

# דוד לנגר יעוץ כלכלי ופיננסי

## בשיתוף עם: אינג' גדעון אירוס

### בהתייעצות עם פרופ' ארנון בנטור, הטכניון

15 בפברואר 2018

## פירוט אופן החישוב של עלות\תועלת שימושי אפר הפחם למשק

### תמצית מנהלים

- ❖ מטרת מסמך זה הינה להציג את תחשיבי התועלת למשק של אפר הפחם בשימושו העיקריים ומנגד – את העלויות הסביבתיות הנגרמות בשל שימושים אלו.
- ❖ לא מוצג אומדן התועלת למשק בשל מניעת פגיעה בלתי הפיכה בערכי טבע ונוף בכריה של חול ומחצבים אחרים המוחלפים ע"י אפר הפחם.
- ❖ **קרינה:** בעבודה זו לא נעשתה הערכה כלכלית של מנות הקרינה הפוטנציאליות הנוספות הנגרמות מניצול אפר הפחם בתעשיות הצמנט והבטון. זאת משום שעל פי עמדת הגופים המקצועיים הבינלאומיים אין לייחס ערך כלכלי לחשיפת אוכלוסיות גדולות למנות קרינה אישיות נמוכות מאד ביחס לקרינת הרקע הטבעית, כדוגמת מנות הקרינה הנתרמות ע"י אפר הפחם בשימושו, לצורך קבלת החלטות רגולטוריות. **יודגש כי עפ"י דעת מומחים אין במנות הקרינה הנתרמות ע"י אפר הפחם בשימושו כדי לגרום לנזקים בריאותיים הנורמטיבית**, שיעורן אף מוגדר ככזה **ששולל התערבות רגולטורית** עפ"י התקן הבינלאומי להגנה מקרינה<sup>1</sup>.
- ❖ לצורך החישוב תומחרו שימושי אפר הפחם המרחף והתחתית למיניהם, בראשם השימושים בתעשיית הצמנט ובתעשיית הבטון. חישוב ערך השימוש באפר מרחף בתעשיית הבטון כולל הערכת התועלת מהארכת משך חיי השירות של מבנים (ראה: **"הגדלת משך השירות" בטבלה שלהלן**) שהיא פועל יוצא של השימוש באפר הפחם בתערובות הבטון, כמפורט בגוף המסמך. הנחיות התכנון הנוכחיות למבנים, מכוונות לתקופת שירות מבני של 50 שנה<sup>2</sup>. ממחקרים טכנולוגיים שנערכו עולה כי הוספת אפר פחם לתערובות הבטון מאריכה את משך חיי השירות של המבנים בעשרות אחוזים. הוספת אפר הפחם הינה חלק מסידרת תנאים ובהם גם הפחתת כמות הצמנט ויחס מים צמנט נמוך. מן הראוי לציין כי כאשר מדובר במבני תשתית, השימוש באפר פחם מכפיל ואף משלש את משך חיי השירות.

<sup>1</sup> התקן הבינ"ל מאפשר התערבות הרגולטור בשימושים מסוג זה בתנאי שהוכיח כי עלות החשיפה למנת הקרינה הקולקטיבית עולה משמעותית על התועלת הכלכלית והסביבתית למשק.

<sup>2</sup> לכאורה קיימת אפשרות שלא לבצע שיקום מבני בל"ז המתחייב מהנחיות התכנון, משיקולים כאלו ואחרים, אולם אז פוטנציאל הנזק מחשיפת הבטון להשפעות קורוזיביות (שרובו סמוי מהעין) מצטברת ואף מחמירה והתוצאות האפשריות הן – תיקון בעלות גבוהה יותר ואף סבירות גבוהה להריסה.

- ❖ תומחרו גם חלק מן ההשפעות הסביבתיות הכרוכות בניצול אפר הפחם בתעשיית הבנייה: התועלת למשק עקב מניעת פליטת CO2 הכרוכה בייצור צמנט וכן, כאמור לעיל, העלות למשק של תוספת מנת הקרינה.
- ❖ חושב פער עלויות ההובלה שנוצר עקב מרחקי ההובלה הקצרים יותר, של אפר פחם המסופק למפעלי הבטון מתחנות הכח, בהשוואה למרחק הובלת החול ממישור רותם.
- ❖ לשימוש באפר הפחם השפעה חיובית מהותית בתחומים נוספים ובהם: שימור משאבי טבע המצויים במחסור, מניעת פגיעה בערכי טבע ומניעת מפגעים סביבתיים הנגרמים לאוכלוסייה בסביבת המחצבות ובהם- רעש, אבק ומזהמים אחרים<sup>3</sup>.

### להלן הטבלה המסכמת:

		ש"ח לטון				
סה"כ	תועלת			שימוש	אפר	
	הפרשי הובלה	סביבה (מניעת פליטת CO2)*	ערך מוסף			ישירה
374 ₪		89		285	צמנט	מרחף
3,002 ₪	9	17	2,682	295	בטון	
523 ₪			115	408	(טיוב קרקע) שפכים	
156 ₪				156	צמנט	תחתית
117 ₪				117	מוצרי בנייה	
270 ₪				270	גיבון וחקלאות	
68 ₪				68	סלילה ותשתיות	
						* בבטון - עקב החיסכון בצמנט

### 1. כללי

אפר הפחם משמש כיום בעיקר כח"ג חיוני בייצור השוטף של צמנט ובטון במדינת ישראל. המצב הנוכחי הינו פועל יוצא של שנות עבודה רבות, בהן הוחדר אפר הפחם לתעשיות אלו. זאת, לאחר יצירת ביסוס תשתית טכנולוגית, שאיפשרה למצות באופן היעיל ביותר את התרומה הטכנו-כלכלית של אפר הפחם בשתי תעשיות אלו.

בתעשיית הצמנט, משמש אפר הפחם כרכיב חיוני להבטחת האיכות הנדרשת של הקלינקר (כולל שיפור איכות מרכיב האלומינה) ולייצור הצמנט עצמו (כתוסף). בתעשיית הבטון, משמש אפר הפחם **כתוסף תקני חיוני** בתערובות הבטון. אפר הפחם גם מהווה רכיב מהותי בתערובות הבטון, המאפשר שיפור הקיים.

כבר היום קיים עודף ביקוש, הגדל עם הצמיחה בענף הבנייה, על פני היצע ההולך וקטן עקב מדיניות העדפת ייצור חשמל מגז טבעי. נכון להיום ועד 2022 היצע האפר נמוך וצפי להיות נמוך בכ- 30% מההיקף של שנת 2015. בעתיד עם הגברת השימוש בגז והשבתת 4 היחידות הפחמיות המתוכננת באתר רבין במחצית הראשונה של שנות העשרים, צפוי המחסור לגדול משמעותית. יש להניח כי עודף הביקוש יתועל לחיפוש מקורות אפר פחם מחוץ לגבולות המדינה כפי שמתבטא כבר כיום, בבקשת נשר לייבא אפר פחם ממקור ים תיכוני וליזמות יבוא נוספות. ככל שיתפתח יבוא אפר פחם התועלת השנתית למשק תגדל בהתאם.

