



שבי"ק 3/98

שורק

הועדה לאנוריה אטומית

המרכז למחקר גרעיני נחל - שורק

יבנה 81800

אפר פחם - ההיבטים הרדיולוגיים של יסומו

כתוסף לבטון.

ממצאי מדידות במבנים מועשרי אפר פחם

מאת:

מנחם מרגליות, עובדיה אבן, גוסטבו חקין ושמואל שמש.

שטח בטיחות קרינה

בדיקה ואישור: יאיר שמאי

ממייג שורק

סיון תשנ"ח

יוני 1998

חוכן עפ"י חזמנת מנהלת הפחם



מבוא:

בארץ מופק חלק נכבד מן החשמל ע"י תחנות כוח המופעלות בשריפת פחם. בשנת האחרונה לבזה נעשה שימוש בכ- 9 מליון טון פחם. תהליך זה מפיק - כתוצר לוואי בלוגי נמנע - כמויות ניכרות של אפר פחם, ובתנאי העבודה הנוכחיים של תחנות הכוח נותרים כ- 11.5% מכמותו המקורית של הפחם כאפר. כ- 90% מכמות זו, כלומר, כ- 930,000 טון, הם אפר מרחף, שהוא בר שימוש בתעשיית הבניה כתוסף לבטון ומוצריו, בעיקר כתחליף לחול זק-גרגר. מאחר והצטברות כמויות כה גדולות של אפר פחם מהווה בעיה סביבתית משמעותית, ומאחר והמשך השימוש הנרחב בחול לצרכי בניה פוגע קשות בסביבה, הועלה הרעיון להחליף, ולו חלקית, את החול באפר הפחם. מספר גופים מסחריים הצליחו לייצר בטון ומוצריו תוך שימוש באפר פחם, והמוצרים נמצאו ראויים לשימוש מבחינת תכונותיהם המכניות.

עם זאת התעוררה שאלה לגבי השלכות הרדיולוגיות של ישום הרעיון האמור, עקב נוכחות רדיואיזוטופים טבעיים בפחם, וממילא גם באפר הפחם: הפחם מכיל חומרים רדיואקטיביים בריכוזים הדומים למזי לקיים במחצבים אחרים. תהליך שריפת הפחם כרוך בחמצון הרכיב האורגני של הפחם ובסילוקו כגז, והאפר הנותר מייצג למעשה (כמעט) רק את החלק האנאורגני. מאחר והרדיואיזוטופים השכיחים בטבע (אשלגן-40 ושרשרות הדעיכה של אורניום 238 ותוריום 232) מופיעים כאנאורגניים, חרי שכמעט כל כמותם נותרת באפר, וריכוזם בו גדול פי 9 בקירוב מזה שבפחם הטבעי. הוטפת אפר פחם לחומרים ומוצרים המשמשים לבניה כרוכה איפוא - פוטנציאלית לפחות - בהעלאת כמות הרדיואיזוטופים בסביבתנו המיידית של האדם זייר המבנים וממילא - בהעלאת מידת חשיפתו לקרינה מייננת הנפלטת מרדיואיזוטופים אלה. משום כך מצאו אגף הרישוי בועדה לאנרגיה אטומית והמשרד לאיכות הסביבה לנכון לבדוק את מידת העלאת החשיפה של זיירי מבנים העשויים ממוצרי בטון מועשרי אפר פחם.

מבין הרדיואיזוטופים הטבעיים המצויים באפר הפחם, בולט במיוחד הראדון-222 (המופיע כרכיב בשרשרות הדעיכה של האורניום 238). רדיואיזוטופ זה תורם לחשיפת האדם בשני נתיבים חליפיים:

- הראדון מתפרק בעצמו לסדרה של רדיואיזוטופים הפולטים קרינה מייננת. בנות סדרה זו הנוותרות בתוך קירות המבנה, תורמות לחשיפת האדם באמצעות קרינת גמא (קרינה בעלת כושר חדירה גבוה) הנפלטת מן הקירות.
- הראדון עצמו הוא גז אציל ועל כן בעל יכולת נדידה חופשית למזי בתוך קירות המבנה. חלק מן הראדון עשוי איפוא להיפלט אל תוך חלל החדר. במצב זה פוטנציאל החשיפה הוא בעל

