



23 פברואר, 2018
מנ – 39590

מסמך עמדה

התוויית מרחב הפעולה וקדימויות לפיתוח, קידום, שימור ותחזוקת שימושי אפר פחם

על בסיס הערכת עלות – תועלת של השימושים
כרקע לגיבוש מדיניות ולקבלת החלטות פעולה במצבי משק משתנים

תקציר

בעקבות שינויים משמעותיים שהתרחשו בשנים האחרונות בהיקף ייצור החשמל מפחם ושינויים הנגזרים מהם בכמויות אפר הפחם (להלן: אפר), עלה הצורך לעדכן את תוכנית האב על פיה פועלת מנהלת אפר הפחם (המנהלת). זאת לשם הקצאה מיטבית, במציאות משתנה, של משאבי המנהלת ליצירה, לשימור, לתחזוקה ולעדכון שוטף של התשתית הממלכתית בתחום האפר בידע ובתקינה הנדרשת להנעת כוחות השוק למיצוי התועלת הכוללת הגלומה במגוון יישומי האפר ולשמירת רצף אספקתו השוטפת מתחנות הכח למניעת שיבושים בתפקודן.

להערכת תמונת המצב נבחן מרחב הפעולה של שימושי האפר והותוו גבולותיו, באמצעות הרכבים מייצגים, במונחי עלות/תועלת, בהתחשב במדדים המשקיים-אסטרטגיים, מדדי האיכות והכלכלה ומדדי הסביבה, הבריאות והחברה. במסגרת זו נסקרו כלל השימושים בהיבטיהם הטכנולוגיים, הכלכליים והסביבתיים והוערכה תרומתם הכוללת למשק בחלופות שונות של הקצאת האפר.

טווח הבחינה מתמקד בחמש השנים 2018 – 2022, המאופיינות בתפעול מוגבל של יחידות הייצור הפחמיות בשיעור 70% מרמת הייצור של שנת 2015 ומכאן גם של ייצור האפר – כ- 750 אלפי טונות בשנה. לאחר 2022, בה מתוכננת הדממת ארבע היחידות הוותיקות בתחנת הכח אורות רבין, תפחת כמות האפר הזמינה למשק עוד יותר. לעת הזאת לא ניתן להעריך את כמויות האפר הצפויות לאחר מועד זה, אולם בהנחת תפעול יחידות הייצור הנותרות ברמה הנוכחית תפחת כמות האפר השנתית לכ- 500 אלפי טונות בשנה.

מנגד יגדל וילך הביקוש לאפר כמשאב חיוני בעיקר לייצור צמנט ובטון, העומד כבר היום על רמה של כ- 2.5 מיליון טונה בשנה בכלל הביקושים.

להתוויית מרחב הפעולה נבחנו שלוש חלופות הקצאה:

- הקצאה שוויונית בקירוב לענפי הצמנט והבטון הנהוגה היום, ומעוגנת בהנחיות הממונה על ההגבלים העסקיים.
- הקצאה המעדיפה יחסית את ענף הבטון, בשמירה על חלקו ההיסטורי למרות הפחתת כמויות האפר הזמינות,
- הקצאה המעדיפה יחסית את ענף הצמנט, אולם בחסם תחתון על כמות האפר המיועדת לייצור בטון לשימור תפקודו השוטף בשגרה הנדרש להבטחת הענותו להגברת השימוש לעת משבר בהיקף הנדרש לתפקוד תקין של תחנות הכח הפחמיות.

בהתבסס על בחינה פרטנית ומעמיקה של ערך שימושי האפר למיניהם מתקבלים הערכים הכוללים למשק בתלות בחלופת ההקצאה (טבלה 3 להלן), כלהלן:

ערך כולל למשק (מיליוני ₪ בשנה) בחלופות הקצאת אפר פחם		
העדפה יחסית לבטון	מאוזנת לצמנט ולבטון	העדפה יחסית לצמנט
1,323	1,072	797

ההסתמכות ההולכת וגדלה על גז טבעי כמקור אנרגיה לייצור חשמל טומנת בחובה סיכונים למשברים בייצור החשמל עקב כשל באספקת הגז. בהתרחש ארוע כשל באספקת הגז תידרש הפעלה של יחידות הייצור הפחמיות בעומסים גבוהים בהרבה מרמת התפעול הנמוכה בשגרה ובהיווצרות כמויות אפר פחם החורגות מהרמה המנוצלת בשגרה. כושר הייצור הכולל של כלל היחידות הפחמיות היום הוא כ- 1.5 מיליון טונה אפר בשנה, כפול מרמת הייצור הנוכחית. להרכב השימושים ולחלקם היחסי תהיה השפעה משמעותית על כושר הקליטה של המשק לעודפי האפר בשעת חירום. מניתוח נפחי האחסון התפעוליים בתעשיות הצמנט והבטון מעלה כי לתעשיית הבטון כושר תגובה כפול בקירוב מזה של תעשיית הצמנט.

המסמך איננו עוסק בסוגיית יבוא האפר העומדת היום על הפרק. ביבוא אפר קיים פוטנציאל לשיפור יכולת התגובה של המשק ולהקטנת החשש מהצטברות חריגה של עודפי אפר המחייבים אחסון ביניים באתר מחוץ לחצרות תחנות הכח.



יודגש כי אין המנהלת מתיימרת לדרג שימושים על פי מסמך זה ולהעמידם במסדר עדיפויות והיא אף איננה מתכוונת להמליץ לרשויות להכתיב למשק מדרג כלשהו. לתפיסת המנהלת התערבות כזו מנוגדת לעקרונות המקובלים בתקינה ויש בה פוטנציאל של פגיעה בתועלת הציבורית ובאיכות החיים. במשק הפועל על פי עקרונות בסיסיים של שוק חופשי, המתעדף מעצמו ערכים איכותיים וכלכליים, יושג האיזון המבוקש בין תועלות ועלויות בסביבה תחרותית התחומה במגבלות נורמטיביות – טכנולוגיות, סביבתיות-בריאותיות ועסקיות.

עמדה זו של המנהלת מתיישבת עם עקרונות התקן הבינלאומי להגנה מקרינה של הסוכנות הבינלאומית להגנה מקרינה (סבא"א), הפוטר מהתערבות רגולטורית שימוש בחומרים כדוגמת אפר ואף פוסל אופטימיזציה ותיעדוף של שימושים שתרומתם למנת הקרינה לה נחשפים בני אדם נמוכה מרמת ייחוס של 1 mSv/y , ועל אחת כמה כשתרומה זו נמוכה מרמה של 0.3 mSv/y , כדוגמת שימושי האפר. בהקשר הדיון ביבוא אפר יצוין כי במסמכי סבא"א נאמר אף במפורש שאין להגביל סחר מקומי ובינלאומי בנימוק הגנה מקרינה של חומרים העומדים בערכי הפטור, כדוגמת אפר¹.

מאידך גיסא פעולת המנהלת מתמקדת בזיהוי התועלות הגלומות בניצול האפר ובגיבוי תקני של תועלות אלה המיועד לייצר תמריצים משקיים למימושן בפועל (למשל – מתן ביטוי תקני ומפרטי מתאים לתרומת האפר להארכת קיים בטונים; מתן ביטוי מקצועי לתוספת היבול ביישום במס"א בחקלאות ובמסמכי הנחייה מקצועיים).

מבוא

מנהלת אפר הפחם פועלת לאור שתי מטרות העל של מערך אפר הפחם, המשלימות ותומכות זו את זו:

1. פינוי רציף ויציב של אפר הפחם מתחנות הכח במצבי משק משתנים.
2. מיצוי תועלות כלכליות, טכנולוגיות וסביבתיות מאפר הפחם כמשאב.

פעולת המנהלת מגובה במדיניות ממשלתית לטיפול באפר פחם שעיקריה:

1. הגדרת אפר הפחם כחומר בר השבה ששימושו טעונים תנאים סביבתיים וקביעת הנחיות סביבתיות שיאפשרו השבתו הכלכלית,
2. מתן קדימות לפיתוח שימושים כלכליים במגמה למנוע סילוק והשחתה של אפר הפחם כמשאב בעל ערך למשק.

פעולות המנהלת ליצירת תשתית ידע ותקינה הנדרשת לפיתוח ויישום שימושים, אמורות לחולל ולשרת תהליך המכוון לאיזון רב ממדי (משקי-אסטרטגי, איכותי, כלכלי, סביבתי-בריאותי וחברתי) בין מטרות העל. במשק הפועל על פי עקרונות בסיסיים של שוק חופשי, המתעדף מעצמו ערכים איכותיים וכלכליים, יושג האיזון המבוקש בסביבה תחרותית ונורמטיבית שמאפיינה העיקריים הם:

- גיוון שימושים – המקטין תלות בתנודות משקיות של ענף זה או אחר ומדלל את החתימה הסביבתית הכרוכה בכל שימוש בפני עצמו;
- ביזור משתמשים – המקטין תלות בגורמים בעלי משקל תפעולי ומסחרי בכל ענף;
- רציפות ועקביות – התורמות, באמצעות שימושים רציפים ויציבים בתהליכים תעשייתיים מבוקרים, לפינוי שוטף של אפר בהתאמה מרבית עם קצב הייצור, למזעור הפרעות בתפעול תחנות הכח, להקטנת הצורך בנפחי אחסון ביניים ולשמירת איכותו המקורית של האפר בעת היווצרו;
- מיצוי תועלות איכותיות וכלכליות – אשר יוצרות מוטיבציה אצל משתמשים פוטנציאליים לעשות שימוש מועיל באפר ומצדיקות ניצולו כנגד השפעות סביבתיות ובריאותיות שליליות אפשריות;
- הגבלת השפעות הסביבתיות והבריאותיות – המבטיחה עמידה בתקנים ומניעה נורמטיבית של מפגעים סביבתיים ונזקים בריאותיים, כתנאי סף להצדקה סוציאקונומית של שימושי האפר;

המטרה

התוויית מרחב הפעולה המעשי של שימושי האפר והקצאה מיטבית של משאבי המנהלת ליצירה, לשימור ולתחזוקה ולעדכון שוטף של התשתית הממלכתית בידע ובתקינה, הנדרשת להנעת כוחות

¹ "Trade ... national and international trade in commodities containing radionuclides with activity concentration below the values of activity concentration provided in table 1 ... should not be subject to regulatory control for the purposes of radiation protection", Section 5.8, [RS-G-1.7, IAEA, 2004](#)



השוק למיצוי התועלת הכוללת (משקית-אסטרטגית, איכותית, כלכלית, סביבתית-בריאותית וחברתית) הגלומה במגוון יישומי האפר, במונחי טווח התכנון.