חושבה גם התועלת השנתית למשק הצפויה מהפחתת פליטת CO2 הכרוכה בייצור צמנט המוחלף ע"י אפר הפחם כתוסף לבטון וכן מוצגת העלות למשק בשל תוספת מנת הקרינה הנובעת משילוב אפר פחם ביח' שהייה של אזרחים, בהתאם לתחשיבי מנהלת אפר הפחם המוצגים כנספח למסמך זה.

<sup>3</sup> נמסר לנו שעבודה כלכלית המעריכה חלק מהשפעות אלו מצוייה בדו"ח שהוגש למשרד להגה"ס, ממצאי דו"ח זה לא עמדו לרשותנו.

שימוש באפר פחם ביצור בטון (כמחליף צמנט ומחליף חול) עשוי להאריך את תקופת הקיים (משך השירות הטכנולוגי התקין) של המבנים שייבנו תוך שימוש בבטון הכולל אפר פחם כתוסף בכ- 37% בממוצע, בהשוואה לאורך החיים הטכנולוגי המתוכנן, העומד כיום על 50 שנה.

שיפור עמידות אלמנטים מבניים החשופים לתהליכי קורוזיה הוא ללא ספק יתרון רב ערך למשק, אף שלכאורה הוא בלתי נראה שכן מדובר בהשפעה לטווח ארוך שאינה מהווה חלק ממטרות חברות הבניה ולא מדרישות הקונים. קיימת אפשרות שלא לבצע שיקום מבני בלו"ז המתחייב מהנחיות התכנון, משיקולים כאלו ואחרים, אולם אז פוטנציאל הנזק מחשיפת הבטון להשפעות קורוזיביות (שרובו סמוי מהעין) מצטברת ואף מחמירה והתוצאות האפשריות הן – תיקון בעלות גבוהה יותר ואף סבירות גבוהה להריסה.

התחשיב, בסעיף זה, אינו כולל זקיפת ערך בשל דחיית נזקים עקיפים הכרוכים בעבודות שימור המבנים בסוף תקופת הקיים הטכנולוגי, כגון: בלאי כבישים וציוד, פליטת CO2 ומזהמים אחרים (בהובלה ובייצור הצמנט הנוסף שהיה נדרש לבינוי החדש), פגיעה בסביבה בכריית חומרי הגלם הנדרשים לשימור ועוד.

### **שימושים נוספים והשפעות ואחרות שתומחרו ומוצגים במסמך זה הם:**

- **במס"א** - בוצת שפכים מיוצבת בעזרת סיד ואפר פחם מרחף, משמשת לטיוב קרקע – מוצגת גם התועלת למשק עקב השיפור ביבולים, החיסכון בחומרי דישון והדברה והתועלת לסביבה.
- **גיבון וחקלאות** – חושבה תועלת אפר הפחם כמחליף טוף כמצע אינרטי לגידול צמחים.
- **מוצרי בנייה** (בלוקים ומוצרי תשתית) - חושבה תועלת אפר הפחם כמחליף חול.
- **תשתיות** (סלילה ותשתיות מבניות) – חושבה תועלת אפר הפחם כמחליף חול.
- **חיסכון בהובלה** – עקב מיקום תחנות הכח במרכז הארץ נוצר מוצג החיסכון הכספי המשוקלל לכל טון אפר פחם, בהשוואה להובלת חול ממישור רותם. נלקח בחשבון שחלק מהחול והמודרג (חומר גלם) מובלים ממרכז הארץ.

## **2. שימושים שתומחרו**

### **2.1 תעשיית הצמנט**

**אפר הפחם משמש את תעשיית הצמנט לשלוש מטרות:**

- כתחליף לחלק ממרכיבי הקלינקר
- תוסף לאחר ייצור הקלינקר במהלך הטחינה
- משפר אלומינה

בנוסף לכך, משתמשת תעשיית הצמנט באפר פחם הפסול לתעשיית הבטון (LOI גבוה מ – 7%) ואפר פחם תחתי שאינו בשימוש כלל בתעשיית הבטון.

**במודל החישוב מוצגת התועלת למשק של אפר הפחם לתעשיית הצמנט בשני סגמנטים:** כתחליף קלינקר וכמשפר אלומינה. שעור תכולת האפר ב – 1 טון צמנט מסוג CEMII (צמנט המכיל אפר פחם) בשני היישומים, נע כיום בסד"ג של 25%-21%. אנו מציגים במודל את אפר הפחם כח"ג בייצור קלינקר מול בוקסיט, כמשפר אלומינה. ידוע לנו כי נכון להיום תעשיית הצמנט מייבאת קאולין כמשפר אלומינה, הנחנו כי תכונות ותכולת הקאולין דומות לבוקסיט.

## 2.2 תעשיית הבטון

לתעשיית הבטון המובא משמש אפר הפחם כתוסף למרכיבי הבטון (צמנט, אגרגטים, חול, מים, מוספים ותוספים) לשתי מטרות, האחת כחליף לצמנט בתערובת הבטון (כ - 70% מכמות הבטון המיוצרת בארץ מורשית על פי התקן הישראלי ת.י. 118 (2008) להכיל אפר פחם כחליף לצמנט) והשנייה כחליף לחול בכל תערובות הבטון.

קיימת הוראה אדמיניסטרטיבית (שלטונית), שבעקבותיה הוסף בגיליון תיקון 2 לת.י. 118 (2008) תחת סעיף 5.2.5 (שימוש בתוספים), ש"הכמות הכוללת של אפר פחם בבטון לא תהיה גדולה מ - 160 ק"ג, למ"ק בטון טרי".

כיום, מנוצל אפר הפחם בבטון מובא בכמות של כ - 100 ק"ג למ"ק, באותן תערובות בהן ניתן להשתמש באפר פחם כחליף חלקי לצמנט ולחול או לחול בלבד וזאת מסיבות טכנולוגיות הקשורות לעבידות הבטון.

לצורך החישוב נבנה מודל המחשב את העלות הממוצעת של חומרי הגלם בתערובת בטון אופיינית, לייצרן הבטון. העלות חושבה ללא שימוש באפר פחם, ועם שימוש באפר פחם. בחישוב נלקח בחשבון מחיר צמנט שאינו מכיל אפר פחם אלא חומרים חליפיים, יקרים יותר, הזמינים בשוק.

התועלת **למשק** נובעת מן הפער בין עלות תערובת הבטון ללא שימוש באפר פחם ועלות תערובת הבטון עם שימוש באפר פחם, **מנקודת ראות המשק** – מחיר אפר הפחם כמוצר לוואי הוא אפס וכך זה מוצג בגיליונות החישוב בסעיף 4 להלן.

התועלת למשק בשימוש באפר פחם בייצור בטון חושבה עבור תערובות הבטון המכילות צמנט מסוג CEMII לדרגות חשיפה 1,2,3 ולדרגת חשיפה 4, המאפשרות החלפה חלקית של צמנט בנוסף להחלפה חלקית של חול, תערובות אלו מהוות ביחד כ - 70% מכלל ייצור הבטון המובא בארץ. כמו כן חושבה התועלת למשק עבור דרגות חשיפה 5-11 המאפשרות החלפת חול בלבד, ומהוות ביחד כ - 30% מכלל תערובות הבטון.