אופי שונה: הראדון וסזירות בנוותו מרחפים באויר החדר וגורמים לחשיפת מערכת הנשימה של שוכני החדר, בעיקר באמצעות קרינת האלפא הנפלטת מחלק מבנות סדרה זו. לקרינת האלפא יכולת גבוהה לגרימת נזקים ביולוגיים והחשיפה לראדון הוכחה מעל כל ספק טביר כגורם לסרטן הריאה.

ועזוז מומחים בראשותו של די"ר א. שטרן (אגף הרישוי -הואי"א) גיבשה מתווה למדידות שנועד להעריך מדידות את תוספת מנת הקרינה לשוכני מבנים מועשרי אפר פחם, תוך שימת דגש על כפילות נתיבי החשיפה (קרינת גמא הנפלטת ישירות מן הקירות וחשיפת מערכת הנשימה ע"י בנות הראדון).

מתווה לעריכת ניטויים אלה גובש במהלך ישיבות הועדה האמורה.

קוויו העיקריים של המתווה להלן:

- מדידות ריכוז הרדיואיוטופים בקירות המבנה
 - מדידות רמת האיטום של המבנה (ע"י גז עקיבה).
 - מדידת ריכוז הראדון בחלל המבנה.
 - מדידת תכולת הלחות של חמרי המבנה (ע"י יבוש והשוואת משקלים).
- לצרכי השוואה בוצעו המדידות בארבעה אתרים זהים בקירוב מבחינה מבנית (ארבעה חדרים המשמשים כמרחבי מגן דירתיים - ממ"ז), כאשר שניים מהם עשויים בטון מועשר אפר פחם, בעוד השניים האחרים עשויים מבטון רגיל.
- המידע לגבי הרכב הבטון נמסר ע"י מנהלת אפר הפחם, בשיתוף יצרנית בטון. (רדימיקס בע"מ). חניטויים המפורטים להלן בוצעו לפי מתווה זה.

1. ממצאים:

1.1 אתרי מדידה:

עפ"י הנחיות ר' מח' בטיחות קרינה במשרד לאיכות הסביבה, די"ר אחוד נאמן הכינה חב' רדימיקס תערובות בטון מועשרות באפר פחם (7% ממשקל הצמנט). התערובות הללו שימשו ליציקת מרחבי מגן דירתיים (ממ"ז) במספר אתרים בארץ. לביצוע המדידות הנוכחיות נבחרו שני זוגות מבנים, בטמיכות זה לזה - האחד מבטון מועשר אפר פחם, והאחר - מבטון רגיל. זוג אחד של מבנים כאלה הועמד לרשותנו בקרית ים, וזוג נוסף באשקלון. בשני המקרים היו שני הממדיים בקומות גבוהות וללא צנרת מקשרת אל הקרקע, כך

שריכוזי הראדון בחזירים אלה חייבים היו לנבוע משפיעה מקירות המבנים עצמם.

אופן ביצוע המדידות :

1.2

במהלך זיוני ועדת המתווה הוצגה ע"י עורכי עבודה זו הערכה חישובית כי גם שפיעת ראדון נמוכה, עשויה להביא להבנות רמת ראדון גבוהה יחסית, בתנאי שהחדר אטום היטב. מאחר והממדיים נבנו ברמת איטום גבוהה מאוד, חועלנה ההצעה לבדוק בחזירים אלה את ריכוז הראדון, וכנגדו את רמת האיטום, ולחשתמש בשילוב זה כאמצעי למדוד את שפיעת הראדון מסוגי בטון שונים.

בסיסו הפיסיקלי של חישוב זה להלן :

תחי שפיעת הראדון לחדר $E(R_n)$ (ביחידות בקרל למ"ר לשניה). אזי שפיעת הראדון במונחי מספר אטומים $I(R_n)$ (ביחידות אטומים למ"ר לשניה), תהיה נתונה ע"י :

$$I(R_n) = E(R_n) / \lambda_{R_n}$$

כאשר λ_{R_n} - קבוע הדעיכה הפיסיקלי של הראדון ביחידות שניה / 1.

