

David Langer B.A.(Econ.), M.B.A דוד לנגר

- יעוץ כלכלי ופיננסי -

**תחשיב עלות תועלת אפר פחם בבטון לבניה
כנגד חשיפה לקרינה**

**מוצג במסגרת בחינת הצדקה (justification) סוציו-
אקונומית של השימוש באפר בבטון, על פי כללי בטיחות
קרינה**

**נערך ע"י :
דוד לנגר, יועץ כלכלי**

**בסיוע:
פרופ' טוביה שלזינגר
אינג' גדעון אירוס
עמרי לולב, מנהלת אפר הפחם**

אוגוסט 2008

רח' ש"י עגנון 13, רעננה 43380, Israel 43380 Shay Agnon 13 St. Ra'anana

Tel.: -972-9-7714442, Fax.: -972-9-7718823

david@tesuot.co.il

1. מבוא

לצורך ניתוח והצגת ההצדקה (Justification) לשימוש באפר פחם כרכיב בבטון, ביישומי בנייה למגורים, נבנה ומוצג מודל כלכלי לאופק תכנון ארוך של 110 שנה. מטרת המודל הינה לערוך בדיקת עלות-תועלת (Cost-Benefit Analysis) בין התועלת למשק כתוצאה משימוש באפר הפחם כמשאב, היינו – מרכיב (Ingredient) חשוב בהרכב הבטון ובין הנזק הפוטנציאלי, לכאורה, מהשפעת תוספת הקרינה הנתרמת ע"י האפר. מטעמי שמרנות, נלקחו בכל הנוגע להשפעת הקרינה ההנחות המחמירות ביותר. זאת, הן באשר לתקופת החשיפה (50 שנות קיים של מבנים), לעוצמת הקרינה (מקור פחם עתיר יסודות רדיואקטיביים) ולהיקף הבניה החדשה שתבוסס על בטון המכיל אפר פחם. המודל משלב הצגה ליניארית של השפעת הקרינה במבנים כספיים, עם נתונים סטטיסטיים הנוגעים לקצב הבנייה למגורים וקצב גידול האוכלוסין. מנגד, מוצגים נתוני הנזק למשק כפועל ישיר של אי השימוש באפר הפחם כמרכיב בבטון דהיינו עלות הטמנתו במטמנות מוסדרות בתוספת הערך הנחסך הנמנע עקב אי ניצולו כמרכיב בבטון. לחילופין מוצג גם ערך הנזק למשק בהנחה חזקה מאד (מבחינת סיכויי התממשותה בהעדר אתרי אחסון ביניים מוסדרים לאפר המצטבר בכמות של 1.1 מליון טון בשנה הנדרשים תפעולית לסלילה, ובזמינות נמוכה של אתרי סלילה העומדים בדרישות הגנה על מי תהום), שכל כמות אפר הפחם תנותב לסלילה במקום לבטון.

כל התוצאות מוצגות בערכים נוכחיים, כלומר – מהוונות למועד עריכת התחשיב.

