



מיסודם של  
משרד הבינוי והשיכון

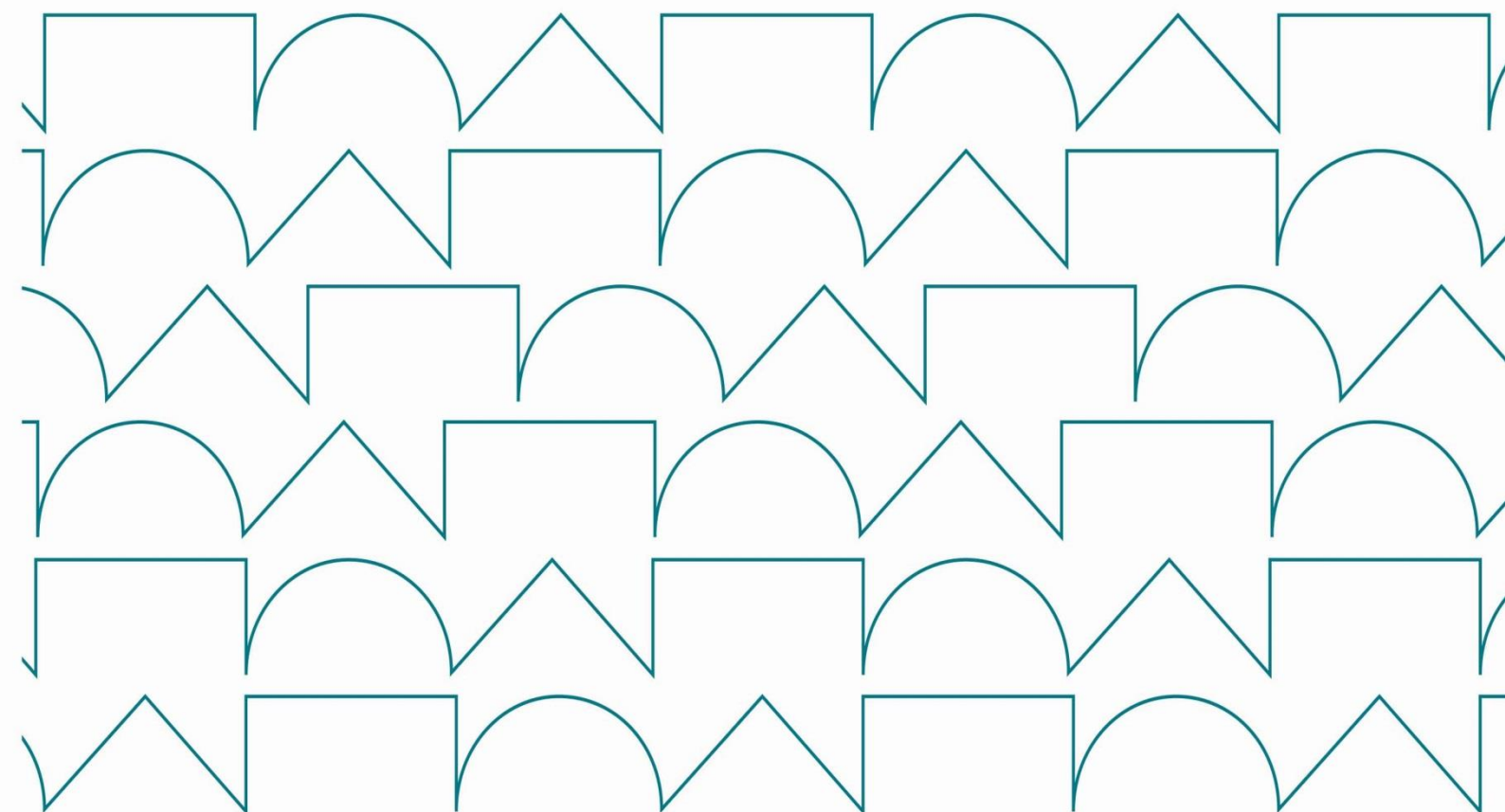


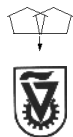
הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל  
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

## המכון הלאומי לחקר הבנייה

### תשתית טכנולוגית להקטנת תכולת הקלינקר בבטון: אפר פחם עם צמנט CEMII

עמית קני      ארנון בנטור





מיסודם של Founded by

משרד הבינוי והשיכון MINISTRY OF CONSTRUCTION AND HOUSING

הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל TECHNION ISRAEL INSTITUTE OF TECHNOLOGY

הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית Faculty of Civil & Environmental Engineering

**NATIONAL  
BUILDING  
RESEARCH  
INSTITUTE** המכון  
הלאומי  
לחקר  
הבנייה

---

2016421

# תשתית טכנולוגית להקטנת תכולת הקלינקר בבטון: אפר פחם עם צמנט CEMII

ד"ר עמית קני פרופ' ארנון בנטור

הוזמן על ידי מנהלת אפר הפחם

מס' הזמנה 38221

Copyright © 20014 by A. Kenny and A. Bentur  
The National Coal Ash Board and The Technion Research and Development  
Foundation, Ltd, Haifa

מרץ 2014

חיפה

אדר ב' תשע"ד

"למען הסר ספק מודגש בזאת כי החוקר/ים, מוסד הטכניון למחקר ופיתוח בע"מ והטכניון – מכון טכנולוגי 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 ו/או לצד ג' כלשהו, עקב המחקר ו/או דו"ח זה או בהקשר אל מי מהם כמו גם בקשר ליישום האמור בו. מבלי לגרוע מן האמור לעיל, מובהר בזאת כי יישום תוצאות המחקר יהיה באחריותו הבלעדית של המיישם".

## תוכן עניינים

.....	תקציר
<b>1</b> .....	<b>1. מבוא</b>
1 .....	1.1 רקע כללי
2 .....	1.2 תקינה
3 .....	1.3 סקירה עדכנית של הספרות
8 .....	1.4 מטרת המחקר
<b>9</b> .....	<b>2. מערכת הניסויים</b>
9 .....	2.1 תוכנית המחקר
9 .....	2.2 חומרים
15 .....	2.3 תערובות ניסיון
17 .....	2.4 הרכב התערובות
18 .....	2.5 בדיקות
<b>18</b> .....	<b>3. תוצאות</b>
18 .....	3.1 תכונות התערובות
20 .....	3.2 יעילות במדגמי מלט – בדיקות תקניות
22 .....	3.3 חוזק ויעילות בבטון
29 .....	3.4 מקדם היעילות במלטים (בדיקת EN 450) בהשוואה ליעילות הנמדדת בבטונים
31 .....	3.5 קצב התפתחות החוזק
37 .....	3.6 קיים
38 .....	3.7 ניתוח תוצאות של בדיקות תקניות מתמשכות שבוצעו במעבדות בדיקה
<b>43</b> .....	<b>4. מסקנות</b>
<b>45</b> .....	<b>5. רשימת ספרות</b>
.....	Abstract

## תקציר

המחקר עוסק באפיון ההתנהגות של סוגים שונים של אפר פחם בבטונים העשויים מצמנט מסוג CEM I ו- CEM II במטרה לבחון את היעילות של אפר הפחם המשולב בבטון עצמו כמרכיב נפרד ולברר האם השימוש בצמנטים מעורבים מקטין את יעילות האפר בבטון.

הניסויים כללו אפיון של תערובות בטון עם תכולות שונות של צמנט ותוספות של אפר פחם מרחף, וכן גם תכולות דומות לאפר של מלאן אבן גיר בעל פילוג חלקיקים דומה כדי לאפיין אפקטים כימיים ופיזיקליים (אפקט מלאן). במקביל נבחנו גם תערובות מלט להגדרת אקטיביות פוצולנית כמקובל בתקנים. הבדיקות כללו חוזק ופרמטרים של קיים שנקבעו באמצעות מבחני חדירה למים ואוויר.

