



# שימושי אפר פחם בבנייה

## סקירת מחקרים ועבודות בהיגוי צוות מקצועי – הנדסי (בנייה)<sup>1</sup> מנהלת אפר הפחם

אוקטובר 2016

הוכן בסיוע  
אינג' גדעון אירוס

<sup>1</sup> חברים בצוות לדורותיו ושותפים בדיוניו: אינג' גדעון אירוס, לימור ארגמן, אינג' גיל אשוח, דר' מוני בן בסט, פרופ' ארנון בנטור, דר' רינה וסרמן, אינג' נתן חילו, דר' רונן כהן, פרופ' אמנון כץ, אינג' ניסן לוי, לנה נודלמן, אינג' יוסי סיקולר, פאולו פלזנשוולב, משה פסימברג, פרופ' קוסטה קובלר, אינג' יניב קנופ, דר' עמית קני, פרופ' דני רבינא ז"ל, דר' מתי רליס, אינג' יהודה תורגימן.



סקירת מחקרים ועבודות  
אוקטובר 2016  
שימושי אפר פחם בבנייה

תוכן עניינים

עמ'	
1	הקדמה
1	מושגי יסוד
	ניסויי שטח לבחינת השפעת אפר מרחף על תכונות הבטון
5	❖ בטון מובא – פרופ' דן רבינא, פרופ' חנוך יגרמן
6	❖ מוצרי בטון – פרופ' דן רבינא, דר' אריאל גולדמן
	קיים של בטון עם אפר מרחף
6	❖ הקטנת תכולת הצמנט המינימלית על חשבון האפר – פרופ' ארנון בנטור, דר' הדסה באום
13	❖ סקר ספרות בנושא בטון עתיר אפר – דר' רינה וסרמן, פרופ' ארנון בנטור, פרופ' קוסטה קובלר
16	❖ שיפור מקדם ההחלפה בין צמנט לאפר בתנאי קרבונציה וכלורידים – פרופ' ארנון בנטור, דר' הדסה באום
	יעילות אפר מרחף בבטון
17	❖ חקר השפעת מקור האפר וסוג הצמנט על תפקוד הבטון כתשתית טכנולוגית להקטנת תכולת הקלינקר בבטון: אפר פחם עם צמנט CEM II – דר' עמית קני, פרופ' ארנון בנטור



**סקירת מחקרים ועבודות  
אוקטובר 2016  
שימושי אפר פחם בבנייה**

**הקדמה**

אפר פחם המיוצר כיום בארץ מנוצל רובו ככולו, כמקובל בעולם, בתעשיית הבנייה – בעיקר בייצור צמנט ובטון.

בתעשיית הצמנט משמשים אפר הפחם המרחף והתחתית כמחליפים חלקיים לחומרי הגלם של הצמנט (במיוחד כמשפרי אלומינה בקלינקר), ואילו אפר הפחם המרחף בלבד משמש כתוסף לקלינקר בשלב הטחינה. זאת בהתאם לת.י. 1 – צמנט, המאמץ למעשה את התקן האירופי EN 197.

בתעשיית הבטון משמש אפר הפחם המרחף בלבד (במגבלות התקן) כמחליף חלקי לצמנט ולחול בתערובות הבטון. השימוש באפר זה כמוסף לבטון מבוסס על מספר תקנים ישראלים: ת"י 1209 – תקן לאפר מרחף כמוסף לבטון, ת"י 466 – חוקת הבטון, ת.י. 118 – בטון: דרישות, תפקוד וייצור ות"י 5098 – תכולת יסודות רדיואקטיביים טבעיים במוצרי בנייה. לאחרונה הוחלט לאמץ את התקן האירופי של אפר מרחף לבטון, EN 450-1: 2012 – Fly ash for concrete. Definition, specifications and conformity criteria ברביזיה של ת"י 1209.

שימוש אופטימאלי זה באפר פחם בכלל ובאפר מרחף בפרט, הינו תוצאה של מחקרים שהחלו בשנות ה-80 ולאורך שנים לאחר מכן, אשר בוצעו ועדיין מבוצעים על ידי חוקרי המכון הלאומי לחקר הבנייה בטכניון מטעם המנהלת, במטרה להגיע לניצול אופטימאלי של האפר תוך שמירה על תכונות הבטון הנדרשות בתקינה ואף שיפורן, והיערכות לשינויים עתידיים בתעשייה (סוגי צמנט חדשים, פיתוח ושינויים טכנולוגיים ושינויים בשוק).

במסמך תוצג סקירה קצרה של מחקרי המנהלת שבוצעו לבחינת יישום אפר הפחם בתעשיית הבנייה. כדי להבין טוב יותר את תוכן הדברים מומלץ לעיין תחילה במספר מושגי יסוד המובאים להלן:

**מושגי יסוד**

**יחס מים/צמנט** - (מבטא את היחס בין כמות המים מבוטאת בק"ג למ"ק של בטון לכמות הצמנט המבוטאת גם היא בק"ג למ"ק בטון). גורם זה משפיע על הבטון בכמה תחומים. בכמויות מים נמוכות ובאותה כמות צמנט הבטון יהיה חסר פלסטיות (קושי בעיבודו במהלך היציקה). תוספת מים לבטון סמיך או יבש מקלה על הובלתו והשמתו של הבטון, כלומר משפרת את עבידותו מצד אחד אולם מביאה לירידת חוזקו מצד שני. מאידך, בכמויות גבוהות של מים ישנה ירידה בחוזק



**סקירת מחקרים ועבודות  
אוקטובר 2016  
שימושי אפר פחם בבנייה**

הבטון ובלכידותו (סגרגציה) משום שהגרמים מתרחקים זה מזה ואז הקשר ביניהם נחלש ונוצרים נקבובים קפילאריים רבים יותר.

**אשפרה-** התקשות הבטון (התקשות מרכיבי הבטון) הנוצרת על ידי הידרציה של הצמנט עם שאר מרכיבי הבטון (אגרגטים וחול), ולשם כך דרושים מים בכמות מוגדרת כדי לקבל בטון בתכונות הנדרשות.

אשפרת הבטון היא טיפול המספק את הלחות המתאימה המונעת את התאיידות המים שנועדו להתקשר כימית עם הצמנט כך שהבטון יתקשה סופית (תיווצר אבן מלאכותית). האשפרה נמשכת מספר ימים כשלאחר מכן נמשך תהליך התחזקות הבטון תחת אשפרה טבעית עד לקבלת החוזק הנדרש. אשפרה לקויה פוגמת בעיקר באיכות הבטון ובתפקודו עד כדי גרימה לכשל הבטון (לא יגיע לחוזק הנדרש), להיסדקותו ולפגיעה בתכונות שנדרשו ממנו בעת תכנונו. עקב תהליכי ההידרציה האיטיים יותר של בטון עם אפר פחם, הוא רגיש יותר לתהליך אשפרה נאות ולמשך האשפרה כמוגדר בדרישות התקינה.

**השפעת תנאי אקלים על הבטון-** מאובחנת בשני היבטים עיקריים: האחד קרבונציה והשני כלורינציה. שתי תופעות אלו גורמות להחלדת ברזל הזיון (קורוזיה) הנובעת ממגע בין האוויר לברזל ו/או חדירת כלורידים (בעיקר בסביבה ימית). הקורוזיה גורמת ל"התנפחות" הבטון, לסידוק הבטון ואף להתפוררותו. מניעת תופעה זו מבוצעת בכמה דרכים בהתאם לגודל הבעיה. התקן הישראלי ת.י. 118 – בטון דרישות, תפקוד וייצור, בגיליון התיקון האחרון שלו משנת 2015, קובע את יחס מים/צמנט המקסימלי ואת כמות הצמנט המינימלית לתערובות הבטון לכל דרגות החשיפה, כך שהבטון המיוצר היום יהיה עמיד יותר לתנאי האקלים מהבטונים שיוצרו בשנים עברו.

**קרבונציה-** תוצאה של תגובה בין פחמן דו חמצני באטמוספירה בנוכחות רטיבות, עם מימת סידן  $(Ca(OH)_2)$ , הגורמת להיווצרות  $CaCO_3$ . בתהליך זה נקשרים גם האלקלים שבמי הנקבים, וזה מביא לירידה ב-pH ויכול לגרום לדה-פסיבציה של ברזל הזיון. קצב הקרבונציה תלוי במספר גורמים כגון: מידת חדירות הבטון (ככל שזו תהיה קטנה יותר התגובה הכימית לעיל תהיה איטית יותר), גודל אלמנט הבטון, עובי שכבת הכיסוי של פלדת הזיון בבטון, טמפ' והלחות בסביבה, הרכב תערובת הבטון, תכולת המים בבטון וכמות מימת הסידן הזמינה.

הקרבונציה וחוזק הלחיצה (המציין את חוזק הבטון) קשורים לינארית ליחס מים-צמנט. כלומר בטון שחוזקו גבוה יותר שיעור השפעת הקרבונציה אמור להיות נמוך יותר.

**חדירות כלורידים (כלורינציה)-** כלורידים נחשבים מזיקים לבטון משום שהם נקשרים למוצרי ההידרציה, וכתוצאה מכך נפסקת הריאקציה הפוצולנית הדרושה לקבלת חוזק הבטון המתוכנן. הכלורידים גורמים גם לקורוזיה של ברזל הזיון בבטון. חדירות הבטון לכלורידים תלויה בין השאר בטיב אשפרת הבטון ובעובי שכבת כיסוי הבטון המכסה את ברזל הזיון.



**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
 שימושי אפר פחם בבנייה**

**התקפת סולפטים** - הסולפטים תוקפים את הבטון, בעיקר את מרכיב הצמנט הידראט  $Ca_3AlO_3$ . מהחירור נוצר אטרינגיט- חומר המחליש ומפורר את הבטון עקב "התנפחותו". כדוגמה ביציקות בים או בקרבתו ועל מנת למנוע את התקפת הסולפטים המצויים במי הים משתמשים בצמנט נגד סולפטים.

