



מיסודם של  
משרד הבינוי

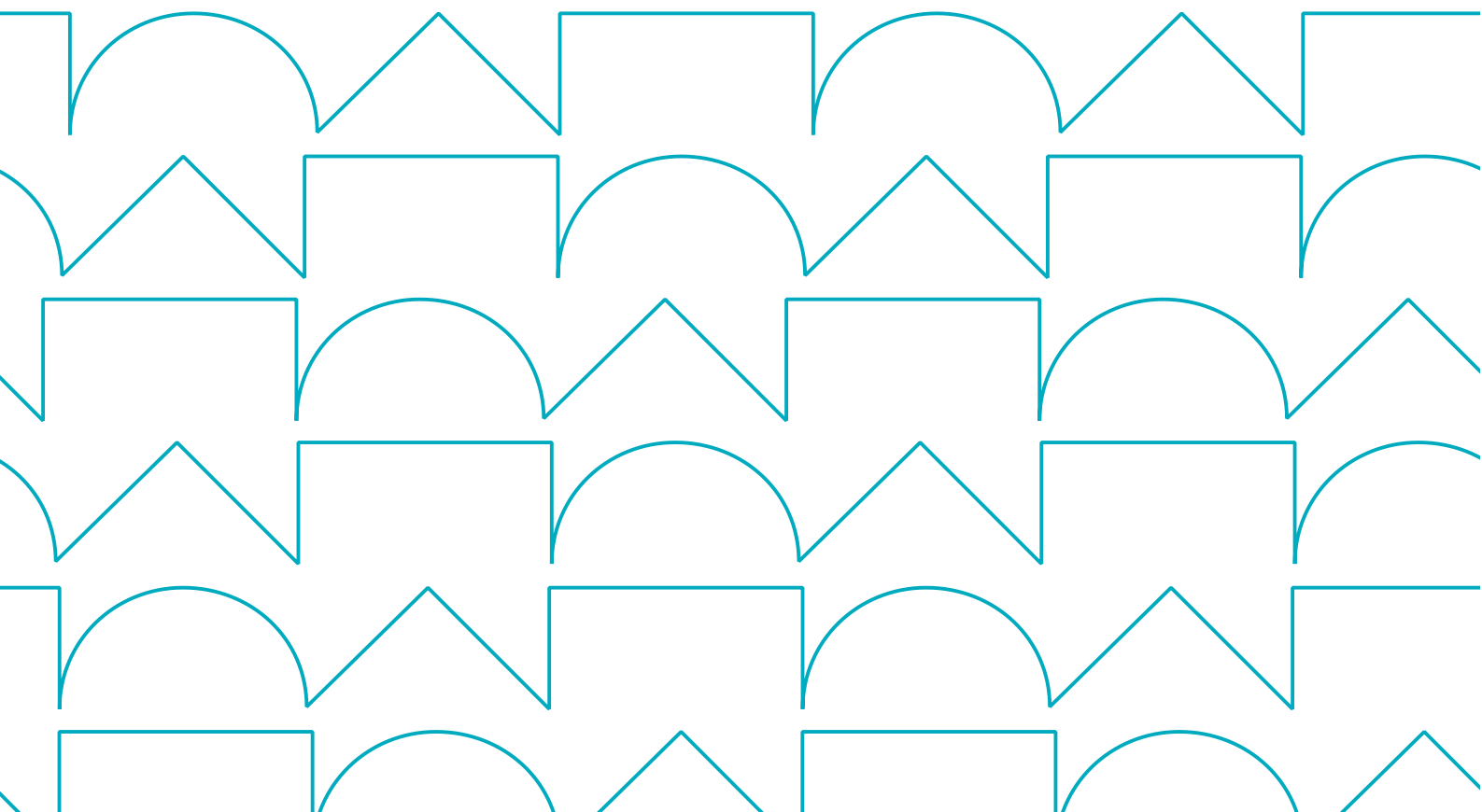
הטכניון-מכון טכנולוגי לישראל  
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

**המכון הלאומי לחקר הבנייה**  
**National Building Research Institute**



**קיים של בטון עם אפר פחם:  
בחינת האפשרויות להגדלת מקדם היעילות של אפר הפחם**

**א. בנטור      ה. באום**





Founded By  
Ministry of Construction  
Technion-Israel Institute of Technology  
Faculty of Civil & Environmental Engineering

מיסודם של  
משרד הבינוי

הטכניון-מכון טכנולוגי לישראל  
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

המכון הלאומי לחקר הבנייה  
National Building Research Institute



2007718

# קיים של בטון עם אפר פחם: בחינת האפשרויות להגדלת מקדם היעילות של אפר הפחם

פרופ' א. בנטור ד"ר ה. באום

הוזמן על ידי מנהלת אפר הפחם

מס' הזמנה 35019

Copyright © 2008 by A. Bentur, H. Baum, The National Coal Ash Board and The Technion  
Research and Development Foundation, Ltd, Haifa

מאי 2008

חיפה

אייר תשס"ח

למען הסר ספק מודגש בזאת כי החוקר, מוסד הטכניון למחקר ולפיתוח בע"מ והטכניון המכון הטכנולוגי לישראל – אינם ולא יהיו אחראים לכל פגיעה ו/או נזק ו/או הוצאות ו/או הפסד, מכל סוג ומין, שנגרם או עלול להיגרם לרכוש ו/או לגוף, כתוצאה ישירה או עקיפה, למקבל הדו"ח או לצד ג' כלשהו, עקב דו"ח זה או בהקשר אליו, לרבות בשל יישום האמור בו.

## תוכן העניינים

### עמוד

1	מבוא	1
2	מטרות המחקר	2
2	תאור מערכת הניסויים	3
10	קרבוניציה	4
10	4.1 תוצאות	4.1
10	4.2 דיון	4.2
40	כלורידים	5
51	מסקנות	6
52	נספח א': פריזה בתנאים טבעיים	52
59	נספח ב': השוואת תוצאות קרבוניציה וחזק – מחקר נוכחי וקודם	59

## תקציר

במחקר קודם נבחנה האפשרות להביא לשינוי בתקן הישראלי כדי לאפשר שימוש באפר פחם כתחליף לצמנט. הדגש העיקרי היה על האפשרות להקטנת תכולת הצמנט המינימאלית הנדרשת בתקן תוך בחינה של מקדם היעילות של האפר והתכולה המרבית של צמנט שניתן להחליף. על בסיס מחקר זה שונה התקן והתאפשרה החלפת צמנט באפר פחם עבור תנאי פריזה בקרבונציה (סוג פריזה/מבנה 1-4 על פי ת"י 466). ההחלפה הייתה בתנאים מגבילים של מקדם יעילות של 0.5 לאזורים 1-3, 0.4 לאזור 4, והחלפה מרבית של 40 ק"ג/מ"ק צמנט.

באותו מחקר ניתנה עדיפות להחלפה בתנאי חשיפה של קרבונציה (דרגות 1 – 4) משום שבתחום זה נמצא בשימוש מרבית נפח הבטון המיוצר בארץ. בתחום דרגות החשיפה הגבוהות יותר האופייניות לתנאי כלורידים (5 – 8) נערכה חקירה מוגבלת יותר, ולא התקבלו המלצות חד משמעיות לגבי השינוי בתקן.

המחקר והמסקנות בתחום דרגות 1 – 4 התבסס על קרבונציה בתנאים מואצים, בעיקר של תערובות בעלות תכולות מים דומות של כ- 185 ליטר מים למ"ק בטון.

מסקנות המחקר נתנו תוצאות חיוביות ושימושיות אשר אפשרו את שינוי התקן במגמה לשלב אפר פחם בבטון. יחד עם זאת הועלו מספר שאלות, בעיקר האם קיימת אפשרות להרחיב את גבולות השימוש באפר בתנאי פריזה 1 – 4 תוך שמביאים בחשבון את הגורמים הבאים:

- א. תנאי הקרבונציה המואצת "חמורים" מדי לגבי אפיון תפקוד האפר.
- ב. קיימת אפשרות שבתכולות מים נמוכות יותר האפר יהיה יעיל יותר בכל הקשור לעמידות לקרבונציה.

כדי לקבל אינדיקציה לסוגיות אלה הוכנו גם מספר קטן של תערובות בעלות תכולות מים של 185 ו- 165 ליטר/מ"ק ונחשפו לתנאי חשיפה טבעיים. לאחרונה (בנובמבר 2005) דווחו התוצאות של פריזה לאחר שנתיים.

מתוך תוצאות ראשוניות אלה ניתן להצביע על שתי מגמות:

- א. התוצאות הראשוניות מראות שקיימת קורלציה טובה בינה ובין הקרבונציה הטבעית והמואצת. לכן, בשלב זה, לא נראה שיש טעם להשקיע מאמץ בבחינת פרמטרים אחרים של קרבונציה מואצת.
- ב. בבחינת הקטנת תכולת הצמנט המינימאלית לערכים מתחת ל- 230 ק"ג/מ"ק נמצאה בפריזה הטבעית אינדיקציה לכך שבתכולת המים הנמוכה יש יתרון גדול יותר לאפר. יחד עם זאת זמן הפריזה קצר מדי כדי להסיק מסקנות מרחיקות לכת (נספח א').

לאור ניתוח זה הורחב המחקר ונבחנה היעילות של השימוש באפר הפחם הן בדרגות הפריזה הנמוכות בתנאי קרבונציה (1 - 4) והן הגבוהות יותר בתנאי כלורידים (5 – 6). יעילות האפר בתנאי קרבונציה:

- עבור הרכב בטון נתון להבדלים באיכויות האפר יש השפעה קטנה יחסית הן על החוזק והן על הקרבונציה, למרות שמדובר במדגמי אפר בעלי מקדם אקטיביות פוצולנית שונה.
- ההשפעה העיקרית של איכות האפר היא בהקטנה בתצרוכת המים במדגמי אפר בעלי LOI נמוך יותר. השפעה זו באה לידי ביטוי בתערובות עם תכולת מים של 185 ליטר/מ"ק אשר בהן נעשה שימוש בריאובילד 1000 אך היא הייתה הרבה יותר קטנה, כמעט זניחה בתערובות עם תכולת מים 160 ליטר/מ"ק אשר שם המוסף היה גלניום 51 .
- היעילות של האפר במחקר הנוכחי הייתה הרבה יותר נמוכה מזו שבמחקר הקודם, למרות שהאקטיביות הפוצולנית הייתה גבוהה יותר במדגמי האפר שבמחקר הנוכחי. אין בידינו הסבר להבדל זה, וייתכן שהוא קשור בטיב הצמנט, למרות שבשני המקרים מדובר בצמנט מאותו סוג. סוגיה זו דורשת ליבון מיוחד והתייחסות ראשונית אליה מוצגת בנספח א'.

#### יעילות האפר בתנאי חשיפה לכלורידים:

- ניתן להשיג תפקוד שקיל בתנאי חשיפה לכלורידים (יחסית לתערובות תקניות עם מנת מים של 0.45 ותכולת צמנט של 320-350 ק"ג/מ"ק) באמצעות תערובות עם תכולת צמנט נמוכה יותר של 270 ק"ג/מ"ק ומנת מים של 0.55 כאשר מוסיפים להן אפר בתכולות של כ- 90 ק"ג/מ"ק. היעילות של האפר בתוספות אלה היא כ- 0.80 עבור אשפרה תקנית של 7 ימים במים, ומעל 1.0 עבור אשפרה רציפה במים במשך 28 ימים.
- בתנאי אשפרה של התזה התפקוד של חדירות לכולרידים הנו ירוד ביותר, ללא קשר להרכב התערובת ותכולת האפר. על כן אין משמעות למקדמי היעילות בתנאים אלה.
- תוספת אפר לתערובות עם מנת מים של 0.45 מאפשרת להקטין את החדירות לערכים של כ- 500 קולון המאפיינת תערובות עם עמידות יוצאת דופן לכלורידים. גם כאן נדרשת אשפרה במים; אשפרה בהתזה אינה מאפשרת להשיג תפקוד כזה.
- עבור הרכב בטון נתון, לטיב האפר כפי שבא לידי ביטוי ב- LOI לא הייתה השפעה על התפקוד לחדירות כלורידים. ההשפעה הייתה עקיפה באמצעות הקטנה בתכולת המוסף העל פלסטי הנדרשת להשגת הרכב נתון בעבידות מתאימה.

#### אשפרה

גם במחקר זה נמצא שלאשפרה השפעה קטנה יחסית על החוזק בכל הקשור לתפעול האפר. יחד עם זאת השפעתה משמעותית בכל הקשור לתפעול האפר בהיבטים של קיים, כלורידים קרבונציה. הרגישות הנה גדולה במיוחד בתחום החדירות לכלורידים – אשפרה המבוססת על התזה מאפשרת להשיג בדוחק את דרישות החוזק אך בשום פנים ואון איננה מאפשרת להגיע לקיים הנדרש.

## 1. מבוא

במחקר קודם נבחנה האפשרות להביא לשינוי בתקן הישראלי כדי לאפשר שימוש באפר פחם כתחליף לצמנט. הדגש העיקרי היה על האפשרות להקטנת תכולת הצמנט המינימאלית הנדרשת בתקן תוך בחינה של מקדם היעילות של האפר והתכולה המרבית של צמנט שניתן להחליף. על בסיס מחקר זה שונה התקן והתאפשרה החלפת צמנט באפר פחם עבור תנאי פריזה בקרבונציה (סוג פריזה/מבנה 1-4 על פי ת"י 466). ההחלפה הייתה בתנאים מגבילים של מקדם יעילות של 0.5 לאזורים 1-3, 0.4 לאזור 4, והחלפה מרבית של 40 ק"ג/מ"ק צמנט.

באותו מחקר ניתנה עדיפות להחלפה בתנאי חשיפה של קרבונציה (דרגות 1 – 4) משום שבתחום זה נמצא בשימוש מרבית נפח הבטון המיוצר בארץ. בתחום דרגות החשיפה הגבוהות יותר האופייניות לתנאי כלורידים (5 – 8) נערכה חקירה מוגבלת יותר, ולא התקבלו המלצות חד משמעיות לגבי השינוי בתקן.

המחקר והמסקנות בתחום דרגות 1 – 4 התבסס על קרבונציה בתנאים מואצים, בעיקר של תערובות בעלות תכולות מים דומות של כ- 185 ליטר מים למ"ק בטון.

מסקנות המחקר נתנו תוצאות חיוביות ושימושיות אשר אפשרו את שינוי התקן במגמה לשלב אפר פחם בבטון. יחד עם זאת הועלו מספר שאלות, בעיקר האם קיימת אפשרות להרחיב את גבולות השימוש באפר בתנאי פריזה 1 – 4 תוך שמביאים בחשבון את הגורמים הבאים:

- א. תנאי הקרבונציה המואצת "חמורים" מדי לגבי אפיון תפקוד האפר.
- ב. קיימת אפשרות שבתכולות מים נמוכות יותר האפר יהיה יעיל יותר בכל הקשור לעמידות לקרבונציה.

כדי לקבל אינדיקציה לסוגיות אלה הוכנו גם מספר קטן של תערובות בעלות תכולות מים של 185 ו- 165 ליטר/מ"ק ונחשפו לתנאי חשיפה טבעיים. לאחרונה (בנובמבר 2005) דווחו התוצאות של פריזה לאחר שנתיים.

מתוך תוצאות ראשוניות אלה ניתן להצביע על שתי מגמות:

- א. התוצאות הראשוניות מראות שקיימת קורלציה טובה בינה ובין הקרבונציה הטבעית והמואצת. לכן, בשלב זה, לא נראה שיש טעם להשקיע מאמץ בבחינת פרמטרים אחרים של קרבונציה מואצת.
- ב. בבחינת הקטנת תכולת הצמנט המינימאלית לערכים מתחת ל- 230 ק"ג/מ"ק נמצאה בפריזה הטבעית אינדיקציה לכך שבתכולת המים הנמוכה יש יתרון גדול יותר לאפר. יחד עם זאת זמן הפריזה קצר מדי כדי להסיק מסקנות מרחיקות לכת (נספח א').

לאור ניתוח זה נראה היה שיש מקום למחקר אשר יאפשר בחינה של הרחבת היעילות של השימוש באפר הפחם הן בדרגות הפריזה הנמוכות בתנאי קרבונציה (1 - 4) והן הגבוהות יותר בתנאי כלורידים (5 - 6).

בדרגות החשיפה הנמוכות, אשר בהן הבעיה היא התנגדות לקרבונציה יש מקום להעמיק את המחקר משני היבטים :

(א) המשך מעקב אחר קשרי הגומלין בין הקרבונציה הטבעית והמואצת.  
 (ב) בחינת השפעת תכולת המים על מקדם היעילות במגמה לבדוק האם בתכולת מים נמוכה יותר המקדם גבוה יותר. לבחינה של אפשרות זו יש משמעות מעשית חשובה לאור השינוי בתקן הישראלי העושה הבחנה בין אפרי פחם בעלי איכויות שונות שהן פועל יוצא של ההפסד בקלייה, LOI: אפר באיכות גבוהה בעל LOI הקטן מ- 4% המאפשר את הקטנת תצרוכת מים (סוג א') ואפר בעל LOI מעל 4% (סוג ב') אשר איננו מאפשר הקטנה כזו. אם יוכח שמקדם היעילות גדול יותר עבור אפר מסוג א', יש לכך משמעויות כלכליות חשובות.

בדרגות החשיפה הגבוהות הבעיה היא עמידות בחדירת כלורידים, ויש מקום לחקירה יסודית יותר כדי לבחון את האפשרות לשינוי התקן הישראלי לניצול הפוטנציאל של האפר להקטנת מקדם החדירות לכלורידים. הצורך במחקר הוא בעיקר בהיבט של הפגיעה הפוטנציאלית ביכולת ההקטנה של החדירות לכלורידים כתוצאה מתנאי האשפחה והאקלים בארץ, אשר יכולים לצמצם את יעילות האפר בשכבת הכיסוי של הבטון.

## 2. מטרות המחקר

- א. בחינה של האפשרות להגדלת יעילות האפר כתחליף לצמנט בתנאי קרבונציה.
- ב. גיבוש קריטריונים להחלפת צמנט באפר פחם בתנאי חשיפה לכלורידים (סביבה ימית).

## 3. תאור מערכת הניסויים

מטרות עבודת המחקר הנוכחית, הן :

- ג. בחינה של האפשרות להגדלת יעילות האפר כתחליף לצמנט בתנאי קרבונציה.
- ד. גיבוש קריטריונים להחלפת צמנט באפר פחם בתנאי חשיפה לכלורידים (סביבה ימית).

יעילות אפר הפחם בתנאי קרבונציה התבססה על חקירת הקרבונציה בתערובות בעלות תכולות צמנט של 200, 230 ו- 270 ק"ג/מ"ק צמנט ותכולות אפר של עד 120 ק"ג/מ"ק. לצורך השגת הסומך הדרוש תוך שימור תכולת הצמנט והמים נעשה שימוש במוספים על-פלסטיים. מדגמי האפר היו בעלי שני ערכי LOI. מדגם אחד היה אפר בעל איכות גבוהה (LOI נמוך, בעל יכולת הקטנת תצרוכת מים גבוהה) ואפר באיכות נמוכה יותר עם LOI של מעל 4% שאינו מאפשר הקטנה בתצרוכת מים. הבטונים שהוכנו היו בהרכבים נתונים של תכולות מים של 185 ו- 165 ליטר/מ"ק ותכולות צמנט של 200 ו- 230 ק"ג/מ"ק, כאשר האפר מוסף בתכולות של עד 120



ק"ג/מ"ק תוך החלפה בחול. העבידות נשמרה קבועה ע"י ויסות תכולת המוסף העל פלסטי, ריאובילד 1000 עבור התערובות עם 185 ליטר מים וגלניום 51 עבור התערובות עם 165 ליטר מים. ההרכבים והמשתנים מוצגים בטבלה 1.

אפיון תפקוד הבטונים להתנגדות לקרבונציה התבסס על חשיפה טבעית ובדיקה מואצת. הבדיקה המואצת התבצעה על מדגמים בגיל 90 ימים לאחר שעברו טיפולי אשפרה שונים כמפורט בטבלה 1. קביעת הקרבונציה בחשיפה טבעית תהיה לאחר תקופות של  $\frac{1}{2}$ , 1, 2, 5, 10 ו- 15 שנים.

יעילות האפר בתנאי כלורידים (סביבה ימית) נבדקה בבטונים בעלי תכולת צמנט בטווח של 270 עד 350 ק"ג צמנט למ"ק (כאשר תערובות הבסיס הן עם 320 ו- 350 ק"ג/מ"ק ומנות מים של 0.55 ו- 0.45). תכולות האפר היו ברמה של עד 120 ק"ג/מ"ק. החדירות לכלורידים נקבעה באמצעות בדיקה מואצת ASTM C1202, להערכת מקדמי הדיפוזיה. בדיקת מקדמי הדיפוזיה התבצעה בגילים של 90 ימים והוכנו מדגמים לבדיקות בגילים צבוגרים יותר: 180 ימים, 1 שנה, 2 שנים ו- 5 שנים. המדגמים שקבלו אשפרה במים בצורות שונות, החל מאשפרה חלקית עד לאשפרה של 28 ימים במים (ראה טבלה 2). לאחר האשפרה במים אוחסנו המדגמים בתנאי מעבדה רגילים עד לגיל הבדיקה לחדירת כלורידים, במועדים הנקובים לעיל.

המשתנים בהרכב ובאשפרה של הבטונים בסדרת הקרבונציה מוצגים בטבלה 1 ובסדרת הכלורידים בטבלה 2. בטבלה 3 מוצגים נתוני האגרטים, בטבלה 4 ובטבלה נתונים הרכבי מדגמי האפר, ובטבלה 5 מוצג הרכב הצמנט.

טבלה 1: תכנית ניסויים לבדיקות קרוניציה של תערובות בטון המכילות אפר פחם

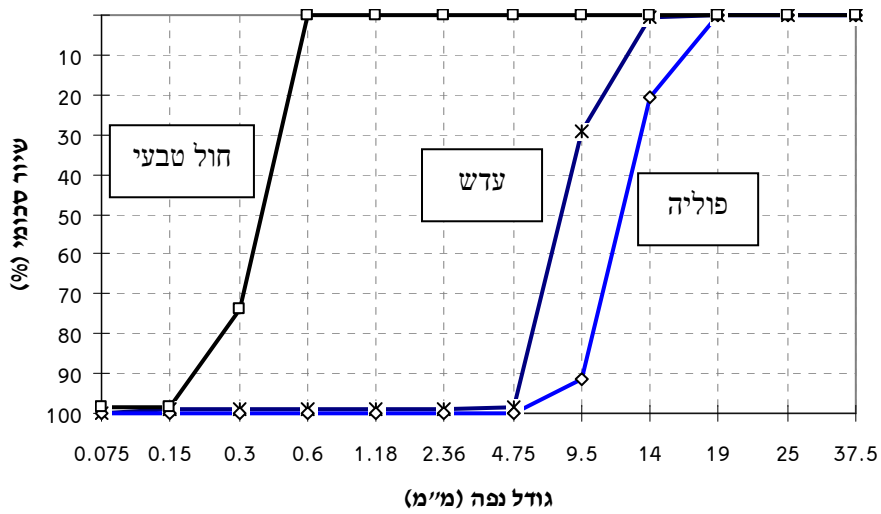
הערות	מוסף-על	סומך, מ"מ	הרכב, ק"ג למ"ק			תערובת מס.	סדרה		
			מים	אפר פחם	צמנט				
תערובות ייחוס ללא אפר פחם	+	>125	185	-	200	1	I		
	+			-	230	2			
	+			-	270	3			
	+		165	-	200	4	II		
	+			-	230	5			
	+			-	270	6			
אפר פחם מאופיין ב- LOI עד 3%	+		165	30	200	7	III		
	+					60		8	
	+					90		9	
	+			30	230	10	IV		
	+					60		11	
	+					90		12	
אפר פחם מאופיין ב- LOI עד 3% תכולת מוסף מוקטנת	+			185	30	200	13	V	
	+						60		14
	+						90		15
	+				30	230	16	VI	
	+						60		17
	+						90		18
אפר פחם מאופיין ב- LOI כ-6%	+		185		30	200	19	VII	
	+						60		20
	+						90		21
	+				30	230	22	VIII	
	+						60		23
	+						90		24
אפר פחם מאופיין ב- LOI כ-6%	+			165	30	200	25	IX	
	+						60		26
	+						90		27
	+				30	230	28	X	
	+						60		29
	+						90		30

טבלה 2: תכנית ניסויים לחדירת כלורידים של תערובות בטון המכילות אפר פחם

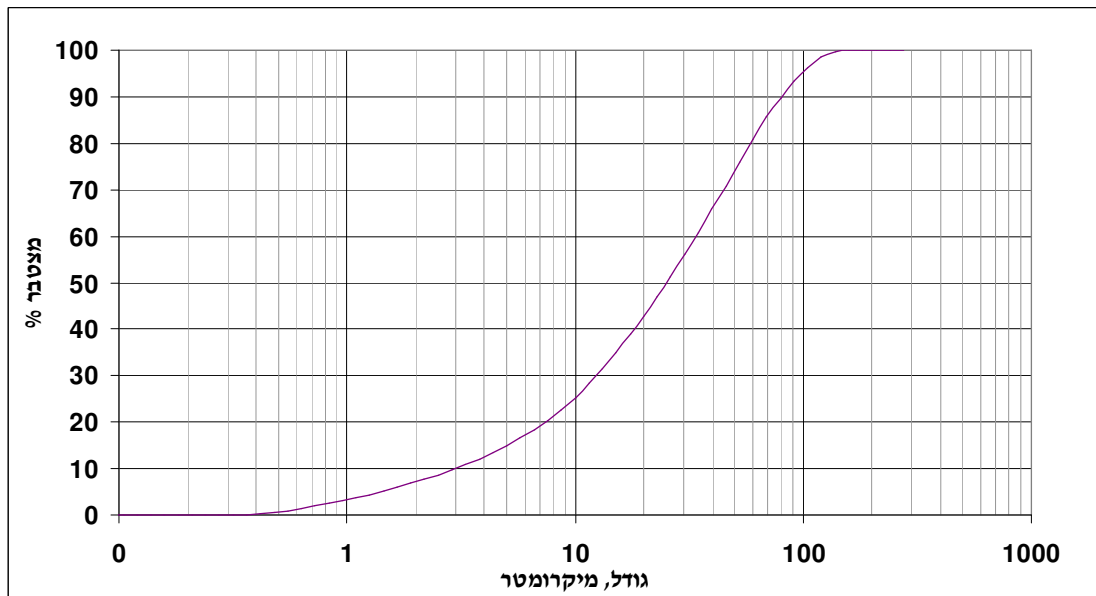
הערות	הרכב, ק"ג למ"ק			סדרה	תערובת מס'	
	מים	אפר פחם	צמנט			
תערובות ייחוס ללא אפר פחם	175	-	320	I	I.1	I
	145	-	320		I.2	
	160	-	350		I.3	
אפר פחם מאופיין ב- LOI נמוך	175	60	270	II	II.4	II
		90			II.5	
		120			II.6	
	160	60	320	III	III.7	III
		90			III.8	
		120			III.9	
אפר פחם מאופיין ב- LOI גבוה	175	60	270	IV	IV.10	IV
		90			IV.11	
		120			IV.12	
	160	60	320	V	IV.13	V
		90			IV.14	
		120			IV.15	

טבלה 3 : תכונות האגרנטים המשמשים להכנת תערובות הבטון בעבודה הנוכחית

ספיגות, %	משקל סגולי-מרחבי, ק"ג למ"ק	
0.6	2.74	פוליה
1.0	2.72	שומשום
0.0	2.65	מלאן מודיעים
0.1	2.63	חול טבעי



דרוג האגרנטים



דרוג מלאן מודיעים

טבלה 4 : הרכב אפר פחם קולומביאני המאופיין באיבוד בקלייה נמוך.