המסקנות העיקריות:

1. לא נמצאה קורלציה ברורה בין האקטיבציה כפי שנקבעה בבדיקה התקנית במלט ובין האקטיבציה שהתקבלה בפועל בבטון. מדגם האפר שאופיין במקדם האקטיבציה הנמוך ביותר במלט היה אמנם החלש ביותר בבטון, אך ההבדלים בינו ובין האחרים בבדיקת המלט היו קטנים בעוד שבבטון הם היו גדולים.
2. תוצאות בדיקות תקניות במלט לא הראו באופן ברור יתרון למערכות עם צמנט CEM I וניתן אף לומר שהייתה אינדיקציה למגמה הפוכה. נראה על כן שההנחיה בתקן למקדם יעילות עבור CEM II בשיעור של חצי מ- CEM I (0.2 לעומת 0.4) איננה מבוססת ויש לבדוק כל מקרה לגופו.
3. ניתוח התפתחות החוזק בבטונים עם אפר פחם מראה שכל מערכת ניתנת לאפיון על יד שני פרמטרים, האחד הוא הזמן האופייני והשני הוא החוזק הסופי. באמצעות שני אלה ניתן לחשב את האקטיביות בבטון ואת השינויים בה על ציר הזמן.
4. העדר קשרי גומלין ברורים בין האקטיביות התקנית במלטים ובין התפקוד בפועל בבטון ניתנת להסבר בכך שיש להביא בחשבון בנוסף לאפקט הפוצולני גם אפקט של מלאן אשר השפעתו שונה בבטונים ומלטים. אפקט זה קשור כנראה בפילוג גודל החלקיקים של הצמנט והאפר.
5. המשמעות של מסקנות אלה שהבדיקה התקנית של אקטיביות פוצולנית איננה מספקת לצורך חיזוי מדויק של התנהגות האפר בבטון וגם לא לחיזוי האינטראקציה בינו ובין צמנטים מסוג צמנט CEM I ו- CEM II, ויש צורך באפיון ישיר של ההתנהגות בבטון. פיתוח של בדיקות פשוטות ומהירות יותר שיאפשרו חיזוי על בסיס ההרכב הכימי והפיזיקלי של האפר מחייב כנראה הבנה טובה יותר של השפעת פילוג גודל החלקיקים של הצמנט והאפר בכל הקשור לאפקט מלאן.
6. התוצאות בעבודה זו מאששות מסקנות של בדיקות קודמות המראות שניתן להפיק מאפר פחם יעילות בבטון מצמנט CEM II שאינה נופלת מזו המתקבלת במערכת צמנט CEM I. יש להניח שהדבר קשור באופטימיזציה של פילוג גודל החלקיקים. מבחינה מעשית פרוש הדבר שהחיסכון בקלינקר בצמנט על ידי תוספת מוספים מינרליים אינה חייבת בהכרח לפגוע באקטיביות של מוספים מינרליים המשולבים ישירות בבטון.
7. בבטונים שנבדקו כאן, נמצא שללא תלות בהרכב אפר הפחם היה שיפור בהתנגדות לחדירה של אוויר ומים לתוך הבטון למרות האשפורה המוגבלת במים. שיפור זה משמעותו שהקיים של

בטונים אלה איננו פחות טוב מזה של בטונים מצמנט בלבד, למרות האשפורה המוגבלת. יש לציין שהאשפורה כאן היא אמנם מוגבלת, 7 ימים במים, אך זו האשפורה המינימלית הנדרשת על פי תקנים ומפרטים לביצוע בשטח. הקטנת משך האשפורה מתחת לזמן זה עלולה לגרום לפגיעה באכות הבטון עם אפר פחם מנקודת מבט של קיים ולכך יש סימוכין בעבודות קודמות.

## 1. מבוא

### 1.1 רקע כללי

המגמה הבולטת היום בתחום תעשיית הצמנט והבטון הנה מעבר להרכבים המכילים כמויות קטנה ככל האפשר של קלינקר מצמנט פורטלנד, וזאת תוצאה של שיקולים כלכליים ואקולוגיים. מגמה זו תלך ותגבר על ציר הזמן, וזאת כפועל יוצא של שיקולים סביבתיים אשר כבר היום באים לידי ביטוי באופן חלקי בחוקים ובתקנות בעלי "שיניים" כלכליות. המסע על דו תחמוצת הפחמן הוא אולי הסנונית הראשונה, והוא עצמו כבר יצר טלטלה די רצינית בתעשיית הצמנט והבטון.

הקטנת תכולת הקלינקר יכולה להתבצע בשתי צורות עיקריות, האחת בתעשיית הצמנט ע"י ייצור צמנטים מעורבים אשר תיפקודם דומה או אף עולה בהיבטים מסוימים על צמנט רגיל, או בתעשיית הבטון ע"י הכנת תערובות בטון אשר בהן התוסף המינרלי משולב כמרכיב נפרד בתערובת, ותכולת הצמנט מוקטנת. שתי הגישות מקובלות כיום, לכל אחת יתרונות וחסרונות והשימוש בהן תלוי בעיקר בזמינות של תוספים מינרליים בעלי איכות מתאימה ויציבה על ציר הזמן. בשתי צורות השימוש בתוספים מינרליים יש צורך במערכת מתקדמת של אבטחת איכות ואמינות וכן גם רמה מקצועית גבוהה של תהליך הייצור, כך שיתאפשר בחירה ושימוש נכונים בתוספים מינרליים אשר איכותם וזמינותם עלולה להשתנות על ציר הזמן.

היעילות של שתי הגישות להקטנת תכולת הקלינקר מגובה כיום על יד טכנולוגיות מתקדמות של מוספים משפרי עבידות. מוספים אלה יכולים לאפשר את ההקטנה במנת המים ובכך לפצות על אקטיביות כימית נמוכה יחסית ולאפשר השגת חוזק מתאים בגיל צעיר גם במערכות אשר בהן התרומה לחוזק של המרכיבים המינרליים באה לידי ביטוי רק בגילים מאוחרים יותר. למוספים הללו יכול להיות גם תפקיד נוסף והוא שפעול בעל אופי מכני של המרכיבים האינרטיים יותר במערכת – הם מאפשרים פיזור טוב יותר של החלקיקים הדקים במערכת (שבדרך כלל כלולים במרכיבים של התוספים המינרליים) ומקנים להם אפקט מלאן (משמשים כ"מיקרו-אגרגט" משריין בעל כושר הדבקה גבוה למוצרי ההידרציה סביבו) או הוספת גרעיני נוקליאציה המשפרים את אחידות המערכת הצמנטית. את האפקט הזה ניתן לשלב גם בטכנולוגיות המתבססות על פילוג אופטימלי של החלקיקים הדקים במערכת: צמנט, תוספים מינרליים ומלאנים. לתעשיית הבטון והצמנט מודעות לאפקטים כאלה והדבר מוצא את ביטויו בארץ בשימוש במלאן אבן גיר, אותו ניתן לשלב בצמנט עצמו או בבטון באופן ישיר או בעקיפין דרך האבק באגרגט גרוס.

לאור הפרגמנטציה האופיינית לתעשיית הבנייה, הסקטורים היצרניים השונים (יצרן הצמנט, ספק/יצרן תוספים מינרליים- בעיקר אפר פחם, ויצרן הבטון) מנסים כל אחד בתחומו להשיג אופטימיזציה כדי למנף את היעילות והערך המוסף של המוצר שלו, מבלי שיש תאום טכנולוגי על פני כל המשולש צמנט-תוספים מינרליים (אפר פחם)-מוספים כימיים. על רקע זה אנו עדים לשינויים משמעותיים בתעשיית הצמנט הבאה לידי ביטוי בהחדרה מסיבית של השימוש בצמנטים מעורבים מסוגים שונים. בשלב זה מדובר בעיקר בצמנטים עם תכולות של עד 20% תוספים מינרליים (בעיקר מסוג CEMII) ויש כבר היערכות לצמנטים עם תכולות גבוהות יותר. במקביל, לא נערכה בחינה מעמיקה של מדת היעילות של אפר פחם אותו מוסיפים לבטון העשוי מצמנט מעורב. ההנחה הרווחת שהיעילות תקטן איננה בהכרח נכונה, כפי שמסתבר בתוצאות של מחקרים שנערכו לאחרונה. על רקע זה נוצר צורך לבדוק בצורה שיטתית את היעילות של אפר הפחם בשילוב עם הצמנטים

החדשים העתירים בתוספים מינרליים, וכיצד משפיעות תכונות אפר הפחם על היעילות הפוצולנית בצמנטים אלה.

אפר הפחם משפיע על הבטון בשני מנגנונים:

- מנגנון כימי – בגיל המוקדם על-ידי שינוי הסביבה הכימית בזמן ההידרציה, ובגיל המאוחר על-ידי יצירת גל צמנטי בתגובה פוצולנית.
  - מנגנון פיזיקלי – אפקט מלאן הבא לידי ביטוי באריזה טובה של החלקיקים הקטנים והאצה של ההידרציה של מרכיבי הצמנט על ידי מנגנון נוקלאציה על פני המלאן.
- האינטראקציה בין אפר פחם וצמנט, בעיסות, מלטות ובטונים נחקרה רבות ופורסמו לא מעט סקרים בנושא זה. הסקירה להלן מתייחסת בעיקר לעבודת חדשות שנעשו בשנים האחרונות בתחומים אלה, אשר להן משמעויות לגבי מטרת המחקר כאן, בעיקר בכל הקשור ביעילות בבטונים עצמם ובהפרדה בין אפקט מלאן ואפקט כימי (פוצולני).