העבודה תתמקד בתקופת חמש השנים הבאות עד 2022, בהן צפויה יציבות בכמות האפר הזמינה לשימושי במשק.

השיטה

בהתבסס על ניתוח מקיף של מאפייני השימושים השונים, תרומותיהם החיוביות והשליליות, ושל מפת הגורמים המשפיעים והמושפעים, והערכת עלות – תועלת כוללת (במונחים מדידים אחידים) בסרגלי המדרג השונים (משקי-בטחוני, איכותי, כלכלי, סביבתי-בריאותי וחברתי) במציאות המשקית הנוכחית והצפויה, ייבחנו סלי שימושים חלופיים בהרכבים שונים. באמצעות מנגנון השוואתי המתעדכן באופן שוטף בנתוני מרחב הפעולה ייבחר סל שימושים מיטבי, הממצה בשקלול עלות-תועלת כוללת כאמור לעיל את הערך הגלום באפר למשק במגוון היישומים, במגבלות נורמטיביות (איכותיות וסביבתיות-בריאותיות), במצבי משק משתנים, ומשרת באופן מיטבי את מטרות העל.

רקע משקי כללי

שינויים משמעותיים מתרחשים לאחרונה בחלקו של הפחם בסל מקורות האנרגיה לייצור חשמל, המתבטאים בטווח הקרוב בהפחתה של עד 30% ממנו מסיבות סביבתיות בעיקרן ובטווח הרחוק בהתייצבות מתוכננת ברמה מינימלית המיועדת לתחזק כושר ייצור פחמי זמין מסיבות ביטחון אנרגטי. על פי החלטת משרדי האנרגיה והגנת הסביבה ידוממו בשנת 2022 4 היחידות בתחנת הכח אורות רבין שהחלו לייצר חשמל משריפת פחם במחצית הראשונה של שנות השמונים במאה הקודמת. עמדת שר האנרגיה היא כי בעוד 12 שנים, דהיינו 2030, מועד החופף בקירוב למוצע יתרת החיים הטכנו-כלכליים המתוכננים של מערך ייצור החשמל מפחם הנוכחי, ידוממו כל שאר היחידות הפעילות היום ולא ייוצר עוד חשמל מפחם בישראל.

מאידך גיסא ענף הבנייה, המשתמש העיקרי באפר הפחם, צומח לפחות בקצב גידול האוכלוסייה. המשמעות המשקית העולה מהתפתחויות אלה היא מחד גיסא היווצרות מחסור באפר בעל השפעות טכנו-כלכליות מרחיקות לכת וסטייה מאיזון משני צדי משוואת 'ייצור=ניצול' בטווח המידי, ומאידך גיסא הגברת אי הוודאות עקב שחיקה בהיקף השוק הזמין המאתגרת את יכולת המערך לתפקד ביעילות בטווח הארוך יותר, בעיקר במצבי משבר במשק בכלל ובענף החשמל בפרט ואף בחריגה משגרה תפעולית, העלולים לחולל שינויים חריגים בהיקפי ייצור האפר ובניצולו.

שינויים אלה ומשמעויותיהם מחייבים בחינה הן של הנחות היסוד ומדיניות הפיתוח והקיים של מערך שימושי האפר והן של עקרונות הפעולה של המנהלת. לכך יש להוסיף את השפעת יבוא אפשרי של אפר כמענה למחסור.

נתוני היסוד

סקירת נתוני היסוד כוללת תיאור תמציתי של השימושים, תועלותיהם ועלויותיהם למשק; כמויות היצע האפר והביקוש ועודף הביקוש הנגזר מהערכות אלה.

סקירת שימושים פעילים

האפר מהווה בכל שימושי תחליף לחומרי חציבה ו/או מוצרי ביניים המנוצלים לייצור המוצרים ועקב תכונותיו תורם גם לערך מוסף ייחודי מעבר לערך תחליפיו הנחסכים.

ענף הבנייה²

צמנט

האפר משמש את תעשיית הצמנט לשלוש מטרות:

- תחליף לחלק ממרכיבי הקלינקר (חרסית וחול) ומשפר אלומינה כנגד חרסיות נחותות – אפר תחתית וכן עודפי אפר מרחף שהורטב ואוחסן בערימה.
- תוסף פוצלני לצמנט CEMII³ במהלך טחינת הקלינקר, עד 10% ממשקל הצמנט – אפר מרחף העומד בתקן האפר לבטון.

בנוסף לכך, מנצלת תעשיית הצמנט את האפר המרחף הפסול לתעשיית הבטון (LOI גבוה מ – 7%) כח"ג בייצור הקלינקר.

² סקירת שימושי אפר פחם בענף הבנייה, מתוך אתר המנהלת

³ CEMII מכיל קלינקר טחון בשיעור 80% ותוספים – אפר, סיגים וגיר, עד 20%.



יבואני הצמנט מוסיפים לצמנט אפר מרחף בריכוז המותר על פי התקן. יצוין כי תקן הצמנט מאפשר שימוש בסוגים רבים המבוססים על הרכבים שונים של התוספים (אפר מרחף, סיגים, אבן גיר) בשיעורים שונים (עד 10% כאמור בצמנט העיקרי CEMII המצוי בשימוש בארץ, ובריכוזים גבוהים יותר – עד 35%, שיישומם טעון תהליך הוכחת איכות המתאימה לתנאי תעשיית הבנייה הארץ). כמו כן לצמנט המשווק בשקים והמשמש בעיקר לשיפוצים מוסיפים בסביבות 4% אפר מרחף. המסמך איננו מתייחס לצמנט זה בשל חלקו הקטן בשוק.

בטון

אפר מרחף משמש כתוסף פוצלני לבטון המאפשר החלפה חלקית של צמנט וכמלאן המחליף חלקית חול דק גרגר. בממוצע מוסיפים אפר מרחף לבטון בכמות של 100 ק"ג למ³. האפר המרחף מחליף צמנט ביחס של 2 (אפר) / 1 (צמנט) בדרגות חשיפה 1 – 4 (אופייניות לאזורים פנים ארציים דלי השפעות קורוזיביות) ומחליף חול בכל אזורי הארץ ביחס המשקלים הסגוליים 1 (אפר) / 1.2 (חול).

תרומתו של האפר המרחף לבטון מתבטאת בשלל תכונות ייחודיות הן בשל השתתפותו הכימית בתהליך ההידרציה של הצמנט ובשפעולו והן בשל תפקידו כמלאן איכותי המאופייין בגודל גרגר נמוך (ממוצע כ- 20 μm) שצורתו כדורית:

- שיפור עבירות הבטון הטרי המתבטא בהפחתת איבוד מים (Bleeding), בזרימות טובה המאפשרת מילוי תבניות ללא בועות אוויר לכודות,
- הקטנת תצרוכת מים,
- הגדלת לכידות הבטון,
- הקטנת חדירות לגזים המחוללים תהליכי קורוזיה,
- שיפור עמידות בפני סולפטים,
- הגדלת חוזק בגילים מאוחרים,
- הקטנת טמפרטורה מרבית בבטון רב נפח (חום הידרציה) המפחיתה סיכוני סדיקה,
- שיפור פני המוצר – חלקות ואחידות,
- לעומת זאת, האפר גורם להאטת התפתחות החוזק בגילים צעירים. הוא עלול לעכב פירוק טפסות והוא מחייב הקפדה על האשפרה התקנית.

לאפר המרחף המוסף לבטון תרומה ייחודית בהפחתה בשיעור 25% של מנת הקרינה הכוללת מגמא ורדון בהשוואה לקרינה מגמא, לה נחשפים בני אדם בשהייתם בבניינים העשויים בטון, בשל הקטנת החשיפה לרדון כתוצאה ממילוי חללים ומעברים במסת הבטון, המאט את קצב שפיעתו והצטברותו של הרדון בחללי השהייה⁴.

שיטת הבנייה בישראל מבוססת במידה רבה על בטון. כמות הבטון הנדרשת לבנייה למגורים בממוצע שיטות ויעודי הבנייה השונים (בנייה רוויה ופרטית) היא 112 מ³ ליחידת דיור⁵. בהנחה שהתפלגות ניצול אפר מרחף בבטון חופפת להתפלגות יעדי הבטון (הבטון מסופק ליעדיו בהתאם לתכונות הנדרשות על ידי המתכננים, בכפוף לתקן. כאשר מפעל בטון משתמש באפר מרחף הוא יעדיף לספק בטון המכיל אותו לכלל יעדי מסיבות כלכליות) ניתן להעריך כי 50% מהאפר המרחף המוסף לבטון משמש לבנייה למגורים, כ- 10% בבנייה ציבורית וכ- 40% בתשתיות למיניהן⁶.