TO: IEC Att: Messrs Paulo  
Felzenszwalbe, Marc Scher  
FROM: Guy Fooksman,  
NCSC

Estimted  
arrival to  
Hadera: 10/22/2006  
Estimted  
arrival to  
Ashkelon:

Vessel + Voyage	<b>Cape Carmel</b>	<b>6</b>	A F T	INITIAL DEFORM.	<b>1,205</b>
Supplier	<b>Drummond</b>			SOFTENING	<b>1,241</b>
Grade	<b>DrS04</b>			HEMISPHERIC	<b>1,320</b>
Coal Origin	<b>Colombia</b>			FLOW	<b>1,405</b>
Loading Port	<b>Puerto Drummond</b>		S I Z E	0-0.5mm	<b>10.50%</b>
Contract Mine	<b>La Loma LS</b>			0-5mm	<b>40.60%</b>
B/L Date	<b>10/3/2006</b>			30mm-50mm	<b>9.50%</b>
Destination	<b>Hadera</b>	<b>Ruthenberg</b>		50mm-75mm	<b>2.60%</b>
Quantity	<b>173,149</b>	<b>0</b>		75mm-100mm	<b>0.00%</b>
				100mm+	<b>0.00%</b>
(A.R.)	TOTAL MOISTURE	<b>13.10%</b>	A S H C H E M I S T R Y	SiO2	<b>56.74%</b>
(A.D.)	RESIDUAL MOISTURE	<b>6.09%</b>		Al2O3	<b>21.87%</b>
(D.B.)	ASH	<b>4.87%</b>		Fe2O3	<b>9.42%</b>
(D.B.)	VOLATILE MATTER	<b>40.95%</b>		CaO	<b>3.85%</b>
(A.R.)	GROSS C.V.	<b>6,441</b>		MgO	<b>1.84%</b>
(A.R.)	NET C.V	<b>6,127</b>		TiO2	<b>0.98%</b>
(D.B.)	CARBON	<b>75.74%</b>		K2O	<b>1.57%</b>
(D.B.)	HYDROGEN	<b>5.35%</b>		Na2O	<b>1.77%</b>
(D.B.)	NITROGEN	<b>1.39%</b>		SO3	<b>1.16%</b>
(D.B.)	SULPHUR	<b>0.39%</b>		P2O5	<b>0.21%</b>
(D.B.)	CHLORINE	<b>0.030%</b>		Undetermined	<b>0.59%</b>
(D.B.)	OXYGEN	<b>12.26%</b>		RS	<b>0.090</b>
	H.G.I.	<b>45</b>		RF	<b>0.410</b>
		<b>100.0%</b>		<b>L.O.I.</b>	<b>1.50%</b>

טבלה 5 : הרכב אפר פחם אינדונזי המאופיין באיבוד בקלייה גבוה.

**SHIPMENT  
ANALYSIS  
No. 758**

**TO: IEC Att: Messrs Paulo Felzenszwalbe, Marc Scher**  
**FROM: Guy Fooksman, NCSC**

Estimated arrival  
to Hadera: 10/20/2006  
Estimated arrival  
to Ashkelon:

Vessel + Voyage	New Brisk	6	A F T	INITIAL DEFORM.	1,170
Supplier	KPC			SOFTENING	1,210
Grade	BlendLS			HEMISPHERIC	1,240
Coal Origin	Indonesia			FLOW	1,330
Loading Port	Tanjung Bara		S I Z E	0-0.5mm	6.10%
Contract Mine	BlendLS			0-5mm	35.10%
B/L Date	9/30/2006			30mm-50mm	11.10%
Destination	Hadera	Ruthenberg		50mm-75mm	1.30%
Quantity	156,517	0		75mm-100mm	0.00%
				100mm+	0.00%
(A.R.)	TOTAL MOISTURE	13.80%			
(A.D.)	RESIDUAL MOISTURE	9.20%	A	SiO2	54.92%
(D.B.)	ASH	5.80%	S	Al2O3	20.81%
(D.B.)	VOLATILE MATTER	44.70%	H	Fe2O3	10.13%
(A.R.)	GROSS C.V.	6,184		CaO	3.83%
(A.R.)	NET C.V	5,870	C	MgO	3.07%
(D.B.)	CARBON	74.64%	H	TiO2	1.00%
(D.B.)	HYDROGEN	5.29%	E	K2O	2.40%
(D.B.)	NITROGEN	1.31%	M	Na2O	0.74%
(D.B.)	SULPHUR	0.47%	I	SO3	2.35%
(D.B.)	CHLORINE	0.010%	S	P2O5	0.26%
(D.B.)	OXYGEN	12.49%	T	Undetermined	0.49%
	H.G.I.	45	R	RS	0.120
		100.0%	Y	RF	0.190
				L.O.I.	7.50%

טבלה 5 : הרכב הצמנט מסוג CEM II 42.5 N A-V ששימש בעבודה הנוכחית

**הרכב  
כימי:**

**תכונות פיזיקליות\*:**

±	value	parameter
40	3710	שטח פנים (gr/cm <sup>2</sup> )
	3.020	צפיפות (gr/cm <sup>3</sup> )
-	9.3	+32
-	3.5	+45
		התקשרות (דקות)
5	280	התחלה
5	360	סוף
0.5	29.5	מים לעבידות (%)
-	0.0	התפשטות בחום (מ"מ)

**חוזק בלחיצה  
(מגפ"ס):\***

גיל	מנסרות
1	11.6
2	25.7
3	32.6
7	43.4
28	61.0

57.33	CaO
19.84	SiO <sub>2</sub>
6.13	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
4.27	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1.00	MgO
0.37	TiO <sub>2</sub>
0.67	K <sub>2</sub> O
0.24	Na <sub>2</sub> O
0.75	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
0.04	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
3.27	*SO <sub>3</sub>
0.022	Cl
5.18	*IR
0.76	*FL
0.78	LOI 250°C
0.36	LOI 600°C
4.02	LOI 950°C
5.16	*LOI total
12.7	sol Cr6+ppm

## 4. קרבונציה

### 4.1 תוצאות

הרכב הבטונים ותכונות הבטון הטרי מוצגות בטבלה 6. תוצאות החוזק, מקדמי הקרבונציה ומחזור החיים המחושב מסוכמים בטבלה 7 ובטבלה 8. תחשיב מחזור החיים התבסס על תוצאות של בדיקות קודמות באתר פריזה ובתנאים מואצים, אשר מתוכם ניתן היה להעריך שיום של קרבונציה בתנאים מואצים הינו שווה ערך ל-200 ימים בתנאים טבעיים. הערכה זו תואמת גם את המגמות שמתקבלות מבדיקות פריזה שבוצעו לאחרונה במדגמי בטון עם אפר פחם מסדרת ניסויים קודמת שבוצעה בממון מנהלת אפר הפחם. תוצאות של פריזה מואצת ופריזה טבעית עד לגיל של שנתיים מוצגות בנספח א'.

עקומי חוזק עבור בטוני הבקרה באשפרות השונות מוצגים בציור 1. בציורעד ציור 11 מוצגים עקומי חוזק – תכולת אפר הפחם עבור הרכבים נתונים של בטונים בתנאי אשפרה שונים.

### 4.2 דיון

מקדמי יעילות שחושבו על סמך התוצאות מוצגים בטבלה 9 ובטבלה 10, עבור חוזק וקרבונציה בהתאמה.

מקדמי היעילות היו נמוכים יחסית ועל כן קשה על בסיסם להשוות את היעילות של מדגמי האפר עם LOI גבוה ונמוך. לכן, כדי לנתח את ההבדלים בין מדגמי האפר הוצגו עקומים של חוזק-תכולת אפר ועקומים של מקדם קרבונציה – תכולת אפר אשר בכל אחד מהם נערכת השוואה בין שני מדגמי האפר, עבור אשפרה נתונה (ציור 12 עד ציור 19 עבור חוזק, וציור עד ציור , עבור מקדם קרבונציה). כדי להרחיב את המסקנות הוצבו על גבי אותם ציורים גם התוצאות של המחקר הקודם אשר בהם נבחנו שני סוגי אפר, בעלי LOI נמוך וגבוה.

בכל ציורים ניתן לראות מגמות כלליות דומות: עבור הרכב נתון של בטון וצמנט, אין הבדל משמעותי בין השפעת שני סוגי האפר על תוספת החוזק או הקטנה במקדם הקרבונציה, דהיינו העקומים של שני סוגי האפר די דומים וההפרש ביניהם קטן, וזאת יחסית לשיפור בתכונה (תוספת חוזק או הקטנה בקרבונציה) יחסית לבטון הבקרה ללא אפר. יש להדגיש שמדגמי האפר היו שונים באקטיביות הפוצולנית שלהם (טבלה), ולמרות זאת, ההבדלים ביניהם בהתנהגות בבטון הנם קטנים. נראה שהיעילות של האפר קצת יותר טובה בתערובות עם תכולת המים הנמוכה יותר של 165 ליטר/מ"ק.

בהשוואה בין סדרת הניסויים הנוכחית והסדרה הקודמת (עבור בטונים בעלי הרכב דומה של תכולת מים של כ- 160 ליטר למ"ק), ניתן לראות שהשיפור עקב תוספת האפר היה משמעותי יותר במחקר הקודם, למרות שתכונות האפר, כפי שבאות לידי ביטוי ב- LOI, במקדם האקטיביות הפוצולני ובדקות הטחינה, היו טובות יותר במחקר הנוכחי (טבלה).



מעניין לציין שמגמות אלה בולטות כאשר האשפרה ברטוב היא ברמה גבוהה (אשפרה E ו - D), וההבדלים בין המשתנים השונים הולכים וקטנים ככל שהאשפרה במים היא לקויה יותר.

מתוך תוצאות אלה ניתן להבחין במספר מגמות:

- עבור הרכב בטון נתון להבדלים באיכויות האפר יש השפעה קטנה יחסית הן על החוזק והן על הקרבונציה, למרות שמדובר במדגמי אפר בעלי מקדם אקטיביות פוצולנית שונה.
- ההשפעה העיקרית של איכות האפר היא בהקטנה בתצרוכת המים במדגמי אפר בעלי LOI נמוך יותר. השפעה זו באה לידי ביטוי בתערובות עם תכולת מים של 185 ליטר/מ"ק אשר בהן נעשה שימוש בריאובילד 1000 אך היא הייתה הרבה יותר קטנה, כמעט זניחה בתערובות עם תכולת מים 160 ליטר/מ"ק אשר שם המוסף היה גלניום 51 (ציור עד ציור ).
- היעילות של האפר במחקר הנוכחי הייתה הרבה יותר נמוכה מזו שבמחקר הקודם, למרות שהאקטיביות הפוצולנית הייתה גבוהה יותר במדגמי האפר שבמחקר הנוכחי (טבלה 11). אין בידינו הסבר להבדל זה, וייתכן שהוא קשור בטיב הצמנט, למרות שבשני המקרים מדובר בצמנט מאותו סוג. סוגיה זו דורשת ליבון מיוחד והתייחסות ראשונית אליה מוצגת בנספח א'.

טבלה 6 : הרכב נומינלי ותכונות הבטון הטרי של התערובות לבדיקת עמידות בחדירת קרבונציה

תכולת מוסף ביחס לצמנט	סומך, מ"מ	תכולת אוויר, %	הרכב נומינלי, ק" למ"יק									מס. יציקה) תכולת אפר	C, W ק"יג למ"יק
			משקל מרחבי	מוסף	אפר פחם	מלאן מודיעים	חול טבעי	עדש	פוליה	צמנט	מים		
0.60	132	2.0	2399	1.64	0	0	723	405	811	274	185	0(1)	185,270
0.60	125	1.3	2393	1.40	0	24	733	406	811	233	185	0(2)	185,230 LOI-L RE
0.30	137	0.9	2399	0.70	31	24	702	407	815	234	185	30(7)	
0.30	128	0.8	2375	0.70	61	24	661	404	809	232	184	60(5)	
0.30	148	0.8	2386	0.70	92	24	629	407	814	234	185	90(6)	
0.20	110	0.8	2393	0.47	123	24	596	409	819	235	186	120(31)	
0.90	118	1.0	2389	1.82	0	43	742	405	810	203	184	0(3)	185,200 LOI-L RE
0.40	121	0.4	2388	0.81	30	24	726	406	812	203	185	30(4)	
0.30	153	1.0	2397	0.61	61	24	695	409	817	204	186	60(8)	
0.20	149	0.9	2379	0.41	24	91	655	407	813	203	185	90(9)	
0.15	130	0.8	2379	0.31	122	24	620	408	815	204	186	120(32)	
0.30	95	1.0	2399	1.76	31	24	702	407	814	234	185	(30)10	185,230 LOI-H RE
0.30	161	0.9	2393	1.76	61	24	665	407	814	234	185	(60)11	
0.60	145	1.1	2376	1.40	91	24	625	405	811	233	185	(90)12	
0.50	102	1.0	2372	1.17	122	24	589	406	812	233	185	(120)33	
0.60	140	1.3	2368	1.21	30	24	719	403	805	201	183	(30)13	
0.60	131	0.8	2386	1.22	61	24	690	407	814	203	185	60(14)	185,200 LOI-H RE
0.60	136	0.8	2386	1.22	92	24	655	408	816	204	186	90(15)	
0.60	121	0.9	2371	1.22	122	24	616	406	813	203	185	120(34)	
1.00	97	2.0	2390	2.69	0	18	744	398	797	269	161	0(16)	
1.20	86	2.1	2403	2.77	0	30	773	401	803	231	163	0(17)	160,230 LOI-L GL
1.10	129	1.7	2396	2.54	30	29	736	402	803	231	163	30(19)	
1.10	149	1.4	2397	2.55	60	29	702	403	806	232	163	60(20)	
1.00	180	1.4	2407	2.33	91	30	670	405	811	233	164	90(21)	
1.00	162	1.9	2380	2.31	121	29	629	402	804	231	163	120(35)	
1.10	97	2.8	2393	2.60	0	38	790	400	800	200	162	0(18)	160,200 LOI-L GL
1.10	110	1.6	2399	2.22	30	29	765	403	805	201	163	30(22)	
1.00	118	1.6	2397	2.02	61	29	730	403	807	202	163	60(23)	
0.90	110	2.1	2385	1.81	90	29	693	402	804	201	163	90(24)	
0.90	120	1.6	2378	1.81	121	29	656	402	804	201	163	120(36)	
1.20	118	1.9	2409	2.79	61	30	705	405	810	233	164	60(41)	160,230 LOI-H GL
1.20	117	1.8	2396	2.79	91	29	666	404	807	232	164	90(42)	
1.00	98	1.9	2393	2.32	121	29	632	404	808	232	164	120(37)	
1.00	83	2.1	2401	2.02	61	29	731	404	808	202	164	60(39)	160,200 LOI-H GL
1.2	103	1.6	2397	2.43	91	29	695	404	809	202	164	90(40)	
1.00	87	2.0	2385	2.02	121	29	658	403	806	202	163	120(38)	

באדום – אפר פחם המאופייין ב-LOI נמוך. בכחול – אפר פחם המאופייין ב-LOI גבוה. סגול – מוסף ריאובילד 2000. ירוק – מוסף גלניום 51.

טבלה 7: חוזק בלחיצה בגילאים שונים, לאחר חשיפה לתנאי אשפחה שונים – סדרת קרבונציה

חוזק בלחיצה (מגפ"ס) בגיל (ימים)																				C, W ק"ג למ"ק	
90				28				7				3				1					(מס. יציקה) תכולת אפר
E	D	C	B	E	D	C	B	E	D	C	B	E	D	C	B	E	D	C	B		
50.1	41.5	38.1	32.8	37.5	40.7	36.6	33.6	26.3	26.3	25.9	27.6	19.0	19.0	18.6	18.6	9.1	9.1	9.1	9.1	0(1)	185,270
39.1	32.5	28.2	26.1	25.7	30.1	26.8	25.9	17.8	17.8	18.0	20.4	12.5	12.5	13.4	13.4	6.2	6.2	6.2	6.2	0(2)	185,230 LOI-L RE
42.3	35.8	33.5	31.7	29.6	32.8	31.2	30.2	20.3	20.3	19.7	21.2	לא נבדק	לא נבדק	14.7	14.7	7.0	7.0	7.0	7.0	30(7)	
47.0	37.3	31.6	29.5	30.8	33.7	30.3	28.2	19.1	19.1	19.2	20.9	14.3	14.3	13.4	13.4	1.8	1.8	1.8	1.8	60(5)	
47.4	38.6	34.8	31.3	31.9	33.9	31.3	28.3	18.5	18.5	19.5	21.8	13.9	13.9	13.5	13.5	6.1	6.1	6.1	6.1	90(6)	
38.8	31.6	27.5	25.1	34.2	38.1	33.2	31.2	19.4	19.4	20.2	22.3	13.8	13.8	13.5	13.5	5.1	5.1	5.1	5.1	120(31)	
32.6	25.7	23.5	21.7	22.6	22.9	21.8	20.6	13.8	13.8	14.1	16.7	10.0	10.0	10.1	10.1	4.6	4.6	4.6	4.6	0(3)	185,200 LOI-L RE
36.2	26.9	21.8	23.1	24.2	24.4	22.1	19.8	13.8	13.8	14.4	15.9	9.9	9.9	9.7	9.7	4.8	4.8	4.8	4.8	30(4)	
41.4	30.8	29.1	25.7	28.6	29.3	27.1	24.4	16.6	16.6	17.5	18.2	לא נבדק	לא נבדק	11.7	11.7	5.8	5.8	5.8	5.8	60(8)	
38.8	31.5	27.3	26.0	24.6	27.6	24.7	24.7	15.1	15.1	15.7	17.3	10.3	10.3	10.7	10.7	4.4	4.4	4.4	4.4	90(9)	
33.3	25.8	24.2	22.6	27.6	29.7	27.9	25.4	15.4	15.4	15.9	17.7	11.5	11.5	11.2	11.2	4.7	4.7	4.7	4.7	120(32)	
41.0	33.3	30.1	29.5	28.4	30.3	27.6	26.6	18.3	18.3	19.2	20.2	13.1	13.1	13.3	13.3	6.7	6.7	6.7	6.7	(30)10	185,230 LOI-H RE
35.7	28.3	25.2	25.6	29.6	32.7	28.8	29.6	18.7	18.7	19.9	21.0	13.8	13.8	13.4	13.4	6.5	6.5	6.5	6.5	(60)11	
29.4	36.7	25.1	25.4	32.9	35.0	31.0	30.0	19.6	19.6	21.4	21.4	13.4	13.4	14.1	14.1	6.4	6.4	6.4	6.4	(90)12	
37.6	31.2	27.3	25.2	33.4	34.8	31.8	28.8	19.8	19.8	20.3	19.9	14.1	14.1	13.8	13.8	6.0	6.0	6.0	6.0	(120)33	
26.2	20.6	18.6	18.3	20.6	23.6	21.4	21.7	13.5	13.5	15.4	16.1	9.6	9.6	10.2	10.2	4.2	4.2	4.2	4.2	(30)13	
34.8	27.1	24.9	23.1	23.0	25.9	23.2	22.5	13.5	13.5	14.6	15.5	9.6	9.6	10.1	10.1	4.6	4.6	4.6	4.6	60(14)	185,200 LOI-H RE
38.2	29.9	27.2	25.8	25.9	27.2	25.6	24.3	15.3	15.3	15.7	17.3	10.5	10.5	10.9	10.9	5.0	5.0	5.0	5.0	90(15)	
31.2	23.4	21.8	20.1	25.0	24.8	23.7	20.9	15.0	15.0	14.2	15.2	9.7	9.7	10.1	10.1	5.5	5.5	5.5	5.5	120(34)	
57.1	46.5	41.5	39.8	40.9	45.1	41.9	38.9	29.0	29.0	29.5	30.1	20.7	20.7	22.1	22.1	9.8	9.8	9.8	9.8	0(16)	
44.2	45.2	34.5	32.2	31.2	30.5	30.8	30.2	22.5	22.5	23.8	24.4	15.8	15.8	16.3	16.3	7.1	7.1	7.1	7.1	0(17)	
49.3	41.9	36.7	34.6	35.6	37.0	32.0	29.4	25.4	25.4	24.7	25.1	16.7	16.7	18.1	18.1	8.4	8.4	8.4	8.4	30(19)	
54.8	45.6	38.1	37.1	40.1	39.6	36.9	34.9	24.1	24.1	26.8	26.8	17.1	17.1	17.8	17.8	8.9	8.9	8.9	8.9	60(20)	
60.1	53.2	42.2	40.8	44.9	46.3	39.7	38.9	27.2	27.2	27.3	28.2	18.7	18.7	18.3	18.3	8.4	8.4	8.4	8.4	90(21)	
54.0	43.3	39.8	37.6	41.4	38.0	35.1	34.4	22.9	22.9	22.6	24.7	16.0	16.0	18.3	18.3	10.4	10.4	10.4	10.4	120(35)	
38.6	37.2	29.3	29.7	25.3	לא נבדק	27.0	24.2	17.5	17.5	20.5	20.4	12.5	12.5	12.6	12.6	5.7	5.7	5.7	5.7	0(18)	160,200 LOI-L GL
32.6	41.7	34.2	29.8	27.6	30.5	27.4	27.3	17.8	17.8	19.7	20.3	13.6	13.6	13.0	13.0	5.9	5.9	5.9	5.9	30(22)	
47.5	40.5	32.8	31.7	31.7	34.7	30.2	29.6	20.3	20.3	20.5	22.2	13.6	13.6	13.4	13.4	5.9	5.9	5.9	5.9	60(23)	
43.8	37.3	30.5	27.1	31.7	32.2	28.8	28.8	17.1	17.1	18.2	18.9	11.9	11.9	11.4	11.4	4.3	4.3	4.3	4.3	90(24)	
46.7	38.5	34.1	32.1	33.5	29.2	28.4	18.3	18.3	18.5	22.9	12.9	12.9	14.5	14.5	8.5	8.5	8.5	8.5	120(36)		
52.5	42.4	38.8	38.1	37.2	35.9	32.3	29.7	23.8	23.8	20.7	24.7	16.7	16.7	16.4	16.4	8.1	8.1	8.1	8.1	60(41)	160,230 LOI-H GL
54.2	45.8	39.9	37.8	39.2	40.3	35.4	33.4	22.2	22.2	23.0	24.9	18.1	18.1	17.1	17.1	8.4	8.4	8.4	8.4	90(42)	
55.1	46.1	40.8	40.2	40.9	39.5	36.4	34.0	24.0	24.0	21.6	25.0	18.1	18.1	17.5	17.5	9.8	9.8	9.8	9.8	120(37)	
44.0	36.5	32.1	28.8	31.1	31.9	28.7	27.1	18.6	18.6	18.4	19.9	13.1	13.1	12.7	12.7	6.8	6.8	6.8	6.8	60(39)	
48.5	43.7	33.0	32.3	35.5	36.0	32.0	29.6	22.3	22.3	19.9	21.3	15.1	15.1	13.6	13.6	7.4	7.4	7.4	7.4	90(40)	
47.3	38.9	34.7	33.3	34.5	33.9	30.6	29.0	19.4	19.4	18.3	21.1	14.2	14.2	13.6	13.6	7.6	7.6	7.6	7.6	120(38)	

טבלה 8: מקדמי קרבונציה ותחשיבי מחזור חיים על-סמך נתוני קרבונציה מואצת

E				D				C				B				(מס. יציקה) תכולת אמר	C,W ק"ג למ"ק
LC	n	k	R <sup>2</sup>	LC	n	k	R <sup>2</sup>	LC	n	k	R <sup>2</sup>	LC	n	k	R <sup>2</sup>		
37	2.0	3.66	0.93	25	2.1	4.85	0.99	20	2.4	6.74	0.98	16	2.1	6.05	0.97	0(1)	185,270
20	2.1	5.44	0.98	12	2.2	7.41	0.99	9	2.2	8.62	0.99	7	2.2	9.19	0.99	0(2)	180,230 LOI-L RE
24	1.8	3.66	0.99	13	2.1	6.65	0.98	10	1.9	6.64	1.00	9	2.1	7.76	0.98	30(7)	
25	1.8	3.57	0.99	13	1.8	5.10	0.99	9	2.0	7.45	1.00	8	2.0	7.80	0.96	60(5)	
28	1.9	3.80	0.98	19	2.1	5.56	0.94	9	1.8	6.24	0.98	8	2.2	8.93	0.99	90(6)	
33	1.8	3.08	0.99	16	1.9	5.09	0.97	14	2.0	6.04	0.98	14	2.4	7.85	0.99	120(31)	
12	2.0	6.54	0.96	8	2.0	8.03	0.98	6	2.0	8.98	0.99	6	2.1	9.67	0.99	0(3)	185,200 LOI-L RE
16	1.9	5.04	0.99	8	2.2	8.66	0.99	6	1.9	8.71	0.97	6	2.2	10.15	0.98	30(4)	
20	1.8	4.12	1.00	11	2.0	6.62	0.99	8	2.0	7.84	0.99	6	2.0	8.85	0.97	60(8)	
7	1.9	4.54	0.95	10	2.2	8.05	0.99	6	1.9	8.31	0.98	7	2.0	8.61	0.94	90(9)	
25	2.1	4.90	0.96	16	1.6	3.59	0.93	9	2.2	8.60	0.99	8	2.4	10.08	0.99	120(32)	
19	1.7	3.73	0.98	12	1.8	5.44	1.00	9	1.8	6.15	1.00	8	1.9	7.12	0.99	(30)10	185,230 LOI-H RE
27	1.8	3.42	0.99	13	1.9	5.59	0.99	11	2.1	7.20	0.99	9	2.0	7.36	1.00	(60)11	
29	1.8	3.34	0.97	15	2.2	6.59	0.99	18	2.5	7.43	0.98	8	2.4	9.75	1.00	(90)12	
39	1.6	2.10	0.98	17	1.9	4.92	0.99	8	1.8	6.55	0.99	8	1.9	7.17	1.00	(120)33	
17	2.1	5.86	0.98	8	2.3	9.46	0.99	12	2.2	10.46	1.00	12	2.5	12.05	1.00	(30)13	185,200 LOI-H RE
17	1.9	4.87	0.98	8	1.9	7.12	1.00	7	1.7	7.00	0.99	6	2.1	9.97	0.99	60(14)	
20	2.0	4.96	0.99	9	2.0	7.56	0.99	6	1.7	7.11	1.00	6	1.8	7.96	0.98	90(15)	
18	1.9	4.79	0.98	6	1.7	7.28	0.98	6	2.0	9.22	1.00	5	2.4	12.02	0.98	120(34)	
59	1.7	1.91	0.98	27	1.8	3.44	0.94	24	1.6	2.85	0.98	22	2.1	5.17	0.99	0(16)	160,270
31	1.6	2.43	0.98	22	1.6	2.94	0.98	11	2.0	6.70	0.98	12	1.6	4.31	0.82	0(17)	160,200 LOI-L GL
52	2.4	4.50	0.83	25	2.1	4.84	0.98	15	2.0	5.68	0.99	13	2.1	6.70	0.98	30(19)	
40	2.0	3.53	0.97	23	2.2	5.44	0.98	16	2.1	5.96	0.99	13	2.2	7.09	0.98	60(20)	
68	2.3	3.70	0.96	30	2.1	4.44	0.98	20	2.3	6.30	0.99	15	2.1	6.24	0.98	90(21)	
60	2.0	2.87	0.77	27	2.0	4.24	0.97	17	2.1	5.88	0.97	12	2.0	6.46	0.99	120(35)	
16	1.6	3.70	0.73	19	2.1	5.49	0.96	6	1.6	6.65	0.98	6	2.0	8.97	0.97	0(18)	160,200 LOI-L GL
18	1.8	4.30	0.99	11	2.0	6.80	0.98	6	1.8	7.70	0.96	6	2.0	8.79	0.99	30(22)	
25	1.8	3.58	0.97	15	1.9	5.32	0.98	10	1.9	6.50	0.97	8	2.2	8.86	0.98	60(23)	
25	1.7	3.17	0.95	10	1.7	5.56	0.95	9	1.8	6.22	0.97	8	2.2	8.77	1.00	90(24)	
24	1.6	2.83	0.99	14	2.0	5.88	1.00	10	1.9	6.55	0.97	8	2.0	7.73	1.00	120(36)	
54	2.1	3.36	0.83	22	2.1	5.13	0.98	15	1.9	5.33	0.96	14	2.1	6.42	0.95	60(41)	160,230 LOI-H GL
41	1.6	2.18	0.96	25	2.1	4.91	0.96	17	1.9	4.87	0.98	15	2.1	6.26	0.99	90(42)	
36	1.7	2.38	0.95	25	2.0	4.45	0.97	15	1.9	5.21	0.99	13	1.9	5.78	0.99	120(37)	
28	1.7	2.97	0.98	15	1.8	4.86	0.99	10	1.8	6.14	0.99	7	1.7	6.56	0.99	60(39)	160,200 LOI-H GL
33	1.6	2.31	0.97	19	1.9	4.66	0.98	13	1.8	5.26	1.00	9	1.8	6.26	0.98	90(40)	
35	1.7	2.6	0.98	16	2.0	5.56	0.99	11	1.8	5.78	0.99	8	1.9	7.21	1.00	120(38)	