## 1.2 תקינה

היעילות הפוצולנית של תוספים פוצולנים באה לידי ביטוי בת"י 466, כאשר בחישוב יחס מים לצמנט לצורכי קיים, מוסיפים את אפר הפחם לצמנט, עם מקדם יעילות התלוי בסוג צמנט, כאשר לצמנט מסוג CEM I המקדם הוא 0.4, ועבור צמנט מסוג CEM II המקדם הוא 0.2, כאשר תכולת אפר הפחם בה ניתן להשתמש לצרכי קיים מוגבלת ל- 100 ק"ג, ולא יותר משליש משקל הצמנט. מקדמים אלה מבוססים על דרישות בתקן האירופאי EN206.

התקן האירופאי EN 450 והתקן האמריקאי ASTM C617 מגדירים את הדרישות מאפר פחם. הבדיקות לאפר פחם מוגדרות בתקן האירופאי EN 196, EN 450, ובתקן האמריקאי ASTM C618 ו- ASTM C311.

היעילות הפוצולנית לצורך חוזק של תוספים פוצולנים מוערכת על-ידי בדיקה ע"פ ASTM C311, או EN 450 והיא מבוצעת במדגמי מלט. מקדם היעילות הפוצולנית מוצג כיחס בין החוזק המתקבל במלט תקני המכיל 75% צמנט ו- 25% תוסף, ובין החוזק המתקבל במלט תקני המכיל 100% צמנט. התקינה האמריקאית דורשת אקטיביות פוצולנית מינימלית של 75% בגיל 7 ו-28 יום. התקינה האירופאית דורשת מינימום של 75% ב- 28 יום, ו- 85% ב- 90 יום.

על פי התקינה, ההרכב הכימי של תוספים פוצולנים, ובכללם אפר הפחם צריך להיות בטווח של ערכים מוגבלים. הפסד בקלייה מירבי מותר לאפר פחם הוא 9.0% לסוג C, 7.0% לסוג B, ו- 5.0% לסוג A (משקלי) בתקינה האירופאית, ו- 6% בתקינה האמריקאית. ריכוז הכלוריד לא יעלה על 0.1% (משקלי), בתקינה אירופאית בלבד. ריכוז הסולפט לא יעלה על 3.0% (משקלי) בתקינה האירופאית, ו- 5% בתקינה האמריקאית. ריכוז הסיד החופשי לא יעלה על 2.5% (משקלי). כאשר הריכוז מעל 1.0% יש לבדוק גם הגדלת נפח במחט לשטליה. ע"פ ASTM יש לבדוק הגדלת הנפח בכל מקרה. התקינה האירופאית מגבילה את ריכוז הסיד האקטיבי ל- 10%. בתקינה האמריקאית מוגדר אפר בעל תכולת סיד חופשי מעל - 10% כאפר מסוג C (אפר כזה מתקבל משריפה של פצלים ולא משריפה של פחם אנטרציט). ריכוז תחמוצות הסיליקון, אלומיניום,



וברזל יהווה לפחות 70% ממשקל האפר (למעט אפר מסוג C). על-פי התקן האירופאי, ריכוז האלקלים לא יעלה על 5% (שווה ערך לנתרן חמצני, משקלי). בתקן האמריקאי קיימת דרישת רשות להגבלת תכולת האלקלים ל-1.5% (שווה ערך לנתרן חמצני, משקלי). ריכוז המגנזיה מוגבל בתקן האירופאי ל-4% (משקלי). עם זאת, על פי EN 450 חזקה על אפר פחם (משריפה של פחם אנטרציט טחון) כי הוא עומד בדרישות הכימיות ועל כן התקן אינו דורש לבדוק עמידה בדרישות אלו.

בנוסף, התקן האמריקאי, ASTM C 618, מגדיר פרמטר מחושב שאינו מהווה דרישת חובה, והוא מכפלת הפסד בקלייה בשארית על נפה 45 מיקרון. קיימת אפשרות לדרישות נוספות של המזמין כמו למשל הצטמקות ביבוש, כליות אויר, והגדלת נפח בתגובה עם אגרגטים סיליקטיים.

התקן האירופאי מגביל את דקות אפר הפחם ל-40% שארית על נפה 45 מיקרון בניפוי רטוב (סוג N), או 12% לסוג S. התקן האמריקאי מגביל את הדקות ל-34% שארית על נפה 45 מיקרון בניפוי רטוב לכל סוגי האפר.

### 1.3 סקירה עדכנית של הספרות

הסקירה המוצגת להלן מתמקדת בידע שדווח בספרות בשנים האחרונות אשר יכול להיות רלוונטי למחקר הנוכחי.

#### אפיון אפר הפחם

##### אפיון כימי

פפדוקיס ושותפיו [Papadakis2002] הציעו למדוד את אחוז הסיליקה האקטיבית בחומר הפוצולני (לפי EN-196-2). הם הראו, שכאשר יש מספיק סיד להגיב עם הערב הפוצולני, מקדם היעילות הפוצולני  $k$  ניתן להערכה ע"י המשוואה הבאה:

$$k = (\gamma_s \cdot f_{s,p} / f_{s,c}) \cdot (1 - a \cdot W / C) \quad \text{משוואה 1}$$

כאשר  $\gamma_s$  – היחס בין הסיליקה האקטיבית לסה"כ הסיליקה בחומר הפוצולני,  $f_{s,p}$  – אחוז משקלי של סיליקה בחומר הפוצולני, ו-  $f_{s,c}$  אחוז משקלי של סיליקה בצמנט,  $a$  – מקדם תלוי גיל השואף ל-0 בגיל שנה. התוצאות הנ"ל אומתו בבדיקה עם בטונים. יוצאים מן הכלל הם חומרים פוצולנים טבעיים, בהם  $k$  המתקבל בשיטה זו הנה הערכת יתר [Papadakis2002]

הצעה מוקדמת יותר [Sharma1993] מצאה קשר בין תגובה עם סיד לבין סיליקה אקטיבית ושטח פנים סגולי, ע"פ הנוסחה האמפירית:

$$L = \left( \frac{F}{1000} \right)^{0.85} \cdot S^{0.8} \quad \text{משוואה 2}$$

כאשר  $L$  – תגובה עם סיד ( $^1\text{kg/cm}^2$ ),  $F$  – שטח פנים סגולי (בליין,  $\text{cm}^2/\text{gr}$ ),  $S$  – אחוז סיליקה מסיסה. תכולה גבוהה של פחם לא שרוף המתבססת על אמצון של הפסד בקלייה (ע"פ LOI) עלולה לגרום לעלייה בתצרוכת המים לקבלת עבירות נתונה, בעוד תכולה נמוכה מקטינה את תצרוכת המים לאותה עבירות [Atis2005].

### אפיון פיזיקלי

את גודל הגרגר של אפר הפחם מודדים באחת מהשיטות הבאות: שטח פנים סגולי ע"י בליין (ASTM C204), אחוז משתייר על נפה  $45\text{ }\mu\text{m}$ , ואיפיון גודל החלקיקים המתקבל מעיבוד תמונה (מיקרוסקופ אור) בהגדלה 500X [Felekoglu2009], או דיפרקציה של אור באורך גל ידוע (שיטה מקובלת בעת האחרונה בזכות מכשור מעבדתי אוטומטי, כגון MasterSizer) נמצא קשר ליניארי בין התוצאות במדידות השונות, כך שלצורך קבלת מתאם, אין חשיבות לשיטת הבדיקה [Felekoglu2009].