יהי קצב חלוף האוויר של החדר עם סביבתו - λ_{av} (ביחידות של חילופי אוויר לשניה).

במצב שיווי משקל מתקיים שוויון בין כמות האטומים החודרת לחלל החדר ביחידות זמן לבין כמות היוצאת ממנו, אם בדעיכה פסיקלית ואם בדליפה אל מחוץ לחדר. כלומר :

$$S \cdot \frac{E(R_n)}{\lambda_{R_n}} = C_{R_n} \cdot \frac{V}{\lambda_{R_n}} \cdot (\lambda_{R_n} + \lambda_{ac})$$

כלומר :

$$E(R_n) = \frac{V}{S} \cdot C_{R_n} (\lambda_{R_n} + \lambda_{ac})$$

אשר על כן בוצעו המדידות דלהלן :

(1) איטום :

הממדיים שנבדקו בניסוי זה, היו בלתי מוגמרים (ללא טיוח וללא חלונות ודלתות). לפיכך הוסף איטום (מלא ככל הניתן) למפתחי החלון וחזלת ע"י סגירתם בלוחות לבידים מצופי יריעות פולאתילן.

(2) שיטת הבדיקה :

ננקטו הצעדים הבאים (עפ"י סדרם)

- הזרמת גז SF_6 לחלל החדר.
- פיזורו בחזר ע"י מפות, לקבלת ריכוז אחיד בחלל החדר.
- מדידת ריכוז הגז באוויר ע"י מנסר ממוחשב (רישום הריכוז כל מחצית שעה).

זמן המדידה הראשונה מגדיר את תחילת הניסוי ($t=0$). חלוף אויר בין החדר לסביבתו מביא לירידה אקספוננציאלית בריכוז הגז בחדר, כלומר:

$$1. \quad C(t) = C(t=0) \cdot e^{-\lambda t}$$

$$2. \quad \ln \left(\frac{c(t)}{c(t=0)} \right) = -\lambda t$$

מכאן מחולץ קבוע חלוף האויר λ .

תוצאות (קצב איזור):

- ממייד אי (קרייט ים - אתר פסגות ים קומה 12) – מועשר אפר פחם. הזממייד נאטם ביום אי 25/1/98 ובשעה 13:00 הזרם לתוכו גז ה- SF_6 . סדרת מדידות הריכוז החלה ב- 13:30 ונסתיימה 4.5 שעות לאחר מכן (זרם החשמל לאתר נפסק). ממצאי סדרת מדידות זו היו:
ריכוז תחילי: 38.65 PPM
ריכוז סופי: 37.95 PPM
(זאת תוך חתחשבות בדיוק המכשיר בתחום הודאות של 95%).
מכאן: $\lambda = 0.0041/h$ או: החלפת אויר אחת ב- 10 ימים.

- אתר בי – ללא אפר פחם (קומה 4 באותו מתחם)
מדידה זומה נערכה באותה שיטה לממייד בקומה די באותה קבוצת מבנים ממיידי זה נבנת מבטון קונבנציונלי ללא העשרה באפר פחם.
המדידה החלה ביום גי, 27/1/98 בשעה 13:00 ונמשכה עד יום חי 29/1/98 באותה שעה. ממצאי מדידה היו:
ערך תחילי: 44.07 PPM
ערך סופי: 17.78 PPM (15.7 שעות אחייכ)
מכאן: $\lambda = 0.058/h$

או החלפת אויר אחת ב- 17 ± 2 שעות (0.71 יום). החסבר להבדל התורף בין קצבי האורור של שני הממדיים נעוץ, ככל הנראה, באיטום לקוי של ממ"ד ב (בטון רגיל).

