



4.4.2017

אומדן לפרמטרים טכנולוגיים להערכת יתרונות כלכליים לשילוב אפר פחם בבטון

פרופ' ארנון בנטור

1. רקע

המסמך הנוכחי נועד לגבש אומדנים של קריטריונים טכנולוגיים שימשו כבסיס לניתוח כלכלי של היתרונות לשימוש באפר פחם לייצור בטונים. הקריטריונים הטכנולוגיים מבוססים על האפשרות לחיסכון בצמנט בבטון כאשר אפר הפחם משמש כתחליף לחלק מהצמנט, או להארכת משך חיי השרות של הבטון כאשר האפר משמש כתחליף לחול והתוספת שלו איננה מלווה בהקטנת תכולת הצמנט.

המתודולוגיה לגיבוש האומדנים מבוססת על אפיון מקדם היעילות של אפר הפחם כהגדרתה המקובלת, כמו למשל בתקן האירופאי לבטון EN206¹. ניתן לקבוע את מקדם היעילות עבור חוזק ועבור פרמטרים של חדירות לגורמים אגרסיביים לבטון מזוין, בעיקר קרבונציה וכלורידים. עבור אפר פחם יש דיווחים רבים בספרות למקדמים אלה והם נעים בדרך כלל בטווח שבין 0.25 עד 1.00. בהתבסס על מחקר שנעשה בארץ ניתן להציב ערך של מקדם יעילות של 0.50 כאומדן סביר לאפיון כללי של מרבית סוגי אפר הפחם המשולבים עם צמנט המיוצר בארץ², גם עבור חוזק וגם עבור מקדמי החדירה. מקדם זה אומץ גם בתקן הישראלי³.

בהתבסס על גישה זו ועל מקדם זה ניתן לגבש אומדנים טכנולוגיים לחיסכון עבור שני תרחישים:

- א. אפר הפחם מחליף חלק מהצמנט תוך שימור החוזק (דהיינו מנת מים אפקטיבית זהה לבטון מצמנט פורטלנד בלבד ולבטון שבו חלק מהצמנט מוחלף באפר); החיסכון במקרה זה הוא תוצאה של הקטנת תכולת הצמנט.
- ב. האפר מחליף חול ובכך מתקבל בטון בעל מנת מים אפקטיבית נמוכה יותר, אשר החדירות שלו לגורמים אגרסיביים היא קטנה יותר. החיסכון במקרה זה הוא תוצאה של הגידול במשך חיי השרות, אשר אותו ניתן להעריך באמצעות מודלים הנדסיים כדוגמת אלה המוצגים בהנחיות של FIB⁴.

2. הנחות להרכב הבטונים

- תערובת טיפוסית לתנאי פריזה לקרבונציה: 250 ק"ג צמנט, 150 ליטר מים, מנת מים 0.60; מתאים לדרישות התקן הישראלי ת"י 118 (בטון, דרישות תפקוד וייצור), עבור פריזה באזורים שהם מעבר לרצועת החוף של 1000 מטר (דרגות חשיפה 2 עד 4).
- תערובת טיפוסית לתנאי פריזה לכלורידים: 320 ק"ג צמנט, 160 ליטר מים, מנת מים 0.50; מתאים לדרישות התקן הישראלי ת"י 118 (בטון, דרישות תפקוד וייצור), עבור פריזה באזורי החוף עד לטווח של 1000 מטר מהחוף (דרגות חשיפה 5 – 6).

¹ European Standard EN 206, Concrete-Specification, performance, production and conformity, 2013

² א.בנטור, ה.באום, קיים של בטון עם אפר פחם, המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון, דו"ח למנהלת אפר הפחם, 2003

³ ת"י 118: בטון, דרישות תפקוד וייצור, גיליון תיקון מס' 4, מרס 2015

⁴ FIB Model Code for service life design, FIB Bulletin 34, 2006

- תכולה טיפוסית של אפר פחם – 100 ק"ג למ"ק בטון
3. הנחות לגבי תחשיבי משך חיי שרות בהתבסס על הנחיות לתכנון של IB:

קרבונציה

את החדירות לקרבונציה ניתן לאפיין באמצעות מקדם לחדירות, R, ומכונה התנגדות לקרבונציה. ניתן לחשב את משך חיי שרות בתלות במקדם R:

$$X_c(t) = [2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot R^{-1}_{ANC,0} \cdot C_s]^{1/2} \cdot W(t) \cdot (t)^{1/2} \quad (1)$$

