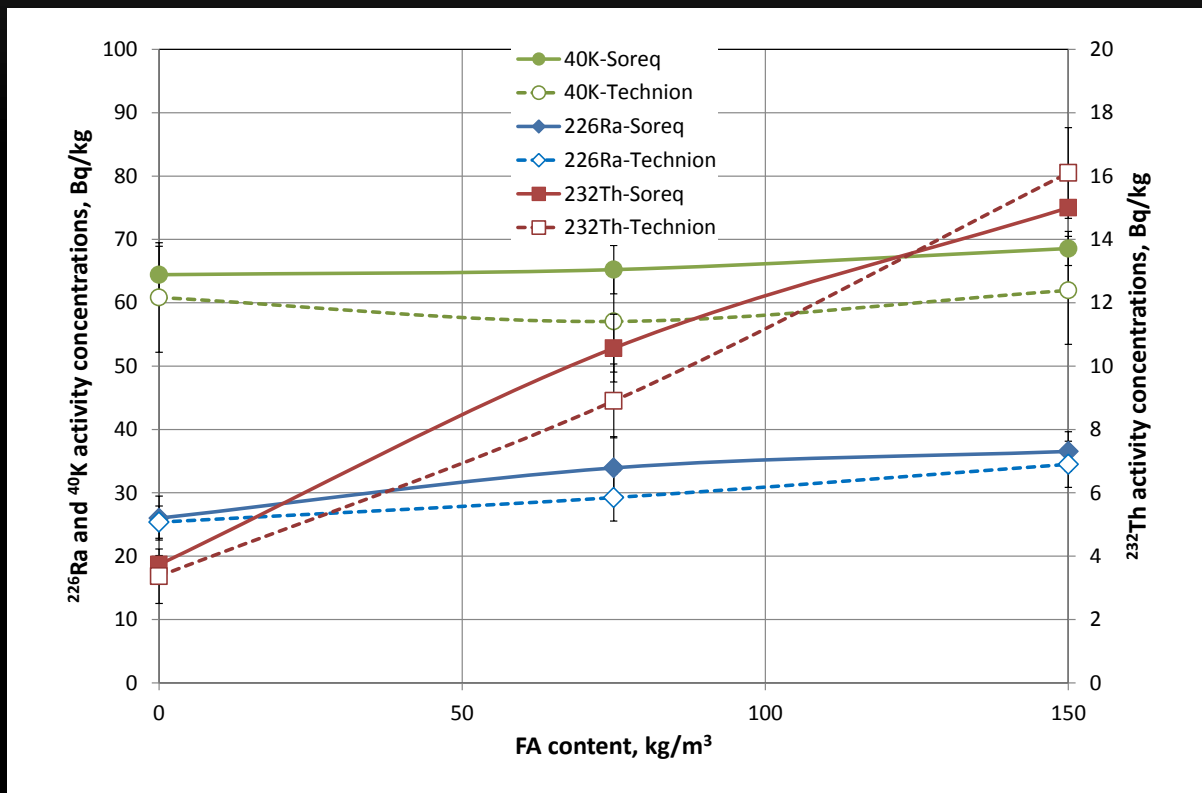
הממצאים העיקריים – בדיקות מעבדה

- מקדם האמנציה מבטון ללא אפר גבוה יותר לעומת בטון עם 75 ו- 150 ק"ג אפר למ"ק בכ- 25%-7, ו- 46%-10, בהתאמה
- אשפרה לקויה גורמת להפחתה גדולה יותר במקדם האמנציה ב- 46%-90 לעומת הערכים שהתקבלו באשפרה תקנית
- שיטות החישוב משפיעות על ערכי מקדם האמנציה ועל ערכי קצב השפיעה; שיטת הרגרסיה הליניארית נותנת תוצאות מעט גבוהות יותר מאשר שיטת הרגרסיה הלא-ליניארית
- לגבי קצב השפיעה, ההבדלים בין אוכלוסיית הבטון עם וללא אפר הפחם אינם מובהקים