טרם חושבה התועלת למשק של שימוש באפר פחם לתערובות בטון מיוחדות (כגון תערובות בטון המיועדות ליציקת רפסודות, בבסיסי מבנים גבוהים) בשל העדר חלק מהנתונים, עם השלמתם תעודכן התועלת למשק בהתאם. נציין כי נכון להיום מוערך השימוש באפר הפחם לתערובות מיוחדות בכ - 50% מסך השימוש בתעשיית הבטון.

## 2.3 הארכת משך השירות של מבנים

הנחיות התכנון הנוכחיות למבנים, עפ"י חוקת הבטון (ת.י. 466) מכוונות לתקופת שירות מבני של 50 שנה. ממחקרים טכנולוגיים העוסקים ב- **Life Cycle Assessment (LCA)**, של מבני בטון מזויין עולה כי הוספת דקים (חומר דק הנוצר בעת ייצור אגרגטים המכונה אבק, מלאן וכד') ובמיוחד אפר פחם בגלל תכונותיו הפוזולניות, לתערובות הבטון (עפ"י ת.י. 118), מאריכה את משך חיי השירות של שלד המבנים (משך חיי השירות הינו ביטוי כמותי לקיים הבניין - **Durability**<sup>4</sup>). הוספת אפר הפחם הינה חלק מסידרת תנאים ובהם גם הפחתת כמות הצמנט ויחס מים צמנט נמוך. בעבודה זו נלקחה בחשבון הערכה ממוצעת של הארכת משך חיי השירות של שלד המבנים בכ - 37%. אמדן זה מבוסס על משך חיי שירות ונבנה בהסתמך על שקלול טווח ההשפעה באיזורים שונים בארץ (דרום, פנים הארץ ורצועת החוף)<sup>5</sup>. המשמעות היא כי עבודות שמטרתן שימור וחיזוק מבני, תידחינה בכ - 18.5 שנים (בממוצע), בהשוואה למבנים שנבנו תוך שימוש בתערובות בטון שאינן כוללות אפר פחם כתוסף בשלב הכנת הבטון. מן הראוי לציין כי

<sup>4</sup> "קיים" מתייחס לתקופת השירות של המבנה. זהו מושג טכנו-כלכלי המגלם את מחזור ההשקעות הנדרש לתחזוקתו ברמת שירות נאותה, ללא הידרדרות משמעותית במצבו. בתום תקופת הקיים המתוכנן נדרשת השקעה משמעותית להמשך השירות הנאות.

A durable structure shall meet the requirements of serviceability, strength and stability" throughout its design working life, without significant loss of utility or excessive unforeseen maintenance", Euro Code 2, pp 40

<sup>5</sup> "אומדן לפרמטרים טכנולוגיים להערכת יתרונות כלכליים לשילוב אפר פחם בבטון", פרופ' א.בנטור, אפריל, 2017

כאשר מדובר במבני תשתית, השימוש באפר פחם מכפיל ואף משלש את משך דחיית עבודות השירות, בהשוואה למבני תשתית שנבנות תוך שימוש בתערובות בטון שאינן מכילות אפר פחם כתוסף<sup>6</sup>.

**מבחינת המשק, התועלת הגלומה בסעיף זה (תוצאת השימוש באפר הפחם) הינה הגבוהה ביותר, שכן, כפי שיובהר להלן, מדובר בחיסכון משקי משמעותי. כפי שנאמר קודם, קיימת אפשרות שלא לבצע שיקום מבני בלו"ז המתחייב מהנחיות התכנון, משיקולים כאלו ואחרים, אולם אז פוטנציאל הנזק מחשיפת הבטון להשפעות קורוזיביות (שרובו סמוי מהעין) מצטברת ואף מחמירה והתוצאות האפשריות הן – תיקון בעלות גבוהה יותר ואף סבירות גבוהה להריסה. כמו כן יצוין כי מנקודת ראות המשק התועלת הגלומה בתרומת אפר הפחם להארכת הקיים מקבלת ביטוי מעשי גם במשטר של תחזוקת שבר שנמנעת מביצוע שיפוץ במועד התקני.**

הוספת אפר פחם לתערובות הבטון, המעלה את כמות הדקים, תורמת להאטת תהליך ההידרציה בזכות תכונותיו המיוחדות (האמורות לעיל) ומצופפת את הבטון. הוספת אפר הפחם מאריכה את הקיים של המבנים במספר שנים עקב הקטנת החדירות של גורמי הבלייה והקורוזיה (מים, כלורידים, גזים וכיו"ב) לרכיבי הבטון המכילים אפר פחם.

מחקרים הוכיחו גם שבטון המכיל כמות צמנט נמוכה ממה שהיה מקובל עד היום, בשילוב עם כמות מסוימת של אפר פחם ויחס מים/צמנט נמוך ככל האפשר הוא בעל קיים ארוך יותר. הדבר בא לידי ביטוי בתקן הבטון האירופי (EN 206) והתקנים הישראליים המתאימים (ת.י. 466 – חוקת הבטון, ת.י. 118 (2008) – בטון: דרישות, תפקוד וייצור). בבטונים כאלו ניתן לקבל את חוזק הבטון הנדרש ולהאריך קיים הבטון.

בהתאם למדיניות אימוץ תקנים אירופאים התפרסם בשנת 2015 גיליון תיקון מס' 4 לת.י. 118 המאפשר הפחתת כמות הצמנט למ"ק של בטון בכ – 15% ביחס לתקן הקיים היום.

**לאימוץ התקן האירופי במסגרת התיקון לת.י. 118, המביא לידי ביטוי את חשיבות הארכת קיים המבנה, צריכות להתקיים מספר תנאים ובהן:**

- o כמות צמנט מינימלית (כמוגדר בתקן),
- o יחס מים/צמנט מקסימאלי (כמוגדר בתקן),
- o הוספת אפר פחם, המשמש כחליף לחלק מהצמנט, התורמת משמעותית לעמידות הבטון כנגד חדירת אלמנטים קורוזיביים.

על פי התיקון האמור לת.י. 118 ניתן להקטין את כמות הצמנט, עד לכדי רמה מינימאלית של 210 ק"ג למ"ק (רלבנטי לכ- 60%-70% מכמות הבטון המיוצרת בארץ) ובתנאי שתערובת הבטון תכיל לפחות 50 ק"ג אפר פחם למ"ק, המשמש כתחליף לצמנט. תהליך זה יקטין את עלות ייצור הבטון, ישמור על חוזק הבטון הנדרש וישפר את קיים הבטון. **יודגש כי על פי התקינה בישראל רק אפר פחם מורשה לשמש כתוסף למטרה זו, כיום<sup>7</sup>.**

מתודולוגיה לגיבוש אומדני הארכת משך חיי השירות הטכנולוגי התקין של בטון רגיל ואשר מסתמכת על התקן האירופי לבטון EN206 ומודלים הנדסיים כדוגמת אלו המוצגים בהנחיות של FIB<sup>8</sup>, מעלה, כאמור, כי הצפי לדחיית פעולות השימור בישראל נאמד, בחישוב ממוצע משוקלל המבוסס על איזורי הבניה השונים בארץ, בכ- 37% מאורך החיים המתוכנן, שהם כ- 18.5 שנים.