X_c – עומק החדירה

t – זמן

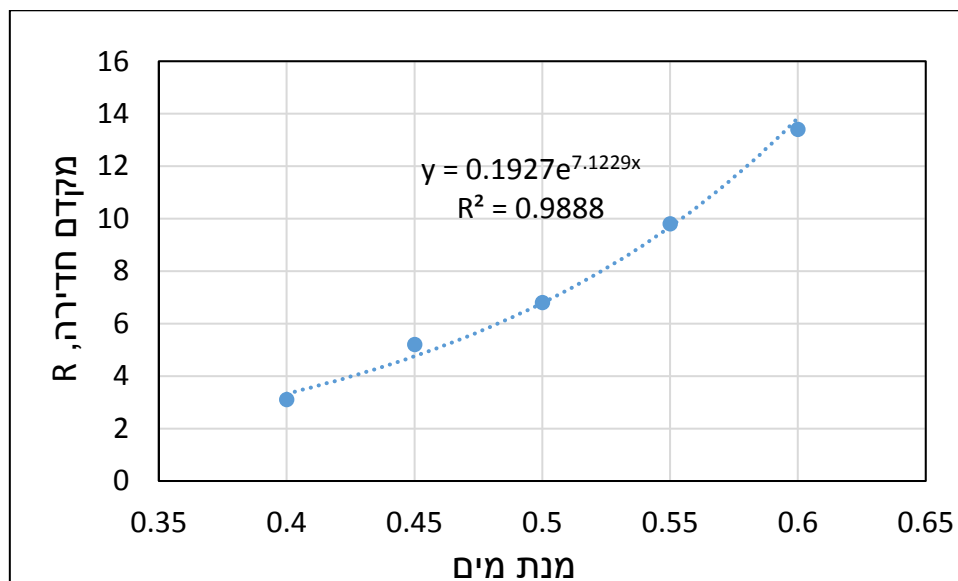
R – מקדם ההתנגדות לקרבונציה (חדירות)

ערכים טיפוסיים של מקדם ההתנגדות R בתלות במנת המים לפי FIB⁴:

Guidelines for values for inverse carbonation resistance in accelerated conditions, as a function of w/c ratio and type of binder [FIB2006]⁴

Cement type	$R_{ACC,0^{-1}}$ [(mm ² /s)/(kgCO ₂ /m ³)], at equivalent w/c ratios of:					
	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
CEM I 42.5R	-	3.1	5.2	6.8	9.8	13.4

הקשר בין מקדם ההתנגדות (חדירות) לקרבונציה ובין מנת המים:



חישוב משך חיי שרות יחסי: מתוך משוואה (1) ניתן לקבוע שמשך חיי השרות היחסי של הרכבים בשתי מנות מים שונות הוא היחס בשורש ריבועי של מקדמי החדירה בשתי מנות המים.

חדירות כלורידים

משוואת הדיפוזיה לחישוב משך חיי שרות בתלות במקדם הדיפוזיה של הבטון, D:

$$C_{crit} = C(x=a; t) = C_o \left[1 - \operatorname{erf} \frac{a}{2(D \cdot t)^{1/2}} \right] \quad (2)$$

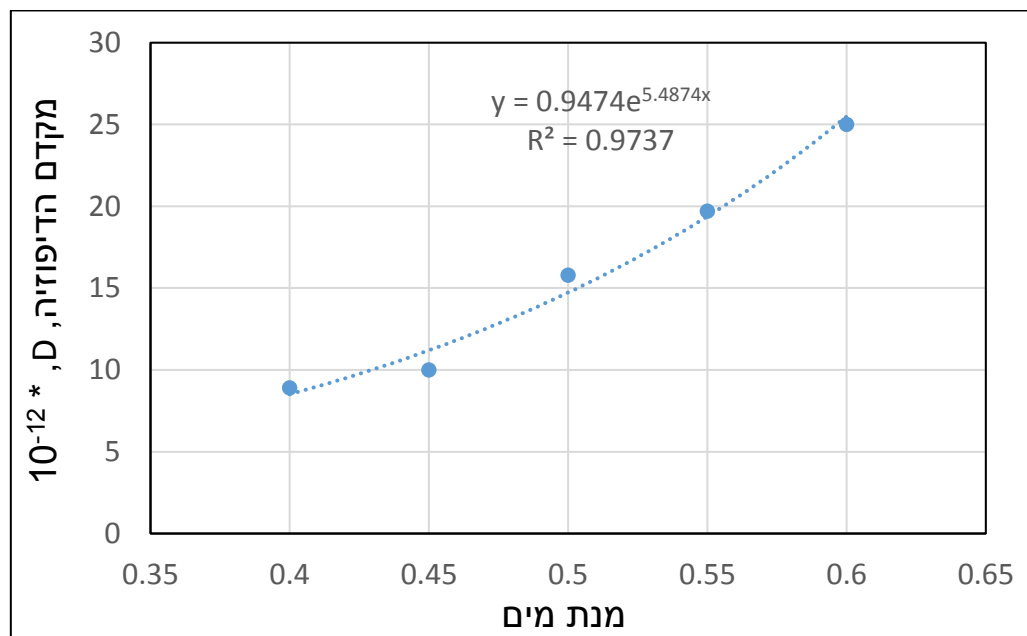
C_{crit} - ריכוז כלור קריטי הגורם לדה-פסיבציה של הפלדה
 C_0 - ריכוז הכלורידים על פני הבטון
 a - כיסוי הפלדה בבטון
 t - משך חיי השרות
 D - מקדם הדיפוזיה של הבטון

ערכים טיפוסיים של מקדם הדיפוזיה D בתלות במנת המים לפי FIB⁴:

Recommended values for diffusion coefficients [FIB 2006]⁴

Cement type	Diffusion coefficient, m^2/s , at equivalent w/c ratios of:					
	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
CEM I 42.5R	-	8.9×10^{-12}	10.0×10^{-12}	15.8×10^{-12}	19.7×10^{-12}	25.0×10^{-12}

הקשר בין מקדם הדיפוזיה ומנת המים:



חישוב משך חיי שרות יחסי: מתוך משוואה (2) ניתן לקבוע שמשך חיי השרות היחסי של הרכבים בשתי מנות מים שונות הוא היחסי שבין מקדמי הדיפוזיה בשתי מנות המים.

