



סקירת מחקרים ועבודות
אוקטובר 2016
היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם

הקדמה

פחם מכיל מגוון רחב של יסודות כימיים הנפוצים בקליפת כדור הארץ, בכללם גם היסודות הרדיואקטיביים הטבעיים (ר"א) רדיום-226 (^{226}Ra), תוריום-232 (^{232}Th) ואשלגן-40 (^{40}K) בריכוזים נמוכים. כתוצאה משריפת הפחם והתכלות החומר האורגני המהווה את עיקר המסה של הפחם, עולה ריכוז היסודות האלה באפר בהשוואה לריכוזם בפחם. בשימושי אפר הפחם עולה שאלת החשיפה לקרינה הנפלטת מהיסודות הר"א. קרינה זו עלולה להוות סיכון בריאותי לעובדים ולציבור בהקשר ליישומי האפר בחקלאות, בתשתיות ובעיקר בתעשיית הבנייה. כדי לבחון את מידת הסיכון וקבילותו בוצעו ע"י המנהלת חישובים ומדידות קרינה בשלבים השונים של יישומי האפר, זאת בנוסף לבקרה השוטפת מדי שנה על תכולת הרדיונוקלידים במקורות הפחם העיקריים המיובאים לישראל ובשני סוגי האפר הנוצרים מהם בתחנות הכח.

[הערה: אטומים של יסודות רדיואקטיביים קרויים בחלק מהספרות המקצועית רדיונוקלידים (radionuclides). נשתמש מדי פעם במונח הזה בסקירה שלהלן].

בנייה

הדיירים במבני מגורים העשויים בטון המכיל אפר מרחף ו/או בלוקים המכילים אפר תחתית מנופה דק, נחשפים לקרינה חיצונית (קרינת גמא) ופנימית (קרינת אלפא כתוצאה מנשימת גז רדון). ההיבטים הרדיולוגיים של יישומי אפר פחם בתעשיית הבנייה נבדקו ונחקרו עד כה ע"י המנהלת במספר מסגרות:

- מחקרים ;
- בדיקות קרינה מבלוקי בנייה המכילים אפר פחם ;
- סקר קרינה מתערובות בטון נפוצות עם ובלי אפר מרחף כחליף חלקי לחול ולצמנט (בשיתוף הטכניון וממ"ג-שורק).

בדיקות הקרינה מבוצעות לפי **ת"י 5098 – תכולת יסודות רדיואקטיביים במוצרי בנייה, דצמבר 2009**. תקן זה נועד להגביל את מנת הקרינה ממוצרי הבנייה מהם עשויים קירות המבנה, הרצפה והתקרה, לרמה התואמת סיכון בריאותי נמוך המוגדר כסביר ע"י הגופים המקצועיים הבינלאומיים והמוצדק בשיקולים חברתיים-כלכליים. יצוין כי התקן אינו קובע גבולות לרמת הקרינה המרבית המותרת בחדר, ואינו מגדיר גבול בין "רמה בטוחה" ל"רמה מסוכנת", אלא נועד לאפשר בקרה מסודרת של הרשויות על ריכוז היסודות הר"א ממקורות טבעיים במוצרי בנייה, מבלי לפגוע באפשרות להשתמש ברב המוחלט של מוצרי הבנייה המיוצרים בישראל מחומרי גלם מקומיים.



**סקירת מחקרים ועבודות
אוקטובר 2016
היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

דרישות התקן מתייחסות לריכוזי האקטיביות של היסודות הר"א (בקרל/ק"ג) הנמדדים במוצר הבנייה, בתלות בעובי המוצר ובמסה המרחבית (ק"ג/מ"ק) של המוצר. הגבלת מנת הקרינה מבוססת בתקן באמצעות אינדקס ריכוז I האקטיביות של המוצר, המוגדר בנוסחה שלהלן. בנוחה זו מחשבים לכל יסוד רדיונוקליד ספציפי את היחס בין ריכוז האקטיביות שלו במוצר (C_{Xy} , ביחידות Bq/kg, המופיע במונה) וריכוז האקטיביות הגבולי שנקבע לאותו רדיונוקליד ($A(^{X}Y)$, ביחידות Bq/kg, המופיע במכנה) והנלקח מטבלת ריכוזי האקטיביות הגבוליים המוצגת בתקן לפי המסה המשטחית של המוצר (ביחידות ק"ג/מ"ר).

אינדקס ריכוז האקטיביות של המוצר נקבע לפי הנוסחה:

$$I = (1 - e) \frac{C_{Ra}}{A(^{226}Ra)} + \frac{C_{Th}}{A_{Th}(^{232}Th)} + \frac{C_K}{A(^{40}K)} + e \frac{^{226}Ra}{A_{Rn}(^{222}Rn)} \leq 1$$

מוצר בנייה עומד בתקן (מאושר לשימוש) כאשר $I \leq 1$.

יצוין כי התקן הנוכחי נקבע בדצמבר 2009 והתפרסם בפברואר 2010, לאחר שני מחזורי בחינה (רוויזיה) בוועדות המומחים של מכון התקנים.

סקירת עבודות בנושא קרינה ממוצרי בנייה

בשנת 2000 בוצעו ע"י גוסטבו חקין וקבוצתו מממ"ג-שורק בדיקות לקביעת ריכוזי אקטיביות של רדיונוקלידים טבעיים וקצב פליטת ראדון בבלוקים אופייניים בישראל.

