

פרופ' טוביה שלזינגר, יועץ בטיחות קרינה  
מעלה ברוש, אפרתה 90435  
טל: 3579547-766 , 9938565-02, פקס-02-9309478  
e-mail: [tuviasch@zahav.net.il](mailto:tuviasch@zahav.net.il)

## **היבטים רדיולוגיים ומנהליים של העיסוק באפר פחם**

(עירום (stacking), שינוע, אחסון ויישום - בתשתיות, בבניה ובחקלאות)

חוות דעת

מאת

טוביה שלזינגר D.Sc

סיוון תשס"ח

יולי 2008

חוות דעת זו הוזמנה על ידי מנהלת אפר הפחם

## תוכן עניינים

| <u>פרק</u>  | <u>עמוד</u> |
|---|-------------|
| תקציר   | 3           |
| 1. רקע  | 5           |
| 2. מבנה המסמך ותוכנו                              | 7           |
| 3. מבוא   | 7           |
| 4. סיכוני קרינה הכרוכים בטיפול באפר פחם וביישומיו | 11          |
| 4.1 בתשתיות ובחקלאות                              | 12          |
| 4.2 בבנייה  | 16          |
| 5. סיכום ומסקנות                                  | 23          |
| אסמכתאות  | 25          |
| נספחים  | 30          |

## תקציר

חוות דעת זו הוזמנה ע"י מנהלת אפר הפחם בעקבות הודעת הממונה על הקרינה הסביבתית במשרד להגנת הסביבה מיוני 2008 המסווגת את אפר הפחם כפסולת רדיואקטיבית. במסגרת הערר על החלטת הממונה התבקשה חוות דעת מומחה להערכת החשיפה לקרינה של הציבור והעובדים מהטיפול באפר פחם עצמו ומיישומי האפר בשימושי הרבים והשונים.

בחוות הדעת נסקרים המחקרים והערכות הסיכון הכמותיות כפי שנערכו בנושא זה בישראל. מחקרים אלה נבחנים על פי אמות המידה המקובלות בתחום בטיחות הקרינה וההגנה מקרינה כפי שהן מוצגות במסמכי הגופים הבינלאומיים העוסקים בהגנה מפני קרינה מייננת. גופים אליהם נחשבים כסמכות מקצועית מנחה שהמלצותיהם מהוות בסיס לתקינה ולתחיקה בתחום ההגנה מקרינה ברוב ארצות העולם.

מעיון בממצאי המחקרים עולה כי :

- הסיכונים הקרינתיים הכרוכים בטיפול באפר פחם עצמו ואלה הכרוכים ביישומי אפר פחם בתשתיות נמוכים עד נמוכים מאוד. ביישומי תשתית מסוימים השימוש באפר גורם אף להקטנת הקרינה הסביבתית כיון שהשימוש באפר גורם להפחתת שפיעת גז הרדון.
  - הסיכונים הכרוכים ביישומי אפר פחם בתעשיית הבנייה נמוכים אף הם ומהווים כשלעצמם רק חלק, ובדרך כלל רק חלק קטן, מסיכוני הקרינה הכרוכים בשימוש במכלול חומרי הגלם בתעשיית הבניה, כיוון שכמעט כל חומרי הגלם לבניה מכילים ריכוז זה או אחר של חומרים רדיואקטיביים טבעיים. חוות הדעת קובעת כי השימוש בחומרי הגלם האלה כרוך אף הוא בסיכון קרינתי נמוך הנמצא תחת בקרה..
- עוד קובעת חוות הדעת כי אפר פחם בריכוזי האקטיביות המרביים שנמדדו בו פטור (exempted) למעשה מדרישות התקן הבינלאומי להגנה מקרינה (IAEA 1996), גם כשמדובר בכמויות גדולות (bulk amounts), זאת על פי הנחיות התוספת לתקן הבינלאומי שפורסמה בשנת 2004 (IAEA 2004). פרטים על מסמך זה והשלכותיו על מידת הבקרה הנדרשת על יישומי אפר פחם מפורטים במסמך נפרד (שלזינגר 2008).
- על בסיס האמור לעיל קובע מגיש חוות הדעת כי הסיכון הקרינתי הכרוך בשימושי אפר פחם ביישומיו השונים בישראל, ובכלל זה יישומו כחומר גלם בייצור צמנט ובטון,

בהתחשב במגבלות הטכנולוגיות האינטרנטיקליות של אחוז האפר בתערובות הבטון, תואמים את רמת הסיכון הקרינתי המקובל לפי המלצות/הנחיות הגופים הבינלאומיים אף לפי פרשנות מחמירה של הנחיות אלה.

דעתו המקצועית של מגיש חוות הדעת היא כי אין כל הצדקה לסווג את אפר הפחם כפסולת רדיואקטיבית, כיוון שהאפר אינו פסולת אלא מוצר בר שימוש שיישומיו נתונים לבקרה, כמפורט בחוות הדעת.

החלטה על סיווג אפר פחם (שריכוזי האקטיביות בו נמוכים ביותר) כפסולת רדיואקטיבית היא, לדעת מגיש חוות הדעת, צעד תמוה, בלתי סביר, בלתי אחראי ונוגד את ההמלצות וההנחיות הבינלאומיות הנוגעות לצורה ולהיקף של הבקרה על חומרים רדיואקטיביים ממקור טבעי (NORM). סיווג האפר כפסולת רדיואקטיבית פוסל אוטומטית את כל יישומי אפר הפחם כיוון שפסולת רדיואקטיבית חייבת להיות מסולקת לאתר פסולת רדיואקטיבית (**תקנות 2002**). סיווג כזה עלול לכן לגרום למדינה נזקים כלכליים וחברתיים משמעותיים ואולי בלתי הפיכים.

יתר על כן החלטה כזו עלולה ליצור למדינת ישראל בעיני הקהילה המקצועית הבינלאומית תדמית של מדינה שתקנותיה קיצוניות ונוגדות הסכמים ואמנות בינלאומיות וכן לגרום לזילות גמורה בהתייחסות הציבור בישראל אל פסולת רדיואקטיבית אמיתית.

## 1. רקע

בחודש יוני 2008 הודיע הממונה על הקרינה הסביבתית במשרד להגנת הסביבה (הממונה) למנהל מנהלת אפר פחם (המנהלת) על כוונתו להכריז על אפר פחם כעל פסולת רדיואקטיבית. עותק מהודעת הממונה מוצג בנספח 1 לחוות דעת זו. הממונה נימק את הודעתו (בדבר השינוי המהותי של התייחסות המשרד לאפר פחם) בכך ש"בשל רמת האקטיביות. האפר מהווה סיכון לאדם ולסביבה",

הודעה זו התקבלה בהפתעה במנהלת אפר הפחם כיוון שרמת האקטיביות של האפר לא השתנתה בתקופה האחרונה וכיוון שזה עשרות שנים אפר הפחם מיושם בישראל (כמו בכל ארצות המערב המפותחות) במגוון יישומים באישור המשרד להגנת הסביבה (ראה פרק 3 להלן).

כיוון שבאותו זמן התכוונו חברת החשמל, ומנהלת אפר הפחם לערר על החלטת הממונה ולשכנעו לחזור בו מכוונתו, פנה מנהל המנהלת למחבר מסמך זה בבקשה להכין חוות דעת מומחה שתתייחס לסיכוני אפר פחם. על חוות הדעת להתרכז, לפי הבקשה ב:

א. הערכת החשיפה (הסיכון) הצפויה לבני אדם (עובדים והציבור הרחב) לקרינה שמקורה באפר פחם בשלבי הטיפול בו (ערום (stacking), שינוע ואחסון).

ב. הערכת החשיפה (הסיכון) הצפויה לבני אדם (עובדים והציבור הרחב) כתוצאה ממגוון יישומי אפר הפחם ובעיקר בתשתיות, בחקלאות ובתעשיית הבניה.

מנהל המנהלת צירף לבקשה נתונים בסיסיים על תנאי הערום, האחסון והשינוע של האפר (בתחנות הכוח ובאתרי יישום האפר בתשתיות, בחקלאות ובתעשיית הבניה), תנאים שנקבעו ומיושמים על פי הוראות המשרד להגנת הסביבה, כדלהלן:

- פליטת אבק מערימות או מתקני אחסון ושינוע של אפר פחם או מעבודות תשתית באפר פחם בתנאי תפעול תקינים, היא מינימאלית עד זניחה בגלל הרטבה קבועה של האפר.
- שטיפת מתכות, לרבות יסודות רדיואקטיביים, מערימות ומתשתיות הבנויות מאפר פחם בתנאי יישום מבוקרים, היא מינימאלית עד זניחה.
- שימוש באפר פחם בתשתיות נעשה בהתאם לתנאים סביבתיים שקבע המשרד והכלולים במפרטי הקמה, המונעים פליטת אבק ותשטיפים לסביבה בעת הקמת התשתית ולאורך תקופת תפקודה.
- יישום אפר פחם בתעשיית הבניה נעשה בהתאם לתנאים ברישיון עסק שקבע המשרד להגנת הסביבה (המשרד), המגבילים את מרכיב האפר במוצר ומונעים פליטת אבק ותשטיפים לסביבה בתהליך הייצור, ובעתיד גם בהתאם להגבלות ולדרישות של ת.י 5058 (תקן העוסק בהגבלות על ריכוזי חומרים רדיואקטיביים טבעיים במוצרי בנייה).
- הערכת הסיכון המוצגת במסמך שלהלן הוכנה בהתאם לפרטי הבקשה שתוארה לעיל.

בהמשך המסמך נעסוק לפי בקשת המנהלת גם בהיבטים החוקיים של הבקרה על אפר הפחם ועל יישומיו.

מחבר חוות הדעת מלווה את הטיפול ביישומי אפר פחם בישראל קרוב לעשרים שנה. הוא היה בין מחברי הדוח הראשון בישראל שהציע לגבש תקן להגבלת ריכוזי חומרים רדיואקטיביים במוצרי בניה יותר מעשור לפני פרסום התקן הראשון בעניין זה (מרגליות ושלזינגר 1990, ראובני ושלזינגר 1996),

בשנת 2000 ביצע המחבר יחד עם דר' אבי בן שלמה ממ"ג סקר ספרות מקיף וחוות דעת עבור הוועדה לאנרגיה אטומית שהתייחסה לגישת הארגונים הבינלאומיים והמדינות המפותחות לבקרה על החשיפה לקרינה מייננת ממקורות טבעיים (בן שלמה ושלזינגר 2000). בשנת 2001 חקר מחבר המסמך את הסיכונים הרדיואקטיביים הכרוכים בטיפול באפר פחם והגיש למנהלת אפר פחם חוות דעת הנוגעת לסיכוני הקרינה בעת הטיפול באפר פחם כולל ההיבטים החוקיים והמנהליים של ייצוא אפר פחם לאירופה (Schlesinger 2001). המחבר הגיע למסקנה שהסיכון הכרוך בטיפול באפר פחם בתנאי עבודה מבוקרים הוא קטן מאוד עד זניח (ראה להלן). בשנת 2004 הציג המחבר בכנס הבינלאומי ה-11 של IRPA עבודה מקיפה על התקינה והתחיקה הבינלאומיים בכל הקשור להגנה בפני קרינה ממקורות טבעיים (Schlesinger 2004). פרטים נוספים על מעמדו של מחבר חוות הדעת והתפקידים שמילא וממלא כיום בתחום המקצועי של הגנת העובד והציבור מקרינה מייננת מוצגים בנספח 2 למסמך זה.

לפני שנסיים את פרק הרקע הקצר הזה ברצוני להביע את דעתי על עצם הודעתו של הממונה בדבר כוונתו להכריז על אפר פחם כעל פסולת רדיואקטיבית. דעתי המקצועית היא כי :

**א. אין כל הצדקה לסווג את אפר הפחם כפסולת רדיואקטיבית, כיוון שהאפר אינו פסולת אלא**

**מוצר בר שימוש שיישומיו נתונים לבקרה, כמפורט לעיל (ראה להלן בפרק 3 על היקף השימוש באפר פחם בתשתיות, בבניה וביישומים אחרים בארה"ב ובאירופה).**

**ב. החלטה על סיווג אפר פחם כפסולת רדיואקטיבית היא צעד תמוה, בלתי סביר בלתי אחראי**

**ונוגד את ההמלצות וההנחיות הבינלאומיות הנוגעות לצורה ולהיקף של הבקרה על חומרים**

**רדיואקטיביים ממקור טבעי (NORM). סיווג האפר כפסולת רדיואקטיבית פוסל אוטומטית**

**את כל יישומי אפר הפחם כיוון שפסולת רדיואקטיבית חייבת להיות מסולקת לאתר פסולת**

**רדיואקטיבית (תקנות 2002). סיווג כזה עלול לכן לגרום למדינה נזקים כלכליים וחברתיים**

**משמעותיים ואולי בלתי הפיכים. בנוסף לכך תיצור החלטה כזו למדינת ישראל (בעיני**

**הקהילה הבינלאומית והסוכנות הבינלאומית לאנרגיה אטומית שהיא הסמכות הבינלאומית**

**בכל הנוגע לטיפול בחומרים רדיואקטיביים) תדמית של מדינה שתקנותיה קיצוניות ונוגדות**

**הסכמים ואמנות בינלאומיות. בנוסף סיווג אפר פחם (שריכוזי האקטיביות בו נמוכים ביותר)**

**כפסולת רדיואקטיבית יגרום לזילות גמורה בהתייחסות הציבור בישראל אל פסולת**

**רדיואקטיבית אמיתית.**

## 2. מבנה המסמך ותוכנו

**פרק 3 פרק המבוא** מציג נתונים על כמות אפר הפחם הנוצרת בתחנות הכוח לייצור החשמל בישראל. מוצגים נתונים על ריכוזי חומרים רדיואקטיביים ומתכות רעילות בפחם ובאפר. מדווח על היתרונות הרבים של שימושי האפר בתשתיות, בחקלאות ובתעשיית הבניה לעומת חלופת הסילוק כפסולת, הן מבחינה סביבתית, הן מבחינה כלכלית. מוצגים גם נתונים על יישומי אפר פחם במדינות אירופה וארה"ב.

**פרק 4** יוקדש להערכת מידת החשיפה (הסיכון) של עובדים ובני אדם מהציבור הרחב במהלך הטיפול באפר (בתהליכי הערום, השינוע והאחסון) ובשלבים השונים של יישומי האפר בתשתיות, בתעשיית הבניה ובחקלאות.

**פרק 5** הוא פרק המסקנות וההמלצות. בסוף המסמך נציג רשימת אסמכתאות. הרשימה מכילה בנוסף לאסמכתאות המצוטטות במסמך זה, גם אסמכתאות לקריאה נוספת בנושאי סיכוני NORM והבקרה על יישומי חומרים אלה.

### הנספחים:

נספח 1 – עותק מהודעת הממונה על כוונתו לסווג אפר פחם כפסולת רדיואקטיבית.

נספח 2 – פרטים על מעמדו וניסיונו המקצועי של מחבר חוות הדעת.

נספח 3 – גדלים ויחידות למדידה כמותית של רדיואקטיביות ושל חשיפה לקרינה מייננת.

נספח 4 א – פרטים על הרדיואיזוטופים בשרשרת האורניום

נספח 4 ב – פרטים על הרדיואיזוטופים בשרשרת התוריום

נספח 5 – ריכוז חומרים רדיואקטיביים טבעיים בפחם המיובא לישראל ובאפר הפחם המופק ממנו בתחנות הכוח לייצור חשמל בישראל בשנת 2007.

נספח 6 – סקירת מערכת ההגנה מקרינה של ה-ICRP שהמלצותיה משמשות בסיס אחיד ומוסכם לתקינה ולתחיקה הנוגעים לבקרת חשיפת העובד והציבור לקרינה מייננת ברב מדינות העולם

נספח 7 – נתונים על קרינת הרקע הטבעי לפי דוח הוועדה המדעית של האו"ם משנת 2000.

נספח 8 – ריכוזי חומרים רדיואקטיביים בחומרי גלם ומוצרי בניה בישראל

## 3. מבוא

בשנת 2007 צריכת הפחם בישראל הגיעה ל 13.2 מליון טון (נתוני חברת החשמל 2008). צריכת הפחם בשתי תחנות הכוח, אורות רבין בחדרה ותחנת רוטנברג באשקלון, מתחלקת כמעט בשווה (55% בחדרה ו- 45% באשקלון) (מאפ 2008).

הפחם מיובא לישראל מדרום אפריקה, אוסטרליה, קולומביה, אינדונזיה ורוסיה (מאפ 2008).

בצד היתרונות של השימוש בפחם לייצור חשמל שריפת הפחם בכמויות אדירות כאלה גורמת לבעיה סביבתית אם לא מוצאים פיתרון לאפר הנוצר כתוצר לוואי של השריפה (למשל על ידי מחזור ושימוש בו לתשתיות או לתעשיית הבניה, ראה להלן).

כל טון של פחם הנשרף מותיר אחריו 40-150 ק"ג אפר תחתי ואפר מרחף. משמעות עובדה זו היא שבישראל נוצרים מידי שנה 1.1-1.3 מיליון טונות של פסולת בצורת אפר פחם (אפר תחתית ואפר מרחף). אפר זה מכיל שאריות של מתכות כבדות ויסודות רדיואקטיביים (להלן יסודות ר"א).

שימוש טכנולוגי באפר למטרות שונות במקום סילוקו כפסולת משרת על כן שתי מטרות במקביל.

א. מניעת מפגע סביבתי הנגרם בכריית חומרי גלם טבעיים.

ב. תועלת כלכלית מניצול הפסולת כתחליף לחומרי גלם טבעיים.

במדינות רבות בעולם נעשה שימוש מגוון באפר הפחם למשל כחומר מילוי (structural fill), כמרכיב בצמנט, בבטון ובמוצרי בנייה אחרים, כמצע לגינון וכחומר סופג רטיבות ברפתות. לפי דוח שפורסם בשנת 2008, על ידי תאגיד אפר הפחם בארה"ב, כ- 45% מתוך 91 מיליון טון של אפר פחם הנוצרים בתעשיית האנרגיה בארץ זו ממוחזרים ומנוצלים ביישומים שונים, כמחצית מזה בתעשיית הבניה (ACAA 2008). באירופה, ניצול אפר הפחם רחב הרבה יותר. לפי פרסום של התאגיד האירופי לתוצרי שריפת פחם משנת 2004, כ- 92% מכ- 50 מיליון אפר פחם שהופקו בשנה זו ברחבי 15 מהמדינות הגדולות ביבשת (ביניהם: איטליה, בלגיה, בריטניה, גרמניה, הולנד, יוון, ספרד, פורטוגל וצרפת) נוצלו ליישומים שונים ומגוונים, מזה כ-40% בתעשיית הבניה (ECOPA 2004) בישראל שעור השימוש גבוה עוד יותר. כ-98% מכמות של כ-1.2 מיליון טונות אפר תחתי ומרחף שנוצרו בשנת 2007 בתחנות הכוח בארץ יושמו בתחומים שונים, הרוב הגדול (כ-92%) יושם בתעשיית הבניה (מצגר 2008).

יישומי האפר כרוכים בסיכונים מסוימים, שחלק מהם הוזכר לעיל. בגלל סיכונים אלה הוטלו במדינות רבות וגם בישראל הגבלות מסוימות על היישומים האלה, והם מבוצעים תחת בקרה. היקף הבקרה ומהותה תלויים בסוג הסיכון (קרינה חיצונית, נשימת גז רדון הנפלט מן האפר, חדירת תשטיפי האפר למי תהום, חדירת האפר למערכת הנשימה או למערכת העיכול של בני אדם או בעלי חיים), היקף הבקרה תלוי גם בסוג היישום.

כיוון שבדרך כלל הסיכונים הרדיולוגיים נמוכים והם קיימים רק בחלק מהיישומים, ממליצים הארגונים הבינלאומיים על הפעלת אמצעי בקרה חלקיים בגישה הקרויה **הגישה ההדרגתית** (graded approach), גישה אותה נסביר במסמך נפרד המוקדש להיבטים החוקיים והמנהליים של הבקרה על יישומי חומרים רדיואקטיביים ממקור טבעי (NORM) בכלל ועל יישומי אפר פחם בפרט (שלזינגר 2008).

הסוכנות להגנת הסביבה בארה"ב (EPA) מפעילה שיקולים דומים בהנחיותיה ביחס למחזור אפר פחם. במסמך שפורסם בשנת 2000 (EPA 2000) מסבירה הסוכנות את החלטתה לפטור אפר



פחם (מתחנות כוח) מדרישות בקרה מחמירות החלות על פסולות מסוכנות hazardous wastes). במסמך מוזכרות הגבלות ודרישות מסוימות ביחס לתנאי המחזור וסוגי היישומים של אפר פחם המאושרים על ידי הסוכנות. מודגש במסמך כי הסוכנות להגנת הסביבה אינה מעוניינת לשים הגבלות נוספות על היישומים המועילים של האפר והיא תומכת במיוחד ביישומי האפר בתעשיית הבטון ומוצרי הבנייה.

בעיסוקים מסוימים הקשורים באפר פחם וביישומיו ניתן לפי הגישה ההדרגתית לוותר כליל על בקרה מההיבט של בטיחות קרינה אם קיימת בקרה מסיבות אחרות הקשורות בסיכונים הלא קרינתיים של האפר ו/או יישומיו הספציפיים. נצטט בנושא זה קטע מדו"ח מספר 51 מסדרת הדוחות הבטיחותיים של הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה אטומית (סבא"א- IAEA) משנת 2007 (IAEA 2007). דו"ח זה עוסק באמצעי בטיחות קרינה הנדרשים בתעשיית הצירקון (Zircon) והצירקוניה (Zirconia) (המחצבים המהווים חומרי גלם לתעשיות אלה מכילים רדיואיזוטופים משרשרת האורניום והתוריום עם ריכוזי אקטיביות של מאות עד עשרות אלפי Bq/kg):

בסעיף 1.3 בדו"ח נאמר:

#### Pa. 1.3 Scope:

"...Particular attention is given to situations where existing occupational health and Safety (OHS) regulations or environmental protection regulations may be effective in avoiding or minimizing the need for additional regulatory control of radiation exposure..."

**בפרק 4** להלן נסקור את סיכוני הקרינה הכמותיים הכרוכים בטיפול באפר וביישומיו. סיכון זה נובע מהעובדה שהאפר מכיל שאריות של חומרים רדיואקטיביים (חומרים ר"א) הפולטים קרינה מייננת. נציג הערכה כמותית למידת החשיפה לקרינה הצפויה מהאפר ומיישומיו בתרחישים שונים מרגע הגעת האפר למתקני האיסוף דרך שלבי הטיפול באפר (עירום, אחסון ושינוע) ועד לתחומי היישום בתשתיות, בחקלאות ובתעשיית הבניה.