טבלה 9: מקדמי יעילות (K strength factor) של תערובות בטון אם אפר פחם משני סוגים (6% ו-1% LOI), בתלות בתכולת הצמנט ובתנאי האשפורה, בגיל 28 ו-90 ימים. החוזק בלחיצה הוא מסדרת תערובות הקרבונציה

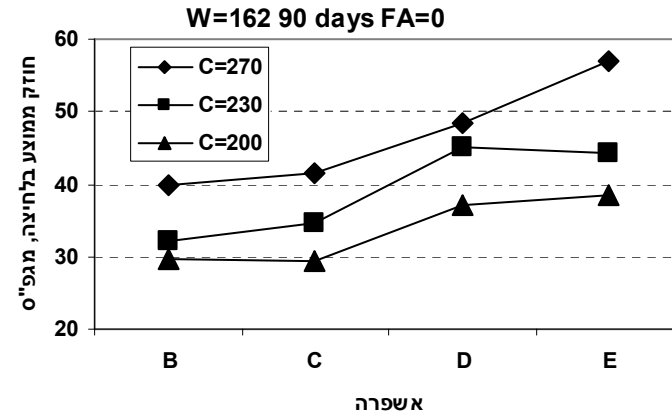
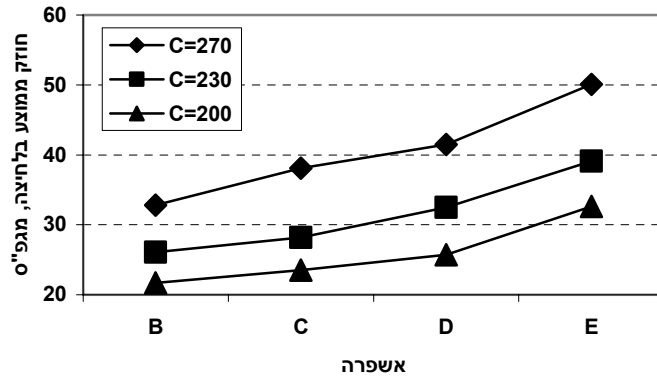
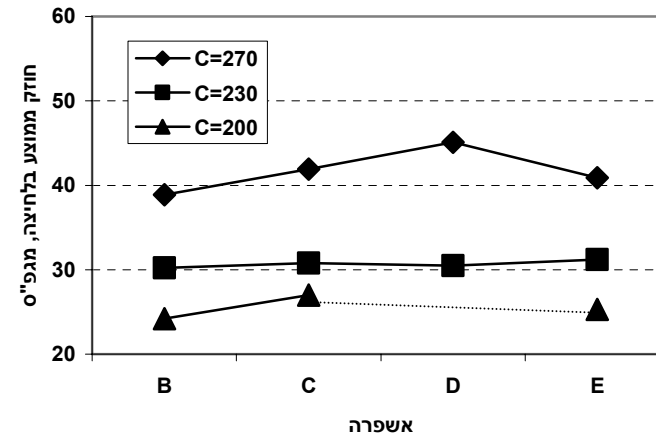
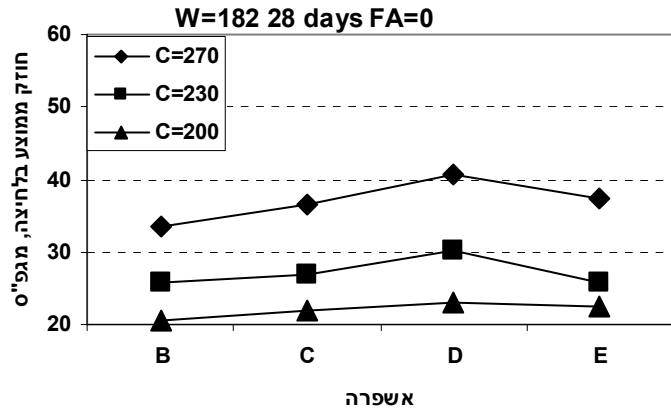
מקדמי יעילות לחוזק בתנאי אשפורה:																תכולת צמנט, ק"ג למ"ק	ייחוס, ללא אפר	עם אפר	
E				D				C				B							תכולת מים, ק"ג למ"ק
1% LOI		6% LOI		1% LOI		6% LOI		1% LOI		6% LOI		1% LOI		6% LOI					
90 ימים	28 ימים	90 ימים	28 ימים	90 ימים	28 ימים	90 ימים	28 ימים	90 ימים	28 ימים	90 ימים	28 ימים	90 ימים	28 ימים	90 ימים	28 ימים				
"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	180	230	270	
0.56	"0.0"	"0.0"	0.33	0.63	"0.0"	"0.0"	"0.0"	0.48	"0.0"	"0.0"	"0.0"	0.50	"0.0"	0.35	"0.0"	160			
0.3-0.6	0.3-0.8	"0.0"	0.35	"0.0"	0.25	"0.0"	"0.0"	0.4-0.6	0.3-0.5	"0.0"	"0.0"	0.33	"0.0"	0.33	"0.0"	180	200	230	
0.56	0.3-0.7	0.50	0.33	"0.0"	0.25	"0.0"	0.56	0.25	0.3-0.5	"0.0"	0.3-0.4	0.26	"0.0"	0.33	0.33	160			

טבלה 10: מקדמי יעילות (K life cycle factor) של תערובות בטון אם אפר פחם משני סוגים (6% ו-1% LOI), בתלות בתכולת הצמנט ובתנאי האשפורה, (עבור n מחושב ו-n=2.5).

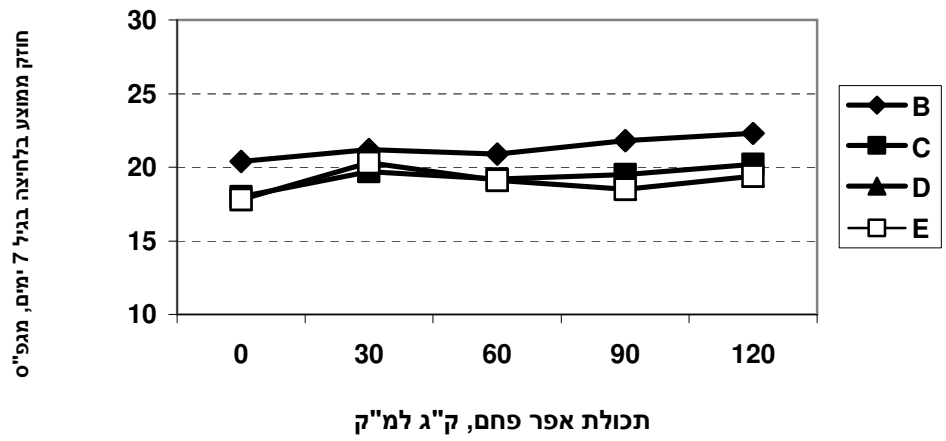
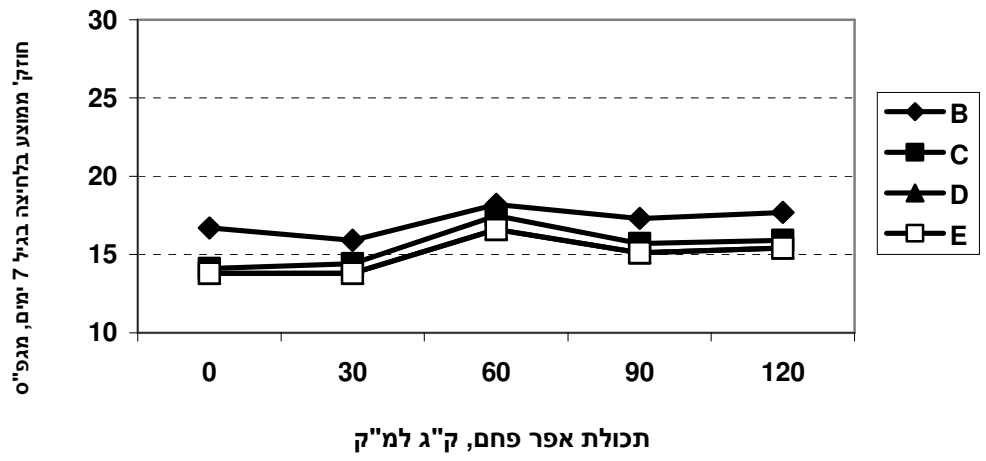
מקדמי יעילות - מחזור חיים - קרבונציה מואצת:																תכולת צמנט, ק"ג למ"ק	ייחוס, ללא אפר	עם אפר	
E				D				C				B							תכולת מים, ק"ג למ"ק
1% LOI		6% LOI		1% LOI		6% LOI		1% LOI		6% LOI		1% LOI		6% LOI					
n מחושב	n=2.5	n מחושב	n=2.5	n מחושב	n=2.5	n מחושב	n=2.5	n מחושב	n=2.5	n מחושב	n=2.5	n מחושב	n=2.5	n מחושב	n=2.5				
"0.0"	"0.0"	0.36	0.35	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	180	230	270	
"0.0"	0.50	"0.0"	"0.0"	"0.0"	0.5-0.3	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	160			
0.63	0.50	0.36	0.33	0.30	0.30	"0.0"	"0.0"	0.25	0.25	"0.0"	"0.0"	0.25	0.33	"0.0"	"0.0"	180	200	230	
0.30	0.30	0.45-0.3	0.4-0.3	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	0.25	"0.0"	0.4-0.3	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	160			

טבלה 12 : השוואה בין הרכב אפרי הפחם בשני המחקרים

מחקר קודם		מחקר נוכחי		תכונה
7.5	4.1	6.12	1.42	LOI
0.77	0.83	0.913	0.905	מקדם אקטיביות פוצולני
4850	3600	5491	4424	דקות

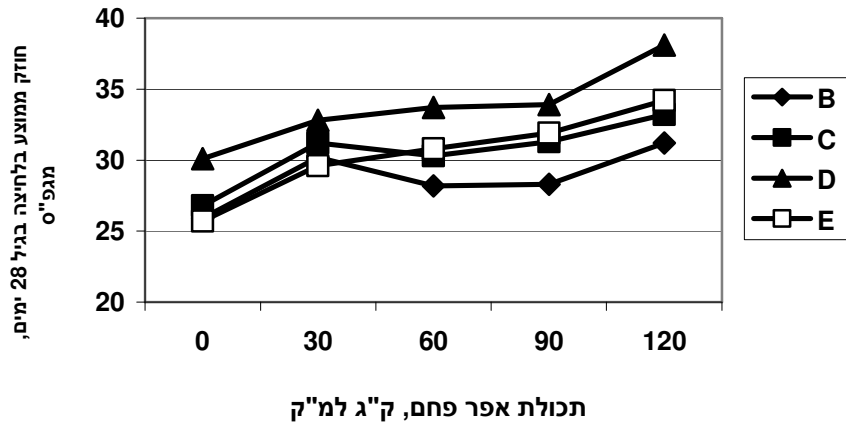
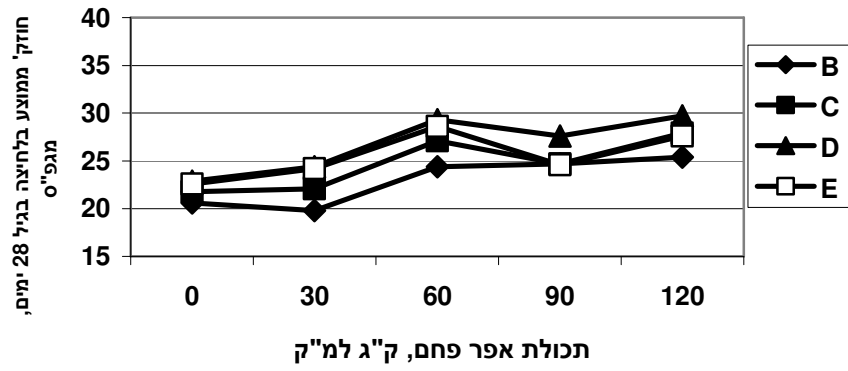


ציור 1: חוזק ממוצע בלחיצה בתלות בתנאי האשפורה: תערובות ללא אפר בגיל 28 ו-90 ימים, עם תכולות שונות של מים

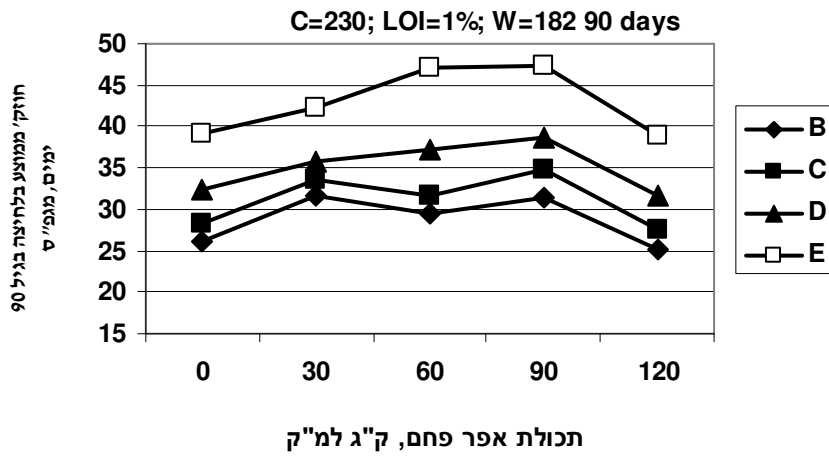
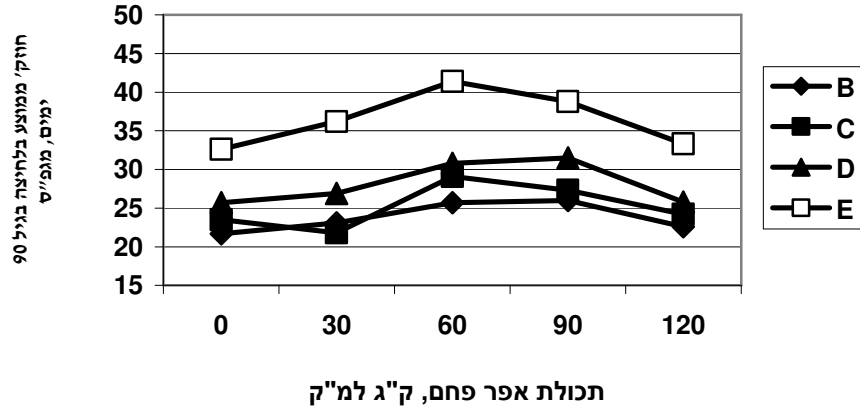


ציור 2: חוזק בלחיצה בתלות בתכולת אפר פחם עם LOI נמוך בתכולת מים של 180 ליטר למ"ק בגיל 7 ימים

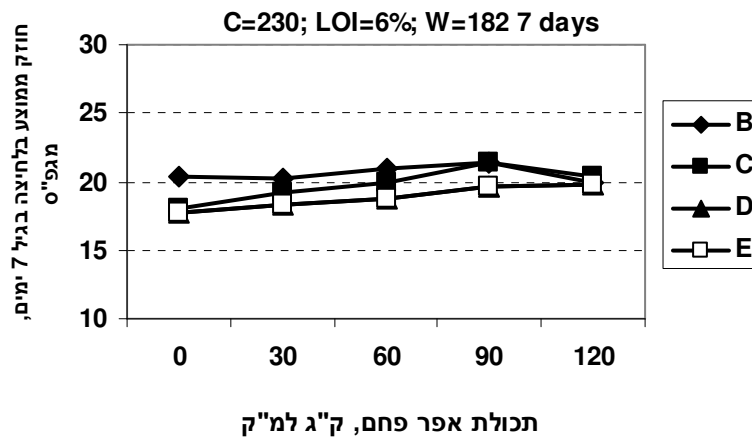
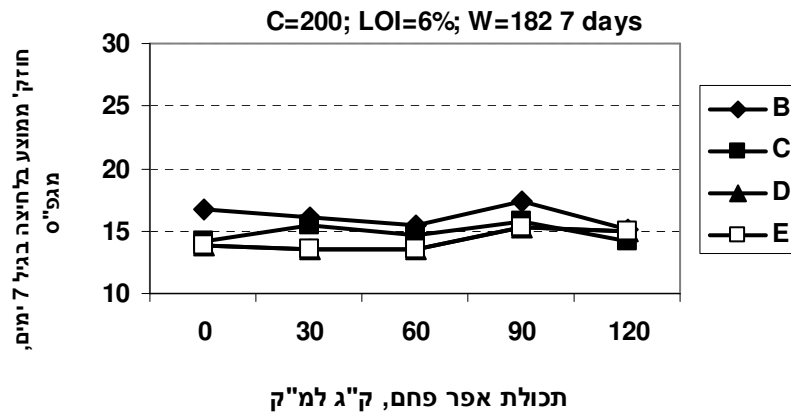




**ציור 2:** חוזק בלחיצה בתלות בתכולת אפר פחם עם LOI נמוך בתכולת מים של 180 ליטר למ"ק בגיל 28 ימים

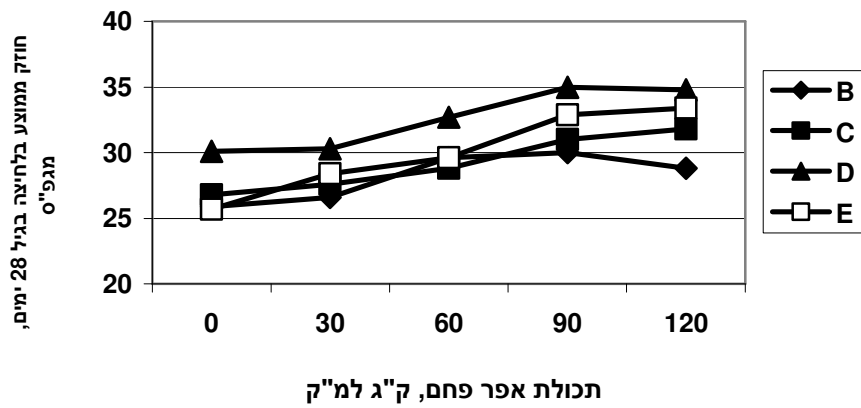
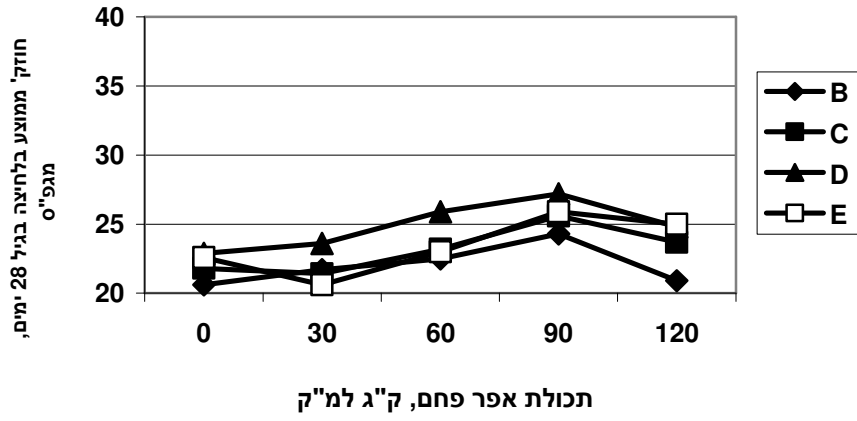


ציור 3 : חוזק בלחיצה בתלות בתכולת אפר פחם עם LOI נמוך בתכולת מים של 180 ליטר למ"ק בגיל 90 ימים

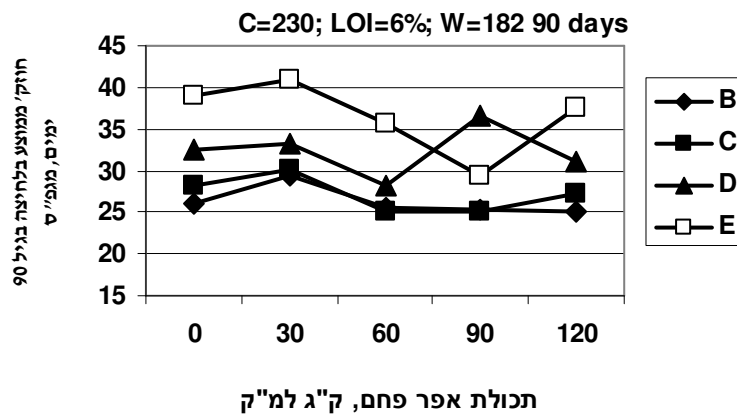
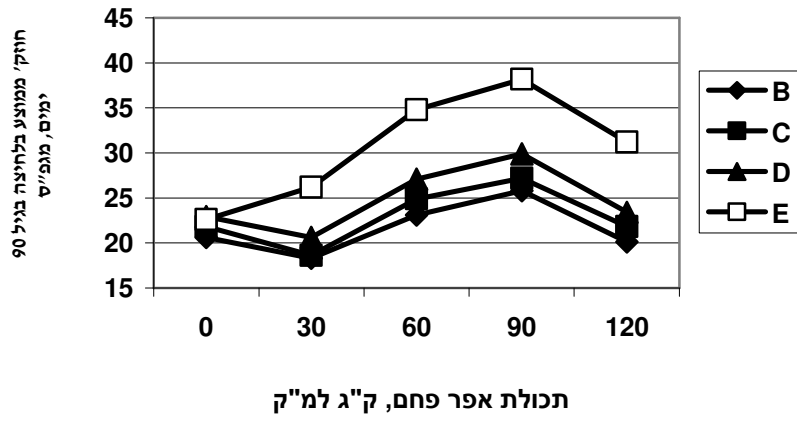


ציור 4: חוזק בלחיצה בתלות בתכולת אפר פחם עם LOI גבוה בתכולת מים של 180 ליטר למ"ק בגיל 7 ימים

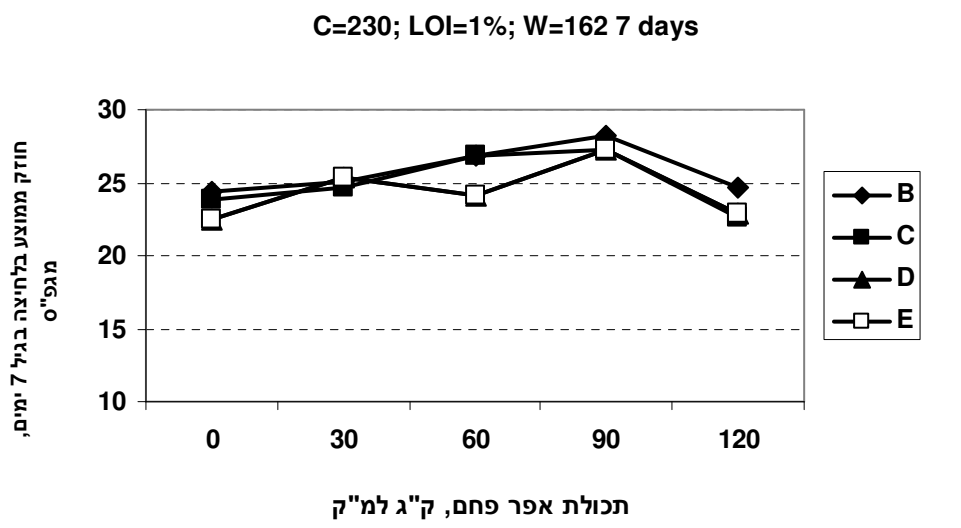
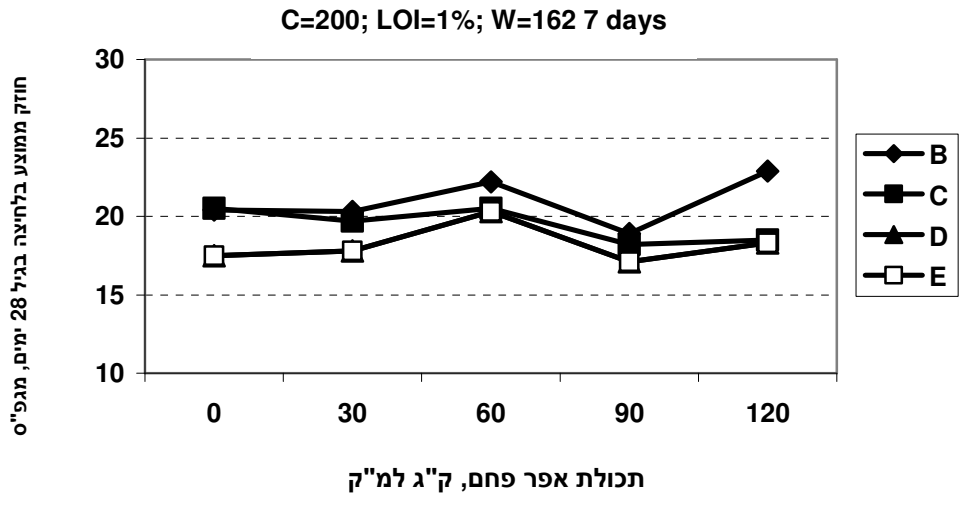
C=200; LOI=6%; W=182 28 days



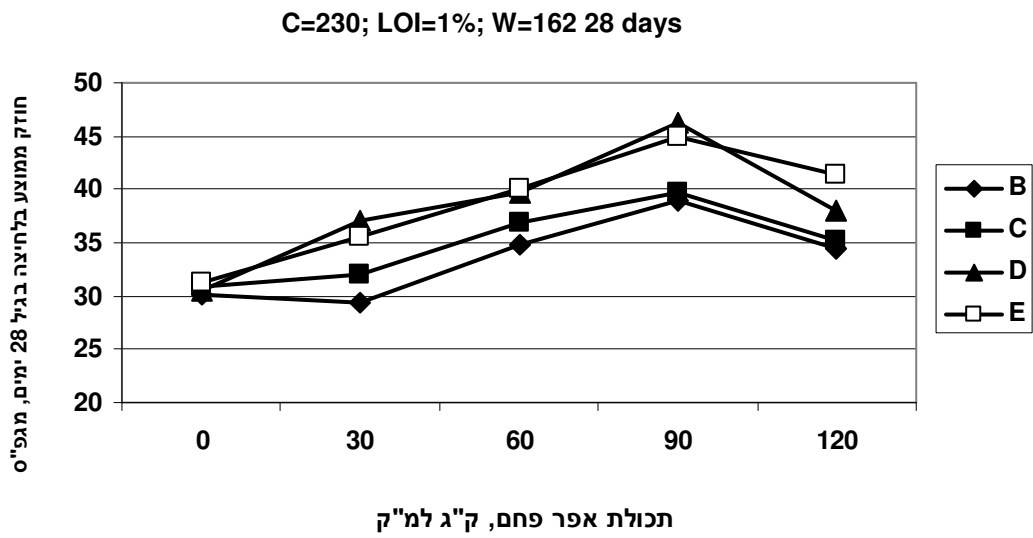
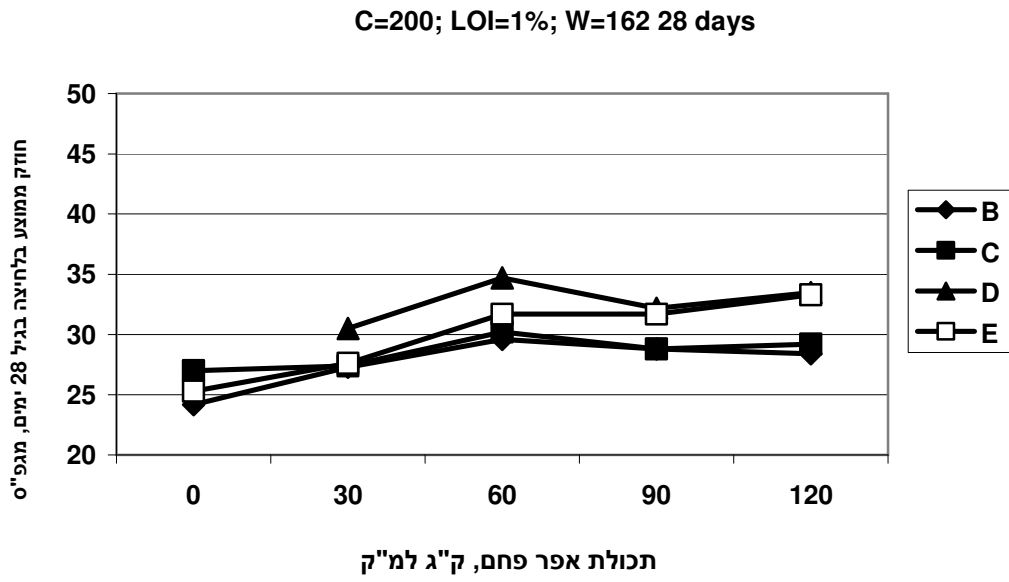
ציור 5 : חוזק בלחיצה בתלות בתכולת אפר פחם עם LOI גבוה בתכולת מים של 180 ליטר למ"ק בגיל 28 ימים



