



שימוש באפר פחם לייצור בטונים עמידים בתנאי סביבה קשים: הנחיות לתכן הבטון

ארנון בנטור, פבל לריאנובסקי

1. רקע

ההיקף הגדול של מבני תשתית המוקמים כיום בארץ והצפויים בשנים הבאות מעלה את הצורך בייצור בטונים בעלי קיים משופר בתנאי סביבה קשים, או קיים למשך פרקי זמן ארוכים של 100 שנים ויותר במבני תשתית מיוחדים דוגמת מנהרות.

התקנים המקובלים בארץ ובעולם לתכן בטונים בסביבות כאלה הם מרשמיים, כאשר ההנחה בערכי התכן הנקבעים שם הם משך חיים של 50 שנים. הדרישות המרשמיות בתקנים הן של מנת מים מרבית ותכולת צמנט מזערית, והן מלוות בדרישות לעובי כיסוי מינימלי על הפלדה. ניתן להגיע להרכבים יעילים יותר על ידי שימוש באפר פחם להקטנת תכולת הצמנט ובכך להגיע לבטון שווה ערך אשר הרגישות לסדיקה בו עקב מאמצים תרמיים הנה נמוכה, או בטנים מעולים יותר אשר מאפשרים להאריך את משך חיי השרות.

שיפורים דומים ניתן גם להשיג על ידי תוספים אחרים דוגמת סיגים ומיקרוסיליקה, אך במקרים אלה מדובר בחומרים מיובאים בשעה שאת אפר הפחם ניתן לקבל בארץ בשריפה של פחם לייצור חשמל בתחנות הכח. המגמה להקטין את השימוש בפחם להפקת חשמל תוביל גם להקטנת כמות אפר הפחם בארץ ולאור זאת יש יתרון למקד את הניצול שלו עבור שימושים אשר בהם נדרשים בטונים מעולים יותר להבטיח חיי שרות נאותים. ביישומים אלה הערך המוסף שלו הנו גבוה יותר, במיוחד שיש בכך כדי לחסוך ביבוא של חומרי לוואי מחו"ל.

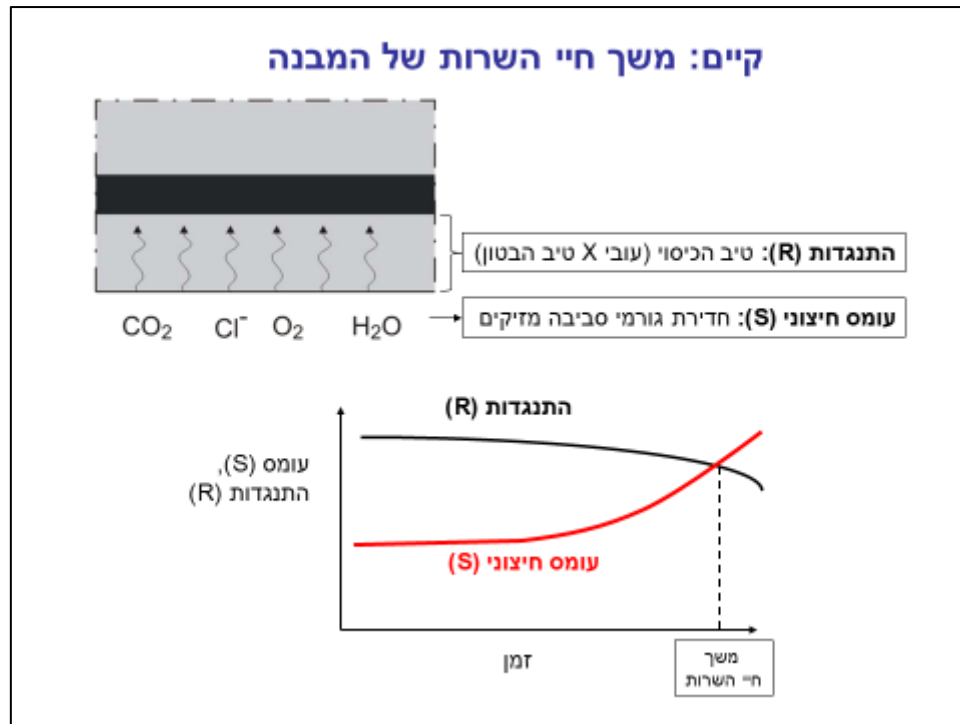
המסמך הנוכחי נועד על כן לתת בידי המתכנן כלים לתכן של בטונים עם אפר פחם המיועדים לייצור בטון מעולה יותר שנועד לעמוד בתנאי סביבה קשים יותר או למשך חיי שרות ארוכים במיוחד.

2. מתודולוגיות לתכן של בטון עם אפר פחם

בתקינה הבינלאומית מקובלות כיום שתי גישות לתכן של בטונים לקיים אשר ניתן ליישם אותן לתכן של בטונים מעולים עם אפר פחם: התפקודית החלקית והתפקודית המלאה.