ההתפלגות הארצית של בטון המכיל אפר מרחף⁷ חופפת במידה רבה את ההתפלגות הארצית (בחלוקה לפי קווי רוחב) של השימוש בבטון לכלל יעדי⁸ (המשקפת את פיזור האוכלוסייה ומרכזי הפעילות המשקית), בהטיה מסוימת אך לא משמעותית לטובת לצפון:

- 10% מדרום לאשדוד,
- 50% במרכז הארץ בין אשדוד לנתניה,
- 40% מצפון לנתניה.

היא מבטאת בעיקר את התועלת הכלכלית בהחלפת צמנט באפר המרחף בשיעור המרבי האפשרי בכל האזורים בהם הדבר אפשרי מבחינת דרישות התקן, אולם גם את יתרון המרחק של האפר המרחף שמקורותיו (תחנות הכח הפחמיות) קרובות יחסית למרכזי הפעילות המשקית והעירונית, בהשוואה לחול המוחלף על ידו שמקורו העיקרי במחצבת

⁴ אפיון רדיולוגי של תערובת בטון נפוצות עם אפר פחם מרחף בהשוואה לבטון ייחוס ללא אפר, נתוני מנהלת

⁵ תחשיב כמות בטון ממוצעת ליחידת מגורים – ג. אירוס, ינואר 2018

⁶ הערכת חלוקת יעדי הבטון ליעודי מגורים, בנייה ציבורית ותשתיות

⁷ מקור: רישום משלוחי אפר מרחף מתחנות הכח

⁸ מקור: אגודת יצרני בטון מובא



החול הפוסילי במישור רותם בדרום הארץ. כיוון שעלות הובלת אפר מרחף כפולה בקירוב מעלות הובלת חול יתרון המרחק מקבל ערך כלכלי מובהק בצפון הארץ בלבד. אולם נראה שמרכיב ההובלה איננו מהווה גורם משמעותי בהעדפת תערובות בטון המכילות אפר פחם בהשוואה לחסכון בעלויות החומרים המוחלפים על ידו. חיזוק להערכה זו ניתן לקבל בערך נמוך המתקבל בחישוב מצטבר ארצי של הפרשי ההובלה של אפר פחם וחול למפעלים בשיעור כ- 10 ₪ בממוצע לטונה אפר פחם, בהשוואה לכ- 300 ₪ החיסכון לטונה אפר בהחלפת חומרי הגלם.

תרומתו היותר משמעותית של האפר המרחף לבטון היא בהארכת הקיים שלו (הארכת משך חיי השירות של המבנה) בזכות שילוב תכונת הפוצוליות התורמת להידרציה של הצמנט ודקות הגרגר, הגורמים, באמצעות ציפוף הבטון, להאטת התבלות שכבת הבטון האמורה להגן על הזיון ולשיפור ההגנה מחדירת גזים ורטיבות המחוללים קורוזיה בזיון. הוספת אפר מרחף בתערובות הבטון מאפשר להאריך את הקיים בכ- 37% ממשך החיים המתוכנן – 50 שנה, לכמעט 70 שנה⁹. בגמר הקיים המתוכנן של הבטון עומדות בפני המשתמשים במבנה אפשרויות שונות בהתאם לרמת הישרדותו: דחיית הטיפול בבטון כאשר מצבו סביר, שיפוץ ושדרוג הבטון כאשר מופיעים סימני בלאי ראשוניים והריסה כאשר הפגיעה בזיון איננה ניתנת עוד לתיקון. הארכת הקיים באמצעות שילוב אפר מרחף בתערובת הבטון דוחה בכ- 20 שנה הזדקקות לכל אחת מאפשרויות אלה.

יודגש כי בלאי הבטון הוא תופעה סמויה מהעין שמתגלה רק כשמצבו מחמיר ומתפתחים סימני סדיקה והתפוררות חיצוניים. לכן לדחיית הטיפול בבטון, המאפשרת לתהליכי הבליה להתמשך ולהתעצם עם הזמן, עלול להיות מחיר גבוה בעתיד, הן בשיפוץ נרחב יותר והן בהגדלת הסיכוי להריסה.

לצורך הערכת התרומה הכלכלית של האפר המרחף לקיים מבני הבטון בארץ, הונח כי:

1. האפר משמש בתערובות בטון המיועדות לבנייה למגורים בלבד. זאת בהתבסס על ההערכה שבניית מבני ציבור הינה בסביבות 10% בלבד מכלל הבנייה בישראל.
2. החישוב מתייחס לדירה ממוצעת ששטח המגורים בה הוא כ- 120 מ"ר.
3. לבניית יחידת דיור ממוצעת משתמשים ב- 112 מ"ק בטון, המיושמים בדירה עצמה ובחלק היחסי של שטחי השירות המשותפים במבנה.
4. תקופת השירות המתוכננת על פי התקינה הקיימת היא 50 שנה. שימוש באפר מרחף בתערובת הבטון תורם להארכת תקופת השירות (קיים) בכ- 37% בממוצע משוקלל ארצי, דהיינו בכ- 20 שנה.
5. כ- 20% מהבנייה היא של יחידות דיור צמודות קרקע. לגביהן הונח כי כ- 50% מהן תהרסנה בתום תקופת השירות. כלומר כ- 10% מכלל הבנייה למגורים.
6. בכ- 90% מהבנייה למגורים, ניתן יהיה להסתפק בשיפוץ שלד הבטון ושיפוץ מערכות שרות שונות הממוקמות בתוך הבטון ומחוברות אליו, כגון צנרות מים, ביוב, דלוחים, חשמל, גז ותקשורת.
7. העלות הממוצעת של מ"ר בנייה כיום בישראל מוערכת בכ- 7,000 ₪. עלות השלד נאמדת בכ- 40% מעלות הבנייה ושיקום השלד ומערכות השירות נאמד בכ- 60% מעלותו.

מוצרי בנייה

אפר מרחף משמש כמלאן המשפר עבידות במוצרי בנייה טרומית של מבנים יבילים גדולים. אפר תחתית המנופה למקטע גודל קטן דומה לשל חול, משמש כמחליף החול בבלוקי בטון ובמוצרי בנייה טרומיים. בנוסף לתרומתו להפחתת עלות הייצור תורם אפר התחתית להפחתת משקל הבלוק – כמחצית משקל החול המוחלף, מדד חיוני בבנייה ידנית, ולשיפור כושר הבידוד למעבר חום בהשוואה לחול.

ענף החקלאות¹⁰

מצע גידול צמחים חקלאי וגנני (אפר תחתית)

מרבית גידולי התרבות - ירקות ופרחים - גדלים בישראל כמו במקומות רבים בעולם במצעים מנותקים מן הקרקע המקומית או כאלה המחליפים את הקרקע. מצעים אלה מיוצרים בתהליכים תעשייתיים ומורכבים מתערובות של חומרים אורגניים (קומפוסט) וחומרים אחרים, אנאורגניים ואורגניים, המיועדים ליצור מדיום גידול מתאים לבית

⁹ אומדן לפרמטרים טכנולוגיים (הארכת קיים) להערכת יתרונות כלכליים לשילוב אפר פחם בבטון, א. בנטור, 4.4.17.

¹⁰ סקירת שימושי אפר פחם בענף החקלאות והגינן, מתוך אתר המנהלת



השורשים, במטרה לאפשר לצמח תנאים מיטביים לגידול ולהשאת יבולים. אפר תחתית המנופה לגודל גרגר מתאים (0 - 8 מ"מ) משמש, בתערובת עם קומפוסטים ממקורות שונים ובלעדיהם, מצע בעל תכונות המבוקשות לצמח:

- יחס אוויר מים רצוי,
- מוליכות ותאחיזה של מים בשיעורים טובים,
- נקיון ממחלות ועשבי בר,
- יציבות במרקם המצע.

משקלו הנמוך בכ- 30% ממשקל הטוף נותן לו יתרון בגינון על מבנים (מרתפי חניה, גגות וכו').

ייצוב בוצת שפכים ליעוד חקלאי (אפר מרחף)

בוצת שפכים עירונית היא מוצר לוואי מתהליך הטיהור במתקן טיהור שפכים. הבוצה המיוצבת ניתנת לשימוש כדשן משום שהיא עשירה בחומר אורגני וביסודות הזנה לצמחים, אולם מתכות כבדות ופתוגנים – חיידקים גורמי מחלות, מגבילים את אפשרות ניצולה בחקלאות. הואיל ובישראל ניצול מועיל של בוצת שפכים עירונית ניתן רק כתוסף לקרקע חקלאית יש לייצב אותה לרמה תקנית מסוג א'. כלומר לוודא כי ריכוז המתכות הכבדות איננו חורג מדרישות התקנות וכן שריכוז אוכלוסיות הפתוגנים מופחת לרמה שאין בה סכנה בריאותית לעובדים ולניזונים מהיבול החקלאי.

אפר מרחף משמש יחד עם סיד, כחומרים אלקאליים, בשיטת N-Viro, כתוסף מייצב המסייע בהפחתת פליטת נדיפים אורגניים, בפיסטור הפתוגנים ובקיבוע המתכות הכבדות וכן בשינוי מרקם הבוצה לקבלת חומר פריר ונוח לפיזור. בנוסף לכך ערבוב אפר מרחף בקרקע חרסיתית משפר את המבנה האגרו-מכני שלה ואת פוריותה וביחסים מתאימים של מרכיבי הבמס"א הוא מסייע בדיכוי מחלות שוכנות קרקע.