ריכוזי האקטיביות שנמדדו בעבודה זו היו דומים לערכי ריכוז האקטיביות בבלוקים מסחריים נפוצים בארץ ובאירופה, והיו 17 ± 4 , 4 ± 1 ו- 40 ± 12 בקרל/ק"ג רדיום-226, תוריום-232 ואשלגן-40, בהתאמה. שפיעת הראדון (המבוססת בנוסחת האינדקס שבתקן הישראלי באמצעות פרמטר האמנציה - e) שנמדדה הייתה 0.18 ± 0.07 מילי-בקרל למ"ר לשנייה. ערכים אלו שימשו להערכת תוספת מנת הקרינה המצטברת בשנה הצפויה לבני אדם עקב שהות רצופה בחדר בנוי מבלוקים אלו כאלה. תוספת מנת הקרינה שהוערכה הגיעה ל- 0.055 מיליסיוורט לשנה, מנה הנמוכה ב- 50% מתוספת המנה שחושבה במחקר מ- 1998 של מרגליות וחובריו עבור חדר עשוי מבטון מועשר באפר פחם.

בבדיקות משנת 2001 של דר' ולדימיר בוטנקו מ"פרוטון" חושבה תוספת מנת הקרינה החיצונית השנתית בחדר הבנוי מבלוקים בעובי 10 – 20 ס"מ וצפיפות 900 ק"ג/מ"ק המכילים אפר בריכוזים שונים, בהנחות מוגדרות על קצב פליטת ראדון מהבלוקים ותכולת הרדיונוקלידים הטבעיים בהם. טווח תוספת מנת הקרינה שחושבה נע בין 0.0052 ל- 0.0226 מיליסיוורט לשנה המהווים בין 0.52 ל- 2.26 אחוז, בהתאמה, מרמת הקרינה השנתית המותרת לבני אדם מן הציבור עפ"י התקן האמריקאי (1 מיליסיוורט לשנה).



סקירת מחקרים ועבודות
 אוקטובר 2016

היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם

ב- 2002 נבדקו ע"י נתן לביא מהחברה לשירותי איכות הסביבה **ריכוזי האקטיביות של הרדיונוקלידים הטבעיים בבלוקים** (שיוצרו במפעל טרמודן) המכילים אפר בשיעור 7, 10, 12 ו- 15 אחוז ממשקלם. ריכוזי ה- ^{232}Th , ^{226}Ra ו- ^{40}K שנמדדו עבור שיעורי האפר הללו היו 24.5, 78 ו- 277.2 בקרל/ק"ג, בהתאמה. ריכוזי האקטיביות של הרדיונוקלידים עלו עם אחוז האפר, כמצופה, אך יחד עם זאת כל הבלוקים עמדו בתקן הקרינה ($I \leq 1$), כפי שבא לידי ביטוי בערכי אינדקס ריכוז האקטיביות שנעו בין 0.28 ל- 0.31 בבלוקים בעובי 10 ס"מ ובין 0.43 ל- 0.47 בבלוקים בעובי 20 ס"מ.

ב- 2002 הושלמה הכנת מסמך של פרופ' טוביה שלזינגר בנושא **הבקרה על ריכוזי אקטיביות של רדיונוקלידים במוצרי בנייה, באפר ובפחם המיובא לארץ**.

הסיבה להגבלות על שימושי אפר פחם במוצרי בנייה נעוצה בפוטנציאל של חשיפת בני אדם לקרינה מייננת הנפלטת מהמוצרים בגלל ריכוז היתר של יסודות ר"א טבעיים באפר. מתן ההיתר להפצת המוצרים תלוי בעמידה של מוצר בנייה המכיל אפר פחם בדרישות ת"י 5098. תקן זה היה ב- 2002 בשלבי הכנה (כאמור התקן הנוכחי נקבע בדצמבר 2009 לאחר שני מחזורי רויזיה במכון התקנים). לבדיקת ההשלכות של התקן על השימוש באפר פחם לבנייה נבחנה בדוח זה עמידתם בתקן ($I \leq 1$) של מוצרי בנייה מסוגים שונים: בלוק בטון ללא אפר, בטון רגיל, בטון מועשר באפר עד 10% ויותר, בלוק בטון המכיל עד 15% אפר ובלוק תרמי לבנייה המכיל עד 50% ויותר אפר. כל המוצרים האלה עמדו באמות המידה של התקן, למעט בלוק תרמי שהכיל 70% אפר שעמידתו הייתה גבולית. המסמך מבקר את התקן בטענה שיש בו החמרה ניכרת לעומת התקנים האירופאים. החמרה זו מתבטאת בארבעה היבטים:

- (1) קביעת תוספת מנה של 0.3 מיליסיוורט לשנה לעומת תוספת מנה של 1 מיליסיוורט לשנה באירופה;
- (2) תוספת מנת הקרינה (0.3 מיליסיוורט) שמקורה במוצרי הבנייה, המותרת לדיירי מבנים, כוללת לפי התקן הישראלי בנוסף לקרינת גמא גם את הקרינה מנשימת גז ראדון (ובנותיו) הנפלט מהמוצר, בעוד לפי התקנים האירופיים התוספת המותרת היא קרינת הגמא בלבד ובעיית הראדון מטופלת בתקנים האירופיים בנפרד;
- (3) מנת הייחוס (שתוספת מנת הקרינה המותרת מחושבת מעליה) נבחרה בתקן הישראלי כקרינה מ"בלוק אפור" הגורם למנה של 0.15 מיליסיוורט לשנה, לעומת מנת הייחוס הנהוגה באירופה כקרינת גמא באוויר החופשי מחוץ למבנים בערך של 0.3 מיליסיוורט לשנה;
- (4) מנת הקרינה הנגרמת ע"י מוצר הבנייה מחושבת למבנה שכל שש פאותיו עשויים מהמוצר הנבדק בהשוואה להנחה של ארבעה קירות העשויים מהמוצר לפי ההנחות בתקנים באירופה.

בסיכום המסמך הומלץ לאמץ בישראל את העקרונות של הגישה האירופית.



**סקירת מחקרים ועבודות
 אוקטובר 2016
היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

סקירת עבודות בנושא קרינה מבטון המכיל אפר

ב- 1998 בוצעו ע"י דר' מנחם מרגליות וקבוצתו מממ"ג-שורק סדרת בדיקות של שפיעת ראדון בשני ממ"דים למגורים הבנויים מבטון מועשר באפר מרחף (7% ממשקל הצמנט) בהשוואה לממ"דים ללא אפר.

ממצאי הבדיקות הראו כי שפיעת הראדון מקירות הממ"דים העשויים בטון המכיל אפר נמוכה יותר ב- 1.4 – 4.4 בקרל/מ"ר לשעה (2.9 בממוצע) משפיעת הראדון שנמדדה בממ"דים הרגילים, למרות שריכוז הרדיום-226 בבטון שהכיל אפר היה גדול יותר, ב- 5 – 12 בקרל/ק"ג. ההסבר שהוצע לתופעה זו על ידי עורכי המחקר הוא שגרירי האפר הקטנים ממלאים חללים בבטון ומצמצמים בכך את יכולת התנועה של ראדון בתוכו, כולל הראדון שמקורו במרכיבים האחרים של הבטון. התוספת למנת הקרינה הכוללת (מקרינת גמא וראדון) כתוצאה משהות בממ"ד המכיל אפר בכל קירותיו בהשוואה לממ"ד רגיל, הוערכה על ידי עורכי המחקר כ- 0.025 מיליסיוורט לשנה, תוספת המהווה 2.5% בלבד מגבול המנה המרבי המומלץ לבני אדם מן האוכלוסייה הרחבה (1 מיליסיוורט לשנה).

המלצות דומות לאלו שניתנו במסמך לעיל של שלזינגר (2002) בו נבדקו בלוקי בטון, התקבלו גם **בחוות דעת מומחה על עמידתם של בטונים בדרישות ת"י 5098 שניתנה ב- 2005 ע"י פרופ' קוסטה קובלר מהמכון הלאומי לחקר הבנייה בטכניון.**

בחוות הדעת בוצעה הערכה של עמידן בדרישות התקן הישראלי של תערובות בטון נפוצות בהרכבים הבאים: עם ק"ג אפר למ"ק וללא אפר פחם, עם תכולת צמנט (CEM I 42.5) של 230, 270 ו- 450 ק"ג/מ"ק, בעלות צפיפות של כ- 2400 ק"ג/מ"ק (למעט תערובת אחת בצפיפות 2300 ק"ג/מ"ק) ועונות לדרישות בטון ב-40 ומעלה. לבדיקת עמידתם של הבטונים שיוצרו מתערובות אלה בדרישות התקן הישראלי, נבדקה תכולת הרדיונוקלידים בבטונים וקצב שפיעת הראדון מהם. נמצא שלמעט תערובת בודדת בה אינדקס הקרינה היה מתחת ל- 1 ואחרת בה הוא עמד על 1, יתר התערובות חרגו מן התקן ($I > 1$) וכתוצאה מכך נפסלו לשימוש, אך מצד שני עמדו בדרישות התקנים באירופה. בסיכום חוות הדעת נקבע שהתקן הישראלי לא מציאותי ומחמיר לעומת אירופה (מהסיבות שצוינו במסמך של שלזינגר), ועל כן יש לבצע לו רוויזיה כדי להתאימו לתקנים באירופה ולהבטיח את ישימותו בארץ.

ב- 2009 שודרגה תוכנת Block שפותחה בשנת 2004 לצורך חישוב מנת הקרינה הנובעת מחומרים רדיואקטיביים במבנה, ומהווה למעשה בסיס פיסיקלי לתקן הקרינה הנוכחי. התוכנה המשודרגת מאפשרת לחשב את מנת הקרינה השנתית (שהייה של 7000 שעות במבנה) שתתקבל בכל נקודה בחדר בהינתן ממדי החדר, צפיפות הקיר וריכוז אקטיביות של היסודות הר"א בחומרי המבנה. בעזרת התוכנה ניתן גם לחשב ריכוזים גבוליים של היסודות הר"א בחומרי המבנה בהנחה של מנה



**סקירת מחקרים ועבודות
 אוקטובר 2016
היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

שנתית מרבית מוגדרת במרכז החדר. עבודה זו בוצעה ע"י פרופ' קוסטה קובלר וויטלי פריבן מהטכניון ודר' יאיר שמאי מממ"ג-שורק, ובסיוע המנהלת.