**יחס מים/צמנט אפקטיבי** - יחס/מים צמנט בתערובת הבטון המכילה בנוסף לצמנט גם תוסף פוצולני. במקרה זה מחושב יחס מים צמנט על פי הנוסחה:  $w/(C+kp)$ , כאשר  $w$  - תכולת המים,  $(C+kP)$  - התכולה האפקטיבית של חומר המליטה:  $C$  - הצמנט,  $p$  - התוסף הפוצולני ו-  $k$  - מקדם היעילות.

תערובות בטון המכילות צמנט בלבד או צמנט ותוסף פוצולני אמורות להיות בעלות חוזק לחיצה זהה כאשר לשתייהן אותה מנת המים ואותה כמות של צמנט + כמות המוסף כשהוא מוכפל במקדם היעילות. כך שבפועל ניתן להפחית מכמות הצמנט בתערובת הבטון עקב השימוש גם בתוסף הפוצולני.

**מקדם יעילות (מקדם הידראולי)** - מבטא את כמות הצמנט שאותה יכולה להחליף יחידה אחת של אפר פחם, ועדיין לקבל חוזק לחיצה זהה בתום 28 יום ממועד הייצור. עפ"י גיליון תיקון מס. 4 לתקן (שיצא במרץ 2015), רשאים להוסיף אפר פחם כחליף חלקי לצמנט CEM I או CEM II לסוגי "מבנה או רכיב" בדרגות חשיפה 1-4 (טבלה 9 בגיליון התיקון) בלבד. מגבלה נוספת הינה שכמות האפר המחליפה צמנט לא תהיה גדולה מ- 0.33 מכמות הצמנט מסוג CEM I הנמצאת בפועל בתערובת המתוכננת עם אפר פחם, ולא יותר מ 0.25 מכמות הצמנט מסוג CEM II, הנמצאת בפועל בתערובת המתוכננת עם אפר פחם. לסוג "מבנה או רכיב" בדרגות החשיפה 5-11 חל איסור להשתמש באפר פחם כמחליף צמנט אלא אם בוצעה קודם לכן בדיקה על פי עקרון התפקוד השקיל. מקדם היעילות מסומן כ-  $k$  והוא מחושב כיחס בין כמות הצמנט "האמורה לצאת" מתערובת הבטון המקורית לכמות אפר הפחם האמורה להחליף אותה. הוא עשוי להשתנות בעת השימוש בסוגי צמנט שונים ו/או דרגות חשיפה שונות. בסיס קביעת ערך  $k$  הוא בחינת חוזק הלחיצה של התערובת ללא אפר פחם והתערובת עם כמות צמנט מופחתת המכילה אפר פחם אולם קיימים פרמטרים נוספים כגון תהליך אשפרת הבטון, דקות האפר, ה- LOI של האפר וכד'.

**קיים (durability)** - קיים הינו מושג המבטא את משך "חיי השרות" של המבנה. כלומר, זהו מושג טכנו/כלכלי המציין את משך תקופת השרות של המבנה במסגרת הוצאות אחזקה סבירות ועד למועד בו נדרשות השקעות גבוהות כדי לשדרגו או להשאירו מתאים לשרות או להריסתו. משך הקיים תלוי במספר גורמים- האזור הגיאוגרפי בו הוקם המבנה, תנאי אקלים, תנאים סביבתיים (מי תהום, סוג הקרקע), שימוש באפר פחם בתערובת הבטון תוך ניצול האפשרות



**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
 שימושי אפר פחם בבנייה**

להקטין את כמות הצמנט, חוזק הבטון כתלות ביחס מים/צמנט של התערובת, אשפרה נאותה המשפיעה על מרקם פני הבטון (איטום פני הבטון) וכד'.

**Loss On Ignition -LOI (הפסד בקלייה)**- הינו מונח המבטא אובדן משקלי של אפר הפחם מבוטא באחוזים לאחר הקלייה (הצתה/בעירה) של הפחם עקב הימצאות פחמן לא שרוף באפר הפחם. ההפסד בקלייה נובע בעיקר מאי שריפת שארית החומר האורגני באפר הפחם. ככל שהאחוז גבוה יותר אפר הפחם איכותי פחות למטרות שימוש כמחליף צמנט. אפר פחם בעל LOI גבוה עשוי לגרום לתופעות לא רצויות טכנולוגיות וכלכליות כגון דחייה במועד התקשרות הבטון וכתוצאה מכך דחייה במועד פירוק התבניות, צורך בכמות גבוהה יותר של מים וזאת על מנת לקבל עיסת בטון עבידה, תוספת צמנט לתערובת עקב כך כדי לקבל את חוזק הלחיצה המתוכנן (בעיה טכנולוגית). תוספת הצמנט לכשעצמה מעבר למתוכנן פוגעת בקיים המבנה ולפיכך מהווה בעיה כלכלית לא פשוטה. לפיכך התקן הישראלי ת"י 1209 לאפר פחם מרחף לתעשיית הבנייה אוסר על שימוש באפר פחם עם LOI גבוה מ- 7% בתערובת הבטון.

**ריאקציה פוצולנית**- תגובה של מים עם סיד חי היוצרת סיד כבוי:  $CaO + H_2O = Ca(OH)_2$  והמשחררת חום רב. ההידרציה של חומר פוצולני היא איטית ומשפיעה על חוזק הצמנט ועקב כך על חוזק הבטון. לפיכך בטון עם צמנט המכיל אפר פחם או עיסת בטון המכילה אפר פחם, מאופיינים בחוזק לחיצה נמוך בגילאים מוקדמים ביחס לצמנט שאיננו מכיל אפר פחם ו/או עיסת בטון שאיננה מכילה אפר פחם.

נמצא כי בטון עם צמנט מסוג CEM II 42.5 המכיל אפר פחם כתחליף לקלינקר (עד 10%) מפתח חוזק לחיצה נמוך יותר בימים הראשונים ממועד היציקה מבטון ללא אפר עם צמנט מסוג CEM I 42.5. כתוצאה מכך התפתחות החוזק של בטון עם הצמנט הנ"ל המכיל אפר פחם ו/או עיסת בטון המכילה אפר פחם (על פי עקרון מקדם היעילות המוזכר לעיל), תהיה איטית יותר, אולם תגיע לחוזק לחיצה זהה לפחות לחוזק הלחיצה של בטון עם צמנט ללא אפר פחם המוזכר לעיל בתום 28 יום ממועד היציקה.

האקטיביות הפוצולנית של אפר הפחם תלויה בעיקר בתכולת הסיליקה והאלומינה באפר אך גם בגודל הגרגרים, והיא עולה ככל שהגרגרים קטנים יותר (דקות טחינה). נמצא גם כי בדרך כלל התחזקות הבטון המכיל אפר פחם בעיסת הבטון גבוהה יותר מבטון שאיננו מכיל אפר פחם בתום 90 יום ממועד היציקה.

**זמן התקשרות (צמנט)**- שיטת בדיקה המיועדת לבדוק את משך התקשרות עיסת הצמנט והמשקפת את מידת התנגדות עיסת הצמנט לחדירה באמצעות מחט תקנית. זמן תחילת ההתקשרות נמדד מרגע המגע בין הצמנט למים (הידרציית הצמנט) (הרגע שבו מתחיל הצמנט להתקשר למרכיביו (חול) ועד לקבלת התנגדות לחדירה של 3.5 מגפ"ס (באמצעות מכשיר תקני).



**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
 שימושי אפר פחם בבנייה**

זמן סוף התקשרות נמדד מרגע המגע בין הצמנט למים ועד לרגע שבו גרגרי הצמנט מפסיקים ליצור קשרים ביניהם או עד לקבלת התנגדות לחדירה של 27.6 מגפ"ס. זמן התקשרות תלוי בכמה גורמים: (1) דקות הטחינה של הצמנט- ככל שהגרגרי הצמנט קטנים יותר וטחונים יותר, תהליך ההידרציה מסתיים בזמן קצר יותר; (2) חום הסביבה- ככל שהסביבה חמה יותר, זמן ההתקשרות קצר יותר. אפר הפחם גורם לעיכוב בזמן התחלת וסוף ההתקשרות של עיסת הבטון כתלות בכמות האפר בבטון, דקות הטחינה של האפר והרכבו הכימי, ובעיקר באחוז ה-LOI.

**ניסויי שטח לבחינת השפעת אפר מרחף על תכונות הבטון**

הפרויקט הראשון מטעם המנהלת לבחינת השימוש באפר מרחף בבטון בוצע ב-1999, במסגרתו **נבחנו ביצועיהם של בטונים עם אפר פחם שיוצרו על ידי חברת רדימיקס תוך ליווי מקצועי של פרופ' דן רבינא וחנוך יגרמן מהטכניון, בהשוואה לבטונים ללא אפר.** הפרויקט הורכב משלושה ניסויים: בדיקות קוביות בטון שנוצקו באתרי בנייה לאחר שעברו שלושה סוגי אשפרה: אשפרה תקנית, האשפרה ה"מקובלת" באתרי בנייה- התזת מים פעמיים ביום במשך 3 ימים, וכיסוי ביריעה אוטמת לבנה. כעבור שבוע אוחסנו הקוביות בחדר אקלים בתנאי טמפ' של 30°C ולחות יחסית של 40% עד לבדיקתם בגיל 28 יום. הניסוי השני היווה השלמה ורחבה של הניסוי באתר, וכלל הכנת בטונים בתנאי קיץ (32°C, לחות יחסית 40±5%, טמפ' בטון תחילית- 32°C) ואשפרה בטמפ' שונות (20, 30, 40°C) ו- 2 מתוך 3 תנאי האשפרה המצוינים לעיל (ללא אשפרה תקנית). בניסוי השלישי הוכנו בטונים בתנאי חורף (20°C, לחות יחסית 65%, טמפ' בטון תחילית- 20°C), עם אשפרה בטמפ' של 10 ו- 20°C באותם תנאי אשפרה כבשלב הקודם. בוצעו בדיקות חוזק, ספיגות נימית וקרבוניצה, וכן חום הידרציה בניסוי השלישי.