- ממ"ד ג, "מרינה הייטס" אשקלון – קומה 8 (מזרח) – מועשר אפר פחם. המדידה החלה ביום ה- 3 למאי 1998 שעה 13:00 ונמשכה למחרתו עד שעה 10:00. ממצאי מדידה היו:
ערך תחילי: 40.58 PPM
ערך סופי: 14.7 PPM (15.7 שעות אח"כ)
מכאן: $\lambda = 0.056/h$
או החלפת אויר אחת ב- 18 ± 2 שעות.
- ממ"ד ז', "מרינה הייטס" אשקלון – קומה 8 (מערב) ללא אפר פחם. המדידה החלה ביום 4 למאי 1998 12:00 ונמשכה עד ל 6 במאי ממצאי מדידה היו:
ערך תחילי: 43.74 PPM
ערך סופי: 24.17 PPM (11 שעות אח"כ)
מכאן: $\lambda = 0.056/h$
או החלפת אויר אחת ב- 18 ± 2 שעות.

2. ראזון:

- מדידת ריכוז הראזון נערכה באמצעות שלושה כלים במקביל:
- גלאי ראדון מטיפוס אלקטרט.
 - גלאי ראדון מטיפוס פחם פעיל.
 - מנטר ראדון מטיפוס Niton. (הופעל רק במדידות בקרית ים)
- בממ"ד א' הוצבו הגלאים וחמנטר ביום ה- 27/1/98 ואילו בממ"ד ב' הוצבו הגלאים ביום ה' 29/1/98 שתי המדידות נסתיימו ביום ז' ה- 4/2/98 (מנטר הראדון פעל כל העת בממ"ד א'). בממדיים באשקלון נערכו מדידות הראדון בתקופה שבין ה- 6 ל- 12 במאי 1998. התוצאות מוצגות בטבלת הטיכום להלן.

3. רמות קרינת חגמא:

מדידות אלה בוצעו ע"י נצנץ תוצרת Automess מדגם Sczintomat. התוצאות מוצגות בטבלת הסיכום להלן.

4. מדידת ריכוזי הרדיואיזוטופים בקירות המבנה :

לצורך מדידות אלו נלקחו דגימות בטון מן הקירות בממדיים - תודתנו נתונה למר עמרי לולב על פעילותו הנמרצת בשלב זה.
המדידות עצמן בוצעו במעבדת המנייה לרמות רדיואקטיביות נמוכות בממ"ג שורק, באמצעות גלאי HPGe בעל יעילות אבטולוטית של 80% .
התוצאות מוצגות בטבלת הסיכום להלן,
ריכוזי אפר הפחם בבטון המוגדר כמועשר הוא 7% (מידע שמקורו בחב' רדימיקט)

5. גיאומטריות החדרים :

החדרים זהים בקירוב מבחינת המבנה הגיאומטרי, ועל כן יחושבו כולם לפי אותם יחסי שטח /נפח

$$V = 24.4 \text{ מ"ק (נפח החדר)}$$

$$S = 49.2 \text{ מ"ר (שטח קירות החדר)}$$

סיכום ממצאי המדידות (קצב חילוץ אויר, ריכוז איזוטופים בחומר המבנה, רמת קרינת הגמא וריכוז הראדון) מובא בטבלה 1, כן מובאת שפיעת הראדון המחושבת מהם.
מוצגים בנפרד הממצאים הממוצעים לגבי בטון מועשר אפר פחם ולגבי בטון רגיל.

טבלה 1: ריכוזי דיֹואִיזוֹטוֹפִים וּשְׁפִיעַת רֶאדוֹן: בְּטוֹן רִגִיל לְעוֹמֵת מוֹעֵשֶׂר אֶפֶר פָּחֵם

גודל מחושב	הגדלים הנמדדים							סוג הבטון (הכנה עיִי רזימיקס)
	איורו ר (זמן לחילוף אויר בשעות	לחות בבטון (%)	ריכוז רֶאדוֹן (בקרל למיִיק אויר)	קרינת גמא בחדר (מיקרו רנטגן לשעה)	ריכוז אשלגן 40 (בקרל לקיִיג)	ריכוז תוריום 232 (בקרל לקיִיג)	ריכוז ראדיום 226 (בקרל לקיִיג)	
1.1	240	1.8	194	5	118	11	37	מועשר אפר פחם קרית ים אשקלון
2.5 בממוצע	18	3	133	4.5	94	15	30	
3.9								
5.5	17	2	176	4	80	8.7	32	רגיל קרית ים אשקלון
5.4 בממוצע	17	3	170	4	100	7	18	
5.3								