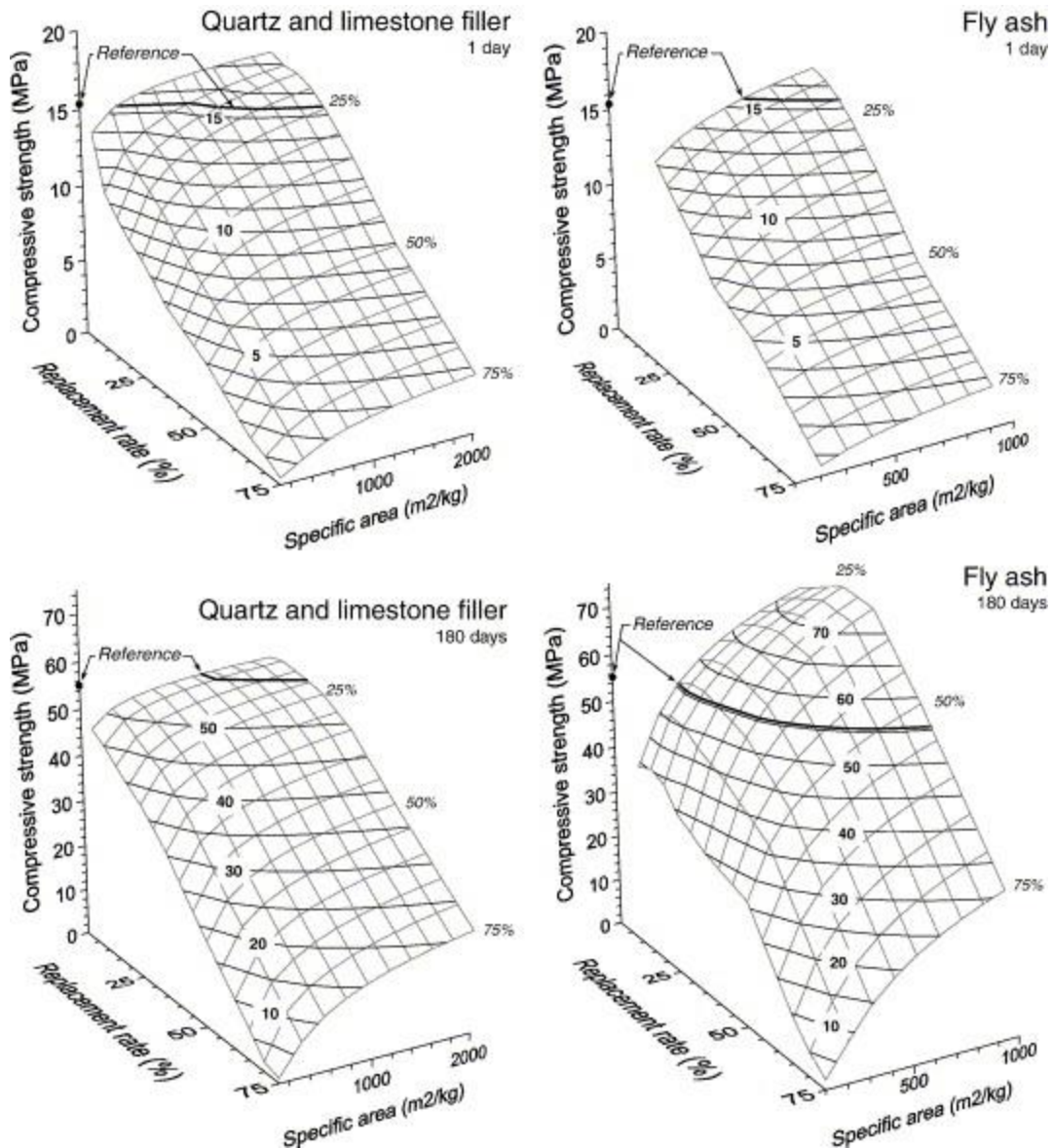
### עבירות

בדרך כלל השילוב של אפר פחם בבטון משפר את העבירות ומקטין את תצרוכת המים הודות למבנה של החלקיקים שהוא עגול ובעל שטח פנים חלק. יחד עם זאת יכולות להיות סטיות ממגמה זו כפי שבא לידי ביטוי בעבודה של [Felekoglu2009]. בניסוי במלטים, תוספת של אפר פחם בדקות של  $262\text{ m}^2/\text{kg}$  גרמה להגדלת תצרוכת המים. טחינה קלה של אפר הפחם לדקות של  $393\text{ m}^2/\text{kg}$  הפחיתה את תצרוכת המים, יחסית לאפר פחם שאינו טחון, אך טחינה נוספת העלתה את תצרוכת המים. בדיקה בריאו-מיקסר העלתה כי תוספת אפר פחם שאינו טחון מעלה את הצמיגות, באופן משמעותי יותר מאפר פחם טחון, וזאת בתלות באחוז אפר הפחם מכלל חומר המליטה, במיוחד כאשר חלקו עולה מעבר ל-20%. מאמץ הכניעה של הבטון הטרי עלה עם אחוז אפר הפחם, ללא תלות בדקות הטחינה. [Felekoglu2009].

### חוזק

בדרך כלל החוזק בגיל מוקדם וגיל 28 יום של תערובות עם אפר פחם הינו נמוך מאשר תערובת בקרה והוא עולה עליה רק בגיל של 28 ימים. בעבודה שבדקה את השפעת שטח הפנים הסגולי של אפר פחם על החוזק נמצא שבגיל 90 יום התקבל חוזק גדול ביותר עבור אפר פחם בדקות טחינה של  $393\text{ m}^2/\text{kg}$ . עבור אפר פחם עם שטח פנים גדול או קטן יותר התקבל חוזק נמוך יותר ביחס לתערובת הייחוס. [Felekoglu2009]. כלומר, לכאורה קיימת דקות טחינה אופטימלית. יש בכך אינדיקציה לחשיבות פילוג החלקיקים בבטון. לדקות הטחינה של תוספים מינרליים יש השפעה על החוזק, והדבר בולט בעיקר בגיל מוקדם, כפי שרואים איור 1 [Cyr2006].

<sup>1</sup>היחידות אינן תואמות. יתכן שמדובר בטעות דפוס במקור



### איור 1: השפעת דקות טחינה וסוג מוסף על החוזק של מלטים בגילים שונים (מתוך - [Cyr2006])

את החוזק של צמנט מעורב המכיל תוספים מינרליים ניתן לחלק לשלושה גורמים:

- דילול הצמנט, ז.א. הגדלה אפקטיבית של מנת המים לצמנט ופועל יוצא הוא חוזק נמוך יותר בעיקר בגיל מוקדם שבו לא באה לידי ביטוי הפעילות הפוצולנית (הקטנת החוזק).
  - אפקט פיזיקלי, בעיקר על ידי יצירת שטחי פנים עליהם מתרחשת נוקלאציה של מוצרי הידרציה וכן גם אפקט של ציפוף פיזיקלי באותם מקרים שמתקבל דרוג טוב של התוספים עם גרגירי הצמנט (הגדלת החוזק)
  - אפקט כימי, יצירת גיל צמנטי על ידי הידרציה של החומר הפוצולני (הגדלת החוזק).
- את ההשפעות האלה ניתן לסכם לפי הנוסחה:

### משוואה 3

$$f_p = f_{dilution} + \Delta f_\phi + \Delta f_{pz}$$

כאשר  $f_p$  - חוזק המתקבל מצמנט מעורב המכיל קלינקר ותוספים מינרליים,  $f_{dilution}$  - החוזק מתקבל מצמנט פורטלנד, לאחר שהוא דולל עקב החלפה בתוסף מינרלי,  $\Delta f_\phi$  - ההשפעה הפיזיקלית של מנגנון מלאן על החוזק,  $\Delta f_{pz}$  - ההשפעה הכימית של תגובה פוצולנית של התוסף המינרלי.

$f_{dilution}$  - באופן ניסוי נמצא ע"י החלפה של תכולת הצמנט במלאן אינרטי גס (שטח פנים סגולי של כ- 20 מ"ר לק"ג). באופן אנליטי ניתן לחשבו ע"י שינוי יחס מים לצמנט מתוך חוק אברהמס או חוק פאוור (במחקר הנ"ל נמצאה התאמה טובה יותר לחוק פאוור).

$\Delta f_\phi$  - באופן ניסוי נמצא ממשוואת החוזק בהחלפת צמנט במלאן אינרטי גס, לעומת החלפה במלאן אינרטי דק. הגישה האנליטית דומה לזו של ההשפעה הפוצולנית.

$\Delta f_{pz}$  - באופן ניסוי נמצא מהפרש החוזק בין תערובות זהות למעט החלפת צמנט בחומר פוצולני או מלאן אינרטי בעל אותו שטח פנים סגולי.