**ממצאי הניסויים:**

- עבדות הבטונים עם אפר פחם הייתה טובה יותר באופן משמעותי.
- הבטונים עם אפר פחם הפרישו פחות מים.
- צריכת המים בתערובות עם אפר פחם בכמות של 150 ק"ג למ"ק הייתה גדולה יותר מאשר בתערובות מקבילות ללא אפר. יש לבחון שנית את תכולת האפר האופטימאלית ואת תכולת המוספים הכימיים. נראה, גם לאור הניסיון בעבודות בטון עם אפר בתחנת הכוח באשקלון, שיש להמליץ על תכולה מרבית של כ- 120 ק"ג למ"ק של אפר פחם.
- חוזק הבטונים עם אפר פחם היה נמוך יותר בבטונים שקיבלו אשפרה בהרטבה בהתזה פעמיים ביו במשך שלושה ימים או שלא קבלו אשפרה כלל ביחס לחוזק בטונים ללא אפר. לפיכך, בטונים עם אפר מחייבים אשפרה ברטוב טובה וממושכת יותר משל בטונים ללא אפר על מנת להגיע לחוזק שווה בגיל 28 יום או אף גבוה יותר בגילים מאוחרים.



## סקירת מחקרים ועבודות אוקטובר 2016 שימושי אפר פחם בבנייה

- בטון עם אפר פחם מושפע בצורה משמעותית מטמפרטורת היציקה ו/או האשפחה. בטמפרטורות נמוכות הוא מתחזק לאט יחסית ומחייב אשפחה ברטוב ממושכת יחסית. מאידך, בטמפרטורות מוגבהות,  $40^{\circ}\text{C}$  ומעלה, כבר בגיל מוקדם האפר תורם לחוזק בצורה משמעותית.
- ערכי הקרבונציה והספיגות הנימית של הבטונים עם אפר פחם היו גבוהים מאילו של הבטונים ללא אפר, במיוחד באשפחה בהרטבה לסירוגין. זה גם כן מצביע על החשיבות הרבה בצורך שיש באשפחה טובה וממושכת יותר יחסית על מנת לקבל איכות שווה ואף טובה יותר של מרקם הפנים בבטונים עם אפר פחם, הקובע את הקיימות וההגנה על הזיון.
- על מנת להשיג הפחתה בהתפתחות הטמפרטורה, עקב חום ההידרציה, בגושי בטון גדולים בעזרת אפר פחם יש להפחית את כמות האפר בצורה משמעותית, ויש להגביל את תכולת הצמנט הצמנט. יש לבצע ניסויים מוקדמים לקביעת כמות האפר וכמות הצמנט האופטימאלית.

ניסוי נוסף כדוגמת הקודם שבוצע באתר לבחינת תפקוד הבטון המכיל אפר בתנאי שטח, נעשה בשנת 2000 במסגרתו נבחנו הביצועים של מוצרי בטון עם אפר מרחף (במקום חול והקטנה מסוימת של הצמנט) שיוצרו על ידי חברת אקרשטיין תוך ליווי מקצועי של פרופ' דן רבינא וד"ר אריאל גולדמן מהטכניון. הניסוי נערך במפעל החברה וכלל בדיקות בקיץ ובחורף של מוצרים שונים- אבני ריצוף, צינורות, אבני שפה ומוצרים טרומיים. חוזק הבטונים שנבדקו בחורף היה כנדרש אך קטן יותר בקיץ, כנראה בשל איכות האפר הנמוכה יותר בבטונים שנבדקו בקיץ, ובשל תכולת חללי אוויר גדולה יחסית באבני הריצוף בעונה זו. בניסוי החורף נצפו תופעות של התפוררות הפינות באבני הריצוף והשפה בגיל מוקדם ותפרחת ("ציפת סיד") של פני השטח של אבני הריצוף, תופעות שמוסברות ככל הנראה על ידי טמפי' הסביבה הנמוכה. בסיכום התוצאות הומלץ להשתמש באפר, ולהתאים את היקף חלקו בבטון כמחליף חול וצמנט למוצר המסוים ולתקופת הייצור.

ת"י 466 - חוקת הבטון, מאפשר להקטין את תכולת הצמנט המינימלית הנדרשת בתקן (ת"י 466- חוקת הבטון) על ידי החלפה חלקית באפר מרחף ביחס המבטא את תרומת האפר לקיים (אורך חיים) הבטון בהגנה מפני תהליכי בלייה הנגרמים מחשיפתו לסביבה: קרבונציה וחדירת כלורידים הגורמים לקורוזיה של הבטון.

### קיים של בטון עם אפר פחם

בחינת האפשרות להגדיל את כמות האפר המרחף ע"ח הצמנט בבטון, תוך עמידה בדרישות הקיים בתקן, בוצעה ע"י פרופ' ארנון בנטור וד"ר הדסה באום מהטכניון. המחקר בוצע בשלושה שלבים: (1) תערובות ייחוס ללא אפר המכילות תכולות שונות של צמנט ונחשפו לתנאי אשפחה





**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
 שימושי אפר פחם בבנייה**

שונים; (2) חוזק בלחיצה וחדירות לכלורידים של תערובות עם אפר פחם בעל LOI גבוה (7.5%); (3) קיים בתנאי קרבונציה של בטונים עם אפר שעברו אשפיה וחשיפה בתנאי אקלים מתונים. שלבים 1 ו-2 סוכמו בדו"ח אחד מיוני 2003 ושלב 3 סוכם בדו"ח מדצמבר באותה שנה. במסגרת המחקר נבחנה ההתנהגות בטונים עם תכולות שונות של אפר פחם משני סוגים. האחד, מוגדר כאפר פחם באיכות ירודה, בעל הפסד גבוה בקלייה (4.1%). נבחן תפקודן של התערובות מנקודת מבט של חוזק, חדירות לכלורידים וקרבונציה, אשר שימשו כאמות מידה להערכת הקיים. התערובות הוכנו במנות מים דומות כדי לאפשר אומדן ישיר של השפעת האפר שהוסף מעל לתכולות הצמנט בתערובות. מכאן שכל שתכולת הצמנט הייתה גדולה יותר מנת המים הייתה קטנה יותר. תערובות הבטון נחשפו לתנאי אשפיה שונים: 28 ימים במים (E), 7 ימים במים (D), הדמייה של התזה 3 פעמים ביום במשך 6 ו-3 ימים (C ו-B בהתאמה) וללא אשפיה כלל (A). נבדקו תערובות בטווח רחב של תכולת צמנט, מ-170 ק"ג למ"ק עד 320 ק"ג למ"ק, שהוכנו במנות מים דומות כדי לאפשר אומדן ישיר של השפעת האפר אשר הוסף מעל לתכולות צמנט אלה, בתכולות של 60 עד 150 ק"ג למ"ק. התוצאות והמסקנות העיקריות שהתקבלו וההמלצות הנגזרות מהן לגבי תקינה מוצגות להלן תוך התייחסות בנפרד לחשיפה לסביבה המכילה כלורידים ולחשיפה בתנאי קרבונציה.

**תוצאות**

**חוזק בלחיצה**

ככל שתכולת הצמנט בתערובת הייתה גבוהה יותר (כלומר, מנת מים לצמנט נמוכה יותר), החוזק בלחיצה עלה, ללא תלות בסוג האפר. השפעת האפר על החוזק לא הייתה חד משמעית- אמנם במרבית הבטונים (65%) חוזק התערובות עם האפר האיכותי יותר (LOI=4.1%) היה גדול יותר, אולם במספר תערובות (10%) לא הייתה השפעה לאפר ובשאר (25%) המגמה הייתה אף הפוכה. השפעת תנאי האשפיה על חוזק הבטון- החוזק הגבוה ביותר בתערובות תחת אשפיה ברטוב (D ו-E) והנמוך ביותר ללא אשפיה (A), ללא תלות בגיל הבטון או בסוג האפר בתערובת, כאשר החוזק עלה עם משך האשפיה (מכסימום חוזק ב-E המייצגת אשפיה למשך 28 יום). באופן כללי חוזק התערובות שעברו אשפיה ברטוב מגיל 28 יום היה יותר גבוה משל התערובות ללא אשפיה, בכל ההרכבים, ללא תלות בתכולת הצמנט או בסוג האפר. ככל שתכולת הצמנט בתערובות ללא אפר הייתה גדולה יותר, האשפיה השפיעה פחות על החוזק. עבור אותה תכולת צמנט, ככל שתכולת האפר הייתה גדולה יותר הרגישות לאשפיה עלתה והשפעת משך האשפיה על החוזק בלחיצה הייתה משמעותית יותר. הסיבה לכך היא הריאקציה הפוצולנית שהיא איטית יותר ונדרש יותר זמן למצות את הפוטנציאל שלה לתרומתה לחוזק. הרגישות לאשפיה עלתה גם ככל שהיה פחות צמנט בתערובת, עבור אותה תכולת אפר.



**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
 שימושי אפר פחם בבנייה**

השפעת גיל הבטון - עלייה בחוזק הבטון עם הזמן ובקצב ההולך וקטן עם הגיל. עלייה זו מותנית בנוכחות רטיבות והיא מתקיימת כל עוד הרטיבות מספקת להמשיך את ההידרציה, כלומר, התפתחות החוזק עלתה עם משך האשפחה ברטוב.

מקדם היעילות של האפר מבחינת חוזק בלחיצה - קטן עם הגידול בתכולת הצמנט שהאפר מחליף, כאשר ההקטנה חריפה יותר ככל שהאשפחה לקויה יותר בשל היעדר רטיבות הנדרשת לריאקציה הפוצולנית, וחריפה פחות ככל שיש יותר צמנט בתערובת בגלל כושר האקטיבציה הגדול יותר בנוכחות יותר צמנט, וכן גם בהתייבשות איטית יותר בתערובות אלה. מסקנה ראשונית ממגמות אלה היא שמבחינת החוזק מקדם יעילות של 0.2 – 0.4 לפי התקן האירופאי הוא קביל כאן, כל עוד מקפידים על לפחות 6 ימי אשפחה במים. עם זאת, מאחר ובפועל הבקרה על אשפחה בשטח לוקה בחסר, הרי ספק אם יש להתיר שימוש במקדמי היעילות הגבוהים שנמצאו כאן, ולהגביל עצמנו למקובל בתקנים האירופאים.