כדי להציג תמונת אילוסטרציה של התועלת למשק בחרנו להתייחס למודל של בנייה למגורים המשקף גם שהייה בבניה מסחרית, ציבורית ותעשייתית. נדגיש כי התוצאות המוצגות מוטות כלפי מטה מאחר שאינן כוללות את התועלת למשק הנגזרת מתוספת הקיים של מבני תשתית שלבנייתם משתמשים בתערובות בטון מיוחדות הכוללות אפר פחם.

<sup>6</sup> לפי תחשיב שמסתמך על נתוני למ"ס בשנת 2016 כ-40% מהבטון שימש לבניית תשתיות. בהעדר נתונים לגבי כמות הבטון שבה נעשה שימוש באפר פחם בתערובות המיוחדות, לא ניתן כלל ביטוי לתועלת זו במסמך, לכן ההערכה המוצגת היא הערכת חסר.

<sup>7</sup> תיאורטית ניתן להחליף את אפר הפחם המשמש כחומר פוצולני המאפשר הפחתת צמנט בתערובת הבטון, אך מדובר בתהליך מחקר ותקינה שצפוי להימשך מספר שנים.

<sup>8</sup> FIB Model Code For service life design, FIB Bulletin 34, 2006

## נציין מספר נקודות לעניין חישוב תרומת האפר המיובא לקיים מבנים

- א. התבססנו על אמדן של 112 מ"ק בטון ככמות הנדרשת לבניית דירה ממוצעת בשטח של 120 מ"ר (כולל התשתיות הקשורות לפיתוח הסביבתי כגון מדרכות, שבילים, משטחים ציבוריים וכן מבני שירות משותפים כמרתפי חניה, חדרי מדרגות ומעליות וכד')<sup>9</sup>.
- ב. אמדן מחיר ממוצע לבניית מ"ר כיום בסטנדרט גימור מינימאלי הינו בסד"ג של כ- 7,000 ₪ (נתון שמרני).
- ג. במסגרת התחשיב המוצג בסעיף 5.4 להלן נלקח בחשבון כי כ-20% מהבנייה היא של יחידות צמודות קרקע שגודלן הממוצע זהה ליחידות בבנייה רוויה. עם זאת אנו מערכים כי בגמר תקופת השירות המתוכננת תידרש הריסה של כ- 50% מתוכן.
- בדיקת רגישות - בניית מודל אלטרנטיבי לתרומה לקיים, בהנחות הבאות:
- 30% מסך המבנים (50% מהמבנים בפנים הארץ) הם בעלי פוטנציאל לקיים אפקטיבי של 75 שנה, ללא אפר פחם
  - שימוש באפר פחם מאריך את תקופת השירות של הנ"ל בשיעור זהה, כלומר ב-37%, שהם - 27.75 שנים
- העלתה שתרומת טון אפר פחם יורדת בשיעור מזערי בלבד של 2 ₪ לטון, בהשוואה לתוצאה המוצגת בסעיף 5.4 להלן,
- ד. מנקודת ראות המשק, שימוש באפר הפחם בכמויות שצוינו, יש בו כדי להאריך את תקופת השירות של הדירות הנ"ל, עד מועד ביצוע עבודות השימור, בכ- 18.5 שנה, התועלת למשק היא עפ"י מודל החישוב שלנו שווי דחיית פעולות השימור הללו. התוצאה שתוצג בסעיף 5.4 להלן, מייצגת את עלות הבינוי הישירה בלבד, כלומר ללא: הובלה, בלאי כבישים וציוד, פליטת CO2 ומזהמים אחרים (בהובלה ובייצור הצמנט הנוסף במועד החידוש) הפרעות לסביבה בעת ביצוע עבודות השימור וכיו"ב. **הבטון הוא תנאי הכרחי** (בשיטת הבנייה המיושמת בישראל) לקיומו של מבנה לשהיית בני אדם (מגורים, תעסוקה, מסחר ופנאי). **אפר הפחם הוא רכיב הכרחי יחיד כיום** (בתקינה הישראלית הנוכחית) להארכת הקיים של בטון ולא קיימת כיום אפשרות מעשית, מקומית, אלטרנטיבית. תיאורטית, קיימת אפשרות של שימוש במלאן (אגרגט גירי טחון שאינו זמין כיום בכמויות הגדולות הנדרשות וייצורו כתוסף לבטון אינו כלכלי), אך תכונותיו הטכנולוגיות נופלות בהרבה מתכונות אפר הפחם, לרבות השפעתו על הקיים ובנוסף לכך, יישומו יגרום לגידול ניכר בעלות תערובות הבטון<sup>10</sup>. מכאן, שאת הערך המוסף של הארכת תקופת השירות של המבנים יש לייחס במלואו לאפר הפחם.

### 2.4 התועלת למשק עקב חסכון בפליטת CO2

- בתעשיית הצמנט:** החיסכון בפליטת CO2 נובע מהעברת מרבית הייצור מ- CEMI ל- CEMII שמהווה כיום כ- 88% מסך הייצור. תכולת הקלינקר ב- CEMII היא כ- 80% בלבד בהשוואה ל- 95-100% ב- CEMI.
- בתעשיית הבטון:** החיסכון נובע מייצור נמוע של צמנט שהוא פועל יוצא של שימוש באפר פחם בתעשיית הבטון כח"ג שבחלקו חוסך צמנט.
- שימוש ב- 100 ק"ג אפר פחם כתוסף בתערובות הבטון, בדרגות חשיפה 1-4, חוסך כ- 25 ק"ג צמנט. בייצור 1 טון קלינקר נפלט כ- 1 טון CO2 לאויר, בנוסף למזהמים אחרים.
- אומדן העלות למשק (Social cost of CO2 - SCC) של פליטת 1 טון CO2 נע, בהתאם למחקרים שונים, בין כמה עשרות לכמה מאות דולרים. הערכת הממשל האמריקאי אומדת את העלות למשק ב- \$37.

<sup>9</sup> אינג' גדעון אירוס – "חישוב כמות בטון ליח' מגורים מייצגת לשנת 2018 בישראל" – ינואר, 2018

<sup>10</sup> המלאנים הטבעיים הנם אינרטיים ברובם ועל כן אינם יעילים, או יעילים הרבה פחות לשיפור קיים. אבן גיר ידועה בספרות כנותנת שיפור מסוים בעמידות סולפטים אך ללא שיעור פחות מאפר פחם, ואין היא משפרת עמידות בכלורידים שהיא בעיית קיים מרכזית.

בישראל - מסמך שפורסם ע"י המשרד להגנת הסביבה ביום 3 בפברואר 2016, מורה כי עפ"י חוות דעת של מומחים חיצוניים מחיר פליטת גזי חממה למשק הישראלי הוא \$30 לטון. זהו המחיר אותו אימצנו בעבודה זו. בהתחשב בכך שמאז פרסום המסמך הנ"ל חל תיסוף משמעותי של השקל מול הדולר – החישוב בוצע לפי השער היציג בעת הפרסום שעמד על כ- 3.964 ₪ לדולר. לא חושב החיסכון למשק עקב מניעת פליטת מזהמים אחרים, כתוצאה מהעדר מידע מספיק.