את  $\Delta f_\phi$  ו-  $\Delta f_{pz}$  ניתן לחשב על פי הנוסחה הבאה :

### משוואה 4

$$\Delta f(t) = \frac{a(t)}{1 + \left( \frac{b}{S_{eff}} \right)^c}$$

כאשר  $a$  - מקדם תלוי זמן (גדול יותר עבור האפקט הפוצולני),  $b$  - בקרוב שטח הפנים הסגולי של הצמנט,  $c$  -  $S_{eff}$ , 1 - שטח פנים סגולי אפקטיבי של התוסף, לפי הנוסחה :

### משוואה 5

$$S_{eff} = S_s \cdot \frac{p}{1-p} \cdot \left( \frac{1 + \cos(\pi \cdot p)}{2} \right)^k \cdot \left( 1 + \left( \frac{p}{m} \right)^n \right)^{-1}$$

כאשר  $S_s$  - שטח פנים סגולי של התוסף,  $p$  - שיעור ההחלפה של קלינקר בתוסף, והמקדמים  $k, m, n$  הם מקדמים אמפיריים שבעבודה קודמת [Cyr2005] נמצאו 0.7, 36.8, ו- 3.4, בהתאמה.

בבטונים עם אפר פחם המכילים מוסף מפחית מים מתקבל מקדם יעילות פוצולני גבוה מזה שמתקבל בבטון מקביל ללא מוסף [Atis2005]. יתכן שיש לכך חשיבות מבחינת פיזור אפר הפחם במערכת, לצורך יצירת אפקט המלאן והאפקט הפוצולני.

אפיון על-סמך פעילות פוצולנית מחישוב רמת ההידרציה של אפר פחם ברמת הוספה נמוכה, אפשר למצוא את האחוז המקסימלי של אפר פחם שיכול להגיב. במקרה הספציפי מדובר ב- 37% [Wang2004].

### השפעת יחס תוספים לקלינקר על פעילות אפר-פחם

כאשר אין תוספת של אפר פחם, רק כשלושת רבעי הקלינקר עוברים הידרציה כעבור שנה. כאשר אפר הפחם מהווה 60% מחומר המליטה, כ-98% מהקלינקר עובר הידרציה תוך 3 חודשים. ככול שתכולת אפר הפחם גדולה יותר, ההידרציה של הקלינקר מהירה ומלאה יותר, אבל שיעור התגובה של אפר הפחם נמוך יותר.

[Wang2004]

לתוספת אפר הפחם עצמה יש השפעה חיובית על החוזק שנובעת מאפקט המלאן. השפעה זו היא בעלת משמעות רק בגיל צעיר, והופכת להיות זניחה בגיל 9 חודשים. [Wang2004a]

בנוסף נמצא שמקדם האקטיביות הפוצולנית תלוי גם בתכולת הצמנט, ועולה עם תכולת הצמנט [Oner2005, Yildirim2011].

### תכן תערובת עם אפר פחם

השוני המהותי בין תכן תערובת ללא אפר פחם לתכן תערובת עם אפר פחם הוא קביעת היחס בין המים לחומרי המליטה, עבור יחס נתון בין אפר פחם לצמנט. נמצאו אינדיקציות לכך שתכולת האוויר עולה עם עלייה בהפסד בקלייה (LOI), עד כדי אחוז אחד [Huang2013].

### מודלים אמפיריים

ללא קשר לתהליכים המתרחשים, נמצא קרוב אמפירי המאפשר חיזוי החוזק של בטון המכיל חומר מליטה שבו הוחלף צמנט CEMI באפר-פחם בשיעורים של 10% עד 80%. בספרות דווחו ערכים בטווח רחב, 0.20 עד 1.0 החיזוי מתבסס על נוסחת בולמי (כאשר המשתנה השני הוא בקרוב -0.5, ע"פ [Brandt1995]):

$$f_c = A(t) \cdot (1/\omega - 0.5) \quad \text{משוואה 6}$$

כאשר  $A$  הוא מקדם אמפירי התלוי בסוג הצמנט, ו- $\omega$  הנה מנת המים האפקטיבית המביאה בחשבון את תכולת הצמנט ותכולת האפר כשהיא מוכפלת במקדם יעילות,  $k$ , כפי שמוגדר בתקנים כדוגמת EN 206 (משוואה 7)

$$\omega_{eff} = \frac{W + \Delta A}{C + k \cdot FA} \quad \text{משוואה 7}$$

הערכים של  $k$  בגיל 28 יום יכולים להיות בטווח רחב, בין 0.2 ו-1.0, כאשר במחקר שבוצע במקור [Rajamane2007] דווח על ערכים שנעים בין 0.59 (עבור -80% החלפה) ל-0.88 (עבור 10% החלפה). הערכים של  $k$  שהתקבלו התאימו בקרוב למשוואה:

$$k = 1.20 - 0.14 \cdot \ln(p) \quad \text{משוואה 8}$$

כאשר  $p$  הוא אחוז אפר הפחם מכלל חומרי המליטה. [Rajamane2007]

קרוב אחר לחוזק על-פי [Huang2013] נתון במשוואה 9

$$f_c' = \alpha[1/W/\text{cm} + \beta(FA/\text{cm}) + \gamma]$$

#### משוואה 9

כאשר את הפרמטרים  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  יש למצוא בצורה אמפירית לגיל הרצוי, לכל סוג צמנט ואפר-פחם. משוואה זו שמשה בהצלחה לחיזוי החוזק של בטונים בעלי חוזק רגיל (24 עד 35 מגפ"ס ע"פ התקן הטייוואני), בתכולות אפר פחם של 0-80% מסך חומרי המליטה (כלומר עד פי 4 ממשקל הצמנט). [Huang2013]

מדידה של הידרציה כאשר צמנט ואפר פחם עוברים הידרציה בתערובת - לא ניתן למצוא את שיעור ההידרציה ממשנתה בודד, כמו מים קשורים, נקבוביות, או תכולת הסיד. פתרון שנעשה בו שימוש הוא פתרון שתי משוואות בשני נעלמים, האחת מתייחסת לנקבוביות והשנייה לתכולת הסיד כדי למצוא את ההידרציה של הצמנט ואפר הפחם, כל אחד בנפרד [Wang2004]. הנקבוביות נקבעה ע"י פורוזימטר כספית, ותכולת הסיד ע"י בדיקה תרמו-גרבימטרית. TGA.

#### סיכום ודיון

העבודה המקיפה ביותר בתחום של יעילות מלאנים ותוספים מינרליים במלטות בשנים האחרונות היא של Cyr שמסוכמת ב- [Cyr2006]. עם זאת, עבודה זו מתייחסת לאפקט המלאן ולאפקט הפוצולני כמקשה אחת, ומתעלמת מההבדלים ביניהם. סביר להניח שההשפעה של הכימיה נכנסת למקדם  $a$  במשוואה 4. אם נשתמש במשוואות 3-5 על מנת למצוא את התנהגות החוזק, יתכן שלצורך ההתחשבות בכימיה מספיק למצוא קורלציה בין  $a$ , מקדם השפעה על החוזק, של משוואה 4, ל- $k$ , מקדם היעילות הפוצולנית, במשוואות 1 ו-7.

מאחר ולשטח הפנים הסגולי השפעה משמעותית על החוזק, הן עקב אפקט המלאן, והן עקב השפעה על הפעילות הפוצולנית, יש מקום להתייחס אל ערבול הבטון כאל טחנת כדורים. בנוסף יש לזכור כי בבטון יש שימוש במוספים פעילי שטח (מפחיתי מים למיניהם). יתכן שהגורם לשוני בין תפקוד אפר פחם במלטות לעומת תפקודו בבטונים נובע משטח הפנים האפקטיבי, זאת כנראה עקב טחינה ופיזור של אפר הפחם, בערבול בטון, ובנוכחות מפחיתי מים, שאינה מתקיימת בבדיקה התקנית (מלטות).

דווקא בבטונים בעלי יחס גבוה של אפר פחם לקלינקר ניתן לצפות להתפתחות חוזק מהירה יותר ביחס לבטון בקרה, וזאת עקב המסה מהירה יותר של הקלינקר, כתוצאה של מירידה בריכוז הסידן בתמיסה (שהגיב עם החומר הפוצולני).

#### 1.4 מטרת המחקר

אפיון ההתנהגות של סוגים שונים של אפר פחם בבטונים העשויים מצמנט מסוג CEMI ו- CEMII במטרה לבחון את היעילות של אפר הפחם המשולב בבטון עצמו כמרכיב נפרד ולברר האם השימוש בצמנטים מעורבים מקטין את יעילות האפר בבטון.