הגישה התפקודית החלקית מבוססת על העיקרון של תפקוד שקיל, דהיינו בטון עם אפר פחם אשר ייתן תפקוד דומה לבטון שהרכבו נקבע בצורה מרשמית בתקן הרגיל, דהיינו מנת מים מרבית ותכולת צמנט מזערית. המסמך המוביל ברוח זו הוא CEN 16563 [1] אשר אליו מפנה התקן המרשמי לבטונים EN 206 [2].

הגישה התפקודית המלאה מבוססת על קביעת ערכים גבוליים לכשל עקב בלייה, וחישוב משך הזמן (חיי שרות) עד שהם מתהווים בבטון המזוין. החישוב מתבסס על מודלים מקובלים המתארים בצורה כמותית תהליכי חדירה של גורמים אגרסיביים כתוצאה מתנאי סביבה ("עומסים סביבתיים"), כאשר ההתנגדות לחדירתם תלויה באיכות הבטון ועובי הכיסוי ("התנגדות"), כפי שמתואר בצורה סכמטית בציור 1.



ציור 1: תיאור סכמטי של חישוב משך חיי שרות בהתבסס על הקשרים של עומס סביבתי (S) בתלות בזמן וההתנגדות לגורמים אגרסיביים (R), כאשר פונקציית ההתנגדות היא בעיקר תוצאה של תכונות הבטון ועובי הכיסוי

המסמך הנוכחי נועד לגבש אומדנים של קריטריונים טכנולוגיים שיוכלו לשמש 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.

הקשרים R ו-S שבציור 1 ניתנים לתיאור באמצעות מודלים שונים אשר החשובים שבהם הם אלה המתארים את תהליכי הקרבונציה והחדירות לכלורידים אשר גורמים לקורוזיה של הפלדה בבטון מזוין.

את החדירות לקרבונציה ניתן לאפיין באמצעות מקדם חדירות, R , שמכונה 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)

k - מקדמי קשר

C_s - ריכוז דו תחמוצת הפחמן באוויר

$W(t)$ - פונקציה המתייחסת לתנאי אקלים, בעיקר טמפרטורה

את משוואה (1) נהוג גם לתאר בצורת קשר פשוט יותר בין עומק הקרבונציה, X_c , ושורש ריבועי של הזמן, כאשר המקדם k במשוואה נקבע באופן אמפירי בהתבסס על בדיקות מואצות:

$$X_c(t) = k (t)^{1/2} \quad (2)$$

את תהליך חדירת הכלורידים ניתן לתאר באמצעות משוואת הדיפוזיה, כאשר משך חיי השרות עד להתחלת הקורוזיה של הפלדה (דה-פסיבציה) נקבע כאשר ריכוז הכלור על פני הפלדה מגיע לערך קריטי הגורם לדה-פסיבציה של הפלדה:

$$C_{crit} = C(x=a; t) = C_o [1 - \operatorname{erf} \frac{a}{2(D \cdot t)^{1/2}}] \quad (3)$$

C_{crit} - ריכוז כלור קריטי הגורם לדה-פסיבציה של הפלדה

C_o - ריכוז הכלורידים על פני הבטון

a - כיסוי הפלדה בבטון

t - משך חיי השרות

D - מקדם הדיפוזיה האפקטיבי של הבטון

erf – פונקציית השגיאה

3. הגישה התפקודית החלקית

הגישה התפקודית החלקית מבוססת על עקרונות התפקוד השקיל, דהיינו על השוואת התפקוד של הבטון המכיל אפר פחם לבטון תקני העונה על הדרישות המרשמיות של התקן. התקן המרשמי מציג דרישות למנת מים מרבית ותכולת צמנט מזערית, לדוגמא התקן האירופאי לבטון EN206 [2] או התקן הישראלי ת"י 118 [3].

הרכבים טיפוסיים לפי התקן הישראלי לעמידה בקרבונציה ובחדירות לכלורידים הם:

- 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).

גישת התפקוד השקיל מבוססת על בדיקות השוואתיות אשר בהן קובעים את הרכב התערובת עם אפר פחם אשר תיתן התנהגות דומה לזו של הבטון המרשמי כמפורט לעיל. מאחר והפרמטר הדומיננטי המבטיח את תפקוד הבטון המרשמי הוא מנת המים לצמנט, W/C , מגדירים עבור תערובת הבטון עם אפר הפחם מנת מים אקוויולנטית, אשר בה התרומה של אפר הפחם מבוטאת באמצעות מקדם יעילות, k , לפי ההגדרה שלהלן:

$$[W/(C + k \cdot A)]_{fly\ ash\ concrete} = [W/C]_{prescriptive\ concrete} \quad (4)$$