שפיעת ראדון מבטונים המכילים אפר פחם

הבעייתיות בתקן הקרינה (ת"י 5098) בגרסתו טרם הרוויזה של 2009, שנבעה מהנחות יסוד מחמירות בהשוואה להמלצות גופים בינלאומיים, גרמה לכך שתערובות בטון נפוצות המכילות אפר פחם באחוזים נמוכים לא יעמדו בדרישות התקן. בעקבות דיונים בצוות המקצועי-מדעי (קרינה) והתייעצות עם המומחים בוועדה התורתית-מקצועית לבטיחות קרינה בישראל, נערך לבקשת המנהלת מחקר בנושא [שפיעת ראדון מבטונים המכילים אפר פחם שנמשך בין 2011-2009](#). המחקר בוצע בשיתוף פעולה בין החוקרים גוסטבו חקין ודר' ז'אן קוך משטח בטיחות קרינה בממ"ג-שורק, ופרופ' קוסטה קובלר ופרופ' רחל בקר מהמכון הלאומי לחקר הבנייה בטכניון.

מטרות המחקר היו: (1) בדיקה מעבדתית של השפעת גיל הבטון, חוזק הבטון ותכולת האפר בבטון על קצב שפיעת הראדון ממנו; (2) בדיקת המתאם בין הריכוז החוזי של ראדון במבנה עפ"י מודל וריכוז הראדון המדוד במעבדה, לבין הריכוז המדוד בפועל בממ"ד. **בשלב הראשון בוצעה סקירת ספרות** הנוגעת לשאלת פליטת ראדון ממוצרי בנייה המכילים אפר פחם, מודלים ומדידות לקביעת ריכוז ראדון במבנים, שיטות למדידת שפיעת ראדון במעבדה ותקני קרינה בעולם. **בשלב השני בוצעו בדיקות במעבדה ובאתר**. במעבדה נבדקה תכולת רדיונוקלידים ומדידות ראדון בקוביות בטון בגיל 1 ו-2.5 חודשים שהוכנו במעבדת הטכניון ללא אפר ועם תכולת אפר (ממקור דרא"פ) של 75 ו-150 ק"ג/מ"ק בטון, לאחר אשרה למשך שבעה ימים ויום אחד (סה"כ 6 תערובות). הבדיקות נערכו במקביל במעבדת ממ"ג-שורק ובמעבדת NRG בהולנד ([סמוך למועד היציקה של הבטונים ובגיל שנה](#)). **באתר** בוצעו בדיקות ראדון ב-3 זוגות ממ"דים של בניין במרכז הארץ, כאשר כל זוג בנוי מבטון שונה: ללא אפר מרחף ועם אפר מרחף כתחליף לחול בשיעור 120 ו-140 ק"ג/מ"ק (זוג אחד עם אפר אינדונזי דל יחסית ברדיואקטיביות והזוג האחר עם אפר דרא"פ עשיר ברדיום-226), במצבי סגירה שונים של החלון והדלת בממ"דים. בנוסף, בוצעו בדיקות ראדון במעבדה לדגמי הבטונים ששימשו ליציקת הממ"דים.

ממצאים ולקחים:

סקירת ספרות – תקני קרינה - ת"י 5098 הוא המחמיר ביותר מבין התקנים שנסקרו בשני היבטים עיקריים: (1) הגבלת תוספת מנה ממוצרי בנייה ל-0.3 מיליסיוורט לשנה בתקן הישראלי והדני בלבד לעומת 1 מיליסיוורט לשנה בתקנים האחרים, עם הקלות בתקן הדני הבאות לידי ביטוי בין היתר בתוספת של 0.3 מיליסיוורט הכוללת בו רק את קרינת הגמא ולא הגמא והראדון יחד כבתקן הישראלי; (2) התקן הישראלי והאוסטרי בלבד כוללים גם את שפיעת הראדון



סקירת מחקרים ועבודות
 אוקטובר 2016

היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם

באינדקס האקטיביות, עם הקלה בתקן האוסטרי המבוסס על תוספת מנה מרבית של 1 מיליסיוורט ולא 0.3 מיליסיוורט כבתקן הישראלי. קרינה ממוצרי בטון המכילים אפר פחם- עליה בתכולת האפר בבטון מעלה את קצב המנה מקרינת גמא, אולם בד בבד מפחיתה את קצב שפיעת הראדון, עפ"י מרבית העבודות שנסקרו. מחקר אחד הראה עליה בקצב השפיעה עם הכנסת אפר לבטון, ואחרים לא גילו השפעה של האפר. הסיבה לעליה בתכולת הרדיום מצד אחד עם עליה בתכולת האפר, ומצד שני לירידה בשפיעת הראדון, מוסברת כנראה ב"כליאת" גז הראדון בכדורים הזכוכיתיים-אמורפיים של מבנה האפר ובהצטופפות הבטון כתוצאה מהחלקיקים הדקים של האפר והריאקציה הפוצולנית של האפר עם מים וסיד כבוי בבטון.