התוצר – במס"א (בוצה מיוצבת בסיד ואפר), המתקבל בתהליך N-Viro, מפוזר ומוצנע בקרקע בשדות פלחה בכמות של 3 - 5 טונה לדונם במשטר מחזורי אחת ל- 3 - 5 שנים. ריכוז האפר בקרקע המעורבת בכל פיזור הוא בקירוב 1%.

בניסויי שדה שנערכו בפיקוח מכון וולקני נמצא שלבמס"א ערך מוסף משמעותי בשיפור היבול ובאיכותו. ערך זה כומת ע"י צוות מחקר ממשד החקלאות¹¹. הואיל ולא ניתן לייצר במס"א בישראל ללא אפר מרחף, יש לייחס לו את הערך המוסף.

ענף התשתית¹²

סלילה ומילוי מבני

אפר, מרחף ותחתית, משמש כחומר מילוי מבני המחליף חול וחומרי מילוי תקינים בסוללות מחלפים ובכבישים. יישום אפר מתבצע בגרעין הסוללה, כרוך בנהל בקרת איכות מחמיר בהשוואה לשימוש בחול ומותנה בדרישות מבניות ייחודיות להבטחת הפרדתו מהסביבה גם בתנאי מזג אוויר קשים מחוללי ארוזיה. בשל תכונת הפוצולניות אפר פחם משפר משמעותית את יציבות הסוללות ועמידותן בעומסי התנועה בהשוואה לחול האינרטי. השימוש באפר לסלילה ולמילוי מבני בתשתיות אפשרי ומתבקש בפרויקטים בהם יש להשתמש בחומר מיובא כאשר לא ניתן לאזן את חומרי הסלילה המקומיים בין חפירה למילוי.

מתקנים תת קרקעיים

אפר תחתית מהווה תחליף איכותי לחול בריפוד מתקני תשתית תת-קרקעיים – צנרת ביוב, מים, תקשורת וכדומה, העשויים בטון או פוליאטילן. בזכות מרקם החלקיקים הייחודי ותאחיזת המים מהווה אפר התחתית חומר יציב המונע היווצרות כיסי חולשה במעטפת המתקנים ועומסי עיווי על המתקנים, המתרחשים בחומרים המוחלפים, למשל חול, במצבי גלישה ופיזור של חומר המעטפת בזרימת מי משקעים.

כמות האפר הצפויה

בהתאם להנחיית שר האנרגיה להפחית את היקף ייצור החשמל ל- 70% מרמת הייצור בשנת 2015, צפויה כמות של כ- 750 אלף טונה אפר בשנה, מתחילת 2018 ועד 2022. מתוכם כ- 670 אלף טונה אפר מרחף וכ- 80 אלף טונה אפר תחתית.

ביקושים לאפר

¹¹ ה. אפרת וחובי, משרד החקלאות, 27.1.216.

¹² סקירת שימושי אפר פחם בענף החקלאות והגינון, מתוך אתר המנהלת



האפר מנוצל בעיקר בענף הבנייה, כ- 95% מכלל האפר. הוא משמש כח"ג המחליף חרסית בייצור קלינקר וכתוסף לצמנט, וכן כתוסף לבטון מובא. כ- 5% מכמות האפר, מרחף ותחתית, מסופקת לכלל השימושים האחרים – תוסף (מרחף) ואגרנט (תחתית) במוצרי בנייה, מעטפת (תחתית) מתקנים תת קרקעיים, מצע גידול צמחים (תחתית) בחקלאות ובגינות, טיפול בשפכים (מרחף) לחקלאות ותוסף (מרחף) לאספלט.

בענף הבנייה

צמנט

בהתאם להערכת אינג' ג. אירוס¹³ פוטנציאל השימוש באפר מרחף בתעשיית הצמנט, לרבות יבוא הצמנט, בשנת 2018 עולה על 1.5 מיליון טונה. בהנחת הקצאה השוויונית של אפר מרחף לתעשיית הצמנט (לרבות צמנט מיובא) והבטון, תוגבל אספקת האפר המרחף לתעשיית הצמנט, לרבות יבוא צמנט המעורב בארץ באפר מרחף, לכ- 300 אלף טונה. כמו כן ינוצלו כ- 40 אלף טונה אפר תחתית כח"ג לייצור קלינקר. בסה"כ תוגבל אספקת אפר פחם לתעשיית הצמנט בכללה – מקומית ויבוא, לכ- 340 אלף טונה בשנה. כלומר עודף הביקוש על ההיצע בתעשיית הצמנט יעמוד בשנת 2018 על 1.16 מיליון טונות בשנה.

בטון מובא

בהתאם להערכה הנ"ל פוטנציאל השימוש באפר מרחף בתעשיית הבטון המובא, כמחליף חלקי לחול ולצמנט, בשנת 2018 עולה על 900 אלף טונה. בהנחת הקצאה שוויונית של אפר מרחף כאמור לעיל תוגבל אספקת האפר המרחף לתעשיית הבטון לכ- 300 אלף טונה לכל היותר. כלומר עודף הביקוש על ההיצע בתעשיית הבטון המובא יעמוד על כ- 600 אלף טונה.

מוצרי בנייה

לאפר תחתית המנופה למקטע גודל הגרגר של אגרנט דק פוטנציאל שימוש במוצרי בטון טרומיים ובבלוקים כמחליף חול העולה בסדרי גודל על פוטנציאל הייצור – 40 אלף טונה בשנה, של הנפה בתחנת הכח רוטנברג. לכאורה ניתן להפעיל נפה גם בתחנת הכח אורות רבין בהיקף דומה, אולם לא נראה שבתנאים הנוכחיים ייווצר תמריץ מסחרי להפעלתה.

בענף החקלאות

ייצוב בוצת שפכים (במס"א)

כושר הייצור של מתקן הטיפול בשפכים בשיטת N-Viro בשפד"ן הוא כ- 100 אלף טונות במס"א בשנה שלייצורם נדרשים 40 אלף טונות אפר מרחף. בהנחת תפעול חלקי של המתקן כמשלים למתקני העיכול האל-אוורני, ככל שהתפעול השוטף ידרוש זאת ובמצבי כשל של מתקנים אלה וכן כנותן שירות טוב בוצת שפכים ממטש"ים באזור המרכז מדרגת סוג ב' לסוג א', צפויה דרישה לכמות שנתית של אפר מרחף בהיקף של כ- 20 אלף טונות. בהנחת הקמת שני מתקנים דומים נוספים בדרום ובצפון, ככל שייוצרו תנאים מסחריים להקמתם, צפוי ביקוש של כ- 60 אלף טונה אפר מרחף בשנה. למטרה זו ניתן יהיה להשתמש באפר המרחף הפסול הצפוי בהיקף דומה¹⁴.

היקף השטחים המתאימים לגידולים המורשים ע"י משרד הבריאות עומד על כ- 2 מיליון דונם, המאפשר פיזור הבמס"א בריכוז של 5 טונה לדונם בתדירות של 3 – 5 שנים בכמות גדולה למעלה מפי 10 כושר הייצור של המתקן בשפד"ן. בהקמת מתקנים נוספים כאמור לעיל בצפון ובדרום יהיה פוטנציאל השימוש החקלאי גבוה פי 5 מכושר הייצור הארצי.

מצע גידול צמחים חקלאי וגנני

כמחליף טוף במצע גידול צמחים פוטנציאל הביקוש לאפר תחתית המנופה למקטע בפילוג גרגר דומה לשל טוף עולה בסדר גודל על פוטנציאל הייצור – 20 אלף טונה בשנה, של הנפה בתחנת הכח רוטנברג. לכאורה ניתן להפעיל נפה גם בתחנת הכח אורות רבין בהיקף דומה, אולם לא נראה שבתנאים הנוכחיים ייווצר תמריץ מסחרי להפעלתה.

רפד לבעלי חיים

בשל שיפור בתנאי גידול פרות לחלב, הצורך בחומרי ריפוד למרבץ הפרות קטן באופן משמעותי מאז החל השימוש באפר תחתית למטרה זו בתחילת שנות האלפיים. יש להניח ששימוש זה ילך ויעלם למעט רפתות מעטות.

בענף התשתיות

¹³ ייצור אפר הפחם בתעשיית הצמנט והבטון המובא, ג. אירוס, 17.9.17

¹⁴ מכיל שארית פחמן לא שרוף החורגת ממגבלת תקן אפר מרחף כתוסף לבטון.



סלילה ומילוי מבני

ניצול אפר, מרחף ותחתית, בפרויקטים בסלילה אפשרי רק בהצטבר מלאי גדול בהיקף עשרות אלפי טונה, המתאים לאספקה רציפה של אלפי טונה ביום בקצב הנדרש להקמת מילוי מבני מעובד (מורטב ומהודק) בסוללות כבישים. במשטר אספקת אפר הפחם לשימושו בקצב ייצורו אין אפשרות ליעדו לסלילת כבישים, אלא בחריגה משמעותית משגרה משקית הגורמת להצטברות לא מתוכננת בכמויות גדולות. זאת כמובן רק בהתקיים כושר אחסון מספק מחוץ לחצרי תחנות הכח. למשל בעת מלחמה בה פוחתת פעילות המשק בכלל ובתחום הבנייה בפרט, או אם מתחולל משבר באספקת גז טבעי המחייב הפעלת היחידות הפחמיות בעומס מלא החורג משמעותית משגרת המינימום המוכתבת במדיניות מקורות האנרגיה לייצור חשמל.