החומרים הר"א (רדיואיזוטופים) העיקריים שבפחם ובאפר הפחם הם **אשלגן-40 ( $^{40}\text{K}$ )** ורדיואיזוטופים **משרשרת האורניום** (Uranium Series) שבראשה אורניום 238 ו**משרשרת התוריום** (Thorium Series) שבראשה תוריום 232. האורניום והתוריום מצויים בפחם בשיווי משקל (או קרוב לשיווי משקל) עם בנותיהם. בשתי השרשרות יחד יש קרוב ל-20 רדיואיזוטופים שהחשובים בהם, לעניין סיכוני חשיפה לקרינה חיצונית, הם **רדיום-226 ( $^{226}\text{Ra}$ )** ובנותיו **ו- תוריום-232 ( $^{232}\text{Th}$ )** ובנותיו. לעניין סיכוני **זיהום פנימי** נלקחים בחשבון כל הרדיואיזוטופים שבשרשרת האורניום הטבעי ובשרשרת התוריום הטבעי. ריכוזי **האקטיביות** של הרדיואיזוטופים האלה בפחם משתנים בהתאם למקור הפחם (מקום כרייתו) אך בדרך כלל הריכוזים הם בטווח של עשרות ועד מאות אחדות **בקרל לקילוגרם (Bq/kg)**.

(ראה **בנספח-3** למסמך זה הסבר קצר על הגדלים והיחידות המיוחדים המשמשים להערכה כמותית של חומרים ר"א ושל מידת החשיפה לקרינה מייננת).

פרטים על הרדיואיזוטופים שבשרשרת האורניום והתוריום מוצגים ב**נספח 4א** וב**נספח 4ב** למסמך זה. עיון בטבלה שבנספח 4א מסביר מדוע לעניין חשיפה לקרינה חיצונית מרדיואיזוטופים בשרשרת האורניום מתחשבים רק ברדיום-226 והרדיואיזוטופים שתחתיו בשרשרת. הסיבה לכך היא שהרדיואיזוטופים שלפני הרדיום בשרשרת זו פולטים ברובם הגדול רק קרינות אלפא וביתא שהן קרינות לא חדירות לכן רדיואיזוטופים אלה לא תורמים למעשה לחשיפה החיצונית. לעומת זאת לעניין מנת הקרינה מזיהום פנימי פולטי קרינת האלפא הם החשובים ביותר.

שריפת הפחם מסלקת את רב החומר האורגני מהפחם וגורמת להגדלת ריכוז המתכות והרדיואיזוטופים באפר פי 15-6 מריכוזיהם בפחם. השריפה יוצרת שני סוגי אפר: **אפר מרחף** (fly ash) ו**אפר תחת** (bottom ash). האפר המרחף הוא דק יותר והוא מופרד מגזי הפליטה על ידי משקעים אלקטרוסטטיים (כדי למנוע יציאתו דרך הארובות). אפר תחת גס יותר והוא שוקע בתחתית הדוד ממנו הוא מסולק באופן רציף בזרם מים. יש הבדל קטן בין ריכוזי האקטיביות באפר מרחף ובאפר תחת, כאשר הריכוזים באפר מרחף גבוהים יותר (ב 10-20% עבור  $^{226}\text{Ra}$  ו-  $^{232}\text{Th}$ ).

נתונים על הערכים של ריכוזי האקטיביות בפחם המיובא לישראל ובאפר פחם שנוצר בתחנות הכוח לייצור חשמל בישראל מוצגים ב**נספח 5** למסמך זה. בטבלה שבנספח זה מוצגים ערכי ריכוז האקטיביות שנמדדו בשנת 2007. באותה טבלה בטור האחרון מוצגים ערכי הממוצע הרב שנתי של ריכוזי האקטיביות כפי שנמדדו באופן שגרתי, פעמיים בשנה במשך 16 שנים מאז 1991. לנתונים שב**נספח 5א** חשיבות רבה כי הסכנה הכרוכה ביישומי האפר היא יחסית לריכוזי האקטיביות. מידת הסכנה שביישומי האפר היא הנושא המרכזי של חוות דעת זו. מתוך אותו נספח עולה כי ריכוזי הרדיואיזוטופים שנזכרו לעיל הם בטווח של 100-220 Bq/kg ו- 80-230 Bq/kg או 130-450 Bq/kg עבור רדיום-226, תוריום-232 ואשלגן-40 בהתאמה. כאמור לעיל הרדיום ושאר בנות שרשרת האורניום נמצאים בשיווי משקל עם האורניום 238. האקטיביות הסגולית של אורניום-238 היא  $1.233 \cdot 10^4$  (Bq/g) (ראה **נספח 3**) לכן ריכוז של 200 בקרל אורניום לק"ג אפר תואם לריכוז של כ- 16.2 מיליגרם אורניום לק"ג אפר, דהיינו כ- **16 ppm**, על בסיס משקלי. חישוב דומה לגבי תוריום-232 (עם מחצית חיים ארוכה פי 3.1 מזה של אורניום 238) תוך שימוש באקטיביות הסגולית של תוריום-232 -  $4.05 \cdot 10^3$  (Bq/g) (ראה **נספח 3**) נותן ריכוז 200 בקרל תוריום-232 לק"ג אפר תואם לריכוז של כ- 49.4 מיליגרם תוריום לק"ג אפר דהיינו כ- **49 ppm**.

ריכוזי האורניום והתוריום בדוגמאות לאפר מרחף ותחת בתחנות הכוח בישראל במונחי ppm נקבעו על ידי המכון הגיאולוגי בשנים 2003-2007 ומוצגים ב**נספח 5ב** למסמך זה. הערכים שנמצאו מאשרים את נתוני הטבלה 5א על ריכוזי הרדיואיזוטופים שהוכנה ע"י חברת החשמל.

כשהאורניום-238 נמצא בשיווי משקל עם בנותיו באפר הוא תורם את 99.99% מהמשקל היחסי של כל השרשרת באפר זאת בגלל מחצית חייו הארוכה מאוד ביחס לבנותיו.

מסקנה חשובה העולה מהנתונים שלעיל היא שעפ"י ריכוזי האקטיביות שלעיל (עד 200 בקרל אורניום-238 לק"ג אפר) מיליגרם של אפר מכיל עד כ-  $2 \cdot 10^4$  Bq של אורניום 238 ואקטיביות דומה של בנותיו. עלינו לזכור ערך זה כשנדון להלן בסיכוני נשימה של אבק אפר פחם המרחף באוויר.

#### 4. סיכוני קרינה הכרוכים בטיפול באפר פחם וביישומיו.

אפר הפחם נחשב בכל העולם כתוצר לוואי של תעשיית האנרגיה שיש לו שימושים ויישומים מועילים רבים. בהעדר בקרה, יישומי האפר יכולים להיות כרוכים גם בסיכונים סביבתיים ובריאותיים מסוימים אותם כבר הזכרנו, פיזור מתכות כבדות לסביבה במקרה של שימושי אפר בתשתיות, חדירת חלקיקי אפר למערכת הנשימה של בני אדם (בהיבט של בריאות תעסוקתית) וחשיפת בני אדם לקרינה חיצונית או פנימית. בגלל הסיכונים האלה יישומי אפר הפחם נתונים ברב המדינות המפותחות לבקרה כזו או אחרת. הסיכונים לעיל תלויים בסוג היישום, כאשר הסיכון הקרינתי רלוונטי בעיקר ליישומים בבניה.

בפרק זה להלן נעסוק בהערכת הסיכון הקרינתי בלבד. נעריך בנפרד את סיכוני החשיפה לקרינה חיצונית (הנגרמת על ידי קרינת גמא הנפלטת מן האפר) ואת הסיכונים הקשורים בחשיפה פנימית הנגרמת על ידי נשימת גז הרדון הנפלט מהאפר או זו הנגרמת כתוצאה מקרינות אלפא, ביתא וגמא הנפלטת מחלקיקי אפר שחדרו לדרכי הנשימה או למערכת העיכול של האדם (ראה בנספח 3 למסמך זה הסבר על ההבדל בין חשיפה לקרינה חיצונית ובין חשיפה לקרינה שמקורה בזיהום פנימי). הערכת החשיפה לקרינה חיצונית נעשית על ידי חישובים תיאורטיים ונתמכת על ידי מדידות ישירות באמצעות מנטרי קרינה.

הערכת מנת הקרינה הצפויה מזיהום פנימי מסובכת יותר ואינה ניתנת למדידה ישירה. כקנה מידה משתמשים בפרמטר הקרוי **גבול הנטילה שנתית** ובאנגלית **ALI** (Annual Limit of Intake). ה- **ALI** הנמדד ביחידות Bq היא האקטיביות שחדירתה לגוף במשך שנה תגרום למנת קרינה אפקטיבית המגיעה לגבול המנה השנתי. הסבר מפורט יותר על הפרמטר הזה מוצג בנספח 3 למסמך זה, העוסק בהגדרת הגדלים והיחידות להערכה כמותית של רדיואקטיביות וחשיפת בני אדם לקרינה מייננת. באותו נספח הוצגו ערכי ה- **ALI** לנשימה לתרכובות לא מסיסות של רדיואיזוטופים בשרשרת האורניום והתורמים תרומה עיקרית למנת הקרינה של בני אדם שחומר כדוגמת אפר פחם חדר לגופם בדרכי הנשימה. מתוך הערכים המוצגים בנספח 3 עולה כי ערך ה- **ALI** לנשימה לעובדים הנושמים אוויר המזההם באפר פחם הנושא רדיואיזוטופים משרשרת האורניום בשיווי משקל עם ה-  $^{238}\text{U}$  מגיע ל- 880 Bq (יצוין כי לפי הנתונים שהוצגו לעיל על הריכוזים המרביים של  $^{238}\text{U}$  באפר הפחם נשימת אקטיביות בכמות זו תואמת קליטת 4.4 ק"ג של אפר בריאות באמצעות נשימה).

גודל הנגזר מערכי ה-AL הוא ה-**DAC** (Derived Air Concentration). זהו ריכוז החומר הרדיואקטיבי באוויר ( $\text{Bq/m}^3$ ) שיגרום לעובד (בהתאם לקצב נשימתו ומספר שעות העבודה בשנה בריכוז המדובר) לנשום כמות אקטיביות השווה לערך ה-ALI בתנאי עבודה אופייניים של 2000 שעות עבודה בשנה.

ערך ה-**DAC** לעובדים לתרכובות לא מסיסות של  $^{238}\text{U}$  ללא בנותיו הוא  $1.125 (\text{Bq/m}^3)$  ולתרכובות לא מסיסות של  $^{238}\text{U}$  בשיווי משקל עם בנותיו הוא  $0.37 (\text{Bq/m}^3)$  (ראה נספח 3).

לפני שניגש להערכות הסיכון הכמותיות נציין כי כל בני האדם על כדור הארץ חשופים לקרינה מייננת ממקורות טבעיים. החשיפה היא הן לקרינה חיצונית (קרינה קוסמית וקרינת קרקע) והן לחדירת חומרים רדיואקטיביים לגופו בדרכי הנשימה והאכילה. **מנת הקרינה האפקטיבית** (ראה נספח 3) מקרינה טבעית נאמדת ביותר משני מיליון **לשנה**. פרטים על קרינת הרקע הטבעי ומרכיביו מוצגים בנספח 7 למסמך זה.

**בסעיף 4.1** להלן נתייחס ראשית לסיכוני הקרינה בעת הטיפול באפר עצמו בשלבי הערום (stacking), האחסון והשינוע של האפר (בתחנות הכוח ובאתרי יישום האפר). נמשיך ונבחן את הסיכונים הקרינתיים הנובעים מהיישומים בתשתיות, בחקלאות ובתעשיית הבניה. ההערכות שתובאנה כאן נסמכות רובן ככולן על מחקרים וסקרים, בארץ ובעולם, מהם תיאורטיים, מהם המבוססים על מדידות בפועל במקומות העיסוק באפר וביישומיו. נביא רק את הפרטים העיקריים המתארים את המחקר ואת תוצאותיו תוך ציטוט שם המחקר ופרטים על מבצעיו.

נדגיש כי הערכות הסיכון של הטיפול באפר פחם עצמו בפעילויות שהוזכרו לעיל מתייחסות היום בעיקר לאפר תחתי כיוון שהאפר המרחף מנוצל בישראל רובו ככולו בתעשיית הבטון כמפורט לעיל. הטיפול באפר המרחף בתעשייה זו לא כרוך בסיכוני זיהום פנימי כי האפר מהסוג הזה מועבר במערכות פנאומטיות סגורות מהמשקעים האלקטרוסטטיים לתוך ממגורות (silos) ומשם למיכליות סגורות (דוגמת מיכליות צמנט). סיכונים דומים מאפר מרחף שנוצל בעבר במסות גדולות בתשתיות, ואולי ישמש למטרות כאלה גם בעתיד, אינם שונים מהותית מאלה של אפר התחתית כיוון שהטיפול באפר המרחף (הרטבה למניעת אבק) בתשתיות דומה לזה של אפר התחתית.

בנושא הסיכונים הכרוכים ביישומי אפר בתעשיית הבניה נדון לחוד בסעיף 4.2 להלן.

## 4.1 סיכוני קרינה בעת הטיפול באפר פחם וביישומיו בתשתיות ובחקלאות

### 4.1.1 ערום (stacking), שינוע ועיבוד של האפר

בשנת 1998 ביצעה קבוצת חוקרים ממ"ג שורק, עבור אגף הפיקוח על העבודה במשרד העבודה והרווחה הערכה של תנאי העבודה וסיכוני החשיפה לקרינה שמקורה באפר הפחם לעובדים ובני אדם מן הציבור בעת הערום (stacking) והשינוע של אפר מרחף מעובד (conditioned) **(שלדינגר**

**וגרופ 1998).**

התרחיש שנבדק היה עבודה במשך 2,000 שעות בשנה, בתוך סכנה סגורה (אך לא אטומה), במרחק של מטר אחד מערימת אפר פחם (שלא הקפידו להרטיבה) שממדיה הם 5X5 מ' וגובה 3 מ' עם ריכוזי האקטיביות מרביים של 200 בקרל לק"ג, 200 בקרל לק"ג ו- 600 בקרל לק"ג ל-  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ו-  $^{40}\text{K}$  בהתאמה. ההנחות על ריכוזי האקטיביות התבססו על הערכה שמרנית. מסלולי החשיפה התעסוקתית שלגבם בוצעה ההערכה היו: חשיפה **לקרינה חיצונית** ומנת קרינה **מזיהום פנימי** כתוצאה מנשימת רדון וחדירה של חלקיקי אפר (בריקוזים הפוטנציאליים באוויר כתוצאה מההרחפה עקב עבודות העירום או השינוע התיאורטיות) למערכת הנשימה.

על בסיס עבודה קודמת של הצוות (**גרופ 1997**) הניחו מחברי הדו"ח כי **מקדם ההרחפה** התיאורטי של אפר בעבודות מסוג זה (ערום אפר מרחף מעובד) מגיע, לערך מרבי של  $3 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}^3$  (מקדם ההרחפה מוגדר כיחס בין ריכוז האקטיביות באוויר - ביחידות  $\text{Bq/m}^3$  לריכוז האקטיביות באפר - ביחידות  $\text{Bq/kg}$ ).

על בסיס אותה עבודה הניחו המחברים כי לריכוזי הרדון הצפויים באוויר שבקרבת ערימת האפר עשויים להגיע לערך תיאורטי מרבי של  $80 \text{ Bq/m}^3$ .

תוצאות ההערכה כפי שהוגשו למזמיני העבודה היו כדלהלן:

**חשיפה תעסוקתית:**

**קרינה חיצונית (מנה מצטברת לשנה) - 180 מיקרו סיוורט ( $180 \mu\text{Sv}$ ).**

**זיהום פנימי – (מנה מחויבת מצטברת לשנה) :**

**- מנשימת רדון – 200 מיקרו סיוורט ( $200 \mu\text{Sv}$ ).**

**- מחלקיקים מרחפים – 500 מיקרו סיוורט ( $500 \mu\text{Sv}$ ).**

מחברי המחקר הסיקו עוד כי אם נוקטים באמצעי בטיחות שגרתיים לפי חוקי ההיגיינה התעסוקתית (כגון הרטבת האפר, הנדרשת ממילא כתנאי תפעולי הכרחי לערום ושינוע במערכות פתוחות, ו/או שימוש במסכות אבק וכו') המנה מחלקיקים מרחפים ומרדון צפויה לקטון בסדר גודל ויותר. ומנת הקרינה התעסוקתית הכוללת צפויה להגיע לכ- **150-200 מיקרו סיוורט ( $150-200 \mu\text{Sv}$ )** בלבד. יצוין כי מנת הקרינה הזו מגיעה לכ- 4% בלבד מגבול המנה השנתי לעובדים. מסקנה נוספת של מחברי המסמך היא כי **מנת הקרינה לבני אדם מן הציבור** השוהים בקרבת מקום העבודה שם מתבצע הטיפול באפר פחם לפי התרחיש שלעיל צפויה להגיע ללא יותר מכ- **5%** מערכי המנות שהוצגו לעיל. המחברים העריכו את השגיאה המרבית בהערכה שלהם בכ-  $\pm 50\%$ .

לעומת ההערכות התיאורטיות השמרניות נזכיר כאן את הסקר המעשי שנערך בהזמנת משרד התמ"ת ע"י קבוצת חוקרים בממ"ג שורק בשנת 2004 (**גרופ 2004**) להערכת סיכוני חשיפת עובדים לקרינה מייננת במפעלי תעשייה המעבדים פוספטים ואפר פחם. בסקר זה, בו השתמשו בדוגמי אוויר אישיים אותם נשאו עליהם העובדים, נמצא כי בהערכה מחמירה מנת הקרינה הצפויה במשך שנה לעובד השווה שעה אחת ליום (300 שעות בשנה) באזור הזיהום הגבוה ביותר היא:

## 60 מיקרוסיוורט לעובד בסמיכות למערכת שינוע ואחסון אפר פחם בתחנת כוח

### 32 מיקרוסיוורט לעובד במפעל בטון העושה שימוש באפר פחם

"מתוצאות אלה עולה" כדברי מחברי הדו"ח "כי אין באפר פחם – בתנאי העבודה שנסקרו – פוטנציאל להוות סיכון רדיולוגי, כלומר אין הצדקה להגביל את השהייה בסביבתו".

בטרם נסיים סעיף זה נזכיר כי על העיסוק באפר פחם לא חלות תקנות הבטיחות בעבודה לעוסקים בקרינה מייננת (תקנות 1992ב), זאת לפי התוספת הרביעית לתקנות בהם ניתן פטור מתחולת התקנות לחומרים מוצקים שהריכוז הממוצע של היסודות הרדיואקטיביים בהם אינו עולה על 100 בקרל לגרם (0.0027 מיקרוקירי לגרם) ובתנאי שריכוז זה אחיד למדי. אגף הפיקוח על העבודה ביקש בכל זאת לבצע את ההערכה כיוון שבדעת משרד התמ"ת לעדכן את תקנות הבטיחות בעבודה משנת 1992. הגרסה החדשה של התקנות תותאם לדרישות התקן הבינלאומי להגנה מקרינה משנת 1995 (IAEA 1995). נציין עם זאת כי גם לפי התקן הבינלאומי הזה ואף לפי נספחיו ועדכוניו משנת 2004 (IAEA 2004) אפר פחם הוא מועמד לפטור (exemption) מדרישות בטיחות הקרינה כמוסבר במסמך נפרד המוקדש להיבטים החוקיים והמנהליים של הבקרה על NORM ואפר פחם (שלזינגר 2008).

#### 4.1.2 יישום אפר פחם בתשתיות

א. בשנת 2002 בוצע על ידי צוות חוקרים מהקריה הגרעינית נגב סקר ספרות וסיכום מחקרי שדה לבחינת הסיכונים הרדיולוגיים של יישומי אפר פחם (מרחף ותחתית) בתשתיות בעיקר כתשתית לכבישים, כחומר המשמש למילוי בורות ולבניית סוללות וכחומר מילוי של יסודות בתים. נבחנו מנות הקרינה הצפויות לעובדים ובני אדם מן הציבור המשתמשים בכבישים ובבתים הנבנים על שכבת אפר פחם. נבחנו גם הסכנות של שטיפת חומרים רדיואקטיביים ומתכות כבדות מן האפר למי התהום.

מדיווחי הצוות (פלד וצרויה 2002) עולה כי לא קיימת בעיה אקולוגית עקב שטיפת מתכות כבדות או חומרים רדיואקטיביים למי התהום או לשרשרת המזון. ביחס למנות הקרינה הצפויות לעובדים ולאוכלוסיה, החוקרים מצטטים מסמכים של הסוכנות האמריקאית להגנת הסביבה (EPA). מנות הקרינה לעובדים כתוצאה מהיישומים האלה הוערכו על ידי הצוות כ- 0.3 מיליסיוורט לשנה לכל היותר. המנה לבני אדם מן הציבור נמוכה הרבה יותר.

ב. מחקר מעשי על סיכוני הקרינה לתושבי מבנים (בקיבוץ זיקים בדרום הארץ) הבנויים על שכבת מילוי של אפר פחם בעובי 3 מ' שמעליה שכבת כורכר בעובי 1.5 מ', בוצע בשנת 2001 על ידי צוות חוקרים בראשות דר' ו. שטיינר מהמשרד להגנת הסביבה. הצוות ביצע מדידות קצב קרינת גמא ושפיעת גז ראדון מהקרקע (שנמדדת ב-  $Bq/m^2 \cdot sec$ ). החוקרים הסיקו מתוצאות המדידות (שטיינר 2001) כי קצב קרינת גמא מאפר פחם המכוסה בשכבת קרקע אינה עולה על קצב קרינת הגמא מעל הקרקע הטבעי כפי שנמדד באותו אזור. עוד התברר ששפיעת רדון משכבת אפר פחם נמוכה פי 5 – 4 מהשפיעה הטבעית מהקרקע שבאותו אזור.

בשנת 2002 ביצע ד"ר שטיינר בדיקות נוספות בקיבוץ זיקים ובקיבוץ נען באזור שכבת אפר פחם בעובי של 4-1 מ' ובשטח של כ- 100X100 מ'. מהמדידות עלה כי קצב מנת קרינת הגמא לה נחשף מפעיל ציוד מכני שעבד באתר עלה רק באחוזים בודדים (ובתחום שגיאת המדידה) ביחס לקצב מנת קרינת הגמא הממוצע שנמדד באותו הגובה הרחק מאזור האפר (שטיינר 2002).

ג. ב- 2008 הגיש דר' יעקב נתן מהמכון הגיאולוגי מסמך המסכם תוצאות מעקב בן 10 שנים אחר דליפת מתכות ומזהמים אחרים למי תהום מסוללת אפר פחם באורך כ-1.1 ק"מ מתחת לכביש הגישה לג'יסר-א-זרקא בכביש החוף. הסוללה מכילה כ- 28,000 טון של אפר פחם מרחף ותחתית שסופקו מתחנת הכוח אורות רבין. תוצאות המעקב (Nathan 2008), שהיו שותפים לו גם חוקרים ממכון וולקני ומחברת חשמל, הצביעו על העדר דליפה משמעותית של מזהמים למי התהום, בכלל זה גם יסודות רדיואקטיביים. המחקר הראה כי האפר המרחף שבסוללה, המעובד ומהודק בהתאם לדרישות מפרט הסלילה, הפך למעשה לבלתי חדיר למעבר מים בתהליך מהיר יחסית.