בדיקות מעבדה – ריכוזי האקטיביות של הרדיונוקלידים הטבעיים ובמיוחד ריכוזי ה- ^{226}Ra וה- ^{232}Th בבטון שהכיל אפר היו גבוהים יותר מאשר בבטון ללא אפר ב- 22 – 36 ו- 13 – 66 אחוז, בהתאמה, כאשר ההדירות הגבוהה בתוצאות העידה על הומוגניות גדולה של התערובות. לעומת זאת, האמנציה של הראדון מהבטון פחתה עם העלייה בתכולת האפר. כמו כן, נמצא שאשפחה לקויה (יום אחד) גרמה להפחתה גדולה יותר באמנציה.

בדיקות בממ"דים – בבדיקות המעבדתיות של דגמי הבטונים ששימשו ליציקת הממ"דים התקבלה הפחתה בשפיעת הראדון בשיעור של 10-20 אחוז בהוספת אפר לתערובות הבטון וכ- 50% בבדיקות מקבילות בהולנד, למרות שריכוזי האקטיביות של הרדיונוקלידים נמצאו דומים למדי בשתי המעבדות; התופעה לא אובחנה באופן מובהק במדידות בממ"דים. הפיזור הכללי של התוצאות, עקב ריבוי הגורמים הבלתי מבוקרים המשפיעים בבניין, כולל השפעת שיטת החישוב, היה גדול יותר מטווח ההשפעה של נוכחות אפר בבטון. עם זאת, החישובים הראו כי שפיעת הראדון מכל סוגי הבטון שנבדקו (עם ובלי אפר) לא עלולה לגרום לריכוז ראדון העולה על רמת הפעולה (200 בקרל/מ"ק), הן בתנאי שהייה רגילים בממ"ד (תחלופת אוויר מינימלית 0.25 לשעה) והן בתנאי התמגנות בהם הממ"ד אטום למשך שעות. בנוסף, תוספת האפר לבטון (עד 150 ק"ג/מ"ק) לא הגדילה את שפיעת הראדון.

אי הוודאות בממצאי המדידות בישראל בשיעור עד 30% (פחות מ- 10% בהולנד) מחייבת המשך פיתוח שיטת המדידה הישראלית למתן ביטוי הולם לתרומת האפר להפחתת שפיעת הראדון מבטון.

השפעת אפר פחם ממקורות שונים על מנת הקרינה מבטון

ממצאי בדיקות קרינה מבטון שנערכו במהלך השנים במקביל לעבודה על תקן הקרינה הישראלי הבלטו עוד יותר את הבעייתיות בתקן (מעבר להנחות היסוד המחמירות), מאחר והוא נסמך בבדיקת הראדון על שיטה שפותחה בארץ והסובלת מחוסר ניסיון, בסיס נתונים דל והיעדר ביקורת מדעית בינלאומית, ונמצאת עדיין בשלבי פיתוח ובחינה. בהקשר לאפר הפחם, יש חשיבות מיוחדת לשילובו של האפר בבטון, הואיל ועפ"י מחקרים בארץ ובעולם, כפי שצוין מקודם, הוספת



**סקירת מחקרים ועבודות
 אוקטובר 2016
היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

אפר לבטון מפחיתה בשיעור ניכר את שפיעת הראדון ממנו. כדי לבקר את השיטה הישראלית הוחלט ע"י המנהלת לבצע בדיקות מקבילות של תערובות בטון המכילות אפר מרחף (100 ק"ג/מ"ק) ממקורות הפחם העיקרים המיובאים לישראל (לעומת תערובת ייחוס ללא אפר), [במעבדת ממ"ג-שורק \(קביעת ריכוזי אקטיביות של הרדיונוקלידים\) ובמעבדת אוניברסיטת בן גוריון \(שפיעת ראדון\) לפי ת"י 5098](#), ובמעבדת NRG בהולנד (לתערובות נבחרות, Dr. Govert de With, 2013-2016: סקר 1, 2, 3, 4) לפי השיטה ההולנדית המבוססת על ניסיון עשיר רב שנים ונבחנה אקדמית במחקרים רבים ובפרסומים בינלאומיים. במקביל, מבוצעות [בדיקות התכונות ההנדסיות](#) של אותן תערובות. הבדיקות מבוצעות מדי שנה, מאז 2012.

חקלאות

[בדיקות לקביעת ריכוזי אקטיביות של הרדיונוקלידים הטבעיים בתוצרת חקלאית בוצעו ע"י גוסטבו חקין מממ"ג-שורק בין השנים 1999-2006](#). נבדק מגוון גידולים אשר גודלו על מצע המכיל "מצעית" (תערובת של 70% אפ"ת מנופה גס עם 30% קומפוסט) ומצע טוף סטנדרטי המקובל בשימוש: [עגבניות שרי](#), כרוב סיני, [חסה](#), [בזיל](#), [מלפפון](#), [תות שדה](#), [פלפל ועירית](#). בכל המקרים הריכוזים שנמדדו היו דומים בשני המצעים, כלומר לא נמצאה תוספת לריכוז האקטיביות של הרדיונוקלידים בתוצרת החקלאית שגודלה על מצע האפר לעומת זו שגודלה על טוף. בחלק מהמקרים הריכוזים אף היו מתחת לגבול המדידה. דוחות הבדיקה סוכם בקביעה שהריכוזים שנמדדו אינם מהווים בעיה מבחינת בטיחות קרינה וכי אין מניעה מהיבט זה להשתמש ב"מצעית" לגידולים שנבדקו. ממצאים זהים התקבלו [בבדיקות חלב פרות](#) שרבצו על מצע המבוסס על אפ"ת דק ("ריפודית") לעומת אלה שרבצו על מצע רגיל.