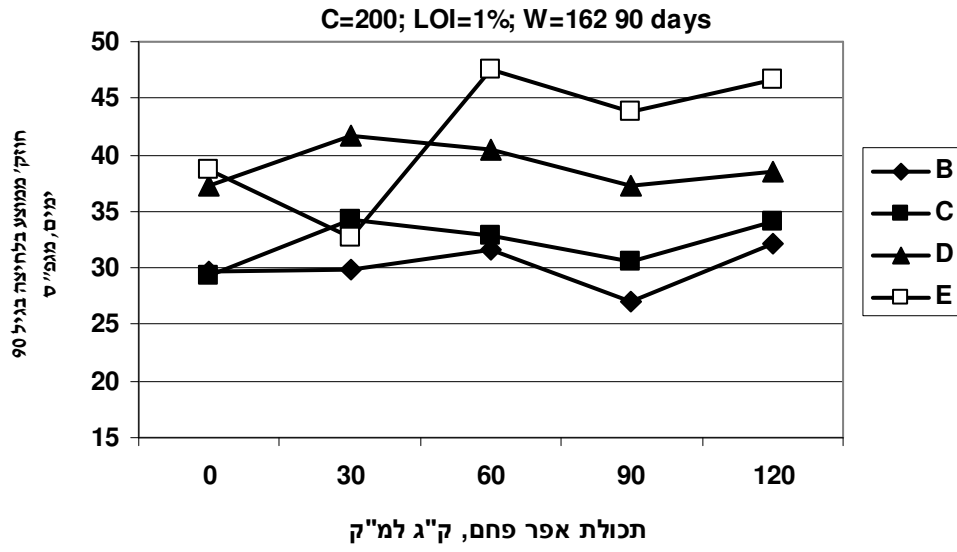
ציור 6 : חוזק בלחיצה בתלות בתכולת אפר פחם עם LOI גבוה בתכולת מים של 180 ליטר למ"ק בגיל 90 ימים



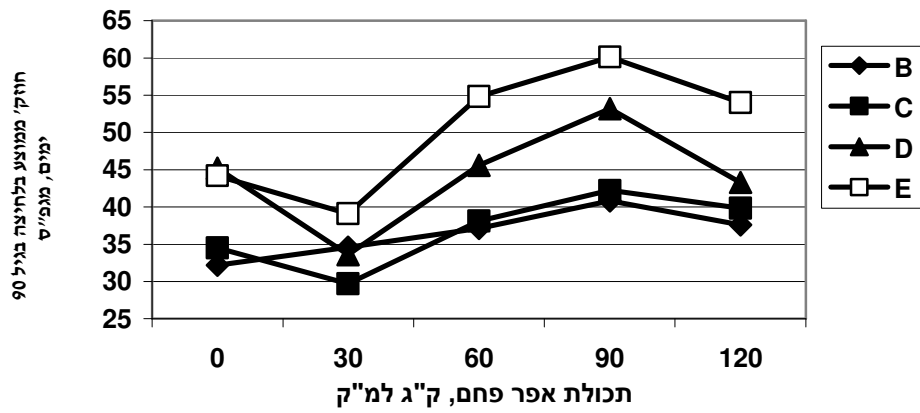
ציור 7: חוזק בלחיצה בתלות בתכולת אפר פחם עם LOI נמוך בתכולת מים של 160 ליטר למ"ק בגיל 7 ימים



**ציור 9:** חוזק בלחיצה בתלות בתכולת אפר פחם עם LOI נמוך בתכולת מים של 160 ליטר למ"ק בגיל 28 ימים

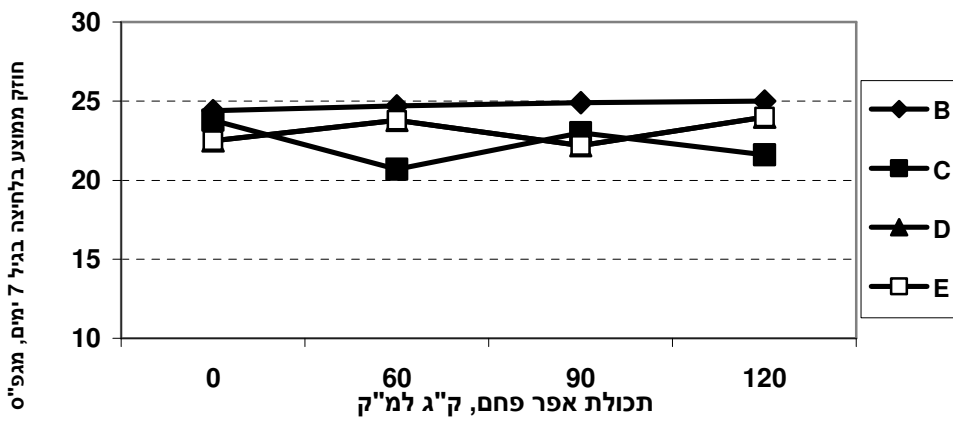
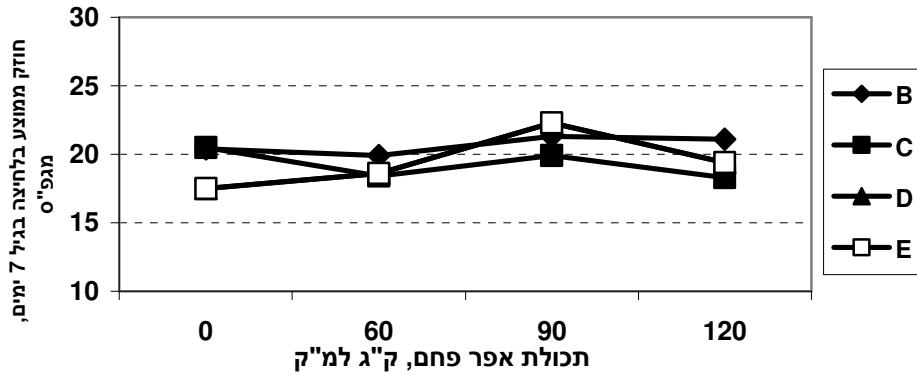


**C=230; LOI=1%; W=162 90 days**

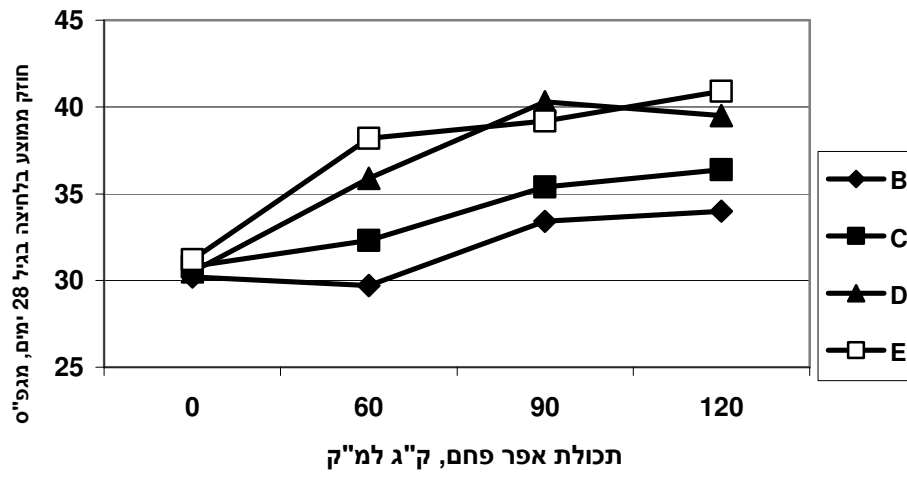
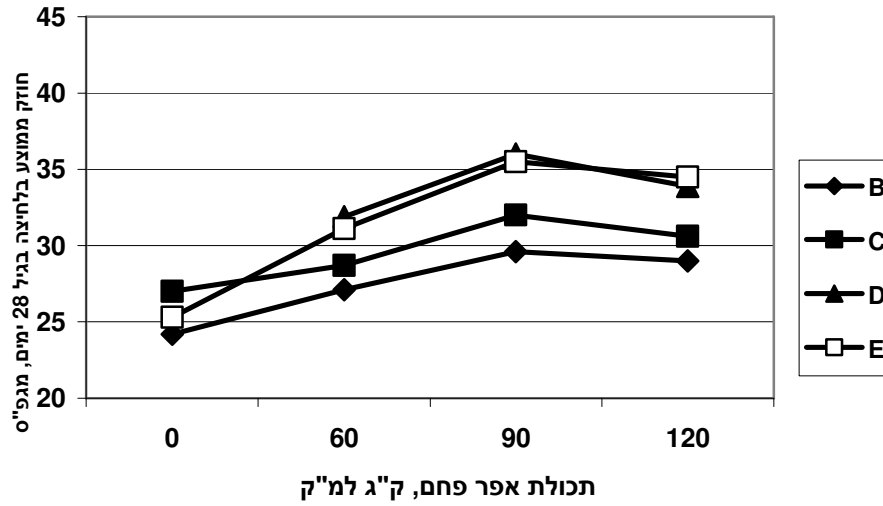


ציור 8 : חוזק בלחיצה בתלות בתכולת אפר פחם עם LOI נמוך בתכולת מים של 160 ליטר למ"ק בגיל 90 ימים

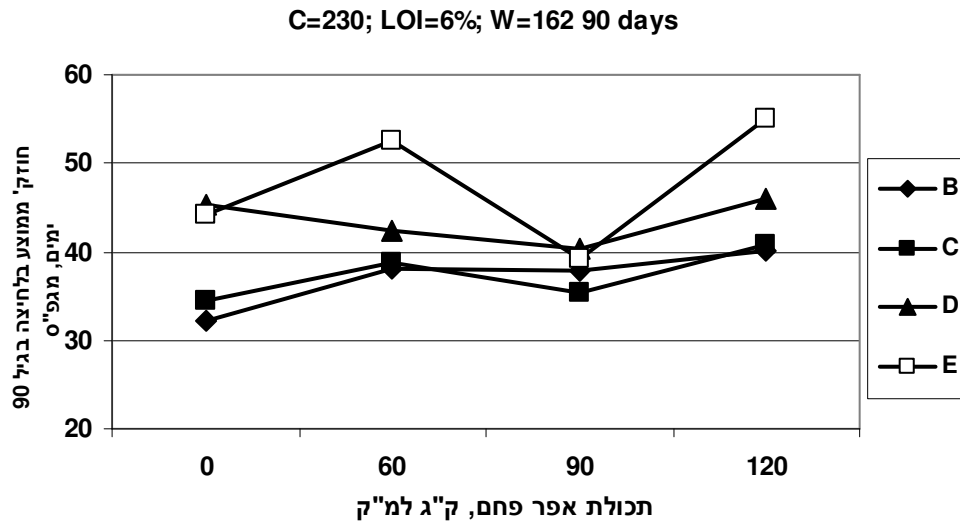
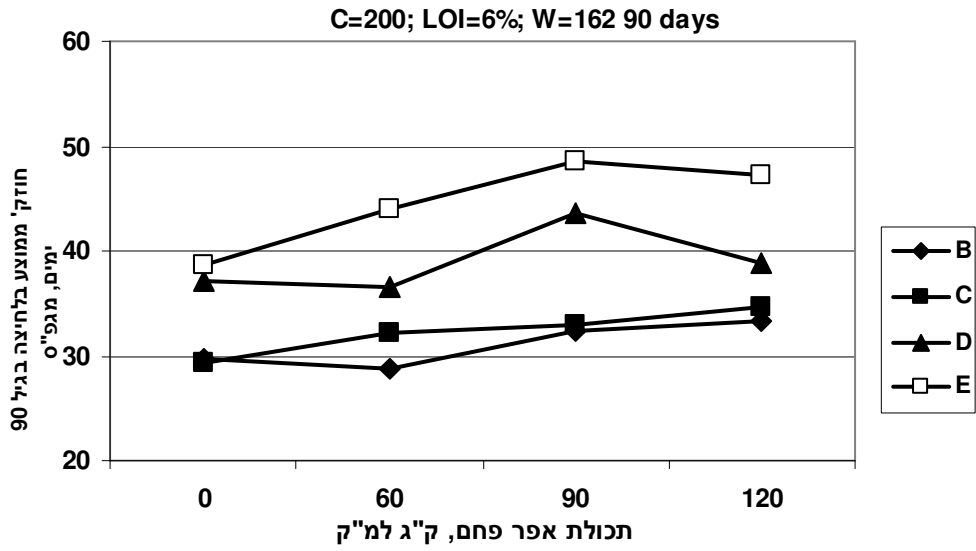




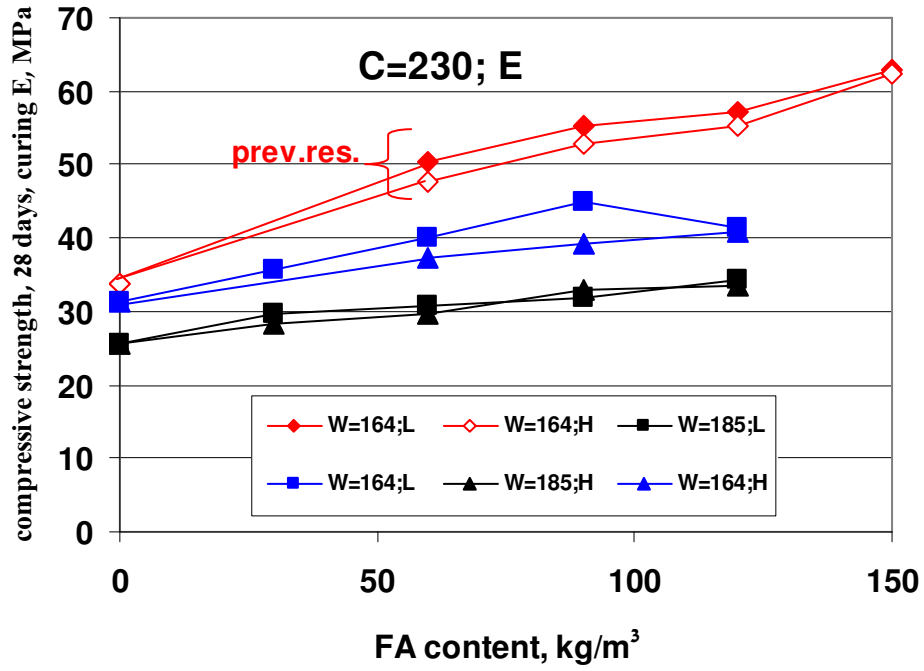
ציור 9: חוזק בלחיצה בתלות בתכולת אפר פחם עם LOI גבוה בתכולת מים של 160 ליטר למ"ק בגיל 7 ימים



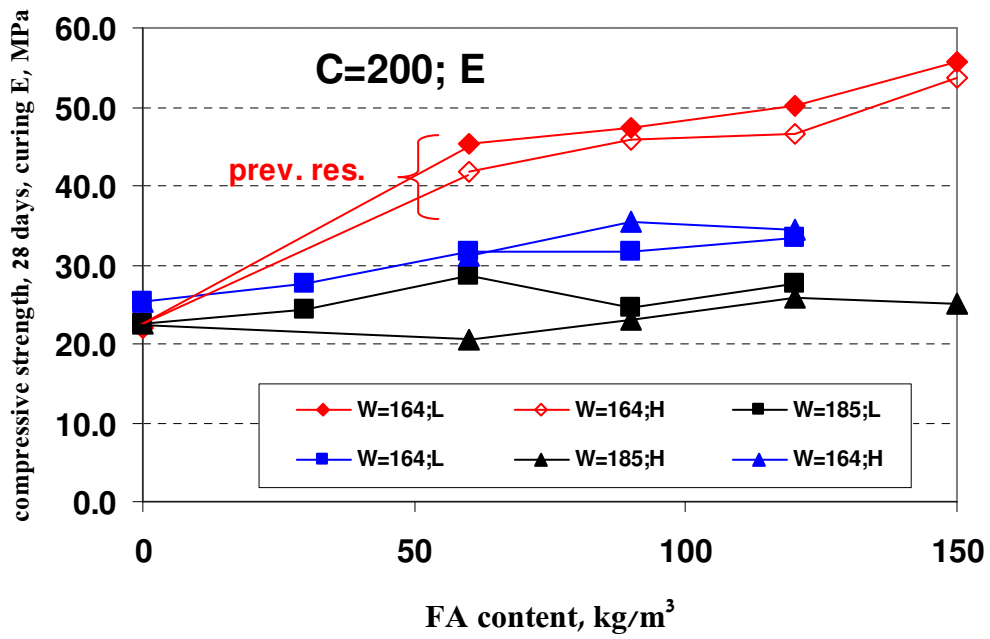
ציור 10: חוזק בלחיצה בתלות בתכולת אפר פחם עם LOI גבוה בתכולת מים של 160 ליטר למ"ק בגיל 28 ימים



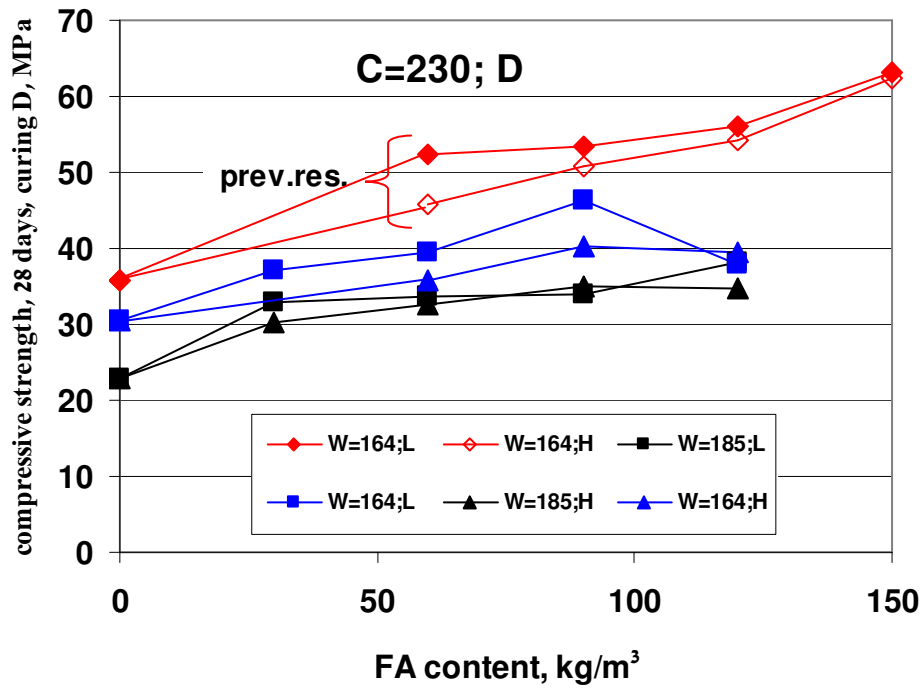
**ציור 11:** חוזק בלחיצה בתלות בתכולת אפר פחם עם LOI גבוהה בתכולת מים של 160 ליטר למ"ק בגיל 90 ימים



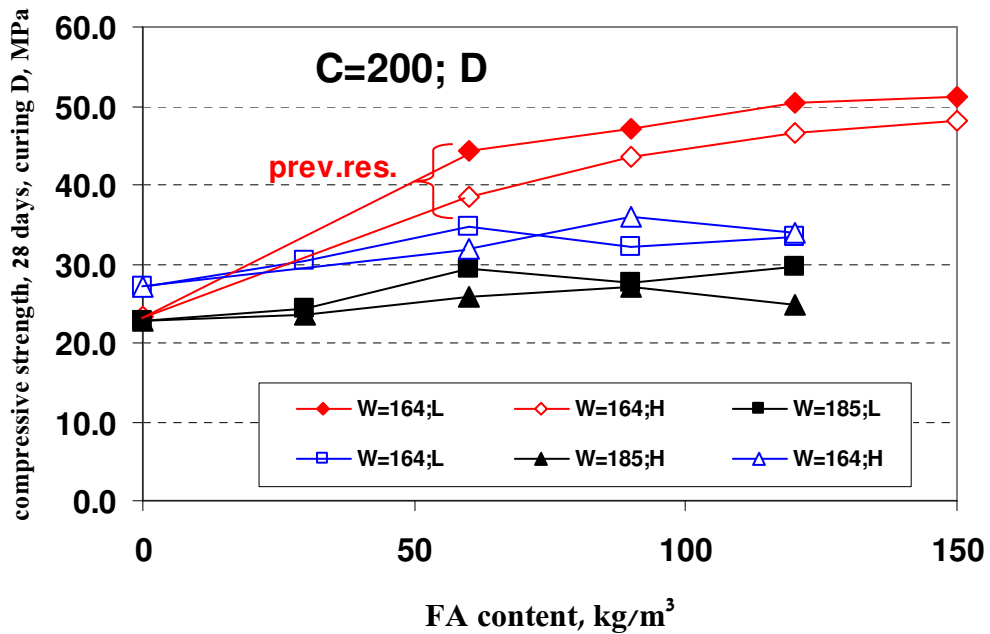
ציור 12 : חוזק בלחיצה בתלות בתכולת האפר : תכולת צמנט 230 ק"ג למ"ק ואשפרה E



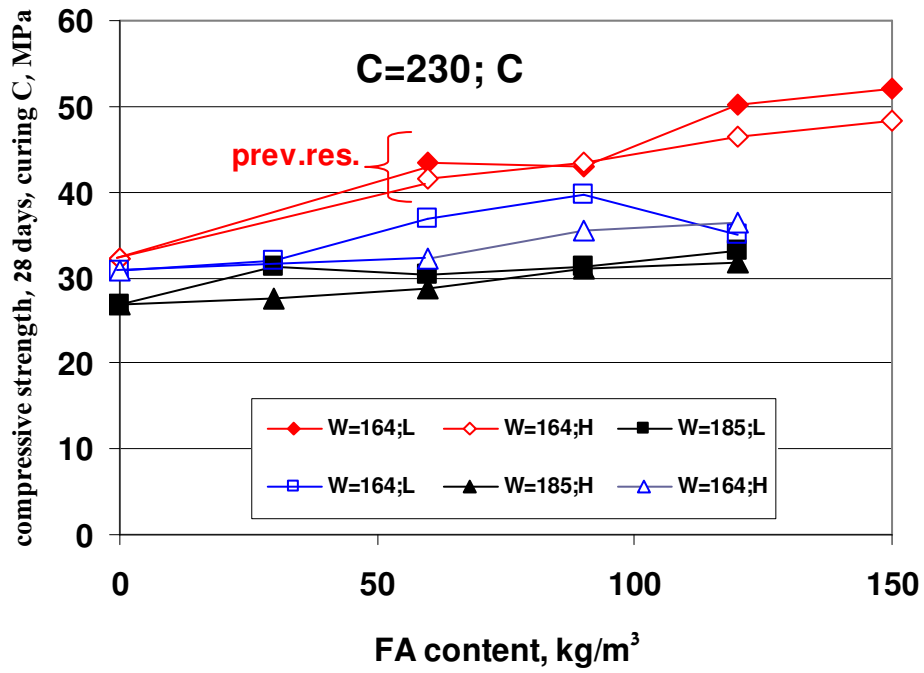
ציור 13 : חוזק בלחיצה בתלות בתכולת האפר : תכולת צמנט 200 ק"ג למ"ק ואשפרה E



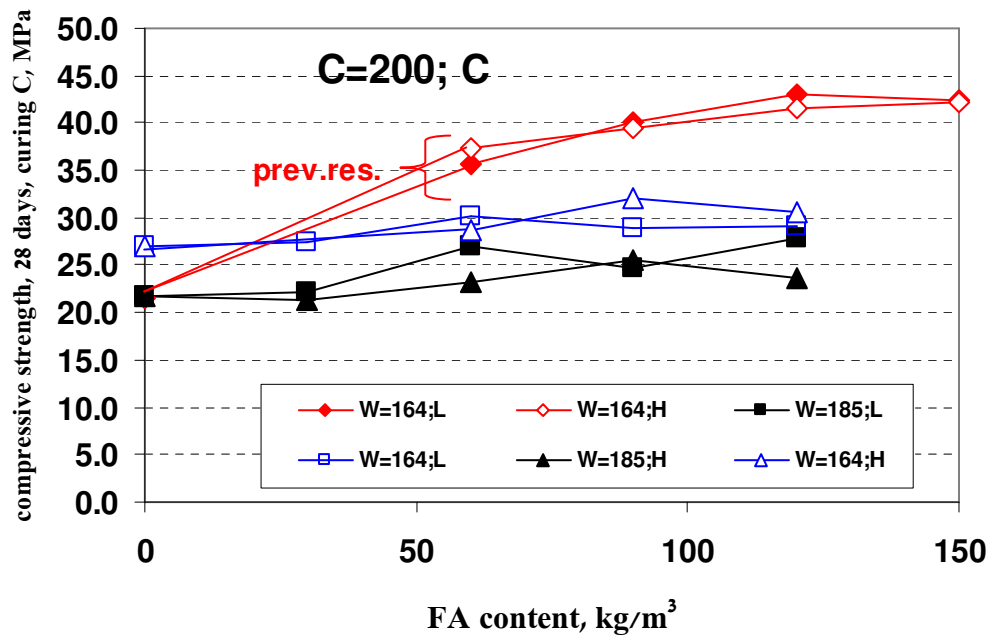
ציור 14 : חוזק בלחיצה בתלות בתכולת האפר : תכולת צמנט 230 ק"ג למ"ק ואשפרה D



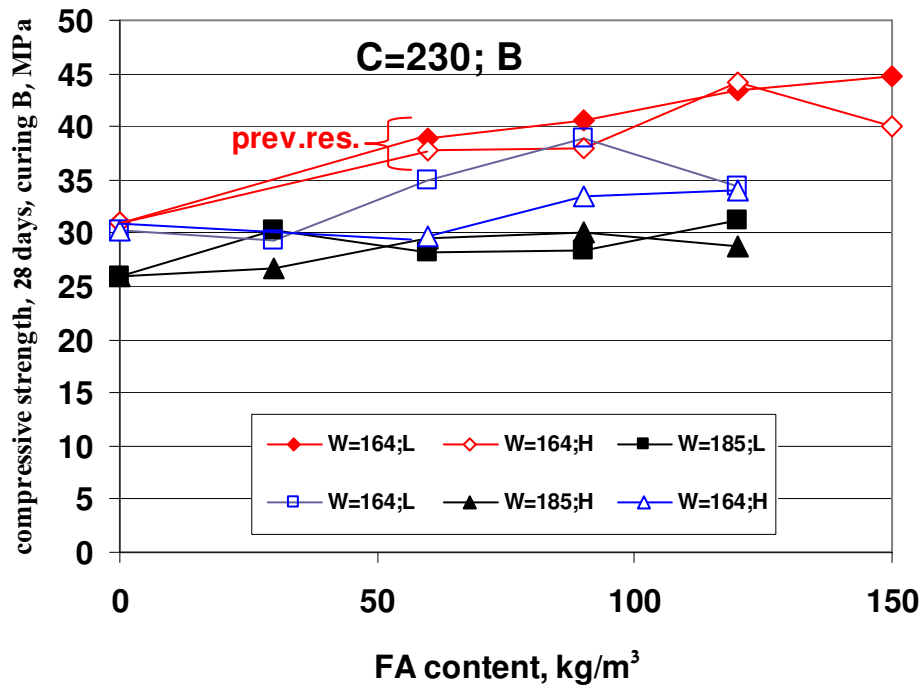
ציור 15 : חוזק בלחיצה בתלות בתכולת האפר : תכולת צמנט 200 ק"ג למ"ק ואשפרה D



