

מדריך שימושי אפר פחם במוצרי בנייה

אינג' גדעון אירוס ופרופ' דן רבינא, 2007, המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון

מהו אפר פחם מרחף

אפר הפחם המרחף משמש כאחד ממרכיבי הבטון- כתחליף חלקי לצמנט ולחול המהווה אחד ממרכיבי הבטון. חול הים (זיפזיף) הולך ואוזל בישראל. כן משמש אפר הפחם כחומר גלם בייצור אגרגט קל. שימושים אלו כדאיים מבחינה כלכלית, אנרגטית ואקולוגית¹. התכונות הפיסיקליות והכימיות של אפר הפחם מקנות לו את היכולת להחליף חלק ממרכיבי הבטון.

הרכבו ותכונותיו מושפעים מהרכב פחם המקור, תנאי שריפת הפחם ודקות טחינתו טרם השריפה, כאשר סוג מערכת איסוף האפר המרחף משפיעה גם היא על גודל חלקיקי האפר המרחף השוקעים בה.

התכונות הפיסיקליות- כימיות של האפר המרחף משפיעות משמעותית על איכותו מבחינת יישומו כמחליף חלקי לצמנט בבטון: תכולת הסיליקה והאלומינה, תכולת הפחמן הבלתי שרוף המבוטאת ב-LOI ודקות האפר המבוטאת בשארית על נפה 45 מיקרון. אלה הם הפרמטרים העיקריים המשפיעים על האקטיביות הפוצולנית של האפר והם נדרשים לסף מסוים לפי התקן. על כן יש למקד את הגדרת סוג האפר על פי איכותו במונחי LOI ודקות גרגר.

התקשות צמנט בנוכחות מים- הידרציה, נובעת מהתכונות הפוצולניות בצמנט. חומרים פוצולניים מכילים סיליקה או אלומינה והם כמעט ללא תכונות מליטה, אולם כחומר דק בתנאי רטיבות הם מתרכבים בריאקציה כימית בטמפרטורות רגילות עם הסידן, ונוצר החומר מימת הסידן $(Ca(OH)_2)$ שהוא בעל תכונות מליטה. תהליך ההידרציה של אפר פחם מרחף דומה לזה של הצמנט, כאשר אפר מטיפוס F ייצור הידרציה כאשר אלקלים ו- $Ca(OH)_2$ מוספים אליו, בעוד אפר מטיפוס C מכיל יותר CaO והוא בעל יכולת התקשרות עצמית והתקשות גבוהה יותר גם ללא נוכחות צמנט.

בתהליך טיוב אפר מרחף ניתן להקטין את דקותו ואת אחוז ה-LOI. טיוב האפר בעתיד מחויב המציאות, כפתרון כלכלי הן לתחנות הכח והן לתעשיית הבנייה, עם שימוש עתידי בתחנות הכח בארץ, בטכנולוגיה לסילוק NOx שתוצר הלוואי שלה הוא הימצאות אמוניה באפר.

אפר פחם מרחף בתעשיית הבטון

הוספת אפר פחם מרחף לתערובת הבטון יכולה להתבצע באחת משתי הדרכים כאשר לכל דרך יתרונות ותסרונות מבחינת החיסכון הכלכלי (איחסון, שינוע וכו'): ייצור צמנט מעורב כאשר אפר הפחם המרחף מהווה חלק אינטגרלי ממנו, והוספת אפר פחם מרחף לתערובת הבטון כפי שמוסיפים את הצמנט ו/או דקים במפעל לייצור בטון.

עד היום מיוצרים בעיקר שני סוגי צמנט ע"י חברת נשר- CEM II 42.5 שהיה ידוע כצ.פ. 250 ו- CEM I 52.5 שהיה ידוע כ צ.פ. 300, כאשר עפ"י הרביזיה האחרונה בת"י 1 אפשר כיום להשתמש ב-27 סוגי צמנט, בהם גם 4 סוגי צמנטים המכילים אפר פחם וזאת בתנאי שהצמנטים הללו מוכרים ויש עימם ניסיון עבודה, אחרת יש לבצע קודם לשימוש בהם ניסויים מוסכמים.