מילוי תת קרקעי

אפר תחתית משמש כאמור כמחליף חול לריפוד מעטפת מתקנים תת-קרקעיים. פוטנציאל השימוש באזורים המרוחקים ממקורות החול, שעלויות הובלתו גבוהות יחסית, גדול בהרבה מהכמויות הזמינות. עם זאת יש להניח כי במצב החוסר הקבוע של אפר, המנוצל בשימושים כלכליים יותר – ח"ג לקלינקר המחליף חרסית, מצע גידול צמחים המחליף טוף ואגרגט מחליף חול במוצרי בנייה, הכמויות שתיוותרנה ללא שימוש חלופי שוטף תהיינה זניחות.

היבטים סביבתיים ביישומי אפר פחם

השפעות סביבתיות ישירות

הסיווג הסביבתי של האפר, המתואר לפרטיו באתר המנהלת (להלן בסעיפי הסביבה המתאימים), מציג באופן ברור כי כל גורמי הסביבה בעולם מתייחסים אליו כחומר שאין סכנה בטיפול בו ובשימושו בכל ההיבטים הסביבתיים – שטיפת מתכות כבדות, חשיפה לקרינה מייננת וחשיפה לאבק: OECD כולל אותו ברשימת Green List; התקן הבינלאומי להגנה מקרינה פוטר אותו מבקרה ופיקוח והוא מסווג בכל העולם כאבק שאיננו מזיק. Final Rule של USEPA משנת 2014 מסווג את האפר כשארית לא מסוכנת משריפת פחם ואיננו דורש תנאי סביבתי כל שהוא בשימושו. כך גם האיחוד האירופי.

בישראל ננקטה מדיניות מחמירה המגבילה בתנאים סביבתיים שימושים שקיים בהם חשש, אף נמוך, לפגיעה סביבתית. בהישמר תנאים אלה, ההשפעות הסביבתיות של יישום אפר הפחם הן זניחות. זאת בהסתמך על הערכת סיכונים מקיפה לכלל השימושים בענפי המשק השונים הנובעת מגוף המחקרים הרחב שבוצעו ע"י המנהלת¹⁵.

מתכות כבדות¹⁶

אפר מרחף

בתהליך היווצרות האפר המרחף בדוד השריפה בתחנת הכח, מתעבים חלק מהיסודות הנדיפים על פני גרגרי האפר המרחף, הנסחפים בגזי הפליטה, באזור בו מתחילה התקררותם. יסודות אלה נשטפים בקלות יחסית מהאפר הטרי, אולם תהליכי הזדקנות מהירים למדי (חודשים אחדים) של האפר המרחף הנחשף לסביבה מפחיתים משמעותית את שטיפתם ולמעשה אחוז זניח מתכולת היסודות מגיע לסביבה ביישומי תשתיות וחקלאות. ביישום אפר מרחף כמילוי מבני בסוללות מתחולל תהליך שקיעת גיר (תוצאת הריאקציה בין הקלציום המצוי באפר הפחם ו- CO₂ באוויר, בסביבה מימית) הממלא את החללים בין גרגרי האפר ומונע חדירה של מים. כמו כן תגובתו הפוצולנית של האפר המרחף למים בתהליך עיבודו כמלאן מבני בתשתיות סלילה ומילוי וכתוסף לקרקע ישירות או באמצעות במס"א, מחוללת תהליך הידרציה המקבע מתכות כבדות ומפחית זמינותן לסביבה.

ואמנם התנאים הסביבתיים המשודרגים ליישומי אפר מרחף בתשתיות ובחקלאות מתבססים על הערכה סביבתית זו¹⁷.

אפר תחתית

תהליך המיון הטכנולוגי של האפר בדוד השריפה גורם לאפר התחתית, בשל משקלו הגבוה יחסית, ליפול לתחתית הדוד בשלב בו הוא נוזלי ולוהט. ההתקררות המהירה של אפר התחתית בבריכת המים שבתחתית הדוד מקנה לגרגריו מרקם קרמי הכולא את המתכות הכבדות בתוך הגרגרים ומונע כמעט לחלוטין את שטיפתם בחשיפה למים.

¹⁵ הערכת סיכונים של שימושי אפר פחם בבנייה, מתוך אתר המנהלת

¹⁶ סיווג אפר פחם בתקניה הסביבתית והבריאותית הבינלאומית – יסודות קורט, מתוך אתר המנהלת

¹⁷ שידרוג התנאים הסביבתיים לשימושי אפר פחם בקרקע – סלילה, תשתיות וחקלאות, דצמבר 2015



ואמנם התנאים הסביבתיים לאפר תחתית ביישומי קרקע, הן כחומר מילוי מבני בתשתיות, הן כחומר ריפוד לתשתיות תת-קרקעיות והן כמצע גידול צמחים, מקלים בהרבה מתנאי האפר המרחף.

קרינה מייננת¹⁸

האפר מכיל, ככל החומרים הנכרים מקליפת כדור הארץ, יסודות רדיואקטיביים טבעיים. ריכוזי היסודות הרדיואקטיביים המצויים בפחם נשארים במרביתם, בתהליך שריפת הפחם, בחומר המינרלי המרכיב את האפר ולפיכך ריכוזיהם בו גבוהים מריכוזיהם המקוריים בפחם בשיעור האפר בפחם בקירוב. עם זאת ריכוזים אלה נמוכים פי 4 ומעלה (מותנה במקור הפחם) מערכי הסף לפטור מדרישות התקן הבינלאומי להגנה מקרינה של סבא"א (טבלה 13, עמוד 128 בתקן) ובממוצע הערכים של מקורות הפחם הם נמוכים פי 7 בקירוב עבור רדיום Ra^{226} ותוריום Th^{232} ופי 33 עבור אשלגן $^{40}K^{19}$.

ואמנם גרסת התקן הבינלאומי להגנה מקרינה מייננת משנת 2014²⁰ של הסוכנות הבינלאומית להגנה מקרינה (סבא"א), המסווגת את אפר הפחם כחומר שיסודותיו הרדיואקטיביים הינם ממקור טבעי (Radionuclides of Natural Origin) ואת שימושו כמצב קיים (Existing Exposure Situation), פוטרת את אותו עצמו ושימושו מכל רגולציה. יתר על כן, לפי הנחיות התקן לא נדרשת אופטימיזציה של פעולות הגנה מקרינה במוצרי בנייה המכילים יסודות רדיואקטיביים ממקור טבעי שתרומתם מתחת לרמת ייחוס של 1 mSv/y. הדירקטיבה האירופית משנת 2014 להגנה מקרינה איננה מגבילה את השימוש באפר פחם בכלל ובמוצרי בנייה בפרט ומצמצמת את דרישותיה לעמידת המוצר, ללא הבחנה בהרכב חומרי הגלם, במדד (אינדקס) הקרינה וכן לדיווח לרשות המוסמכת, לפי דרישתה, של ריכוזי היסודות הרדיואקטיביים באפר, כבחומרים אחרים המשמשים ליעודים דומים, בלבד.

יובהר כי בכל השימושים האפר מחליף חומרי חציבה המכילים אף הם יסודות רדיואקטיביים, חלקם בסדר הגודל של תכולתם באפר, ולפיכך תרומתו הכוללת למנת הקרינה במוצר (כביש, תשתית, מוצר בנייה, שדה חקלאי, גינה) נמוכה מחישוב הנגזר מריכוזי היסודות אשר בו בלבד.

יצוין גם כי בישראל שורר משטר הגבלה על ריכוזי היסודות הרדיואקטיביים במוצרי בנייה באמצעות תקן ת.י. 5098 – ריכוזי יסודות רדיואקטיביים טבעיים במוצרי בנייה²¹, שקובע ערכים מרביים מותרים למנות הקרינה מהמוצר ללא הבחנה בהרכב חומרי הגלם אשר בו, אולם בדיעבד הוא מגביל לכאורה את תרומתו של אפר הפחם יחד עם הגבלת תרומת כל אחד מחומרי הגלם האחרים, למנת הקרינה הכוללת של המוצר. כמו כן תקן ת.י. 118 – בטון: דרישות, תפקוד וייצור, מגביל את תכולת האפר המרחף כתוסף לבטון ל-160 ק"ג (דרישה ייחודית לישראל). המנהלת בחנה את מנות הקרינה המייננת להן נחשפים אנשים מהציבור ביישומיו השונים ומצאה אותן זניחות בהתאם להגדרות התקן הבינלאומי.

בבטון למגורים²² נמצא שהמנה הנתרמת ע"י האפר המרחף בבטון המשמש למגורים, הכוללת קרינת גמא ורדון היא 0.016 mSv/y לאדם מהציבור. יצוין כי קרינת הגמא לבדה גבוהה יותר – 0.02 mSv/y, זאת משום שהאפר המרחף מפחית את שפיעת הרדון מהבטון בכ- 25% בהשוואה למנת הקרינה מהגמא לבדה. זאת בזכות ציפוף הבטון ע"י גרגרי האפר ותרומתו לתגבור תהליך יצירת מוצרי ההידרציה בבטון המרסנים את פעופע הרדון דרך החללים ומעבר האוויר בבטון²³. מנת קרינה זו מהווה 0.8% (פחתו ממאת) מרמת הקרינה הטבעית מכלל המקורות – 2 mSv/y, לה נחשפים בני אדם בישראל²⁴. רמה זו נחשבת זניחה משום שהיא מצויה בתחם השתנות הקרינה הטבעית.