W – תכולת המים בבטון

C – תכולת הצמנט בבטון

A – תכולת האפר בבטון

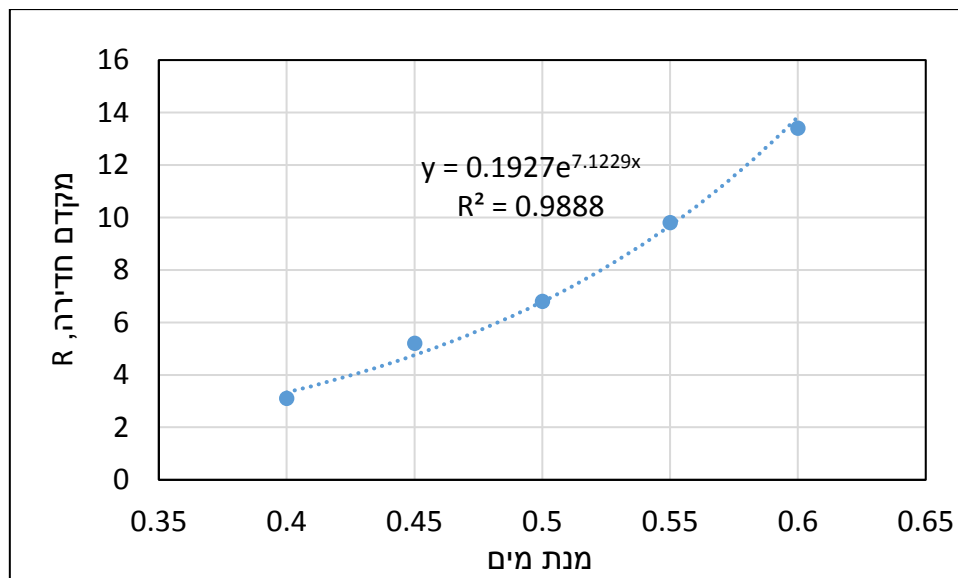
k – מקדם היעילות של אפר הפחם

הנחיות לגבי הבדיקות לקביעת ההתנהגות השקילה מוצגות במסמך האירופאי [1].

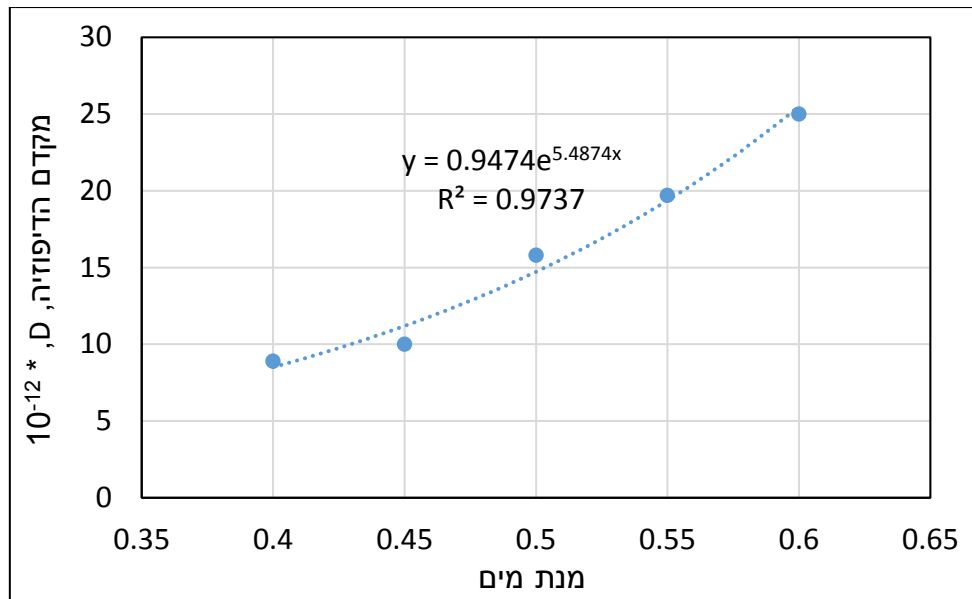
הבסיס לכל אלה הוא קביעת הקשר בין מנת המים והתכונה הרלוונטית בבטון מצמנט רגיל אשר אליו משווים את הבטון עם אפר הפחם.

דוגמאות לקשרים אלה עבור מקדם הקרבונציה (משוואה 1) ומקדם הדיפוזיה (משוואה 3) מוצגים בציורים 2 ו-3 בהתבסס על נתונים של FIB [4], טבלאות 1 ו-2.

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



ציור 2: קשר בין מקדם חדירה במשוואת הקרבונציה (משוואה 1) ובין מנת המים בצמנט מסוג I CEM לפי המודל קוד האירופי [4]



ציור 3: קשר בין מקדם הדיפוזיה האפקטיבי במשוואת הדיפוזיה (משוואה 3) ובין מנת המים בצמנט מסוג CEM I לפי המודל קוד האירופי [4]

טבלה 1: מקדמי ההתנגדות לקרבונציה (משוואה 1) בתלות במנת המים בצמנט מסוג CEM 42.5 לפי המודל קוד האירופי [4]

R _{acc,0} ⁻¹ [(mm ² /s)/(kgCO ₂ /m ³)] במנת מים של:				
0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
3.1	5.2	6.8	9.8	13.4