## **2.5 ניצול אפר פחם מרחף בייצוב שפכים לחקלאות; ניצול אפר תחתית גיבון וחקלאות ובמוצרי בניה ותשתיות**

**במס"א –** על פי החישוב של מכון וולקני עלות הטיפול בבוצת השפד"ן בשיטת המעכלים (אל-אווירניים תרמופיליים) גבוהה לפחות (הערכת השקעה נמוכה) פי 2.7 מעלות אנ-ווירו (ייצוב הבוצה בעזרת תוספים אלקליים – סיד ואפר פחם).

החישוב מתייחס גם להבדל בעלויות הפיזור (כמות בוצת אנ-ווירו גדולה פי 4). מניח 45% אפר פחם בתערובת (5% סיד) במחיר 30 ₪ לטון, 5% סיד במחיר 800 ₪ לטון. בהנחות אלה עלות בוצת אנ-ווירו מסתכמת ב- 217 ₪ לטון.

במחיר 0 לאפר פחם, 600 ₪ לטון סיד, 40% אפר, 10% סיד, עלות בוצת אנ-ווירו מסתכמת ב- 170 ₪ לטון. לפיכך ערך טון אפר פחם (80% מהתוספים) בניצולו לייצוב בוצת שפכים בשיטת אנ-ווירו בהשוואה לקומפוסטציה כחלופת מחדל (360 ₪ לטון בוצה כדמי טיפול באתר קומפוסטציה) הוא  $238 = (360 - 170) / 0.8$  ₪.

ערך תרומת אפר הפחם לחסכון בהשוואה למעכלים מגיעה ל- 522 ₪ לטון אפר פחם:  $(588 - 170) / 0.8$ . להערכת השימוש הונח ניצול הכושר התפעולי (שתי משמרות) של המתקן בשפד"ן 60,000 טון בוצה בשנה = בערך 50,000 טון אפר. כ- 30,000 טון בערך החליפי של המעכלים בשפד"ן לבוצה מקומית (522 ₪ לטון) 20,000 טון בערך החליפי של קומפוסטציה בטובלן לבוצה מיובאת ממט"שים אחרים במרכז (238 ₪ לטון):  $522 \times 3/5 + 238 \times 2/5 = 408.4$  ₪ לטון.

חישוב ערך מוסף למשק מאפר לבמס"א לחקלאות (שימוש מותר יחיד) מבוסס על ממצאי המחקר של מכון וולקני<sup>11</sup>:

תועלת כוללת בשיפור היבול ובמניעת שימוש בדשנים ובחומרי הדברה – 124 ₪ לדונם.

עלות (22 ₪ לדונם בניכוי הגבלה רגולטורית בריאותית זמנית – 13 ₪ לדונם) – 9 ₪ לדונם.

**תועלת נקיה – 115 ₪ לדונם.**

מחברי המחקר הניחו 1 טון אפר, כתוסף לבמס"א, לדונם (טבלה 3). לכן, בהנחה שללא אפר פחם לא ניתן לייצר במס"א, התועלת היא 115 ₪ לטון אפר פחם.

## **שימושי אפר תחתית**

**גיבון וחקלאות –** אפר תחתית מנופה גס מחליף טוף במחיר 180 ₪ לטון (באזור המרכז). בתיקון צפיפות (ק"ג/מ"ק) יחסית בין שני החומרים (אפר – 900, טוף – 1400) התועלת למשק מאפר פחם  $1.5 \times 180 = 270$  ₪ לטון. בהנחה של החלפה 1:1 נפחי.

**קרינה בחקלאות:** עפ"י תחשיב שערכה מנהלת אפר הפחם, עלות הקרינה לה נחשפים מאפר תחתית בגיבון בהשוואה למצע טוף שהוא ברירת המחדל – 8 ₪ לטון אפר, כאשר היישום מתבצע בתערובת הכוללת 30% חומר אורגני (בהמלצת פרופ' יונה חן מהפקולטה לחקלאות ברחובות, מפתח שיטת השימוש באפר פחם בחקלאות)

<sup>11</sup> עלות מול תועלת כלכלית של השימוש החקלאי באפר פחם מרחף – חישוב כלכלי של השימוש החקלאי באפר בשילוב עם בוצה – ד"ר אפרת הדס, פרופ' אורי מינגלגרין, אשר איזנקוט, ד"ר פנחס פיין, מכון וולקני, ינואר 2016

התחשיב מתייחס להנחות שונות על עובי שכבת המצע ושיעור החומר האורגני בתערובת המצע וכן לצפיפות היחסית של האפר לטוף. לצורך הערכת העלות יש להתייחס למצע בעובי 40 ס"מ.

**מוצרי בנייה (בלוקים ומוצרי תשתית) –** אפר תחתית מנופה דק מחליף חול במחיר 65 ₪ לטון. בתיקון צפיפות (אפר – 850, חול – 1500) התועלת למשק מאפר פחם 1.8X65=117 **₪ לטון**. בהנחה של החלפה 1:1 נפחי.

**תשתיות –** אפר תחתית גולמי מחליף חול במחיר 40 ₪. בתיקון צפיפות (אפר – 900, חול – 1500). התועלת למשק מאפר פחם 1.7X40=68 ₪ לטון, בהנחה של החלפה 1:1 נפחי.