בצמנט למגורים תרומת האפר לקרינה מהצמנט מתבטאת בשני מסלולי ניצולו בייצור הצמנט. כח"ג בייצור קלינר הוא תורם את ריכוזי היסודות שבו בלבד. כתוסף לצמנט הוא

¹⁸ [סיווג אפר פחם בתקינה הסביבתית והבריאותית הבינלאומית – יסודות רדיואקטיביים](#), מתוך אתר המנהלת

¹⁹ [ריכוזי רדיונוקלידים באפר פחם ישראלי](#), נתוני מנהלת

²⁰ [Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA, 2014](#)

²¹ [סקירה כללית של ת.י. 5098](#), מתוך אתר המנהלת

²² תחשיבי המנהלת מתבססים על מודי מודל ת.י. 5098 באשר למנת הקרינה ממבנה במידות נתונות.

²³ [חישוב תרומת אפר פחם מרחף כתוסף לבטון למגורים למנת הקרינה](#)

²⁴ [הערכת החשיפה של הציבור בישראל לקרינה מייננת ממקורות טבעיים, ל. כהנא, אוניברסיטת בן-גוריון, 2012](#)



תורם גם את תכונתו כמפחית שפיעת רדון. בסה"כ תורם האפר 0.01 mSv/y לאדם מהציבור במבנה מגורים הבנוי מבטון שנעשה בו שימוש בצמנט CEMII המכיל אפר²⁵. דהיינו 0.5% מרמת הקרינה הטבעית.

בגינן²⁶ נמצא כי תערובת אפר תחתית המנופה גס עם 30% חומר אורגני, כמולץ ע"י מפתח המצע, פרופ' יונה חן מהפקולטה לחקלאות, תרומת האפר למנת הקרינה לאדם מהציבור בהשוואה לטוף כחומר המוחלף על ידו, אינה עולה על 0.001 mSv/y²⁷. דהיינו 0.05% מרמת הקרינה הטבעית.

בחקלאות תרומת אפר הפחם, המשמש לייצוב בוצת שפכים עירונית (במס"א) המיועדת לטיוב קרקע, למנת קרינה לה נחשף החקלאי, נבחנה באופן שמרני מאד ע"י דר' ז'אן קוד משטח בטיחות קרינה בממ"ג-שורק ונמצא כי היא אינה עולה על 0.0022 mSv/y²⁸. דהיינו קטנה מ- 0.11% מרמת הקרינה הטבעית.

אבק²⁹

לא קיימת הגדרה ייחודית לאפר בתקנות אבק במדינות מובילות בעולם כדוגמת ארה"ב, גרמניה והולנד. גם במסמך ארגון הבריאות העולמי הסוקר את הסיכון הבריאותי בחשיפה לאבק מינרלי אין התייחסות לאפר. במדינות בהן ישנה התייחסות לאפר בתקנות אבק, הוא אינו מוגדר כאבק מזיק (בהתאם לתכולת הסיליקה הגבישית החופשית באוויר) וההתייחסות אליו היא כשל אבק מכל סוג שהוא (Dust of any kind, אנגליה) או כזה שאין לגביו מגבלות ייחודיות PNOR/S - Particulates Not Otherwise Regulated/Specified (ארה"ב).

הקוורץ באפר אינו פעיל ביולוגית כי מרבית פני השטח שלו אינם חשופים אלא מצופים באלומינו-סיליקט, זאת בשל שריפת הפחם בטמפ' גבוהות והטיפול התרמלי שעובר הקוורץ בפחם. תופעה זו מובהקת באבק האפר המרחף בר הנשימה, בשל הפעילות הכימית המוגברת על פני השטח הגדולים יחסית של החלקיקים. תכולת הקוורץ באפר המרחף במקטע בר נשימה מגיעה ל- 0.1% וכ- 60 – 86 אחוז ממנו כלואים בצפוי אלומינו-סיליקטי המונע חשיפת פני השטח שלהם. כלומר, אפר מרחף בר נשימה מכיל בין 0.014 – 0.04 אחוז קוורץ חופשי.

באפר התחתית אחוז הקוורץ בר הנשימה נמוך עוד יותר, הן משום שמרבית הגרגרים גדולים והקטנים יותר, לרבות בני הנשימה, לכודים בתלכידים של חלקיקי האפר הגדולים.

להבדיל ממדינות העולם, בישראל הוגדר לפני שנים האפר בתקנות אבק מזיק בטעות כסיליקה גבישית חופשית. זאת על יסוד הנחה שהואיל והסיליקה מהווה למעלה מ- 50% באפר הפחם, גם הסיליקה הגבישית החופשית בת הנשימה מצויה בו בשיעור גבוה. אולם בימים אלה מקדם מנהל הבטיחות והגהות התעסוקתית במשרד העבודה תקנה חדשה המבטל הגדרה זו של האפר.

השפעות סביבתיות עקיפות

יישום אפר כמחליף חומרי חציבה ומוצרי ביניים תעשייתיים תורם בעקיפין בשלל היבטים סביבתיים:

בייצור צמנט השימוש באפר פחם כמחליף קלינקר, הן כתוסף עד 10% משקלית לצמנט CEMII והן כתוסף לבטון המחליף כ- 10% מהצמנט בתערובת הבטון, מונע פליטת מזהמים הכרוכים בייצור הקלינקר, בראשם CO₂ המתקבל משריפת הגיר המוזן יחד עם חומרי הגלם האחרים לכבשן.

ייצור 1 טונה קלינקר כרוך בפליטת כ- 1 טונה CO₂. כתוסף לצמנט CEMII מחליף האפר קלינקר ביחס 1:1. בבטון מחליף האפר קלינקר ביחס של 1:2 בדרגות חשיפה 1 - 4 בתקן הבטון (ת.י. 118).

כמחליף קלינקר תורם האפר להפחתת מזהמי אוויר נוספים – SO_x, NO_x, TOC וחלקיקים.

²⁵ [חישוב תרומת אפר פחם כח"ג לקלינקר וכתוסף לצמנט למנת הקרינה מצמנט בבטון למגורים](#)

²⁶ תחשיבי המנהלת מתבססים על דו"ח ז' קוד, שורק, 6.2.02

²⁷ [חישוב תרומת אפר תחתית כמצע גידול צמחים בגינן למנת הקרינה](#)

²⁸ [הערכת החשיפה לקרינה משימוש בבוצת שפכים מיוצבת המכילה סיד ואפר מרחף \(במס"א\) בקרקע חקלאית –](#)

[ד"ר ז'אן קוד, ינואר 2010](#)

²⁹ [סיווג אפר פחם בתקינה הסביבתית והבריאותית הבינלאומית – אבק, מתוך אתר המנהלת](#)



בכריית מחצבים השימוש באפר כמחליף ח"ג לייצור קלינקר וצמנט לבטון, חול לייצור בטון ולמילוי מבני בתשתיות, סיד ומלאן בייצוב בוצת שפכים וטוף כמצע גידול צמחים, מפחית נזקים סביבתיים הכרוכים בחציבה - אבק, רעש וזיהומי אוויר מהפעלת הציוד המכני והתעשייתי בכרייה ובעיבוד החומרים.

בהובלת חומרי הגלם בשל קרבת תחנות הכח הפחמיות לריכוזי האוכלוסייה ולמרכזי הפעילות המשקית יחסית למרחק ממקור החול בדרום הארץ תורם השימוש באפר להפחתת עומס תעבורת המשאיות וכנגזר ממנו פליטת מזהמי אוויר וסיכוני תאונות.

בשימור משאבי טבע המצויים במחסור בהפחתת ניצול חול, גיר, חרסית וטוף המוחלפים בייצור המוצרים, בפיתוח בר קיימא בין דורי.

בשימור הסביבה הטבעית במניעת כרייה בפיתוח בר קיימא.

בדישון והדברה בחקלאות בהחלפת כימיקלים תעשייתיים ע"י במס"א המיוצבת באפר מרחף.

תגובה באירוע משברי

ההסתמכות ההולכת וגדלה על גז טבעי כמקור אנרגיה לייצור חשמל, וההפחתה הנגזרת של הפחם, טומנת בחובה סיכונים למשברים בייצור החשמל עקב כשל באספקת הגז. מערך הפקת הגז ואספקתו חשוף לכשלים תפעוליים ולארועים ביטחוניים בעלי פוטנציאל משברי משמעותי בייצור החשמל. בהתרחש ארוע כשל באספקת הגז תידרש הפעלה של יחידות הייצור הפחמיות בעומסים גבוהים בהרבה מרמת התפעול הנמוכה בשגרה (על פי מדיניות מקורות האנרגיה הנוכחית לייצור חשמל), ובהיווצרות כמויות אפר החורגות מהרמה המנוצלת בשגרה. התכווצות אוכלוסיית המשתמשים באפר בענפי המשק השונים, בעיקר בתחום הבנייה – צמנט ובטון מובא, עקב הפחתת כמות האפר הזמינה בשגרה, מקטינה את יכולת המשק להתאים את עצמו בפרק זמן סביר לקליטת הכמויות החריגות. במצב זה עלולים להצטבר בתחנות הכח הפחמיות עודפים גדולים של אפר שאין להם יעד מתאים ולסכן את תפעולן התקין בהעדר נפח אחסון מספק בחצרי תחנות הכח ואתר אחסון מוסדר מחוץ להן.