ד. בשנת 2002, בוצע על ידי החברה לשרותי איכות הסביבה ניטור סביבתי וניטור סביבתי-תעסוקתי למדידת ריכוזי חלקיקי אפר תחתי באוויר שבסביבת אתר אפר פחם ליד קיבוץ זיקים. באתר בוצעו עבודות פיזור והרטבה של אפר פחם כמו גם עבודות טעינה, שינוע, פריקה, פיזור, הידוק וכבישה. האפר אמנם מגיע לאתר כשהוא מורטב אבל במזג אוויר חם וקיצי האפר עלול להתייבש ואבק האפר עלול להתפזר באוויר על ידי הרוח. הניטור בוצע כדי לבחון עם ערכי ריכוז האפר באוויר מגיעים לסף התעסוקתי או הסביבתי לסיכונים אבק מרחף (עם קוטר חלקיק אפקטיבי הקטן מ- 10 מיקרומטר). ערכי הסף נמדדים ביחידות מיקרוגרם מסה במטר מעוקב שלאוויר (מק"ג/מ"ק). ערך הסף לפי התקנות הישראליות נקבע ל- 150 מק"ג/מ"ק לחשיפה של 24 שעות. הערכים שנמדדו בפועל בניטור שבוצע במחקר זה (שרבני 2002) הגיעו במקרה של אפר פחם תחתית (בניכוי תרומת אבק הרקע הסביבתי שנמדד במעלה הרוח) ל-3-14 מק"ג/מ"ק המהווים 2%- ו- 9% מערך הסף, במרחק 150 מ' ו- 75 מ' מאתר העבודה בהתאמה.

מתוצאות המדידות עולה כי ריכוזי האבק בר הנשימה שנמצאו בניטור בעת עבודות תשתית באפר פחם מורטב נמוכים באופן ניכר מתקן TWA-TLV שנקבע ע"י ה- ACGIH ושקיבל גושפנקא חוקית ממשרד העבודה בישראל. כמויות האבק הנינשם שנמדדו היו אף נמוכות מכדי למסרן לאנליזה בספקטרוסקופיית XRD לקביעת ריכוז הסיליקה הגבישית החופשית.

נסיים סקירת מחקר זה בכך שניצין כי, בהנחה שכל האבק שנמצא באוויר הוא אפר פחם, המכיל אורניום-238 בשיווי משקל עם בנותיו, ערך הסף לסיכונים אבק של 0.15 מיליגרם אבק למ"ק אוויר שהוזכר לעיל תואם ל-  $3 \cdot 10^{-5}$  Bq אורניום-238 למ"ק אוויר. ערך זה מהווה כ- 8 אלפיות האחוז מערך ה- DAC לתרכובות לא מסיסות של  $^{238}\text{U}$  בשיווי משקל עם בנותיו (שהוא  $0.37 \text{ (Bq/m}^3\text{)}$ ).

### 4.1.3 יישום אפר פחם כמצע לגידול צמחים

בין השנים 1998-2006 נערכו ניסויים על ידי מדענים מהפקולטה לחקלאות של האוניברסיטה העברית, בשיתוף עם המרכז למחקר גרעיני נחלל שורק, לגידול צמחים על מצע של אפר פחם תחתית ובחינת תכונות עלי הצמחים ופירותיהם בהשוואה לתכונות עלים ופירות של צמחים דומים שגדלו על מצע טוף (מצע מקובל המוצא שימוש רחב בגידול צמחי חממה בישראל ובעולם). הניסויים נערכו בחממות אחדות ברחבי הארץ כולל הנגב, הערבה, בקעת הירדן, בקעת בית שאן והשרון והצמחים שנבחנו כללו עגבניות, פלפל, עירית, צמחי תבלין, מנגו ואחרים. תוצאות הניסויים הצביעו על כך כי ריכוזי מתכות כבדות ורדיונוקלידים בעלים ובפירות שגדלו על מצע אפר פחם היו נמוכים במידה ניכרת מהסף המותר. הריכוזים היו דומים או אף נמוכים מאלו שנמצאו בצמחים שגדלו על מצע טוף. עם סיום המחקר הרב שנתי (חן וחקין 2006) הרב שנתי המליצו עורכי המחקר בפני שירות המזון הארצי במשרד הבריאות לאשר השימוש באפר פחם תחתית כמצע גידול לכל גידולי המזון החד שנתיים. ההמלצה התקבלה ע"י שירות המזון.

אספקט בטיחותי אחר של יישומי אפר פחם בחקלאות ובגינות נבחן בשנת 2002 על ידי חוקר ממומ"ג (קור 2002). במחקר זה הוערכה החשיפה לקרינה הצפויה לעובדים ביישומים שונים של אפר בחקלאות ובגינות. באופן ספציפי הוערכה החשיפה לקרינה הצפויה לעובדים העוסקים בתשתיות למדשאות במגרשי ספורט ובגנים ציבוריים ולבני אדם מן הציבור שישהו על המדשאות האלה, כאשר התשתית נעשית מתערובת של 60% אפר פחם תחתית או טוף ו-40% קומפוסט בעובי של 30 - 10 ס"מ (אפר הפחם והטוף מכילים את שלושת הרדיונוקלידים הטבעיים – אשלגן 40, רדיום 226 ותוריום 232 כאשר ריכוזי האשלגן 40 גבוהים בטוף פי 2 ביחס לאפר פחם וריכוזי שני הרדיונוקלידים האחרים גבוהים באפר פחם פי 4-5 ביחס לטוף).

מהמחקר עולה כי תוספת החשיפה לקרינה עקב השכבה הדקה של האפר (בהשוואה לקרינת הקרקע הרגילה) זניחה ונמוכה בהשוואה להשתנות החשיפה לקרינת הקרקע הטבעי. תוספת מנת הקרינה המצטברת בשנה לאדם השווה 500 שעות במשך השנה על המדשאה מגיעה ל 50-20 מיקרו סיוורט לשנה (בהתאם לכך אם הוא עומד או שוכב על הדשא). המנות האלה נמוכות בפקטור 10-5 מחסם המנה לבני אדם מן הציבור עבור עיסוק בודד, לפי המלצות ה-ICRP.

### 4.2 יישום אפר פחם בתעשיית הבניה

תחום היישום העיקרי של אפר פחם בתעשיית הבניה היא בתחום מוצרי הבטון, לכן נתרכז ביישומי אפר הפחם בתחום זה.

תערובות הבטון המיוצרות בישראל, כמו גם אלה המיוצרות בארה"ב ומדינות מערב אירופה, מכילות 5-10% אפר פחם (בדרך כלל אפר מרחף בלבד). חלק מהאפר מוכנס לצמנט



(המהווה כ-10% ממשקל הבטון). כמות נוספת של אפר מוכנסת לתערובת הבטון כתחליף (או כתוספת) לחול. ברוב תערובות הבטון המיוצרות בישראל האפר מהווה פחות מ-7% ממשקל הבטון (כ-160-80 ק"ג למ"ק של בבטון עם צפיפות מרחבית של כ-2,400 ק"ג למ"ק). שאר מרכיבי הבטון הם מים (5%-4) חול, חצץ ואגרטים אחרים המהווים יחד כ-90% ויותר ממשקל הבטון.

למרות שריכוזי החומרים הרדיואקטיביים הטבעיים (דהיינו **אשלגן-40** ורדיואיזוטופים משרשרת האורניום, המיוצגים על ידי **רדיום-226**, ושרשרת התוריום - המיוצגים על ידי **תוריום-232**) באפר פחם גבוהים פי 10-5 מריכוזי אותם החומרים בשאר מרכיבי הבטון, רוב מנת הקרינה אותה סופגים דיירי המבנים (העשויים ממוצרי הבטון) מקורה בחומרים הרדיואקטיביים שבשאר מרכיבי הבטון, זאת כיוון שהאפר מהווה כאמור פחות מ-10% ממשקל הבטון

פרטים על ריכוזי החומרים הרדיואקטיביים הטבעיים בפחם המיובא לישראל ובאפר פחם המוכנס לתערובות הבטון בישראל מוצגים ב**נספח 5** למסמך זה. פרטים על ריכוזי חומרים אלה במכלול חומרי הגלם לבניה ובמוצרי הבניה בישראל מוצגים ב**נספח 8** למסמך זה. בטבלה שבנספח 8 רוכזו נתונים על כ-180 דוגמאות של בטון גולמי ומוכן, עם ובלי אפר פחם, אפר פחם תחתי ומרחף, חול ים, חול מדרג, חול מחצבה ואגרטים שונים. בנוסף נמדדו ריכוזי החומרים הר"א הטבעיים בדוגמאות פומיס ממקורות שונים, פוספוגבס ובלוקי בניה.

מהמידות האלה עולה בברור (בהתחשב בחלקו היחסי של אפר הפחם בתערובת הבטון) שאפר הפחם תורם רק חלק, ובדרך כלל רק חלק קטן ולפעמים אף זניח, לתכולת הרדיואקטיביות שבבטון. עיון בטבלה מעלה עוד שריכוזי החומרים הרדיואקטיביים בחלק ממוצרי הבניה העשויים פומיס למשל עולים בעשרות אחוזים על אלה שבבטונים המכילים אפר פחם. בלוק פומיס הינו דוגמה של מוצר בנייה טבעי (שלא מכיל תוצרי לוואי כמו אפר פחם) המכיל ח"ג (פומיס) בעל ריכוזי חומרים רדיואקטיביים דומים לאלה המאפיינים אפר פחם. ההיבט החוקי של ממצא זה יידון במסמך נפרד (**שלזינגר 2008**).

בהתחשב בכל האמור לעיל ברור כי הדיון בסיכוני הקרינה הכרוכים ביישומי אפר פחם בתעשיית הבניה חייב להיערך כחלק בלתי נפרד מהדיון בחשיפת בני אדם לקרינה שמקורה בחומרים רדיואקטיביים טבעיים במוצרי בניה.

הטיפול בנושא בדרגים המקצועיים והרגולטריים בעולם וגם בישראל הוא נרחב ביותר ולא נתאר אותו בהרחבה. נסתפק בציון אבני דרך וציטוט מסקנות של עבודות קודמות. סקירה קצרה זו תמחיש בצורה מאוד ברורה כי הטיפול בנושא הבקרה על חשיפת הציבור לקרינה מייננת ממוצרי בניה בישראל הוא רציף, אינטנסיבי ועולה במידה ניכרת על רמת הטיפול באותו נושא במדינות אירופה המפותחות. הסקירה שלהלן מבוססת בעיקר על פרקי

המבוא לחוות דעת של מחבר מסמך זה שהוגשה למנהלת אפר פחם בשנת 2001 (Schlesinger 2001).

כבר לפני כ- 30 שנה הוחל הטיפול בנושא באירופה ובארה"ב, כאשר הארגון לשיתוף פעולה כלכלי של המדינות המפותחות (ה-OECD) פרסם אז מסמך בנושא זה תחת הכותרת :

Exposure to radiation from the natural radioactivity in building materials

המסמך דן בהיבטי בטיחות קרינה של חשיפת בני אדם מן הציבור לקרינה שמקורה בחומרים רדיואקטיביים טבעיים בחומרי הגלם לבניה ובמוצרי בניה. אינדקס הקרינה, שבאמצעותו מעריכם עד היום את התרומה המשוקללת של אשלגן 40 והרדיואיזוטופים משרשרת האורניום והתוריום למנת הקרינה של תושבי מבנים הבנויים ממוצרי הבניה המכילים את הרדיואיזוטופים האלה, הוצע, כנראה לראשונה בפרסום זה (OECD 1979).

**בישראל** הטיפול בנושא התחיל כעשור אחרי הפרסום הנ"ל. בשנת 1990 פרסמה קבוצת חוקרים מממ"ג המלצות ביחס להגבלות שיש להטיל על תכולת חומרים רדיואקטיביים בחומרי בניה ומרכיביה (מרגליות ושלזינגר 1990). כהמשך לעבודה זו וביזמת חברת החשמל פרסמה הקבוצה מממ"ג בשנת 1996 סקירה על ההשלכות הרדיולוגיות של השימוש באפר פחם כמרכיב של חומרי בנייה (הראובני ושלזינגר 1996) והציעה לגבש תקן ישראלי כאמצעי הבקרה היעיל ביותר להבטחת העמידה בהנחיות הבינלאומיות ביחס להגבלת חשיפת בני אדם מן הציבור לקרינה מייננת.

**באירופה** פורסמה ב- 1996 הדירקטיבה האירופית בנושא הגנת העובדים והציבור מקרינה מייננת שזכתה לכינוי התקן האירופי הבסיסי להגנה מקרינה (EC1996). דירקטיבה זו קבעה למעשה שמדינות הקהילה האירופית יישמו את התקן הבינלאומי להגנה מקרינה שפורסם באותה שנה (IAEA 1995). לפרטי ההנחיות של הדירקטיבה האירופית בנושא חשיפה לקרינה ממקורות טבעיים, כולל חומרים רדיואקטיביים ממקור טבעי (NORM), נתייחס במסמך נפרד (שלזינגר 2008). פה נציין רק כי לנושא הוקדש פרק מיוחד בדירקטיבה- פרק VII וכי היחס אל חומרים רדיואקטיביים טבעיים הוא מקל הרבה יותר מאשר היחס לחומרים רדיואקטיביים מעשי ידי אדם.

**בשנת 1997** גיבשה הקבוצה מממ"ג מסמך (הראובני ושלזינגר 1997) שבו הוצגה הצעה לתקן ישראלי משופר (לעומת זה שהוצע ב-1996) בדבר הגבלת תכולת חומרים ר"א במוצרי בניה. מחברי המסמך הציעו אז להגביל את תוספת מנת הקרינה לאכלוסיה ממוצרי בנייה המכילים ריכוזים חריגים של יסודות ר"א טבעיים ל-0.5 מיליסיוורט לשנה. הבסיס להמלצה זו הייתה הגבלת מנת הקרינה השנתית הכוללת לאוכלוסייה מחומרי בניה למיליסיוורט אחד לשנה, ובהנחה כי מנת הקרינה מחומרי בניה קונבנציונאליים מגיעה בישראל לכ- 0.5 מיליסיוורט לשנה. הנחה זו תאמה את רמת הקרינה הטבעית בבנייני מגורים באירופה כפי שדווח בספרות (ראה למשל UNSCEAR 1988). ההנחה נבחרה בהעדר נתונים על הקרינה הטבעית בבנייני מגורים בישראל.

ההצעה כללה גם נוסחה מעשית לבחינת עמידת מוצר בניה כלשהו באמות המידה של התקן המוצע. הבחינה המעשית שהוצעה מתבססת על חישוב תרומת שלושת היסודות הר"א העיקריים השכיחים במוצרי בניה ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) באמצעות אינדקס הריכוז  $i$  שהוגדר כסכום המנות

$$i = C(^{40}\text{K}) / A(^{40}\text{K}) + C(^{226}\text{Ra}) / A(^{226}\text{Ra}) + C(^{232}\text{Th}) / A(^{232}\text{Th})$$

כאשר  $C(X_j)$  הוא ריכוז היסוד הרדיואקטיבי מסוג  $X_j$  במוצר הבניה ו-  $A(X_j)$  הוא הריכוז הגבולי של אותו יסוד רדיואקטיבי ( $X_j$ ) שבהימצאו לבדו (כלומר ללא נוכחות יסודות רדיואקטיביים אחרים במוצר) יגרום לדיירי מבנה הבנוי ממוצר זה מנת קרינה שנתית השווה למנה הגבולית שנקבעה (1 מיליסיוורט לשנה). מנה זו היא המנה הגבולית הכוללת שנקבעה לבני אדם מן הציבור, והיא הייתה מורכבת במקרה זה ממנת קרינת הרקע הטבעית האופיינית של 0.5 מיליסיוורט והתוספת של עוד 0.5 מיליסיוורט הנגרמת על ידי היסודות הר"א במוצר המסוים שריכוזיהם חריגים ועולים על הערכים הנורמאליים.

כאמת מידה לתקן הוצע שהמוצר יעמוד בתנאי  $I \leq 1$

הוסבר במסמך כי ערכי הריכוזים הגבוליים  $A(^{40}\text{K})$ ,  $A(^{226}\text{Ra})$  ו-  $A(^{232}\text{Th})$  (הנמדדים בדרך כלל ביחידות Bq/kg) תלויים במשתנים רבים. לגבי קרינה חיצונית קובעים ממדי המבנה, מספר הקירות מהם נפלטת הקרינה, עובי מוצר הבניה (ממנו עשויים הקירות), צפיפות מוצר הבניה ( $\text{kg/m}^3$ ), משך השהיה בחדר במשך שנה והנקודה בחדר לגביו מחשבים את קצבי החשיפה. ביחס לתרומת הרדון קובעים, בנוסף למשך השהיה, קצב פליטת הרדון מהקירות (קצב שהוא פונקציה של חלק מהפרמטרים שנמנו לעיל) וקצב האווור כלומר מספר חילופי האוויר בשעה. בהצעת התקן של הקבוצה מממ"ג חושבו ערכי  $A(^{40}\text{K})$ ,  $A(^{226}\text{Ra})$  ו-  $A(^{232}\text{Th})$  עבור סדרת ערכים אופייניים לכל אחד מהפרמטרים הנ"ל. הוצעו 2 סדרות של ערכי ריכוז גבוליים כאמת מידה לאישור מוצר בניה סטנדרטי ומבנה אופייני (חדר בגודל  $3 \times 3 \times 2.7$  מ<sup>3</sup>, עובי מוצר 24 ס"מ, צפיפות מרחבית של המוצר – 1,500 ק"ג מ<sup>3</sup> ומקדם אמנציה 0.05):

1. רמת פטור – הוצע כי מוצרים שעבורם אינדקס הריכוז הבא יקיים את השוויון או אי השוויון:

$$(1) \quad C(^{40}\text{K}) / 2500 + C(^{226}\text{Ra}) / 110 + C(^{232}\text{Th}) / 135 \leq 1$$

יהיו פטורים מכל רישום, רישוי ופיקוח.

2. רמת אישור מותנה - מוצרים עבורם ערכו של האינדקס שלעיל עולה על 1 יאושרו בתנאי שהשימוש בהם יוצדק מבחינה חברתית וכלכלית ובתנאי שאינדקס הריכוז, בצורתו הבאה, יקיים את השוויון או אי השוויון:

$$(2) \quad C(^{40}\text{K}) / 5000 + C(^{226}\text{Ra}) / 220 + C(^{232}\text{Th}) / 270 \leq 1$$

הוצע שמוצרים שלא יעמדו בתנאים של משוואה (2) אלה לא יאושרו לשימוש.

הצעת התקן המשופר הייתה אמורה לאפשר שימוש באפר פחם, פומיס וחומרי בניה נוספים בתנאי שתוספת מנת הקרינה הנגרמת על ידם לא תעלה על 0.5 מיליסיוורט לשנה. בין השאר נטען על בסיס פרסומים בספרות המקצועית שדיווחו על מדידות שהצביעו על כך שהוספת אפר פחם למוצרי הבנייה מפחיתה את קצב הפליטה של הרדון מהמוצר (מקטין את ה-Radon Emanation Coefficient). בהתבסס על פרסומים אלה הוספת אפר פחם לבטון לא רק שאינה מגדילה את החשיפה לרדון אלא אף מפחיתה אותה. הסיבה לכך לפי הספרות מקורה בשני גורמים: כתוצאה מהטמפרטורה הגבוהה של השריפה לחלקיקי האפר הנוצרים מבנה זגוגי אטום יחסית המפחית את שפיעת הרדון ממנו; דקות האפר ותרומתו לתהליכי המליטה (צמנטיזציה) גורמים לציפוף הבטון ולעיכוב תנועת הרדון בקיר. נושא זה נחקר גם בארץ אולם טרם הוכרע.

בשנים 1997-1999 חלו התפתחויות נוספות בנושא הן באירופה והן בישראל. **באירופה** פרסמו מוסדות הקהילה האירופית ב-1997 (בעקבות הדירקטיבה של שנת 1996) את המסמך הקרוי **הגנה מקרינה 96** העוסק בריכוזים מוגברים של חומרים רדיואקטיביים בחומרי בניה (**EC 1997a**). באותה שנה פרסמו מוסדות הקהילה מסמך מיוחד (**EC 1997b**) המכיל הנחיות ליישום **פרק VII של הדירקטיבה**. במסמך זה נידון גם נושא הבקרה על ריכוזי חומרים רדיואקטיביים טבעיים במוצרי בניה.

**בישראל** הוחל במקביל, ביזמת הוועדה המקצועית תורתית לבטיחות קרינה **יחד עם הוועדה שעסקה** בהערכת סיכוני הקרינה הכרוכים ביישומי האפר במנהלת אפר פחם בגיבוש הצעה לתקן ישראלי בנושא, על בסיס ההמלצות של קבוצת ממ"ג שתוארו לעיל ועל בסיס ההתפתחויות באירופה. בין השאר התחשבה הוועדה בהמלצות מיוחדות של ה-ICRP שהוצגו לציבור בפרסום מס' 82 של הוועדה הבינלאומית (**ICRP 1999**). המלצות הוועדה תייחסו לדרכים ולאמצעים למיסוד הבקרה על חשיפה כרונית של בני אדם למקורות קרינה מייננת טבעיים ולא טבעיים. בהמלצות ICRP נקבע **חסם מנה** (dose constraint) בטווח של 0.3-1.0 מיליסיוורט לשנה כמנת קרינה **נוספת** לבני אדם מן הציבור הרחב (מעל הרקע הטבעי) הנגרמת על ידי **עיסוק** בודד (ראה על מושג העיסוק **בנספח 6**).

הוועדה המקצועית תורתית אמצה את הגבול התחתון של הטווח הנ"ל, דהיינו חסם מנה של 0.3 מיליסיוורט לשנה מעיסוק בודד, והחליטה גם כי תעשיית הבניה היא עיסוק לצורך זה. עוד החליטה הוועדה שבחישוב מנת הקרינה הנגרמת על ידי המוצר יש לקחת בחשבון גם את הרדון שמקורו ברדיום-226 שבמוצר והנפלט מהמוצר לחלל החדר. עוד קבעה הוועדה כי הערך המייצג של קרינת רקע בבית מגורים הבנוי מחומרי בניה קונבנציונאליים בישראל הוא 0.15 מיליסיוורט לשנה (לעומת 0.5 מיליסיוורט לשנה שהוצע בהצעת התקן של ממ"ג בשנת 1997 - **הראובני ושלזינגר**, ראה לעיל). שינוי אחרון זה בא על בסיס מדידות בפועל של "בלוק אפור" וחישוב מנת הקרינה מקרינה חיצונית ושל ריכוזי הראדון במבנה העשוי ממנו. "בלוק אפור" היה (לדעת יו"ר הוועדה אז) מוצר בניה עיקרי במבני מגורים בישראל (לפי ת"י 5 על חלקיו). עוביו של בלוק כזה היה 20 ס"מ ומשקלו המרחבי כ-1,300 ק"ג למ"ק. לפי השינוי שהוצע המנה השנתית הכוללת

המותרת ממוצרי בניה ירדה מ-1.0 מיליסיוורט לשנה ל-0.45 מיליסיוורט לשנה, ובטלה רמת הפטור שאינה מצריכה כל בקרה. בדיעבד הובהר כי הבלוק האפור מייצג 20% (משקלי) לכל היותר ממסת המבנה הסטנדרטי, בעוד הבטון מהווה 70% ממנה לפחות.