## 2. מערכת הניסויים

### 2.1 תוכנית המחקר

המחקר התבסס על בחינה של תערובות בטון המכילות אפר פחם יחסית לתערובות בקרה ללא אפר פחם. המחקר התמקד באפיון בטונים רגילים, בטווח חוזק של ב-30 – ב-40. תערובות הבקרה היה בתכולת מים קבועה של 160 ק"ג מים למ"ק בטון, עם תכולת צמנט של 230 ו-270 ק"ג/מ"ק. התערובות עם אפר הפחם היו על בסיס של 230 ק"ג/מ"ק צמנט, אשר אליה הוספו 100 ק"ג/מ"ק אפר (על חשבון החול הדק), מתוך מטרה להגיע לביצועים אקוויולנטיים לתערובת הבקרה עם 270 ק"ג/מ"ק צמנט (דהיינו החלפה של 40 ק"ג צמנט ב-100 ק"ג של אפר מתוך כוונה לבחון את מידת היעילות של החלפה זו). לצורך בחינת אפקט המלאן הוכנה גם תערובת אשר בה במקום אפר פחם הוסף מלאן גיר בעל גודל חלקיקים דומה לזה של האפר. המשתנים בהרכב היו שלושה סוגים של אפר פחם ושני סוגים של צמנט (CEMI ו-CEMII). הבדיקות כללו אפיון של עבירות, חוזק וחדירות של הבטונים. מאחר והרכב הבטונים נשאר זהה, ניתן יהיה להסיק מתוכם באופן השוואתי על היעילות של כל אחד מהאפרים והשילוב של יעילות של הרכב האפר בצמנטים שונים.

### 2.2 חומרים

#### חומרי גלם

לצורך המחקר נבחרו, לאחר התייעצות, שלושה סוגי אפר פחם המייצגים את מרבית האפר המיוצר בארץ והם מתאפיינים במקדמי אקטיביות פוצולנית שונים, גבוה, בינוני ונמוך. תכונות אפר הפחם, כפי שהתקבלו ממנהלת אפר הפחם מופיעות בטבלה 1. בנוסף, מדגמי האפר והמלאנים במחקר נשלחו לאנליזה כימית במעבדות נשר, והרכבם כפי שהתקבל ממעבדת נשר מופיע בטבלה 2. פילוג החלקיקים של האבקות נבדק בתרחיף מימי ע"י שימוש בדיפרקציה של אור נראה באמצעות מכשיר MasterSizer בפקולטה להנדסה כימית בטכניון. הפילוג מופיע בשגיאה! מקור ההפניה לא נמצא. 2א' ו-2ב' וסיכום של הערכים המאפיינים את עקומי הפילוג מוצגים בטבלה 3. החול המודרג (0.5-9 מ"מ) שבו נעשה שימוש עבר שטיפה כדי להוציא ממנו את הדקים. הסימולציה לדקים שבחול זה התקבלה ע"י שימוש ב"מלאן אספלטי", שהנו מלאן אבן גיר אשר הוסף לחול הטבעי כדי ביחד לייצג חול גרוס בצורה שתאפשר הכנת תערובות עם תכולה קבועה של דקים.

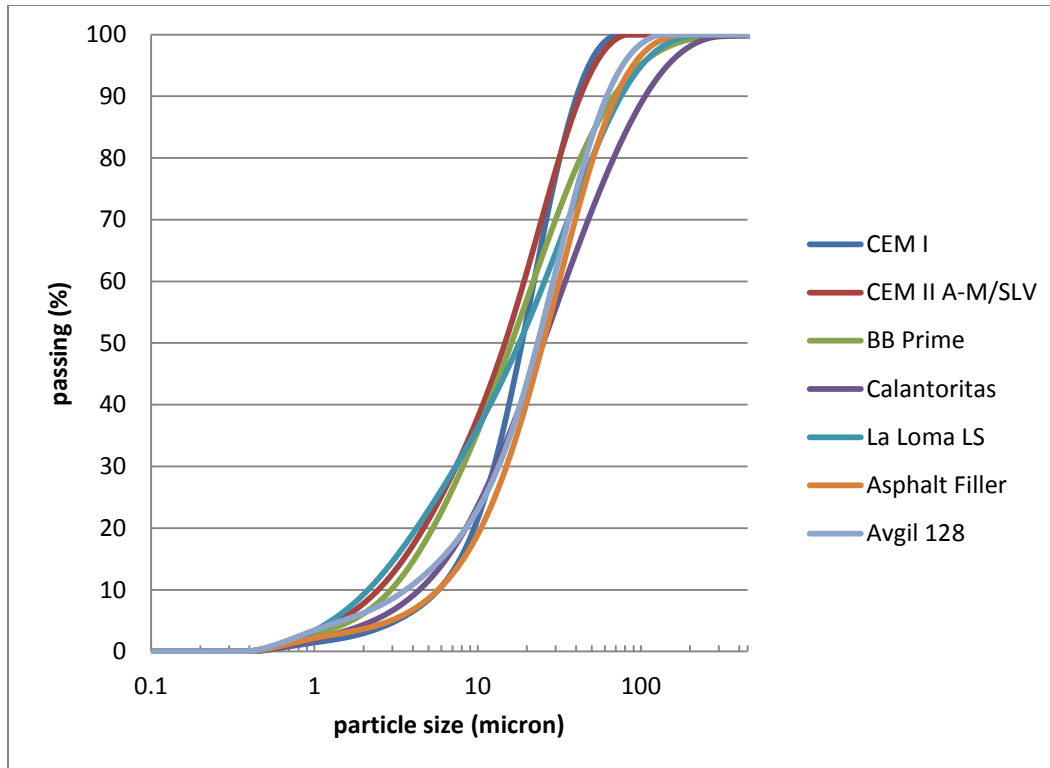
טבלה 1: תכונות אפר פחם ע"פ תוצאות שהתקבלו ממנהלת אפר הפחם (בדיקות פעילות פוצולנית נעשו ע"י איזוטופ. האפר ששימש לבדיקות אינו מאותה אצווה ששימשה למחקר)

אשקלון	חדרה	חדרה	תחנה		
Calantoritas	Drummond	Billiton	ספק		
Glencore	La Lama LS	BB prime	סוג	תכונה	
2.23	2.21	2.14		גר' לסמ"ק	משקל סגולי
0.639	0.721	0.699		7	פעילות פוצולנית
0.731	0.918	0.795		28	
0.775	0.897	0.798		60	
0.817	0.977	0.819		90	
18	20	23	%	משתייר 45 מיקרון	
61.3	41.9	19.4	%	הגדלת זמן תחילת התקשרות	
6	1.51	2.42	%	975	הפסד בקלייה
0.016	0.009	0.04	%	כלוריד	
0.04	0.04	0.031	%	סיד חופשי	
0.11	0.05	0.077	%	SO3	
88.55	73.82	88.28	%	S+A+F	
0.46	2.02	0.56	%	אלקלים כ- Na2O	
0.48	1.21	0.72	%	M	
3.53	7.64	37.37	ppm	פוספט מסיס	
0.29	0.24	0.07	%	רטיבות	

