

## קיים של בטון עם אפר פחם

פרופ' ארנון בנטור ודר' הדסה באום, 2003

המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון

אנו עדים בשנים האחרונות להתפתחויות ומהלכים אשר תהיה להם השפעה חשובה על תעשיית הבטון בארץ. בתחום התקינה אנו בעיצומו של מהלך להתאמה לתקינה אירופאית: בתחום תכן מבני בטון, על ידי רוויזיה של התקן הישראלי למבני בטון, ת"י 466, ובתחום הבטון, כחומר, הכוונה לאמץ את התקן האירופאי EN206, שאושר לאחרונה באירופה.

כדי להבטיח שימוש יעיל וכלכלי בחומרי לוואי כמו אפר פחם, יש צורך לקבוע בצורה מושכלת את הדרישות בתקן אשר יביאו בחשבון את תנאי האקלים המקומיים. מתוך ראייה זו, יש לקבוע מהם מקדמי היעילות של אפר הפחם מנקודת מבט של חוזק והכללים להקטנת תכולת הצמנט המינימאלית מנקודת מבט של קיים. בתנאים המקומיים הדרישות עלולות להיות שונות מאלה המקובלות באירופה.

כדי להשיג מטרה זאת נבחנו בעבודה הנוכחית ההתנהגות של בטונים עם תכולות שונות של אפר פחם משני סוגים. האחד, מוגדר כאפר פחם באיכות ירודה, בעל הפסד גבוה בקלייה (7.5%), השני איכותי יותר (LOI=4.1%). נבחן תפקודן של התערובות מנקודת מבט של חוזק, חדירות כלורידים וקרבונציה, אשר שימשו כאמות מידה להערכת הקיים. תערובות הבטון נחשפו לתנאי אשפחה שונים: עשרים ושמונה ימים במים (E), שבעה ימים במים (D), הדמיה של התזה 3 פעמים ביום במשך ששה ימים ו- שלושה ימים (C ו-B בהתאמה) וללא אשפחה 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 לתכולת צמנט אלה, בתכולות של 60 עד 150 ק"ג למ"ק.

המסקנות העיקריות שהתקבלו וההמלצות הנגזרות מהן לגבי תקינה מוצגות להלן תוך התייחסות בנפרד לחשיפה בתנאי קרבונציה וחשיפה לסביבה המכילה כלורידים.

### • קרבונציה

מקדמי היעילות לקרבונציה נעים בד"כ בתחום 0.5 עד 1.1 בתחומים בהם אפר הפחם אמור לשמש כתחליף לתכולת צמנט של 30 עד 40 ק"ג צמנט למ"ק, דהיינו, במעבר מתערובת של 200 ק"ג צמנט למ"ק עם אפר, לתערובת ייחוס של 230 ק"ג צמנט למ"ק, ובמעבר מתערובת של 230 ק"ג צמנט למ"ק לתערובת ייחוס של 270 ק"ג צמנט למ"ק. בתחום זה לא באה לידי ביטוי בולט הנטייה למקדם גבוה יותר בתנאי האשפחה הטובים יותר (ז.א. במחקר כאן התקבלו ערכים גבוהים מן המצופה באשפרות הירודות), וייתכן והסיבה לכך היא תוצאה של מחזורי חיים קצרים מאד בכל המקרים (ללא תלות כמעט בהרכב הבטון) ועל כן החישוב של המקדמים המתבסס על הבדלים קטנים שבין מחזורי

החיים באשפרות שהן סימולציה של התזה הנו רגיש יותר לתנאי האשפרה מאשר לתכולת האפר בתערובת.

בהקשר של קיים ניתן להסיק מהתוצאות שכל עוד מדובר על אפר פחם כתחליף ל-30 עד 40 ק"ג צמנט למ"ק, הרי ניתן להביא בחשבון את תרומת האפר, גם באשפרה ירודה.

כאשר מדובר על אפר פחם כתחליף לתכולות צמנט גבוהות יותר של כ-60 ק"ג צמנט למ"ק, (דהיינו מעבר מתערובת של 200 ק"ג צמנט למ"ק עם אפר לתערובת שקילה של 270 ק"ג צמנט למ"ק), בולט אפקט האשפרה. באשפרה לקויה מקדם היעילות הוא אפס. רק באשפרה תחת מים במשך 28 ימים מתאפשרת בכלל החלפה וכאן מקדם היעילות מתקרב ל-1. מגמה זו שונה באופן מהותי מהחלפות של צמנט בתכולות של כ-30 ק"ג צמנט למ"ק, אשר שם לא קיימת כמעט רגישות לאשפרה.