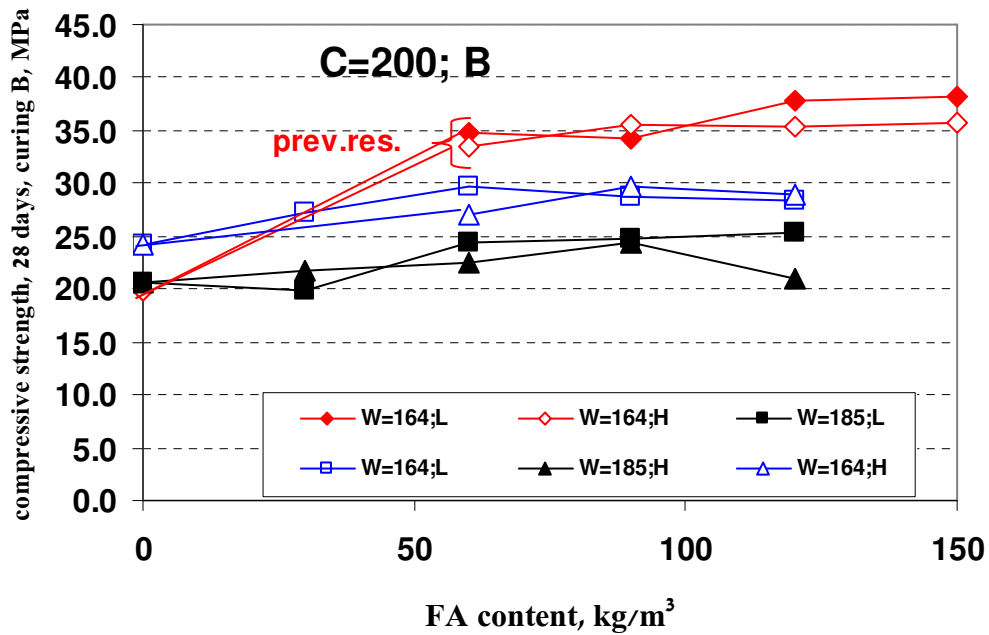
ציור 16: בלחיצה בתלות בתכולת האפר: תכולת צמנט 230 ק"ג למ"ק ואשפרה C



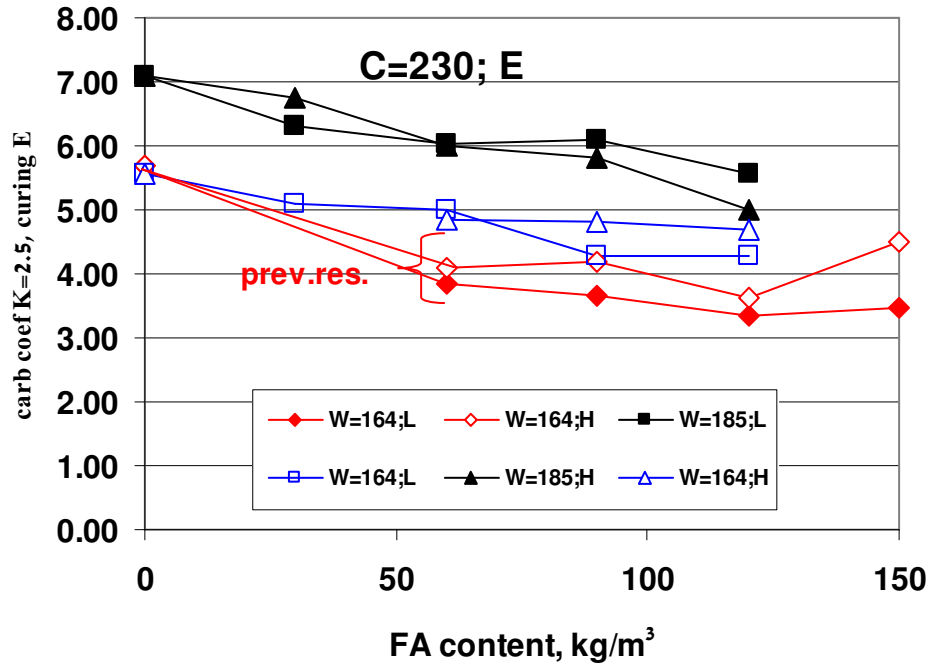
ציור 17: בלחיצה בתלות בתכולת האפר: תכולת צמנט 200 ק"ג למ"ק ואשפרה C



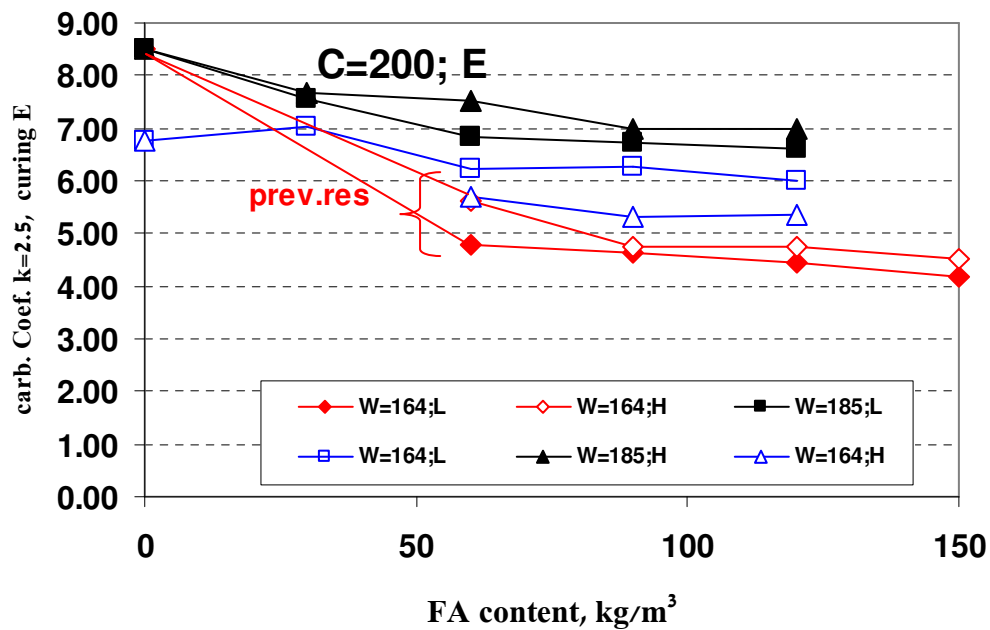
ציור 18: בלחיצה בתלות בתכולת האפר: תכולת צמנט 230 ק"ג למ"ק ואשפרה B



ציור 19: בלחיצה בתלות בתכולת האפר: תכולת צמנט 200 ק"ג למ"ק ואשפרה B

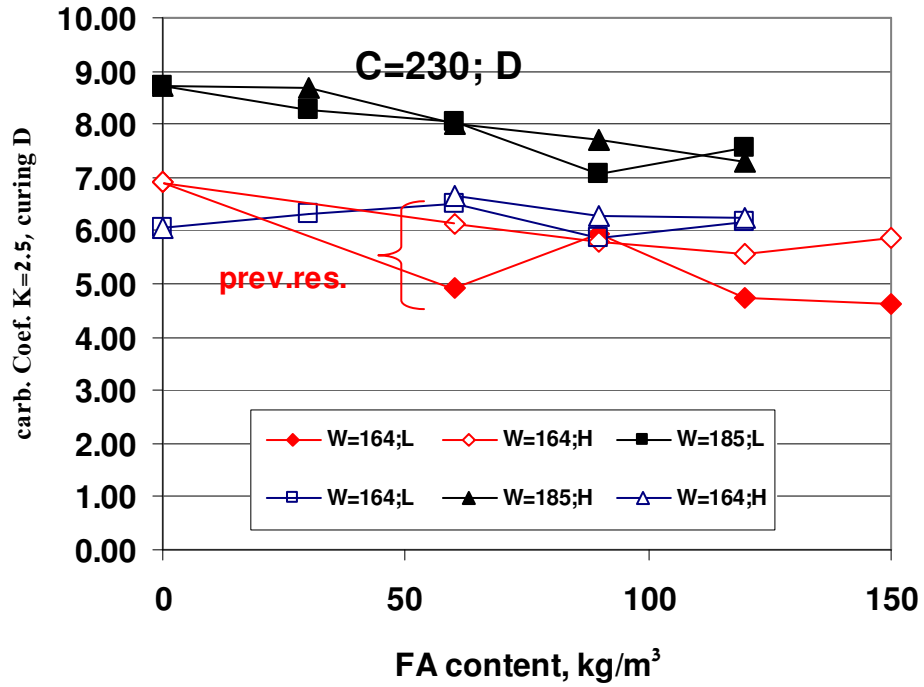


ציור 22: עקומי מקדם קרבונציה – תכולת אפר עבור בטונים עם 230 ק"ג צמנט שעברו אשפחה E, 28 ימים במים (בטונים בעלי תכולות מים של 185 ו-165, ומדגמי אפר מהמחקר הנוכחי והקודם בעלי LOI נמוך – L וגבוה – H).

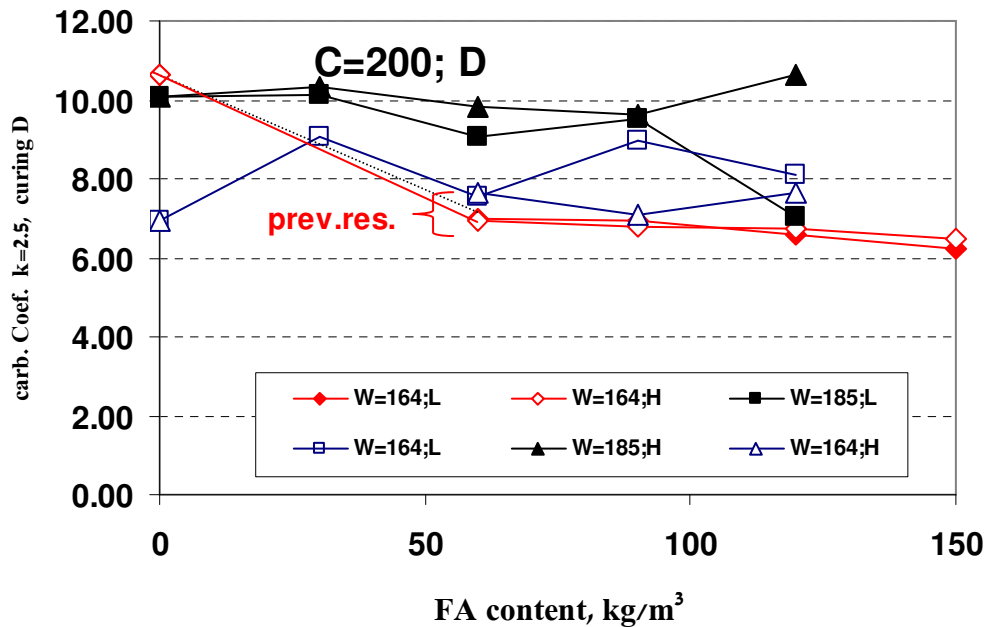


ציור 23: עקומי מקדם קרבונציה – תכולת אפר עבור בטונים עם 200 ק"ג צמנט שעברו אשפחה E, 28 ימים במים (בטונים בעלי תכולות מים של 185 ו-165, ומדגמי אפר מהמחקר הנוכחי והקודם בעלי LOI נמוך – L וגבוה – H).

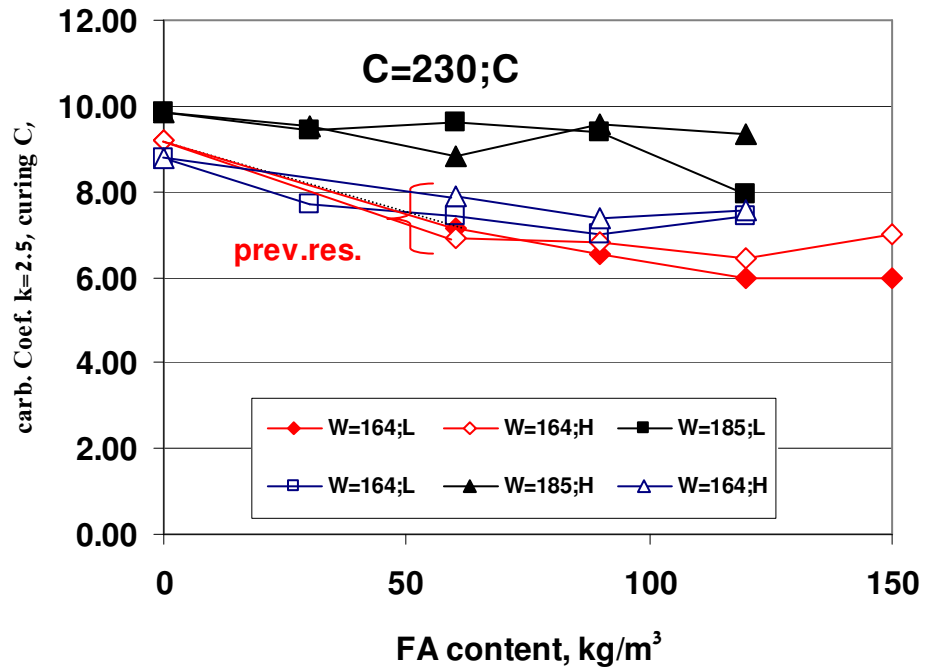




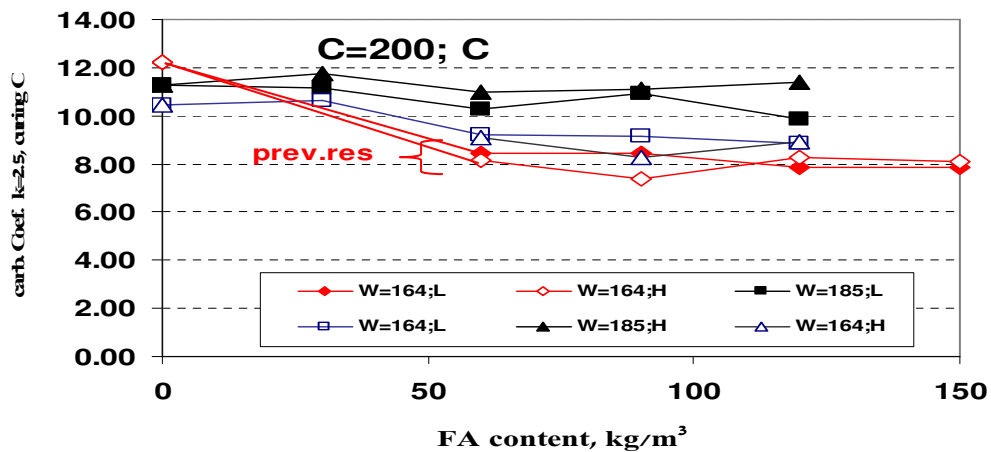
ציור 24: עקומי מקדם קרבוניציה – תכולת אפר עבור בטונים עם ק"יג צמנט שעברו אשפחה D, 7 ימים במים (בטונים בעלי תכולות מים של 185 ו- 165, ומדגמי אפר מהמחקר הנוכחי והקודם בעלי LOI נמוך – L וגבוה – H).



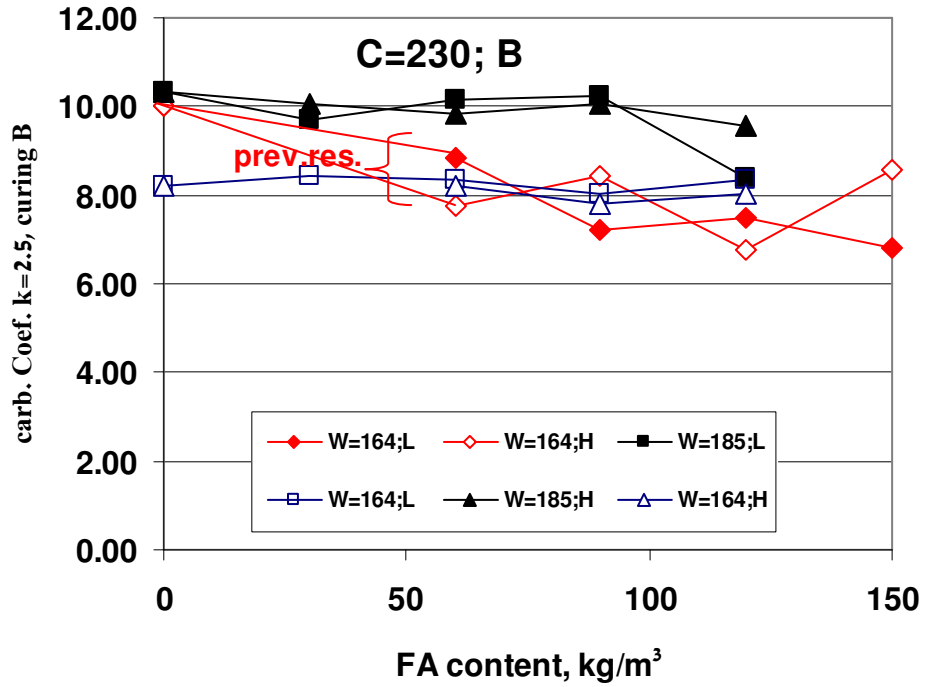
ציור 25: עקומי מקדם קרבוניציה – תכולת אפר עבור בטונים עם ק"יג צמנט שעברו אשפחה D, 7 ימים במים (בטונים בעלי תכולות מים של 185 ו- 165, ומדגמי אפר מהמחקר הנוכחי והקודם בעלי LOI נמוך – L וגבוה – H).



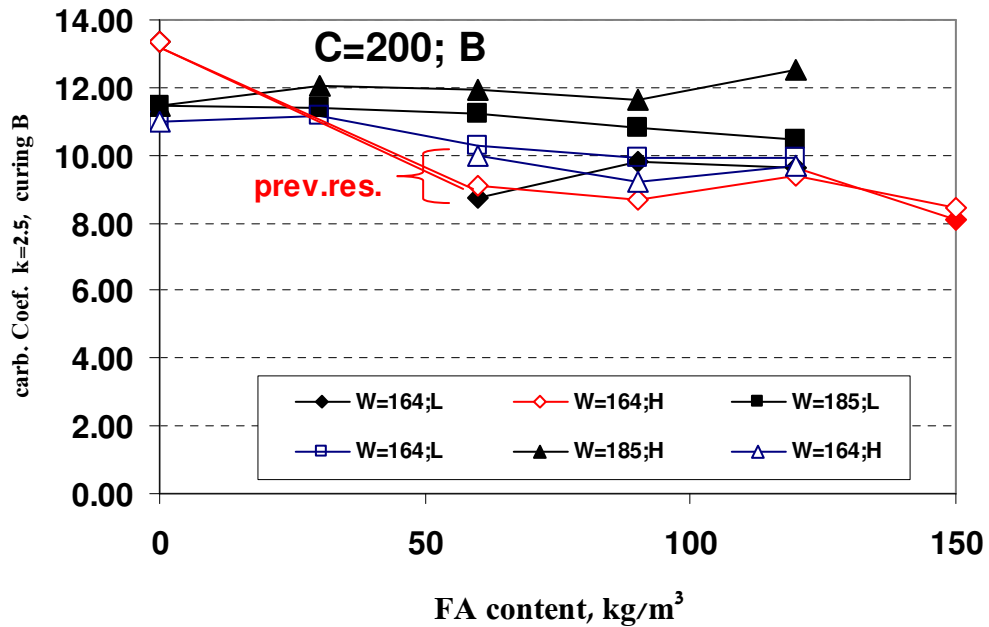
ציור 20: עקומי מקדם קרבוניציה – תכולת אפר עבור בטונים עם 230 ק"ג צמנט שעברו אשפחה 6, C ימי התזה במים (בטונים בעלי תכולות מים של 185 ו- 165, ומדגמי אפר מהמחקר הנוכחי והקודם בעלי LOI נמוך – L וגבוה – H).



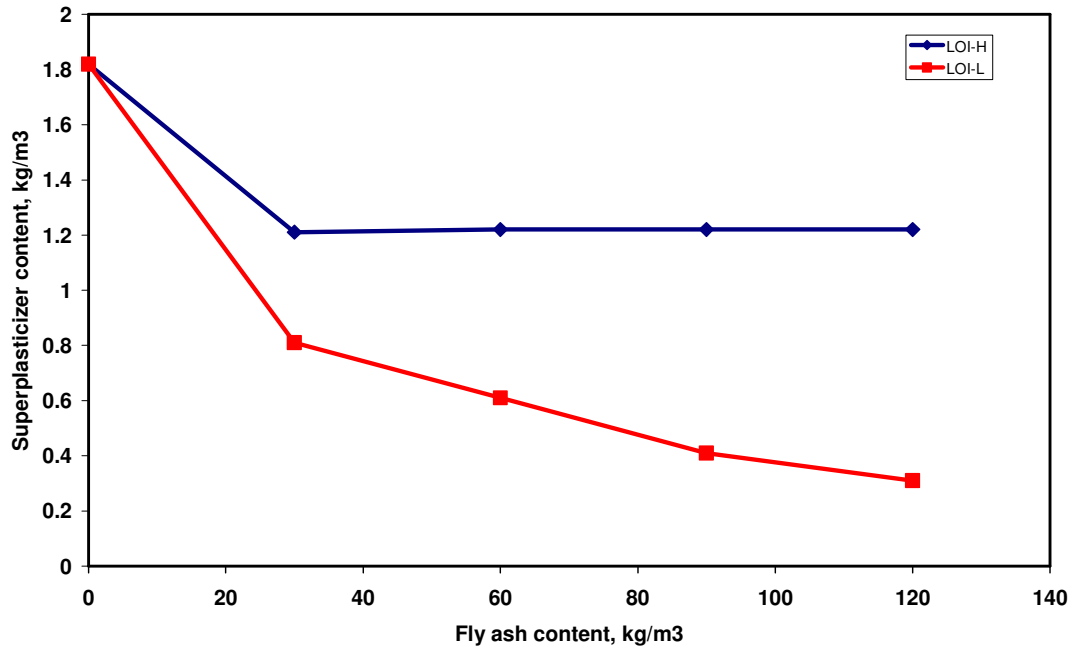
ציור 27: עקומי מקדם קרבוניציה – תכולת אפר עבור בטונים עם 200 ק"ג צמנט שעברו אשפחה 6, C ימי התזה במים (בטונים בעלי תכולות מים של 185 ו- 165, ומדגמי אפר מהמחקר הנוכחי והקודם בעלי LOI נמוך – L וגבוה – H).



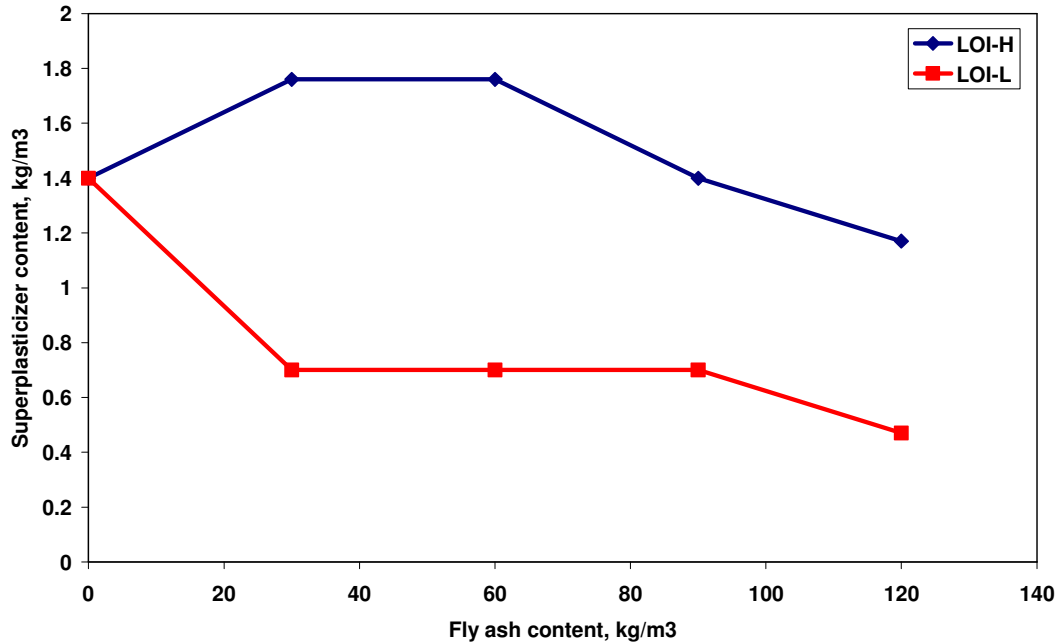
**ציר 28:** עקומי מקדם קרבוניציה – תכולת אפר עבור בטונים עם 230 ק"ג צמנט שעברו אשפחה B, 3 ימי התזה במים (בטונים בעלי תכולות מים של 185 ו- 165, ומדגמי אפר מהמחקר הנוכחי והקודם בעלי LOI נמוך – L וגבוה – H).



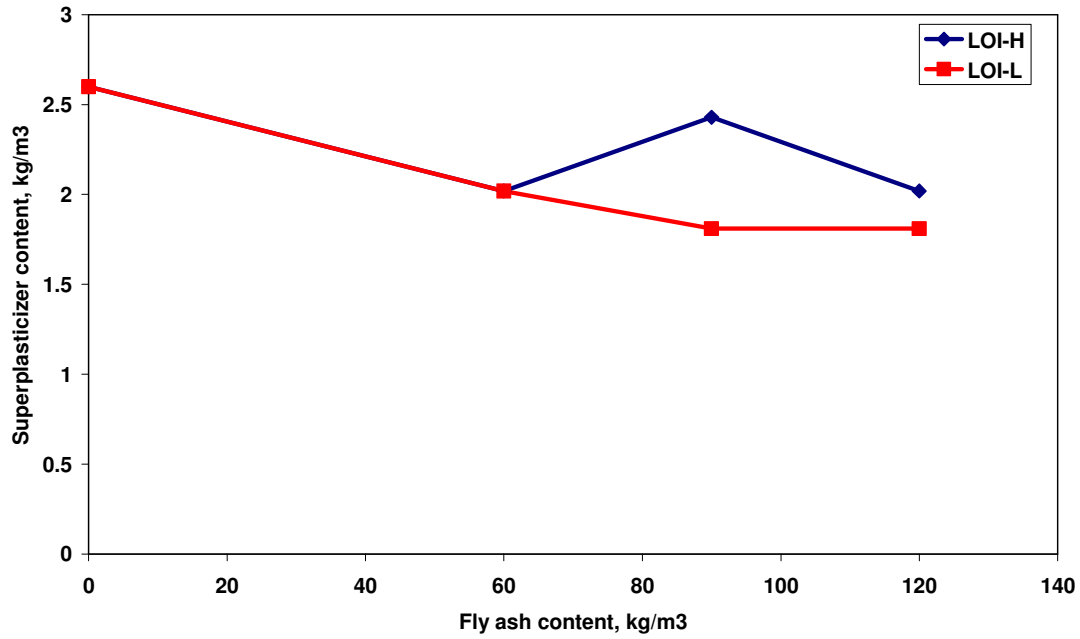
**ציר 29:** עקומי מקדם קרבוניציה – תכולת אפר עבור בטונים עם 200 ק"ג צמנט שעברו אשפחה B, 3 ימי התזה במים (בטונים בעלי תכולות מים של 185 ו- 165, ומדגמי אפר מהמחקר הנוכחי והקודם בעלי LOI נמוך – L וגבוה – H).



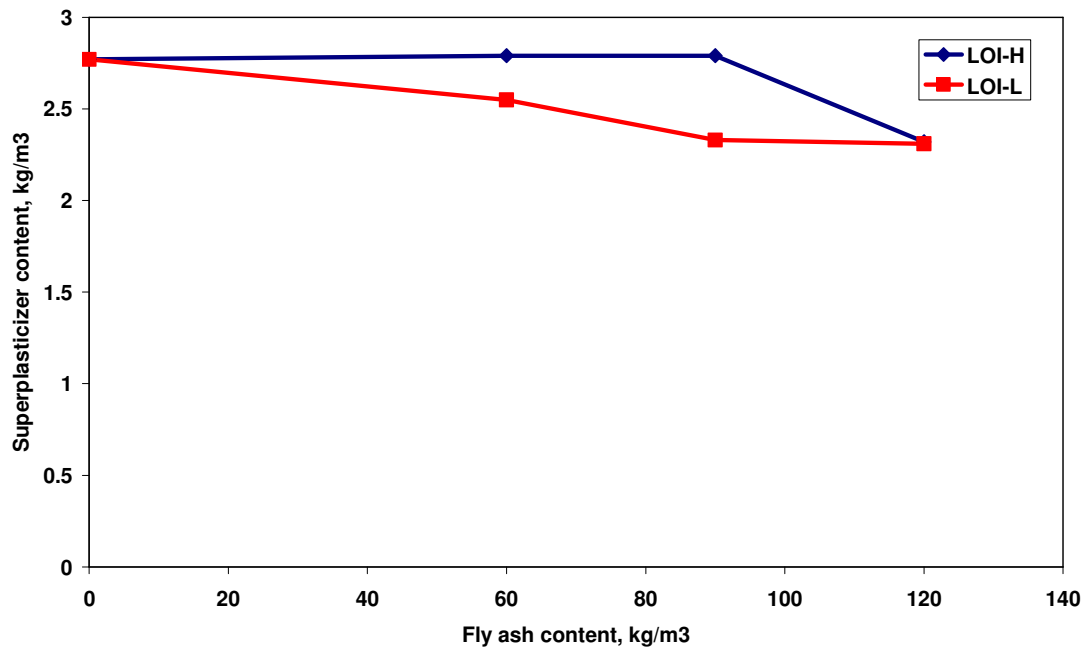
ציור 30: השפעת תכולת אפר משני סוגים (LOI גבוה - LOI, H נמוך - L) על תכולת המוסף העל פלסטי (ריאובילד 1000) הנדרשת להשגת עבידות דומה בתערובות עם 200 ק"ג/מ"ק צמנט ו-185 ליטר/מ"ק מים).