בדיקות מעבדה: בדיקות שפיעת ראדון מבטון לפי שיטת תא אטום



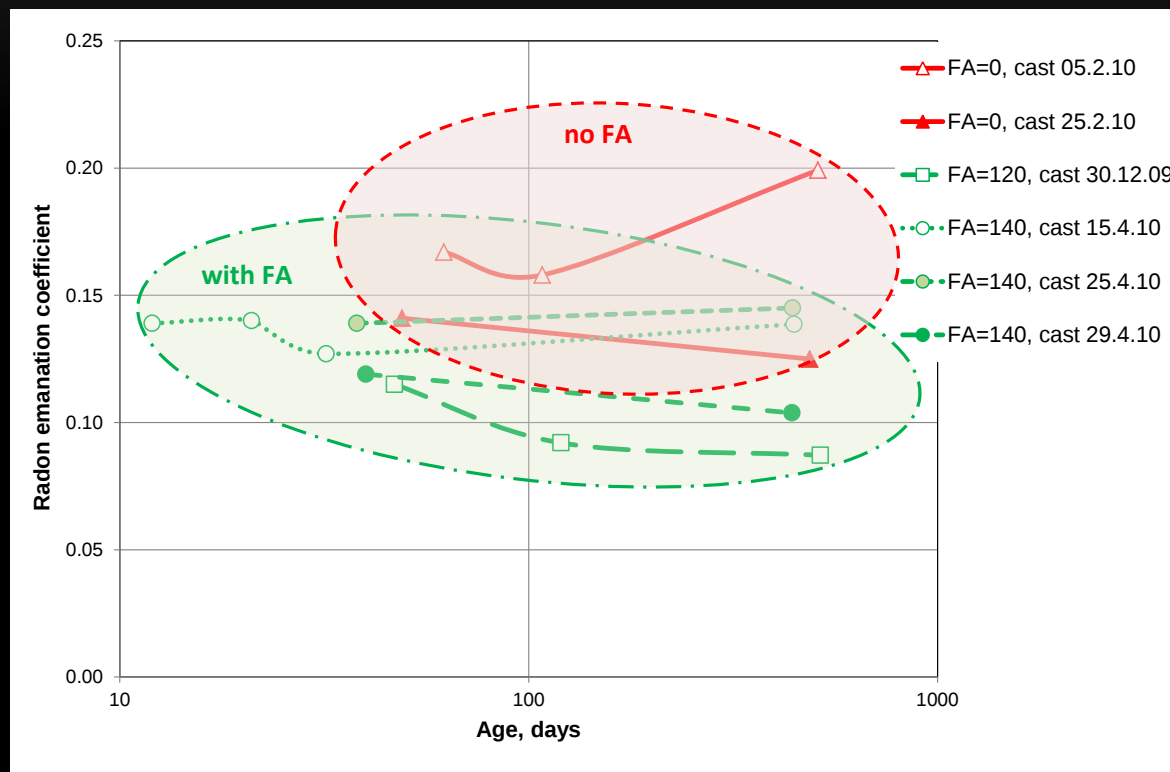
שינוי בריכוז הרדיונוקלים כתלות בתכולת אפר הפחם בתערובת