2. הנחות יסוד לתחשיב

- בתרחיש העיקרי, הונח שיעור היוון (שער נכיון) ריאלי של 5% לשנה. שער הנכיון מורכב למעשה משער ריבית להשקעה חסרת סיכון+פרמיית סיכון. נהוג לראות בשיעור התשואה על אג"ח ממשלתיות בסיס לחישוב שיעור התשואה חסרת סיכון. נכון למועד הכנת מסמך זה נע שיעור הריבית הריאלית חסרת הסיכון בגבולות של 2.5-3.5%, כלומר התחשיב הבסיסי (לפני בדיקות רגישות) מייצג פרמיית סיכון שנעה בסד"ג של 1.5-2.5%. נהוג לראות בפרמיית הסיכון תוספת תשואה שדורש משקיע פוטנציאלי בגין הסיכון הכרוך בביצוע השקעה מסוימת, כאשר צפויים מספר תרחישים שכל אחד מהם יכול להשפיע על שיעור התשואה העתידי. לכל השקעה יכול המשקיע לייחס פרמיית סיכון שונה כאשר, בתמצית, הרווח הכלכלי הוא עודף התשואה על פני זמן, בהשוואה לתשואה אופציונאלית, חסרת סיכון. בתחשיב המוצג, פרמיית הסיכון אינה מייצגת סיכון למשקיע פוטנציאלי, כפי שמקובל להציג בתחשיבי כדאיות כלכלית קונבנציונאליים, אלא סיכון הנובע משינוי ריאלי שיכול לחול לאורך אופק המודל בתרחישים המוצגים וואו בפרמטרים מסוימים ששימוש בהנחות יסוד לביצוע התחשיב.
- הונח שעל פי כמות האפר הזמינה במצב הפתיחה, מיוצרות מדי שנה כ- 53,000¹ יחידות שהייה חדשות (למגורים, לתעסוקה, למסחר ולשירותים) מבטון המכיל אפר פחם.
- הונח שהאוכלוסייה שוהה כ-45% מהיממה ביחידות השהייה ובמחצית הנותרת ביחידות אחרות ובמרחבים פתוחים. הואיל ומודל החשיפה לקרינה בהערכות שלהלן (מרגליות וקובלר) מניח שהיית 80% מהזמן (7000 שעות בשנה) במבנים ו-20% במרחבים פתוחים. ב-35% מהזמן השהייה היא במבנים שאינם מכילים אפר פחם. לפיכך, משך זמן שהיית האוכלוסייה במבנים המכילים אפר פחם הינו 56% (=45/80).
- עפ"י נתוני הלמ"ס הונח שממוצע הדיירים בדירה הוא 3.36. הואיל וצפיפות האוכלוסייה במבני תעסוקה ומסחר גבוהה מזו שבמבני דיר, הוגדל מס' "הדיירים" ביחידות השהייה המייצגות בכ- 1/3 ל-4.5.
- לאור ההנחות דלעיל חושבה חשיפת דיירים חדשים מדי שנה למבנים בהם הבטון מכיל אפר פחם. החישוב בוצע בהתאם לכמויות אפר הפחם הזמינות לאורך אופק

¹ מ-1.1 מליון טון אפר פחם מייצרים כ-7.9 מליון מ"ק בטון (בהרכבי תערובות שונות בהתאם ליעוד). לבניית יחידת שהייה משתמשים בכ-150 מ"ק בטון.

התכנון של המודל (80 שנה – כאשר החל מהשנה ה-31 אין יותר אפר פחם זמין, פועל יוצא של הדממת תחנות הכח הפחמיות, ראה ההנחות בתוואי הפיתוח להלן)

- אורך חיים תפעולי-טכנו-כלכלי של תחנות כח פחמיות – 50 שנה.
- קיים (אורך חיים תפקודי) של מבני בטון – 50 שנה.

תקופת החישוב הכוללת, 80 שנה, נקבעה בהנחות הבאות:

- תקופת היבנות (בניית יחידות דיור חדשות מבטון המכיל אפר פחם) בת 50 שנה:

**30 שנה שבהן הכמות היא- 1.1 מליון טון אפר בשנה
הנוצר מתחנות הכח הפחמיות הנוכחיות, המיוצגות
ע"י מערך ייצור בעל גיל ממוצע של 20 שנה .**

- תקופה בת 20 שנים, החל מעוד 30 שנה, בה קיימת כמות סטטית של דירות אשר נוצרו בעת הקמתן מ- 1.1 מליון טון אפר בשנה ואשר יתחילו לסיים את קיימן, בהתאם לקצב הבינוי, בהגיען לגיל הקיים המתוכנן.
- תקופת גריעה – 30 שנה נוספות, בהן ילכו הבתים שנבנו עם אפר פחם ויגרטו מדי שנה, כאמור.

- עפ"י התקינה הנוכחית ת.י 118 הקובע סוגי בטון שונים לאזורים שונים, בהתאם לתנאי הסביבה, צפוי יישום אפר הפחם רק בכ-70% מהבניה החדשה². כמו כן הונח שהבטון המכיל אפר פחם מהווה כ- 70% ממסת הבניין.

- תרומת מנת הקרינה של האפר חושבה בהסתמך על דו"ח הדרן בהיבטים הרדיולוגיים של יישום אפר הפחם כתוסף לבטון. מסקנות הדו"ח מבוססות על ממצאי מדידות במבנים מועשרי אפר פחם. המדידות והדו"ח נערכו ע"י צוות של ממ"ג שורק בראשות דר' מנחם מרגליות. השוואת הסיכום הכולל של תרומת מנת הקרינה מקרינת גמא ומראדון מראה כי חיים (7,000 שעות בשנה) בחדר מבטון יצוק מועשר אפר פחם בכל ששת קירותיו (ממ"ד), תוסיף לשוכן החדר מנת קרינה שנתית של 0.025 mSv . התוספת היא בהשוואה לחשיפת שוכן חדר בטון רגיל. הבדיקה בוצעה בחדר מבטון מועשר ב- 150 ק"ג אפר פחם למ"ק.