ציור 31: השפעת תכולת אפר משני סוגים (LOI גבוה - LOI, H נמוך - L) על תכולת המוסף העל פלסטי (ריאובילד 1000) הנדרשת להשגת עבידות דומה בתערובות עם 230 ק"ג/מ"ק צמנט ו-185 ליטר/מ"ק מים).



ציור 32: השפעת תכולת אפר משני סוגים (LOI גבוה - LOI, H - נמוך - LOI, L) על תכולת המוסף העל פלסטי (גלניום 51) הנדרשת להשגת עמידות דומה בתערובות עם 200 ק"ג/מ"ק צמנט ו-160 ליטר/מ"ק מים).



ציור 33: השפעת תכולת אפר משני סוגים (LOI גבוה - LOI, H - נמוך - LOI, L) על תכולת המוסף העל פלסטי (גלניום 51) הנדרשת להשגת עמידות דומה בתערובות עם 230 ק"ג/מ"ק צמנט ו-160 ליטר/מ"ק מים).

## 5. כלורידים

הרכב התערובות ותכונות הבטון הטרי של סדרת הכלורידים מוצגות בטבלה 11. בטבלה 12 ובטבלה 13 מוצגות תוצאות החוזק והחדירות לכלורידים. תחשיב מחזור החיים בטבלה 15 התבסס על משוואת הדיפוזיה תוך שלוקחים את הקשר שלהלן בין מקדם הדיפוזיה והחדירות לכלורידים (קולון) כפי שנקבעה בבדיקת ASTM C 1202:

$$D_{eff} = 0.137 \times 10^{-3} (\text{Chloride Permeability})^{0.854}$$

הפרמטרים האחרים לצורך החישוב היו, עובי כיסוי של 30 מ"מ, תכולת כלור קריטית של 0.4% ממשקל הצמנט וריכוז כלורידים על פני הבטון של 1.7654 ק"ג למ"ק.

השפעת האשפפה ותכולת האפר בתערובות בעלות תכולה נתונה של צמנט ומים על החדירות לכלורידים מתוארת בציורים 35 – 38. כצפוי, ניתן לראות שככל שהאשפפה טובה יותר ותכולת האפר גדולה יותר החדירות קטנה יותר. בולט במיוחד השיפור בחדירות כאשר עוברים מאשפפה של התזה לאשפפה של טבילה במים.

בציור מתוארת השפעת הרכב הבטון, תכולת האפר וטיב האפר על החדירות, עבור בטונים שקבלו אשפפה של 7 ימים במים (אשפפה D), שהיא האשפפה הרגילה הנדרשת במפרטים. ניתן להסיק על מספר מגמות בעלות עניין:

- ככל שתכולת האפר גדולה יותר החדירות קטנה יותר
- אין הבדל בהקטנת החדירות בין שני סוגי האפר, האחד עם LOI גבוה ו
- השני עם LOI נמוך.
- עבור תערובת בעלת תכולת צמנט נתונה, החלפת חלק מהצמנט באפר מאפשרת הקטנה דרמטית בחדירות לכלורידים. הדבר בולט במיוחד כאשר עושים השוואה לתערובת בקרה במנת מים של 0.45 המקובלת במפרטים לבטון ימי (תכולת צמנט של 350 ק"ג/מ"ק ותכולת מים של 160 ליטר/מ"ק): החלפת 30 ק"ג צמנט בתערובת זו ב- 60 ק"ג אפר מאפשרת הקטנת החדירות מכ - 1800 קולון לכ- 600 קולון, ללא תלות באיכות האפר. תוספת אפר בשיעור של 90 ק"ג מלווה בהקטנה נוספת מתונה, לכ- 400 קולון, גם כאן כמעט ללא תלות באיכות האפר.
- את התפקוד של חדירות לכלורידים בתערובת הבקרה המקובלת (מנת מים 0.45, תכולת צמנט - 350 ק"ג/מ"ק, תכולת מים - 160 ליטר/מ"ק) ניתן להשיג בתערובת בעלת תכולת צמנט נמוכה יותר של 270 ק"ג/מ"ק, עם 90 ק"ג אפר. אקויוולנטיות זו מצביעה על מקדם יעילות לכלורידים של 0.81 ו - 0.87 עבור מדגמי אפר בעלי LOI גבוה ונמוך, בהתאמה. ערכים אלה הרבה יותר גבוה ממקדם היעילות לחוזק ולקרבוניציה שנקבעו עם מדגמי אפר אלה (ראה פרק 2).

- כאשר מציגים את משך החיים הממוצע (טבלה 13) כפונקציה של החדירות לכלורידים (ציור ) ניתן לראות שכל התוצאות, עבור ההרכבים השונים ותנאי האשפיה השונים, מונחות על קו אחד, וממנו ניתן להסיק שכאשר החדירות היא מתחת ל – 1000 קולון משך החיים יהיה מעל 50 שנה. יש כמובן להדגיש שמסקנה זו נכונה לגבי ההנחות של חישוב משך החיים אשר הנחו את החישוב בעבודה הנוכחית.

בציור עד ציור , מתוארת השפעת הרכב הבטון, תכולת אפר הפחם וטיב האפר על החדירות, עבור בטונים שקבלו אשפיה מעבר למקובל (אשפיה E – 28 ימים במים – ציור 41) ואשפיה לקויה של התזה של 6 ימים ו- 3 ימים (ציור ציור ). המגמות דומות לאלה שתוארו עבור אשפיה D. יחד עם זאת מבחינה מעשית יש מספר היבטים חשובים שמן בראוי להדגישם ואשר מצביעים על השוני שבין סוגי האשפיה: באשפיה רציפה במים במשך 28 ימים (אשפיה E) מקדם היעילות הנו גבוה יותר, מעל ל – 1.0. באשפרות המבוססות על התזה במים (B ו- C) החדירות היא בכל המקרים גבוהה מכ- 200 קולון ואלה הם ערכים בלתי מתאימים לבטונים הצריכים לעמוד בתנאי חשיפה לכלורידים. על כן לתחשיבי היעילות בתנאי אשפיה אלה אין כל משמעות מעשית. בהקשר זה מוצגת בציור ובציור ההשפעה היחסית של האשפיה על חדירות לכלורידים (ציור ) ועל חוזק (ציור ). ניתן לראות שהחדירות לכלורידים הרבה יותר רגישה לטיב האשפיה.

מתוצאות אלה ניתן להבחין במספר מגמות אשר יש להן משמעות לתקינה:

- ניתן להשיג תפקוד שקיל בתנאי חשיפה לכלורידים (יחסית לתערובות תקניות עם מנת מים של 0.45 ותכולת צמנט של 320-350 ק"ג/מ"ק) באמצעות תערובות עם תכולת צמנט נמוכה יותר של 270 ק"ג/מ"ק ומנת מים של 0.55 כאשר מוסיפים להן אפר בתכולות של כ- 90 ק"ג/מ"ק. היעילות של האפר בתוספות אלה היא כ- 0.80 עבור אשפיה תקנית של 7 ימים במים, ומעל 1.0 עבור אשפיה רציפה במים במשך 28 ימים.
- בתנאי אשפיה של התזה התפקוד של חדירות לכלורידים הנו ירוד ביותר, ללא קשר להרכב התערובת ותכולת האפר. על כן אין משמעות למקדמי היעילות בתנאים אלה.
- תוספת אפר לתערובות עם מנת מים של 0.45 מאפשרת להקטין את החדירות לערכים של כ- 500 קולון המאפיינת תערובות עם עמידות יוצאת דופן לכלורידים. גם כאן נדרשת אשפיה במים; אשפיה בהתזה אינה מאפשרת להשיג תפקוד כזה.
- עבור הרכב בטון נתון, לטיב האפר כפי שבא לידי ביטוי ב- LOI לא הייתה השפעה על התפקוד לחדירות כלורידים. ההשפעה הייתה עקיפה באמצעות הקטנה בתכולת המוסף העל פלסטי הנדרשת להשגת הרכב נתון בעבידות מתאימה.

טבלה 11 : הרכב נומינלי ותכונות הבטון הטרי של התערובות - סדרת חדירות לכלורידים

תכולת מוסף ביחס לצמנט	מוסך, מ"מ (*)	תכולת אוויר, %	הרכב נומינלי, ק" למ"ק									C, W ק"ג למ"ק	
			משקל מרחבי	מוסך	אפר פחם	מלאן מודיעים	חול טבעי	עדש	פוליה	צמנט	מים		(מס. יציקה) תכולת אפר
0.90	225	2.0	2396	2.89	0	34	695	402	764	321	177	0(1)	175,320
1.20	84	3.0	2426	3.87	0	30	687	398	839	323	145	0(2)	145,320
1.00	150	2.0	2417	3.58	0	0	692	401	802	358	161	3(3)	160,350
0.85	(166) 214	2.0	2389	2.32	61	34	670	404	767	273	178	60(4)	175,270
0.80	(153) 182	1.0	2372	2.17	91	34	631	402	763	272	177	90(5)	LOI-L
0.70	(153) 117	2.0	2380	1.91	122	34	599	404	768	273	178	120(6)	LOI-L
0.85	(67) 100	2.4	2400	2.74	60	34	659	401	761	322	161	60(7)	160,320
0.90	(94) 141	2.3	2410	2.92	91	34	627	403	766	324	162	90(8)	LOI-L
0.90	(106) 136	2.5	2389	2.90	121	34	587	401	761	322	161	120(9)	LOI-L
0.95	(167) 178	2.0	2387	2.59	61	34	669	403	766	273	178	60(10)	175,270
0.95	(149) 187	2.0	2376	2.59	91	34	632	403	765	272	177	90(11)	LOI-H
0.90	(103) 122	2.0	2384	2.47	122	34	599	405	769	274	178	120(12)	LOI-H
1.10	(98) 131	2.6	2395	3.44	60	34	657	400	760	322	161	60(13)	160,320
1.10	(87) 127	2.5	2393	3.54	91	34	621	400	760	322	161	90(14)	LOI-H
1.15	(90) 123	2.4	2348	3.64	119	33	575	394	748	317	159	120(15)	LOI-H

(\*) סומך מיד (סומך לאחר 15 דקות)



טבלה 12: חוזק בלחיצה בגילאים שונים, לאחר חשיפה לתנאי אשפחה שונים – סדרת כלורידים

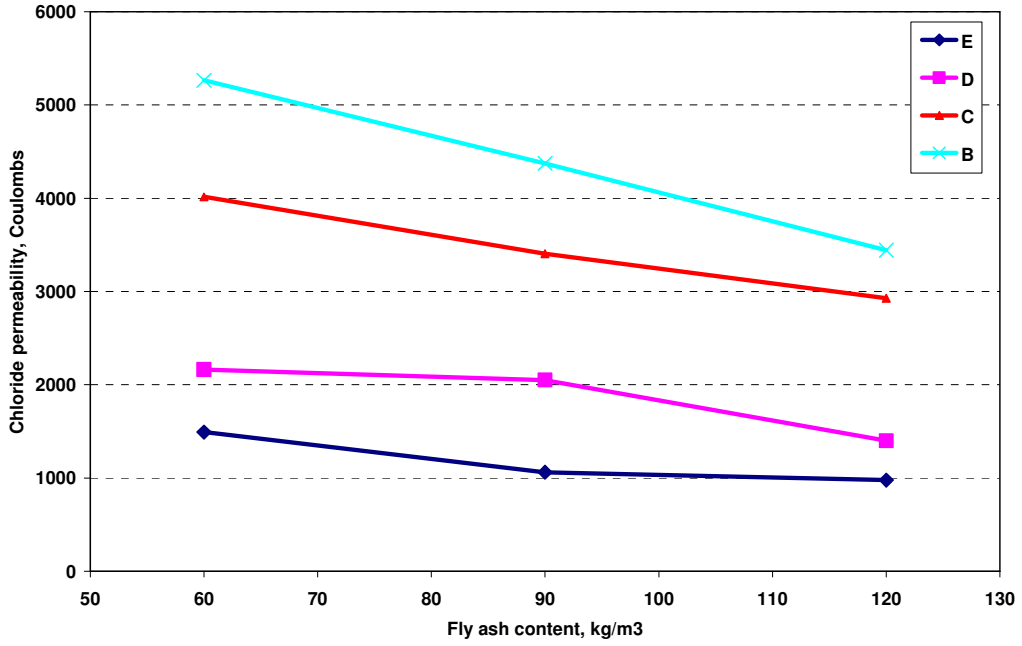
חוזק בלחיצה (מגפ"ס) בגיל (ימים)																				.מס. (יציקה) תכולת אפר	C,W ק"ג למ"ק
90				28				7				3				1					
E	D	C	B	E	D	C	B	E	D	C	B	E	D	C	B	E	D	C	B		
57.8	52.7	47.3	46.7	42.8	46.7	43.5	42.1	29.9	29.9	31.0	31.8	24.9	24.9	24.2	24.2	14.2	14.2	14.2	14.2	0(1)	175,320
70.5	70.1	62.3	57.7	60.8	64.5	57.0	53.3	47.1	47.1	45.4	45.4	36.9	36.9	36.1	36.1	19.2	19.2	19.2	19.2	0(2)	145,320
71.3	63.8	55.3	53.7	55.7	61.4	53.2	51.6	43.9	43.9	41.4	42.2	33.1	33.1	30.3	30.3	17.0	17.0	17.0	17.0	0(3)	160,350
55.0	48.8	43.1	38.3	39.5	41.9	37.1	36.3	25.4	25.4	25.2	25.4	20.3	20.3	19.1	19.1	10.8	10.8	10.8	10.8	60(4)	175,270
57.4	50.4	44.4	43.5	40.3	43.9	39.6	39.0	25.8	25.8	26.6	27.1	20.0	20.0	20.1	20.1	11.7	11.7	11.7	11.7	90(5)	LOI-L
60.7	54.3	48.2	45.5	41.2	45.7	41.4	40.4	26.9	26.9	27.5	28.7	19.5	19.5	20.7	20.7	11.4	11.4	11.4	11.4	120(6)	
72.9	69.7	59.1	56.8	60.1	61.1	54.9	53.2	43.2	43.2	39.3	41.2	33.9	33.9	31.2	31.2	18.0	18.0	18.0	18.0	60(7)	160,320
66.1	60.0	53.9	48.9	59.5	64.5	59.8	59.2	45.7	45.7	41.0	44.0	33.4	33.4	32.2	32.2	20.3	20.3	20.3	20.3	90(8)	LOI-L
63.8	62.4	52.7	52.7	66.5	67.6	60.0	55.8	43.2	43.2	43.9	43.6	35.1	35.1	32.6	32.6	19.4	19.4	19.4	19.4	120(9)	
52.6	46.3	42.0	39.1	38.6	40.7	37.7	34.4	26.3	26.3	26.6	27.6	18.5	18.5	18.9	18.9	11.0	11.0	11.0	11.0	60(10)	175,270
57.0	51.3	44.8	42.6	39.4	35.8	39.1	34.7	26.7	26.7	27.1	28.7	19.4	19.4	20.1	20.1	11.7	11.7	11.7	11.7	90(11)	LOI-H
64.0	53.6	46.5	44.4	46.9	46.7	42.3	39.0	30.2	30.2	28.0	28.4	23.0	23.0	20.7	20.7	11.4	11.4	11.4	11.4	120(12)	
61.5	58.4	50.1	47.7	59.1	64.4	55.9	52.5	47.6	47.6	43.7	44.0	37.1	37.1	33.1	33.1	21.5	21.5	21.5	21.5	60(13)	160,320
80.6	68.2	60.2	59.2	56.6	62.5	56.0	54.6	44.7	44.7	42.9	44.4	32.4	32.4	34.3	34.3	20.2	20.2	20.2	20.2	90(14)	LOI-H
76.7	68.5	62.4	61.4	63.4	64.3	54.7	55.4	44.1	44.1	43.1	45.1	32.9	32.9	34.8	34.8	19.9	19.9	19.9	19.9	120(15)	

טבלה 13: חדירות לכלורידים, לאחר חשיפה לתנאי אשפרה שונים ותחשיבי מחזור חיים – סדרת כלורידים

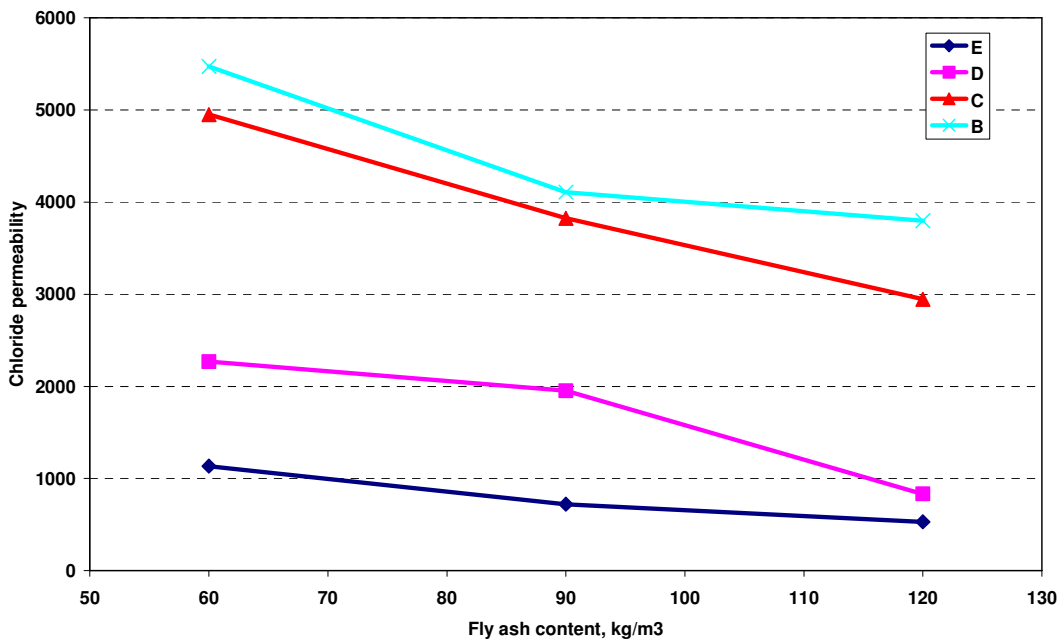
אשפרה E		אשפרה D		אשפרה C		אשפרה B		מס. יציקה (תכולת אפר)	C, W ק"ג למ"ק
מחזור חיים (שנים)	חדירות (קולון) (*)	מחזור חיים (שנים)	חדירות (קולון) (*)	מחזור חיים (שנים)	חדירות (קולון) (*)	מחזור חיים (שנים)	חדירות (קולון) (*)		
27.1	2253	23.9	2614	11.5	6224	12.2	5843	0(1)	175,320
58.1	909	53.3	1007	22.2	2864	19.0	3444	0(2)	145,320*
42.7	1310	31.6	1873	14.2	4868	14.6	4721	3(3)	160,350
38.3	1494	28.0	2163	16.7	4015	13.3	5265	60(4)	175,270
51.0	1062	29.3	2051	19.2	3404	15.5	4375	90(5)	LOI-L
54.7	977	30.8	1931	21.7	2928	19.0	3444	120(6)	
140.7	317	85.6	573	30.7	1944	23.8	2630	60(7)	160,320
153.4	286	119.3	386	27.7	2196	25.9	2378	90(8)	LOI-L
180.3	236	165.7	261	35.1	1655	27.5	2216	120(9)	
48.3	1133	26.9	2268	14.0	4952	12.9	5472	60(10)	175,270
70.6	720	30.6	1952	17.4	3825	16.4	4109	90(11)	LOI-H
91.5	529	62.5	833	21.6	2945	17.5	3797	120(12)	
90.8	534	79.0	630	28.2	2149	22.9	2759	60(13)	160,320
104.1	454	102.0	465	34.5	1688	33.2	1769	90(14)	LOI-H
103.3	458	70.0	728	38.6	1477	37.7	1521	120(15)	

\* הערה: הערכים בתערובת זו (מספר 2), בעלת מנת מים של 450, הגם נמוכים באופן מיוחד, הרבה יותר נמוכים מהמדווה בספרות ומתוצאות שהתקבלו בתערובת דומה במחקר קודם. כמו כן הם נמוכים בהרבה מתערובת מס' 3 בהרכב דומה. לכן לא נלקחה תערובת זו בחשבון בניתוח התוצאות.

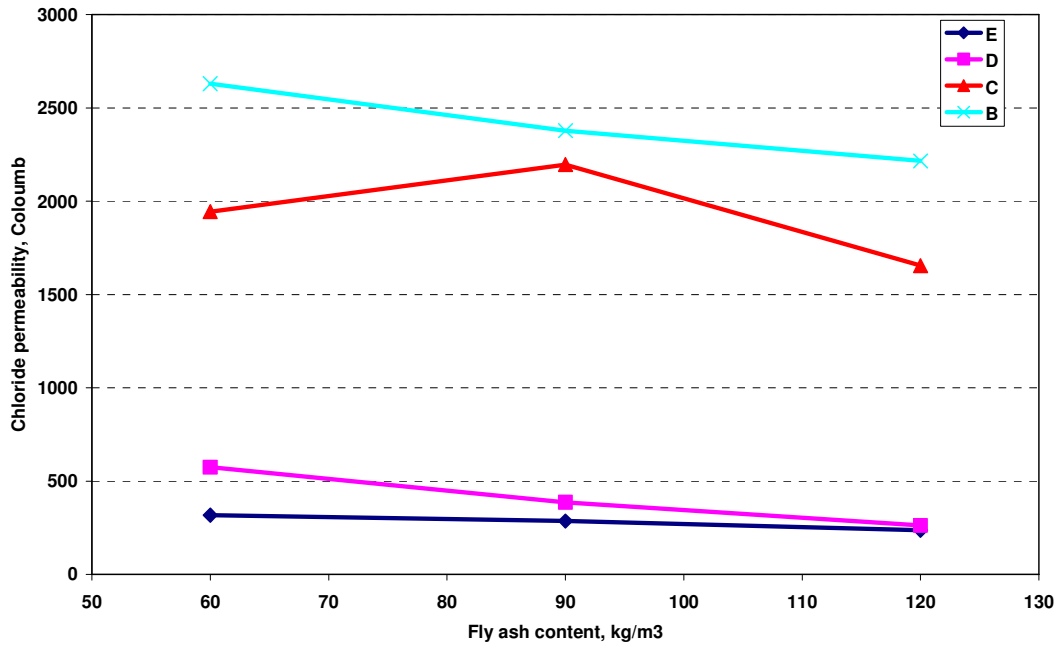
מעל 4000 חדירות גבוהה  
 4000-2000 חדירות בינונית  
 2000-1000 חדירות נמוכה  
 1000-100 חדירות מאד נמוכה  
 פחות מ-100 זניחה



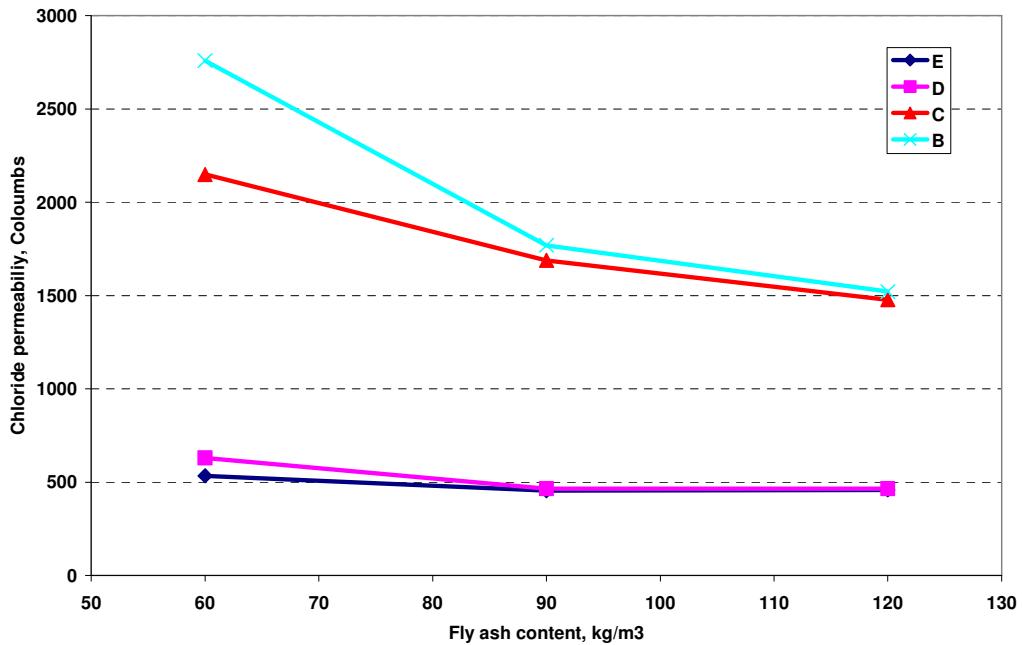
ציור 34 : השפעת תכולת האפר והאשפרה על החדירות לכלורידים של בטונים בעלי תכולת צמנט של 270 ק"ג/מ"ק, תכולת מים של 175 ליטר/מ"ק ואפר בעל LOI נמוך



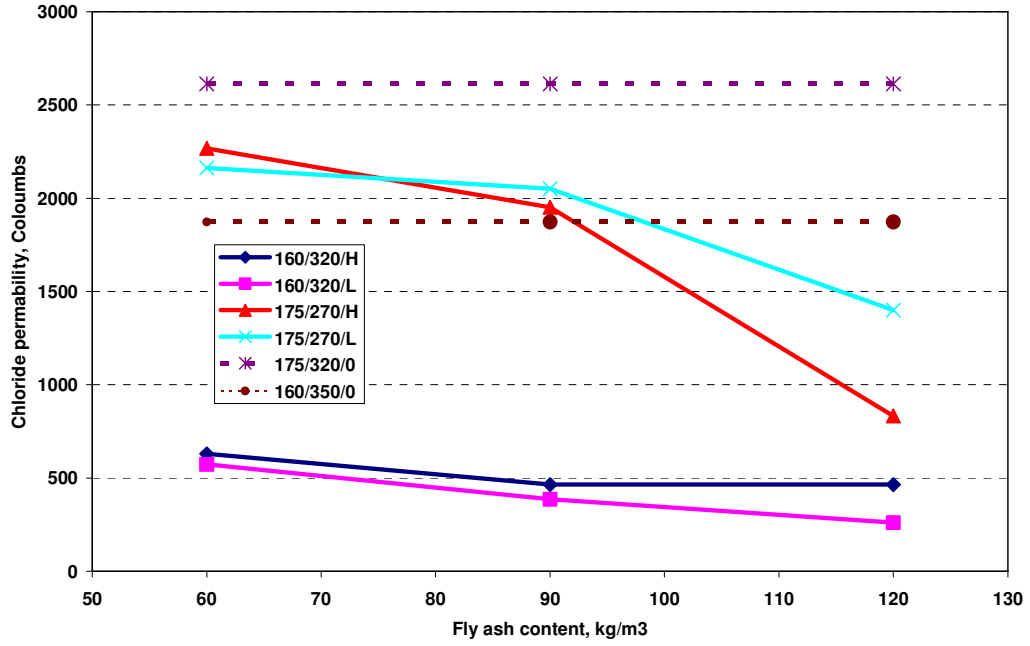
ציור 35 : השפעת תכולת האפר והאשפרה על החדירות לכלורידים של בטונים בעלי תכולת צמנט של 270 ק"ג/מ"ק, תכולת מים של 175 ליטר/מ"ק ואפר בעל LOI גבוה