הוועדה המקצועית תורתית מסרה את המלצותיה למשרד לאיכות הסביבה שפנה למכון התקנים הישראלי וביקש לכנס וועדת מומחים שתגבש תקן מתאים, על בסיס המלצות הוועדה. טיוטת תקן ישראלי גובשה לקראת סוף שנת 2001. השם שניתן לתקן היה ת.י. 5098 – תכולת יסודות רדיואקטיביים במוצרי בנייה (מת"י 2002).

כינוס וועדת המומחים והכנת טיוטת התקן הישראלי בוצעו בשיתוף פעולה מלא בין מכון התקנים, המשרד להגנת הסביבה, מנהלת אפר פחם והוועדה המקצועית תורתית. כולם אף שלחו נציגים לוועדת המומחים.

**באירופה** פרסמה מועצת הקהילה האירופית בשנת 1999 מסמך נוסף בסדרת פרסומי בטיחות קרינה של המועצה. הפרסום שכונה 112 Radiation Protection (1999 EC) עסק בעקרונות בטיחות קרינה בהקשר לבקרה על הרדיואקטיביות הטבעית במוצרי בניה.

במסמך מאמצת המועצה את טווח חסמי המנה לעיסוק בודד 1.0-0.3 מיליסיוורט לשנה שהומלץ על ידי ה-ICRP ונותנת לכל מדינה החברה בקהילה לבחור את חסם המנה המתאים לה בתנאי שהוא בטוח הזה. לפי ההנחיות שבפרסום הזה אין צורך לכלול את הרדון בחישוב מנת הקרינה שמקורו במוצר הבניה כיוון שהגבלות על ריכוזי רדון במבני מגורים מטופלות כבר על ידי דירקטיבה אחרת שהייתה כבר בתוקף בעת פרסום המסמך הנידון. לפי המלצות המסמך הזה, מוצר הגורם לקרינה נמוכה מ-0.3 מיליסיוורט לשנה הנו פטור מכל רישוי, רישום ובקרה.

בשנת 2001 עסק מחבר חוות דעת זו לפי בקשת מנהלת אפר פחם באיסוף מידע וגיבוש מסמך מסכם (שלזינגר 2002) על היבטי בטיחות קרינה, היבטים טכניים ושיקולים חוקיים, כלכליים וציבוריים הנובעים מניצול אפר הפחם כחומר גלם במוצרי בניה. מסמך זה בחן את השלכות התקן הישראלי 5098 (שטיוטה שלו כבר פורסמה) על תעשיית הבנייה ועל הצורך או אי הצורך ליזום בקרה על ריכוזי יסודות ר"א טבעיים בפחם המיובא לישראל.

בפרקי המבוא למסמך הוצגו עקרונות ההגנה מקרינה בהקשר ליישומי חומרים רדיואקטיביים טבעיים וההמלצות של הגופים הבינלאומיים והארגונים האירופיים בנושא, נכון לשנת 2001, כפי שתוארו כאן לעיל. בהמשך בחן מחבר המסמך את עמידת מוצרי בניה שונים, שהיו

מקובלים בישראל באותה עת, בדרישות **טיוטת התקן העתידי ת.י. 5098**.

הבחינה העלתה כי המוצרים הבאים המכילים אפר פחם שמקורו בפחם שיובא לישראל בשנים 1999 ו-2000 עומדים באמות המידה של טיוטת התקן, **לפי הגרסה שהייתה אז בתוקף**, אך בחלקם בערכי אינדקס גבוליים:

א. בלוק אפור עם עובי 20 ס"מ וצפיפות מרחבית - 1,200 ק"ג למ<sup>3</sup>

#### אינדקס קרינה 0.249

ב. בטון רגיל ללא אפר פחם (מלבד זה שבצמנט) עם עובי 20 ס"מ וצפיפותו מרחבית 2,300 ק"ג למ<sup>3</sup>

#### אינדקס קרינה - 0.621

ג. בטון מועשר בכ- 7.6% אפר פחם עם אותם נתונים

#### אינדקס קרינה 0.841

ד. בטון מועשר בכ- 10% אפר פחם עם אותם נתונים

#### אינדקס קרינה 0.933

החישובים נעשו למקדם אמנציה של כ- 5%.

הבחינה התייחסה גם לבלוקים תרמיים עם אחוזי העשרה שונים באפר פחם אבל לא נביא את התוצאות כאן

מחבר המסמך הצביע על כך שערכי האינדקס הגבוהים יחסית לבטון המועשר באפר פחם נובעים מהדרישות המחמירות של **טיוטת התקן**.

להלן ציטוט ממסקנותיו:

" מעיון בת.י. 5098 עולה כי העקרונות עליהם בנוי תקן זה והגבלות החשיפה שנקבעו בישראל בהקשר למוצרי בניה מחמירים ביחס לנהוג במדינות אירופה .

הדרישות הישראליות מחמירות בהתייחס לארבעה גורמים שונים:

א. בחירת חסם מנה של 0.3 mSv לשנה (באירופה נתנו אופציה לחסם מנה של עד 1.0 mSv לשנה ).  
 ב. תוספת מנת הקרינה לדיירי מבני מגורים שמקורה במוצרי הבניה, אותה משווים לחסם המנה שנקבע בהקשר למוצרים אלה ( 0.3 mSv לשנה ) כוללת בישראל, בנוסף למנת הקרינה החיצונית, גם את מנת הקרינה הנגרמת על ידי הגז רדון שמקורו במוצר הבניה . בהנחות האירופיות מנת הקרינה מרדון אינה נכללת בתוספת המנה ובעיית הרדון מטופלת בנפרד. אינדקסי הקרינה מחושבים באירופה על בסיס קרינת הגמא (הנגרמת על ידי מוצר הבניה ) בלבד.

ג. מוצר הייחוס שנבחר בישראל לחישוב רמת הקרינה הטבעית הנורמאלית במבני מגורים (שאליה משווים את מנת הקרינה הכוללת הצפויה ממוצר הבניה כדי לקבע אם מוצר הבניה גורם לתוספת של קרינה) הוא "הבלוק האפור" הגורם למנת קרינה שנתית של 0.15 mSv לשנה בלבד. באירופה לא נקבע מוצר ייחוס ותוספת המנה מחושבת מעל מנה שנתית של 0.3 mSv לשנה , שהיא מנת הקרינה השנתית לאדם מקרינת הגמא באוויר החופשי מחוץ למבנים.

ד. הנחה של 4 קירות + תקרה ורצפה ממוצר הבניה (בהשוואה ל-4 קירות שמניחים באירופה).

מחבר המסמך המליץ מספר אפשרויות לתיקון המצב. הרלוונטיות ביותר להיום הן:

1. החלפת "הבלוק האפור" במוצר ייחוס אחר הדומה יותר למוצר הנבחן לכל הפחות כשמדובר בבטון שהשוואתו ל" בלוק האפור" אינה מובנת.

2. לא לבחור כלל במוצר ייחוס אלא במנת ייחוס שיכולה להיות למשל מנת הקרינה הממוצעת השנתית במבני מגורים בישראל, ממוצרי בניה ללא אפר פחם (מנה זו קרובה ככל הנראה ל- 0.35 mSv לשנה (ללא רדון)).

התקן הישראלי שקיבל את השם ת.י. 5098 פורסם לבסוף רק בסוף שנת 2002 ( מת"י 2002). התקן נוסה בשטח במשך כשנתיים, אולם משהתברר כי הוא פוסל חלק ממשי מתערובות הבטון הנפוצות, גם כאלה שאינן מכילות אפר פחם, הוחלט לערוך בו רויזיה. בשנת 2007 פורסמה רויזיה לתקן. גם יישומו של תקן זה נתקל בקשיים שלא נעמוד על כל פרטיהם כאן. נציין רק שעיקר הקושי נעוץ בעובדה שאינדקס הקרינה, שחושב לחלק ניכר (כ-50%) ממוצרי הבטון שיוצרו מחומרי הגלם המקומיים (והמכילים פחות מ-7% אפר פחם), על בסיס תוצאות מדידה של האמנציה של רדון שבוצעו לפי ההנחיות של התקן, עלה על 0.80. בלמעלה מ-10% מהמוצרים עלה ערך האינדקס על 1.0 ובמקרים בודדים הגיע אף ל-1.2. הבעיה נעוצה ככל הנראה בשיטת מדידת האמנציה של רדון ובהנחות המחמירות ששימשו בסיס לתקן.

## 5. סיכום ומסקנות

מהסקירה והדיון בנושא סיכוני קרינה הכרוכים בטיפול באפר פחם עצמו וביישומי אפר פחם בתשתיות ובחקלאות ( סעיף 4.1 ) וביישומי אפר פחם בתעשיית הבניה (סעיף 4.2 ) כפי שהוצגו לעיל עולה כי:

א. הסיכונים הקרינתיים הכרוכים בטיפול באפר פחם עצמו ואלה הכרוכים ביישומי אפר פחם בתשתיות נמוכים עד נמוכים מאוד. מנות הקרינה הצפויות לעובדים העוסקים בטיפול ישיר באפר ו/או ביישומיו בתשתיות עלולים להגיע רק לאחוזים בודדים מגבול המנה השנתי שנקבע לעובדים. לבני אדם מן הציבור הרחב המנות צפויות להגיע לפחות מ-5% מהמנות הצפויות לעובדים ולכן תגענה לפחות מ-10% מגבול המנה שנקבע לבני אדם מן הציבור הרחב. גם הסיכון הפוטנציאלי הנמוך הזה, שעלול להיגרם בעיקר מנשימת אבק מרחף המכיל אפר פחם, נמנע בדרך כלל מראש על ידי נקיטת אמצעים תפעוליים ואמצעי היגיינה תעסוקתית למניעת סיכוני אבק.

ביישומים מסוימים של האפר השימוש בו גורם אף להקטנת הקרינה הסביבתית. התברר למשל באחד המחקרים שצוטטו לעיל (שטיינר 2001), כי למרות הריכוזים המוגברים של רדיום 226 באפר הפחם שפיעת רדון משכבת אפר פחם שמשתמשים בה למילוי קרקע נמוכה פי 4 – 5 מהשפיעה הטבעית של רדון מהקרקע שבאותו אזור.

ב. אפר פחם בריכוזי האקטיביות המרביים שנמדדו באפר (ראה נספח 5) פטור (exempted) מדרישות התקן הבינלאומי להגנה מקרינה (IAEA 1996), גם כשמדובר בכמויות גדולות ( bulk amounts ), זאת על פי הנחיות תוספת/נספח מיוחד של התקן הבינלאומי משנת 2004

(IAEA 2004), כפי שזה יפורט במסמך נפרד שידון בהיבטים חוקיים ומנהליים של הבקרה על יישומי חומרים רדיואקטיביים ממקור טבעי (NORM) בכלל ועל יישומי אפר פחם בפרט (שלזינגר 2008).

ג. . הסיכונים הכרוכים ביישומי אפר פחם בתעשיית הבנייה נמוכים ומהווים כשלעצמם רק חלק, ובדרך כלל רק חלק קטן, מסיכוני הקרינה הכרוכים בשימוש במכלול חומרי הגלם בתעשיית הבניה שכולם מכילים ריכוז זה או אחר של חומרים רדיואקטיביים טבעיים, ושהשימוש בהם כרוך אף הוא בסיכון נמוך ומקובל.

ד. השימוש בחומרי הגלם האלה בישראל כולל השימוש אפר הפחם בתעשיית הבטון תואמים את המלצות הגופים הבינלאומיים, אף לפי פרשנות מחמירה מאוד של הנחיות אלה.

ה. הטיפול של הוועדות המקצועיות בתחום בטיחות הקרינה ושל הרשויות הרגולטוריות בישראל בנושא הגבלת חשיפת הציבור לקרינה מייננת ממוצרי בניה בכלל ושל אפר פחם בפרט הוא מקצועי ורציף ונמשך מאז שנות ה-90. פעילות הגופים האלה למיסוד בקרה של ריכוזי חומרים רדיואקטיביים טבעיים במוצרי בניה היא בכיוון הנכון ובוצע (עד לפני כשנה) תוך שיתוף פעולה מלא בין הרשויות, הוועדה המקצועית-תורתית לבטיחות קרינה, יצרני אפר הפחם, מנהלת אפר פחם, ספקי חומרי הגלם וקבלני הבניה. שיתוף פעולה זה צריך ויכול להימשך בעתיד.

ו. בשנה שחלפה מאז פרסום הגרסה החדשה של ת.י 5098 התגלו קשיים ביישום התקן . קשיים אלה והסיבות המשוערות להן תוארו בסוף סעיף 4.2 לעיל. הבעיה נעוצה ככל הנראה בשיטת מדידת האמנציה של רדון . יצוין עם זאת כי הבעיה אינה חמורה כיוון שמנת הקרינה הצפויה לתושבי מבנים הבנויים ממוצרי הבניה שאינדקס הקרינה שלהם עלה על דרישות התקן והגיע ל-1.2 אינם צפויים להיחשף מעל מנת קרינה של 1.0 מיליסיוורט לשנה.

ז. הדרך הנאותה ביותר לבקרה על חשיפת הציבור לקרינה מייננת ממוצרי בניה היא באמצעות תקני קרינה ממוצרי הבניה, שחייבים להיבנות כך שדרישותיהם יהיו בבחינת "גזירה שרוב הציבור יכול לעמוד בה", דהיינו שהתקן יבטיח כי אינדקס הקרינה של רוב רובם של מוצרי הבניה מייצור מקומי המקובלים בישראל, ובעיקר מוצרי הבטון העשויים מחומרי גלם מקומיים (כולל עד 10% אפר פחם), לא יעלה על 0.85.



## אסמכתאות

**ACAA 2008** - MacDonald M. Beneficial use of coal combustion products continues to grow. Ash at work Issue - American Coal Ash Association, Washington DC, 2008.

**EC 1996-** Council Directive 96/29 EURATOM, Official Journal of the European Communities No. L 159, 29.6.1996.

**EC-1997a** Enhanced Radioactivity of building materials, Radiation Protection 96, EC 1997.

**EC 1997b** - Recommendations for the implementation of Title VII of the European Basic Safety Standards Directive (BSS) concerning significant increase in exposure due to natural radiation sources, Radiation Protection 88, EC 1997.

**EC 1999** - Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials, Radiation Protection 112, EC 1999.

**ECOBA 2004** – European Coal Combustion Products Association ,2004, Annual Report, Essen , Germany.

**IAEA 1995** - Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, IAEA Safety series 115, 1995.

**IAEA 2000-** Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material - 1996 Edition (Revised): Safety Standards Series No. TS-R-1 (ST-1, Revised), IAEA, Vienna, 2000.

**IAEA 2004-** Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, Safety Standard Series No. RS-G-1.7, IAEA, Vienna (2004).

**ICRP 1999** - Protection of the Public in Situations of Prolonged Radiation Exposure, Annals of the ICRP Vol. 29 (1-2), ICRP Pub. 82, Pergammon Press 1999.

**Nathan 2008** –Y. Nathan, Investigation of the permeability of coal fly ash at Jisr el Zarka, Geological Survey Israel 1988.

**OECD-1979** Exposure to radiation from the natural radioactivity in building materials. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), Paris 1979.

**Schlesinger 2001-** T. Schlesinger, Radiation Safety and Legal Aspects of Handling Coal Ash produced in Israel Electric Corporation Power Stations: A statement of opinion submitted to the Israel coal company.

**Schlesinger 2004** -T. Schlesinger and J. Koch, Protection against Natural Radiation at Home and at Work Exclusion, Practice, Intervention - Theory and Practice, proceedings of the 11<sup>Th</sup> International Congress of IRPA , Madrid Spain , May 2004.

**UNSCEAR 1988** - Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly, UNSCEAR, 1988.

- בן שלמה ושלזינגר 2000-** א. בן שלמה וט. שלזינגר, הבקרה על החשיפה לקרינה מייננת ממקורות טבעיים – עקרונות ההגנה מקרינה, מערכת הבקרה והמלצות ליישומים בישראל. דו"ח ממ"ג – 3015, אפריל 2000.
- גרופ 1997-** י. גרופ, ע. אבן, ט. שלזינגר, מ. מרגליות, הערכת סיכוני קרינה לעובדים במסוף הפוספטים בנמל אשדוד, דו"ח ממ"ג 2676, ממ"ג טבת תשנ"ז, ינואר 1997.
- גרופ 2004-** י. גרופ, ג. חקין, ס. חרוז-ושיץ, ט. רימר, סקר סיכוני חשיפת עובדים לקרינה מייננת במפעלי תעשייה המעבדים פוספטים ואפר פחם בהקשר לבחינת סיווגם כעובדי קרינה, ממ"ג 3480, אב תשס"ד, אוגוסט 2004.
- הראובני ושלזינגר 1996-** ר. הראובני, ט. שלזינגר, מ. מרגליות, ההשלכות הרדיולוגיות של השימוש באפר פחם כמרכיב של חומרי בנייה, דו"ח ממ"ג 2681, יוני 1996.
- חן וחקין 2006 -** י. חן וג. חקין, בדיקת ריכוז מתכות כבדות ורדיונוקליאידים בצמחים שגדלו במצע אפר פחם - בצמחים שגדלו במצע אפר פחם – סיכום רב שנתי של ניסויים (1998-2006), סיכום מנהלים של אוסף דוחות, 2006.
- מאפ 2008 -** מנהלת אפר. פחם יולי 2008.
- מרגליות ושלזינגר 1990-** מ. מרגליות, ט. שלזינגר וי. שמאי, הגבלות על תכולת חומרים ר"א בחומרי בניה ובמרכיביה, הצעה לתקן ישראלי, מב"ק, ממ"ג שורק נובמבר 1990.
- מצגר 2008 -** א. מצגר- ייצור ושימושי אפר פחם במדינות שונות בעולם, יולי 2008.
- מתי 2002 -** ת"י 5098, תכולת יסודות רדיואקטיביים במוצרי בניה, מכון התקנים הישראלי, נובמבר 2002, גרסה ראשונה.
- פלד וצרויה 2002 -** ע. פלד, ש. צרויה ו-ע. גרמן, התנאים סביבתיים (רדיולוגיים) לשימוש באפר פחם בתשתיות, קמ"ג, אייר תשס"ב, מאי 2002.
- קור 2002 -** הערכת החשיפה לקרינה מייננת עקב שימושים באפר פחם בחקלאות וגינון, שב"ק- 1.1-74, ממ"ג, פברואר 2002.
- שטיינר 2001 -** וו. שטיינר, מדידות קצב קרינת גמא ופליטת גז ראדון בקיבוץ זיקים, דו"ח שהוגש למדען הראשי של משרד איכות הסביבה, ה/ כסליו/תשס"ב (20/11/2001).
- שטיינר 2002 -** וו. שטיינר, מדידות קצב קרינת גמא ופליטת גז ראדון בקיבוץ זיקים, דו"ח שהוגש למדען הראשי של משרד איכות הסביבה, ה/ כסליו/תשס"ב (20/11/2001).
- שלזינגר וגרופ 1998 -** ט. שלזינגר וי. גרופ, חשיפה לקרינה בשינוע ועיבוד אפר פחם, שב"ק 11-582, ממ"ג, 1998.
- שלזינגר 2002 -** ט. שלזינגר - הבקרה על ריכוזי יסודות ר"א טבעיים בפחם המיובא לישראל לשם צריכתו בתחנות כוח לייצור חשמל, היבטי בטיחות קרינה ושיקולים חוקיים, כלכליים וציבוריים, דוח שהוגש למנהלת אפר פחם, נובמבר 2002.
- שלזינגר 2008** היבטים חוקיים ומנהליים של הבקרה על יישומי חומרים רדיואקטיביים ממקור טבעי (NORM) בכלל ועל יישומי אפר פחם בפרט (בהכנה).
- שרבני 2002 -** מ. שרבני, ניטור אבק בעבודה עם אפר פחם תחתית סמוך לקיבוץ זיקים, החברה לשרותי איכות הסביבה, אוגוסט 2002.
- תקנות 1992 (ב)-** תקנות הבטיחות בעבודה, גהות תעסוקתית ובריאות העוסקים בקרינה מייננת התשנ"ג 1992, קובץ התקנות- 5484 י"ג כסליו התשנ"ג 8.12.92.
- תקנות 2002-** תקנות החומרים המסוכנים (סילוק פסולת רדיואקטיבית) התשס"ב 2002, ק"ת 6151 כ"ד בשבט התשס"ב 6.2.2002.

## מקורות לקריאה נוספת

**EC 1990** -. Commission Recommendation 90/143/Euratom of 21 February 1990 on the Protection of the Public Against Indoor Exposure to Radon.

**EC 1993**, Principles and methods for Establishing Concentrations and Quantities (Exemption Values) below which Reporting is not required in the European Directive RP-65, CEC Luxembourg 1993.

**EC 2000** – Practical Use of the Concepts of Clearance and Exemption, Radiation Protection 122, EC 2000.

**EPA 1977**- Radiological Surveys of Idaho Phosphate Ore Processing-The Thermal Process, EPA Technical Note ORP/LV-77-3, National Technical Information Service, Springfield, Virginia, 1977.

**EPA 2000** – Notice of Regulatory Determination on Wastes from Combustion of Fossil Fuels, Federal Register Vol. 65, No. 99, 40 CFR parts 261, May 22, 2000.

**FIPR 1998**- Evaluation of Exposure to Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials (TENORM) in the Phosphate Industry, Florida Institute of Phosphate Research (FIPR), July 1998.

**Grof and Schlesinger 1996** - Y. Grof, T. Schlesinger, R. Hareuveni and M. Margalioth – Limitation on the Concentration of Radioactive Elements in Building Materials, the Influence of the Construction Factors and of the Physical Properties the Product on the Dose, Second Regional Mediterranean Congress on Radiation Protection, Tel Aviv 1997.

**HSE (1993)**. Low Specific Activity Materials, Information Document HSE 560/28.

**IAEA 1999**, Occupational radiation Protection, Safety Standard Series No. RS-G-1.1, IAEA, Vienna, 1999.

**IAEA 2004a**- Occupational Radiation Protection in the Mining and Processing of Raw Materials, Safety Standard Series No. RS-G-1.6, IAEA, Vienna (2004).

**IAEA 2006**- Assessing the Need for Radiation Protection Measures in Work Involving Minerals and Raw Materials, Safety Report Series No. 49, IAEA, Vienna (2006).

**IAEA 2007**- Radiation Protection and NORM Residue Management in the Zircon and Zirconia Industries. Safety Report Series No. 51, IAEA, Vienna (2007).

**ICRP 1982** - Limits of Intakes of Radionuclides by Workers, ICRP Pub. 30, parts 1 to 3 with supplements, Pergamon Press 1979-1982.

**ICRP 1991** -1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Pub. 60, Pergammon Press 1991.

**ICRP 1994.** International Commission on Radiation Protection. Protection Against Radon-222 at Home and at Work, ICRP Pub. 65.

**ICRP 2005** Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103, , Pergammon Press 2005.

**ICRP 2007** – Scope of Radiological Protection Control Measures, Annals of the ICRP Vol. 37 No.6, ICRP Pub. 104, Pergammon Press 2007.

**HSE (1993).** Low Specific Activity Materials, Information Document HSE 560/28

**Janssen & Marketed (1997).** Augustine Janssen and Mika Marketed, Provision on Natural Radioactive in the New Basic Safety Standards Directive, Proceedings of the International Symposium on Radiological Problems with Natural Radioactivity in the Non-Nuclear Industry, Amsterdam, 1997.