### 3. טבלאות חישוב עלות/תועלת ל-1 טון אפר פחם

#### 3.1 חישוב התועלת בתעשיית הצמנט

תזונו יסוד:																																																																																																																																																																																								
הבהרה: הרכבי הצמנט שלהלן מבוססים על מידע גלוי ומיצרני הצמנט.																																																																																																																																																																																								
מחיר טון ₪																																																																																																																																																																																								
הערות																																																																																																																																																																																								
מחיר בסיסי של קלינקר המכיל גיר, חול וחרסית וכן גבס ותוספים																																																																																																																																																																																								
האפר מחליף בוקסייט ביחס של 1.5:1 בהתאמה - 27% אלומינה לעומת 41% בבוקסייט																																																																																																																																																																																								
הונח שימוש בבוקסייט מתוך מטרה לשמור על משאבי וערכי טבע מקומיים																																																																																																																																																																																								
260																																																																																																																																																																																								
70																																																																																																																																																																																								
סיגים																																																																																																																																																																																								
אבן גיר																																																																																																																																																																																								
מה"יצור הכולל																																																																																																																																																																																								
88% CEMII																																																																																																																																																																																								
מה"יצור הכולל																																																																																																																																																																																								
12% CEMI																																																																																																																																																																																								
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="4">צמנט CEMII AM SL</th> <th colspan="4">צמנט CEMII AM S-L-V</th> <th colspan="3">הנתונים בק"ג</th> </tr> <tr> <th colspan="4">טרם מוכר ע"י תעשיית הבטון</th> <th colspan="4">לפי ת.י. 1 - צמנט רגיל</th> <th colspan="3"></th> </tr> <tr> <th rowspan="2">הפרש מול צמנט תקני (A)</th> <th rowspan="2">עלות חו"ג ליצור ₪</th> <th colspan="2">צמנט ללא אפר פחם (D)</th> <th colspan="2">צמנט בו הקלינקר מכיל בוקסייט במקום אפר פחם ©</th> <th colspan="2">צמנט עם מינ' אפר פחם כתוסף (B)</th> <th rowspan="2">עלות חו"ג ליצור ₪</th> <th colspan="2">צמנט תקני עם שימוש אפקטיבי באפר (A)</th> <th rowspan="2">הנתונים בק"ג</th> </tr> <tr> <th>התאמה ל-1 טון צמנט</th> <th>הרכב הקלינקר*</th> <th>התאמה ל-1 טון</th> <th>הרכב הקלינקר*</th> <th>התאמה ל-1 טון</th> <th>הרכב הקלינקר*</th> <th>התאמה ל-1 טון</th> <th>הרכב הקלינקר*</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td>95.3%</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>ייצור הקלינקר חומרים:</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>165</td> <td>686</td> <td>720</td> <td>686</td> <td>720</td> <td>648</td> <td>680</td> <td>155</td> <td>646</td> <td>680</td> <td>גיר, חול, חרסית</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>114</td> <td>120</td> <td>0</td> <td>114</td> <td>120</td> <td>אפר פחם</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>30</td> <td>76</td> <td>80</td> <td>76</td> <td>80</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>-</td> <td>0</td> <td>בוקסייט</td> </tr> <tr> <td>-1</td> <td>11</td> <td>48</td> <td>50</td> <td>48</td> <td>50</td> <td>48</td> <td>50</td> <td>12</td> <td>50</td> <td>50</td> <td>גבס+תוספים</td> </tr> <tr> <td><b>40</b></td> <td><b>207</b></td> <td><b>810</b></td> <td><b>850</b></td> <td><b>810</b></td> <td><b>850</b></td> <td><b>810</b></td> <td><b>850</b></td> <td><b>167</b></td> <td><b>810</b></td> <td><b>850</b></td> <td>סה"כ קלינקר תוספים</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>70</td> <td>30</td> <td>100</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>אפר פחם</td> </tr> <tr> <td>18</td> <td>23</td> <td>90</td> <td>30</td> <td>70</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>סיגים</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>7</td> <td>100</td> <td>90</td> <td>90</td> <td>70</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>אבקת אבן גיר</td> </tr> <tr> <td><b>20</b></td> <td><b>30</b></td> <td><b>190</b></td> <td><b>190</b></td> <td><b>190</b></td> <td><b>190</b></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>סה"כ טחינה</td> </tr> <tr> <td><b>60</b></td> <td><b>237</b></td> <td><b>1000</b></td> <td><b>850</b></td> <td><b>1000</b></td> <td><b>850</b></td> <td><b>1000</b></td> <td><b>850</b></td> <td><b>177</b></td> <td><b>1000</b></td> <td><b>850</b></td> <td>סה"כ כללי</td> </tr> </tbody> </table>											צמנט CEMII AM SL				צמנט CEMII AM S-L-V				הנתונים בק"ג			טרם מוכר ע"י תעשיית הבטון				לפי ת.י. 1 - צמנט רגיל							הפרש מול צמנט תקני (A)	עלות חו"ג ליצור ₪	צמנט ללא אפר פחם (D)		צמנט בו הקלינקר מכיל בוקסייט במקום אפר פחם ©		צמנט עם מינ' אפר פחם כתוסף (B)		עלות חו"ג ליצור ₪	צמנט תקני עם שימוש אפקטיבי באפר (A)		הנתונים בק"ג	התאמה ל-1 טון צמנט	הרכב הקלינקר*	התאמה ל-1 טון	הרכב הקלינקר*	התאמה ל-1 טון	הרכב הקלינקר*	התאמה ל-1 טון	הרכב הקלינקר*			95.3%									ייצור הקלינקר חומרים:	10	165	686	720	686	720	648	680	155	646	680	גיר, חול, חרסית	0	0	0	0	0	0	114	120	0	114	120	אפר פחם	30	30	76	80	76	80	0	0	0	-	0	בוקסייט	-1	11	48	50	48	50	48	50	12	50	50	גבס+תוספים	<b>40</b>	<b>207</b>	<b>810</b>	<b>850</b>	<b>810</b>	<b>850</b>	<b>810</b>	<b>850</b>	<b>167</b>	<b>810</b>	<b>850</b>	סה"כ קלינקר תוספים	0	0	0	70	30	100						אפר פחם	18	23	90	30	70	20						סיגים	2	7	100	90	90	70						אבקת אבן גיר	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>190</b>	<b>190</b>	<b>190</b>	<b>190</b>						סה"כ טחינה	<b>60</b>	<b>237</b>	<b>1000</b>	<b>850</b>	<b>1000</b>	<b>850</b>	<b>1000</b>	<b>850</b>	<b>177</b>	<b>1000</b>	<b>850</b>	סה"כ כללי
צמנט CEMII AM SL				צמנט CEMII AM S-L-V				הנתונים בק"ג																																																																																																																																																																																
טרם מוכר ע"י תעשיית הבטון				לפי ת.י. 1 - צמנט רגיל																																																																																																																																																																																				
הפרש מול צמנט תקני (A)	עלות חו"ג ליצור ₪	צמנט ללא אפר פחם (D)		צמנט בו הקלינקר מכיל בוקסייט במקום אפר פחם ©		צמנט עם מינ' אפר פחם כתוסף (B)		עלות חו"ג ליצור ₪	צמנט תקני עם שימוש אפקטיבי באפר (A)		הנתונים בק"ג																																																																																																																																																																													
		התאמה ל-1 טון צמנט	הרכב הקלינקר*	התאמה ל-1 טון	הרכב הקלינקר*	התאמה ל-1 טון	הרכב הקלינקר*		התאמה ל-1 טון	הרכב הקלינקר*																																																																																																																																																																														
		95.3%									ייצור הקלינקר חומרים:																																																																																																																																																																													
10	165	686	720	686	720	648	680	155	646	680	גיר, חול, חרסית																																																																																																																																																																													
0	0	0	0	0	0	114	120	0	114	120	אפר פחם																																																																																																																																																																													
30	30	76	80	76	80	0	0	0	-	0	בוקסייט																																																																																																																																																																													
-1	11	48	50	48	50	48	50	12	50	50	גבס+תוספים																																																																																																																																																																													
<b>40</b>	<b>207</b>	<b>810</b>	<b>850</b>	<b>810</b>	<b>850</b>	<b>810</b>	<b>850</b>	<b>167</b>	<b>810</b>	<b>850</b>	סה"כ קלינקר תוספים																																																																																																																																																																													
0	0	0	70	30	100						אפר פחם																																																																																																																																																																													
18	23	90	30	70	20						סיגים																																																																																																																																																																													
2	7	100	90	90	70						אבקת אבן גיר																																																																																																																																																																													
<b>20</b>	<b>30</b>	<b>190</b>	<b>190</b>	<b>190</b>	<b>190</b>						סה"כ טחינה																																																																																																																																																																													
<b>60</b>	<b>237</b>	<b>1000</b>	<b>850</b>	<b>1000</b>	<b>850</b>	<b>1000</b>	<b>850</b>	<b>177</b>	<b>1000</b>	<b>850</b>	סה"כ כללי																																																																																																																																																																													
* הרכב הקלינקר הוא לפי התקן הישראלי ת.י. 1 לכן נדרשת התאמה לכמות הקלינקר ב-1 טון צמנט CEMII																																																																																																																																																																																								
A. הצמנט בשימוש כיום מכיל עפ"י התקן עד 10% אפר פחם.																																																																																																																																																																																								
B. בצמנט זה ניתן להפחית את האפר כתוסף עד 3% ועדיין נשארים בתחום התקינה המותרת.																																																																																																																																																																																								
C. בצמנט זה מחליף בוקסייט את אפר הפחם בקלינקר, כמשפר אלומינה ואפר הפחם הקיים משמש כתוסף																																																																																																																																																																																								
D. בצמנט זה אין כלל שימוש באפר פחם, הוא "לא מוכר" בת.י. 118 וכדי לאשרו בתקינה נדרשת לפחות שנת עבודה.																																																																																																																																																																																								