המגמות הללו מראות שבתחומים הצרים יותר, של הקטנת תכולת הצמנט המינימלית בטווח של 270 ל-230 ק"ג צמנט למ"ק ובטווח של 230 ל-200 ק"ג צמנט למ"ק, יש אינדיקציה לכך שאפשר להביא בחשבון את תרומת האפר מנקודת מבט של קיים בתנאי קרבונציה. במקרים אלה יש לבחון את תרומת האפר תוך שמביאים בחשבון מקדם יעילות של כ-0.50, שהוא אינו רגיש במיוחד לתנאי האשפרה המקובלים; באשפרה במים במשך 28 ימים מקדם היעילות גבוה בהרבה, 1 או יותר, אך אלה תנאי אשפרה שאינם מציאותיים בשטח. בתחום הרחב יותר, של הקטנת תכולת הצמנט המינימלית מ-270 ל-200 ק"ג צמנט למ"ק, מקדם היעילות בתנאי האשפרה המקובלים הוא אפס.

ניתוח זה מצביע על כך שניתן בתחומים הללו לאמץ את הקריטריון האירופי להקטנת תכולת הצמנט המינימלית תוך שמביאים בחשבון מקדם יעילות של כ-0.50. ניתוח זה מתאים לשני מדגמי האפר שנחקרו בעבודה נוכחית. לא ניכר הבדל משמעותי במקדמי היעילות עבור שני סוגי אפר אלה בתנאי האשפרה השונים.

בהקשרים אלה מן הראוי לציין מספר מגמות נוספות:

#### 1. אשפרה:

בתחומים שנבדקו כאן ניתן לראות שלירידה באיכות האשפרה יש משמעות מרחיקת לכת מבחינת קיים. לדוגמא, משך החיים המתקבל באשפרה שהיא סימולציה של 3 ימי התזה הוא כחצי מזה של אשפרה במים במשך 7 ימים (שהיא האשפרה התקנית הנדרשת במפרטים), למרות שההפרש בחוזק הרבה יותר קטן.

#### 2. יחסי גומלין חוזק תקני-מחזור חיים:

עבור אותו חוזק, מחזור החיים ארוך יותר עבור התערובות ללא אפר פחם. ההסבר לכך הוא שמקדם היעילות לחוזק יותר גדול ממקדם היעילות לקרבונציה. יש להביא בחשבון מגמות אלה כאשר דנים במשמעויות השונות של אבטחת איכות המתבססת על חוזק. למשל, מחזור החיים של בטון ב-30 ללא אפר גבוה בכ-70% ממחזור החיים של תערובת בחוזק דומה המכילה 60 ק"ג

אפר למ"ק. הדוגמא הנוכחית מצביעה על מצב שבו תערובת עם 170 ק"ג צמנט למ"ק בתוספת 60 ק"ג אפר למ"ק תאפשר להגיע לבטון ב-30, למרות שלא תשיג את מחזור החיים הנדרש מבטון בעל חוזק דומה שבו תכולת הצמנט היא כ-230 ק"ג צמנט למ"ק.

בהסתמך על התוצאות מוצעות שתי המלצות לגבי התקינה :

1. עבור תנאי חשיפה 3 ו-4 (המוגדרים בת"י 466) ניתן לאפשר הפחתה בתכולת הצמנט המינימאלית בשיעור של עד 40 ק"ג צמנט למ"ק (דהיינו לאפשר הפחתה מדרישת המינימום של 270 ק"ג צמנט למ"ק עד 230 ק"ג צמנט למ"ק) תוך החלפת הכמות המופחתת באפר פחם לפי תחשיב של מקדם יעילות של 0.50. הפחתה מסוג זה תואמת את הנוסחה של התקן האירופי :  $\Delta C = k (C_{min} - 200)$
2. בתחום תנאי פריזה 1 (המוגדר בת"י 466) מוצע לאפשר את הקטנת תכולת הצמנט המינימאלית ל-200 ק"ג/מ"ק צמנט (אך לא פחות ממנה), תוך החלפה באפר, בהתבסס על מקדם יעילות של 0.50, והתניה שטיב הבטון יהיה לא פחות מב-30.