**Mobbs et al. (1997).** S. F. Mobbs, J.S.S. Penfold, J.P. Degrange and T. Schneider, Establishment of Reference Levels for Regulatory Control of Workplaces Where Minerals Are Processed which Contain Enhanced Levels Of Naturally Occurring Radionuclides. Proceedings of the International Symposium on Radiological Problems with Natural Radioactivity in the Non-Nuclear Industry, Amsterdam, 1997.

**NCRP 1987** - Exposure of the Population in the United States and Canada from Natural Background Radiation, NCRP Rep. 94, NCRP 1987.

**NCRP 1993-** Radiation Protection in the Mineral Extraction Industry, NCRP Rep. 118, NCRP, 1993.

**Nisnevich 2004** - Nisnevich M., Sirotin G., Eshel Y., Schlesinger T. Development of lightweight concrete containing high volumes of fly ash, bottom ash, and waste fines from stone quarries. The Eighth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete. Editor V.M . . . . Malhotra. ACI International SP-221, 2004.

**Nisnevich 2005** - M. Nisnevich, G. Sirotin, T. Schlesinger, Y. Eshel and A. Koziashvili, Ecologically Friendly Lightweight Concrete Based on Coal Ashes, Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Pittsburgh Coal Conference, Pittsburgh PA, and September 2005.

**NORM (1997).** Naturally Occurring Radioactive Material. International Symposium on Radiological Problems with Natural Radioactivity in the Non-Nuclear Industry, Amsterdam, 1997.

**NORM (1999).** Naturally Occurring Radioactive Material Contamination. Canadian Guidelines for the Management of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM), The NORM Report, winter/spring 1999.

**Schlesinger 2005** -T. Schlesinger and Y. Grof, Israeli Standard IS 5098(setting limits on the concentration of natural radio-nuclides in building products), Proceedings (extended abstracts) of

the International Workshop on the Environmental Aspects of Coal Ash Utilization, Tel-Aviv, Nov. 2005.

**USGS 2001** - US Geological Survey, Minerals Yearbook 2001, Reston, Virginia.

- גרופ ושלזינגר 1998** - י. גרופ וט. שלזינגר, הנטילה השנתית הגבולית (ALI) לעובדים ולבני אדם מן הציבור לפי התקן הבינלאומי להגנה מקרינה משנת 1995, שב"ק 98/18, שטח בטיחות קרינה ממ"ג, חשון תשנ"ט, נובמבר 1998.
- גרופ ושלזינגר 2000** - י. גרופ וט. שלזינגר, חישובי מנת קרינה לדיירי מבנים (כתוצאה מהימצאות יסודות רדיואקטיביים במוצרי הבניה מהם עשוי המבנה). שטח ב"ק, ממ"ג, 2000.
- גרופ 2002** - י. גרופ, ט. רימר, הערכת סיכוני קרינה לעובדים במסוף הפוספטים והאשלג בנמל אשדוד, דו"ח שטח בטיחות קרינה BK-01-2002, ממ"ג, ינואר 2002.
- הראובני ושלזינגר 1997** - ר. הראובני, ט. שלזינגר, מ. מרגליות, הגבלות על תכולת חומרים ר"א במוצרי בניה - הצעה לתקן ישראלי משופר - דו"ח ממ"ג 2682, פברואר 1997.
- ווא"א 2003** תקן להגנה מקרינה של הוועדה לאנרגיה אטומית, טיוטה סופית עדכון 15, יולי 2003.
- מרגליות ושלזינגר 1993** - מ. מרגליות, ט. שלזינגר, ע. אבן, וי. שמאי, הערכת סיכוני קרינה לעובדים במסוף הפוספטים בנמל אשדוד, בק-93/5, ממ"ג, תמוז תשנ"ג, יולי 1993.
- מרגליות ואבן 1998** - מ. מרגליות, ע. אבן, ג. חקין ו-ש. שמש, אפר פחם- ההיבטים הרדיולוגיים של יישומו כתוסף לבטון, שב"ק 3/98, ממ"ג שורק, סיון תשנ"ח יוני 1998.
- שלזינגר 1996** - ט. שלזינגר, בקרה על השימוש בקרינה מייננת בישראל - היבטים מנהליים וחוקיים (תקינה, תחיקה, רישוי ופיקוח), מכון ההדרכה ע"ש פייגה, ממ"ג, תשנ"ו, 1996.
- שלזינגר וגרופ 1999** , ט. שלזינגר וי. גרופ. יישום מושגי היסוד של הכללה ואי הכללה (exclusion), פטור (exemption) ושחרור (clearance) בתקינה ובתחיקה בישראל על בסיס דרישות התקן הבינלאומי והנחיות מדריך הבטיחות של סבא"א - 1999. ממ"ג-3017, ממ"ג, כסליו תש"ס, נובמבר 1999.
- שלזינגר 2004** - ט. שלזינגר, מדריך הבטיחות של סבא"א על יישום מושגי אי החלוקה (exclusion), פטור (exemption) ושחרור (clearance), סקירת עיקרי המסמך בצירוף דברי הסבר חשון תשס"ד אוקטובר 2004.
- שלזינגר 2005** ט. שלזינגר וז'. קוך- מושגי יסוד בהגנה מקרינה, מהדורה תשיעית מורחבת, מכון ההדרכה ע"ש י. פייגה, ממ"ג שורק, תשרי תשס"ו אוקטובר 2005.
- תקנות 1978** - תקנות עבודת נשים תשי"ד 1954 (תקנות בדבר עבודה בקרינה מייננת) תשל"ח 1978.
- תקנות 1990**-תקנות ארגון הפיקוח על העבודה (ניטור סביבתי וניטור ביולוגי של עובדים בגורמים מזיקים) התשנ"א 1990. תיקונים: ק"ת 5487 התשנ"ג, 17.12.1992 ו- ק"ת 5714 התשנ"ו, 21.11.1995.
- תקנות 1992 (א)**- תקנות הרוקחים יסודות רדיואקטיביים ומוצריהם התש"מ 1980, תיקון התשנ"ב 1992.
- תקנות 2001** - תקנות שירותי הובלה, התשס"א 2001.
- מתי 2006** ת"י 5098, תכולת יסודות רדיואקטיביים במוצרי בניה, גרסה שנייה מכון התקנים הישראלי, 2006.

# נספח-1 הודעת הממונה מיוני 2008 על כוונתו לסווג את אפר הפחם כפסולת רדיואקטיבית

אגף מניעת רעש וקרינה

מדינת ישראל  
המשרד להגנת הסביבה



כ" סיון תשס"ח  
23 יוני 2008

לכבוד  
מנכ"ל משרד הבריאות  
מנהל מנהלת אפר הפחם

שלום רב,

## הנדון: הודעת הממונה בדבר קביעת אפר הפחם כפסולת רדיואקטיבית

בכוח סמכויותי לפי תקנות החומרים המסוכנים (סיווג פסולת רדיואקטיבית), התשס"ב – 2002 הנני מודיע על כך שהחל מיום 23.7.08, אפר הפחם הנוצר משריפת הפחם בתחנות הכוח הפחמיות יחשב לפסולת רדיואקטיבית וזאת מן הסימוקים הבאים:

1. אפר הפחם הנוצר פסולת נזיפה מחצבים המכילה תעליבות של רדיונוקלידים
2. רמת האקטיביות הינה מעל 1 (ראה נספח)
3. בשל רמת האקטיביות, אפר הפחם מאוזה סיכון לאדם ולסביבה
4. פינוי, אחסון או שימוש בלתי מבוקרים של אפר פחם מהווים סיכון לאדם ולסביבה

ניתנת כך אפשרות להשיג על קבוצה זו עד יום 7.7.08.

במידת הצורך אני כרושך גם הסברים נוספים.

בברכה,

ד"ר שמואל גליק  
ראש אגף  
ממונה על הקרינה הבטחית מיוזמת

הנחתקים: מנחה למעב"ב  
ראש אגף בטיחות – ועדה לאנרגיה אטומית  
יועצת משפטית  
ממונה קרינה מיוזמת

סיוון תשס"ח  
יוני 2008

### פרופ' טוביה שלינגר – תפקידים וניסיון מקצועי

#### תפקידים נוכחיים:

ראש המחלקה לפיזיקה רפואית- המרכז האוניברסיטאי אריאל בשומרון (מאז 2005)  
מרכז הוועדה המקצועית תורתית להגנה מקרינה (וועדה ממשלתית בין משרדית (מאז 2003))  
פרופ' מן החוץ- בית הספר ללימודי המשך ברפואה, אוניברסיטת ת"א (מאז 1990)  
חבר בוועדת המשנה לסטנדרדים של וועדת הבטג"ר מאז 1980  
חבר הוועדה לבחינה ואישור של תרופות רדיואקטיביות.

#### תפקידים בעבר:

ראש תחום הגנה מקרינה – המרכז למחקר גרעיני נחל שורק (1981-2000)  
מנהל המחלקה לבטיחות קרינה- המרכז למחקר גרעיני נחל שורק (1981-1977)  
נשיא - האגודה הישראלית להגנה מקרינה (כ- 5 תקופות כהונה של שנתיים כל אחת בתקופה  
1980-2005)  
מרכז הוועדה להגנת המטופל מקרינה – (וועדה ממשלתית בין משרדית (1996-2006))

#### פעילות מדעית ומקצועית בינלאומית

סגן נשיא – הארגון הבינלאומי להגנה מקרינה IRPA (1977-1980)  
חבר המועצה - הארגון הבינלאומי להגנה מקרינה IRPA (1977-1992)  
נשיא הכנס הבינלאומי ה- V של IRPA בירושלים ב- 1980.  
פעילות כמומחה בשליחות סבא"א (הסוכנות הבינ"ל לאנרגיה אטומית IAEA):  
○ בשליחויות לפיליפינים ב- 1980 ו- 1981  
○ בשליחות לברזיל ב- 1996.

#### פעילות בקבוצות עבודה ובוועדות מומחים של סבא"א וביניהם :

○ חבר בקבוצת העבודה של סבא"א ושל WHO לגיבוש התקן הבינלאומי להגנה מקרינה  
משנת 1982 ומשנת 1995.  
○ חבר בקבוצת העבודה של סבא"א ושל WHO לבחינה מחדש של ההנחיות להגנה מפני  
ראדון בבתי מגורים (ב- 1992).  
○ חבר בוועדת מומחים של סבא"א לגיבוש הנחיות בנושא רמות התערבות (Intervention  
and Derived Intervention Levels) (ב- 1988)

#### מינויים אקדמיים בחו"ל (במסגרת שנות שבתון)

פרופ' חבר (אורח) ביה"ס לרוקחות אוניברסיטת דרום קליפורניה (USC) – 1976 .  
פרופ' חבר (אורח) המרכז הרפואי Royal Marsden שליד אוניברסיטת לונדון, אנגליה- 1985.  
פרופ' חבר (אורח) המרכז הרפואי Hammersmith שליד אוניברסיטת לונדון, אנגליה.

- מדען אורח במרכז הרפואי Addenbrooke's, קמברידג', אנגליה – 1993 .
- מדען אורח במרכז הרפואי Addenbrooke's, קמברידג', אנגליה – 1997/8 .
- מדען אורח המכון הלאומי לרדיולוגיה BIR, לונדון אנגליה – 2000.

### **מלגות ופרסים**

- 1973 מלגת סבא"א לסיור מדעי של חודש בארה"ב כהכנה לתפקיד מייסד ומנהל מרכז הדרכה לרדיואיזוטופים בממ"ג.
- 1975 מלגת סבא"א לשנה אחת למחקר בנושא דוזימטריה של תכשירים רדיואקטיביים, באוניברסיטת USC, בלוס אנג'לס.
- 1985 מלגת לורד מרקס לחצי שנה לעבודת מחקר בנושא דוזימטריה כמותית בטיפול קרינתי בגרורות של סרטן בלוטת התריס במרכז הרפואי Royal Marsden בלונדון.
- 1988 מלגה לשנה מהאקדמיה הישראלית למדעים והחברה המלכותית, למחקר ופיתוח במרכז הרפואי Hammersmith שליד אוניברסיטת לונדון.
- 1992 פרס השירות המצוין ( Outstanding Service Award ) של הארגון הבינלאומי להגנה מקרינה
- 1997 מלגה ל- 9 חדשים מהמועצה הבריטית (British Council), לעבודת מחקר במרכז הרפואי Addenbrooke's בקמברידג', אנגליה בנושא אבטחת איכות והגנת הנבדק והמטופל בדימות רפואי.



## גדלים יחידות למדידה כמותית של רדיואקטיביות ושל קרינה מייננת

ט. שלזינגר תמוז תשס"ח, יולי 2008\*

בתחום הטכנולוגיה הגרעינית והפיזיקה הרפואית, משתמשים בגדלים וביחידות מיוחדות להערכת כמות החומר הרדיואקטיבי וההערכה הכמותית של החשיפה לקרינה מייננת. נציג את הגדלים והכמויות האלה להלן.

בתחומי הפיזיקה וההנדסה מקובל כיום השימוש במערכת היחידות הבינלאומית (SI). בשיטה זו המרחק נמדד במטרים (m), הזמן בשניות (sec), האנרגיה בג'אולים (joule), המטען החשמלי בקולון (coulomb), המתח בוולטים (Volt) והזרם באמפרים (A). למדידה כמותית של קרינה מייננת וכמות החומר הרדיואקטיבי משתמשים ביחידות רדיואקטיביות מיוחדות נוספות כדלהלן:

### 1. יחידות אנרגיה

א. האלקטרון וולט - האלקטרון וולט היא יחידת אנרגיה בה מודדים בדרך כלל את האנרגיה הנישאת על ידי חלקיקים או פוטונים של קרינה גרעינית.

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-12} \text{ erg} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ joule}$$

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

### 2. אקטיביות ואקטיביות סגולית

אקטיביות - האקטיביות היא גודל פיזיקלי המתאר את כמות החומר הרדיואקטיבי במונחים של קצב ההתפרקויות בחומר. יחידת האקטיביות היא **הבקרל (Bequerel)** ובקיצור Bq. בקרל אחד היא "כמות" חומר רדיואקטיבי בו מתרחשת התפרקות אחת בשניה.  $1 \text{ Bq} = 1 \text{ d.p.s}$ . יחידה גדולה יותר היא ה-MBq (מיליון בקרל).

בעבר היה מקובל למדוד את האקטיביות ביחידות קירי (Curie). קירי אחד הוגדר ככמות חומר רדיואקטיבי העובר  $3.7 \times 10^{10}$  התפרקויות בשניה. יחידות קטנות יותר היו המיליקירי mCi (אלפית הקירי) והמיקרוקירי  $\mu\text{Ci}$  (אלפית המיליקירי).

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \mu\text{Ci} = 37 \text{ kBq}$$

$$1 \text{ Bq} = 2.7 \times 10^{-11} \text{ Ci} = 27 \text{ PCi}$$

$$1 \text{ MBq} = 10^6 \text{ Bq} = 27 \mu\text{Ci}$$

\* חלק גדול מהטקסט בנספח זה לקוח המחוברת **מושגי יסוד בהגנה מקרינה** - מאת ט. שלזינגר וז'אן קור – בהוצאת ממ"ג, 2005.

**אקטיביות סגולית** - זוהי האקטיביות ליחידת משקל או ליחידת נפח הנמדדת ביחידות: Bq/g, Ci/cm<sup>3</sup>, Bq/kg, Ci/g, Ci/cm<sup>3</sup>, וכו'.

**דוגמא** - 25 מיקרוקירי של <sup>40</sup>K (אשלגן) נמהלו בתוך נוזל בכמות של 500 ליטר. האקטיביות הסגולית של הנוזל תהיה 0.05  $\mu$ Ci/l (25/500) או 1,850 Bq/l (25x37000/500).

הקשר בין האקטיביות הסגולית  $a$  ובין המספר האטומי  $A$  ומחצית החיים  $T_{1/2}$  של הרדיואיזוטופ הספציפי נגזר ממשוואת הדעיכה הרדיואקטיבית שלפיו קצב ההתפרקות  $dN/dt$  בכמות של חומר רדיואקטיבי המכיל  $N$  אטומים נתון על ידי

$$(1) \quad dN/dt = -\lambda \cdot N = (0.693/T_{1/2}) \cdot N$$

לפיכך האקטיביות הסגולית (ריכוז האקטיביות ביחידת מסה) של חומר רדיואקטיבי שמספרו האטומי הוא  $A$  ומחצית החיים שלו  $T_{1/2}$  (sec) נתון על ידי

$$(2) \quad a \text{ (Bq/g)} = (0.693/T_{1/2}) \cdot (N_0/A) = 4.174 \cdot 10^{23} / T_{1/2} \cdot A \text{ (Bq/g)}$$

$$= 4.174 \cdot 10^{26} / T_{1/2} \cdot A \text{ (Bq/kg)}$$

כאשר  $N_0$  הוא מספר אבוגדרו שערכו  $6.023 \times 10^{23}$ .

האקטיביות הסגולית ביחידות קירי לגרם תינתן על ידי חלוקת נוסחה (2) ב-  $3.7 \cdot 10^{10}$

$$(3) \quad a \text{ (Ci/g)} = 1.128 \cdot 10^{13} / T_{1/2} \cdot A \text{ (Ci/g)}$$

בנוסחאות (2) ו-(3) נמדד כאמור בשניות. אם מחצית החיים נתונה בשניות. אם מחלקים את בשתי הנוסחאות ב-  $3.153 \cdot 10^7$  שהוא מספר השניות בשנה ומקבלים את הנוסחה לאקטיביות הסגולית כאשר  $T_{1/2}$  נמדד בשנים.

$$(2א) \quad a \text{ (Bq/g)} = 1.324 \cdot 10^{16} / T_{1/2}(y) \cdot A \text{ (Bq/g)} =$$

$$= 1.324 \cdot 10^{19} / T_{1/2}(y) \cdot A \text{ (Bq/Kg)}$$

$$(3א) \quad a \text{ (Ci/g)} = 3.578 \cdot 10^5 / T_{1/2}(y) \cdot A \text{ (Ci/g)} - 1$$

$$= 3.578 \cdot 10^8 / T_{1/2}(y) \cdot A \text{ (Ci/kg)}$$

### דוגמא

נחשב את האקטיביות הסגולית של <sup>60</sup>Co. לחומר זה זמן מחצית חיים 5.26 שנה, ולכן ע"פ נוסחה (2א) לעיל האקטיביות הסגולית של <sup>60</sup>Co היא

$$a \text{ (Co}^{60}\text{)} = 1.324 \cdot 10^{16} / 5.26 \cdot 60 = 4.2 \cdot 10^{13} \text{ (Bq/g)}$$

וביחידות קירי לגרם

$$a \text{ (Co}^{60}\text{)} = 3.6 \cdot 10^5 / 5.26 \cdot 60 = 1.14 \cdot 10^3 \text{ (Ci/g)}$$

כדוגמאות נוספות נחשב את האקטיביות הסגולית של  $U^{238}$  עם מחצית חיים של  $4.51 \cdot 10^9$  שנה ושל  $Th^{232}$  עם מחצית חיים של  $1.41 \cdot 10^{10}$  שנה

$$a(U^{238}) = 1.324 \cdot 10^{16} / 4.51 \cdot 10^9 \cdot 238 = 1.233 \cdot 10^4 \text{ (Bq/g)} = 0.333 \cdot 10^{-6} \text{ (Ci/g)}$$

$$a(Th^{232}) = 1.324 \cdot 10^{16} / 1.41 \cdot 10^{10} \cdot 232 = 4.05 \cdot 10^3 \text{ (Bq/g)} = 1.09 \cdot 10^{-7} \text{ (Ci/g)}$$

יצוין כי כל הנוסחאות שלעיל הם לחומר רדיואקטיבי נקי ללא נושא (carrier free) כאשר חומר רדיואקטיבי מהול בחומר שאינו רדיואקטיבי האקטיביות הסגולית נקבעת לפי אחוז המיהול..

### 3. החשיפה

מידת היוניזציה הנגרמת באוויר כתוצאה ממעבר אלומת פוטונים של קרינת גמא נמדדת על ידי גודל הנקרא "חשיפה" (exposure) יחידת החשיפה היא הרנטגן (Roentgen). זוהי עצמת הקרינה שתגרום ליצירת כמות מטען השווה ליחידה אלקטרוסטטית אחת בסנטימטר מעוקב אחד של אוויר יבש בתנאים סטנדרטיים. זה אקוויולנטי ליצירת כ-  $2.58 \cdot 10^{-4}$  קולון לק"ג אוויר. יחידה קטנה יותר היא המילירנטגן. חשיפה למילירנטגן אחד אקוויולנטית ליצירת 0.258 מיקרוקולון בק"ג אוויר.

$$1 \text{ R} = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg air}$$

$$1 \text{ mR} = 2.58 \cdot 10^{-7} \text{ C/kg air} = 0.258 \mu\text{C/kg air}$$

$$1 \text{ R} = 1000 \text{ mR}$$

### 4. המנה

כמות האנרגיה הנספגת בחומר נמדדת בעזרת גודל הנקרא מנה (Dose). יחידת המנה היא הגריי (Gray), ובקיצור Gy. גריי אחד אקוויולנטי לספיגת אנרגיה של ג'אול אחד בק"ג חומר.

היחידה הקונוונציונאלית של המנה היא הרד - (rad). יחידה זו אקוויולנטית לספיגת 100 ארג בגרם חומר. גריי אחד אקוויולנטי ל- 100 רד.

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

$$1 \text{ Gy} = 1000 \text{ mGy}$$

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy} = 1 \text{ cGy}$$

$$1 \text{ mGy} = 100 \text{ mrad}$$

#### 4.1. הקשר בין החשיפה למנה

הניסיון מראה כי חשיפת הגוף לרנטגן אחד תגרום לספיגת מנת קרינה של רד אחד בקירוב, ברקמות הסמוכות לפני הגוף.

## 5. המנה האקוויולנטית

הנזק הביולוגי הנגרם על ידי ספיגת אנרגיה על ידי הרקמה החיה נמדדת בעזרת גודל הנקרא **שקול המנה** או **המנה האקוויולנטית (equivalent dose)**. יחידת המנה האקוויולנטית היא **הסיוורט (Sievert)** ובקיצור Sv. מנת הקרינה ביחידות סיוורט מתקבלת ממנת הקרינה ביחידת גריי על ידי הכפלה במקדם **השקלול לסוג הקרינה (radiation weighting factor)**. המסומן ב-  $W_R$ . בעבר קראו למקדם המעבר מהמנה הפיזיקאלית למנה האקוויולנטית **גורם האיכות (quality factor)**. ערכו של  $W_R$  לקרינות שונות מוצג בטבלה 1. היחידה הישנה למנת הקרינה האקוויולנטית הייתה הרם (rem) סיוורט אחד אקוויולנטי ל- 100 רם ומיליסיוורט אחד הוא 100 מילירם.