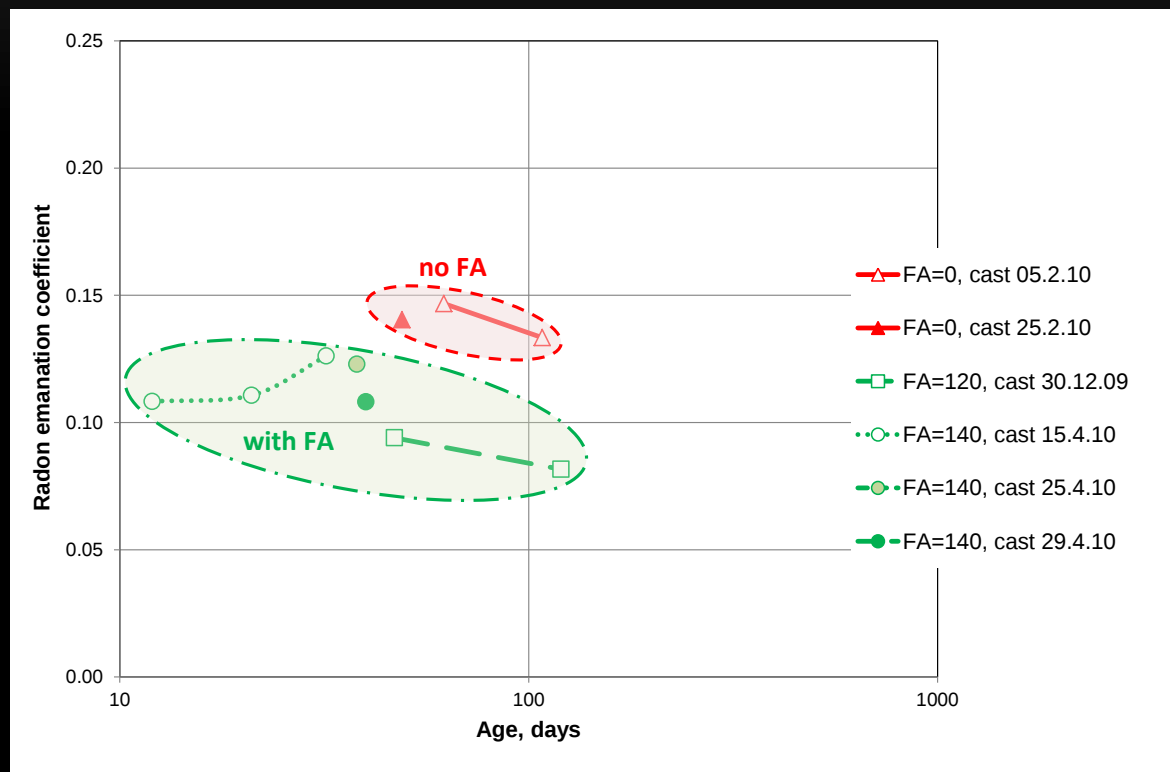
קצב שפיעת הראדון ומקדם האמנציה מהבטונים היצוקים באתר (הבדיקות נעשו בממ"ג שורק על מנסרות בטון חשופות)

גיל [d]	e [%]	*E _{0w} [Bq h ⁻¹ m ⁻²]	E _{0,av} [Bq h ⁻¹ m ⁻²]	תאריך יציקה	אפר פחם [ק"ג/מ"ק]	מס' דוגמא	קומה
94	11.8±0.88	6.50	1.73±0.12	30/12/09	120	EX7363	12
58	11.9±0.89	6.52	1.73±0.12	30/12/09	120	EX7364	12
83	12.1±0.90	6.50	1.73±0.12	30/12/09	120	EX7365	12
	11.9±0.15	6.51	1.73±0.00	מומצע וסטיית תקן			
60	19.1±1.65	8.97	2.39±0.17	5/2/10	0	EX7369	15
60	17.3±1.52	8.76	2.33±0.17	5/2/10	0	EX7370	15
55	19.5±1.70	8.85	2.35±0.17	5/2/10	0	EX7371	15
	18.6±1.17	8.86	2.35±0.03				
44	21.7±1.69	8.81	2.34±0.17	25/2/10	0	EX7415	15
44	21.3±1.58	9.24	2.46±0.17	25/2/10	0	EX7416	15
	21.5±0.28	9.03	2.40±0.08	מומצע וסטיית תקן			
76	18.8±1.92	7.81	2.08±0.17	25/4/10	140	EX7706	19
76	16.3±1.74	7.35	1.95±0.17	25/4/10	140	EX7707	19
	17.6±1.77	7.58	2.02±0.09	מומצע וסטיית תקן			