לפיכך, בהתחשב במסת בטון של 70% מכלל מסת הבנייה במבנה שהייה רגיל מתקבלת תוספת מנת קרינה כדלקמן:

$$0.025 \times 0.7 = 0.0175 \text{ mSv}$$

דהיינו תוספת מנת קרינה של בשיעור של 0.0175 mSv .

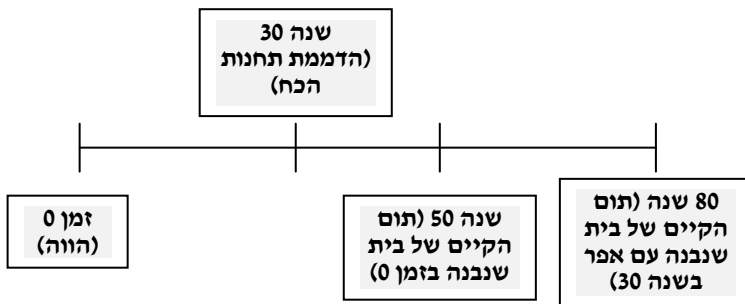
- בנוסף לכך, נערכה ומוצגת בהמשך, בדיקת רגישות המבוססת על ממצאי חו"ד של פרופ' קוסטה קובלר, בהתבסס על בדיקות שנערכו במעבדת הקרינה של החברה לשרותי איכות הסביבה על פי ת.י. 5098 בגרסתו הראשונה (2002). לצורך חישוב תוספת הקרינה, עקב יישום אפר הפחם כתוסף לבטון במקרה זה, חושבה תרומת אפר הפחם לקרינה ב- 4 תערובות בטון שבהם נמדדה רמת הקרינה פעם אחת ללא אפר פחם, ופעם שנייה כאשר התערובות כוללת מוסף אפר פחם בשיעור 150 ק"ג למ"ק. ממצאי הדו"ח, בכפוף לאופן החישוב דלעיל, מורים על תוספת קרינה ממוצעת בשיעור של כ- 0.0693 mSv .
- שווה הערך הכספי של הנזק הנגרם מחשיפה למנת קרינה קולקטיבית (לחילופין – ערך ההשקעה באמצעי הגנה למניעת חשיפה למנת קרינה) של Sv אדם, הונח,

² בהנחת 150 ק"ג אפר פחם למ"ק בטון – 120 ק"ג בהזנה ישירה, 30 ק"ג באמצעות צמנט – 1.1 מליון טון אפר פחם משמשים לייצור 7.3 מליון ש"ע מ"ק בטון, המהווים כ- 70% מהבטון לבנייה בשנת 2007 (למעשה 7.9 מליון מ"ק כולל בטון המכיל שיעור נמוך יותר של אפר).

בהתאם להחלטת הועדה המקצועית-תורתית לבטיחות קרינה בישראל, בסך \$100,000.

- השווי הכלכלי הישיר בחלופת ההטמנה, בהימנעות משימוש באפר בבטון: \$75 לטון אפר, המורכב מ-\$30 עלות הטמנה באתר מרכזי בדרום הארץ ו-\$45 ערך נמנע בבטון.
- שווי כלכלי ישיר בחלופת הסלילה, בהימנעות משימוש באפר בבטון: \$50 לטון אפר, המורכבים מ-\$45 ערך נמנע בבטון, בתוספת \$5 המשקפים חסרון יחסי במיקום מקורות האפר (חדרה ואשקלון) בהשוואה לפריסה הארצית של חומרי חציבה טבעיים לסלילה ו-\$5 העמסת עלויות צבירה ואחסון, בניכוי \$5 המשקפים חסכון ישיר למשק בהימנעות מחציבה לסלילה.
- לא נלקחו בחשבון אומדנים כספיים לתועלות סביבתיות נלוות הכרוכות בניצול אפר פחם בייצור בטון ונזקים פוטנציאליים הכרוכים בהטמנת האפר באתרים ייעודיים, לרבות עצם השימוש במטמנות להטמנת אפר במקום פסולת אחרת שבניגוד לאפר הפחם, אינה ניתנת למיחזור.