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

$$1 \text{ mSv} = 100 \text{ mrem}$$

$$1 \mu\text{Sv} = 0.1 \text{ mrem}$$

### טבלה 1 - ערכי מקדם השקלול לסוג הקרינה, לפי ICRP-60

| מקדם השקלול $W_R$ | סוג הקרינה וטווחי האנרגיה                            |
|-------------------|--|
| 1                 | פוטונים (כל האנרגיות)                                |
| 1                 | אלקטרונים ומיואונים (כל האנרגיות)                    |
|                   | <b>נויטרונים</b>                                     |
| 5                 | כאשר האנרגיה $> 10 \text{ keV}$                      |
| 10                | $10 \text{ keV} - 100 \text{ keV}$                   |
| 20                | $100 \text{ keV} - 2 \text{ MeV}$                    |
| 10                | $2 \text{ MeV} - 20 \text{ MeV}$                     |
| 5                 | מעל $20 \text{ MeV}$                                 |
| 5                 | פרוטונים (להוציא פרוטוני רתיעה באנרגיה מעל ל- 2 MeV) |
| 20                | חלקיקי אלפא, מוצרי ביקוע, יונים כבדים                |

### הערות לטבלה 1:

הסבר על המושג **מקדם השקלול לסוג הקרינה** וההבדל בינו לבין גורם האיכות (Q.F.) ששימש בהמלצות ICRP הקודמות מוצג בנספח A (Annex A) לפרסום מס' 60 של ה- ICRP משנת 1991.

## 6. מנת הקרינה המוכללת (המנה האפקטיבית)

הסיוורט היא גם יחידת מנת הקרינה המוכללת או המנה האפקטיבית (effective dose), המוגדרת על ידי:

$$\text{Effective Dose} = ED_T \times W_T$$

כאשר  $ED_T$  היא המנה האקוויוולנטית לרקמה או לאבר T ו- $W_T$  מקדם השקלול לאבר (tissue weighting factor) המבטא את הסיכון היחסי שבחשיפת אברים ספציפיים ביחס לחשיפת הגוף כולו. מקדמי השקלול לאברי הגוף מוצגים בטבלה 2. "הסיכון היחסי" בהקשר זה הוא הסיכון היחסי לחלות בסרטן ממית כתוצאה מהחשיפה.

**טבלה 2 - מקדמי השקלול לאברי הגוף (הסיכון היחסי שבחשיפת איברים שונים).**

| מקדם השקלול לאבר $W_T$ לפי ICRP-60 | הרקמה / האיבר   |
|------------------------------------|-----------------|
| 0.05                               | שלפוחית השתן    |
| 0.12                               | מח העצם (האדום) |
| 0.01                               | מעטפת העצם      |
| 0.05                               | שדיים           |
| 0.12                               | המעי הגס        |
| 0.05                               | הכבד            |
| 0.12                               | הריאות          |
| 0.05                               | הושט            |
| -                                  | השחלות          |
| 0.01                               | העור            |
| 0.12                               | הקיבה           |
| 0.05                               | בלוטת התריס     |
| 0.05                               | שאר האברים      |
| 0.20                               | אברי המין       |
| 1.0                                | סה"כ            |

הגבלות החשיפה לעובדים ולציבור נקבעות במונחים של מנה אקוויוולנטית לאבר מסוים בשנה או מנה אפקטיבית בשנה.

## 7. הערכה כמותית של מנת הקרינה מחומרים רדיואקטיביים שחדרו לגוף

כשעובדים עם מקורות ר"א פתוחים או במקרה של תקריות שבהם מתפזר חומר ר"א גזי, נוזלי או אבקתי לסביבה, עלולה להיווצר סכנה של זיהום פנימי, זיהום זה יכול לחדור לגוף האדם דרך הנשימה או דרך האכילה. מנת הקרינה הנגרמת כתוצאה מזיהום פנימי תלויה במטבוליזם של

החומר ובמשך השהייה של החומר באברים בהם הוא מתרכז. גורם חשוב בקביעת מנת הקרינה הנגרמת על ידי זיהום פנימי בחומרים רדיואקטיביים הוא מסיסות החומר בנוזלי הגוף. חומרים רדיואקטיביים בתרכובות לא מסיסות החודרות לגוף בדרכי האכילה מופרשים מהגוף בחלקם הניכר תוך עשרות שעות. לעומת זאת אם אותם חומרים חודרים לגוף בדרכי הנשימה ומגיעים לראות הם נשארים במערכת הנשימה לתקופה ארוכה, הנמשכת חודשים ולעיתים שנים רבות, דווקא בגלל מסיסותם הנמוכה.

נוהגים להגדיר איבר קריטי לכל חומר וחומר זהו האיבר הרגיש ביותר במקרה של זיהום בחומר ר"א מסוים (בדרך כלל הוא גם האיבר בו מתרכז החומר). האיבר הקריטי יכול להיות הגוף כולו - למשל עבור טריטיום (רקמת כל הגוף ללא העצמות), העצמות - למשל עבור  $^{241}\text{Am}$ , בלוטת המגן - עבור האיזוטופים של יוד וכו'. במקרים רבים האיברים הנחשפים למנה הגבוהה ביותר הם אלה הקשורים במסלול סילוק החומר מהגוף דהיינו הכליות ושלפוחית השתן.

גורם חשוב בקביעת מנת הקרינה מזיהום פנימי היא **מחצית החיים הביולוגית** (biological half life) המוגדר כזמן הנדרש לגוף או לאיבר מסוים כדי לסלק מהגוף, באמצעים ביולוגיים, מחצית מכמות החומר שחדרה לתוכו.

לזמן העובר עד שכמות החומר הרדיואקטיבי בגוף יורדת למחצית מערכה ההתחלתית, עקב דעיכה פיזיקאלית והפרשה ביולוגית גם יחד, **קוראים מחצית חיים אפקטיבית**. הקשר בין מחצית החיים האפקטיבית  $T_e$ , **מחצית החיים הביולוגית**  $T_b$  ו**מחצית החיים הפיזיקאלית**  $T_p$ , נתון על ידי הנוסחה:

$$1/T_e = 1/T_b + 1/T_p$$

**דוגמא:** מחצית החיים הפיזיקאלית של יוד 125 הוא 60 ימים ומחצית החיים הביולוגית של יוד הוא כ- 120 ימים ולכן מחצית החיים האפקטיבית של יוד 125 הוא כ- 40 יום ( $1/60 + 1/120 = 1/40$ ).

### מנת קרינה ליחידת נטילה

כמות החומר החודרת לגוף קרויה **הנטילה** (intake). אותו החלק מה**נטילה** המגיע מדרכי העיכול ומהראות לנוזלי הגוף (רוב רובו לדם) מכונה **הקליטה** (uptake).

הקשר הכמותי בין ה**נטילה** ובין מנת הקרינה הנגרמת לאדם הנחשף על ידי חדירה זו נקבע באמצעות חישובים המסתמכים על מודלים מורכבים המתחשבים ב**מסיסות החומר** בנוזלי הגוף, התפלגות החומר בגוף לאחר קליטתו, ריכוז החומר באבר, גיל האדם שלגופו חדר החומר, קצב הפרשת החומר מהגוף ופרמטרים פיזיקאליים וביולוגיים נוספים. החישובים מבוצעים באמצעות מחשבים רבי עוצמה. ה-ICRP מפרסם את תוצאות החישובים האלה בטבלאות המציגות את ערכי המנה האפקטיבית ליחידת נטילה (כלומר מנת הקרינה השקולה ליחידת אקטיביות החודרת לגוף). טבלאות של ערכי מנת הקרינה האפקטיבית ליחידת נטילה (ביחידות Sv/Bq) הוצגו למשל בתקן

הבינלאומי להגנה מקרינה (1). עיון בטבלאות אלה מראה למשל כי ערכי מנת הקרינה ליחידת נטילה (**מקל"נ**) של תרכובות לא מסיסות של רדיואיזוטופים ארוכי חיים, פולטי קרינת אלפא בשרשרת האורניום הטבעי החודרות לגוף בדרכי הנשימה של בני אדם מבוגרים הן כדלהלן:

$$^{238}\text{U} - 7.3 \times 10^{-6} \text{ Sv/Bq}, \quad ^{234}\text{U} - 8.5 \times 10^{-6} \text{ Sv/Bq}, \quad ^{226}\text{Ra} - 3.2 \times 10^{-6} \text{ Sv/Bq}, \\ ^{210}\text{Po} - 3.0 \times 10^{-6} \text{ Sv/Bq}$$

מתוך ערכי מנת הקרינה ליחידת אקטיביות מחשבים מה היא **האקטיביות שחדירתה לגוף במשך שנה תגרום למנת קרינה אפקטיבית המגיעה לגבול המנה**. כמות זו נקראת הנטילה השנתית הגבולית ובאנגלית: **ALI** (Annual Limit of Intake).

ערכי **ALI ביחידות Bq** לרוב סוגי הרדיואיזוטופים חושבו על ידי מומחים מממ"ג על בסיס ערכי **המקל"נ** לפי אסמכתא (1) ופורסמו בחוברת מיוחדת בשנת 1998 (5). בפרסום זה הוצגו טבלאות נפרדות לערכי ה-ALI לבליעה ולנשימה לסוגי תרכובות ודרגות מסיסות שונות, בטבלאות הוצגו עמודות נפרדות לערכי ה-ALI שחושבו לגבול מנה שנתי של 20 mSv ושל 50 mSv לעובדי קרינה וגבול מנה של 1 mSv לבני אדם מן הציבור, לקבוצות גיל שונות..

ערכי ה-ALI לנשימה התואמים למשל את ערכי **המקל"נ** שהוצגו לעיל עבור רדיואיזוטופים בשרשרת האורניום בתרכובות לא מסיסות, לעובדים, לפי גבול מנה שנתי של 20 mSv הם:

$$^{238}\text{U} - 2.7 \times 10^3 \text{ Bq}, \quad ^{234}\text{U} - 2.35 \times 10^3 \text{ Bq}, \quad ^{226}\text{Ra} - 5.25 \times 10^3 \text{ Bq}, \\ ^{210}\text{Po} - 6.7 \times 10^3 \text{ Bq}.$$

כשנושמים אוויר המזהם בכל ארבעת הרדיואיזוטופים האלה בשיווי משקל משתמשים בנוסחת שקלול. ערך ה-ALI לנשימה של תרכובות לא מסיסות של אורניום 238 בשיווי משקל עם בנותיו ארוכי לפי נוסחת השקלול הוא **880 Bq**.

גודל הנגזר מערכי ה-ALI הוא ה-**DAC** (Derived Air Concentration). זהו ריכוז החומר הרדיואקטיבי באוויר ( $\text{Bq/m}^3$ ) שיגרום לעובד (בהתאם לקצב נשימתו ומספר שעות העבודה בשנה בריכוז המדובר) לנשום כמות אקטיביות השווה לערך ה-ALI. בתנאי עבודה אופייניים של 2000 שעות עבודה בשנה ובקצב נשימה של 20 ליטר אוויר בשעה מתקבל היחס:

$$\text{DAC} (\text{Bq/m}^3) = \text{ALI} / 2,400$$

עולה מכאן שערך ה-**DAC** לעובדים לתרכובות לא מסיסות של  $^{238}\text{U}$  למשל הוא  $1.125 (\text{Bq/m}^3)$  ולתרכובות לא מסיסות של  $^{238}\text{U}$  בשיווי משקל עם בנותיו הוא  $0.37 (\text{Bq/m}^3)$ .

### אסמכתאות לנספח 3

1. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Pub. 60, Pergammon Press, 1991.
2. Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, IAEA Safety series 115, 1995.
3. Council Directive 96/29 Euratom, Official Journal of the European Communities No. L 159, 29.6.1996.
4. Limits of Intakes of Radionuclides by Workers, ICRP Pub. 30, parts 1 to 3 with supplements, Pergammon Press 1979-1982.
5. י. גרוף וט. שלזינגר, הנטילה השנתית הגבולית (ALI) לעובדים ולבני אדם מן הציבור לפי התקן הבינלאומי להגנה מקרינה משנת 1995, שב"ק 98/18, שטח בטיחות קרינה ממ"ג חשוון תשנ"ט, נובמבר 1998.
6. Protection of the Public in Situations of Prolonged Radiation Exposure, Annals of the ICRP Vol. 29 (1-2), ICRP Pub. 82, Pergammon Press, 1999.
7. Scope of Radiological Protection Control Measures, Annals of the ICRP Vol. 37 No.6, ICRP Pub. 104, Pergammon Press 2007.



Actinium Series ( $4n + 3$ )\*

| Nuclide  | Historical name        | Half-life                   | Major radiation energies (MeV) and intensities† |  |  |  |
|--|------------------------|-----------------------------|---|--|--|--|
|  |                        |                             | $\alpha$  |  | $\beta$                                    | $\gamma$                                     |
| $^{235}_{92}\text{U}$  | Actinouranium          | $7.1 \times 10^8 \text{y}$  | 4.37 (18%)<br>4.40 (57%)<br>4.58c‡ (8%)         |  | ---  | 0.143 (11%)<br>0.185 (54%)<br>0.204 (5%)     |
| $^{231}_{90}\text{Th}$   | Uranium Y              | 25.5h                       | ---   |  | 0.140 (45%)<br>0.220 (15%)<br>0.305 (40%)  | 0.026 (2%)<br>0.084c (10%)                   |
| $^{231}_{91}\text{Pa}$   | Protoactinium          | $3.25 \times 10^4 \text{y}$ | 4.95 (22%)<br>5.01 (24%)<br>5.02 (23%)          |  | ---  | 0.027 (6%)<br>0.29c (6%)                     |
| $^{227}_{89}\text{Ac}$   | Actinium               | 21.6y                       | 4.86c (0.18%)<br>4.95c (1.2%)                   |  | 0.043 (~99%)                               | 0.070 (0.08%)                                |
| $^{227}_{90}\text{Th}$ (98.6%)<br>$^{223}_{87}\text{Fr}$ (1.4%)    | Radioactinium          | 18.2d                       | 5.76 (21%)<br>5.98 (24%)<br>6.04 (23%)          |  | ---  | 0.050 (8%)<br>0.237c (15%)<br>0.31c (8%)     |
| $^{223}_{88}\text{Ra}$   | Actinium K             | 22m                         | 5.44 (~0.005%)                                  |  | 1.15 (~100%)                               | 0.050 (40%)<br>0.080 (13%)<br>0.234 (4%)     |
| $^{223}_{86}\text{Rn}$   | Actinium X             | 11.43d                      | 5.61 (26%)<br>5.71 (54%)<br>5.75 (9%)           |  | ---  | 0.149c (10%)<br>0.270 (10%)<br>0.33c (6%)    |
| $^{219}_{86}\text{Rn}$   | Emanation Actinon (An) | 4.0s                        | 6.42 (8%)<br>6.55 (11%)<br>6.82 (81%)           |  | ---  | 0.272 (9%)<br>0.401 (5%)                     |
| $^{215}_{84}\text{Po}$   | Actinium A             | 1.78ms                      | 7.38 (~100%)                                    |  | 0.74 (~0.0023%)                            | ---  |
| $^{211}_{82}\text{Pb}$ (~100%)<br>$^{215}_{85}\text{At}$ (0.0023%) | Actinium B             | 36.1m                       | ---   |  | 0.29 (1.4%)<br>0.56 (9.4%)<br>1.39 (87.5%) | 0.405 (3.4%)<br>0.427 (1.8%)<br>0.832 (3.4%) |
| $^{211}_{83}\text{Bi}$   | Astatine               | ~0.1ms                      | 8.01 (~100%)                                    |  | ---  | ---  |
| $^{211}_{83}\text{Bi}$   | Actinium C             | 2.15m                       | 6.28 (16%)<br>6.62 (84%)                        |  | 0.60 (0.28%)                               | 0.351 (14%)                                  |
| $^{211}_{84}\text{Po}$ (0.28%)<br>$^{207}_{81}\text{Tl}$ (99.7%)   | Actinium C'            | 0.52s                       | 7.45 (99%)                                      |  | ---  | 0.570 (0.5%)<br>0.90 (0.5%)                  |
| $^{207}_{81}\text{Tl}$   | Actinium C''           | 4.79m                       | ---   |  | 1.44 (99.8%)                               | 0.897 (0.16%)                                |
| $^{207}_{82}\text{Pb}$   | Actinium D             | Stable                      | ---   |  | ---  | ---  |

\*This expression describes the mass number of any member in this series, where  $n$  is an integer.

Example:  $^{207}_{82}\text{Pb}$  ( $4n + 3$ )..... $4(51) + 3 = 207$

†Intensities refer to percentage of disintegrations of the nuclide itself, not to original parent of series.

‡Complex energy peak which would be incompletely resolved by instruments of moderately low resolving power such as scintillators.

Data taken from: Table of Isotopes and USNRDL-TR-802.

## נספח 4 א - שרשרת האורניום-238

Uranium Series ( $4n + 2$ )\*

| Nuclide  | Historical name         | Half-life                    | Major radiation energies (MeV) and intensities† |                                       |   |
|--|-------------------------|------------------------------|---|---------------------------------------|---|
|  |                         |                              | $\alpha$  | $\beta$                               | $\gamma$                                  |
| $^{238}_{92}\text{U}$  | Uranium I               | $4.51 \times 10^9 \text{ y}$ | 4.15 (25%)<br>4.20 (75%)                        | ---                                   | ---                                       |
| $^{234}_{90}\text{Th}$   | Uranium $X_1$           | 24.1d                        | ---   | 0.103 (21%)<br>0.193 (79%)            | 0.063c‡ (3.5%)<br>0.093c (4%)             |
| $^{234}_{91}\text{Pa}^m$   | Uranium $X_2$           | 1.17m                        | ---   | 2.29 (98%)                            | 0.765 (0.30%)<br>1.001 (0.60%)            |
| <div> <div>99.87%</div> <div>0.13%</div> <div> <div><math>^{234}_{91}\text{Pa}</math></div> </div> </div>  | Uranium Z               | 6.75h                        | ---   | 0.53 (66%)<br>1.13 (13%)              | 0.100 (50%)<br>0.70 (24%)<br>0.90 (70%)   |
| $^{234}_{92}\text{U}$  | Uranium II              | $2.47 \times 10^5 \text{ y}$ | 4.72 (28%)<br>4.77 (72%)                        | ---                                   | 0.053 (0.2%)                              |
| $^{230}_{90}\text{Th}$   | Ionium                  | $8.0 \times 10^4 \text{ y}$  | 4.62 (24%)<br>4.68 (76%)                        | ---                                   | 0.068 (0.6%)<br>0.142 (0.07%)             |
| $^{226}_{88}\text{Ra}$   | Radium                  | 1602y                        | 4.60 (6%)<br>4.78 (95%)                         | ---                                   | 0.186 (4%)                                |
| $^{222}_{86}\text{Rn}$   | Emanation<br>Radon (Rn) | 3.823d                       | 5.49 (100%)                                     | ---                                   | 0.510 (0.07%)                             |
| $^{218}_{84}\text{Po}$   | Radium A                | 3.05m                        | 6.00 (~100%)                                    | 0.33 (~0.019%)                        | ---                                       |
| <div> <div>99.98%</div> <div>0.02%</div> <div> <div><math>^{214}_{82}\text{Pb}</math></div> </div> </div>  | Radium B                | 26.8m                        | ---   | 0.65 (50%)<br>0.71 (40%)<br>0.98 (6%) | 0.295 (19%)<br>0.352 (36%)                |
| $^{218}_{85}\text{At}$   | Astatine                | ~2s                          | 6.65 (6%)<br>6.70 (94%)                         | ? (~0.1%)                             | ---                                       |
| $^{214}_{83}\text{Bi}$   | Radium C                | 19.7m                        | 5.45 (0.012%)<br>5.51 (0.008%)                  | 1.0 (23%)<br>1.51 (40%)<br>3.26 (19%) | 0.609 (47%)<br>1.120 (17%)<br>1.764 (17%) |
| <div> <div>99.98%</div> <div>0.02%</div> <div> <div><math>^{214}_{84}\text{Po}</math></div> </div> </div>  | Radium C'               | 164 $\mu\text{s}$            | 7.69 (100%)                                     | ---                                   | 0.799 (0.014%)                            |
| $^{210}_{81}\text{Tl}$   | Radium C''              | 1.3m                         | ---   | 1.3 (25%)<br>1.9 (56%)<br>2.3 (19%)   | 0.296 (80%)<br>0.795 (100%)<br>1.31 (21%) |
| $^{210}_{82}\text{Pb}$   | Radium D                | 21y                          | 3.72 (.000002%)                                 | 0.016 (85%)<br>0.061 (15%)            | 0.047 (4%)                                |
| $^{210}_{83}\text{Bi}$   | Radium E                | 5.01d                        | 4.65 (.00007%)<br>4.69 (.00005%)                | 1.161 (~100%)                         | ---                                       |
| <div> <div>~100%</div> <div>.00013%</div> <div> <div><math>^{210}_{84}\text{Po}</math></div> </div> </div> | Radium F                | 138.4d                       | 5.305 (100%)                                    | ---                                   | 0.803 (0.0011%)                           |
| $^{206}_{81}\text{Tl}$   | Radium E''              | 4.19m                        | ---   | 1.571 (100%)                          | ---                                       |
| $^{206}_{82}\text{Pb}$   | Radium G                | Stable                       | ---   | ---                                   | ---                                       |

\*This expression describes the mass number of any member in this series, where n is an integer.

Example:  $^{206}_{82}\text{Pb}$  ( $4n + 2$ ).....4(51) + 2 = 206

†Intensities refer to percentage of disintegrations of the nuclide itself, not to original parent of series.

‡Complex energy peak which would be incompletely resolved by instruments of moderately low resolving power such as scintillators.

## נספח 4 ב - שרשרת התוריום-232

Thorium Series (4n)\*

| Nuclide                | Historical name       | Half-life                       | Major radiation energies (MeV) and intensities† |  |   |
|------------------------|-----------------------|---------------------------------|---|--|---|
|                        |                       |                                 | α   | β                                      | γ   |
| $^{232}_{90}\text{Th}$ | Thorium               | $1.41 \times 10^{10} \text{ y}$ | 3.95 (24%)<br>4.01 (76%)                        | ---                                    | ---   |
| $^{228}_{88}\text{Ra}$ | Mesothorium I         | 6.7y                            | ---   | 0.055 (100%)                           | ---   |
| $^{228}_{89}\text{Ac}$ | Mesothorium II        | 6.13h                           | ---   | 1.18 (35%)<br>1.75 (12%)<br>2.09 (12%) | 0.34c‡ (15%)<br>0.908 (25%)<br>0.96c (20%)                |
| $^{228}_{90}\text{Th}$ | Radiothorium          | 1.910y                          | 5.34 (28%)<br>5.43 (71%)                        | ---                                    | 0.084 (1.6%)<br>0.214 (0.3%)                              |
| $^{224}_{88}\text{Ra}$ | Thorium X             | 3.64d                           | 5.45 (6%)<br>5.68 (94%)                         | ---                                    | 0.241 (3.7%)  |
| $^{220}_{86}\text{Rn}$ | Emanation Thoron (Tn) | 55s                             | 6.29 (100%)                                     | ---                                    | 0.55 (0.07%)  |
| $^{216}_{84}\text{Po}$ | Thorium A             | 0.15s                           | 6.78 (100%)                                     | ---                                    | ---   |
| $^{212}_{82}\text{Pb}$ | Thorium B             | 10.64h                          | ---   | 0.346 (81%)<br>0.586 (14%)             | 0.239 (47%)<br>0.300 (3.2%)                               |
| $^{212}_{83}\text{Bi}$ | Thorium C             | 60.6m                           | 6.05 (25%)<br>6.09 (10%)                        | 1.55 (5%)<br>2.26 (55%)                | 0.040 (2%)<br>0.727 (7%)<br>1.620 (1.8%)                  |
| $^{212}_{84}\text{Po}$ | Thorium C'            | 304ns                           | 8.78 (100%)                                     | ---                                    | ---   |
| $^{208}_{81}\text{Tl}$ | Thorium C''           | 3.10m                           | ---   | 1.28 (25%)<br>1.52 (21%)<br>1.80 (50%) | 0.511 (23%)<br>0.583 (86%)<br>0.860 (12%)<br>2.614 (100%) |
| $^{208}_{82}\text{Pb}$ | Thorium D             | Stable                          | ---   | ---                                    | ---   |

\*This expression describes the mass number of any member in this series, where n is an integer.  
Example:  $^{232}_{90}\text{Th}$  (4n).....4(58) = 232

†Intensities refer to percentage of disintegrations of the nuclide itself, not to original parent of series.