**חדירות לכלורידים**

חדירות לכלורידים בתלות בתכולת הצמנט - ככל שתכולת הצמנט נמוכה יותר החדירות גדולה יותר, בהישמר יתר התנאים ויחסי התערובת קבועים. מגמה זו נצפית בכל סוגי האשפחה ומביאה לידי ביטוי את השפעת מנת המים, שהיא נמוכה יותר ככל שיש יותר צמנט משום שבכל התערובות נשמרה תכולת מים קבועה.

השפעת תכולת האפר והאשפחה על החדירות לכלורידים - גידול בתכולת האפר מביא להקטנת החדירות, כאשר ההקטנה גדולה יותר עם טיב האשפחה ברטוב. מכאן שכלל שתכולת האפר הייתה גדולה יותר, לאשפחה הייתה חשיבות רבה יותר בהקטנת החדירות לכלורידים. זה נובע מעצם היות האפר פוצולני.

מחזור חיים בהיבט חדירות לכלורידים - בעבודה חושב מחזור חיים של הבטון בתכולות שונות של צמנט ואפר ותנאי אשפחה שונים. תוחלת החיים נקבעה לפי משך הזמן שלוקח לתכולת הכלורידים הקריטית (0.4% ביחס לתכולת הצמנט בתערובת) להגיע לעומק 30 מ"מ בבטון. על פי החישובים, ככל שמשך האשפחה ארוך ואינטנסיבי יותר, וככל שיש יותר צמנט ואפר, הזמן להתחלת קורוזיה בעומק 30 מ"מ מפני הבטון, ארוך יותר. בהשוואת מחזור החיים של שני תערובות קצה: אחת עם 170 ק"ג צמנט למ"ק ללא אפר וללא אשפחה, והאחרת עם 320 ק"ג צמנט למ"ק ו-150 ק"ג אפר למ"ק עם אשפחה מיטבית (28 יום ברטוב), מתקבל פער העומד על פי 150 (0.5 שנה ו-78.3 שנים, בהתאמה). מתוצאות אלו ניכרת ההשפעה של תכולת הצמנט, האפר, סוג האפר ומשך האשפחה ברטוב, על חדירות הבטון לכלורידים ומתוך כך על מחזור החיים של הבטון. דוגמא נוספת להשפעה הדומיננטית של הצמנט על הבטון מבחינת החדירות לכלורידים - מחזור החיים של בטון עם 320 ק"ג צמנט למ"ק ללא אשפחה, נמצא ארוך משל בטון שהכיל 200 ק"ג צמנט למ"ק וקיבל אשפחה אינטנסיבית ביותר. כאשר האשפחה לקויה יותר, ההשפעה של סוג האפר ותכולת הצמנט על מחזור החיים קטנה יותר.



**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
 שימושי אפר פחם בבנייה**

מקדם יעילות של אפר מבחינת חדירות לכלורידים- מבטא את כמות הצמנט שאותה יכול להחליף אפר, ועדיין לקבל את אותו תפקוד בטון מבחינת חדירות לכלורידים. מקדמי היעילות המחושבים על בסיס מחזור חיים בתנאי חדירה של כלורידים, נמצאו קטנים מאלה המחושבים על בסיס החדירות עצמה, משום שבהנחת חישוב מחזור החיים תכולת הכלור הקריטית היא פונקציה של תכולת הצמנט (0.4% ממשקלו). משמעות הדבר היא שבתערובת בעלת תכולת צמנט נמוכה ניתן על ידי תוספת אפר להגיע לאותו תפקוד מבחינת חדירות לכלורידים כמו בתערובת עם יותר צמנט. אבל מאחר ובתערובת עם תכולת הצמנט הגבוהה יותר תכולת הכלורידים הקריטית גבוהה יותר, מחזור החיים שלה ארוך יותר מזה של התערובת עם פחות צמנט, שהיא בעלת חדירות דומה לכלורידים.

הקשר בין חדירות לכלורידים ומחזור החיים המחושב- פרמטר חשוב בחישוב מחזור החיים הוא החדירות לכלורידים המביא לידי ביטוי את ההתנגדות לדיפוזיה של הבטון. יחד עם זאת, אין קשר חד ערכי בין מחזור החיים המחושב לערך החדירות לכלורידים, אך הקשר כן קיים עבור תערובות בעלות אותה תכולת צמנט (המשתנות רק בתכולת האפר וסוג האשפרה). בתערובות עם תכולת צמנט שונות, עבור אותה חדירות לכלורידים מחזור החיים גדול יותר ככל שתכולת הצמנט גבוהה יותר. מגמה זו היא פועל יוצא של העבודה שבחישוב מחזור החיים באה לידי ביטוי תכולת הצמנט בקביעת תכולת הכלורידים הקריטית הנדרשת להתחלת הקורוזיה שהיא 0.4% ממשקל הצמנט. אומדן זה מביא לידי ביטוי את השפעת תכולת הצמנט, מעבר להשפעתה על החדירות לכלורידים. יחד עם זאת, עבור תכולת צמנט נתונה הגידול בתכולת האפר מגדיל משמעותית את מחזור החיים, במקדם של פי 2 עד 3 בטווח של 0-150 ק"ג אפר למ"ק, באשפרה סבירה במים (לפחות C).

**קרבונציה**

**עומק קרבונציה**- נמדד בתנאים טבעיים במעבדה בגיל 60 ו- 90 יום ולאחר לחשיפה לקרבונציה מואצת למשכי זמן שונים בתנאים של ריכוז  $CO_2$  5%,  $20^{\circ}C$  ו- 50% לחות יחסית. ככל שתכולת הצמנט הייתה גבוהה יותר עומק הקרבונציה שנמדד בן בתנאים טבעיים והן במואצים, היה נמוך יותר, ללא תלות באפר בתערובת. כן, ככל שהאשפרה הייתה אינטנסיבית וממושכת יותר, עומק הקרבונציה היה קטן יותר.

השפעת האשפרה והאפר על הקרבונציה הטבעית- מכיוון שהריאקציה הפוצולנית באפר הפחם היא איטית, צפוי שתרומת האפר להעלאת ההתנגדות לחדירת פחמן דו חמצני לבטון, תבוא לידי ביטוי לאחר אשפרה ארוכה. כך למשל עומק הקרבונציה הטבעית בגיל 90 ימים בתערובות ללא אפר פחם שלא עברו אשפרה (A), היה גדול פי 1.6, 2 ו- 3 לערך מזה של תערובות זהות שעברו אשפרה 3 פעמים ביום למשך 6 ימים (C), אשפרה רציפה ברטוב למשך 6 ימים (D) ורציפה ברטוב למשך 28 יום (E), בהתאמה, ללא תלות בתכולת הצמנט בתערובת. בתערובות שהכילו אפר השפעת האשפרה על עומק הקרבונציה הייתה משמעותית יותר עם עליה בתכולת האפר. כך למשל עומק הקרבונציה הטבעית בגיל 90 ימים של תערובות שהכילו 60, 90, 120 ו- 150 ק"ג אפר למ"ק



**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
 שימושי אפר פחם בבנייה**

וקיבלו אשפרה E, היה גדול פי 4, 5, 6 ו-7 לערך, בהתאמה, מתערובות שלא קיבלו אשפרה, ללא תלות בתכולת הצמנט. התוצאות מראות שקצב הקרבונציה של בטון שהוכן עם אפר באותו יחס מים בצמנט, הוא בדרך כלל איטי יותר בהשוואה לזה של בטון ללא אפר.

השפעת האשפרה והאפר על הקרבונציה המואצת- מגמות דומות לקרבונציה הטבעית באות לידי ביטוי גם בקרבונציה המואצת. בתערובות שלא הכילו אפר, בכל תכולות הצמנט שנבדקו, נמצא כי העמידות בפני חדירת קרבונציה משתפרת ככל שהאשפרה אינטנסיבית וממושכת יותר, וכי משך הזמן לחדירת הקרבונציה לעומק מסוים היה ארוך יותר. כך למשל משך הזמן היה פי 2, 3 עד 4 ו-5 עד 7 ארוך יותר בתערובות שקיבלו אשפרה B, D ו- E בהשוואה לתערובות ללא אשפרה. בתערובות שהכילו אפר, תוספת האפר האטה משמעותית את קצב חדירת הקרבונציה בכל תחומי האשפרה. למשל בתערובת עם 270 ק"ג צמנט למ"ק הייתה קרבונציה מלאה עד לעומק 35 מ"מ כעבור 40 ימים, ובהוספת 60 ו-120 ק"ג אפר למ"ק לא הייתה קרבונציה מלאה במהלך הבדיקה.

מחזור חיים בתנאי קרבונציה- מחזור החיים המחושב מייצג את הזמן שלוקח לקרבונציה לחדור לעומק 30 מ"מ בבטון, ובהינתן יום אחד של קרבונציה בתנאים מואצים השווה ערך ל- 200 ימים של קרבונציה טבעית. נמצא שככל שתכולת הצמנט גדולה יותר מחזור החיים היה כצפוי ארוך יותר, ללא תלות בסוג ותכולת האפר וכן האשפרה. ככל שיש יותר אפר, האשפרה משפיעה יותר על מחזור החיים, בעיקר בתערובות בהן תכולת הצמנט גבוהה יותר. כך למשל מחזור החיים של תערובת עם 200 ק"ג צמנט למ"ק ללא אפר שקיבלה אשפרה E נמצא 13 שנים, כ- 50 שנים בממוצע עבור תערובת עם האפר בעל LOI=7.5% (I) וכ- 60 שנים בממוצע עם האפר בעל LOI=4.1% (II). ואילו מחזור החיים המחושב של תערובת עם 270 ק"ג צמנט למ"ק באותם תנאי אשפרה, נמצא ארוך פי 4 לערך (52 שנים) עבור בטון ללא אפר ופי 3 לערך עבור בטון עם אפר (144 ו-159 שנים עם אפר I ו-II, בהתאמה).