טבלה 2: מקדמי הדיפוזיה האפקטיביים לחדירת כלורידים (משוואה 3) בתלות במנת המים בצמנט מסוג CEM I 42.5 לפי המודל קוד האירופי [4]

מקדם הדיפוזיה, m ² /s, במנת מים של:				
0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
8.9x10 ⁻¹²	10.0x10 ⁻¹²	15.8x10 ⁻¹²	19.7x10 ⁻¹²	25.0x10 ⁻¹²

עבור אפר פחם מוצגים בספרות הבינלאומית מקדמי יעילות הנעים בדרך כלל בטווח שבין 0.25 עד 1.00, כאשר הטווח הנמוך יותר הוא עבור קרבונציה והגבוה יותר עבור חדירת כלורידים. בהתבסס על מחקר שנעשה בארץ [5] ניתן להציב ערך של מקדם יעילות של 0.50 כאומדן סביר לאפיון כללי של מרבית סוגי אפר הפחם המשולבים עם צמנט המיוצר בארץ, גם עבור חוזק וגם עבור מקדמי החדירה. מקדם זה אומץ גם בתקן הישראלי [3].

הגישה התפקודית החלקית מאפשרת חישובים השוואתיים (להבדיל מחישוב כמותי של משך חיי השרות) וניתן באמצעותה לגבש אומדנים טכנולוגיים להרכבי בטון עם אפר עבור שני תרחישים:

תרחיש א: אפר הפחם מחליף חלק מהצמנט תוך שימור מנת מים אפקטיבית (דהיינו מנת מים אפקטיבית זהה לבטון מצמנט פורטלנד בלבד ולבטון שבו חלק מהצמנט מוחלף באפר); החיסכון במקרה זה הוא תוצאה של הקטנת תכולת הצמנט.

תרחיש 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 FIB [4].

• דוגמא לחישוב החיסכון בצמנט (תרחיש א):
עבור מקדם יעילות של אפר של 0.50 ותכולת אפר של 100 ק"ג/מ"ק, 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.

• דוגמאות לחישוב הארכת משך חיי השרות היחסי (תרחיש ב):
בתרחיש זה האפר משמש כתחליף לחול תוך שמשמרים את תכולת הצמנט בבטון. כתוצאה מכך קטנה מנת המים האפקטיבית.

החישוב במקרה זה הוא שונה עבור קרבונציה ועבור חדירת כלורידים:

✓ קרבונציה: מתוך משוואה (1) ניתן לקבוע שמשך חיי השרות היחסי של הרכבים בשתי מנות מים שונות הוא היחס בין השורש הריבועי של מקדמי החדירה בשתי מנות המים.
✓ חדירת כלורידים: מתוך משוואה (3) ניתן לקבוע שמשך חיי השרות היחסי של הרכבים בשתי מנות מים שונות הוא היחס שבין מקדמי הדיפוזיה בשתי מנות המים.

עבור מקדם יעילות של האפר של 0.50 ותכולת אפר של 100 ק"ג/מ"ק ההארכה של משך חיי השרות של בטונים העומדים בדרישות המרשמיות של התקן לקרבונציה (מנת מים 0.60) וחדירת כלורידים (מנת מים 0.50) יתקבלו התוצאות הבאות:

✓ קרבונציה: מנת המים האפקטיבית קטנה מ-0.60 ל-0.50. בהתבסס על תחשיב לפי השינוי במקדם החדירות (משוואה 1 והקשר שבציור 2), 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, ציור 2)
✓ חדירת כלורידים: מנת המים האפקטיבית קטנה מ-0.50 ל-0.43 ובהתבסס על תחשיב לפי השינוי במקדם הדיפוזיה (משוואה 3 והקשר שבציור 3), משך חיי השרות יגדל ב-46% (יחס של 0.69 בין מקדמי הדיפוזיה במנות מים של 0.50 ו-0.43, ציור 3)

כאמור, דרך חישוב זו המבוססת על השוואה איננה מאפשרת קביעה ישירה של משך חיי השרות אלא רק את היחס בהשוואה לבטון הבסיס המרשמי. עבור ההנחה הקיימת בתקן המרשמי שמשך חיי השרות עבור תכן הבטון לפי התקן הוא 50 שנה, הרי משך חיי השרות בתערובת עם אפר הפחם עבור מקדם יעילות של 0.50 יהיה גדול ב-21.5 וב-23 שנים עבור קרבונציה וחדירת כלורידים, בהתאמה.

דוגמת החישוב כאן היא עבור מקדם יעילות של 0.50 המקובל בתקן. מקדם זה יכול להיות שונה בתלות באפר הפחם ובצמנט ויש להניח שהוא יהיה גדול יותר עבור חדירת כלורידים.