‡Complex energy peak which would be incompletely resolved by instruments of moderately low resolving power such as scintillators.

Data taken from: Lederer, C. M., Hollander, J. M., and Perlman, I., Table of Isotopes (6th ed.; New York: John Wiley & Sons, Inc., 1967) and Hogan, O. H., Zigman, P. E., and Mackin, J. L., Beta Spectra (USNRDL-TR-802 [Washington, D.C.: U.S. Atomic Energy Commission, 1964]).

**נספח 5א - ריכוז חומרים רדיואקטיביים טבעיים בפחם מיובא לישראל ובאפר פחם המופק ממנו בתחנות הכוח לייצור חשמל בישראל בשנת 2007. הטור האחרון הוא ערך ממוצע לתקופה של 16 שנים אחורה (אז 1991)**

מעודכן ל 8/7/2008

## חברת החשמל לישראל בע"מ

היחידה למניעת מפגעים ורישוי סביבתי

סיכום בדיקות רדיונוקלידים בפחם ובאפר מתחנה"כ של חב. החשמל

| כללי      |         | רוטנברג |        | אורות רבין ב |        | אורות רבין א |        |                   |
|-----------|---------|---------|--------|--------------|--------|--------------|--------|-------------------|
| ממוצע #   | תחום #  | 7-12/07 | 1-6/07 | 7-12/07      | 1-6/07 | 7-12/07      | 1-6/07 | תקופה מיוצגת יסוד |
| פחם       |         |         |        |              |        |              |        |                   |
| 19        | 6-32    | 16      | 15     | ---          | ---    | 16           | 13     | Ra-226            |
| 21        | 5-46    | 14      | 15     | ---          | ---    | 13           | 12     | Th-228            |
| 38        | 8-88    | 26      | 29     | ---          | ---    | 46           | 41     | K-40              |
| אפר מרחף  |         |         |        |              |        |              |        |                   |
| 149       | 99-219  | 144     | 122    | 170          | 132    | 128          | 142    | Ra-226            |
| 143       | 83-226  | 123     | 111    | 140          | 119    | 110          | 120    | Th-228            |
| 289       | 132-447 | 377     | 341    | 247          | 320    | 382          | 291    | K-40              |
| אפר תחתית |         |         |        |              |        |              |        |                   |
| 127       | 80-176  | 93      | 100    | 176          | 129    | 122          | 117    | Ra-226            |
| 130       | 77-190  | 77      | 92     | 168          | 112    | 107          | 104    | Th-228            |
| 230       | 79-557  | 318     | 557    | 209          | 232    | 316          | 268    | K-40              |

The concentrations are in Bq/Kg units on dry material basis

הבדיקות נערכו בממ"ג נחל שורק מלבד בתקופה 6/00 - 1/99 בה הן נערכו בחברת "רמות" שליד אוניברסיטת ת"א ובתקופות 6/03 - 7/02 ו 7/04 - 12/07 בהן הן נערכו בחברה לשירותי איכות הסביבה בת"א רדיום-226 מייצג את שרשרת האורניום-238, תוריום-228 מייצג את שרשרת התוריום-232  
---לא נדגם # לתקופה 12/07 - 7/91 ערך : אריאל מצגר

## נספח 5 ב

ריכוזי האורניום והתוריום, במונחי ppm, בדוגמאות של אפר מרחף ואפר תחתי שנלקחו מתחנות הכוח בישראל בשנים 2003-2007 כפי שנקבעו במעבדות המכון הגיאולוגי .

| שנה  | מדינה       | מכרה הפחם  | סוג אפר | U (ppm) | Th (ppm) |
|------|-------------|------------|---------|---------|----------|
| 2003 | NA          | NA         | מרחף    | 15      | 55       |
|      |             | NA         | תחתית   | 9       | 35       |
|      |             | NA         | תחתית   | 11      | 40       |
|      |             | NA         | תחתית   | 15      | 50       |
| 2004 | אוסטרליה    | New lands  | מרחף    | 7.5     | 26       |
|      | אינדונזיה   | Prima      | מרחף    | 7.2     | 22       |
|      | דרום אפריקה | Goedehoop  | מרחף    | 11      | 34       |
|      |             | KFT275     | מרחף    | 14      | 44       |
|      | קולומביה    | Cerrejon   | מרחף    | 6.5     | 15       |
|      |             | La Loma    | מרחף    | 6.5     | 14       |
| 2005 | אינדונזיה   | Adaro      | מרחף    | 4.5     | 19       |
|      | דרום אפריקה | ATC        | מרחף    | 10      | 25       |
|      |             | BB Prime   | מרחף    | 9.5     | 27       |
|      |             | BB Prime   | מרחף    | 9.3     | 31       |
|      |             | Greenside  | מרחף    | 4.4     | 9.5      |
|      | קולומביה    | La Loma    | מרחף    | 5       | 12       |
|      |             | La Loma LS | מרחף    | 6.5     | 17       |
| 2006 | אינדונזיה   | Blend      | מרחף    | 7       | 19       |
|      | דרום אפריקה | ATC        | מרחף    | 15      | 38       |
|      |             | BB Prime   | מרחף    | 15      | 40       |
|      |             | Goedehoop  | מרחף    | 14      | 43       |
|      |             | Greenside  | מרחף    | 13      | 38       |
|      | קולומביה    | Cerrejon   | מרחף    | 8       | 12       |
|      |             | La Loma    | מרחף    | 10      | 24       |
|      |             | La Loma LS | מרחף    | 8       | 19       |
|      | רוסיה       | RussianV   | מרחף    | 8       | 15       |
| 2007 | אינדונזיה   | Blend      | מרחף    | 8       | NA       |
|      | דרום אפריקה | BB Prime   | מרחף    | 14      | NA       |
|      |             | Goedehoop  | מרחף    | 15      | NA       |
|      | קולומביה    | Cerrejon   | מרחף    | 8       | NA       |
|      | רוסיה       | Mchw       | מרחף    | 10      | NA       |
|      |             | Russian    | מרחף    | 7       | NA       |

NA- אין מידע.

## מערכת ההגנה מקרינה של ה-ICRP \*

בכל העולם מקובל להגביל חשיפת בני אדם לקרינה מייננת על מנת למנוע את הנזקים הבריאותיים העלולים להיגרם על ידי החשיפה או לפחות להפחיתם ככל האפשר.

הנזקים הבריאותיים מפניהם חוששים מתחלקים לשני סוגים עיקריים:

**א.** השפעות ודאיות המתרחשות בדרך כלל תוך זמן קצר מתום החשיפה, הקרויות **השפעות דטרמיניסטיות**. השפעות אלה קרויות כך כיוון שהן ודאיות אם מנת הקרינה עלתה על ערך סף מסוים. חומרת הנזק הנובע מהשפעות כאלה היא יחסית למנת הקרינה. השפעות מסוג זה כוללות קטרקטים בעין, כוויות עור, נזקים המטולוגיים, השפעות זמניות או נמשכות על פוריות, השפעות על אורך חיים, מחלת קרינה חריפה ובמנות גבוהות מאוד גם מוות.

**ב.** השפעות מאוחרות, הקרויות השפעות **סטוכסטיות**. הן זוכות לכינוי זה כיוון שהן אקראיות "הכל או לא כלום" המופיעות רק בחלק קטן מן הנחשפים. השפעות מסוג זה מאופיינות בכך שהסתברות לעצם התרחשות התופעה ולא מידת חומרתה היא יחסית לגודל המנה. בהשפעות כאלה לא מבחינים במנת סף שמתחתיה ההסתברות לנזק היא אפס, כלומר השפעות סטוכסטיות עלולות להופיע לאחר חשיפה למנת קרינה כלשהי קטנה ככל שתהיה. על סוג זה (של השפעות) נמנים הגברת הסיכוי של האדם הנחשף או צאצאיו לחלות במחלות ממאירות, הגברת הסיכוי למומים מולדים בצאצאי הנחשף, השפעות על העובר ועוד.

הגוף הבינלאומי העוסק בגיבוש ההמלצות והגבלות החשיפה לקרינה מייננת הוא הוועדה הבינלאומית להגנה רדיולוגית **ICRP** (International Commission on Radiological Protection). במרכזן של המלצות ה-ICRP משנת 1990 (1) עומדת מערכת ההגנה מקרינה (The System of Radiation Protection) המטפלת בכל סוגי החשיפה לקרינה מייננת שהאדם המודרני פוגש בהם, דהיינו **חשיפה תעסוקתית, חשיפה רפואית וחשיפה ציבורית**.

חשיפות אלה יכולות להתרחש, לפי המינוח של ICRP, הן במסגרת "**עיסוקים**" (**practices**), שבהקשר אליהם מטרת מערכת ההגנה מקרינה היא להגביל חשיפות יזומות ו/או את הסיכוי **לחשיפות פוטנציאליות** (**potential exposures**) והן בנסיבות בהן החשיפה קרתה כבר, כתוצאה מתקרית או תקלה, או שהחשיפה קיימת ומתרחשת, עקב קרינת רקע טבעי מוגבר או גורמים אחרים. בנסיבות אלה מטרת מערכת ההגנה מקרינה היא למנוע את המשך החשיפה ו/או התפשטות הזיהום הרדיואקטיבי, או להקטין ככל האפשר על ידי נקיטת פעולות **התערבות** (**intervention**).

המלצות ה-ICRP משנת 1990 (1) מושתתות על שלושה עקרונות היסוד הידועים: **הצדקה** (**justification**), **אופטימיזציה** (**optimization of radiation protection**) ו**הגבלת מנת הקרינה** (**individual dose limits**). **לפריט**

\* על פי פרקים מחוברת ההדרכה "מושגי יסוד בהגנה מקרינה" מאת ט. שלזינגר, מהדורה תשיעית מורחבת, מכון ההדרכה ע"ש י. פייגה, ממ"ג שורק, חשוון תשס"ה אוקטובר 2004.

עקרונות אלה ניתן לסכם בקצרה כדלהלן :

#### א. הצדקה

עיקרון זה מתייחס לאמות המידה שישמשו בסיס להחלטת הרשויות להתיר שימוש בטכניקה או **עיסוק (practice)** ספציפיים הכרוכים בחשיפת בני אדם (עובדים או הציבור הרחב) לקרינה מייננת. אמות המידה לבחינת ההצדקה נקבעות לפי שיקולי סיכון תועלת, כאשר הכלל הוא שאין להתיר עיסוק שאין בו תועלת נטו לפרט ו/או לציבור. כשמדובר ב**התערבות** ההצדקה מתייחסת לאמות המידה לנקיטת אמצעים הגנה (protective measures) למניעת המשך החשיפה. נקיטת פעולות כאלה (כגון מניעת גישה, פינוי וכו') כרוכה בעלות כלכלית וחברתית אך האמצעים שנוקטים בהם עשויים למנוע את הנזקים שבהמשך החשיפה.

#### ב. אופטימיזציה

העיקרון השני הוא עיקרון **האופטימיזציה** האומר כי **העיסוק** שניתן לו אישור יבוצע תוך מאמץ להפחית את החשיפה ככל הניתן (**As Low As Readily Achievable** ובקיצור **ALARA**) תוך לקיחה בחשבון של הגורמים הכלכליים והחברתיים. הבסיס ל**אופטימיזציה** של אמצעי ההגנה מקרינה היא הערכת הנזק הבריאותי הכולל היכול להיגרם על ידי **העיסוק** הספציפי והשוואת נזק זה לעלותם של אמצעי ההגנה מקרינה שיש לנקוט בהם כדי להפחית את החשיפה.

כשמדובר ב**התערבויות** האופטימיזציה מתייחסת להשוואת **הנזק** הנגרם על ידי העלות הכלכלית והחברתית של אמצעי ההגנה הספציפיים שמוצע לנקוט בהם לעומת **התועלת** הנובעת ממניעת תוספת החשיפה כתוצאה מנקיטת אמצעי הגנה אלה. את **המנה הנחסכת** (averted dose) ניתן לתרגם למונחים כלכליים וחברתיים כדי להגיע להחלטה.

#### ג. הגבלת מנת הקרינה לפרט

העיקרון השלישי קובע כי גם כאשר **עיסוק** מסוים נמצא מוצדק וננקטו כל שיטות האופטימיזציה יש למנוע חשיפת העובד ובני אדם מהציבור מעל **גבולות המנה** המפורטות להלן. הגבלות המנה אינן חלות על חשיפת חולים ומטופלים לקרינה בתהליכי אבחון וטיפול רפואי.

#### גבולות מנה

גבולות המנה באים למנוע כליל את ההשפעות הדטרמיניסטיות ולצמצם במידת האפשר את הסיכוי להשפעת הסטוכסטיות. להשגת מטרות אלה המליצה ה-ICRP על קביעת **גבולות מנה (dose limits)** גבולות המנה מתייחסות למנת הקרינה המצטברת בשנה אחת. גבולות המנה למניעת השפעות דטרמיניסטיות נקבעו בהתאם לערכי מנת הסף לחשיפה כרונית. נוסף נקבעו גבולות המנה כך שהחשיפה הנמשכת עד גבול המנה במשך שנים רבות לא תגרום לאדם תוספת סיכון סטוכסטי שהוועדה מגדירה כ**סיכון בלתי נסבל** או **בלתי קביל (unacceptable)**. הוועדה קבעה ערכי מנה מרביים שהנזק הפוטנציאלי (הסיכון) הנובע מהם הוא בתחום ה**סביר/נסבל (tolerable)**. כבסיס לסיכון סביר של עובדים קבעה הוועדה תוספת סיכון לתמותה בסדר גודל של  $10^{-3}$  לשנה (דהיינו גרימת מקרה מוות אחד נוסף ל-1000 עובדים לשנה). בהתאם לזה קבעה הוועדה את גבולות המנה המפורטות ב**טבלה 1** להלן. הערכים הכמותיים גובשו על בסיס מקדמי הסיכון הסרטני לתחלואה ותמותה מסרטן והסיכוי לגרימת פגמים גנטיים.

**טבלה 1 - גבול המנה השנתי, לפי ICRP 60 (1)**

| גבול המנה השנתי <sup>1</sup> |                     |                                 |
|------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| הציבור הרחב                  | עובדים <sup>2</sup> |                                 |
| 1 mSv <sup>4</sup>           | 20 mSv <sup>3</sup> | מנה אפקטיבית                    |
| 15 mSv                       | 150 mSv             | מנה אקוויוולנטית לעדשות העיניים |
| 50 mSv                       | 500 mSv             | מנה אקוויוולנטית לעור           |
| ----                         | 500 mSv             | מנה אקוויוולנטית לגפיים         |

- (1) מנה מצטברת לשנה מחשיפה לקרינה חיצונית וזיהום פנימי.
- (2) לא כולל עובדות בהריון.
- (3) מנה גבולית ממוצעת לשנה (זמן המיצוע 5 שנים עוקבות) אך לא יותר מ- 50 mSv לכל שנה בודדת.
- (4) במקרים מיוחדים ניתן להרשות חשיפת בודדים מן הציבור למנה אקוויוולנטית של עד 5 mSv בשנה אחת ובתנאי שהחשיפה הממוצעת ב- 5 שנים עוקבות לא תעלה על 1 mSv לשנה.

בהקשר ל**טבלה 1** נזכיר כי כאשר הגוף כולו נחשף המנה האפקטיבית היא המנה הכל גופית. באשר לא כל הגוף נחשף אבל מספר אברים נחשפו במקביל, יש לחשב את המנה האפקטיבית ולהשוות התוצאה לגבולות המנה שבטבלה 1 החישוב נעשה על ידי סיכום המנות המשוקללות בכל האיברים.

עוד יצוין בהקשר לטבלה כי את ההגבלות על **זיהום פנימי** קובעים באמצעות פרמטר הקרוי **נטילה**

**שנתית מרבית** ובאנגלית **ALI (Annual Limit of Intake)**. גודל נגזר מה-**ALI** הוא ה-**DAC (Derived Air Concentration)**. הסבר על הפרמטרים האלה מוצג ב**אסמכתאות** (4) ו- (5) לנספח זה.

התקן הבינלאומי להגנה מקרינה שפורסם ב- 1996 (2) אימץ את הגבלות החשיפה שפורטו ב**טבלה 1**. הגבלות החשיפה האלה מחמירות יותר מההגבלות שעליהן המליצה ה-ICRP בשנת 1977 (בפרסום מס' 26, שלה (3) ושהיו בתוקף עד 1995. גבולות המנה לעובדי קרינה לפי פרסום 26 מוצגות ב**טבלה 2**. לפי טבלה זו ניתן היה למעשה לחשוף עובד למנה מצטברת של 250 מיליסיוורט (25 רם) בחמש שנים עוקבות כאשר לפי ההמלצות החדשות אין לצבור ב- 5 שנים עוקבות יותר מ- 100 מיליסיוורט (10 רם). תקנות הבטיחות בעבודה בישראל טרם הותאמו לתקן הבינלאומי להגנה מקרינה והמנות הגבוליות הנוהגות בישראל, לפי תקנות הבטיחות בעבודה 1992, תואמות עדיין את הערכים שב**טבלה 2**. יתר על כן, לפי תקנות הבטיחות בעבודה, חשיפה לקרינה ממקורות טבעיים כגון החשיפה לרדון והחשיפה לקרינה קוסמית אינה כלולה בחשיפה התעסוקתית.

### **חסמי מנה**

הגבלות החשיפה לפי מערכת ההגנה מקרינה של ה-ICRP משנת 1991 כוללות מלבד המנות הגבוליות גם את מושג **חסמי מנה** (dose constraints). אלה הם גבולות מנה שיש להטיל על החשיפה מעיסוקים ומקורות קרינה ספציפיים במסגרת תהליך אופטימיזציה ראשוני. חסמי המנה נקבעו כדי



להבטיח שתרומת מנת הקרינה לעובד או לפרט מן הציבור כתוצאה מהחשיפה למקור/עיסוק מסוים תהווה רק אחוז מוגבל מהמנה הגבולית .

כך הומלץ למשל להטיל חסם מנה של 0.3 mSv לשנה על תוספת מנת הקרינה לבודד מן הציבור כתוצאה מחשיפתו הכרונית לקרינה טבעית שמקורה בריכוזים חריגים של חומרים רדיואקטיביים טבעיים במוצרי בניה תעשייתיים (בעיקר,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  ו- $^{232}\text{Th}$ ). חסם מנה זה מגיע ל כ- 30% מגבול המנה השנתי לבני אדם מן הציבור כתוצאה מעיסוקים.

### טבלה 2- גבולות מנה שנתיים לעובדי קרינה לפי המלצות ICRP משנת 1977 (3)

| מנה גבולית לשנה<br>(מילירם) | מנה גבולית לשנה<br>(מיליסיוורט) |                             |
|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| 5,000                       | 50                              | הגוף כולו                   |
|                             |                                 | חלק הגוף                    |
| 15,000                      | 150                             | העיניים                     |
| 20,000                      | 200                             | אברי המין                   |
| 30,000                      | 300                             | השדיים                      |
| 40,000                      | 400                             | מח העצם והריאות             |
| 50,000                      | 500                             | בלוטת המגן ואברים<br>בודדים |

### הבקרה על קרינת הרקע הטבעי

עד שנת 1991 מקורות הקרינה הטבעיים קרינה לא נכללו במערכת ההגנה מפני קרינה תעסוקתית ברוב מדינות העולם או שניתן להם פטור (exemption) מדרישות רישום, רישוי ובקרה.

בשנת 1991 המליצה הוועדה הבינלאומית להגנה רדיולוגית (להכליל במערכת ההגנה מקרינה חלק ממקורות הקרינה הטבעית (1). המלצות ה אלה אומצו ותורגמו להנחיות מעשיות בתקן הבינלאומי להגנה מקרינה (2) וגם בתקן האירופי להגנה מקרינה (3), שהקדיש פרק מיוחד (Title VII) לדרישות בטיחות קרינה בעיסוקים הכרוכים בחשיפת עובדים לקרינה מייננת ממקורות טבעיים, עם תשומת לב מיוחדת לעיסוק בעפרות המכילות ריכוזים גבוהים מהרגיל של חומרים רדיואקטיביים טבעיים (כגון פוספטים ואשלג) העלולים לגרום לחשיפה משמעותית של העובדים. בשנת 1999 פרסמה ה- ICRP המלצות מיוחדות הנוגעות להגבלת החשיפה הכרונית של העובדים והציבור לקרינה מייננת ממקורות טבעיים (6). בשנת 2007 פורסמו הנחיות חדשות ומשלימות של ה-ICRP בנושא הטיפול בחומרים רדיואקטיביים ממקור טבעי (7).

## אסמכתאות לנספח 6

1. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Pub. 60, Pergammon Press, 1991.
2. Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, IAEA Safety series 115, 1995.
3. Council Directive 96/29 Euratom, Official Journal of the European Communities No. L 159, 29.6.1996.
4. Limits of Intakes of Radionuclides by Workers, ICRP Pub. 30, parts 1 to 3 with supplements, Pergammon Press 1979-1982.
5. י. גרוף וט. שלזינגר, הנטילה השנתית הגבולית (ALI) לעובדים ולבני אדם מן הציבור לפי התקן הבינלאומי להגנה מקרינה משנת 1995, שב"ק 98/18, שטח בטיחות קרינה ממ"ג חשוון תשנ"ט, נובמבר 1998.
6. Protection of the Public in Situations of Prolonged Radiation Exposure, Annals of the ICRP Vol. 29 (1-2), ICRP Pub. 82, Pergammon Press, 1999.
7. Scope of Radiological Protection Control Measures, Annals of the ICRP Vol. 37 No.6, ICRP Pub. 104, Pergammon Press 2007.

**קרינת הרקע הטבעי**

האדם היה חשוף לקרינה מייננת מאז הופעתו על פני כדור הארץ. לקרינה הטבעית שלושה מקורות עיקריים: 1. הקרינה הקוסמית 2. קרינה ממקורות טבעיים הנמצאים בקליפת כדור הארץ או באוויר; 3. קרינה הפנימית המתקבלת מהתפרקות של איזוטופים רדיואקטיביים הנמצאים בגוף האדם.

הקרינה הקוסמית החודרת לאטמוספירה מהחלל החיצון מורכבת בעיקר מפרוטונים בעלי אנרגיה גבוהה. פרוטונים אלה גורמים בעוברם דרך האטמוספירה, לקרינה משנית על ידי יוניזציה ואינטראקציות גרעיניות. כך נוצרת קרינה, אנרגטית מאוד אף היא, המורכבת מאלקטרונים, נייטרונים, מזונים וקרינה אלקטרומגנטית.