ב- 2002 בוצעה ע"י דר' ז'אן קוך הערכת חשיפה של העובדים והציבור למנות קרינה מאפ"ת המשמש כמצע מנותק לגידולים בחממות וכתשתית למדשאות ציבוריות. חישוב מנת הקרינה הצפויה לבני אדם מן הציבור התבסס על תרחיש מחמיר של שהייה על גבי המדשאה 10% מהזמן (876 שעות בשנה) ובמצבי עמידה (במרחק 1 מטר מפני הקרקע) ושכיבה (במרחק 10 ס"מ מפני הקרקע, או שהייה במרכז החממה (הנקודה בה החשיפה צפויה להיות מרבית) במשך 500 – 700 שעות בשנה. מנות הקרינה הצפויות ממצע האפר חושבו בהשוואה למנת הקרינה הצפויה ממצע טוף באותם תנאי חשיפה. מנות הקרינה שחושבו בחשיפה למצע האפר במדשאות ובחממה היו בטווח 5 – 85 ו- 39 – 64 מיקרו-סיוורט לשנה, בהתאמה, והיו גבוהות פי 2.7 מהמנות שחושבו בחשיפה למצע טוף. אבל, כל המנות היו נמוכות בפקטור 5-10 מחסם המנה (dose constraint) לבני אדם מן הציבור עבור עיסוק בודד הגורם לחשיפה לקרינה מייננת, שהומלץ ע"י הוועדה הבינלאומית להגנה רדיולוגית (ICRP), דהיינו 300 מיקרו-סיוורט לשנה.



**סקירת מחקרים ועבודות
 אוקטובר 2016
היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

תשתיות

אחד מיישומי אפר פחם מרחף, אם כי לא יישום הנפוץ בארץ, הוא השימוש באפר כחומר גלם בתערובת בחנ"מ – בטון בעל חוזק נמוך מבוקר. התערובת המקובלת של הבטון מורכב מחול, צמנט ומים ללא אגרגט חצץ. תערובת זו מקנה לבטון תכונות זרימה הנחוצות ליישומו כחומר הממלא חללים גדולים בתת הקרקע לשם חיזוקה טרם הקמת מבנה על גבי התשתית.

ב- 2001 בוצעה ע"י דר' ז'אן קוך מממ"ג-שורק הערכת סיכוני קרינה לעובדי תחזוקה בקרבת מאגר מי קולחים שסוללותיו יוצבו בבחנ"מ המכיל אפר. הערכת הסיכונים בוצעה במענה לדרישת המשרד לאיכות (הגנת) הסביבה. ההערכה התבססה בכל שלביה על הנחות שמרניות מחמירות של לפי משך שהייה כולל של 3 שעות בשנה של פעילויות התחזוקה השונות בקרבת המאגר, בהנחה שכולן בוצעו ע"י אדם אחד השוהה באותה עת על הסוללה. תוספת מנת הקרינה (מעל לרקע הטבעי) שחושבה מגיעה ל- $6 \cdot 10^{-5}$ מיליסיוורט לשנה (מנה אפקטיבית). תוספת זו נמוכה ביותר מארבעה סדרי גודל מגבול המנה לאדם מן הציבור העומד על 1 מיליסיוורט לשנה עפ"י התקן הבינלאומי להגנה מקרינה. כלומר, הסיכון הוא זניח.

בעולם וגם בישראל נפוץ השימוש באפר פחם כחומר מילוי מבני בתשתיות לכבישים ושטחי בנייה. יישום זה כרוך בסיכוני קרינה פוטנציאליים לעובדים העוסקים באפר ולדיירי המבנים המוקמים על תשתיות אלו. הערכת סיכוני הקרינה ביישום זה נעשתה במסגרת שתי עבודות מטעם המנהלת:

ב- 2002 הושלם ע"י דר' עומר פלד וחובריו מהקריה למחקר גרעיני סקר ספרות לבקשת המנהלת, בנושא תנאים סביבתיים (רדיולוגיים) לשימוש באפר פחם בתשתיות, הסקר נועד להוות בסיס להמלצות לתנאים אלה לשימוש הנדון באפר. נעשתה הבחנה בין הערכת החשיפה החיצונית – דהיינו חשיפה לקרינת גמא מהחומרים הרדיואקטיביים (ר"א) בתשתית האפר, ובין חשיפה פנימית – נשימת ראדון ובנותיו, נשימת אבק אפר וחדירת חומרים ר"א למי התהום ומשם למעגל המזון והשתייה. עפ"י ממצאי הסקר אין בעיה רדיולוגית כתוצאה משימושי האפר בבנייה ובתשתיות, האחרון גם בהינתן הנחות מחמירות כגון חשיפה של עובדי תשתיות לאבק אפר שכל חלקיקיו ברי-נשימה במשך 2000 שעות בשנה. חשוב גם לציין שבמרבית המקרים סוללת האפר "מנותקת" מהסביבה שמעליה ע"י כיסוי בקרקע או כביש אספלט/בטון. בהיבט הרגולטורי הסתמך הסקר על ה- EPA הקובע כי בשימושי אפר פחם למטרות "מועילות" אין סכנה לאדם ולסביבה שמחייבת לסווגו כפסולת מסוכנת ולא נדרשות פעולות ומגבלות נוספות כל שהן.