השוואת שפיעות הראדון משני סוגי הקירות מראה כי קיר אפר הפחם שופע מעט ראדון יחסית לריכוז ה-Ra בו (למעשה - שפיעתו המוחלטת קטנה מזו של קיר הבטון הרגיל). תופעה זו מפתיעה, שכן תכולת הראדיום בבטון המועשר גבוהה בפירוש מזו שבבטון הרגיל.

הועלתה ההערכה כי עקב טמפרטורת השריפה הגבוהה בתחנות הכוח, מקבלים גרגרי אפר הפחם אופי זכוכיתי, ועל כן שפיעת הראדון מהם צפויה להיות נמוכה מזו שבחומר רגיל. לפי הסבר זה טביר לצפות לעודף קטן בשפיעת הראדון מבטון מועשר, אך לא לירידה בשפיעה. ההסבר שהוצע לתופעה זו (עיי חבר ועדת המונווה, פרופי דני רבינא מן הטכניון) הוא שגרגרי אפר הפחם, מעבר לנרומתם הקטנה מאד לכמות הראדון החפשי לנוע בבטון, ממלאים חללים בתוכו ובכך מצמצמים את יכולת התנועה של הראדון – גם זה שמקורו במרכיבים האחרים של הבטון.

הושלכות הרדיולוגיות

המדידות נערכו בתנאי איטום קיצוניים.

מאחר ושימושם הרגיל של החדרים הוא בקצב איוורור מינימלי של החלפת אויר בשעתיים, צפוי כי תרומת ריכוז הראדון בקיר, לריכוז הראדון החלל החדר תהא:

$$\text{קיר בטון רגיל} - 1.8 \text{ Bq/m}^3$$

$$\text{קיר מועשר אפר פחם} - 0.8 \text{ Bq/m}^3$$

וזאת עפיי המשוואה:

$$C_{Rn} = E_{Rn} \cdot \frac{S}{V} \cdot \frac{1}{\lambda_{Rn} + \lambda_{ac}}$$

תרגום רמת הראדון אלה למונחי מנת קרינה שקולה מראה כי בחדר מבטון מועשר באפר פחם תהא התרומה 0.02 mSv/Y לעומת זאת בחדר מבטון רגיל 0.045 mSv/Y (בתנחה של שהיית 80% מן הזמן בחדר).

6. תרומת קרינת הגמא:

רמת קרינת הגמא במרכזי שני החזרים נמדדה ונמצא כי בחדר בטון רגיל היא בממוצע $4 \mu\text{R/h}$, לעומת $4.75 \mu\text{R/h}$ בממוצע בחדר מבטון מועשר אפר פחם. בתנחה כי שהיית האדם בחדר היא 80% מן הזמן, מתבטא הפרש זה ב:

$$0.8 \times 0.75 \times 10^{-5} \text{ mSv/h} \times 8700 \text{ h/y} = 0.05 \text{ mSv/y}$$

7. מנת קרינה מטופחת לשוכן המבנה:

השוואת הסיכום הכולל של ונרומת מנת הקרינה מקרינת גמא ומראדון, מראה כי חיים בחדר מבטון יצוק מועשר אפר פחם בכל ששת קירותיו ונוסיף מנת קרינה שנתית של

0.025 mSv

לשוכן החדר, לעומת חשיפתו של שוכן חדר בטון רגיל. רמה זו מהווה **2.5%** בלבד מן המירב המומלץ לחשיפת האוכלוסייה הרחבה.

ראוי להזכיר כי שימוש בחומר בריכוז דומה של אפר פחם, אך בצפיפות חומר מוחלטת הקטנה פי 3 (בלוקים חלולים או הכוללים כיסי אויר במקום קיר בטון יצוק) תגרום לשליש התוספות כלומר ל- **0.83%** בלבד מן המירב המומלץ.