מחזור ייצור האפר והשימוש



להלן הנחות היסוד כפי שהן מוצגות במודל הכלכלי לחישוב העלות-תועלת:

תחשיב עלות תועלת יישום אפר פחם לענף הבניה		
07.08.08 עדכון אחרון		
הערות	הנחות יסוד	
	1.8%	שיעור גידול האוכלוסיה
	4.5	צפיפות אוכלוסיה ביחידת שהייה
	כמות (Tons)	טווח שנים
	1,100,000	1-30
	כמות אפר פחם שנתית (Tons):	
שימושים: מגורים, תעשייה, מסחר ושירותים	53,000	יחידות שהייה חדשות בשנה
יתרת שנים לקיים: 30	56%	שיעור החשיפה ביח' שהייה
	50	אורך חיי תחנת כח פחמית (בשנים)
	50	אורך חיי מבנה (בשנים)
	נחשפים	טווח שנים
	133,560	1-30
גריעה לפי קצב החשיפה		31-80
	50%	שיעור חשיפה בשנה שוטפת
לבנייה חדשה	5.0%	מחיר הון להיוון
	\$100,000	עלות סיוורט אדם
	שווי כלכלי ל-1 טון אפר פחם:	
עלות הטמנה \$35 ערך נחסך בבטון \$40	\$75	חלופת הטמנה
	\$50	חלופת סלילה
mSv 0.0175	סיוורט=	0.0000175
		מנת קרינה שנתית ממוצעת לאדם הנובעת מיישום אפר הפחם בבניה*

תאור מודל החישוב

עלות מניעת תחלואה הנגרמת מחשיפה לקרינה – C

$$C = A \left[\sum_{n=1}^N \frac{n}{(1+r)^n} + \frac{1}{(1+r)^{N+1}} \left(\sum_{n=1}^M \frac{N}{(1+r)^n} + \frac{1}{(1+r)^{M+1}} \sum_{n=1}^{N-1} \frac{N-n}{(1+r)^n} \right) \right]$$

$$A = c(a \times 10^{-3})p$$

c = עלות הנגרמת למשק מחשיפה של 1 סיוורט-אדם בשנה

a = mSv/py תוספת החשיפה לקרינה הנגרמת מהוספת אפר פחם לבטון במונחי מיליסיוורט לאדם לשנה

p = אוכלוסייה חדשה הנכנסת מדי שנה למבנים חדשים הבנויים מבטון המכיל אפר פחם

N = אופק שנות תכנון ייצור חשמל מפחם

M = יתרת שנות קיים בתים מבטון המכיל אפר פחם לאחר הפסקת ייצור חשמל מפחם

i = 1 חלופת הטמנה כנגד ניצול אפר בבטון

i = 2 חלופת ניצול אפר בסלילה כנגד ניצולו בבטון

תקופה אי' (N שנים ראשונות עד להפסקת ייצור חשמל בפחם) : אוכלוסיה נחשפת $\sum_{n=1}^N \frac{n}{(1+r)^n}$
גדלה בקצב קבוע.

תקופה ב' (מהשנה N+1 ועד השנה N+M לקיים בניינים ראשונים עם אפר פחם) :
אוכלוסיה נחשפת קבועה. $\sum_{n=1}^M \frac{N}{(1+r)^n}$

תקופה ג' (מהשנה N+M+1 ועד השנה 2N+M לקיים בניינים אחרונים עם אפר פחם) : אוכלוסיה נחשפת פוחתת בקצב קבוע. $\sum_{n=1}^{N-1} \frac{N-n}{(1+r)^n}$

תועלת נמנעת מאי שימוש באפר בבנייה

$$D_i = QV_i \sum_{n=1}^N \frac{1}{(1+r)^n}$$

Q = 10⁶ כמות אפר פחם שנתית כמוסף לבטון

V₁ = \$75 בחלופת הטמנה

V₂ = \$50 בחלופת סלילה

להערכת מידת הצדקת השימוש באפר פחם בבטון חושבו שני מדדי סף :

עלות סיוורט-אדם בשנה המשתווה לתועלת אפר כתוסף לבטון

$$\frac{D_i c}{A}$$

תועלת טון אפר כתוסף לבטון המשתווה לעלות תוספת החשיפה לקרינה

$$\frac{C}{QB}$$

באשר

$$B = \sum_{n=1}^{2N+M} \frac{1}{(1+r)^n}$$

הוא מקדם היוון לתקופת הבחינה.