בהנחת צמצום יצור החשמל מפחם בכ- 30% מרמת הייצור שהיתה בשנת 2015, בהתאם להוראת שר האנרגיה, תפחת כמות האפר הזמינה למשק לרמה של כ- 750 אלף טונות בשנה – כ- 670 אלף טונות אפר מרחף וכ- 80 אלף טונות אפר תחתית. בהנחה שמגבלת 70% תחול על יחידות הייצור הנותרות לאחר ההדממה המתוכננת של היחידות הוותיקות באורות רבין, תפחת כמות האפר לרמה של כ- 520 אלף טונות בשנה – כ- 470 אלף טונות אפר מרחף וכ- 50 אלף טונות אפר תחתית. במענה להפחתת כמות האפר הזמינה יסיטו המשתמשים את מערך הייצור לחומרים חליפיים, מקומיים או מיובאים.

כושר ייצור האפר של תחנות הכח הפעילות היום, לרבות יחידות הייצור הוותיקות בתחנת הכח אורות רבין, עומד על כ- 1.4 מיליון טונות בשנה (רמת הייצור בשנת 2012 במשבר אספקת הגז המצרי). כושר הייצור החל משנת 2022, לאחר הדממת היחידות הוותיקות, ירד לרמה של כ- 1 מיליון טונות בשנה (נגזר מההספק היחסי של יחידות הייצור מהכמות שיוצרה בשנת 2012).

לעת משבר יידרש אם כך המשק לקלוט בזמן קצר כמות כפולה מהכמות בשגרה, בטווח הקצר (עד 2022) והארוך (מעבר ל- 2022) כאחת. מהירות התגובה והיקפה יהיו מותנים בגמישות הטכנולוגית של המשתמשים לשנות את הרכב חומרי הגלם ובזמינות מתקני האחסון במפעלים. בדיקת כושר האחסון הענפי בתעשיות הצמנט והבטון מעלה כי לתעשיית הבטון על כל מפעליה כושר אחסון מידי כפול בקירוב מזה של יצרני ויבואני הצמנט³⁰. יש להניח כי מהירות התגובה והיקפה לא יתנו פתרון מלא להוצאת האפר מתחנות הכח. בטווח המידי (שבועות) תהיה התגובה נמוכה יחסית לכמויות האפר שייוצרו בשל השגרה הטכנולוגית המסתמכת על תחליפי האפר ובשל מגבלות כושר אחסון חומרי הגלם השוטף במפעלים המשמש תחליפים אלה³¹. בהתמשכות

³⁰ לכ- 165 מפעלי הבטון, הנמצאים במרחק סביר מתחנות הכח, כושר אחסון של כ- 17,000 טונה אפר מרחף (1.15x90x165), למרבית המפעלים סילו בודד שניתן להועידו לאפר בתכולת 90 טונה, במפעלים הגדולים יותר מסילו אחד). ל- 120 מפעלי בטון (2/3 מהמפעלים הפעילים) כושר אחסון פוטנציאלי כולל של כ- 12,000 טונה אפר מרחף. לתעשיית הצמנט כושר אחסון כולל של כ- 6,000 טונה אפר מרחף כתוסף לצמנט וכן 5,000 טונה כח"ג לייצור קלינקר.

³¹ יש להניח שכמחצית נפח האחסון – כ- 6,000 בתעשיית הבטון, כ- 3,000 בתעשיית הצמנט, ישמש ממילא לאחסון אפר בשגרה. לפיכך כושר האחסון העודף הכולל המידי לאפר מרחף מוגבל לכ- 4,500 טונה לעומת תוספת היצע פוטנציאלית פי 3 של כ- 13,000 טונה אפר מרחף בשבוע (675,000/52) לעת משבר באספקת גז טבעי. כלומר צריכים להתקיים 3 מחזורי אספקה בשבוע כדי להימנע מהצטברות עודפים. כושר האחסון העודף המתמשך לתקופה ארוכה יותר יוכל לגדול בעוד כ- 4,000 טונה (0.8x[17,000-12,000]), המצוי ב- 45 המפעלים שאינם משתמשים באפר בשגרה,



המשבר לתקופה של חודשים אחדים ומעלה, יתאים המשק את עצמו בתהליך הדרגתי לרמת ההיצע השוטפת, בתמריצים מסחריים מתבקשים. אולם בשעת חירום מלחמתית עלולים להצטבר עודפים שיהיה הכרח לפנותם מתחנות הכח לאתר אחסון ביניים חיצוני³².

להרכב השימושים ולחלקם היחסי תהיה השפעה משמעותית על כושר הקליטה הכולל של המשק. ככל שמגוון השימושים יהיה רחב יותר וככל שיעדי האפר בשגרה יהיו רבים יותר, הן ברמה הבין-ענפית והן ברמת כל ענף לעצמו, יגבר כושר הקליטה הכוללת ויתקצר משך התגובה המשקי. לפיכך נראה שיש לשמר את החלק היחסי הנוכחי של השימוש באפר בתעשיית הבטון, המאופיינת בביזור רב הן במספר הגופים הפעילים והן במספר היעדים, או לפחות לשמר את הרמה המזערית המבטיחה בתעשייה זו העדפת אפר על פני תחליפיו. לדעת מומחים הרמה הזו היא כ- 300 אלף טונה בשנה (למעשה, במשטר הייצור המוגבל הנוכחי של חשמל מפחם, צפויה רמת הקצאת האפר לבטון להתייצב על כ- 270 אלף טונה בשנה).

אתר אחסון ביניים מוסדר יאפשר תפקוד תקין של תחנות הכח גם בניצול חלקי ונדחה של עודפי האפר, בעלות הנגזרת של הובלה ואחסון חריגים. מנקודת ראות המשק אחסון ביניים יגרום להפחתת ערך האפר בשל הרטבתו, המגבילה אפשרות ניצולו כח"ג לייצור קלינקר המחליף חרסית במקום כתוסף לבטון המחליף צמנט וחול.

תועלת-עלות שימושי אפר פחם

מחיר האפר למשק

כמוצר לוואי, מחיר אפר למשק בשער היציאה מתחנת הכח הוא 0. מחיר האפר למשתמש שקובעת חברת החשמל הינו מדד חלקי בלבד לחישוב ערכו למשק. הוא מבטא את חלקו של צרכן החשמל בתועלת הכוללת למשק המתחלקת בין המוכר לקונה. הערך הכלכלי של האפר למשק מותנה הן בערכו של המוצר המוחלף, במתכונת הטכנולוגית של ההחלפה לרבות היבטיה הסביבתיים, והן בחלופת המחדל לאפר עצמו.

מלכתחילה ערכו של האפר למשק שלילי, כיון שלא די שהוא חומר סרק (ערך אפס) מבחינה אנרגטית, הטיפול בו כרוך בהוצאות בלתי נמנעות. בהינתן אפר ביציאה מהדודים, כאשר ברירת המחדל היא הטמנה, ערך ניצולו המועיל למשק הוא סכום הוצאות ההטמנה הנמנעות וערך המוצר המוחלף (הנחסף) מותאם במקדמי החלפה טכנולוגיים וכן ערך מוסף ייחודי לאפר ככל שקיים כזה. במציאות בו מנוצל האפר במלואו, הואיל והוצאות המחדל נמנעות בעסקים כרגיל, ערכו הוא כשל המוצר המוחלף כאמור בלבד. לכל אלה יש להוסיף את התועלות והעלויות הסביבתיות הנלוות שאינן מקבלות ביטוי במחיר המוצר המוחלף.

ערך אפר בשימושו

הערכת תרומתו הכלכלית של אפר בשימושו מתבססת על ממצאי עבודת "עלות/תועלת שימושי אפר פחם למשק" של ד. לנגר³³.

ערכו של כל אחד מהשימושים חושב על פי המדדים הבאים:

תועלות³⁴

- מחיר המוצרים המוחלפים על ידו,
 - ערך מוסף ייחודי לאפר בהשוואה לתחליפיו (ייחודי לבטון ולבמס"א בחקלאות),
 - חסכון בעלויות הובלת התחליפים (ייחודי לבטון, בו מחליף האפר המובל למרחקים קצרים יחסית את החול שמקורו במישור רותם המרוחק ממרכזי הפעילות המשקית),
 - הפחתת פליטת CO₂ (ייחודי לצמנט ולבטון),
- עלויות
- תרומת אפר למנת קרינה קולקטיבית יחסית לתחליפיו (ייחודי לצמנט לבטון בבניית מבנים לשהיית בני אדם וכן לגינון)

³² ובסה"כ 8,500 טונה המהווים כ- 70% מההיצע הפוטנציאלי. כלומר ניתן יהיה להסתפק ב- 1.5 מחזורי אספקה שבועיים לכל מפעל במשטר אספקה סביר.

³³ יש להניח שבשעת חירום מלחמתית תפחת הפעילות הכוללת במשק לרבות בענף הבנייה, אולם רמת הביקוש לחשמל נשארת בעינה.

³⁴ [עלות/תועלת שימושי אפר הפחם למשק, ד. לנגר בשיתוף ג. אירוס \(בהתייעצות עם א. בנטור\), 15.2.18](#)

³⁴ תועלות שלא נאמדו בהעדר מידע זמין למנהלת:

- הפחתת פליטות מזהמים בכריית חומרי גלם ובתהליכי ייצור מוצרים המוחלפים ע"י האפר,
- הפחתת פליטות מזהמים בקיצור מרחקי הובלת אפר יחסית להובלת חול (ייחודי לבטון),
- הפחתת חתימה סביבתית ושימור משאבים חיוניים למשק המצויים במחסור בהחלפת חומרי חציבה.