מקדם יעילות משיקולי חדירת קרבונציה- לרוב נמצאה עליה במקדם היעילות עם השיפור בטיב ובמשך האשפרה. בתערובות עם 230 או 270 ק"ג צמנט למ"ק שבהם האפר החליף 30 עד 40 ק"ג צמנט למ"ק (כלומר עם 200 או 230 ק"ג צמנט למ"ק עם אפר, בהתאמה) התקבל במקדם שנע בדרך כלל בין 0.5 ל- 1.1. בתערובות אלו תרומת האפר באה לידי ביטוי גם באשפרה ירודה, אך החלפת 70 ק"ג צמנט למ"ק באפר מחייבת כבר הקפדה על אשפרה מיטבית (E) אם כי אשפרה כזו אינה מקובלת בתנאי הביצוע המקובלים בארץ.

**קשרי גומלין בין פרמטרים של קיים וחוזק**

הקשר בין החוזק בלחיצה ובין החדירות לכלורידים ומחזור החיים- הקשר בין החדירות לכלורידים כפונקציה של חוזק הלחיצה, נראה אחיד עבור כל התערובות, אבל עם פיזור מסוים מתחת לחוזק 40 מגפ"ס הנובע מחדירות גבוהה יותר עם ירידה בתכולת האפר בתערובת, ופיזור הרבה יותר קטן בחוזקים הגבוהים יותר, עם נטייה למגמה הפוכה של ירידה בחדירות לכלורידים עם עליה בתכולת האפר, המלמדת על נטייה מתונה מאד שהשפעת האפר באה לידי ביטוי בבטון בחוזק מעל 40 מגפ"ס. הקשר בין מחזור החיים והחוזק אינו חד ערכי עבור כל התערובות, ועבור



**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
 שימושי אפר פחם בבנייה**

חוזק זהה מחזור החיים גדל עם עליה בתכולת הצמנט. זה מיוחס בעיקר להשפעת תכולת הצמנט על קביעת הערך של תכולת הכלור הקריטית בחישוב מחזור החיים (0.4% ממשקל הצמנט), אך לא תלוי בחוזק. לכן עבור אותו חוזק צפוי לקבל מחזור חיים ארוך יותר עם עליה בתכולת הצמנט. מכאן שפרמטר החוזק הינו פרמטר סביר לאומדן החדירות לכלורידים משום ששני פרמטרים אלה תלויים בעיקר במבנה החללים. אולם החוזק אינו אמד מספיק לצורך הערכת מחזור החיים של תערובות בעלות תכולת צמנט שונות. עם זאת, עבור תכולת צמנט נתונה יש לפרמטר זה משמעות. הגידול בתכולת האפר תוך מתן אשפיה נאותה ברטוב, יכול להגדיל משמעותית את מחזור החיים.

הקשר בין החוזק בלחיצה ומחזור החיים בתנאי קרבונציה- בקירוב ראשון מתקיים קשר חד ערכי עם פיזור קטן. יחד עם זאת, הקשר חזק יותר כאשר מסווגים את התוצאות לפי תכולת האפר: עבור אותו חוזק מחזור החיים קצר יותר בתערובות עם אפר בשיעור של 120 ק"ג למ"ק ויותר, מאחר ומקדם היעילות לחוזק יותר גדול מהמקדם לקרבונציה.

השפעה יחסית של אשפיה והרכב על חוזק ומחזור חיים- בהצגת השפעה משולבת של הרכב ואשפיה על חוזק הלחיצה ומחזור החיים ביחס לתכונות באשפיה E, נראה שמחזור החיים המחושב הן משיקולי קרבונציה טבעית והן חוזק (בגיל 90 יום), תלוי רק באשפיה וכמעט ולא בהרכב, כאשר תלות זו באשפיה גדולה יותר לגבי מחזור החיים מאשר החוזק. מחזור החיים בתנאי כלורידים תלוי הן באשפיה והן בהרכב מבחינת בטונים עם וללא אפר, עם הקטנה גדולה יותר של מחזור החיים כתוצאה מאשפיה לקויה בתערובות עם אפר (I ו-II). נראה כי יש השפעה מתונה יותר של האשפיה על הפחתת החוזק והשפעה חריפה על קיצור מחזור החיים, וחריפה עוד יותר בתערובות עם אפר. למשל במעבר מאשפיה D (תקנית) לאשפיה C (המקבלת בשטח) חלה ירידה של 20% ו-45 – 60 אחוז במחזור החיים בתערובות ללא אפר (לעומת ירידה של 5% בחוזק) ועם אפר (לעומת ירידה של 20% בחוזק), בהתאמה.

**משמעויות לתקינה**

פריזה בתנאי קרבונציה- בהקשר של קיים ניתן להסיק מהתוצאות שכל עוד האפר מהווה תחליף חלקי לצמנט בשיעור של כ-30 עד 40 ק"ג למ"ק (מ-230 ל-200 ומ-270 ל-230 ק"ג צמנט למ"ק, בהתאמה) תרומת האפר באה לידי ביטוי גם באשפיה ירודה, וכשמדובר על החלפה בשיעור גבוה יותר של 60 ק"ג למ"ק יש יותר רגישות לאשפיה- מקדם היעילות הוא אפס באשפיה לקויה ובתנאי האשפיה המקובלים וקרוב ל-1 או יותר באשפיה המיטבית (E), אך מדובר באשפיה שאינה מציאותית בשטח. לירידה באיכות האשפיה יש משמעות מרחיקת לכת מבחינת הקיים, למשל משך החיים שחושב לבטון שקיבל אשפיה מסוג B היה חצי מזה שחושב במקרה של אשפיה D התקנית, למרות שההפרש בחוזק היה הרבה יותר קטן. מגמה נוספת שנצפתה היא שעבור אותו חוזק, מחזור החיים היה ארוך יותר עבור בתערובות ללא אפר ויש לקחת זאת בחשבון כשמסתמכים על החוזק בקביעת איכות הבטון, למשל מחזור החיים של בטון ב-30 ללא אפר גבוה בכ-70% מזה של תערובת בחוזק דומה עם 60 ק"ג אפר למ"ק.



**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
 שימושי אפר פחם בבנייה**

מניתוח התוצאות עולה שניתן לאפשר הפחתה בתכולת הצמנט המינימלית באפר (I - II) בשיעור של עד 40 ק"ג למ"ק (מ- 270 ל- 230 ק"ג צמנט למ"ק) תוך שימוש במקדם יעילות 0.5, עבור תנאי חשיפה 3 (במגע עם מים או קרקע שאינם אגרסיביים או באווירה לחה) ו- 4 (במרחק 1 ו- 2 ק"מ מהים) בת"י 466-חוקת הבטון. עבור תנאי חשיפה 1 (סביבה רגילה) הוצע להקטין את כמות הצמנט המינימלית לעד 200 ק"ג למ"ק ע"י האפר לפי  $k=0.5$  ובתנאי שטיב הבטון לא יפחת מב-30.

פריזה בתנאי כלורידים- מקדמי היעילות לגבי חדירות לכלורידים ומחזור חיים באשפרה C (שבוע התזה במים) שהיא המקובלת בשטח היו אפס. מקדמים סבירים עם משמעות מעשית התקבלו רק באשפרה D (שבוע במים) שהיא האשפרה התקנית. מגמות אלו מצביעות על כך שליעילות החלפת צמנט באפר בתחום הרלבנטי יש תלות גדולה מאד באשפרה, ויותר מאשר התלות משיקולי קרבונציה. בנוסף מקדמי היעילות לחדירות כלורידים נמצאו גדולים מהמקדמים של מחזור החיים, עד פי 2 – 3 באשפרה D. זאת מאחר והאפר יעיל בהקטנת החדירות לכלורידים אך אי אפשר למצות את כל הפוטנציאל הזה משום שהגידול בתכולת הצמנט משפיע גם על ההתנגדות לקורוזיה שמקורה ביכולת שלו להגדיל את תכולת הכלור הקריטית.

מניתוח הממצאים ניתן להסיק את הדברים הבאים לגבי פריזה בתנאי כלורידים, ובהתבסס על ההנחה שהאשפרה בשטח היא לפחות שבוע במים רצוף: **(1) למבנים במרחק 200 עד 2000 מטר מהים:** במגבלת החלפת הצמנט בשיעור של עד 40 ק"ג למ"ק, עבור דרגת חשיפה 5 (המוגדרת בת"י 466 למבנים במרחק 200 – 1000 מטר מהים) אפר בעל אחוז LOI של 7.5% ו- 4.1%, יכול להחליף את הצמנט לפי מקדם יעילות של 0.4 ו- 0.5, בהתאמה, ועבור דרגה 4 (1 ו- 2 ק"מ מהים) המקדמים הם 0.4 ו- 0.9 עבור שני סוגי האפר, בהתאמה. **(2) למבנים במרחק של עד 200 מטר מהים ובתוך הים:** עבור דרגות חשיפה 6 (עד 200 מטר מהים) ו- 7 (בתוך הים) ניתן להחליף צמנט באפר בתנאי שתכולת הצמנט המינימלית הינה 300 ק"ג למ"ק, האפר באיכות גבוהה ( $LOI=4.1\%$ ) ו-  $k=0.2$ .

**על בסיס המחקר בוצע שינוי בת"י 466 ואושרו מקדמי תחלופה לאזורי חשיפה 1-4 החשופים לתנאי קרבונציה (תחום בו נמצא בשימוש מרבית נפח הבטון המיוצר בארץ):  $k=0.5$  לאזורים בדרגות 1-3 ו-  $k=0.4$  לאזור 4, במגבלת החלפה מרבית של 40 ק"ג צמנט למ"ק ותכולת צמנט מינימלית 200 ק"ג למ"ק, ובתנאי שטיב הבטון לא יפחת מב-30 עבור אזור 1.**

ממצאי המחקר התבססו על קרבונציה מואצת בתנאי מעבדה שייתכן ומחמירה מדי לגבי אפר פחם המאופיין בתגובה איטית יחסית הבאה לידי ביטוי בתרומתו להתחזקות הבטון בגילאים מאוחרים. כמו כן קיימת אפשרות שבטון עם תכולת מים נמוכה האופיינית לבטון עם אפר באיכות טובה (LOI נמוך), יהיה עמיד יותר לקרבונציה.