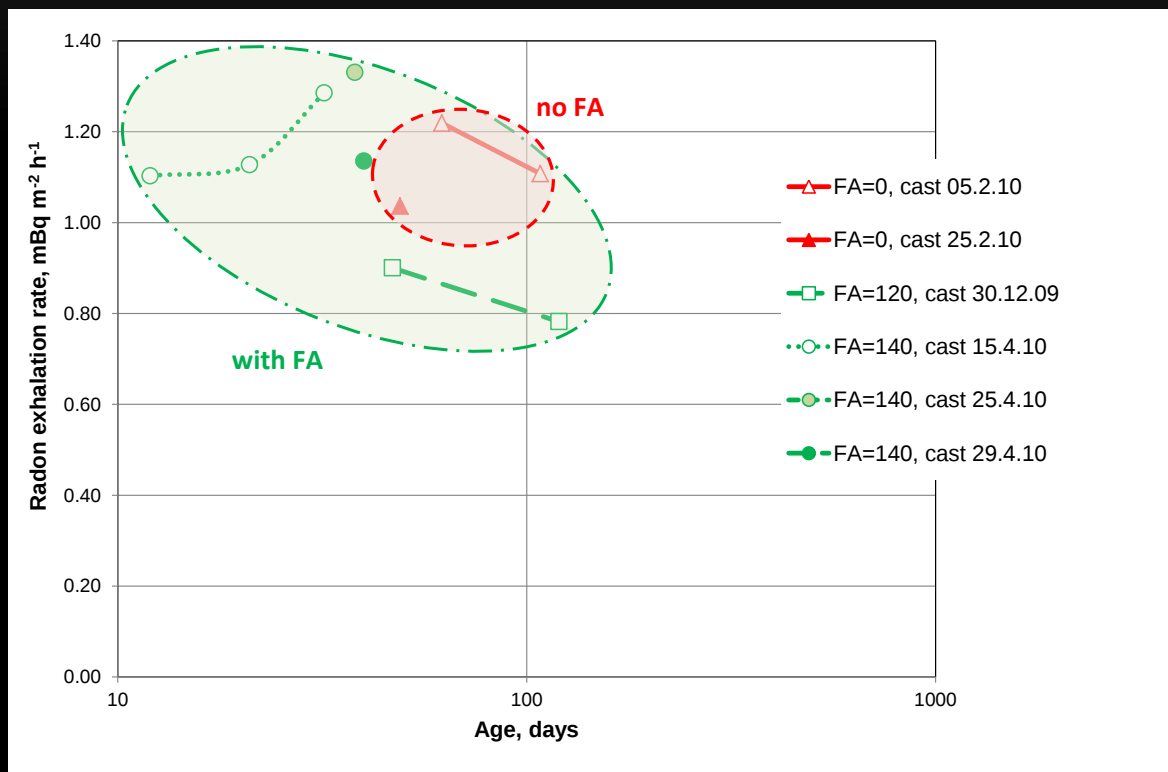
בדיקות מעבדה: מקדם אמנציה של בטונים עם וללא אפר פחם היצוקים במפעל, כנגד גיל הבדיקה, על פי תוצאות בדיקת הקוביות במעבדת הטכניון ועל פי חישוב באמצעות רגרסיה ליניארית



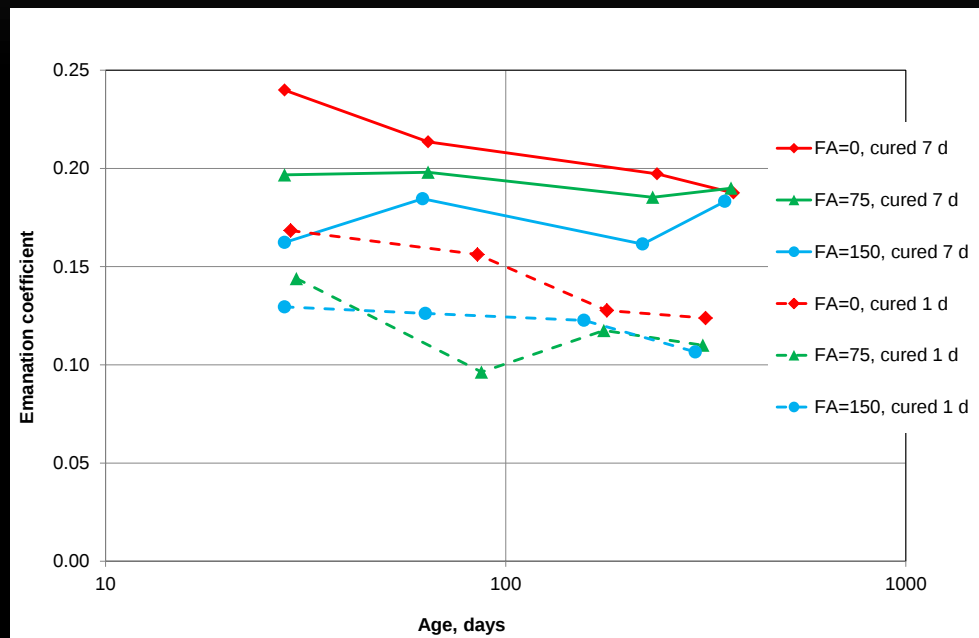
מקדם אמנציה של בטונים עם וללא אפר פחם היצוקים במפעל, כנגד גיל הבדיקה, על פי תוצאות בדיקת הקוביות במעבדת הטכניון ועל פי חישוב באמצעות רגרסיה לא-ליניארית