ב- 2003 בוצעה ע"י פרופ' טוביה שלזינגר ודר' ז'אן קוך מממ"ג-שורק הערכה של מנת קרינה (לשנה) הצפויה להיגרם מקרינה חיצונית לדיירי מבנה הבנוי על תשתית אפר ששימש כחומר מילוי בקיבוץ זיקים לצורך הגבהת קרקע.



**סקירת מחקרים ועבודות
 אוקטובר 2016
היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

הוערכה תוספת המנה הצפויה מעבר למנת הקרינה הצפויה בשימוש בקרקע רגילה. השטח שנבחן הוגבה ע"י הוספת שכבת אפר תחתית בעובי 4.5 מטר ומעליה שכבת קרקע בעובי 1.5 מטר שלמעשה היוותה גורם מנחית לקרינה משכבת האפר שמתחת. ההערכה התבססה על הנחות מתונות (ריכוזי אקטיביות ממוצעים של רדיונוקלידים בקרקעות הארץ ובאפר התחתית; מקור הקרינה- השטח שמתחת למבנה בלבד) ומחמירות (ריכוזי אקטיביות מרביים של רדיונוקלידים בקרקע ובאפר; מקור הקרינה- שטח אזור המילוי כולו ושהיית הדייר במבנה במשך 7000 שעות בשנה המהווים כ- 80% מהזמן). החמרה נוספת הייתה בכך שלא נלקחה בחשבון הנחתת קרינה הנגרמת ע"י רצפת המבנה. בשל הנחתת חזקה של הקרינה מן האפר ע"י קרקע הכיסוי (פי 1500 בהנחות מחמירות) הערכים שהתקבלו היו נמוכים ותוספת הקרינה כתוצאה מהשימוש באפר נמצאה זנחה ובתחום השינויים הסטטיסטיים של תרומת הקרקע לקרינת הרקע הטבעי. יחד עם זאת, צוין כי ללא כיסוי הקרקע תוספת מנת הקרינה לדיירי קומת הקרקע הייתה ככל הנראה מגיעה לסדר הגודל של חסם המנה שנקבע ע"י ה- ICRP לחשיפות כרוניות (0.3 מיליסיורט לשנה) ואף עולה עליו. בהערכה זאת לא חושבה תרומת גז הראדון לקרינה, אולם הונח כי זו לא צפויה לגדול כתוצאה משימוש באפר אלא אף לקטון מאחר והגז נכלא בפאזה הזכוכיתית של האפר.

מעמד רגולטורי ומנהלי

ביוני 2008 קבע הממונה על הקרינה הסביבתית במשרד להגנת הסביבה דר' סטיליאן גלברג כי אפר הפחם הינו פסולת רדיואקטיבית (פ"ר). המשמעות המעשית של הקביעה הייתה הפסקת יישומי האפר והטמנתו באתר לסילוק פ"ר, זאת בניגוד למקובל במדינות רבות בהן אין רואים את האפר כפסולת מסוכנת לאדם ולסביבה שיש לסלקה ועושים בו שימושים מועילים. אחד מנימוקי הממונה לקביעתו היה כי "בשל רמת האקטיביות אפר פחם מהווה סיכון לאדם ולסביבה". במסגרת השגה לקביעה הזו הוכנה בין השאר [חוות דעת של פרופ' טוביה שלזינגר בנושא היבטים רדיולוגיים ומנהליים של העיסוק באפר פחם](#) שהושלמה ביולי באותה שנה.

חוות הדעת התרכזה בהערכת מנת הקרינה (הסיכון) הצפויה לבני אדם (עובדים והציבור הרחב) לקרינה הנפלטת מאפר פחם בשלבי הטיפול בו (ערום, שינוע ואיחסון) וביישומיו השונים, בהתבסס על ממצאי בדיקות ומחקרים מן הארץ והעולם ובהתייחס לתקינה המקומית והבינלאומית להגנה מקרינה. המסקנה העיקרית שעלתה מחוות הדעת היא שבהתאם לכללי בטיחות קרינה המוצגים בהנחיות הגופים הבינלאומיים העוסקים בהגנה מקרינה מיינת, האפר אינו מהווה סיכון לאדם ולסביבה בפעולות הנ"ל והוא פטור (exempted) למעשה מדרישות התקן הבינלאומי להגנה מקרינה. לפיכך נטען ע"י פרופ' שלזינגר כי אין הצדקה לסווג את האפר כפ"ר כיוון שאיננו פסולת אלא מוצר בר שימוש שיישומיו נתונים לבקרה, וכיוון שריכוזי האקטיביות באפר נמוכים במידה רבה מרמות הפטור (exemption levels) שהוצגו בהמלצות הגופים הבינלאומיים (IAEA, ICRP, EC, ראה להלן).