**סקירת מחקרים ועבודות  
אוקטובר 2016  
שימושי אפר פחם בבנייה**

**בטון עתיר אפר**

במסגרת בחינת אפשרות שיפור מקדם היעילות של אפר הפחם והרחבת תחולתו על אזורים בעלי סביבה קשה יותר (לאור ממצאי מחקר בנטור ובאום, 2003), בוצע **סקר ספרות מקדים בנושא שימושים בעולם בבטון עתיר אפר פחם**, ע"י דר' רינה וסרמן, פרופ' ארנון בנטור ופרופ' קוסטה קובלר מהמכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון. בטונים אלו משמשים ליציקות מיוחדות כגון צינורות, סכרים ויציקות ימיות, הודות לתכונות המיוחדות של הבטון. הסקר, שהושלם ב-2007, מדגיש את היתרונות הפוטנציאליים להלך של בטון זה בהשוואה לבטון רגיל כפי שעולים מניתוח השפעת תכונות האפר על הבטון מתוך העבודות שנסקרו:

**תכונות האפר**

- **LOI** – בעזרת אפר בעל LOI נמוך ופילוג ג"ג אופטימאלי (כולל דקות) ניתן להקטין את תצרוכת המים (תהליך שכשלעצמו מותנע כתוצאה מהשימוש באפר, ללא קשר לתכולתו בבטון) ולקבל תכונות זרימה מצוינות, המתאימות לתערובות המיועדות להובלה במשאבה ולהידוק עצמי. בספרות נמצא יתרון לשימוש באפר פחם עם LOI קטן מ-1% בבטון עם 55% אפר, שבו מתאפשרת הקטנה של תצרוכת המים בכ-15% לעומת 10% עבור LOI בטווח 2-3.3 אחוז. כמו כן, ערכי LOI גבוהים היו קשורים עם חוזקי לחיצה נמוכים יותר בתערובות בעלות מנת מים לחומר מקשר (צמנט+אפר) דומה (0.52).
- **דקות האפר** – לא נמצא קשר בין פרמטר זה ובין חוזק בלחיצה- הבטונים שהיו בעלי חוזק לחיצה גבוה יותר לא היו בהכרח דקים יותר. עם זאת, לא ניתן לשלול לגמרי את השפעת הדקות- נמצא שבטון עם צמנט מעורב המכיל 55% אפר אשר נטחנו יחד, היה בעל חוזק גבוה יותר בגיל 90 יום משל בטון שבו האפר הוסף ישירות לבטון.
- **ריאקציה פוצולנית** – בבטון עתיר אפר קיים פוטנציאל ניכר לחיזוק כתוצאה מריאקציה פוצולנית שהיא תהליך איטי הנמשך גם מעבר ל-28 יום. כלומר בגילים מאוחרים החוזק היחסי של המערכת, בהשוואה למערכת בעלת מנת מים לחומר מקשר דומה מצמנט בלבד, עולה. אולם למימוש פוטנציאל זה דרושה סביבה רטובה ואשפחה טובה יותר מזו הניתנת בבטונים רגילים, זאת מאחר שעם התקדמות הריאקציה הפוצולנית הולכת וקטנה תכולת מימן הסידן הנצרכת בתהליך זה – במערכת בעלת 20% אפר פחם נשארת בכל הגילים תכולת דייה של מימת הסידן לקיום המשך הריאקציה הפוצולנית; במערכת עתירת אפר קטנה תכולת מימת הסידן, אבל בגיל 28 יום היא נותרת מספיק גבוהה בכדי לאפשר את המשך התהליך הפוצולני אם מתקיימים תנאי הרטיבות הנדרשים לצורך זה. מאידך, באחד המחקרים דווח גם כי בגיל 90 יום, בתכולת אפר של 45 – 55 אחוז, חלק האפר שהגיב היה פחות מ-20%, דהיינו למעלה מ-80% ממנו נשאר כמלאן אינרטי. משמעות הדבר היא שמעבר לתכולת אפר וגילים מסוימים האפר משמש למעשה כמלאן אינרטי.



**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
 שימושי אפר פחם בבנייה**

מימוש התהליך הפוצולני משפר את הקיים בבטונים עתירי אפר העולה על זה של בטונים רגילים, של עמידות בסביבה ימית שבה הבטון נתון להתקפת סולפטים והזיון בבטון רגיש לקורוזיה כתוצאה מחדירת כלורידים. בהקשר לפוצולניות בבטון עתיר אפר יש להביא בחשבון את האלקלים והסולפטים באפר אשר יכולים לשפעל אותו ולהגדיל את יעילותו בהיבט של הריאקציה הפוצולנית- חוזק בגיל צעיר של בטונים עתירי אפר תלוי בתכולת האלקלים והסולפטים במערכת החומר המקשר (צמנט+אפר). נמצא שככל שהיא גבוהה יותר החוזק בגיל 1 יום גבוה יותר. אם הריאקציה הפוצולנית ממומשת באופן מיטבי מתקבל בטון בעל מבנה פנימי הומוגני, שהוא תוצאה של הריאקציה עם מימת הסידן והפיכתו לגיל צמנטי, וכן גם שיפור המבנה באזור המעבר אגרגאט-מטריצה.

**תכונות הבטון**

- **חוזק** – קצב התפתחות החוזק בבטונים עתירי אפר הינו נמוך יותר מאשר בטון במנת מים דומה מצמנט פורטלנד. כדי להשיג התפתחות חוזק מתאימה יש להכין את הבטון עתיר האפר ביחס מים לחומר מקשר נמוך יותר מזה של בטון עם צמנט פורטלנד רגיל. לפיכך, יש לשלב בבטונים אלו מוסף פלסטי או על-פלסטי. ההסבר לכך הוא שבטונים אלו צריכים להיות בעלי כדאיות כלכלית, כלומר ללא תכולה גבוהה מדי של חומר מקשר. לשם כך יש צורך בהפחתה של תצרוכת המים תוך שמירה על עבידות מתאימה, ולהשגת מטרה זו יש להשתמש באפר בעל יכולת להקטין את תצרוכת המים וכן גם שימוש במוספים משפרי עבידות. על כן היבט חשוב של תערובות אלו הוא האינטראקציה עם מוספים. מהמחקרים שנסקרו עולה ששימוש במוסף על פלסטי מסוג SP גורם לעיכוב בהתחזקות בטונים עתירי אפר (50 – 70 אחוז אפר) בגיל 1 יום כמו גם בגיל 90 יום.
- בנושא אשפרת הבטון – דווח שאשפרה ברטוב במשך 3 חודשים הביאה לשיפור בחוזק הלחיצה של בטון עם 70% אפר (יחס מנת מים לחומר מקשר- 0.28) מ- 41 ל- 63 מגה-פסקל. היעדר אשפרה ברטוב גרמה לירידה בחוזק בגיל 28 יום מ- 43 ל- 33 מגה-פסקל. מגמות ההתחזקות של חוזק הלחיצה דומות לאלו שדווחו לגבי חוזק מתיחה ובקיעה.
- **מודול אלסטיות** – בבטונים המתוכננים לאותה רמת חוזק אין הבדלים ניכרים בפרמטר זה בין בטון רגיל ועתיר אפר, בתנאי שהאשפרה ארוכה דייה בכדי שהבטון עתיר האפר יגיע לחוזק הבטון הרגיל. באותה מנת מים לחומר מקשר, פרמטר זה הולך וקטן עם העלייה בתכולת האפר בבטונים עתירי אפר וזאת כתוצאה מחוזק נמוך יותר בבטונים אלו.
- **התכווצות בייבוש וזחילה** – הבדלים קטנים בהתכווצות בין בטון רגיל ועתיר אפר; בחלק מהעבודות דווח על התכווצות גדולה יותר בבטון עתיר אפר ובאחרים ההיפך. בבטונים בעלי מנת מים נמוכה מ- 0.4 יש שני מרכיבים בהתכווצות: התכווצות עצמית ( autogenous shrinkage) ובייבוש. באחת העבודות דווח שהוספת אפר מקטינה את המרכיב הראשון;





**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
 שימושי אפר פחם בבנייה**

מאידך, בעבודה אחרת נמצא שמרכיב זה גדל עם עלייה בדרגת הריאקציה של האפר וככל שתכולת האלומינה באפר גבוהה יותר (השפעה הבאה לידי ביטוי עד גיל 56 יום).

