

## בטון עתיר באפר פחם:

### סקר ספרות ביקורתי לבחינת ההיתכנות ליישום בארץ

ד"ר רינה וסרמן, פרופ' ארנון בנטור, פרופ"ח קוסטה קובלר, 2007

המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון

#### **תמצית**

בטון על בסיס אפר פחם משמש מזה עשרות שנים בכל רחבי העולם כרכיב בבטון, כולל גם במדינת ישראל, במיוחד בשני העשורים האחרונים. השימוש באפר פחם בשיעורים קטנים ובינוניים (כ- 10 עד 35% ממשקל הצמנט בבטון) הנו מקובל ומבוסס על ידע מחקרי וניסיון. יחד עם זאת קיים וויכוח מקצועי לגבי השיעור המרבי של אפר פחם אשר עדיין אפשרי ליישום בבטון ואשר לו ערך כלכלי וטכנולוגי בכל הקשור לחיסכון בצמנט. לא קיימת תמימות דעים ודעה אחידה ומגובשת בספרות בדבר השיעור האופטימאלי המרבי של אפר הפחם בבטון בכל הקשור לתכונות הבטון הטרי והקשוי. בחלק מעבודות המחקר הוכח שהשיעור האופטימאלי של אפר פחם מבחינת חוזק לחיצה הוא בטווח של 25% – 10% ממשקל הצמנט. יחד עם זאת נעשה מאמץ לבחון את האפשרות להשתמש בתכולות גבוהות יותר של אפר פחם, בשיעור של מעל 40% ממשקל הצמנט, תוך בחינה של סוגי אפר שונים, מסוג C וסוג F.

העבודות הראשונות בתחום זה נעשו בשנות ה-80 כאשר CANMET בקנדה פיתחה לראשונה את הטכנולוגיה הקרויה בטון עתיר באפר פחם (HVFA -high volume fly ash) שבו מעל 40% מצמנט הפורטלנד הוחלפו באפר פחם מסוג F (אפר פחם עם תחולה קטנה של סיד). בטון זה היה מאופיין בתכונות מכאניות מעולות וקיים משופר. מאז זכה סוג זה של בטון בהכרה בכל העולם. יחד עם זאת, תחום זה איננו ממוסד בכל הקשור לשימוש בתכולות כה גבוהות של אפר אשר אותו מוסיפים ישירות לבטון.

מטרת הסקר הנוכחי הייתה לבחון בצורה ביקורתית את הידע בתחום זה בעולם, כדי את ההיתכנות ליישום טכנולוגיה זו בארץ ולהגדיר ידע חסר שיש להשלימו כדי לאפשר שימושים אלה בארץ.

המסקנות העיקריות של סקר זה הן:

1. לאפר פחם מקדם יעילות נמוך יחסית, פחות מאחד, ועל כן כדי לקבל תערובת עתירת אפר פחם בעלת חוזק דומה לזה של בטון מצמנט פורטלנד בלבד, יש לתכנן תערובת אשר בה מנת המים לחומר מקשר נמוכה מזו של בטון שווה ערך אשר החומר המקשר בו הוא צמנט פורטלנד בלבד.
2. מאחר ומקדם היעילות בכל הקשור לתהליך הפוצולני יהיה יותר נמוך בתכולות גבוהות של אפר פחם הרי לא ניתן להשתמש באותם כלי תכנון וערכים המקובלים בהחלפה של עד כ- 25% אפר פחם.
3. המשמעות של מקדם היעילות הנמוך היא לכאורה בעייתית, כאשר ההחלפה היא בסדרי גודל של 50%. יחד עם זאת, אם יתוכננו תערובות אשר בהן מנת המים לחומר מקשר קטנות מ- 0.40, הרי ניתן לנצל את אפקט המלאן הבא לידי ביטוי במנת מים נמוכה, ולפצות לפחות חלקית על מקדם היעילות הנמוך.

4. כדי לקבל תערובות בעלות יחס מים לחומר מקשר נמוך מספיק, אשר תהינה כלכליות וללא תכולה גבוהה מדי של חומר מקשר, יש צורך בהפחתה של תצרוכת המים תוך שימור עבידות מתאימה. להשגת מטרה זו יש צורך בבחירה של אפר פחם בעל יכולת להקטנת תצרוכת מים, וכן גם שילוב של מוספים משפרי עבידות.

5. יש חשיבות מוגברת לבחינה מעמיקה של האינטראקציה של האפר עם המוספים כחלק מהמערך לפיתוח כלים לתכנון תערובות ושימוש בטכנולוגיה של בטון עתיר באפר הפחם. אינטראקציה זו חשובה בכל הקשור לתכונות הבטון הטרי ואף לגבי התפתחות חוזק בגיל מוקדם.

6. בנוסף להיבט של האינטראקציה עם מוספים יש לערוך מיון ואפיון כדי להגדיר אפרי פחם אשר מתאימים לשימוש בבטונים עתירי אפר. הערך של ההפסד בקלייה של אפר הפחם משפיע מאד לא רק על הקטנת תצרוכת המים אלא גם על החוזק בגילים מוקדמים. נראה, שקיים סף של תכולת הפסד בקלייה, כ-1% (אחוזי משקל) אשר מתחתיו יש יתרון ברור לאפר המיועד לבטונים עתירים באפר פחם. נושא זה מחייב לימוד שיטתי ומעמיק.

7. לאשפרה הרטובה הממושכת של בטון עתיר אפר קיימת השפעה ניכרת על חוזק הלחיצה של בטון בגילים מאוחרים, בשיעור של עשרות אחוזים.

8. יש יתרונות ברורים לשימוש במקשר עתיר באפר פחם המתקבל ע"י טחינה משותפת של האפר עם הקלינקר. יש לכן מקום לבחון ולהשוות את הטכנולוגיה של הוספת האפר ישירות לבטון או באמצעות צמנט מעורב.

9. במערכות עתירות באפר שהן שוות חוזק למערכת בקרה מצמנט בלבד, יש יתרון לתערובת עם האפר בכל הקשור לחדירת כלורידים, וזאת אם ניתנה אשפרה סבירה. לעומת זאת, בתערובת עם האפר הקרבונציה הרבה יותר עמוקה, גם אם ניתנת אשפרה ממושכת.

לאור המסקנות מדו"ח זה ניתן להציע מספר עקרונות לקווי פעולה אשר על בסיסם ניתן לפתח תשתית אשר תאפשר בבוא הזמן יישום של טכנולוגיות של בטון עתיר באפר פחם, אם יסתבר שיש צורך ויתרון בכך:

1. איסוף נתונים על אפרי פחם המתקבלים באופן שוטף בתחנות הכוח ומיון ראשוני שלהם על פי ההרכב כדי לבחון למי מהם פוטנציאל לשמש כאפר לבטונים עתירים באפר פחם. עקרונות למיון הוצגו בעבודה זו.
2. בדיקה של מדגמים נבחרים לעבידות וחוזק כדי לאמת את הסיווג.
3. בחינה של האינטראקציה עם מוספים המקובלים בארץ, בכל הקשור לתכונות הבטון הטרי, התקשרות והתפתחות חוזק, וזאת לגבי מספר מדגמי אפר נבחרים.
4. בחינה של נושא האשפרה והקרבונציה כדי לפתח כלים אשר על בסיסם ניתן להקטין את הרגישות לאשפרה ולקרבונציה, למשל ע"י הקטנת מנת המים לחומר מקשר מתחת לזו הנדרשת משיקולי חוזק בתנאי מעבדה.