הערה: לפי הנחיות הוועדה הבינלאומית להגנה מקרינה ICRP והוועדה המדעית של האו"ם לקרינה אטומית UNSCEAR, השימוש במנה הקולקטיבית ובערך הכספי של Man-Sv מיועדים למצבי חשיפה מתוכננים תעסוקתיים וציבוריים ממקורות קרינה כדוגמת כורי כח גרעיניים ומכוני הקרנה רפואיים, ולא לחשיפה ציבורית במצבי חשיפה קיימים, בוודאי לא ברמות נמוכות המאפיינות את שימושי האפר, במיוחד במקרים בהם נחשפת אוכלוסייה בעלת מספר אנשים רב ואפיונים מגוונים למנות אלה. ואמנם אפר בשימושו איננו נחשב "מקור קרינה" לגביו יש לבצע הערכות כאלה.

כמו כן יש לציין כי בעוד שבניתוח הכלכלי של התועלת מתבססים הערכים הכספיים על מדדים משקיים וודאיים, בצד הסיכון מקרינה ועלותו משמשים ערכים תיאורטיים הסתברותיים וספקולטיביים בעלי טווח שגיאה של מאות אחוזים.

תחשיבי ההיוון בהערכות הכלכליות למשק של שימושי אפר הפחם³⁵ מתבססים על שער ריבית ללא סיכון של 1.4% לשנה המשקף תשואה על אג"ח מדינה צמודות מדד לטווח הארוך ביותר. נכון למועד עריכת המסמך הכלכלי עומדת תשואה זו על כ- 1.037%.

טבלה 1: ערך למשק של שימושי אפר פחם (ש לטונה אפר פחם)

אפר	שימוש	תועלת		
		ישירה (מחליף ח"ג)	ערך מוסף	סביבה (מפחית CO2)
מרחף	צמנט	285		119
	בטון	311	2,682	17
	שפכים (חקלאות)	408	115	
תחתית	צמנט	156		
	מוצרי בנייה	117		
	גיבון וחקלאות	270		
	סלילה ותשתיות	68		

בהסתיונות בהערה לעיל באשר לשימוש בהערכה כלכלית של מנות קרינה ברמות נמוכות להן נחשף הציבור בשימושים המסווגים כמצב קיים (לעיל בסעיף הקרינה המייננת), מוצגות ההערכות שלהלן לצורך השוואת סדרי הגודל שבין השימושים השונים לבין עצמם וביניהם לתועלתם למשק.

טבלה 2: הערכה השוואתית של "עלות מנת קרינה" למשק (ש לטונה אפר פחם)³⁶

אפר	שימוש	"עלות"
מרחף	צמנט	40
	בטון	35
תחתית	גיבון	8

חלופות הקצאת אפר פחם לשימושי

כאמור לעיל מטרת העבודה להתוות את מרחב הפעולה המעשי של שימושי אפר הפחם לשם הקצאה מיטבית של משאבי המנהלת ליצירה, לשימור ולתחזוקה ולעדכון שוטף של התשתית הממלכתית בידע ובתקינה, הנדרשת להנעת כוחות השוק למיצוי התועלת הכוללת (משקית-אסטרטגית, איכותית, כלכלית, סביבתית-בריאותית וחברתית) הגלומה במגוון יישומי האפר, במונחי טווח התכנון. כל זאת במצב מחסור משמעותי באפר בהשוואה בין ההיצע והביקוש.

להתוויית המרחב המשקי הוגדרו שלוש חלופות הקצאה של אפר לשימושו כלהלן:

³⁵ ע.ג. עלות מנת הקרינה השנתית לאורך תקופת קיים מבנה הבטון המכיל אפר; ע.ג. דחיית פעולות במבנה הנדרשות בגמר תקופת הקיים.

³⁶ תחשיבי "עלות מנת קרינה" בשימושים הנדונים:

- [אפר תחתית כח"ג לקלינקר ומרחף כתוסף לצמנט](#)
- [אפר מרחף כתוסף לבטון](#)
- [אפר תחתית כמצע גידול צמחים בגיבון](#)



1. הקצאה מאוזנת של אפר מרחף לענפי הצמנט והבטון. הקצאה זו תואמת בקרוב את מצב העסקים כרגיל והיא מעוגנת היום בהנחיית הממונה על ההגבלים העסקיים.
 2. הקצאה הנותנת עדיפות יחסית לשימוש באפר המרחף בייצור בטון, בהתבסס על כמות האפר המרחף שסופקה לתעשיית הבטון – כ- 400 אלף טונות בשנה, בשנים בהן כמותו הכוללת עמדה על 1.2 מיליון טונה בשנה.
 3. הקצאה הנותנת עדיפות יחסית לשימוש באפר מרחף בייצור צמנט, בהיפוך הקצאת העדיפות לתעשיית בטון ובהנחת 200 אלף טונה בשנה כרמה בה תעדיף תעשיית הבטון ניצול תחליפים לאפר המרחף ותגביל את השימוש בו לפרויקטים בהם נדרשות מהבטון תכונות המייחדות את האפר (למשל, ריסון התפתחות חום הידרציה ביציקות רבות נפח).
- החלופות הושוו בערכן הכולל ובמידת הסטייה משתי החלופות הראשונות.
- מהשוואת חלופות הקצאת האפר למגוון השימושים במרחב האפשרויות המעשיות עולה שהעדפת תעשיית הבטון נותנת את הערך הכולל למשק הגבוה ביותר – כ- 1.3 מיליארד ₪ לשנה ומתקבל פער של 40% בין חלופה זו לחלופה ההפוכה המעדיפה את תעשיית הצמנט.
- עם זאת הקצאה מאוזנת של אפר למגוון שימושי, המצויה בתווך בין שתי החלופות הקיצוניות, מפיקה תועלת משקית מיטבית. היא גם מבטיחה רמת תחרותיות כלל ענפית נאותה ותמריץ כלכלי לכלל המשתמשים לעשות שימוש שוטף באפר. כמו כן גלומה בה יכולת הענות טובה יחסית לעליה חריגה בהיצע האפר בשעת חירום אך יודגש כי צירוף פגיעה באספקת גז טבעי עם מצב מלחמתי מחייב הערכות לאחסון ביניים של עודפי אפר משמעותיים באתר מחוץ לחצרי תחנות הכח.
- בחינת החלופות לא התייחסה לאפשרות יבוא אפר לייצור צמנט בשגרה, אולם מבדיקת כושר התגובה המשקי לקליטת כמויות חריגות של אפר כאמור, עולה כי יבוא אפר של כ- 300 אלף טונה בשנה יוכל לשמר רמת פעילות משקית שנתית מאוזנת של כ- 1 מיליון טונה, כ- 2/3 כמות האפר המרבית העלולה להיווצר בשעת חירום, ובכך לשפר את הענות המשק לגידול בהיצע האפר בשעת חירום בהסטת השימוש באפר מיובא לאפר מקומי.

טבלה 3: ערך למשק של ניצול אפר פחם בחלופות הקצאה (אלפי ₪ בשנה)

חלופות הקצאה (אלפי טונה בשנה)									ערך טונה (₪)	שימוש	אפר
העדפת צמנט			העדפת מוצרי בנייה: בטון/אחרים			איזון צמנט - בטון/אחרים					
ערך	אחוז	כמות	ערך	אחוז	כמות	ערך	אחוז	כמות			
153,233	61%	410	78,383	31%	209	114,042	46%	305	374	מרחף	צמנט
600,600	30%	200	1,201,200	60%	400	915,076	46%	305	3003		בטון
31,380	9%	60	31,380	9%	60	31,380	9%	60	523		שפכים (טיוב קרקע)
785,213	100%	670	1,310,963	100%	670	1,060,497	100%	670	סה"כ מרחף		
7,800	67%	50	3,900	33%	25	5,850	50%	38	156	תחתית	צמנט
2,048	23%	18	4,095	47%	35	3,071	35%	26	117		מוצרי בנייה
2,025	10%	8	4,050	20%	15	3,038	15%	11	270		גיבון וחקלאות
									68		סלילה ותשתיות
11,873	100%	75	12,045	100%	75	11,959	100%	75	סה"כ תחתית		
797,086		745	1,323,008		745	1,072,456		745	ערך למשק		
1,072			1,779			1,442			סה"כ	סט"ה מדיניות מאוזנת	
-275,370			250,552						סה"כ	סט"ה מדיניות ערך מרבי	
-370			337						למשיק	למשק	
-525,923						-250,552			סה"כ		
-40%						-19%			אחוז		

הנחות

- ערך האפר בכל אחד משימושיו נגזר מטבלה 1 לעיל על מרכיביה.
- חלופות הקצאת האפר המרחף מובחנות בהעדפה יחסית לצמנט ולבטון לפי הענין כמתואר לעיל.
- הכמות המוקצית לשפכים קבועה בכל החלופות בהנחה שאין תחליף לאפר המרחף ביישום זה.
- חלופות הקצאת אפר תחתית מותאמות ליחסי ההעדפה של האפר המרחף.
- היחס בין כמויות אפר התחתית למוצרי בנייה ולחקלאות משקף את יחסי פילוג הגרגר דק וגס בהתאמה.

ממצאים

- מרווח מרחב הפעולה שמתוות חלופות ההקצאה בין העדפה יחסית של בטון להעדפה יחסית של צמנט מתפרש על פני כ- 0.5 מיליארד ₪ בשנה.
- מנקודת ראות המשק חלופת ההעדפה היחסית של הבטון על פני הצמנט עולה בכ- 20% על החלופה השוויונית וב- 40% על חלופת ההעדפה היחסית של הצמנט.
- החלופה השוויונית עדיפה על חלופת ההעדפה היחסית של הצמנט הן בערכה המשקי הכולל והן בתרומתה לקיום וודאי של תעשיית הבטון כמשתמש באפר פחם המפחית את תלות תחנות הכח ביצרן הצמנט הדומיננטי.