4. הגישה התפקודית המלאה

הגישה התפקודית המלאה מבוססת על קביעת משך חיי השרות (משך הזמן עד תחילת קורוזיה או התקדמות קורוזיה המסכנת את המבנה – מצב גבולי) באמצעות קשרים כמותיים דוגמת משוואות 1 עד 3, הנותנות תיאור כמותי לתהליכים המתוארים בצורה סכמטית בציור 1. קשרים אלה מבוססים על כימות העומס הסביבתי והשתנותו על פני זמן, וזאת מול ההתנגדות של הבטון לעומס זה אשר מוצאת את ביטוייה בטיב הבטון (מקדמי חדירה לקרבונציה - משוואה 1, מקדם דיפוזיה לחדירת כלורידים – משוואה 3) ועובי כיסוי הבטון על הפלדה.

מבחינת תכן הבטון לקיים הפרמטר הקובע הוא מקדם החדירות או הדיפוזיה הנדרש כדי לקבל את משך חיי השרות המתוכנן עבור עובי כיסוי מתוכנן. עבור בטון מצמנט רגיל, ללא תוספים, ניתן להתבסס בתכן הבטון על קשרים בין מקדם החדירה הרלוונטי ומנת המים, כמתואר בציורים 2 ו-3. לצורך קביעת הרכב הבטון בנוכחות אפר פחם יש להביא בחשבון את השפעת האפר על המקדמים הללו, וזה יטופל בנפרד עבור קרבונציה ועבור חדירת כלורידים.

4.1 קרבונציה

השפעת אפר פחם ותוספים אחרים על איכות הבטון לעמידות בקרבונציה מתוארת במסמך המודל קוד של FIB [4]. ההמלצות במסמך זה למקרה שאין נתונים נוספים מוצגים בטבלה 3, כאשר הערכים בטבלה מבוססים על נתונים שפורסמו בספרות לגבי בטון מצמנט רגיל ומצמנט סיגים CEM III/B (המכיל 20 עד 34% סיגים ו- 66% עד 80% קלינקר) ובטונים מצמנט רגיל עם תוספת של 22% אפר פחם או 8% מיקרוסיליקה ממשקל הצמנט. הטבלה נותנת את הערכים של $1/R$, דהיינו ככל שהערך בטבלה נמוך יותר ההתנגדות גדולה יותר. ניתן לראות מהטבלה ואת ההשפעה החיובית של אפר פחם אשר עבורו ההנחה היא מקדם יעילות של 0.50, ואת ההשפעה הגדולה עוד יותר של מיקרוסיליקה אשר עבורה מקדם היעילות הוא 2. לעומת זאת, בצמנט III/B, שהוא צמנט סיגים, ההתנגדות לקרבונציה נמוכה בהרבה מזו של צמנט רגיל.

טבלה 3: מקדמי ההתנגדות לקרבונציה בתלות במנת המים ובהרכב החומר המקשר, מתוך מודל קוד האירופי [4]: צמנט רגיל (CEM I 42.5R), תוספת של 22% אפר פחם (CEMI 42.5R+22%FA), תוספת של 8% מיקרוסיליקה (CEMI 42.5R+8%SF), צמנט סיגים (CEM III/B 42.5).

סוג הצמנט	$R_{ACC,0^{-1}} [(mm^2/s)/(kgCO_2/m^3)]$					
	במנת מים אקוויולנטית של:					
	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
CEM I 42.5R + 22% FA (k=0.5)	-	0.3	1.9	2.4	6.5	8.3
CEM I 42.5R + 8% SF (k=2.0)	3.5	5.5	-	-	16.5	-
CEM III/B 42.5	-	8.3	16.9	26.6	44.3	80.0

4.2 כלורידים

הפרמטרים המאפיינים את הבטון בהקשר של עמידות בפני קורוזיה הנגרמת על ידי חדירת כלורידים, כפי שבאים לידי ביטוי במשוואה 3, הם משני סוגים: מקדם הדיפוזיה אשר מביא לידי ביטוי את איכות כלל הבטון ותכולת הכלור הקריטית הנותנת ביטוי לאינטראקציה שבין הבטון ופני הפלדה בכל הקשור לשמירה על הפסיבציה של הפלדה. ככל שערך זה גבוה יותר פילם הפסיבציה יציב יותר.

בדרך כלל מקובל בחישובים הנדסיים שהערך של תכולת הכלור הקריטית הנו קבוע ובלתי תלוי בטיב הבטון אלא רק בתכולת הצמנט שבו, ומקובל שהוא נע בטווח שבין 0.2 עד 0.4% ממשקל הצמנט בבטון. יחד עם זאת בשנים האחרונות יש מספר עבודות המצביעות על כך שערך זה איננו בהכרח קבוע ויכול לנוע בטווח רחב, ולהרכב הצמנט ולנוכחות של תוספים דוגמת אפר פחם ומיקרוסיליקה יכולה להיות השפעה עליו. בספרות מדווח שהערך של תכולת הכלור הקריטית קטן עם הגידול בתכולת אפר הפחם, אך הירידה הנה קטנה יחסית ובדרך כלל איננה יורדת אל מתחת לערכים הקריטיים של 0.2 עד 0.4% ממשקל הצמנט [9-6]. יתרה מכך, כאשר משקללים את ההשפעה של הירידה בתכולת הכלור הקריטית מול הגידול בהתנגדות לחדירת כלורידים כתוצאה מהקטנת מקדם הדיפוזיה, הרי ההשפעה של השינויים במקדם הדיפוזיה הם הדומיננטיים [8]. על כן מקובל להעריך את השפעת הרכב הבטון רק באמצעות ההשפעה על מקדם הדיפוזיה כאשר הערך של תכולת הכלור הקריטי הנו קבוע. הערך המקובל לפי המודל קוד האירופי [4] הוא 0.2% ממשקל הצמנט, לפי ההנחיות היפניות [10] 1.2 ק"ג/מ"ק בטון ולפי מפרטים מקובלים בארה"ב [12,11] 0.05% ממשקל הבטון. שלושת הערכים הללו אינם שונים באופן מהותי אם מתרגמים את כולם לבסיס דומה של משקל הכלור בבטון.