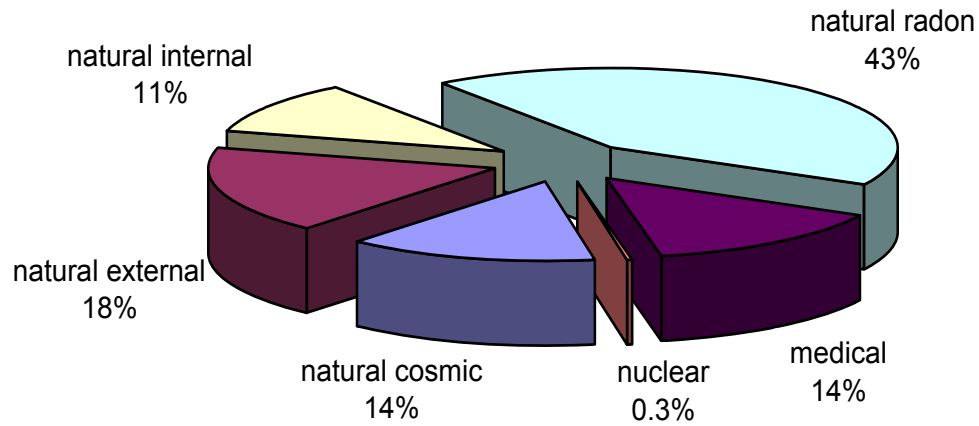
איזוטופים רדיואקטיביים טבעיים, כגון התוריום, האורניום ותוצריהם וכן האשלגן נמצאים בסלעים בקרקע ובאוויר. חומרי בנייה מכילים אף הם ריכוזים שונים של העפרות הרדיואקטיביות הטבעיות. חלק מחומרים אלה פולטים קרינת גמא.

נוסף לקרינה ממקורות חיצוניים חשוף האדם לקרינה עקב התפרקות האיזוטופים הרדיואקטיביים הטבעיים הבונים את גופו. התורם העיקרי לקרינה זו הוא  $^{40}\text{K}$  איזוטופ רדיואקטיבי טבעי של האשלגן. גם הטריטיום (מימן רדיואקטיבי) והפחמן - 14 מצויים בגופו של כל אדם.  $^{226}\text{Ra}$  וחומרי הפירוק שלו חודרים גם הם בכמויות זעירות לגוף עם המזון ומי השתייה. מנת הקרינה הפנימית המתקבלת מאשלגן-40. ושאר הרדיואיזוטופים בגוף האדם מגיע לכ-0.2 מיליסיוורט לשנה (20 מילירם לשנה).

נוסף לכך חשופים בני אדם למנת קרינה נוספת כתוצאה מנשימת הגז ראדון ובנותיו. לפי דוח וועדת האו"ם משנת 2000 (UNSCEAR 2000) מנת הקרינה האפקטיבית מקרינה הטבעית לה חשופה אוכלוסיית כדור הארץ מגיעה לכ- 2.4 מיליסיוורט לשנה בממוצע, ראה להלן טבלה ודיאגרמה מהדו"ח הנ"ל.

**Average annual doses to the world population from all sources of Radiation (UNSCEAR 2000)**

| Source                      | Dose (mSv) |
|-----------------------------|------------|
| <i>Natural</i>              |            |
| Cosmic                      | 0.4        |
| Gamma rays                  | 0.5        |
| Internal                    | 0.3        |
| Radon                       | 1.2        |
|                             |            |
| <i>Artificial</i>           |            |
| Medical                     | 0.4        |
| Atmospheric nuclear testing | 0.005      |
| Chernobyl                   | 0.002      |
| Nuclear power               | 0.0002     |
|                             |            |
| <b>Total</b>                | <b>2.8</b> |

**Figure 1: The different contributions to the average annual dose****אסמכתאות לנספח 7**

**UNSCEAR 2000**, Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations, New York

### נספח 8 - ריכוזי חומרים רדיואקטיביים בחומרי גלם ומוצרי בניה בישראל

לפי בדיקות שבוצעו במשרד להגנת הסביבה בשיטת ספקטרומטריית גמא בין השנים 1999-2006.  
הדוגמאות התקבלו מ: מכון התקנים, מנהלת אפר הפחם, טכניון, יצרני בלוקים וכו'.

| Nr | ID | Material      | Form  | Description                              | Ra226<br>Bq/kg | Th232<br>Bq/kg | K40<br>Bq/kg |
|----|----|---------------|-------|--|----------------|----------------|--------------|
| 1  |    | Ceramics      | Tile  | Ceramics from Italy                      | 243            | 76             | 1131         |
| 2  |    | Pumice        | Block | Block Pumice with cement<br>Portland 250 | 60             | 66             | 801          |
| 3  |    | Pumice        | Block | Block Pumice with cement<br>Portland 300 | 43             | 48             | 870          |
| 4  |    | Ceramics      | Tile  | Ceramics from Israel                     | 46             | 48             | 776          |
| 5  |    | Concrete      | Block | Block from coal ash                      | 147            | 9              | 107          |
| 6  |    | Concrete      | Block | Block from alum ash                      | 105            | 14             | 102          |
| 7  |    | Concrete      | Bulk  | Concrete w coal ash                      | 25             | 12             | 64           |
| 8  |    | Concrete      | Block | Block concrete - ordinary                | 25             | 8              | 74           |
| 9  |    | Concrete      | Bulk  | Concrete - ordinary                      | 18             | 5              | 51           |
| 10 |    | Concrete      | Block | Block with holes                         | 10             | 6              | 97           |
| 11 |    | Phosphogypsum | Raw   | Phosphogypsum                            | 747            | 21             | 5            |
| 12 |    | Pumice        | Raw   | Pumice from Italy                        | 146            | 241            | 104          |
| 13 |    | Coal ash      | Raw   | Coal Ash                                 | 202            | 90             | 29           |
| 14 |    | Alum ash      | Raw   | Alum ash                                 | 247            | 25             | 14           |
| 15 |    | Clay          | Raw   | Aggregate                                | 66             | 83             | 88           |
| 16 |    | Pumice        | Raw   | Aggregate                                | 53             | 94             | 89           |
| 17 |    | Fly ash       | Raw   | Aggregate                                | 61             | 79             | 78           |
| 18 |    | Cement        | Raw   | Cement Portland 250                      | 66             | 56             | 11           |
| 19 |    | Tuf           | Raw   | Aggregate                                | 33             | 59             | 41           |
| 20 |    | Sand          | Raw   | Sand Quartz Ashdod                       | 84             | 8              | 4            |
| 21 |    | Cement        | Raw   | Portland 300                             | 48             | 28             | 11           |
| 22 |    | Bazalt        | Raw   | Aggregate                                | 12             | 20             | 24           |
| 23 |    | Dolomite      | Raw   | Aggregate                                | 28             | 4              | 3            |
| 24 |    | Chalk         | Raw   | Chalk Stone Shfaram                      | 18             | 11             | 6            |
| 25 |    | Tzur          | Raw   | Tzur Stone from Nahal Beer<br>Sheva      | 15             | 4              | 4            |
| 26 |    | Gypsum        | Raw   |  | 11             | 8              | 4            |
| 27 |    | Sand Quarry   | Raw   | Sand from Quarry                         | 12             | 6              | 4            |
| 28 |    | Concrete      | Bulk  | with/without fly ash                     | 30             | 16             | 75           |
| 29 |    | Concrete      | Bulk  | with/without fly ash                     | 24             | 14             | 51           |
| 30 |    | Concrete      | Bulk  | with/without fly ash                     | 26             | 13             | 58           |
| 31 |    | Concrete      | Bulk  | with/without fly ash                     | 26             | 11             | 53           |
| 32 |    | Concrete      | Bulk  | with/without fly ash                     | 17             | 5              | 48           |
| 33 |    | Concrete      | Bulk  | with/without fly ash                     | 17             | 4              | 48           |
| 34 |    | Concrete      | Bulk  | with/without fly ash                     | 24             | 15             | 52           |
| 35 |    | Concrete      | Bulk  | with/without fly ash                     | 27             | 16             | 60           |
| 36 |    | Concrete      | Bulk  | with/without fly ash                     | 29             | 17             | 63           |
| 37 |    | Concrete      | Bulk  | with/without fly ash                     | 25             | 13             | 58           |
| 38 |    | Concrete      | Bulk  | with/without fly ash                     | 25             | 9              | 103          |
| 39 |    | Concrete      | Bulk  | with/without fly ash                     | 16             | 6              | 31           |
| 40 |    | Concrete      | Bulk  | with/without fly ash                     | 18             | 7              | 51           |
| 41 |    | Concrete      | Bulk  | with/without fly ash                     | 19             | 3              | 50           |
| 42 |    | Concrete      | Bulk  | with/without fly ash                     | 20             | 7              | 51           |
| 43 |    | Concrete      | Bulk  | with/without fly ash                     | 22             | 15             | 41           |
| 44 |    | Concrete      | Bulk  | with/without fly ash                     | 17             | 6              | 53           |
| 45 |    | Cement        | Raw   |  | 20             | 7              | 94           |
|    |    |               |       |  |                |                |              |
|    |    |               |       |  |                |                |              |

| נספח 8- החשך |    |                |       |                             |       |       |       |
|--------------|----|----------------|-------|-----------------------------|-------|-------|-------|
| Nr           | ID | Material       | Form  | Description                 | Ra226 | Th232 | K40   |
|              |    |                |       |                             | Bq/kg | Bq/kg | Bq/kg |
| 46           |    | Cement         | Raw   |                             | 23    | 8     | 103   |
| 47           |    | Cement         | Raw   |                             | 58    | 11    | 233   |
| 48           |    | Cement         | Raw   |                             | 6     | 4     | 94    |
|              |    |                |       |                             |       |       |       |
| 49           |    | Bottom Ash     | Raw   | Aggregate                   | 119   | 92    | 125   |
| 50           |    | Bottom Ash     | Raw   | Aggregate                   | 136   | 92    | 118   |
| 51           |    | Bottom Ash     | Raw   | Aggregate                   | 119   | 90    | 208   |
| 52           |    |                |       |                             |       |       |       |
| 53           |    | Cement         | Raw   | Portland 300                | 34    | 14    | 109   |
| 54           |    | Cement         | Raw   | Portland 300                | 35    | 10    | 93    |
| 55           |    | Cement         | Raw   | Portland 250                | 63    | 12    | 126   |
| 56           |    | Cement         | Raw   | Portland 250                | 69    | 11    | 131   |
| 57           |    | Cement         | Raw   | Portland 300                | 21    | 6     | 130   |
| 58           |    | Cement         | Raw   | Portland 250                | 29    | 9     | 105   |
| 59           |    | Cement         | Raw   | Portland 250                | 32    | 8     | 116   |
| 60           |    | Cement         | Raw   | Portland 250                | 35    | 14    | 137   |
| 61           |    | Cement         | Raw   | Portland 300                | 37    | 9     | 87    |
| 62           |    | Cement         | Raw   | Portland 250                | 53    | 16    | 113   |
|              |    |                |       |                             |       |       |       |
| 63           |    | Cement         | Raw   | Portland 300                | 23    | 10    | 143   |
| 64           |    | Cement         | Raw   | Portland 250                | 44    | 13    | 123   |
| 65           |    | Phosphogypsum  | Raw   | Deshanim                    | 420   | 1     | 17    |
|              |    |                |       |                             |       |       |       |
| 66           |    | Sumsum         | Raw   | Aggregate                   | 25    | 5.4   | 75    |
| 67           |    | Polya          | Raw   | Aggregate                   | 14    | <1    | 7.7   |
| 68           |    | Adas           | Raw   | Aggregate                   | 8.6   | <1    | 3.1   |
| 69           |    | Limestone sand | Raw   | Aggregate                   | 2.9   | <1    | <1    |
| 70           |    | Sea sand       | Raw   | Aggregate                   | 3.4   | <1    | 112   |
| 71           |    | Quarry Sand    | Raw   | Aggregate, quarry           | 12    | 5.4   | 187   |
| 72           |    | Quarry Sand    | Raw   | Aggregate, quarry           | 13    | 3.7   | 75    |
| 73           |    | Sand Arad      | Raw   | Aggregate, Readymix         | 21    | 4.5   | 63    |
| 74           |    | Sand Filing    | Raw   | Aggregate, quarry           | 23    | 6.1   | 89    |
| 75           |    | Stone          | Raw   | Aggregate, from sand quarry | 28    | <1    | <1    |
|              |    |                |       |                             |       |       |       |
| 76           |    | Cement         | Raw   |                             | 45    | 27    | 185   |
| 77           |    | Adas           | Raw   | Aggregate                   | 33    | 26    | 103   |
| 78           |    | Sand quarry    | Raw   | Aggregate                   | 21    | <1    | 881   |
| 79           |    | Bottom Ash     | Raw   | Aggregate                   | 120   | 114   | 408   |
| 80           |    | Sumsum         | Raw   | Aggregate                   | 22    | 18    | 148   |
| 81           |    | Sand sea       | Raw   | Aggregate                   | 21    | 11    | 168   |
| 82           |    | Polya          | Raw   | Aggregate                   | 9     | <1    | 163   |
| 83           |    | Bottom Ash     | Raw   | Aggregate                   | 97    | 49    | 188   |
|              |    |                |       |                             |       |       |       |
| 84           |    | Tuf            | Raw   | Aggregate                   | 38    | 29    | 419   |
|              |    |                |       |                             |       |       |       |
| 85           |    | Pumice         | Block | Aggregate                   | 36    | 33    | 712   |
| 86           |    | Pumice         | Block | Aggregate                   | 42    | 49    | 806   |
| 87           |    | Pumice         | Block | Aggregate                   | 38    | 33    | 741   |
|              |    |                |       |                             |       |       |       |
| 88           |    | Pumice         | Raw   | Aggregate                   | 120   | 117   | 861   |
| 89           |    | Pumice         | Raw   | Aggregate                   | 118   | 118   | 848   |
| 90           |    | Pumice         | Raw   | Aggregate                   | 129   | 131   | 993   |
| 91           |    | Pumice         | Raw   | Aggregate                   | 146   | 145   | 1095  |

| נספח 8- המשך |    |               |       |                                |                |                |              |
|--------------|----|---------------|-------|--------------------------------|----------------|----------------|--------------|
| Nr           | ID | Material      | Form  | Description                    | Ra226<br>Bq/kg | Th232<br>Bq/kg | K40<br>Bq/kg |
| 92           |    | Pumice        | Raw   | Aggregate                      | 123            | 124            | 906          |
| 93           |    | Pumice        | Block |                                | 171            | 186            | 1252         |
| 94           |    | Sea           | Raw   | Aggregate                      | 4              | 4              | 85           |
| 95           |    | Modrag        | Raw   | Aggregate                      | 21             | 3              | 8            |
| 96           |    | Adas          | Raw   | Aggregate                      | 20             | 3              | 7            |
| 97           |    | Polya         | Raw   | Aggregate                      | 29             | 1              | 44           |
| 98           |    | Cement        | Raw   | Portland 250                   | 66             | 37             | 108          |
| 99           |    | Fly Ash       | Raw   | Aggregate                      | 230            | 169            | 175          |
| 100          |    | Phosphogypsum | Raw   | Deshanim                       | 20             | 1              | 6            |
| 101          |    | Phosphogypsum | Raw   | Deshanim                       | 812            | 1              | 7            |
| 102          |    | Phosphogypsum | Raw   | Deshanim                       | 3768           | 259            | <27          |
| 103          |    | Phosphogypsum | Raw   | Deshanim                       | 577            | 3              | 14           |
| 104          |    | Phosphogypsum | Raw   | Deshanim                       | 829            | 5              | 452          |
| 105          |    | Phosphogypsum | Raw   | Deshanim                       | 504            | 1              | 41           |
| 106          |    | Phosphogypsum | Raw   | Deshanim                       | 961            | 2              | 475          |
| 107          |    | Concrete      | Bulk  | Cement/Fly ash 160/200         | 40             | 20             | 46           |
| 108          |    | Concrete      | Bulk  | Cement/Fly ash 190/100         | 29             | 9              | 38           |
| 109          |    | Concrete      | Bulk  | Cement/Fly ash 130/300         | 42             | 24             | 44           |
| 110          |    | Concrete      | Bulk  | Cement/Fly ash 220/ 0          | 22             | 3              | 36           |
| 111          | 35 | Cement        | Raw   | Portland 300                   | 71             | 16             | 113          |
| 112          |    | Fly ash       | Raw   | Aggregate                      | 192            | 202            | 202          |
| 113          |    | Sand          | Raw   | Aggregate                      | 15             | 2              | 23           |
| 114          |    | Pumice        | Raw   |                                | 65             | 68             | 841          |
| 115          |    | Bottom Ash    | Raw   | Aggregate                      | 160            | 163            | 153          |
| 116          |    | Bottom Ash    | Raw   | Aggregate                      | 147            | 158            | 135          |
| 117          |    | Concrete      | Block | 15% Bottom Ash                 | 45             | 6.2            | 75           |
| 118          |    | Phosphogypsum | Raw   | Mifal Rotem                    | 656            | 8              | 86           |
| 119          |    | Phosphogypsum | Raw   | Mifal Rotem                    | 821            | 5              | 17           |
| 120          |    | Phosphogypsum | Raw   | Mifal Rotem                    | 953            | 3              | 10           |
| 121          |    | Phosphogypsum | Raw   | Mifal Rotem                    | 1081           | 1              | 15           |
| 122          |    | Phosphogypsum | Raw   | Mifal Rotem                    | 980            | 3              | 23           |
| 123          |    | Phosphogypsum | Raw   | Mifal Rotem                    | 1002           | 2              | 5            |
| 124          |    | Pumice        | Raw   | Pumice                         | 50             | 37             | 1159         |
| 125          |    | Pumice        | Raw   | Pumice                         | 53             | 44             | 887          |
| 126          |    | Pumice        | Raw   | Pumice Turkey                  | 46             | 42             | 742          |
| 127          |    | Pumice        | Raw   | Pumice Kaisary quarry Turkey   | 56             | 61             | 690          |
| 128          |    | Pumice        | Raw   | Pumice Kaisary quarry Turkey   | 71             | 79             | 890          |
| 129          |    | Pumice        | Raw   | Pumice Turkey                  | 70             | 77             | 931          |
| 130          |    | Cement        | Raw   | Cementas, Turkey               | 30             | 30             | 231          |
| 131          |    | Cement        | Raw   | Cementas, Turkey               | 30             | 30             | 234          |
| 132          |    | Cement        | Raw   | Cementas, Turkey               | 34             | 34             | 253          |
| 133          |    | Pumice        | Raw   | Pumice Navashier quarry Turkey | 65             | 68             | 841          |

| נספח 8 (המשך) |    |             |       |                              |                |                |              |
|---------------|----|-------------|-------|------------------------------|----------------|----------------|--------------|
| 134           |    | Cement      | Raw   | Cement with 20% bottom ash   | 81             | 81             | 300          |
| Nr            | ID | Material    | Form  | Description                  | Ra226<br>Bq/kg | Th232<br>Bq/kg | K40<br>Bq/kg |
| 135           |    | Cement      | Raw   | Cement with 25% bottom ash   | 81             | 81             | 295          |
| 136           |    | Cement      | Raw   | Cement with 30% bottom ash   | 84             | 84             | 311          |
| 137           |    | Pumice      | Raw   | Pumice, Sicily, Italy        | 177            | 195            | 1319         |
| 138           |    | Pumice      | Raw   | Pumice, Yali, Greece         | 51             | 53             | 1137         |
| 139           |    | Pumice      | Raw   | Pumice, ship Etna, Ashdod    | 52.7           | 42.8           | 1226         |
| 140           |    | Pumice      | Raw   | Pumice, ship Etna, Ashdod    | 52.5           | 57.6           | 1201         |
| 141           |    | Pumice      | Raw   | Pumice, ship Barneta, Ashdod | 161            | 181            | 1115         |
| 142           |    | Pumice      | Raw   | Pumice, ship Barneta, Ashdod | 158            | 165            | 1130         |
| 143           |    | Pumice      | Raw   | Pumice, ship Barneta, Ashdod | 170            | 172            | 1170         |
| 144           |    | Pumice      | Raw   | Pumice, ship Barneta, Ashdod | 161            | 166            | 1246         |
| 145           |    | Pumice      | Raw   |                              | 47             | 48             | 1025         |
| 146           |    | Pumice      | Block |                              | 40             | 39             | 704          |
| 147           |    | Pumice      | Raw   |                              | 52             | 54             | 1036         |
| 148           |    | Pumice      | Block |                              | 48             | 47             | 866          |
| 149           |    | Pumice      | Block |                              | 45             | 49             | 898          |
| 150           |    | Pumice      | Block |                              | 39             | 35             | 625          |
| 151           |    | Pumice      | Block |                              | 45             | 40             | 681          |
| 152           |    | Pumice      | Block |                              | 54             | 62             | 975          |
| 153           |    | Pumice      | Block |                              | 122            | 140            | 863          |
| 154           |    | Pumice      | Block |                              | 131            | 153            | 899          |
| 155           |    | Pumice      | Raw   |                              | 49             | 57             | 1129         |
| 156           |    | Pumice      | Raw   |                              | 53             | 61             | 1187         |
| 157           |    | Pumice      | Raw   |                              | 192            | 213            | 1333         |
| 158           |    | Pumice      | Raw   |                              | 179            | 194            | 1325         |
| 159           |    | Pumice      | Raw   |                              | 195            | 213            | 1340         |
| 160           |    | Pumice      | Raw   |                              | 193            | 227            | 1320         |
| 161           |    | Pumice      | Block |                              | 44             | 51             | 893          |
| 162           |    | Pumice      | Block |                              | 47             | 55             | 935          |
| 163           |    | Pumice      | Block |                              | 48             | 54             | 973          |
| 164           |    | Pumice      | Block |                              | 83             | 92             | 595          |
| 165           |    | Pumice      | Block |                              | 53             | 60             | 866          |
| 166           |    | Sand Modrag | Raw   | Modrag                       | 28             | 0              | 8            |
| 167           |    | Sand Sea    | Raw   | Sea                          | 4              | 4              | 92           |
| 168           |    | Polya       | Raw   | Polya                        | 26             | 1              | 8            |
| 169           |    | Adas        | Raw   | Adas                         | 28             | 1              | 8            |
| 170           |    | Concrete    | Block | Iven Sinae                   | 106            | 86             | 170          |
| 171           |    | Concrete    | Block | Mashbid                      | 28             | 2              | 21           |
| 172           |    | Concrete    | Block | Ahim Saida                   | 18             | 5              | 78           |
| 173           |    | Bottom Ash  | Raw   | Aggregate                    | 154            | 151            | 202          |
| 174           | 69 | Sand Shea   | Raw   | Aggregate                    | 12             | 2              | 28           |
| 175           | 70 | Bazalt      | Raw   | Aggregate                    | 8              | 11             | 242          |
| 176           | 72 | Pumice      | Raw   | Pumice                       | 53             | 65             | 1213         |
| 177           | 74 | Tuf         | Raw   | Aggregate                    | 33             | 42             | 486          |
| 178           | 75 | Sand quarry | Raw   | Aggregate                    | 24             | 0              | 8            |