CEMI PORTLAND CEMENT*							
לפי ת.י.1 - צמנט רגיל							
הנתונים בק"ג	CEMI שבייצור כיום		עלות חו"ג ליצור		החלפת אפר הפחם בבוקסייט		עלות חו"ג ליצור
	התאמה ל-1 טון צמנט*	הרכב הקלינקר	התאמה ל-1 טון צמנט ק"ג	הרכב הקלינקר	התאמה ל-1 טון צמנט ק"ג	הרכב הקלינקר	
ייצור הקלינקר חומרים: גיר, חול, חרסית אפר פחם בוקסייט גבס+תוספים סה"כ קלינקר*	760	800	192	807	849	204	12
	140	147		0	0		0
				93	98	39	39
	50	53	13	50	53	13	0
	<b>950</b>	<b>1000</b>	<b>205</b>	<b>950</b>	<b>1000</b>	<b>256</b>	<b>51</b>

\* הרכב הקלינקר הוא לפי התקן הישראלי ת.י.1 לכן נדרשת התאמה לכמות הקלינקר ב-1 טון צמנט CEMI

**תחשיב התועלת למשק - אפר מרחף**

השקולל בוצע פי ייצור של 88% CEMII ו- 12% CEMI

החיסכון המשוקלל ל-1 טון צמנט	ש"ח	58.81	החיסכון הנובע למשק משימוש ב-1 טון אפר פחם בתעשיית הצמנט
שימוש משוקלל באפר פחם לייצור 1 טון צמנט	ק"ג	206.3	285.03 ש"ח

**אפר תחתית בייצור הקלינקר**

CEMII	114	ק"ג אפר פחם
חוסכים	40 ש"ח	
מכלל הייצור %	88%	
CEMI	147	ק"ג אפר פחם
מכלל הייצור %	12%	
חוסכים	51 ש"ח	
חיסכון משוקלל	40.94 ש"ח	
תועלת של 1 טון אפר פחם	156 ש"ח	

3.2 חישוב הערך הנצבר בתעשיית הבטון

על פי טבלה 9 החדשה בגליון תיקון 4 לת.י 118 (2008) CEM II							
דרגות חשיפה 1,2,3							
עם אפר פחם			ללא אפר פחם				
עלות ש"ח	מחיר ליח/ש"ח*	כמות למ"ק ק"ג	עלות ש"ח למ"ק ש"ח	מחיר ליח/ש"ח*	כמות למ"ק ק"ג	מרכיבי הבטון	
76	346	220	102	416	245	צמנט CEM II	
0	0	100	0	0	0	אפר פחם	
3	20	145	3	20	145	מים	
41	45	920	41	45	920	עדס	
25	50	490	25	50	500	מודרג	
32	65	485	36	65	550	חול מישור רותם**	
		2360			2360	סה"כ	
20	5	4	20	5	4	מוסף	
196			227			עלות	
30.53			תועלת למשק של אפר פחם ב-1 מ"ק תערובת בטון				
305.25			תועלת למשק של 1 טון אפר פחם בתערובות בטון				
* בהנחה שאין אפר פחם לייצור CEM II יאלץ היצרן לייצר CEM II שאינו מוכר ע"י ת.י 118							
משך הזמן הנדרש ל"הפיכתו למוכר" בתקן נאמד בלמעלה משנה.							
** מחיר הובלת החול ממישור רותם נע בסד"ג של 0.35 ש"ח לטון לק"מ ומחיר הובלת אפר הוא כ- 0.60 ש"ח. לפערי מחירים אלו מול מרחקי ההובלה הממוצעים ניתן ביטוי נפרד בטבלה המסכמת							
דרגת חשיפה 4							
עם אפר פחם			ללא אפר פחם				
עלות ש"ח	מחיר ליח ש"ח	כמות למ"ק ק"ג	עלות ש"ח למ"ק ש"ח	מחיר ליח ש"ח	כמות למ"ק ק"ג	מרכיבי הבטון	
85	346	245	110	416	265	צמנט CEM II	
0	32	100	0	0	0	אפר פחם	
3	20	155	3	20	155	מים	
41	45	920	41	45	920	עדס	
24	50	470	24	50	485	מודרג	
31	65	470	35	65	535	חול מישור רותם*	
		2360			2360	סה"כ	
20	5	4	20	5	4	מוסף	
203			234			עלות	
30.45			תועלת למשק של אפר פחם ב-1 מ"ק תערובת בטון				
304.45			תועלת למשק של 1 טון אפר פחם בתערובות בטון				

דרגת חשיפה 5-11 (רמות חו"ג מייצגות)						
עם אפר פחם			ללא אפר פחם			
עלות ש"ח	מחיר ליח ש"ח	כמות למ"ק ק"ג	עלות למ"ק ש"ח	מחיר ליח ש"ח	כמות למ"ק ק"ג	מרכיבי הבטון
104	346	300	125	416	300	צמנט CEM II
0	32	100	0	0	0	אפר פחם
3	20	150	3	20	150	מים
41	45	920	41	45	920	עדס
23	50	460	25	50	490	מודרג
28	65	430	33	65	500	חול מישור רותם
		2360			2360	סה"כ
25	5	5	25	5	5	מוסף
224			251			עלות
27.05			תועלת למשק של אפר פחם ב-1 מ"ק תערובת בטון			
270.50			תועלת למשק של 1 טון אפר פחם בתערובות בטון			

**תחשיב התועלת המשוקללת למשק**

תועלת משוקללת ל-1 טון אפר פחם (מעוגל)	* התפלגות השימוש:	
128	42%	דרגת חשיפה 2,3,1
85	28%	דרגת חשיפה 4
81	30%	דרגת חשיפה 5-11
295	100%	