מכאן, שאת השפעת אפר הפחם יש לכמת בעיקר באמצעות השפעתה על מקדם הדיפוזיה שבמשוואה 3.

ההנחיות של המודל קוד האירופי מציגות ערכים שניתן לעשות בהם שימוש במקרים שבהם אין נתונים מקומיים, טבלה 4. גם כאן ההנחיות של FIB מבוססות על מקדם יעילות של 0.50 לאפר פחם כפי שמקובל בתקן הישראלי.

טבלה 4: מקדמי דיפוזיה אפקטיביים לחדירת כלורידים בתלות במנת המים ובהרכב החומר המקשר, מתוך המודל קוד האירופי [4]: צמנט רגיל (CEM I 42.5R), תוספת של 22% אפר פחם (CEM I 42.5R+22%FA), תוספת של 8% מיקרוסיליקה (CEM I 42.5R+8%SF), צמנט סיגים (CEM III/B 42.5)

סוג החומר המקשר בבטון	מקדם הדיפוזיה, m^2/s , במנת מים אקויוולנטית של:					
	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}
CEM I 42.5R + 22% FA (k=0.5)	-	5.6×10^{-12}	6.9×10^{-12}	9.0×10^{-12}	10.9×10^{-12}	14.9×10^{-12}
CEM I 42.5R + 8%SF (k=2.0)	4.4×10^{-12}	4.8×10^{-12}	-	-	5.3×10^{-12}	-
CEM III/B 42.5	-	1.4×10^{-12}	1.9×10^{-12}	2.8×10^{-12}	3.0×10^{-12}	3.4×10^{-12}

ערכים דוגמת אלה המוצגים בטבלה 4 הנם ערכים משוקללים המיצגים ממוצע על פני זמן אשר ניתן להציבם במשוואה 3 והם מתארים ערך אפקטיבי מייצג שאיננו תלוי בזמן. אבל בפועל מקדם הדיפוזיה משתנה על פני זמן (מדובר בתחשיבי משך חיי שרות על פני עשרות שנים)

והוא הולך וקטן כתוצאה מהתקדמות איטית של הידרצית הצמנט על פני זמן. ניתן לתת לכך ביטוי באמצעות הקשר הבא:

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^a \quad (4)$$

a מקדם ההזדקנות שהוא אינדקס להקטנת מקדם הדיפוזיה על פני זמן

t_0 – זמן רפרנס, בדרך כלל 28 ימים

ערכים טיפוסיים למקדם a לפי הנחיות באירופה ובארה"ב מוצגים בטבלאות 5 ו-6.

טבלה 5: מקדמי ההזדקנות של הדיפוזיה לכלורידים לפי המודל קוד האירופי [4]

מקדם ההזדקנות, a	הרכב המקשר בבטון
0.30	צמנט רגיל – $0.40 < w/c < 0.60$ CEM I
0.60	צמנט רגיל + אפר פחם – CEM I + fly ash $k=0.50$; $0.40 < w/c_{eq} < 0.60$
0.45	צמנט סיגים – CEM III/B $0.40 < w/c < 0.60$

טבלה 6: מקדמי ההזדקנות לפי המפרט האמריקאי של LIFE 365 ומקדמי דיפוזיה מחושבים לגילים של 28 ימים, 10 ו- 25 שנים [11]

הרכב המקשר בבטון	מקדם ההזדקנות a	$D_{28}, \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$	$D_{10y}, \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$	$D_{25y}, \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$
צמנט פורטלנד רגיל	0.20	79	30	25
30% סיגים	0.37	79	13	9.3
40% אפר פחם	0.52	79	6.3	3.9

הערכים הגבוהים יותר של התוספים המינרליים (אפר פחם וסיגים) מייצגים את האקטיביות הפוצולנית שלהם אשר על פני זמן גורמת להקטנת מקדם הדיפוזיה. ההנחה היא שאחרי 25 שנים המקדם כבר לא משתנה.