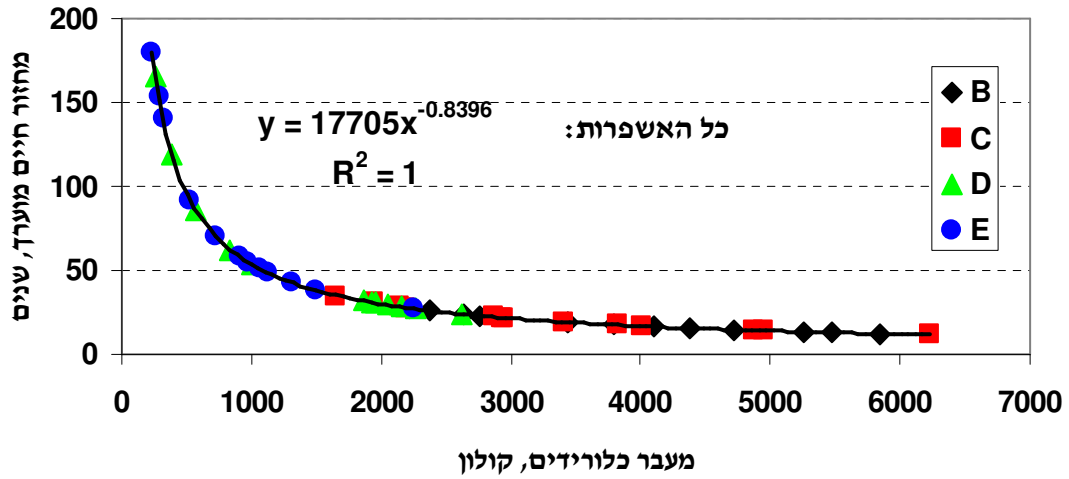
ציון 36: השפעת תכולת האפר והאשפרה על החדירות לכלורידים של בטונים בעלי תכולת צמנט של 320 ק"ג/מ"ק, תכולת מים של 160 ליטר/מ"ק ואפר בעל LOI נמוך



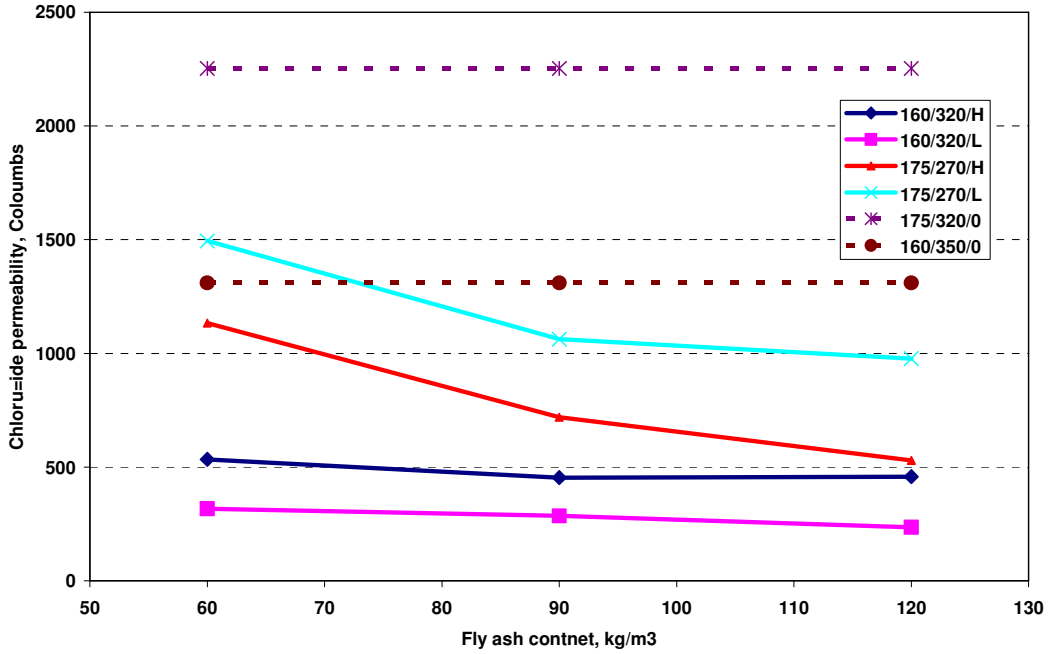
ציון 37: השפעת תכולת האפר והאשפרה על החדירות לכלורידים של בטונים בעלי תכולת צמנט של 320 ק"ג/מ"ק, תכולת מים של 160 ליטר/מ"ק ואפר בעל LOI גבוה



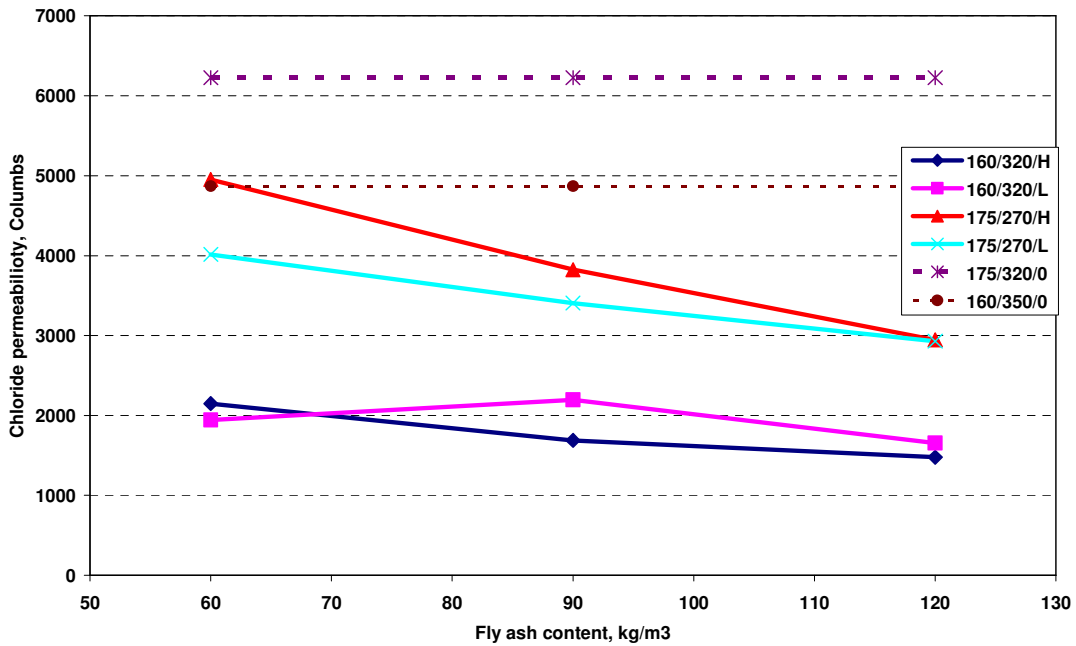
ציור 38: השפעת הרכב הבטון, תכולת האפר וטיב האפר (LOI גבוה – H, LOI נמוך – L) על החדירות לכלורידים בבטונים שעברו אשפּרה מסוג D (7 ימים במים). הקווים המקווקווים מייצגים את בטוני הבקרה ללא אפר פחם.



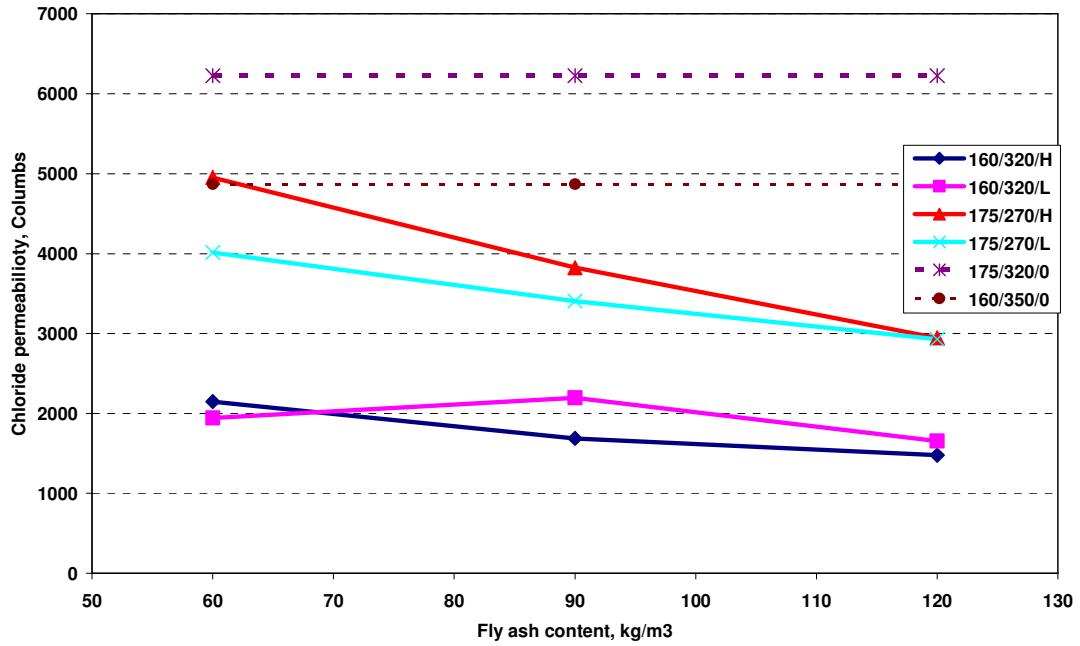
ציור 39: עקום מחזור חיים מחושב – חדירות לכלורידים



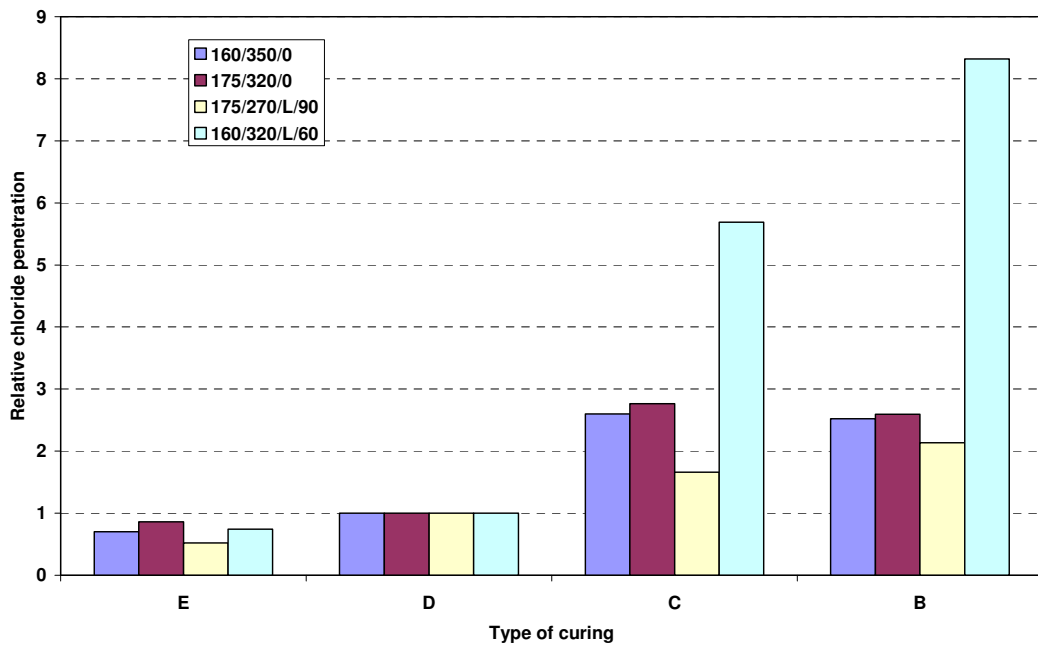
ציור 40: השפעת הרכב הבטון, תכולת האפר וטיב האפר (LOI גבוה – H, LOI נמוך – L) על החדירות לכלורידים בבטונים שעברו אשפחה מסוג E (28 ימים במים). הקווים המקווקווים מייצגים את בטוני הבקרה ללא אפר פחם.



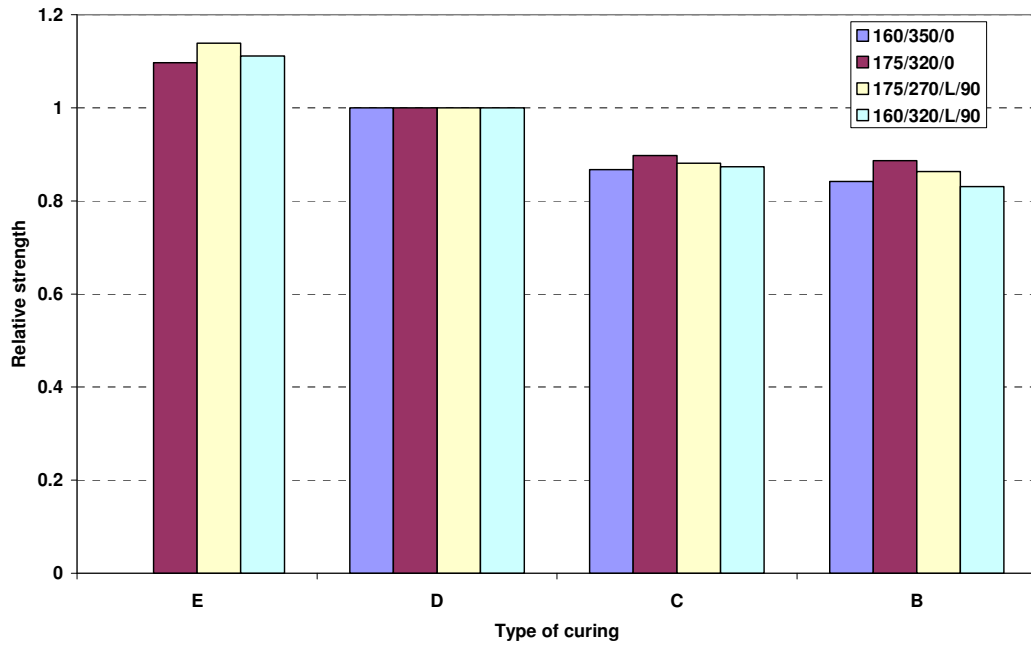
ציור 41: השפעת הרכב הבטון, תכולת האפר וטיב האפר (LOI גבוה – H, LOI נמוך – L) על החדירות לכלורידים בבטונים שעברו אשפחה מסוג C (6 ימי התזה). הקווים המקווקווים מייצגים את בטוני הבקרה ללא אפר פחם.



ציור 42: השפעת הרכב הבטון, תכולת האפר וטיב האפר (LOI גבוה – H, LOI נמוך – L) על החדירות לכלורידים בבטונים שעברו אשפּרה מסוג B (3 ימי התזה). הקווים המקווקוים מייצגים את בטוני הבקרה ללא אפר פחם.



ציור 43: ההשפעה היחסית (יחסית לאשפּרה D של 7 ימים במים) של האשפּרה על חדירות לכלורידים של בטוני הבקרה ובטונים עם 90 ק"ג אפר.



ציון 44: ההשפעה היחסית (יחסית לאשפרה D של 7 ימים במים) של האשפרה על החוזק של בטוני הבקרה ובטונים עם 90 ק"ג אפר.



## 6. מסקנות

### יעילות האפר בתנאי קרבונציה

- עבור הרכב בטון נתון להבדלים באיכויות האפר יש השפעה קטנה יחסית הן על החוזק והן על הקרבונציה, למרות שמדובר במדגמי אפר בעלי מקדם אקטיביות פוצולנית שונה.
- ההשפעה העיקרית של איכות האפר היא בהקטנה בתצרוכת המים במדגמי אפר בעלי LOI נמוך יותר. השפעה זו באה לידי ביטוי בתערובות עם תכולת מים של 185 ליטר/מ"ק אשר בהן נעשה שימוש בריאובילד 1000 אך היא הייתה הרבה יותר קטנה, כמעט זניחה בתערובות עם תכולת מים 160 ליטר/מ"ק אשר שם המוסף היה גלניום 51.
- היעילות של האפר במחקר הנוכחי הייתה הרבה יותר נמוכה מזו שבמחקר הקודם, למרות שהאקטיביות הפוצולנית הייתה גבוהה יותר במדגמי האפר שבמחקר הנוכחי. אין בידינו הסבר להבדל זה, וייתכן שהוא קשור בטיב הצמנט, למרות שבשני המקרים מדובר בצמנט מאותו סוג. סוגיה זו דורשת ליבון מיוחד והתייחסות ראשונית אליה מוצגת בנספח א'.

### יעילות האפר בתנאי חשיפה לכלורידים

- ניתן להשיג תפקוד שקיל בתנאי חשיפה לכלורידים (יחסית לתערובות תקניות עם מנת מים של 0.45 ותכולת צמנט של 320-350 ק"ג/מ"ק) באמצעות תערובות עם תכולת צמנט נמוכה יותר של 270 ק"ג/מ"ק ומנת מים של 0.55 כאשר מוסיפים להן אפר בתכולות של כ- 90 ק"ג/מ"ק. היעילות של האפר בתוספות אלה היא כ- 0.80 עבור אשפרה תקנית של 7 ימים במים, ומעל 1.0 עבור אשפרה רציפה במים במשך 28 ימים.
- בתנאי אשפרה של התזה התפקוד של חדירות לכלורידים הנו ירוד ביותר, ללא קשר להרכב התערובת ותכולת האפר. על כן אין משמעות למקדמי היעילות בתנאים אלה.
- תוספת אפר לתערובות עם מנת מים של 0.45 מאפשרת להקטין את החדירות לערכים של כ- 500 קולון המאפיינת תערובות עם עמידות יוצאת דופן לכלורידים. גם כאן נדרשת אשפרה במים; אשפרה בהתזה אינה מאפשרת להשיג תפקוד כזה.
- עבור הרכב בטון נתון, לטיב האפר כפי שבא לידי ביטוי ב- LOI לא הייתה השפעה על התפקוד לחדירות כלורידים. ההשפעה הייתה עקיפה באמצעות הקטנה בתכולת המוסף העל פלסטי הנדרשת להשגת הרכב נתון בעבידות מתאימה.

### אשפרה

גם במחקר זה נמצא שלאשפרה השפעה קטנה יחסית על החוזק בכל הקשור לתפעול האפר. יחד עם זאת השפעתה משמעותית בכל הקשור לתפעול האפר בהיבטים של קיים, כלורידים קרבונציה. הרגישות הנה גדולה במיוחד בתחום החדירות לכלורידים – אשפרה המבוססת על התזה מאפשרת להשיג בדוחק את דרישות החוזק אך בשום פנים ואון איננה מאפשרת להגיע לקיים הנדרש.

## נספח א'

נובמבר 2005

**פריזה בתנאים טבעיים של בטונים עם אפר פחם**  
**דו"ח ביניים לאחר 2 שנות פריזה טבעית**  
**פרופ' א.בנטור, ד"ר ה.באום**

**רקע**

במחקר לבחינת האפשרות להקטין את תכולות הצמנט המזעריות הנדרשות בבטונים עם אפר פחם גובשו המלצות המתבססות על בדיקות מואצות. עבור בטונים בטיב ב-20 ו ב-30 התבססו ההמלצות על חשיפה לתנאי קרבונציה, שהם התנאים בהם צפויים בטונים באיכות זו לשרת. היה עניין מיוחד בבטונים בתחום זה מאחר והם מהווים חלק ניכר מהבטונים המיוצרים בארץ. בהתבסס על תוצאות המחקר הוכנו המלצות לשינוי בתקן ת"י 466 המאפשרות הקטנת תכולת הצמנט המזערית בתערובות עם אפר פחם. יחד עם זאת, בטווח של הבטונים באיכות של ב-20 (תכולת צמנט מזערית של 230 ק"ג/מ"ק הנדרשת בתקן) לא ניתן היה להמליץ על הפחתה בהתבסס על הבדיקות המואצות.

לאור החשיבות של נושא זה הוחלט על המשך פעילות מחקרית כדי לבחון היבט זה של תפקוד הבטונים בבדיקות ארוכות טווח בתנאי פריזה טבעיים. לצורך כך הוכנו תערובות בטון עם תכולות של 200 ו 230 ק"ג/מ"ק צמנט עם וללא אפר, והן נחשפו לקרבונציה טבעית באתר הפריזה של המכון הלאומי לחקר הבנייה. הרכב התערובות וחוזקן מוצגים בטבלה 1. בימים אלה התקבלו תוצאות בדיקה של גיל שנתיים והן מדווחות כאן.

**תוצאות**

במהלך השנתיים נערכו בדיקות במועדים שונים במהלך שנתיים של פריזה (טבלה 2). בהתבסס על תוצאות אלה ניתן להתחיל כבר בתחשיבים ראשוניים של מחזור החיים בתלות בתכולת האפר ותנאי האשפחה, תוך השוואה ביניהם ובין המגמות שהתקבלו בתנאי הפריזה המואצים. יש להדגיש שמדובר בהערכה ראשונית המתבססת על זמני חשיפה טבעיים קצרים יחסית, וכדי להגיע למסקנות אשר יאפשרו ניתוח אמין לצורך המלצות לתקינה נדרשים זמני חשיפה ארוכים יותר.

עקומי עומק קרבונציה – זמן אופייני באמצעות משוואה (1), כאשר המקדם  $k$  משמש כפרמטר אופייני לעקום:

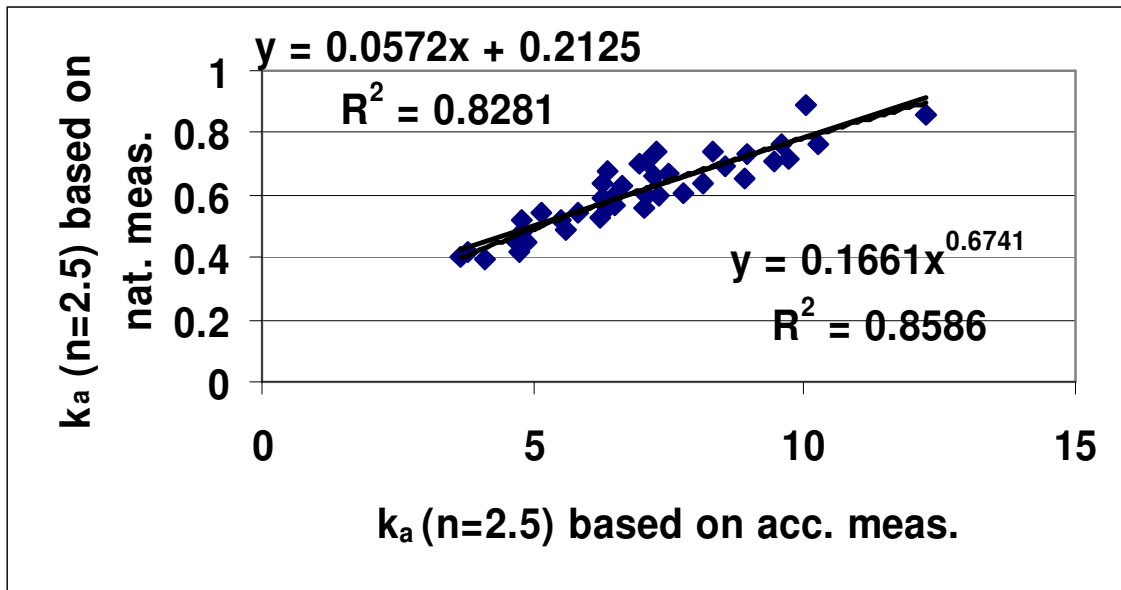
$$y = k (t)^{1/2.5} \quad (1)$$

הקשר בין מקדמי הקרבונציה ( $k$  במשוואה 1) המואצים והטבעיים (הערכים לטבעיים הם אומדן ראשוני בלבד) מוצגים בצירור 1. קיים אמנם קשר מובהק בין שני המקדמים, אך רמת הפיזור

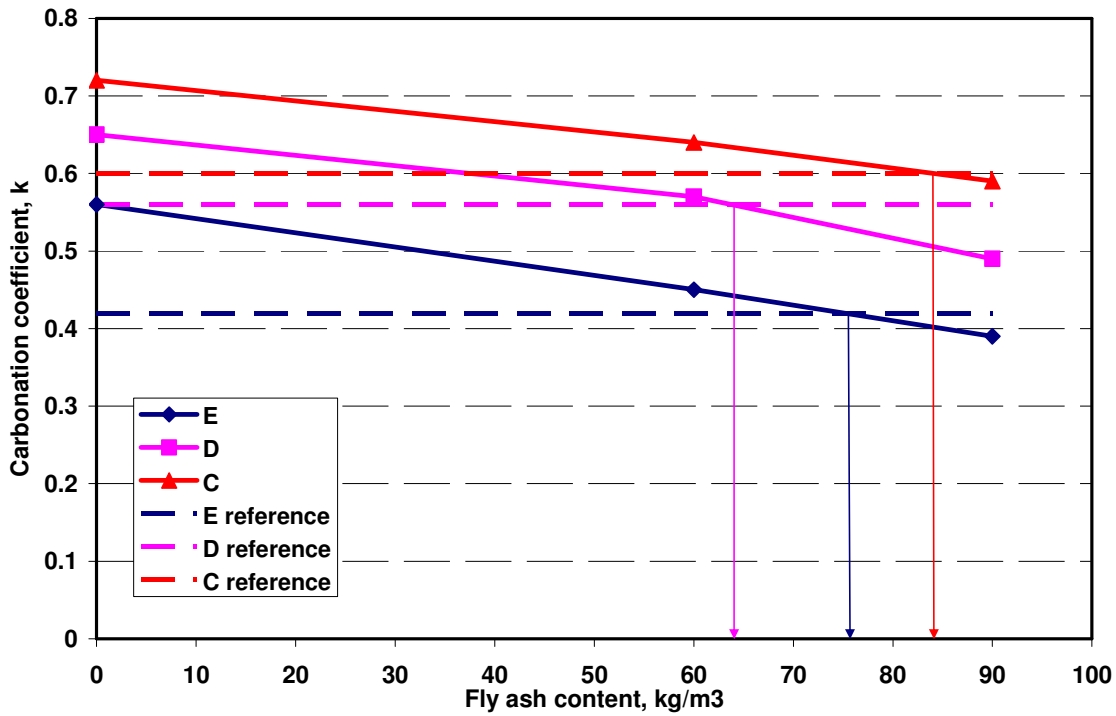
איננה נמוכה, ומשמעות הדבר היא שעבור רמת הדיוק הנדרשת לצורך המטרות כאן, לא מן הנמנע שבדיקות טבעיות יצביעו על אפשרויות אשר אינן ניתנות לביסוס על סמך הבדיקות המואצות.

השפעת תכולת האפר על המקדמים מוצגת בציורים 2 ו- 3 עבור התערובות עם תכולות מים של 164 ו- 150 ליטר למ"ק בהתאמה, תוך השוואה של המקדם של התערובת עם אפר (200 ק"ג צמנט בתוספת אפר) למקדם של תערובת בקרה בעלת תכולת צמנט של 230 ק"ג/מ"ק. מתוך חיתוך הקווים ניתן לקבוע את מקדמי היעילות עבור תנאי האשפיה השונים. עבור התערובות עם 150 ליטר מים למ"ק מקדמי היעילות הם 0.40, 0.46 ו- 0.35 לתנאי אשפיה E (28 ימים במים), D (7 ימים במים) ו- C (7 ימי התזה במים), בהתאמה. עבור התערובת עם 164 ליטר מים למ"ק אין חיתוך של הקווים ומשמעות הדבר הוא מקדמי יעילות 0.

תוצאות אלה מראות שתכולות הצמנט הנמוכות הן גבוליות בכל הקשור לתפעול האפר ולאפשרות להקטנת תכולת הצמנט המזערית. נראה על פניו שהדבר אפשרי רק כאשר תכולת המים הנה נמוכה מספיק.