**סקירת מחקרים ועבודות
 אוקטובר 2016
היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

בהמשך לחוות הדעת לעיל באותו נושא, הושלמה, ביולי 2012, חוות דעת נוספת של פרופ' שלזינגר על בסיס ההנחיות העדכניות (נכון ל- 2011) של סבא"א – הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה אטומית (IAEA – International Atomic Energy Agency) לבקרה על חומרים רדיואקטיביים ממקור טבעי, והמפורסמות בתקן הבינלאומי להגנה מקרינה ולבטיחות של מקורות קרינה (BSS - Basic Safety Standard). בתקן מוצגים שלושה מונחים: אי החלות (exclusion), פטור (exemption) ושיחרור (clearance), שמטרתם לצמצם את מערכת בקרה ולהגיע לאופטימיזציה של עלות-תועלת מבחינת עלות הפחתת החשיפה/הסיכון מול עלות אמצעי הבקרה והמשאבים המושקעים למניעת חשיפה או הפחתת חשיפה של קרינה מזערית/זניחה.

מושג **אי החלות** פירושו שהתקן אינו עוסק בחשיפות לקרינה שאפריו אינן לרשויות יכולת שליטה עליהן (unamenable to control בלשון סבא"א), ולכן דרישות התקן לא חלות עליהן. המושג של "אי החלות" מיושם כמעט אך ורק ביחס לחומרים רדיואקטיביים ממקור טבעי בריכוזים האופייניים לרוב חומרי הגלם שלא עברו תהליכי עיבוד או שינוי וכן חומרים טבעיים וגם מלאכותיים שאין יכולת שליטה עליהם בגלל הימצאותם בכל מקום בעולם (למשל שאריות נפולת ניסויים גרעיניים). עם זאת, אין פה הכללה לכל חומר ר"א, מלאכותי או טבעי, אלא בכפוף להחלטת הרשויות המוסמכות (למשל בקרה על החשיפה של דיירים לריכוזים חריגים של רדיואיזוטופים ממקור טבעי בחומרי הבנייה). לפי טבלה 1 במדריך סבא"א RS-G-1.7 משנת 2004, שעקרונותיו אושרו מחדש בתקן הבינלאומי החדש משנת 2014, עיקרון אי החלות מיושם על חומרים המכילים אשלגן-40 בריכוז מרבי של 10,000 בקרל/ק"ג ועל חומרים המכילים כל רדיואיזוטופ אחר ממקור טבעי (ובעיקר איזוטופים משרשרת האורניום והתוריום) בריכוז מרבי של 1,000 בקרל/ק"ג.

מושג **הפטור** משמעו מעין הרשאה כוללת הניתנת ע"י הרשויות לפעילויות הכרוכות בעיסוק בחומרים ר"א (ממקור טבעי או מלאכותי) הכרוכים בחשיפת בני האדם למנות נמוכות מאד של קרינה, כך שהעיסוק פטור מדרישות רישום, רישוי ובקרה, בתנאי שריכוזי האקטיביות של החומרים האלה הם מתחת לרמת הפטור עבור כמויות צובר (bulk amounts) של חומרים המכילים רדיונוקלידים טבעיים מלאכותיים. רמות הפטור מוצגות בטבלה 2 במדריך סבא"א RS-G-1.7.

מושג **השחרור** נוגע לחומרים ר"א הנמצאים תחת בקרה ומועמדים לשחרור ממנה. רמות השחרור קובעות למשל מהם ריכוזי הסף שמתחתיהם ניתן לשחרר (לסביבה או לאתרי פסולת רגילים) חומרים שהם חלק מעיסוק שדרישות ה-BSS חלות עליו, כאשר נקבע בתקן זה שהן תהיינה נמוכות מ- או שוות לרמות הפטור לכל רדיואיזוטופ, וערכיהן הכמותיים ייקבעו ע"י הרשויות בכל מדינה חברה. מדריך סבא"א RS-G-1.7 קובע כי כאשר הרדיואיזוטופים ממקור טבעי מהווים



סקירת מחקרים ועבודות
אוקטובר 2016

היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם

חלק מעיסוק, ניתן להשתמש ברמות אי החלות של טבלה 1 במדריך גם כאל רמות שחרור. לזה יש משמעות חשובה לגבי סילוק חומרים ר"א ממקור טבעי עם ריכוזי אקטיביות מתחת לרמות השחרור.

השפעת הנחיות מדריך סבא"א RS G-1.7 על יישומי אפר פחם בישראל-

באופן כללי יישומי אפר פחם בישראל מבוקרים ועל כן מהווים "עיסוק" (practice) כמשמעותו בהמלצות ה-ICRP ובתקן הבינלאומי להגנה מקרינה משנת 1996. על סמך ריכוזי האקטיביות המרביים של הרדיואיזוטופים באפר בהשוואה לריכוזי הפטור שהוצגו בטבלה 1 במדריך סבא"א, העיסוק באפר ויישומיו פטורים מדרישות הודעה, רישום ובקרה מנהלית, וניתן לשחרר אפר פחם לסביבה כולל לאתרי פסולת עירוניים. כלומר, האפר פטור למעשה מדרישות ה-BSS. לגבי יישומי האפר בבטון ובתעשיית הבנייה- אפר פחם בישראל נכלל בחומרי גלם לבטון ומוצרי בנייה, ומכיוון שתיתכן חשיפה לקרינה מחומרי גלם מסוג זה לעובדים ודיירים במבנים העשויים מאותם חומרים, נדרשת בקרה על הגבלת חשיפה זו, כלומר נדרשת עמידה בדרישות ת"י 5098.