**3.3 חישוב התועלת למשק עקב מניעת פליטת CO2**

3.3.1	חישוב ערך הנזק הנמנע למשק מפליטת CO2 בייצור בטון																		
	<b>הנחות יסוד:</b> בייצור 1 טון קלינקר נפלט 1 טון CO2 שימוש של 100 ק"ג אפר פחם בתערובות בטון (דרגות חשיפה 1-4), נחסכים 25 ק"ג צמנט הכוללים 81% קלינקר.																		
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>ש"ח</th> <th>שע"ח*</th> <th>\$</th> <th>מחיר למשק של פליטת 1 טון CO2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>119</td> <td>3.964</td> <td>30</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>* יציג ליום 3 בפברואר 2016, מועד פרסום הדו"ח ע"י הגה"ס</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>אלפי טון אפר פחם המסופקים לתעשיית הבטון*</th> <th>כמות נמנעת של ייצור צמנט (באלפי טון)</th> <th>ערך נצבר של מניעת פליטת CO2 באלפי ש"ח</th> <th>שיעור התערובות בהן נחסך צמנט</th> <th>חיסכון עקב שימוש ב-1 טון אפר פחם</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10</td> <td>2.0</td> <td>241</td> <td>70%</td> <td>17 ש"ח</td> </tr> </tbody> </table> <p>* נתון להמחשה בלבד</p>	ש"ח	שע"ח*	\$	מחיר למשק של פליטת 1 טון CO2	119	3.964	30		אלפי טון אפר פחם המסופקים לתעשיית הבטון*	כמות נמנעת של ייצור צמנט (באלפי טון)	ערך נצבר של מניעת פליטת CO2 באלפי ש"ח	שיעור התערובות בהן נחסך צמנט	חיסכון עקב שימוש ב-1 טון אפר פחם	10	2.0	241	70%	17 ש"ח
ש"ח	שע"ח*	\$	מחיר למשק של פליטת 1 טון CO2																
119	3.964	30																	
אלפי טון אפר פחם המסופקים לתעשיית הבטון*	כמות נמנעת של ייצור צמנט (באלפי טון)	ערך נצבר של מניעת פליטת CO2 באלפי ש"ח	שיעור התערובות בהן נחסך צמנט	חיסכון עקב שימוש ב-1 טון אפר פחם															
10	2.0	241	70%	17 ש"ח															
	<b>4.3.2 חישוב ערך הנזק הנמנע למשק מפליטת CO2 בייצור הצמנט</b>																		
	מכל 1 טון אפר פחם המסופק לתעשיית הצמנט כ-75% משמשים כתוסף החוסך קלינקר, בייצור 1 טון קלינקר נפלט 1 טון CO2 שעלות למשק 119 ש"ח																		
	הנזק הנמנע <b>89 ש"ח</b>																		
	לא חושב החיסכון למשק עקב מניעת פליטת מזהמים אחרים, כתוצאה מהעדר מידע מספיק.																		

#### 4.4 חישוב התועלת למשק עקב הארכת קיים מבנים

הבהרות		הנחות יסוד
טון - כל 0.1 טון משמשים כתוסף מאריך קיים	10,000	כמות אפר פחם לצורך התחשיב
	7,000 ₪	עלות מ"ר בנייה
לפי 112 מ"ק בטון ליח' מייצגת	893	מס. יחידות שהייה שייבנו
	20%	מזה לבנייה צמודת קרקע
הונח לצורך פשטות החישוב גודל זהה לבניה רויה	179	סה"כ יח' צמודות קרקע
	50%	מהן צפויות לההרס בתום הקיים המתוכנן
	89	מס. צמודות קרקע שצפויות לההרס
	10%	אחוז מכלל הבנייה
	120	מ"ר ליח' שהייה
	40%	מרכיב השלד בבנייה
	60%	עלות שימור/שיפוץ השלד ממחיר הבסיס
	50	שנות שירות מבנה מתוכננות
	37%	הארכת משך חיי שירות (השפעת אפר הפחם)
	18.50	הארכת משך חיי שירות - שנים
	1.40%	מחיר הון להיוון
	<b>אלפי ₪</b>	<b>חישוב הנזק ממניעת יבוא</b>
	300,000	עלות השלד החזויה ביח' שהייה
	237,000	עלות שימור/שיפוץ לבניה עתידית
מהוון $C=B > 18.5$ שנים	183,251	עלות שימור/שיפוץ עתידית (מהוונת לשנה 50)
$D=B-C$	53,749	הנזק מאי שימוש באפר פחם - נכון לשנה 50
מהוון להיום $E=D >$	26,821	הנזק מאי שימוש באפר פחם - ערך נוכחי
	<b>2,682 ₪</b>	<b>התרומה לקיים של 1 טון אפר פחם - בשימוש ישיר</b>

## 4.5 חישוב החיסכון בהובלה

חיסכון משוקלל בחול וצמנט עקב שימוש ב- 100 ק"ג אפר פחם בתערובת הבטון									התפלגות השימוש:	
ק"ג										
סה"כ חיסכון משוקלל	סה"כ חיסכון בק"ג	חיסכון משוקלל במודרג ל- 1 מ"ק	חיסכון במודרג ל- 1 מ"ק	חיסכון משוקלל בצמנט ל- 1 מ"ק	חיסכון בצמנט ל-1 מ"ק	חיסכון משוקלל בחול ל- 1 מ"ק	חיסכון בחול ל- 1 מ"ק			
42	100	4.2	10	10.5	25	27.3	65	42%	דרגת חשיפה 2,3,1	
28	100	4.2	15	5.6	20	18.2	65	28%	דרגת חשיפה 4	
30	100	9	30	0	0	21	70	30%	דרגת חשיפה 5-11	
<b>100</b>		<b>17</b>	<b>55</b>	<b>16</b>	<b>45</b>	<b>67</b>	<b>200</b>	<b>100%</b>		
100%		17%		16%		67%	%			

  

ש			
עלות הובלת אפר פחם	0.6	לטון לק"מ	
עלות הובלת חול	0.35	לטון לק"מ	
10%	מכמות החול מקורה במרכז, מרחק הובלה		

  

%	מרחק ממוצע מיעד, ק"מ		כמות אפר כוללת, טון	תחנה	אזור	
	חול רותם	תחנת כח				
10	16,444	91.9	48.4	15,504	רוטנברג	דרומית לאשדוד
		91.9	121.8	940	אורות רבין	
46	78,113	141.1	62.6	46,569	רוטנברג	דרום-מרכז
		141.1	80.8	31,544	אורות רבין	
10	17,144	172.2	81.6	2,231	רוטנברג	מרכז-צפון
		172.2	41.5	14,913	אורות רבין	
34	57,650	250.3	151.3	224	רוטנברג	צפון
		250.3	64.3	57,426	אורות רבין	
100	169,351	אפר פחם		169,351		
		חול רותם ומודרג				
		כמות לק"מ				
		29,914,940	10,856,182			
		176.64	64.10	ממוצע ק"מ/טון		
		135.38		ק"מ ממוצע מותאם לכמות החול והמודרג המוחלפים		
		47.38	38.46	עלות הובלה ממוצעת ל-1 טון		
			<b>8.92</b>	חיסכון בעלויות הובלה ל- 1 טון אפר פחם		

**נערך ע"י:**

דוד לנגר, כלכלן, B.A (Econ), MBA

אינג' גדעון אירוס

בהתייעצות עם פרופ' ארנון בנטור, הטכניון