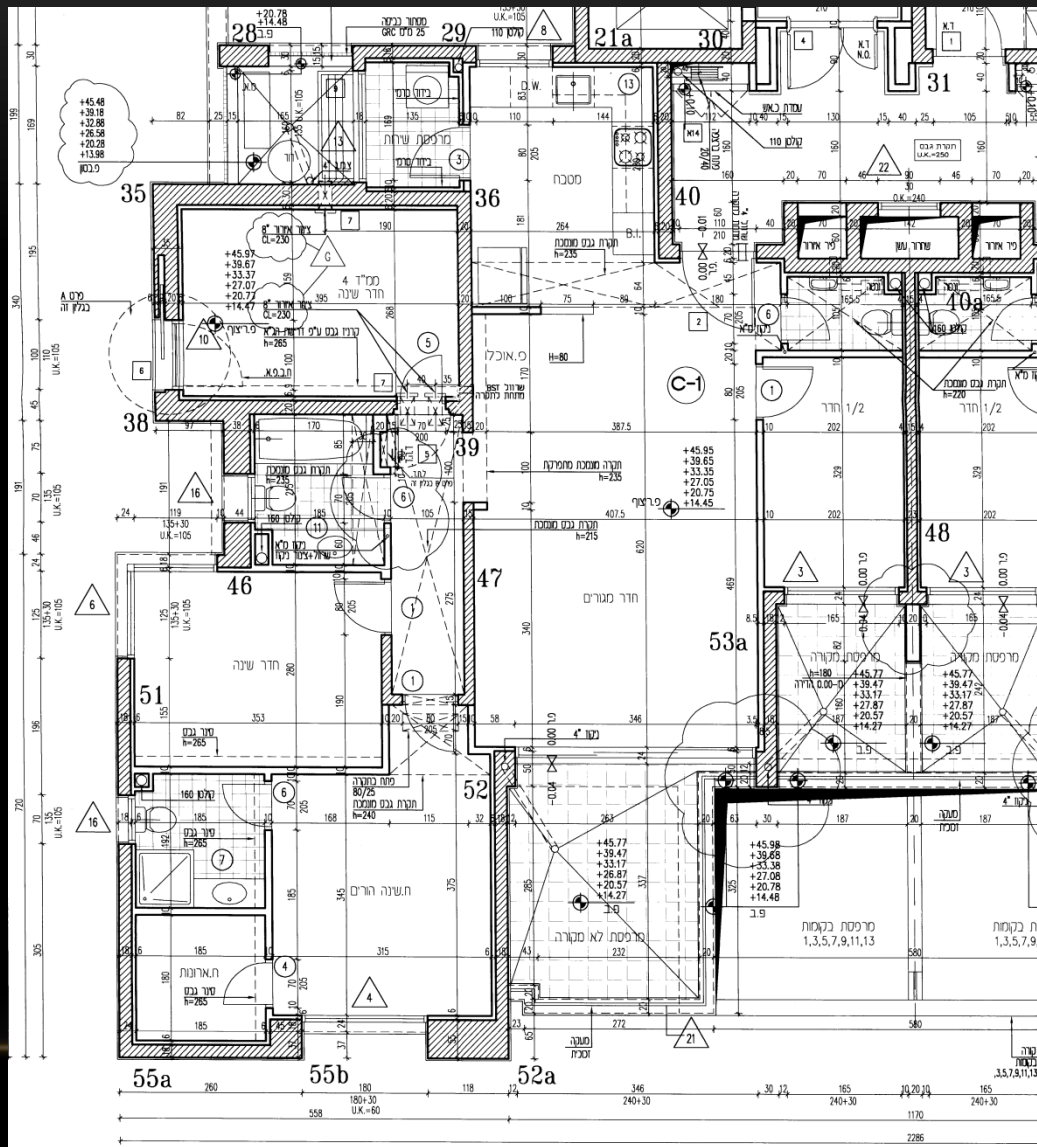


קצב שפיעת הראדון של בטונים עם וללא אפר פחם היצוקים במפעל, כנגד גיל הבדיקה, על פי תוצאות בדיקת הקוביות במעבדת הטכניון ועל פי חישוב באמצעות רגרסיה לא-ליניארית