מנגד חושב מדד ההצדקה להגבלת החשיפה לקרינה באמצעות

תוספת מנת קרינה מרבית מאפר הגורמת לנזק בשיעור היעד לסיורט x אדם

$$\frac{D_i}{A} a$$

3. סיכום ומסקנות

ממצאי התחשיב:

תרומת אפר לתוספת חשיפה לקרינה (mSv/y)	ערך נוכחי של עלות מנות קרינה (אלפי \$)	ערך נוכחי של תועלת מאפר בבנייה כנגד סלילה (אלפי \$)	ערך נוכחי של תועלת מאפר בבנייה כנגד הטמנה (אלפי \$)
0.0175	66,449	845,485	1,268,227
*0.0693	263,138		

* עפ"י דו"ח פרופ' קוסטה קובלר

תועלת טון אפר בבנייה המשתווה לעלות תוספת החשיפה לקרינה (\$) (\$)	עלות סיוורט-אדם בשנה המשתווה לתועלת השימוש באפר בבנייה (אלפי \$)		תרומת אפר לתוספת חשיפה לקרינה (mSv/y)
	כנגד סלילה	כנגד הטמנה	
4	1,272	1,909	0.0175
15	321	481	0.0693

תוספת מנת קרינה גבולית מוצדקת מאפר בבטון (mSv/y לאדם) במעוגל	
כנגד סלילה	כנגד הטמנה
0.2227	0.3340

מהטבלאות דלעיל עולות המסקנות הבאות:

- אמזן הנזק למשק:** הערך הנוכחי המצטבר של עלות תוספת הקרינה למשק במשך 80 שנה הוא כ-60.4 מיליוני \$, בתרחיש הבסיסי. כאמור, הונח כי במשך 30 השנים הראשונות ייושמו 1.1 מליון טונות של אפר פחם כמרכיב בבטון בדירות חדשות. בבדיקה נוספת שנערכה ואשר תמצית תוצאותיה מוצגת לעיל, מגיע היקף העניין של הנזק המצטבר עד לכדי 263 מיליוני \$, זאת, כאשר הונח כי יישום האפר גורם לתוספת מנת חשיפה בהיקף של 0.0693 mSv/y.
- תועלת גבוהה למשק עקב שימוש באפר הפחם כמשאב זמין:** הערך הנוכחי של יישום תוספת אפר הפחם לבטון, לאורך תקופה המוצגת, כנגד הטמנתו הוא כ-1.27 מיליארד \$ וכנגד ניצולו בסלילה כ-0.85 מיליארד \$, כלומר – יצירת ערך עודף למשק (בהשוואה לשיעור הנזק עקב חשיפה לקרינה) בחלופת ההטמנה של כ-1.2 מיליארד \$ (כ-1.0 מיליארד \$ בהנחת תרומת אפר לתוספת מנת חשיפה של 0.0693 mSv/y) ובחלופת הסלילה: כ-0.78 מיליארד \$ (כ-0.58 מיליארד \$ בהנחת תוספת הקרינה כאמור לעיל).
- אי כדאיות רק בעלות גבוהה מאד של סיוורט-אדם:** רק בעלות סיוורט אדם גבוהה מאד של כ-1.9 מיליון \$ (0.48 מיליון \$ בהנחת תוספת מנת חשיפה של 0.0693 mSv/y) הייתה מתבטלת הצדקת השימוש באפר פחם בבנייה כנגד הטמנתו ובעלות של כ-1.27 מיליון \$ (0.32 מיליוני \$ בהנחת התוספת כנ"ל) כנגד ניצולו בסלילה. כל העלויות הללו גבוהות בשיעור ניכר, עד כדי פי 19 מהאומדן הנורמטיבי לעלות סיוורט אדם.

- **איזון בין התועלת למשק ובין הנזק – רק במנות קרינה שוליות גבוהות מאד:** תוספת מנת חשיפה בניצול האפר בבטון מוצדקת בשיעור 0.334 mSv/y לאדם כנגד הטמנה ובשיעור 0.227 כנגד סלילה. תוספות מנות קרינה אלו גבוהות פי (!) 19 ופי 13 (מעוגל), בהתאמה, מתוצאות אמפיריות של תוספת הקרינה הנובעת מיישום אפר הפחם בבנייה עפ"י דו"ח נחל שורק, שהוא כאמור משמש כממצא בסיס בעבודה זו.

לסיכום :

בכפוף להנחות שהוצגו לעיל, המסקנה הינה שהערך המוסף הישיר למשק עקב יישום אפר הפחם כמרכיב בבטון לבניה למגורים עולה משמעותית (בגבולות של פי 19 ולא פחות מאשר פי 4.8 בהנחת תוספת מרבית לקרינה) על אמדן הנזק הפוטנציאלי הצפוי כתוצאה מהגברת החשיפה לקרינה. יצוין, שוב, כי לא נאמדו כספית התועלות הנלוות הסביבתיות והאחרות הנובעות מניצול האפר בבנייה אל מול העלויות העקיפות והסיכונים לסביבה הנובעים מהטמנתו כפסולת.