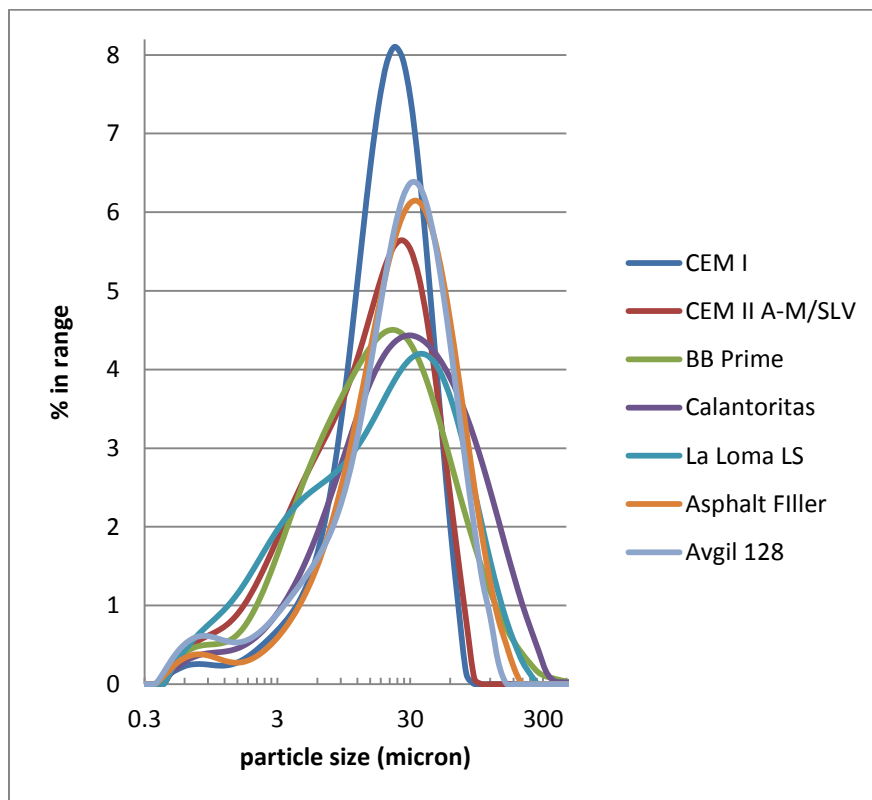


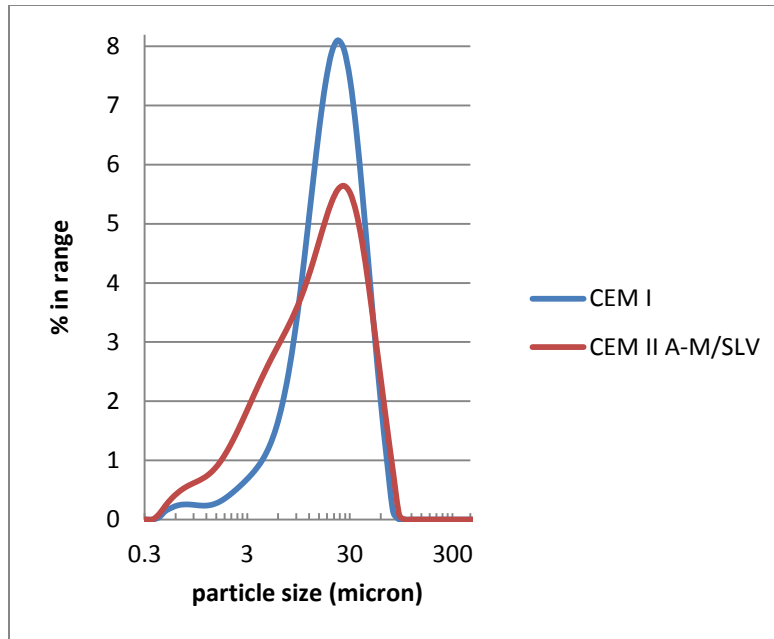
טבלה 2: הרכב כימי של האבקות במחקר (נבדק במעבדות נשר מדוגמאות של אותה אצווה ששימשה למחקר)

Component, %wt.	BB Prime	La Loma LS	Calantoritas	CEM I	CEM II A- M/SLV	Asphalt Filer
CaO	8.26	7.69	3.1	63.23	59.27	40.49
SiO <sub>2</sub>	51.34	56.28	59.9	19.21	21.24	4.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27.9	22.14	22.36	5.5	6.43	1.63
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.28	5.97	6.45	3.79	3.23	0.97
MgO	1.4	1.59	1.32	1.2	1.45	10.17
TiO <sub>2</sub>	1.57	1.05	1.09	0.38	0.44	0.11
K <sub>2</sub> O	0.47	1.27	1.31	0.42	0.44	0.14
Na <sub>2</sub> O	0.11	1.51	0.59	0.25	0.23	0.11
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (soluble)	1.13	0.25	0.59	0.48	0.53	0.04
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.07	0.06	0.05	0.04	0.05	0.02
SO <sub>3</sub>	0.29	0.83	0.54	2.64	3.27	0.24
TOC						0.43%
LOI 600	4.1	1.25	2.25	1.06	1.05	1.22
LOI 950	0.44	0.29	0.11	2.24	3.13	40
LOI total	4.54	1.54	2.36	3.3	4.18	41.22

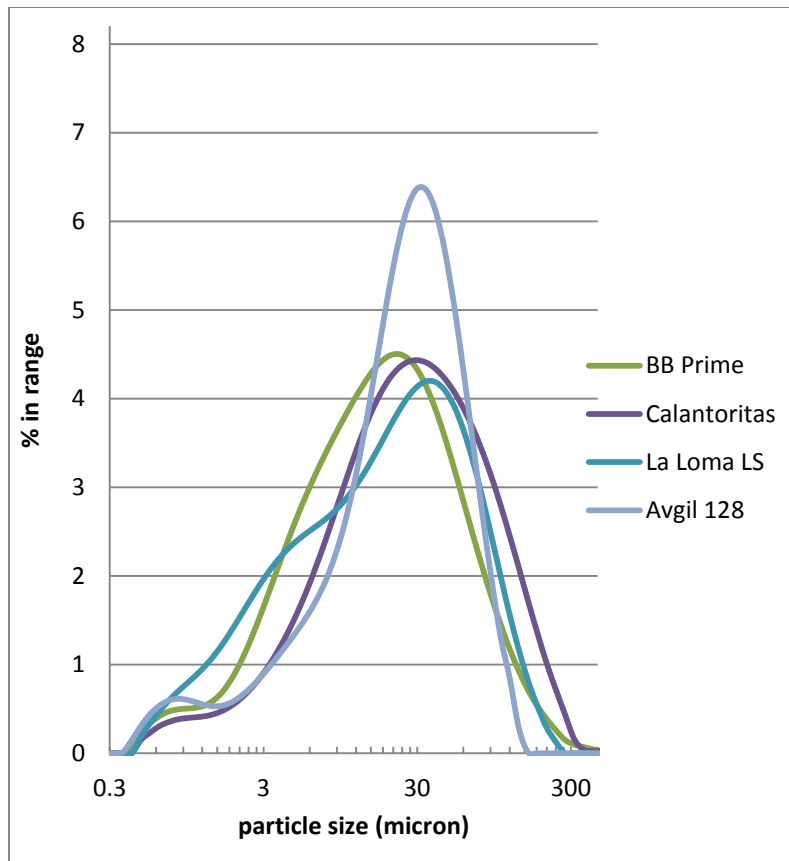


איור 2: דיאגרמת פילוג חלקיקים של אפרי הפחם והמלאנים, כאחוז משקלי מצטבר.





(ב)



(ג)

איור 3 : דיאגרמת צפיפות הסתברות של פילוג החלקיקים של האבקות במחקר: (א) פילוג של כל האבקות, (ב) השוואת פילוג של שני הצמנטים, (ג) השוואת פילוג של המלאנים, מדגמי אפר הפחם ומלאן הגיר

## טבלה 3: סיכום תכונות פילוג חלקיקים של האבקות במחקר

	CEM I 52.5	CEM II A- M/SLV 42.5	BB Prime	Calantoritas	La-Loma LS	Asphalt Filler	Avgil 128
d 0.1 (micron)	5.75	2.46	2.94	4.39	2.13	5.73	3.63
d 0.2 (micron)	9.52	4.66	5.30	8.46	4.22	10.47	8.48
d 0.5 (micron)	18.6	14.7	16.1	25.2	18.0	25.1	23.3
d 0.8 (micron)	31.8	31.6	42.6	68.0	50.2	50.9	45.7
d 0.9 (micron)	40.4	42.4	68.0	106.0	75.4	70.3	61.7
surface weighted mean (micron)	9.5	5.7	6.5	9.0	5.7	9.5	7.2
volume weighted mean (micron)	21.2	19.0	28.7	43.8	30.1	32.8	28.9
Specific surface area (m <sup>2</sup> /gr)	0.201	0.347	0.433	0.298	0.475	0.233	0.309

הנתונים הכלליים של עקומי הפילוג באיורים איור 2 ו- איור 3 והערכים הטיפוסיים בטבלה 3 מראים שכל האבקות נמצאות בטווח דומה של גודל חלקיקים. יחד עם זאת, יש הבדלים בעלי משמעות. לשני הצמנטים ערכים ממוצעים שונים של גודל חלקיקים ממוצע, אך הפילוג הנו רחב יותר בצמנט מסוג CEMII, עם חלק גדול יותר של חלקיקים קטנים. הדבר מוצא את ביטוי בעקומי הפילוג המוצגים באיור 3 -ב' וכן בשטח הפנים הסגולי שהוא גבוה יותר בצמנט מסוג CEMII, טבלה 3. באשר למלאנים, איור 3 -ג' מראה שלאפר CALANTORITAS ולמלאן הגיר פילוג צר יחסית של גודל החלקיקים, בעוד שלשני מדגמי האפר האחרים, LA LOMA ו- BB PRIME, פילוג רחב יותר עם תכולה גדולה יותר של חלקיקים קטנים, כפי שגם בא לידי ביטוי בטבלה 3 בערכים של  $d(0.1)$ ,  $d(0.2)$ .