מקדם אמנציה של קוביות חשופות, אשר הוכנו במעבדה מתערובות הבטון המכילות 0, 75 ו-150 ק"ג למ"ק של אפר דרום-אפריקאי (LABCRETE), עברו אשפורה תקנית (7 ימים) ואשפורה "לקויה" (יום אחד בלבד) ונבדקו בגילאים שונים (עד כשנה); הערכים חושבו באמצעות רגרסיה ליניארית





מידה בבניין





הקצב הממוצע של פליטת הראדון האפקטיבית כפי שחושב ע"י ממ"ג שורק בשתי השיטות בממ"ד המזרחי והמערבי בקומה 15 (בטון ללא אפר)

מס'	ממ"ד	התחלה	סיום	משך המידה	E_{0slope} [Bq/m ² h]	E_0 [Bq/m ² h]	$\lambda\Delta$ [h ⁻¹]
3A	מזרחי	28/4/10 11:00	2/5/10 10:00	3.8	8.72±0.70	5.98±2.39	2.50E-04
3A(2)	מזרחי	2/5/10 14:00	9/5/10 10:00	6.8	7.77±0.34	8.49±0.67	5.50E-04
3A(3)	מזרחי	9/5/10 14:00	13/5/10 8:00	4.0	8.30±1.11	8.19±0.16	3.50E-03
	ממוצע				8.26±0.48	7.55±1.19	
4A	מערבי	28/4/10 11:00	9/5/10 10:00	10.9	9.43±0.75	8.10±3.24	4.70E-03
4A(2)	מערבי	9/5/10 14:00	13/5/10 8:00	3.7	4.60±1.51	4.40±2.02	6.00E-04
	ממוצע				7.02	6.25	



הקצב הממוצע של פליטת הראדון האפקטיבית כפי שחושב ע"י ממ"ג שורק בשתי השיטות בממ"ד המזרחי והמערבי בקומה 19 (בטון עם אפר – 140 ק"ג למ"ק)

מס'	ממ"ד	התחלה	סיום	משך המידה [ימים]	E_{0slope} [Bq/m ² h]	E_0 [Bq/m ² h]	$\lambda\Delta$ [h ⁻¹]
5A	מזרחי	23/6/10 9:00	27/6/10 10:00	4.0	7.52±0.66	8.17±0.98	1.7E-02
5A(2)	מזרחי	27/6/10 10:00	1/7/10 14:00	4.2	7.64±1.22	8.78±1.05	1.0E-02
5A(3)	מזרחי	1/7/10 14:00	28/3/10 7:00	4.8	7.17±1.08	9.12±3.10	2.0E-02
	ממוצע				7.44±0.24	8.69±0.48%	
6A	מערבי	23/6/10 9:00	27/6/10 10:00	4.0	6.85±1.18	7.22±1.30	8.0E-03
6A(2)	מערבי	27/6/10 10:00	1/7/10 14:00	4.2	6.29±1.51	5.51±0.99	1.7E-03
6A(3)	מערבי	1/7/10 14:00	28/3/10 7:00	4.8	4.94±1.48	4.93±0.40	1.3E-03
	ממוצע				6.03±0.98	5.89±1.19	