1. מילים המודגשות בקו מוסברות בהרחבה בדוח המלא.

גורמי ההשפעה העיקריים של אפר הפחם המרחף על תכונות הבטון, גורמים המשפיעים הן חיובית והן שלילית:

- שיפור עמידות הבטון הטרי
- הקטנת תצרוכת המים בתערובת הבטון הטרי על מנת לקבל סומך נדרש
- הגדלת לכידות הבטון
- שינוי בהפרשת מים (Bleeding)
- התפתחות חוזק איטית יחסית בגיל מוקדם וחוזק גבוה יותר בגיל מאוחר
- הקטנת החדירות (בטון אטום יותר)
- שיפור העמידות בפני התקפת סולפטים
- האטת תהליך היווצרות חום ההידרציה
- הקטנת ריאקציה אגרגט אלקלי
- שיפור של פני המוצר
- שיפור הקיים
- אופטימיזציה כלכלית (עלות נמוכה יותר של הבטון)
- הקטנת העמידות בתנאי קפיאה והפשרה
- קושי בשליטה על תכולת האוויר הכלוא

באופן כללי אין מניעה מלהשתמש באפר פחם מרחף כמרכיב בתערובות ומוצרי בטון למיניהם כל עוד "אינו פוגע" בתפקוד הבטון או בדרישות הספציפיות ממנו. יתר על כן, לשילוב אפר מרחף בתערובות בטון יש יתרונות: בהקטנת הצמנט הנדרש, הגדלת עמידות הבטון ובאפשרות ייצור "בטון מתפלס מאליו" בשילוב האפר עם מוספי על. כמו כן, אפר המוסף לכמה סוגי "בטונים מיוחדים" – בטון ללא שקיעה, בטון בעל חוזק גבוה, בטון מהודק ע"י מכבש, בטון רב נפח, בטון משאבה ובטון עמיד בפני סולפטים, משפר את חוזק הבטון המתפתח גם בגילים מאוחרים, מפחית את כמות המים בתערובת, מקטין את חום ההידרציה, גורם לקבלת תערובת עבודה יותר ומשפר את עמידות הבטון בפני סולפטים.

ניתן להשתמש באפר פחם מרחף כחלק מהצמנט ו/או האגרגט הדק בתערובת בטון גם בייצור מוצרי בטון- צינורות בטון, לוחות בטון טרומי ובלוקים מבטון (בישראל כיום נאסר להשתמש באפר פחם בתערובות המיועדות לבטון דרוך). היתרונות בשימוש באפר בתערובות אלו הוא שמירה על החוזק הנדרש והעלאת עמידות התערובת המקלה על הטיפול בתבניות ועוזרת לקבל מוצר מוגמר משופר וחלק יותר. מאידך, השימוש באפר יכול להאריך את משך הזמן הנדרש להעביר את מוצר הבטון מהתבנית לתאי האשפרה ו/או מתאי האשפרה לאחסון. אפר פחם מרחף משמש כמרכיב במוצרים נוספים: בחנ"מ – בטון בעל חוזק נמוך מבוקר (כ-8% ממשקל תערובת בטון זה), ואגרגטים קלים המיועדים לייצור "בטון קל".