4. תחשיבי חיסכון בהתבסס על שיקולי חיסכון בצמנט והארכת משך חיי שרות

השימוש באפר יכול להתבצע בשני אופנים:

תחליף לצמנט: תוך שמביאים בחשבון את מקדם היעילות של האפר לחוזק, 0.50 במקרה הנוכחי, דהיינו מנת המים האפקטיבית של הבטון נשארת ללא שינוי.

בתרחיש זה האומדן הכלכלי לחיסכון כתוצאה משימוש באפר ניתן לביטוי באמצעות ההקטנה בתכולת הצמנט.

בהנחות של הרכבים לעיל, החיסכון הפוטנציאלי הוא 50 ק"ג לכל מ"ק בטון. יחד עם זאת ת"י 118 מגביל את הפחתת תכולת הצמנט בגבולות של 20 – 40 ק"ג/מ"ק, בתלות בדרגת החשיפה וסוג הצמנט.

תחליף לחול: תוספת האפר תוך שימור תכולת הצמנט בבטון וכתוצאה מכך קטנה מנת המים האפקטיבית.

בתרחיש זה האומדן הכלכלי לחיסכון כתוצאה משימוש באפר ניתן לחישוב בהתבסס על הארכת משך חיי השרות כתוצאה מהקטנת מנת המים האפקטיבית:

- עבור תנאי קרבונציה, מנת המים האפקטיבית קטנה מ-0.60 ל-0.50. בהתבסס על תחשיב לפי השינוי במקדם החדירות (משוואה 1), משך חיי השרות יגדל ב- 43% (שורש של היחס בין מקדמי ההתנגדות לחדירות של 2.04, בין המקדמים במנות מים של 0.60 ו-0.50)
- עבור תנאים של חדירת כלורידים, מנת המים האפקטיבית קטנה מ-0.50 ל-0.43 ובהתבסס על תחשיב לפי השינוי במקדם הדיפוזיה (משוואה 2), משך חיי השרות יגדל ב- 46% (יחס של 0.69 בין מקדמי הדיפוזיה במנות מים של 0.50 ו-0.43)

5. אומדן של חיסכון משוקלל

עבור התרחיש של תחליף לצמנט, החיסכון יהיה דומה בכל אזורי הארץ, ללא תלות בתנאי החשיפה, דהיינו בלתי תלוי בסביבה. במקרה זה מדובר בחיסכון פוטנציאלי של 50 ק"ג צמנט לכל מ"ק בטון, אך לאור המגבלה של ת"י 18 הוא ינוע בטווח שבין 20 ל-40 ק"ג/מ"ק.

עבור התרחיש של תחליף לחול החיסכון תלוי באזור החשיפה. ניתן להגדיר בקרוב ראשון שלושה אזורים: רצועת החוף עד כקילומטר מהחוף ששם התנאים הם של חדירת כלורידים; אזור פנים הארץ, מעבר לרצועת החוף, ששם התנאים הם של קרבונציה; אזור הנגב ששם אין בדרך כלל בעיה של קיים, כי מדובר בתנאי אקלים יבשים.

ניתן להעריך את החלק של אזור הנגב בהתאם לגודל האוכלוסייה שבאזור הדרום, כ- 15%. מכאן שהחיסכון בגין הארכת משך חיי שרות מתייחס רק ל- 85% מהבנייה בארץ. לצורך הערכת החיסכון המשוקלל יש צורך להעריך את חלק הבנייה באזור רצועת החוף. מאחר ואין בידנו נתונים על חלקי הבנייה באזורים אלה, ניתן לבצע הערכה המבוססת על אנליזת רגישות אשר נותנת את התוצאות הבאות:

- בהנחה של 25% ברצועת החוף, 60% פנים הארץ: הארכת משך חיי שרות ב- 37.3%
- בהנחה של 10% רצועת החוף, 75% פנים הארץ: הארכת משך חיי שרות ב- 36.9%
- בהנחה של 5% רצועת החוף, 80% פנים הארץ: הארכת משך חיי שרות ב- 36.7%

ניתן לראות שאין הבדל משמעותי בהארכת משך חיי השרות עבור ההנחות השונות והוא בקרוב 37%. עובדה זו היא תוצאה של הארכת משך חיי שרות דומה עבור המקרים של קרבונציה וכלורידים.