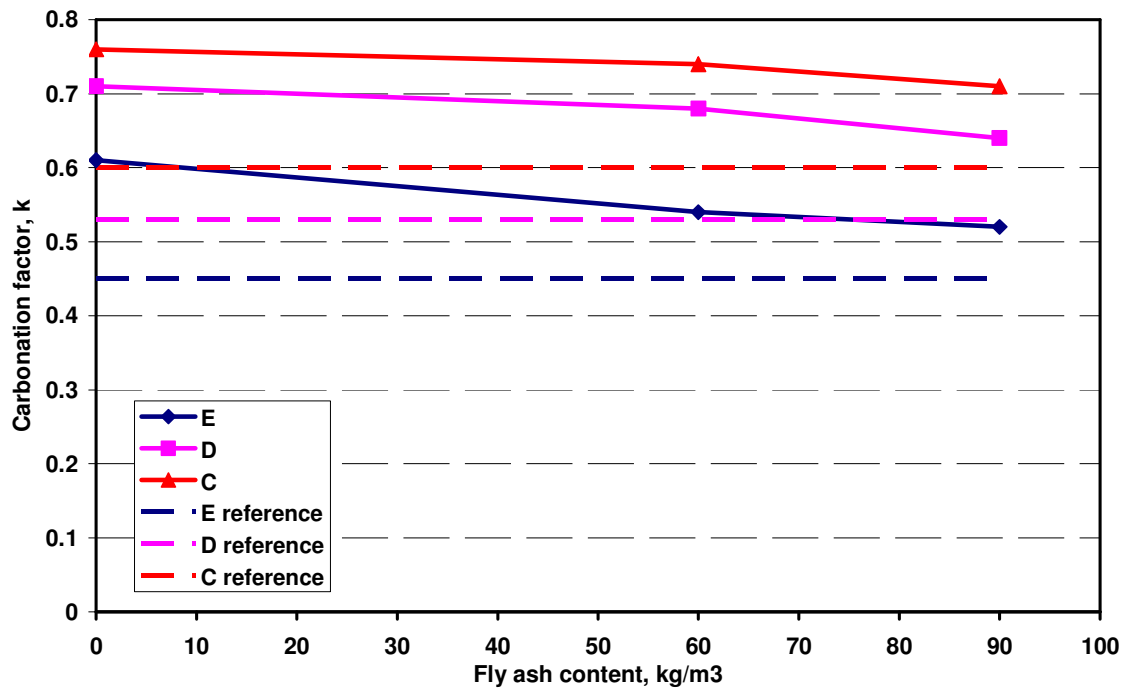


ציור 1: הקשר בין מקדמי קרבונציה בתנאים מואצים ותנאי פריזה טבעיים (לאחר שנתיים באתר פריזה)



ציור 2: השפעת תכולת האפר ותנאי אשפורה על מקדמי קרבונציה (בתנאי פריזה טבעיים במשך שנתיים) של תערובות עם תכולת צמנט של 200 ק"ג/מ"ק, בהשוואה לתערובת ייחוס עם 230 ק"ג/מ"ק צמנט. תכולת המים 150 ליטר למ"ק.

E - אשפורה של 28 ימים במים; D - אשפורה של 7 ימים במים; C - אשפורה של התזה במסך 7 ימים



ציור 3: השפעת תכולת האפר ותנאי אשפורה על מקדמי קרבוניציה (בתנאי פריזה טבעיים במשך שנתיים) של תערובות עם תכולת צמנט של 200 ק"ג/מ"ק, בהשוואה לתערובת ייחוס עם 230 ק"ג/מ"ק צמנט. תכולת המים 164 ליטר למ"ק.

E- אשפורה של 28 ימים במים; D – אשפורה של 7 ימים במים; C – אשפורה של התזה במסך 7 ימים

## טבלה 1 : הרכב תערובות הבטון וחוזקן

חוזק בלחיצה (מגפ"ס), בגיל:			אשפיה	תכולת מים בתערובת, ק"ג למ"ק	תכולת אפר פחם, ק"ג למ"ק	תכולת צמנט, ק"ג למ"ק	מס. תערובת
90 ימים	28 ימים	7 ימים					
27.2	26.4	20.3	B	416	0	200	5N
28.0	26.0	18.6	C				
31.0	29.0	19.0	D				
38.2	28.5	18.4	E				
28.9	29.1	24.4	B	150	0	200	7N
30.8	31.7	23.5	C				
35.4	35.1	23.6	D				
41.5	32.6	23.3	E				
32.5	31.0	23.5	B	416	0	230	6N
33.8	33.3	22.0	C				
38.2	34.1	23.6	D				
41.5	31.3	22.0	E				
34.8	32.7	26.7	B	150	0	230	10N
37.2	37.1	27.8	C				
41.0	40.9	26.7	D				
47.7	38.7	27.1	E				
34.1	30.4	22.3	B	416	60	200	1N
39.4	34.9	24.2	C				
38.9	35.3	23.2	D				
48.7	36.0	23.6	E				
36.4	35.4	28.1	B	150	60	200	8N
38.3	36.0	25.5	C				
43.6	39.0	26.4	D				
55.3	40.5	25.9	E				
32.8	30.8	23.3	B	416	90	200	2N
37.8	33.1	23.3	C				
41.4	36.1	22.0	D				
49.0	36.1	21.6	E				
42.6	41.0	31.5	B	150	90	200	9N
45.1	42.9	32.0	C				
52.2	50.0	32.2	D				
65.4	50.2	31.6	E				
41.2	34.9	26.6	B	416	60	230	3N
43.6	39.4	25.9	C				
49.4	42.3	26.9	D				
58.8	43.1	28.1	E				
41.8	37.6	27.5	B	416	90	230	4N
46.1	40.9	26.5	C				
50.7	45.1	28.0	D				
62.5	45.0	29.0	E				

## טבלה 2: עומק קרבונציה בבטון שנחשף לתנאי סביבה טבעיים באתר פריזה

עומק קרבונציה טבעית (מ"מ), לאחר:					אשפחה	תכולת מיס ק"ג למ"ק	תכולת אפר פחם ק"ג למ"ק	תכולת צמנט ק"ג למ"ק	מס. תערובת
24 חודשים על גג המכון	12 חודשים על גג המכון	6 חודשים על גג המכון	3 חודשים על גג המכון	3 חודשים במעבדה 20°C/60%RH					
12.13	9.57	8.07	8.07	5.83	B	164	0	200 יציקה: 25.5.03	5N
10.93	8.53	6.90	6.90	5.07	C				
10.17	8.17	6.47	6.47	4.87	D				
9.53	6.83	5.57	5.07	3.33	E				
12.63	9.73	7.97	7.80	6.57	B	150	0	200 יציקה: 11.5.03	7N
10.26	8.03	6.90	6.40	4.77	C				
9.67	7.20	6.10	5.20	4.27	D				
8.57	6.10	5.27	4.80	2.70	E				
9.43	6.87	6.47	6.47	5.17	B	164	0	230 יציקה: 25.5.03	6N
8.93	6.23	5.53	5.47	3.90	C				
7.93	5.83	4.60	4.60	3.60	D				
7.13	4.93	3.90	3.87	2.27	E				
10.23	8.27	6.67	6.63	5.63	B	150	0	230 יציקה: 18.5.03	10N
8.50	6.67	5.63	5.40	4.23	C				
8.47	6.10	4.97	4.97	3.73	D				
6.37	4.63	3.97	3.97	1.87	E				
10.32	7.76	7.07	5.71	6.10	B	164	60	200 יציקה: 11.5.03	1N
11.00	8.08	7.40	5.75	4.67	C				
9.77	7.63	6.95	5.40	4.20	D				
8.84	5.83	5.10	3.78	2.17	E				
10.33	8.23	7.43	6.73	5.97	B	150	60	200 יציקה: 6.4.03	8N
9.33	6.97	5.90	5.53	4.60	C				
8.23	6.33	5.20	5.03	3.47	D				
7.23	4.93	3.97	3.57	2.03	E				
9.50	7.71	6.73	5.43	5.40	B	164	90	200 יציקה: 6.4.03	2N
9.76	8.03	7.23	6.13	4.77	C				
9.41	7.10	6.33	5.13	4.00	D				
7.97	6.33	4.85	3.80	2.23	E				
8.60	7.43	6.50	6.23	5.10	B	150	90	200 יציקה: 18.5.03	9N
8.20	6.67	5.57	5.03	4.13	C				
6.60	5.73	4.57	4.57	3.53	D				
5.83	4.70	3.37	3.13	1.90	E				
8.47	6.57	6.37	5.83	5.13	B	164	60	230 יציקה: 27.4.03	3N
7.20	6.07	5.43	4.77	3.87	C				
6.67	5.20	4.60	4.37	3.40	D				
6.17	4.60	3.57	3.27	1.90	E				
9.43	7.97	6.57	6.57	5.17	B	150	90	230 יציקה: 27.4.03	4N
7.73	6.63	6.07	5.63	4.33	C				
7.13	5.93	5.13	4.67	3.53	D				
6.47	5.07	3.67	3.27	1.70	E				



## נספח ב'

### השוואת תוצאות קרבונציה וחוזק מחקר נוכחי וקודם

#### כללי

במחקר הנוכחי והקודם נבחנה היעילות של אפר פחם כתחליף לצמנט, בכל הקשור לתפקוד לחוזק, קרבונציה וחזירות לכלורידים.

היעילות לקרבונציה נבחנה בעיקר בתערובות עם תכולות של צמנט בטווח של 200 – 270 ק"ג/מ"ק ותכולות אפר עד כ- 150 ק"ג/מ"ק. בשני המחקרים נבחנו מדגמי אפר בעלי תכולה נמוכה וגבוהה של הפסד בקלייה, LOI. המחקר הראשון התמקד בתערובות בעלות תכולת מים של כ- 185 ליטר/מ"ק ובמחקר השני נבחנה גם השפעת תכולת המים, 165 ו- 180 ליטר/מ"ק, וזאת כדי לבחון תזה שהוצעה שבתערובות בעלות תכולת מים נמוכה יותר היעילות של האפר תהיה טובה יותר.

ניתוח של תוצאות המחקר השני מראה שבאופן עקבי, מקדמי היעילות שהתקבלו בו נמוכים בהרבה מאלה של המחקר הראשון, גם בתערובות שהיו בעלות תכולת מים דומה.

מטרת מסמך זה היא לרכז נתונים השוואתיים בין שני המחקרים כדי לנסות ולעמוד על מהות ההבדלים.

#### הרכב חומרי הגלם

בטבלה 1 נערכת השוואה בין מדגמי האפר שנבחנו בשני המחקרים. ניתן לראות שבאופן עקבי האיכות של האפר במחקר השני טובה יותר מאשר בראשון, כפי שבאה לידי ביטוי בערכי ה- LOI (נמוכים יותר במחקר הנוכחי), ערכי האקטיביות הפוצולנית (גבוהים יותר במחקר הנוכחי) וערכי דקות האפר (גבוהים יותר במחקר הנוכחי).

טבלה 1: השוואה בין הרכב אפרי הפחם בשני המחקרים

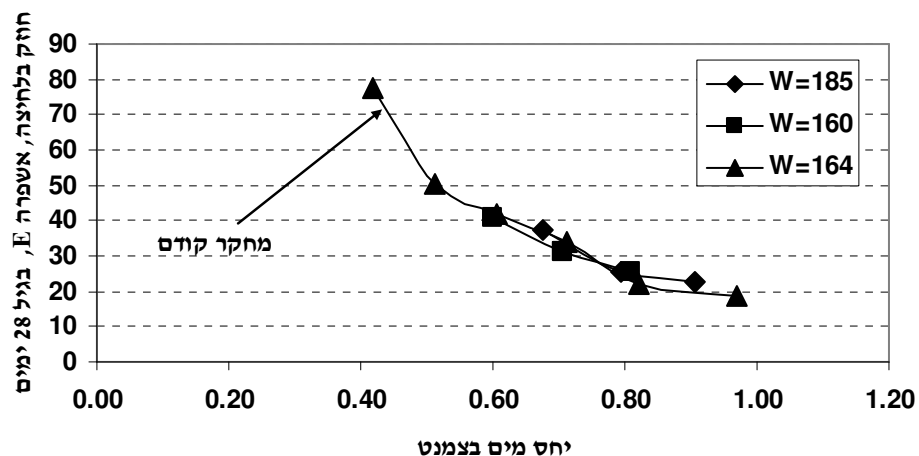
מחקר קודם		מחקר נוכחי		תכונה
7.5	4.1	6.12	1.42	LOI
0.77	0.83	0.913	0.905	מקדם פוצולניות
4850	3600	5491	4424	דקות

בטבלה 2 מוצגים ההרכבים של הצמנטים ששמשו בשני המחקרים. שני הצמנטים הם בקטגוריה של CEM II, וההבדלים בהרכב הכימי הם קטנים, אך ייתכן ולא חסרי משמעות. הצמנט הקודם הוא בעל תכולה גבוהה יותר של CaO ו-SiO<sub>2</sub>, תכולה נמוכה יותר של LOI וצפיפות גבוהה יותר. האם ניתן להעריך שהוא פעיל יותר במובן של מוצרי ההידרציה שיהיו יעילים יותר בשפעול האפר? כדי לבחון היבט זה מן הראוי להתייעץ עם מומחי "נשר".

השוואה בין עקומי חוזק-מנת מים של שני הצמנטים לא מצביעה על הבדל ביניהם (ציור 1), אך זו לא בהכרח אינדיקציה להבדלים ביכול השפעול שהיא תלויה בהרכב הכימי.

טבלה 2: השוואה בין הרכב הצמנטים

מרכיב	מחקר נוכחי	מחקר קודם
CaO	57.3	59.5
SiO <sub>2</sub>	19.8	21.8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.13	7.20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.27	3.40
MgO	1.00	1.10
TiO <sub>2</sub>	0.37	0.47
K <sub>2</sub> O	0.67	0.44
Na <sub>2</sub> O	0.24	0.26
LOI total	5.16	3.20
שטח פנים, ג"מ/סמ"ר	3710	3490
צפיפות ג"מ/סמ"ק	3.020	3.061

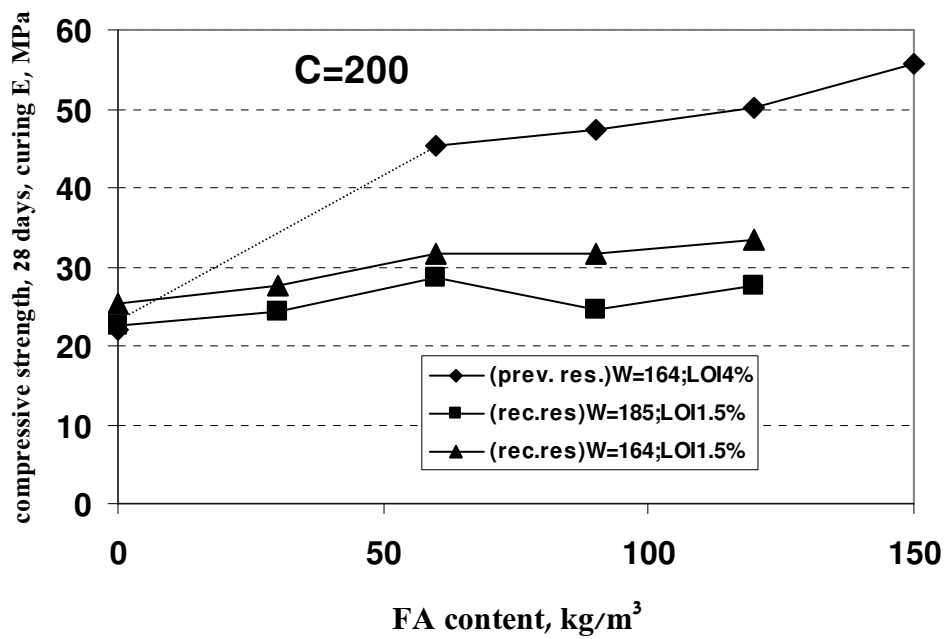


ציור 1: השוואה בין עקומי חוזק-מנת מים של בטונים שהוכנו בשני המחקרים

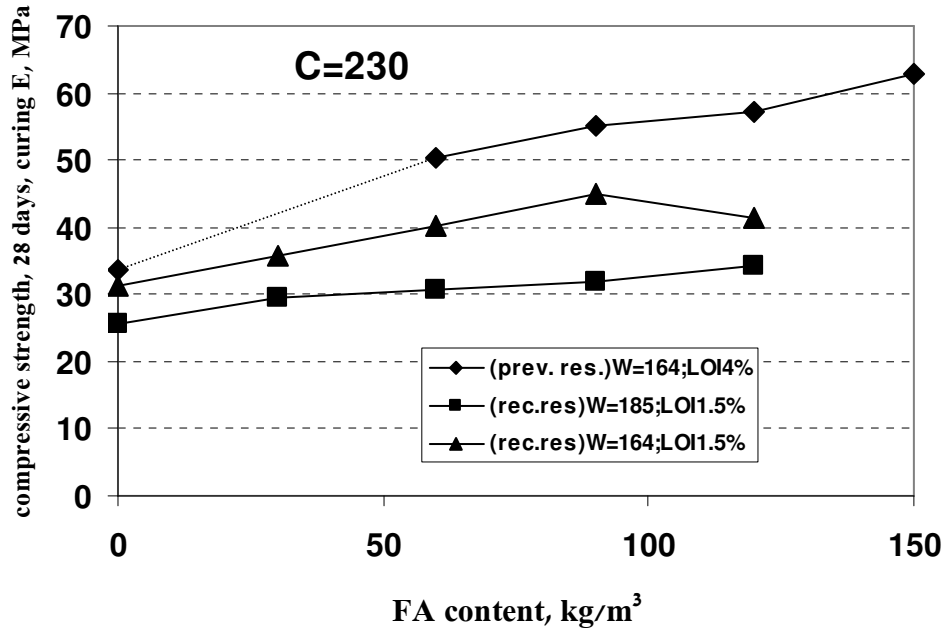
## חוזק

עקומים טיפוסיים המתארים את החוזק בגיל של 28 ימים בתלות בתכולת אפר הפחם, תוך השוואה בין תוצאות המחקר הנוכחי והקודם מוצגים בציור א-2 ובציור א-3.

ניתן לראות שבשני המחקרים החוזק של תערובות הייחוס היה למעשה זהה (כפי שניתן לצפות מהתוצאות המוצגות בציור א-2), אך במחקר הקודם תוספת החוזק עקב נוכחות האפר הייתה הרבה יותר גבוהה.



ציור א-2: השוואה בין עקומי חוזק-תכולת אפר בתערובות עם 200 ק"ג צמנט למ"ק בטון. אשפרה רציפה במים עד לגיל 28 ימים (אשפרה E)

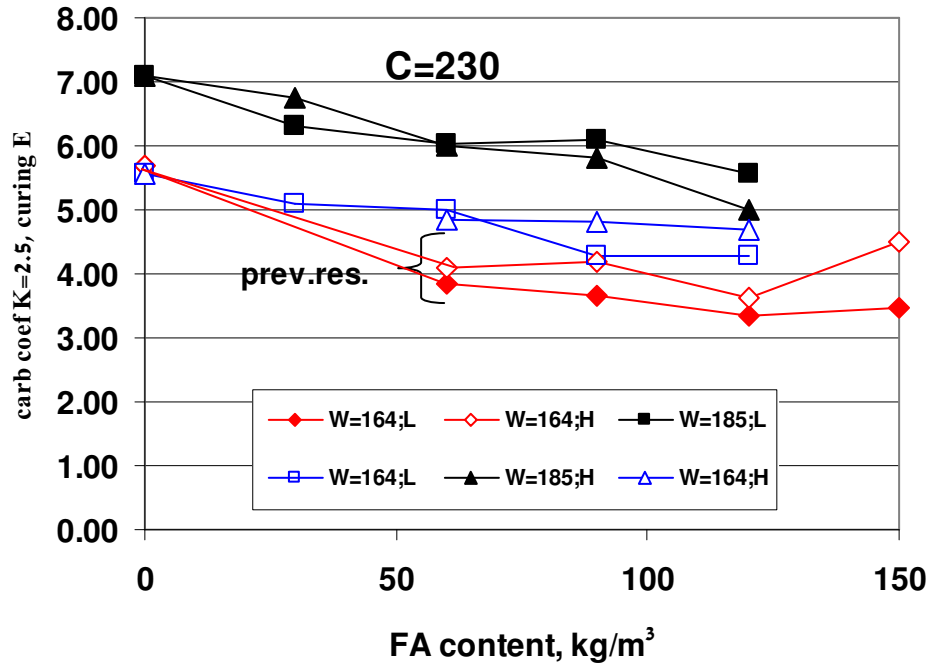


ציור א-3: השוואה בין עקומי חוזק-תכולת אפר בתערובות עם 230 ק"ג צמנט למ"ק בטון. אשפרה רציפה במים עד לגיל 28 ימים (אשפרה E)

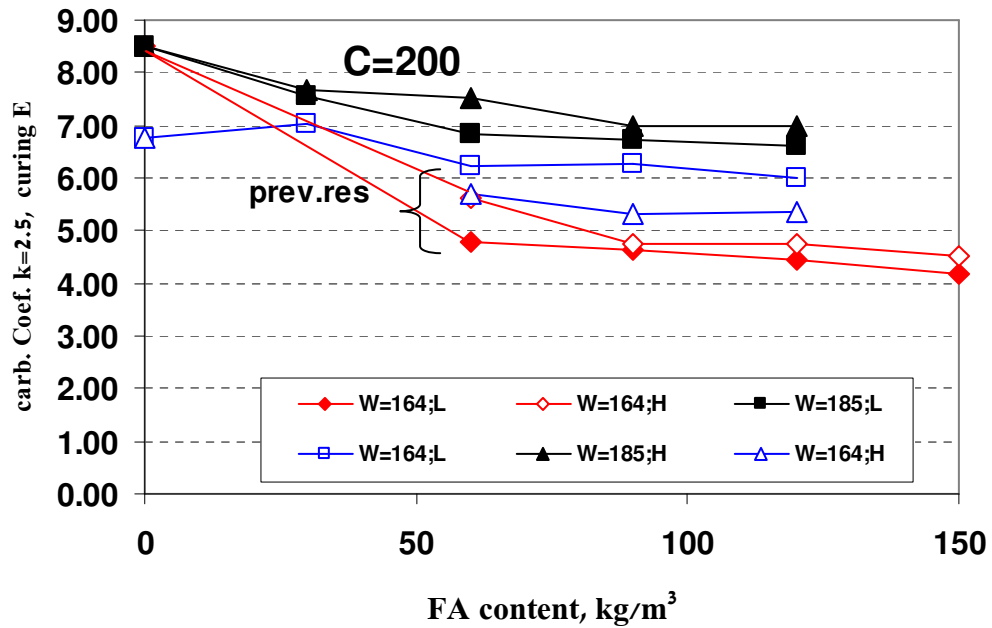
פרוט ברמה גבוהה יותר מוצג בעקומים בנספח א' שם מוצגים עקומים משני המחקרים הכוללים גם את שני סוגי האפר בכל מחקר.

### קרבוניציה

עקומים טיפוסיים של מקדמי קרבוניציה בתלות בתכולת האפר מוצגים בציור א-4 ובציור א-5. גם כאן ניתן לראות שמדגמי האפר מהמחקר הקודם הנם יעילים יותר, וזה בא לידי ביטוי בהקטנה גדולה יותר של מקדמי הקרבוניציה עם הגידול בתכולת האפר.



ציור א-4: השפעת תכולת האפר על מקדמי הקרבוניציה עבור מדגמי אפר מהמחקר הקודם (קווים אדומים) ומהמחקר הנוכחי (קווים כחולים עבור בטונים עם תכולת מים של כ- 165 ליטר/מ"ק בטון, קווים שחורים עבור בטונים עם תכולת מים של כ- 185 ליטר/מ"ק בטון); בטונים עם 230 ק"ג/מ"ק.



ציור א-5: השפעת תכולת האפר עם מקדמי הקרבוניציה עבור מדגמי אפר מהמחקר הקודם (קווים אדומים) ומהמחקר הנוכחי (קווים כחולים עבור בטונים עם תכולת מים של כ- 165 ליטר/מ"ק בטון, קווים שחורים עבור בטונים עם תכולת מים של כ- 185 ליטר/מ"ק בטון); בטונים עם 200 ק"ג/מ"ק.

## מקדמי יעילות

השוואה של מקדמי היעילות שהתקבלו בשני המחקרים מוצגת בטבלה א-3. כפי שניתן לצפות מהתוצאות המוצגות בציור א-2 עד ציור א-5. מקדמי היעילות הן לחוזק והן לקרבונציה היו הרבה יותר גבוהים במחקר הקודם.

**טבלה א-3: מקדמי יעילות לחוזק ולקרבונציה – השוואה בין המחקר הקודם והנוכחי**

מקדמי יעילות (K strength factor)												תכולת מימ, ק"ג למ"ק	תכולת צמנט, ק"ג למ"ק	ייחוס, ללא אפר	אפר
מקדמי יעילות לחוזק בתנאי אשפרה:															
E				D				C				B			
1% LOI		6% LOI		1% LOI		6% LOI		1% LOI		6% LOI		1% LOI		6% LOI	
90 ימים	28 ימים	90 ימים	28 ימים	90 ימים	28 ימים	90 ימים	28 ימים	90 ימים	28 ימים	90 ימים	28 ימים	90 ימים	28 ימים	90 ימים	28 ימים
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.55-0.38	0.62	0.30	0.30	0.63-0.36	0.47-0.42	0.00	0.00	0.5-0.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.44	0.35
1.4	1.4	1.6	0.8	2.2	2.2	1.2	1.3	1.7	1.2	1.2	1.0	1.4	1.3	1.3	1.2
4.1% LOI		7.5% LOI		4.1% LOI		7.5% LOI		4.1% LOI		7.5% LOI		4.1% LOI		7.5% LOI	
0.3-0.6	0.3-0.8	0.00	0.35	0.00	0.25	0.00	0.00	0.4-0.6	0.3-0.5	0.00	0.00	0.33	0.00	0.33	0.00
0.55-0.27	0.56	0.50	0.50	0.00	1.0	0.00	0.56	0.25	0.00	0.26	0.38	0.25	0.00	0.33	0.33
1.4	1.1	1.4	0.8	1.3	0.9	1.3	0.6	0.8	0.7	0.9	0.8	0.9	0.7	0.9	0.7
4.1% LOI		7.5% LOI		4.1% LOI		7.5% LOI		4.1% LOI		7.5% LOI		4.1% LOI		7.5% LOI	

מקדמי יעילות (K life cycle factor)												תכולת מימ, ק"ג למ"ק	תכולת צמנט, ק"ג למ"ק	ייחוס, ללא אפר	אפר
מקדמי יעילות – מחזור חיים - קרבונציה מואצת:															
E				D				C				B			
1% LOI		6% LOI		1% LOI		6% LOI		1% LOI		6% LOI		1% LOI		6% LOI	
n=2.5	n מחושב	n=2.5	n מחושב	n=2.5	n מחושב	n=2.5	n מחושב	n=2.5	n מחושב	n=2.5	n מחושב	n=2.5	n מחושב	n=2.5	n מחושב
0.00	0.00	0.36	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.5-0.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.5		1.8		3.3		1.2		0.7		0.8		0.5		0.9	
4.1% LOI		7.5% LOI		4.1% LOI		7.5% LOI		4.1% LOI		7.5% LOI		4.1% LOI		7.5% LOI	
0.63	0.50	0.36	0.33	0.30	0.30	0.00	0.00	0.25	0.25	0.00	0.00	0.25	0.33	0.00	0.00
0.30	0.30	0.45-0.3	0.4-0.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.4-0.3	0.00	0.00	0.00	0.00
1.0		0.6		0.5		0.6		0.9		0.9		1.1		0.8	
4.1% LOI		7.5% LOI		4.1% LOI		7.5% LOI		4.1% LOI		7.5% LOI		4.1% LOI		7.5% LOI	

באפור – ממחקר קודם

## שאלות לדיון

לא ניתן לנתח את תוצאות המחקר הנוכחי לחגבי מקדמי היעילות של מדגמי האפר השונים מבלי לתת את הדעת ולהבין את מקור ההבדלים בין שני המחקרים. במחקר הנוכחי מגיעים למקדמי יעילות משמעותיים רק בתנאי אשפרה של 28 ימים במים, ולא ניכר הבדל משמעותי בין שני סוגי האפר וגם לא יתרון חד משמעי לתערובות עם תכולת המים הנמוכה יותר, אם כי יש יתרון קטן אך לא בולט, כפי שרואים מציור א-2 וציור א-3. גם במחקר הקודם, אשר שם מקדמי היעילות היו גבוהים יותר, הייתה נטייה ליתרון לאפר בעל LOI נמוך יותר, אך הוא לא היה דרסטי.

השוואה בין מקדמי היעילות בשני המחקרים מראה שמקדמי היעילות הטיפוסיים שונים בהרבה, והם גדולים במידה ניכרת מאשר ההבדלים בין מדגמי האפר בכל מחקר בפני עצמו. מכאן עולה השאלה האם מבחינה מעשית התלות של מקדמי היעילות היא בפרמטרים אחרים מאשר הרכב האפר בטווחים שנבדקו כאן? האם זה יכול להיות הרכב הצמנט? בהקשר זה כדאי לציין שלפי ה-EN 206 מקדמי היעילות בצמנט CEM I גבוהים פי 2 מאשר בצמנט CEM II.