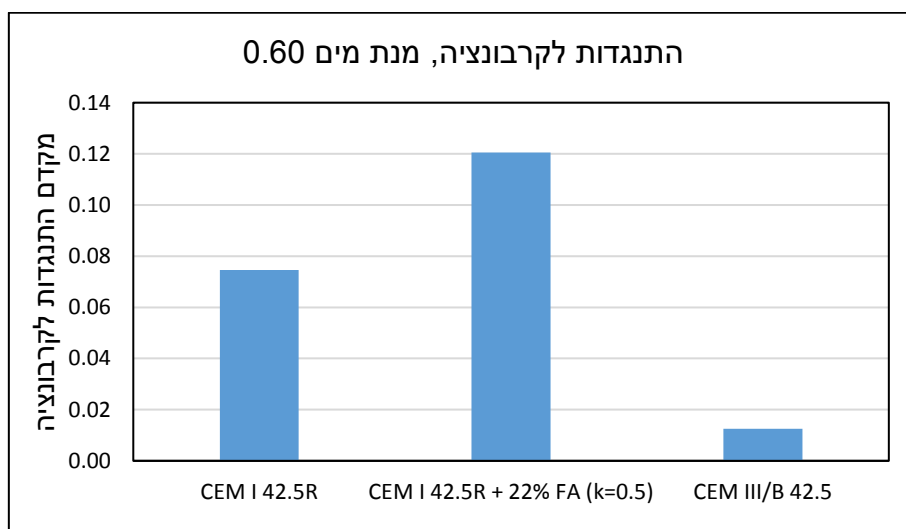
5. סיכום

המסמך הנוכחי מציג את הדרכים לתכן תערובת בטון המכילות אפר פחם במגמה לקבל הרכבים אשר מקנים עמידות משופרת לבטון בתנאי סביבה אגרסיביים או למבנים אשר בהם נדרש משך חיי שרות אורך במיוחד, מעבר ל- 50 שנים. הכלים הכמותיים המוצגים כאן מאפשרים לערוך חישובים שמתוכם ניתן לקדם תחשיבים כלכליים מבוססים על חיסכון בצמנט בשימוש באפר פחם או חיסכון שמקורו בהארכת משך חיי השרות (תחשיבי עלות מחזור החיים).

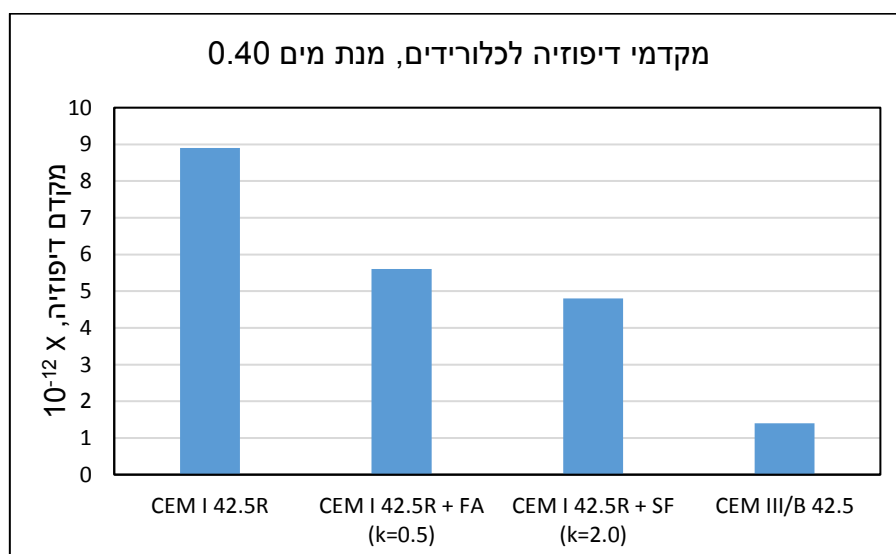
הכלים הכמותיים המוצגים במסמך מבוססים על מתודולוגיות חישוב שפותחו בתקנים ובמפרטים מקובלים במדינות מובילות, אירופה, ארה"ב ויפן. לצורך השימוש בכלים הללו נדרש להכניס פרמטרים מאפיינים אשר יכולים להיות שונים בתנאי אקלים שונים. בשלב זה ניתן להתבסס על ערכים המובאים כאן מתקנים וקודקסים אשר מציינים שבהעדר ערכים נתונים מקומיים ניתן לעשות בהם שימוש. במקביל מקודם מחקר שנועד לפתח ערכים אשר מתאימים לסביבה ולמקובל במדינת ישראל.

בכל מקרה, על פי הערכים שבמסמך זה ניתן לבצע השוואות בין שילוב של אפר פחם לחיסכון בצמנט או בהארכת משך חיים, בהשוואה לטכנולוגיות אחרות המבוססות על הגדלת תכולת הצמנט ושימוש בתוספים אחרים כדוגמת מיקרוסיליקה וסיגים. הדגמה של השוואות אלה בהתבסס על הערכים המוצגים בתקנים ובמפרטים האירופיים והאמריקאים מוצגים בציורים 4 עד 6 עבור הרכבים המיועדים לעמידה בתנאי סביבה של קרבוניזציה (מנת מים 0.60) וחדירת כלורידים (מנת מים בטווח 0.40 עד 0.50).