#### • כלורידים

ניתן לראות שהן לגבי חדירות והן לגבי מחזור חיים באשפרה שהיא סימולציה של 7 ימי התזה (שהיא זו המקובלת בדרך כלל בשטח), מקדמי היעילות לגבי שתי התכונות הנם בד"כ אפס. מקדמים שיש להם משמעות מעשית מתקבלים רק באשפרה של שבוע ימים במים, שהיא האשפרה הנדרשת בתקנים ובמפרטים. מגמה דומה קיימת באשפרה של 28 ימים במים (שהיא אשפרה הקובלת בחו"ל בבדיקות מעבדה תקניות, אך אינה רלוונטית לתנאי הארץ), עם ערכים גבוהים יותר של מקדמי היעילות.

המגמות הללו מצביעות על שתי מסקנות חשובות ביחס להיבטי התקינה :

1. בתחום הרלוונטי של החלפת צמנט באפר פחם מתוך שיקולי פריזה לכלורידים הרגישות לאשפרה היא משמעותית ביותר, והנה הרבה יותר גדולה מזו שנצפתה בתחומים הרלוונטיים לקרבונציה. רק באשפרה רציפה תחת מים במשך שבעה ימים, כנדרש בתקנים ובמפרטים, מתקבלים מקדמי יעילות סבירים.
2. מקדמי היעילות לחדירות כלורידים הנם הרבה יותר גדולים מהמקדמים של מחזור החיים. באשפרה של 28 ימים במים ההבדלים בין מקדמים אלה הם בתחום של פי 2 עד פי 3. הבדלים אלה מקורם בכך שהאפר יעיל מאד בהקטנת החדירות לכלורידים, אך אי אפשר למצות את כל הפוטנציאל הזה משום שלגידול בתכולת הצמנט יש השפעה נוספת על העמידות בקורוזיה שמקורה ביכולת שלו להגדיל את תכולת הכלור הקריטית.

מתוך כל אלה עולה שאם אנו מאמצים את הגישה בתקן האירופי לגבי תפקוד שקיל, ומבססים אותה על תחשיבי מזור חיים, הרי ניתן להגיע למסקנות הבאות:

מבנים במרחק 200 מטר עד 2000 מ' מהים: עבור פריזה בדרגה 5 (המוגדרת בת"י 466 - מבנים במרחק של 200 מטר עד 1000 מ' מהים), ניתן להחליף את הצמנט באפר פחם בהתבסס על תחשיב שבו מקדם היעילות הוא 0.40 עבור האפר בעל LOI של 7.5%, ו-0.50 עבור האפר בעל LOI של 4.1%. עבור דרגה 4 (1 ו-2 ק"מ מהים) המקדמים הם 0.40 ו-0.90 עבור שני סוגי האפר, בהתאמה. יש להדגיש שהחלפה זו מוגבלת להקטנת תכולת הצמנט בשיעור של עד 40 ק"ג צמנט למ"ק. גבול זה הוא פועל יוצא של התוצאות עצמן וכן גם של תחשיב לפי הנוסחה של התקן האירופי,  $\Delta C = k (C_{\min} - 200)$ , כאשר מצביבים בה ערך של 0.50 עבור מקדם היעילות.

מבנים במרחק של עד 200 מטר מהים ובתוך הים: התוצאות עבור תחומים אלה, דרגות 6 ו-7 (המוגדרים בת"י 466) מראות על אפשרות החלפה אבל רק בתנאים מגבילים של תכולת צמנט שאינן קטנות מ-300 ק"ג צמנט למ"ק, אפר באיכות גבוהה (LOI של 4.1%) ומקדם יעילות של 0.20.

יש להדגיש שכל המסקנות הללו לגבי תנאי פריזה בכלורידים מבוססות על ההנחה שהאשפרה בשטח תהיה של לפחות 7 ימים במים, באופן רציף, כנדרש במפרטים ובתקנים. לכן, בכל פעולה בתחום זה יש לסייג ולהדגיש בתקן את נושא האשפרה.