תקינה

במסגרת תקינה של אפר פחם לבטון, ניתן למצוא ברוב התקנים את הבדיקות הבאות להערכת התאמת אפר הפחם לשימוש בבטון, על מנת לעמוד בסף הערכים הנדרשים לכל פרמטר בדיקה בהתאם לתקן, המסתמך על תקינה אירופית בעיקר:

- אקטיביות פוצולנית

- דקות, גודל גרגיר (שארית על נפה $45 \mu m$) או שטח ספציפי- השפעה על תצורת המים ועל האקטיביות הפוזולנית. ככל שאפר הפחם המרחף דק יותר, הפוזולניות של האפר טובה יותר.
- תכולת פחם בלתי שרוף בבדיקת הפסד בקלייה- הימצאות הפחמן לא שרוף באפר גורמת בעקיפין נזק לבטון עקב ספיחת מים ומוספים כימיים, קושי בשליטה על כמות האוויר הכלוא בתערובת הבטון, הארכת זמן ההתקשרות ואי אחידות בצבע הבטון. לכל אלה יש השפעה על תכונות הבטון הטרי והקשוי.
- תכולת רטיבות
- הרכב כימי או בדיקה ספציפית של מספר גורמים כימיים- תחמוצות גפרית ומגנזיום באפר עשויות להזיק לבטון ע"י תפיחתו וסידוקו, ולפיכך יש להגביל את כמותם באפר. בנוסף, ריאקציות בין אגרגטים בהרכב מסוים לאלקלים בבטון גם עלולים להזיק לבטון.
- בדיקת חוזק לחיצה של תערובת בטון המכילה אפר פחם
- בדיקת זמן התקשרות- נוכחות אפר פחם מרחף בבטון דוחה את זמן ההתקשרות של תערובת הבטון, במידה התלויה בכמות האפר, דקותו, מהרכבו הכימי, ובעיקר מכמות הפחמן החופשי בו.

ת"י 466 (2003) המהווה רביזיה לתקן משנת 1987, מאפשר שימוש באפר פחם כתוסף מינרלי בתערובת הבטון, כתחליף חלקי לצמנט ולחול. התקן קובע את כמות הצמנט המינימאלית בכל "סוג מבנה או רכיב" (אזור חשיפה) בלי להתייחס לשימוש באפר הפחם בתערובת. התקן גם מתייחס לדרך חישוב כמות התוסף המינרלי בתערובת בין אם הוא אפר פחם מרחף או מיקרוסיליקה, המבוססת על הנחיות ה- EN206 לפיהן כמות האפר הפחם בבטון (שנועדה להחליף צמנט) לא תעלה על 33% במשקל מכמות הצמנט המעשית בתערובת, יחס מים:צמנט ייקח בחשבון את כמות האפר הפחם בתערובת בהתחשב במקדם ההידראולי של אפר הפחם (K) וסך הצמנט והאפר בתערובת לא יהיה נמוך מכמות הצמנט הנדרשת לתערובת הבטון ללא אפר.

ת"י 118 הוא התקן המורחב לגבי בטון. התקן קובע את כמויות אפר הפחם שאפשר להכניס לתערובות הבטון כתחליף חלקי לצמנט המצוי בתערובות אלו, תוך שמירה על חוזק בטון זהה. התקן מציב דרישה למינימום בתכולת הצמנט בבטון כדי להשיג את החוזק הנדרש, ההולכת ועולה עם החומרה של תנאי החשיפה (חשיפה לכלורידזיזיה וקרבוניזיה) והקירבה לים. כמות התוסף המינרלי מחליף צמנט בתערובות הבטון (במקרה זה אפר פחם מרחף) נקבעת עפ"י עקרון

ערך מקדם היעילות K. ערך ה- K נקבע כ- 0.5 בהתבסס על המחקר של פרופסור ארנון בנטור וד"ר הדסה באום: "קיים של בטון עם אפר פחם. התקן כיום קובע על סמך מחקר זה שבאזורי חשיפה 1-3 יהיה הערך $K=0.5$ במידה והאפר מיועד להחליף חלקית את הצמנט ו- $K=0.4$ לאזורי חשיפה 4.

כיום אין התקן מאפשר להשתמש באפר פחם כחליף חלקי לצמנט לאזורי החשיפה 5-13 אלא אם ייבדק ערך ה- K בבדיקה מעבדתית עפ"י עקרון "התפקוד השקיל" (ראה על פרק זה בחוברת ההדרכה).