- **קיים** – בבטונים עם אפר לאשפרה יש משקל רב בהבטחת התפתחות התהליכים הפוצולניים המפחיתים את נקבוביות הבטון ובאים לידי ביטוי בהקטנת **חדירות לאוויר וספיגות למים** (בבטונים עם 45% אפר שקיבלו אשפרה ממושכת במים). כמו כן, לבטונים עתירי אפר עמידה משופרת ב**חדירות לכלורידים** (למשל תוצאות מחקר לפיהן החדירות לכלורידים ירדה מ-6890 קולון בבטון ללא אפר ל-1170 קולון בבטון עם 55% אפר (% משקלית צמנט+אפר) לאחר 28 ימי אשפרה; אפקט שהלך וגדל לאחר 91 ימי אשפרה). השיפור בהתנגדות לכלורידים נובע מציפוף המבנה כתוצאה מהריאקציה הפוצולנית ומקשירה כימית של הכלורידים ע"י תרכובות אלומינוסיליקה בבטון. כן נמצא כי **האיתנות** בסולפטים של בטונים עתירי אפר (50%) גבוהה מזו של בטונים ללא אפר. גם במקרה זה הגורם לכך הוא ציפוף המבנה כתוצאה מהריאקציה הפוצולנית, וכן הקטנה משמעותית של היווצרות תרכובות רבות נפח כמו אטרינגיט וגבס והתרחשותן רק ליד פני השטח בבטון עתיר אפר ולא בעומק הבטון. עם זאת, נצפתה איתנות פחותה בבטונים עתירי אפר שבאו במגע עם מלחים מפשירי קרח כ- $CaCl_2$  או  $NaCl$ . לפיכך, דרוש מחקר לקביעת איתנות בטון עתיר אפר בהשפעת גורמי סביבה תוקפניים. בטון עתיר אפר רגיש יותר ל**קרבוניציה** ויש להתחשב במגבלה זו. למשל, דיווח באחד המחקרים על עומקי קרבוניציה של 17, 25 ו-50 מ"מ בבטון עם 0, 55 ו-70 אחוז אפר (% משקלית צמנט+אפר), בהתאמה, בתנאי קרבוניציה מואצת של 20%  $CO_2$  למשך 28 יום. כדי לממש עמידות בקרבוניציה שתהיה אקווילנטית לזו של בטון ללא אפר פחם נדרשת אשפרה של 28 יום במים, וגם אז לא תמיד מגיעים לאותו תפקוד.
- **מבנה** – לאפר יש השפעה חיובית על ציפוף אזורי חולשה בבטון הנוצרים באזורי היווצרות מימת הסידן סביב האגרטים, עקב התגובה של האפר עם מימת הסידן בתהליך הפוצולני.
- **סומך** – קצב איבוד הסומך של בטונים עתירי אפר הינו איטי יותר מאשר של בטונים ללא אפר, ועולה עם העלייה בסוג החוזק של הבטון.
- **סידוק** – בבטון עתיר אפר יש רגישות מוקטנת לסידוק כתוצאה מרמה נמוכה יותר של מאמצים תרמיים המתפתחים בימים הראשונים, וכן גם התכווצות נמוכה יותר.

**מסקנות והמלצות**

- לאפר פחם מקדם יעילות נמוך יחסית (>1). על כן, כדי לקבל תערובת עתירת אפר בעלת חוזק דומה לזה של בטון מצמנט בלבד, מנת המים לחומר מקשר בבטון זה צריכה להיות נמוכה מזו של בטון שווה ערך המכיל צמנט בלבד. תכנון תערובות עם מנת מים לחומר מקשר מתחת ל-0.4 מאפשר לנצל את אפקט המלאן הבא לידי ביטוי במנת מים נמוכה, ולפצות לפחות חלקית על מקדם היעילות הנמוך.



**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
 שימושי אפר פחם בבנייה**

- ניתן לתכנן בטונים עתירי אפר מסוגים ב-20, ב-30 ו- ב-40. כדי לקבל תערובות בעלות מנת מים לחומר מקשר נמוכה מספיק ועם זאת כדאיות מבחינה כלכלית (ללא תכולה גבוהה של חומר מקשר), יש להפחית את תכולת המים אולם תוך שמירה על עבידות מתאימה. אחת מהדרכים להשיג זאת היא שילוב מוספים משפרי עבידות בבטונים עתירי אפר.
- בטונים עתירי אפר עם מוספים פלסטיים ועל פלסטיים מאופיינים בשיעורי התחזקות איטיים יותר. יש חשיבות לבחינת האינטראקציה של הבטון עם מוספים, בכל הקשור לתכונות הבטון הטרי ואף לגבי התפתחות חוזק בגיל מוקדם.
- להרכב הכימי והמינרלי של האפר השפעה חזקה על חוזק בטון עתיר אפר בגיל 1 יום. נושא זה מחייב לימוד מיוחד של האינטראקציה בין האפר בבטון.
- ערך LOI של האפר משפיע מאד על חוזק בטון עתיר אפר בגיל 28 יום. נראה שקיים סף LOI של 1% שמתחתיו יש יתרון ברור לאפר בבטונים עתירי אפר.
- החל מגיל 7 יום החוזק היחסי של בטונים עתירי אפר מתקרב לזה של בטונים ללא אפר, דהיינו כ- 60 עד 70 אחוז.
- בגילים מאוחרים (מעל 56 יום) מותנה קצב התחזקות בטון עתיר אפר בהרכב הכימי והמינרלי של האפר וחוזק הלחיצה תלוי מאד בקיום אשפרה רטובה ממושכת של הבטון.
- חוזק בטון עתיר אפר עם צמנט מעורב המתקבל על ידי טחינה משותפת של האפר עם הקלינקר, גבוה משל בטון עם צמנט ואפר המוספים בנפרד, כנראה הודות לשפעול האפר בבטון.
- במערכות עתירות אפר שהן שוות חוזק למערכת בקרה מצמנט בלבד, יש יתרון לתערובת עם האפר בחדירות לכלורידים, בתנאי שניתנה אשפרה סבירה.

**מחקר המשך (למחקר מ- 2003) של פרופ' ארנון בנטור ודר' הדסה באום שסוכם ב- 2008, נועד לבחון את האפשרות להגדיל את מקדם היעילות של האפר כתחליף לצמנט בתנאי קרבונציה (אזורי חשיפה 1 – 4) ולגבש קריטריונים להחלפת צמנט באפר בתנאי כלורידים (סביבה ימית, אזורי חשיפה 5 – 6). בדרגות החשיפה הנמוכות המחקר התמקד בבחינת מידת היציגות של הקרבונציה המואצת לתהליכי הבלייה האמיתיים לאורך זמן, והשפעת תכולת המים על מקדם היעילות בתלות באיכות האפר (באחוז LOI ככל הנראה מקדם היעילות גבוה יותר).**

יעילות האפר בתנאי כלורידים נבדקה לאורך זמן (מ- 0.5 שנה ועד 5 שנים) בבטונים בעלי תכולת צמנט (CEM II 42.5 N A-V) של 270-350 ק"ג למ"ק ותכולות אפר של 60, 90 ו- 120 ק"ג למ"ק, בתנאי אשפרה שונים (E-B, ראה מחקר קודם). כצפוי נמצא שהחדירות לכלורידים קטנה עם טיב האשפרה ועליה בתכולת האפר. בדומה לממצאי הקרבונציה- לא היה הבדל בהקטנת החדירות בין שני סוגי האפר. בתנאי אשפרה של התזה במים (B ו- C) תפקוד הבטונים לחדירות כלורידים היה



**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
 שימושי אפר פחם בבנייה**

ירוד ביותר (חדירות גבוהה מ- 2000 קולון) ללא קשר להרכב התערובת ותכולת האפר, ובתנאים אלה אין משמעות מעשית לחישוב מקדמי יעילות. כן נמצא שהוספת אפר לתערובות עם מנת מים 0.45 מאפשרת להקטין את החדירות לרמה (500 קולון) המאפשרת עמידות יוצאת דופן לכלורידים.

אפיון תפקוד הבטונים להתנגדות לקרבונציה התבסס על חשיפה טבעית ובדיקה מואצת בנקודות ביקורת לאורך זמן (מ- 0.5 ועד 15 שנה לבדיקה בתנאים טבעיים, עד 90 יום לבדיקה המואצת) של תערובות בעלות תכולת צמנט של 200 ו- 230 ק"ג למ"ק, תכולת מים של 185 ו- 165 ק"ג למ"ק (כדי לבדוק האם בתכולת מים נמוכה יותר יעילות האפר טובה יותר) ותכולת אפר של 30, 60 ו- 90 ק"ג למ"ק ע"ח החול בתערובת, כאשר האפר היה באיכות גבוהה – LOI עד 3% המאפשר הקטנת בתצרוכת מים, ובאיכות ונמוכה – LOI כ- 6% שאינו מאפשר זאת. התוצאות שהתקבלו הראו שעבור הרכב נתון של צמנט ובטון אין הבדל משמעותי בין השפעת שני סוגי האפר על החוזק וקרבונציה למרות אקטיביות פוצולנית שונה בין האפרים, ושאיכות האפר באה לידי ביטוי בעיקר בהקטנת תצרוכת המים באפר בעל ה- LOI הנמוך יותר. ממצא מפתיע שהתקבל הוא שמקדמי היעילות היו הרבה יותר נמוכים מאלה של המחקר הקודם, גם בתערובות בעלות תכולת מים דומה, למרות שהאקטיביות הפוצולנית של האפרים במחקר ההמשך הייתה גבוהה יותר. ככל הנראה הסיבה להפחתה ביעילות קשורה לירידה בטיב הצמנט שנעשה בו שימוש בשלב המחקר השני לעומת הצמנט בשלב הראשון, שכתוצאה ממנה יכולת השפעול (התנעת תהליכי ההידרציה) של האפר המוסף לבטון הייתה נמוכה יותר.

**יעילות אפר מרחף בבטון**

אם בעבר המשתנה הכמעט יחיד בבטון היה האפר, הרי שכיום יש שינוי בו זמנית גם בצמנט (הרכב וגודל חלקיקים) ובבטון (מוספים כימיים). כדי לבחון את ההשערה על השפעת איכות הצמנט על תפקוד האפר, נערך [מחקר על ידי דר' עמית קני ופרופ' ארנון בנטור בין 2009-2014 שעסק באפיון התנהגות סוגי אפר פחם שונים בבטונים העשויים מצמנט מסוג CEM I \(צמנט ללא אפר\) ו- CEM II \(צמנט מעורב עם אפר\)](#), במטרה לבחון את היעילות, במונחי חוזק וקיים, של אפר פחם המשולב בבטון עצמו כמרכיב נפרד ולברר האם השימוש בצמנטים מעורבים מקטין את יעילות האפר בבטון. בנוסף, נבדקה תרומת מלאן אבן גיר לחוזק הבטון בהשוואה לתרומת האפר. המחקר משתלב במגמה הבולטת כיום בתעשיית הצמנט והבטון של הקטנת תכולת הקלינקר בצמנט פורטלנד במוצר הסופי, משיקולים כלכליים וסביבתיים. הקטנת הקלינקר יכולה להתבצע בשתי צורות עיקריות: על ידי ייצור צמנטים מעורבים עם תוספים מינרליים כדוגמת אפר מרחף, סיגים, גיר וחרסית משופעלת, אשר תפקודם יהיה דומה או אף יעלה על צמנט רגיל; או על ידי שילוב התוסף המינרלי בנפרד בבטון ובמקביל הקטנת תכולת הצמנט בשיעור מתאים. שתי הצורות מקובלות כיום ויעילותן להקטנת תכולת הקלינקר מגובה



**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
 שימושי אפר פחם בבנייה**

כיום על ידי שימוש במוספים כימיים משפרי עבידות. מוספים אלה יכולים לאפשר הקטנה במנת המים ובכך לאפשר השגת חוזק בגיל צעיר בבטונים בהם אפקט החוזק של התוספים המינרליים בא לידי ביטוי רק בגילאים מאוחרים יותר, ולשפר את פיזור החלקיקים הדקים של התוספים המינרליים בבטון וע"י כך להקנות להם אפקט מלאן שניתן לשלבו גם בטכנולוגיות המבוססות על פילוג אופטימאלי של החלקיקים הדקים במערכת הכוללת צמנט, תוספים מינרליים ומלאנים.