קצב תחלופת האוויר כפי שהתקבל מניתוח דעיכת גז SF₆ במספר שיטות

טווח N, כולל שגיאות (h ⁻¹)	תחלופת אוויר לפי רגרסיה (h ⁻¹)						דלת	חלון	מצב סגירה
	ממ"ד מערבי			ממ"ד מזרחי					
	טכניון שיטה (2)	טכניון שיטה (1)	ממ"ג שורק	טכניון שיטה (2)	טכניון שיטה (1)	ממ"ג שורק			
9.6E-04 -7.1E-03	7.0E-03 (6.952-7.057)E-03	6.7E-03 (6.574-6.769)E-03	7.1E-03	12.0E-04 (11.92-12.06)E-04	9.7E-04 (9.59-9.82)E-04	9.8E-04	אטומה	אטום	A
0.13 -0.26	0.25 (0.2456-0.249)	0.26 (0.2563-0.2605)	0.26	0.13 (0.1314-0.1329)	0.13 (0.1253-0.1275)	0.14	סגורה	אטום	B1
	0.25 (0.2484-0.2522)	0.26 (0.2568-0.2618)	0.26	0.14 (0.143-0.1438)	0.14 (0.1378-0.1388)	0.13	סגורה	אטום	B2
1.2 -3.1	2.65 (2.602-2.701)	2.75 (2.686-2.810)	2.70	1.49 (1.446-1.525)	1.28 (1.242-1.323)	0.91	סגורה	דריי קיפ	C1
	2.87 (2.794-2.936)	2.99 (2.900-3.081)	2.94	1.54 (1.492-1.579)	1.24 (1.208-1.266)	1.11	סגורה	דריי קיפ	C2
10.7 -20.9	13.86 (13.21-14.52)	13.77 (12.89-14.66)	12.50	18.60 (16.31-20.89)	16.69 (13.82-19.56)	10.00	פתוחה	אטום	D1
	15.07 (13.59-16.56)	14.97 (12.97-16.98)	14.29	13.27 (12.19-14.35)	12.03 (10.71-13.34)	9.09	פתוחה	אטום	D2
4.6 -14.0	5.94 (5.678-6.192)	6.21 (5.883-6.543)	6.25	5.41 (5.232-5.585)	4.80 (4.621-4.958)	3.23	סגורה	פתוח	E1
	12.07 (11.09-13.06)	12.75 (11.53-13.97)	12.50	5.65 (5.350-5.949)	4.92 (4.601-5.242)	3.70	סגורה	פתוח	E2
15.9 -51.1	44.14 (39.77-48.51)	44.38 (37.71-51.05)	20.00	-	-		שליש פ'	דריי קיפ	F1
	29.79 (25.49-34.09)	30.38 (24.37-36.39)	25.00	17.39 (16.51-18.28)	17.13 (15.85-18.40)	11.11	שליש פ'	דריי קיפ	F2
20.9 -104.6	62.74 (20.90-104.6)	[63.15] (-141.7-268.0)	41.67	41.00 (36.97-45.03)	40.31 (34.92-45.71)	25.00	שליש פ'	פתוח	G1
	56.56	[57.00]	43.48	58.57	56.64	33.33	שליש פ'	פתוח	G2

הממצאים העיקריים – בדיקות בבניין

- קצב שפיעת הראדון מבטון ללא אפר גבוה יותר לעומת בטון עם אפר (בכ- 18-37%), כאשר הפער במקדס האמנציה הוא כ- 13-66%. יחד עם זאת, צורת החישוב של קצב שפיעת הראדון עלולה להשפיע על דיוק החישוב עד כ- 25%
- לעומת זאת, מתוצאות בדיקת השפיעה בממ"דים התקבל שלכמויות אפר הפחם בבטון בבניין הנבדק (מ-0 עד 140 ק"ג למ"ק) לא הייתה השפעה מובהקת על קצב השפיעה החופשית שנצפתה בפועל ממעטפת הממ"דים השונים

הממצאים העיקריים – בדיקות בבניין

- קצב השפיעה במדידות: 5.9 – 11.7 בקרל למ"ר לשעה
- קצב השפיעה הצפוי כפי שחושב מתוך התוצאות של בדיקות הבטונים: 6.5 – 9.2 בקרל למ"ר לשעה
- הפיזור הכללי של התוצאות, עקב ריבוי הגורמים הבלתי מבוקרים, כולל ההשפעה של שיטת החישוב, היה גדול יותר מטווח ההשפעה של נוכחות אפר הפחם בבטון

הממצאים העיקריים – הערכת הסיכון

- הערכה שמרנית של ריכוז הראדון הצפוי בממ"דים אופייניים בתנאי שירות רגילים תמידיים הנמשכים 9 שעות ברציפות הראתה, שאפילו אם תחלופת האוויר בתקופה זו היא **0.1** לשעה וקצב שפיעת הראדון מכל אלמנטי המעטפת 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 לשנה
- שהתנאים האלה מהווים מצב גבולי נדיר

הממצאים העיקריים – הערכת הסיכון

- כאשר תחלופת האוויר אינה קטנה מ- **0.25** לשעה, 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 לא עלה על **130** בקרל למ"ק, דבר שאושר גם ע"י כל המדידות בבניין במצב זה

סיכום

- שפיעת ראדון מבטון (על כל סוגיו המקובלים בישראל, בין אם הוא כולל אפר פחם ובין אם לא) לא עלולה לגרום לריכוז ראדון העולה על המותר, 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 FA, כמחליף חול ו/או צמנט, בשעורים המקובלים בישראל (עד לכ-140 ק"ג למ"ק) אינה מגדילה באופן מובהק את החשיפה לגז ראדון

**Thank
you!**