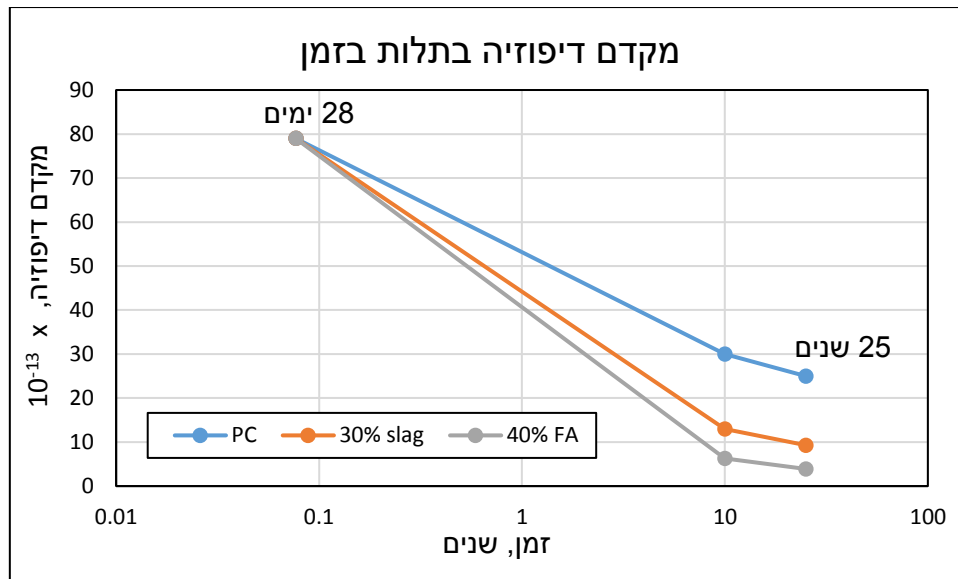
עבור כל התנאים הללו הנוכחות של אפר פחם מקטינה במידה משמעותית את החדירות, הן לקרבוניזציה והן לכלורידים. עבור קרבוניזציה אפר הפחם יעיל יותר מסיגים (ציור 4) ועבור חדירת כלורידים צמנט סיגים יעיל יותר מתערובת המכילה 22% אפר פחם (ציור 5). אם אבל מכפילים את תכולת האפר ל- 40% ומביאים בחשבון את השפעת הזמן ניתן לקבל מאפר פחם יעילות דומה לזו של צמנט סיגים (ציור 6).



ציור 4: מקדמי ההתנגדות לקרבוניזציה של בטונים במנת מים 0.60, על פי המודל קוד האירופי [4]: צמנט רגיל (CEM I 42.5R), תוספת של 22% אפר פחם (CEM I 42.5R+22%FA), צמנט סיגים (CEM III/B 42.5).



ציור 5: מקדמי הדיפוזיה לכלורידים בבטונים במנת מים 0.40 על פי המודל קוד האירופי [4]: צמנט רגיל (CEM I 42.5R), תוספת של 22% אפר פחם (CEM I 42.5R+22%FA), תוספת של 8% מיקרוסיליקה (CEM I 42.5R+8%SF), צמנט סיגים (CEM III/B 42.5).



ציור 6: השפעת הזמן על מקדמי הדיפוזיה של בטונים ממקשר של צמנט פורטלנד (PC), צמנט פורטלנד עם 30% סיגים (30% slag), צמנט פורטלנד עם 40% אפר פחם (40%FA) לפי המפרט האמריקאי 365 LIFE [12,11]

מקורות

1. CEN 16563 Principles of equivalent durability performance, Technical Report, European Committee for Standardization, Brussels, 2013
2. European Standard EN 206, Concrete-Specification, performance, production and conformity, 2013

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

4. [FIB Model Code for service life design \(fib MC-SLD\), fib Bulletin no. 34, 2006, fib secretariat, case postale 88, CH-1015, Lausanne, Switzerland. 2006](#)

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

6. U.Angst, B.Elsener, C.Larsen and O.Vennesland, Critical chloride content in reinforced concrete – A Review, Cement and Concrete Research, 39, 1122-1138, 2009
7. K.Y.Ann and H.W.Song, Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete, Corrosion Science, 49, 4113-4133, 2007
8. T. Cheewaket, C.Jaturapitakkul and W.Chalee, Concrete durability presented by acceptable chloride level and chloride diffusion coefficient in concrete: 10-year results in marine sit, Materials and Structures, 47, 1501-1511, 2014

9. M.Thomas, Chloride thresholds in marine concrete, Cement and Concrete Research, 26, 513-519, 1996
10. Japanese Standard Specifications for Concrete Structures – 2007: Design, JSCE Guidelines for Concrete No. 15, Japan Society of Civil Engineers
11. Life-365 Service Life Prediction Model and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Cost of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides Version 2.1, January 7, 2012, Produced by the Life-365™ Consortium II.
12. Life-365® v2.2 (2013), www.Life-365.org. (free software)