לפיכך, מבחינה טכנולוגית האופטימיזציה של הקטנת תכולת הקלינקר בבטון ושל יעילות האפר בבטון צריכה לקחת בחשבון את האינטראקציות בין הקלינקר, התוספים המינרליים בהם האפר (כמרכיבים בצמנט ובבטון) ומוספים כימיים. זו מטרת העל של המחקר - ליצור בסיס ידע טכנולוגי משותף לגורמים המשפיעים בתעשיית הבטון (צמנט, אפר פחם, בטון) לתועלת המשק: יצרן הצמנט "נשר" המעוניינת לקדם שימוש בצמנט 32.5 בעל תכולת קלינקר של כ- 65% המקובל באירופה, בהשוואה לצמנט 42.5 הנפוץ היום בישראל והמכיל כ- 80% קלינקר; מנהלת האפר המעוניינת להבטיח שימוש מיטבי באפר ע"י סיווג יעילותו כמחליף קלינקר בהתאמה לסוגי הצמנט המיושמים בבטון, היום ובעתיד, ומתן ביטוי בתקן הבטון לסיווג זה; ויצרני הבטון האמורים לתכנן את הרכבי התערובות ולבחור במוספים הכימיים המתאימים, בתלות באיכויות חומרי הגלם השונים לרבות הצמנט והאפר ומקדם התחלופה ביניהם.

הוכנו תערובות בטון עם אפר מרחף משלושה מקורות עיקריים (בעלי אקטיביות פוצולנית נמוכה, בינונית וגבוהה מבין האפרים העיקריים המיובאים לישראל), כל תערובת עם 160 ק"ג/מ"ק מים, 230 ק"ג/מ"ק צמנט (CEM I, CEM II) ו- 80 ק"ג/מ"ק אפר (על חשבון החול הדק), יחסית לתערובות בקרה ללא אפר פחם המכילה 160 ק"ג/מ"ק מים וצמנט בשיעור 230 ו- 270 ק"ג/מ"ק. כמו כן, כל התערובות הכילו 1600 ק"ג/מ"ק אגרגטים ו- 300, 360 ו- 390 ק"ג/מ"ק חול דק בתערובות עם האפר והבקרה בתכולת צמנט 270 ו- 230 ק"ג/מ"ק, בהתאמה. המוסף הכימי שנבחר היה ריאובילד 1000 לאור נתוני הסומך הדומים בתערובות עם האפר לתערובת הבקרה. הבדיקות כללו אפיון של מקדם היעילות הפוצולנית של מקורות האפר, עבידות (סומך ומשקל מרחבי), חוזק (בגילאים 7, 14, 28 ו- 90 יום) וחדירות (ספיגות קפילרית וחדירות אוויר) של הבטונים.

**תוצאות**

**אקטיביות פוצולנית**

מדד זה מבטא את היחס בין חוזק לחיצה בגיל 28 ו- 90 יום, של תערובת חול-צמנט לבין תערובת שבה 25% מהצמנט הוחלף באפר מרחף. כלומר, ערך 75% משמעו אין תרומה של האפר לחוזק (k=0) וערך 100% משמעו 100% יעילות - תפקוד שקול של ק"ג אפר לק"ג צמנט (k=1). הבדיקה התקנית מבוצעת עם צמנט CEM I; במחקר נבדקה יעילות האפר ביחס לשני סוגי הצמנטים. לא



## סקירת מחקרים ועבודות אוקטובר 2016 שימושי אפר פחם בבנייה

נמצא קשר ברור בין שתי המערכות או יתרון ברור למערכת צמנט CEM I למרות שהוא איכותי יותר; יתר על כן, יעילות האפר שהתקבלה במערכת צמנט CEM II לעתים היתה אף גבוהה יותר.

### סומך

בכל התערובות עם CEM II הסומך היה גבוה משמעותית מזה של התערובות עם CEM I, ונע בין 40-90 מ"מ. ייתכן והסיבה לכך היא תכולת אלומינטיים נמוכה יותר בצמנט CEM II הגורמת להגדלת האפקטיביות של המוסף.

### חוזק

לצורך השוואה בין שתי המערכות צמנט CEM I ו-CEM II, הוגדר פרמטר בשם מקדם יעילות בבטון המבטא את היחס חוזק הבטון עם אפר פחם לחוזק בטון הבקרה. בכל התערובות מקדם היעילות עלה עם הגיל בין 7 ל- 28 יום, כאשר בין גיל 28 ל- 90 יום היתה ירידה במקדם של התערובות עם אפר וצמנט CEM II שלא נצפתה בתערובות עם אפר ו-CEM I. הסיבה לכך היא עליה גדולה יותר בחוזק הבטון עם CEM II ללא אפר בין גיל 28-90 יום לעומת הבטון עם CEM I ללא אפר, כנראה תוצאה של התרומה המאוחרת של האפר לחוזק ב-CEM II. מהשוואה בין המקדמים לתערובות השונות לא ניתן היה לקבוע שבמערכת עם צמנט CEM I היעילות גדולה יותר. נצפתה גם תרומה לחוזק בתערובות עם צמנט ומלאן אבן הגיר שהוא לכאורה אינרטי, קטנה מזו של האפר אך בעלת משמעות.

מתוך כך הוגדרו שלושה רכיבים התורמים לחוזק: רכיב הצמנט, המלאן והפוצולני. לצורך אפיון התרומה של רכיבים אלו נעשה שימוש בהתערובות בקרה עם 230 ק"ג/מ"מ צמנט ועל בסיס זה הוגדר פרמטר אפקט מלאן (הפרש החוזק בין תערובות הבקרה וחוזק התערובות עם מלאן הגיר, יחסית להפרש החוזק בין תערובות הבקרה עם 230 ו- 270 ק"ג/מ"מ צמנט) ואפקט פוצולני (הפרש החוזק בין התערובות עם אפר פחם והתערובות עם מלאן הגיר, יחסית להפרש החוזק בין תערובות הבקרה עם 230 ו- 270 ק"ג/מ"מ צמנט). אפקט המלאן היה קבוע בקירוב ולא נראתה מגמה ברורה הקשורה בגיל או סוג הצמנט. האפקט הפוצולני גדל עם הגיל, והיה גדול מאפקט המלאן לכל סוגי אפר הפחם.

### קיים

הקיים ניתן להערכה מתוך פרמטר חדירות, כאשר בעבודה הנוכחית נבדקה חדירות לאוויר וספיגות קפילרית. נמצא שלא תלות במקור האפר היה שיפור בהתנגדות לחדירת אוויר ומים לתוך הבטון למרות האשפורה המוגבלת (7 יום במים).



**סקירת מחקרים ועבודות  
אוקטובר 2016  
שימושי אפר פחם בבנייה**

**דיון ומסקנות**

הממצאים שהתקבלו היו בחלקם מפתיעים – לא תמיד נמצאה קורלציה בין מקדם האקטיביות הפוצולנית לבין פרמטרים פיסיקליים בסיסיים של האפר (דקות טחינה, LOI) ובין מקדם האקטיביות הפוצולנית של האפר לבין תפקוד האפר בבטון הנמדד באמצעות מקדם יעילות בבטון שהוגדר במחקר. האקטיביות הייתה שונה בבדיקה עם צמנטים שונים או צמנטים מאותו סוג שיוצרו בזמנים שונים, והבדלים אלו לא השתקפו בתפקוד האפר בבטון. מקור האפר עם האקטיביות הפוצולנית הנמוכה ביותר היה אמנם החלש ביותר בבטון, אך הבדלי האקטיביות הפוצולנית בין האפרים היו קטנים בעוד שבבטון הם היו גדולים. את הערכים הגבוהים יותר של מקדמי היעילות בבטון עבור ערכים נמוכים יותר של אקטיביות פוצולנית ניתן להסביר באפקט מלאן, שהוא משמעותי יותר בבטון, וכנראה זניח בצמנט. אפקט זה קשור כנראה בלוג גודל חלקיקים של הצמנט והאפר.

ממצאים אלו עולה שחוזק הבטון כמעט בלתי תלוי במקדם האקטיביות הפוצולנית של האפר, ושצמנט CEM II שהוא נחות יותר מ-CEM I, לא בהכרח נותן יעילות נמוכה יותר של האפר בבטון אלא אף משפעל אותו טוב יותר בבטון. ייתכן וחלק מהסיבות לכך קשורות לשימוש במוספים משפרי עבדות בבטון, לשימוש בצמנטים מעורבים עם תוספים פוצולניים היכולים להביא להקטנה ביעילות האפר שכן חלק מתוספים אלו מנצלים את אקטיביות הצמנט ע"ח האפר, ולדקות הטחינה הגבוהה של צמנטים מודרניים הפוגמת בפילוג הרציף של גודל הגרגר ועקב כך יוצרת אריזה פחות צפופה מבעבר במערכת צמנט-אפר שהאפר כפרקציה הדקה השלים בה את הצמנט הגס.

המסקנה העולה מן המחקר היא כי תכונות האפר (אקטיביות פוצולנית, דקות, LOI) אינן מהוות בהכרח אמד לתפקודו בבטון ויש צורך בפיתוח שיטות פשוטות ומהירות יותר לאפיון ישיר של השפעת האפר על הבטון.