## העילות פוצולנית ע"פ EN 450

היעילות הפוצולנית של האפר ששימש במחקר נבדקה עם שני סוגי הצמנט ששימשו במחקר. מאחר והתוצאות מהוות מרכיב באפיון החומרים הן מובאות בטבלה 4. כל הניתוחים המופיעים במחקר מתייחסים לתוצאות אלו.

**טבלה 4: יעילות פוצולנית ע"פ EN 450 של מדגמי האפר שנקבעה בבדיקה עם כל אחד משני סוגי הצמנטים ששימשו במחקר**

צמנט	גיל (ימים)	Calantoritas	BB Prime	La-Loma LS
CEM I	7	0.754	0.755	0.698
	14	0.721	0.688	0.711
	28	0.867	0.739	0.894
	90	1.020	0.816	1.017
CEM II	7	0.808	0.752	0.758
	14	0.779	0.819	0.754
	28	0.809	0.812	0.904
	90	0.913	0.954	0.963

### 2.3 תערובות ניסיון

הוכנו 4 תערובות ניסיון, בנפח 30 ליטר בערבול בחש, ע"מ לבחור את המוסף הכימי המתאים (שיהיה יעיל גם בתערובות עם אפר פחם), לבדוק את התאמת יחסי התערובת, ולוודא קבלת חוזק מתאים לבטון מסוג ב-30. הרכבי התערובות הראשוניים מופיעים בטבלה 5. סומך היעד היה בטווח 90-165 מ"מ (S4-S6).

**טבלה 5: הרכבי תערובות לבדיקת מוספים כימיים (ק"ג למ"ק)**

תערובת				
R2000+FA	R1000+FA	R2000	R1000	חומרים
910	910	910	910	14-19
450	450	450	450	9.5-14
407	407	407	407	0-9.5 חול מודרג שטוף
43	43	43	43	מלאן אספלט 40 מיקרון
143	143	202	202	חול טבעי רותם 0 – 1.8 מ"מ
80	80	0	0	אפר פחם
0	0	0	0	פילר כפר גלעדי
230	230	270	270	צמנט
160	160	160	160	מים
4.6	4.6	5.4	5.4	מוסף מפחית מים
ריאובילד 2000, אפר פחם BB PRIME	ריאובילד 1000, אפר פחם BB PRIME	ריאובילד 2000	ריאובילד 1000	הערות

תכונות הבטון הטרי והחוזק התקני של התערובות לבדיקת מוספים מופיעים בטבלה 6.

**טבלה 6: תכונות הבטון הטרי והחוזק התקני של תערובות לבדיקת מוספים**

תערובת	סומך (ירד ב- מ"מ)	משקל מרחבי (ק"ג/מ"ק)	תכולת אויר (%)	חוזק תקני (MPa)
R1000	160	2440	1	43.6
R2000	155	2463	0.8	43.8
R1000+FA	155	2430	0.8	37.4
R2000+FA	130	2416	1	39.8

המוסף ריאובילד 1000 היה יעיל יותר בתערובות עם אפר הפחם בכל הקשור שלמירת סומך דומה לתערובת הבקרה ועל כן הוא נבחר לשימוש במחקר הנוכחי. כמו-כן, נעשה שינוי ביחסי האגרגטים לתערובות. תערובת ניסיון בהרכב החדש הוכנה ונמצאה מתאימה לעבודה. התערובות טבלה 7 הן אלה שנבחרו בעקבות הניסויים המוקדמים.

## 2.4 הרכב התערובות

על בסיס התוצאות של תערובות הניסיון תוכננו תערובות בהרכבים המוצגים בטבלה 7, אשר המשתנים בהן הם תכולת הצמנט בתערובות הבקרה (270 ו- 230 ק"ג/מ"ק), סוג הצמנט, סוג האפר ומלאן אבן גיר כתחליף לאפר.

מהתערובות הוכנו מדגמים כמפורט להלן :

- 3 קוביות לחוזק בכל אחד מהגילאים : 7, 14, 28, 90 יום
  - סומך ומשקל מרחבי של הבטון הטרי
  - 3 דסקיות לקביעת ספיגות קפילרית וחדירות אויר (טורנט)
- תערובות REF-1-270 ו- REF-1-230 נוצקו פעמיים. פעם בתחילת המחקר ופעם בסופו כדי לקבל אמדן של מידת החזרתיות ביציקת תערובות.

**טבלה 7: הרכבי תערובות לניסוי (ק"ג למ"ק)**

תערובת							
REF-2-230	REF-1-230	[FA type]-[cemet type]	LF-2	LF-1	REF-2-270	REF-1-270	חומרים
811	811	811	811	811	811	811	אגרגט 14-19 מ"מ
399	399	399	399	399	399	399	אגרגט 9.5-14 מ"מ
365	365	365	365	365	365	365	אגרגט 0-9.5 מ"מ חול מודרג
39	39	39	39	39	39	39	מלאן אספלט 40 מיקרון
393	387	303	301	301	363	363	חול טבעי רותם 0 – 1.8 מ"מ
0	0	80	0	0	0	0	אפר פחם
0	0	0	100	100	0	0	פילר כפר גלעדי
230	230	230	230	230	270	270	צמנט
160	160	160	160	160	160	160	מים
4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	5.4	5.4	ריאובילד 1000
CEM II	CEM I	לפי הסימון	CEM II	CEM I	CEM II	CEM I	סוג הצמנט

## 2.5 בדיקות

### סומך

סומך הבטון הטרי נבדק ע"י שקיעה בקונוס אברהמס (ת"י 26 חלק 2.1)

### משקל מרחבי של הבטון הטרי

משקל מרחבי של הבטון הטרי נבדק ע"י שקילת הבטון בסיר בעל נפח ידוע של 7.00 ליטר (ת"י 26 חלק 2.5)

### חוזק לחיצה

דוגמאות הבטון לבדיקת חוזק לחיצה היו בגודל של  $100 \times 100 \times 100$  מ"מ. הן עברו אשפחה תקנית (20 מע"צ, שבוע במים ולאחר מכן ב- 60% לחות יחסית), וחוזקן נבדק בגילאים: 7, 14, 28, ו- 90 יום, בהתאם לת"י 26 חלק 4.1.

### חדירות לאוויר

בדיקת חדירת אוויר נעשתה באמצעות מכשיר Torrent, [Torrent 1992].

### ספיגות נימית

הבדיקות נערכו בהתאם לתקן ישראלי ת"י 26 חלק 5, סעיף 206. לכל תערובת בטון נבדקו 3 מדגמים וחושבו הערכים הממוצעים של ספיגת המים הכוללת וקצב הספיגה הקפילרית (ספיגה נימית).

## 3. תוצאות

### 3.1 תכונות התערובות

תכונות התערובות שנוצקו מופיעות בטבלה 8. הסיומת המספרית ליד כל כינוי של תערובת מציינת את סוג הצמנט, CEMI (1) ו- CEMII (2).



## טבלה 8 – תכונות הבטון הטרי והקשוי

capillary absorption (gr/m <sup>2</sup> /hr <sup>0.5</sup> )	KT (10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> )	BSG (kg/m <sup>3</sup> )	slump (mm)	compressive strength (MPa)				mix
				90	28	14	7	
1476	4.538	2459	118	49.3	49	44.4	32.7	REF 1 - 270 (1)
1546	3.624	2456	192	47.7	43.1	39.3	28.4	REF 2-270
1081	4.084	2452	97	48.4	45.9	38.7	28.2	La loma LS-1
1420	3.958	2423	138	43.0	40.4	34.5	22.8	La loma LS-2
1233	4.709	2446	101	47.5	44.2	39.8	27.4	BB Prime-1
1262	3.216	2458	194	45.8	41.7	35.9	24.7	BB Prime-2
1098	3.888	2421	109	44.1	42.9	37.6	26.5	Calantoritas- 1
1428	5.582	2417	152	39.4	38.7	33.3	22.3	Calantoritas- 2
1388	9.385	2462	193	42.0	40.4	35.5	26.1	LF-1
1721	6.751	2437	145	37.4	34.9	31.0	21.0	LF-2
1383	5.772	2452	185	38.2	36.7	33.7	23.9	REF 1 - 230
1570	6.406	2450	190	35.0	32.1	29.1	19.8	REF 2-230
1377	5.735	2458	150	49.2	46.3	42.9	31.8	REF 1-270 (2)

## סומך

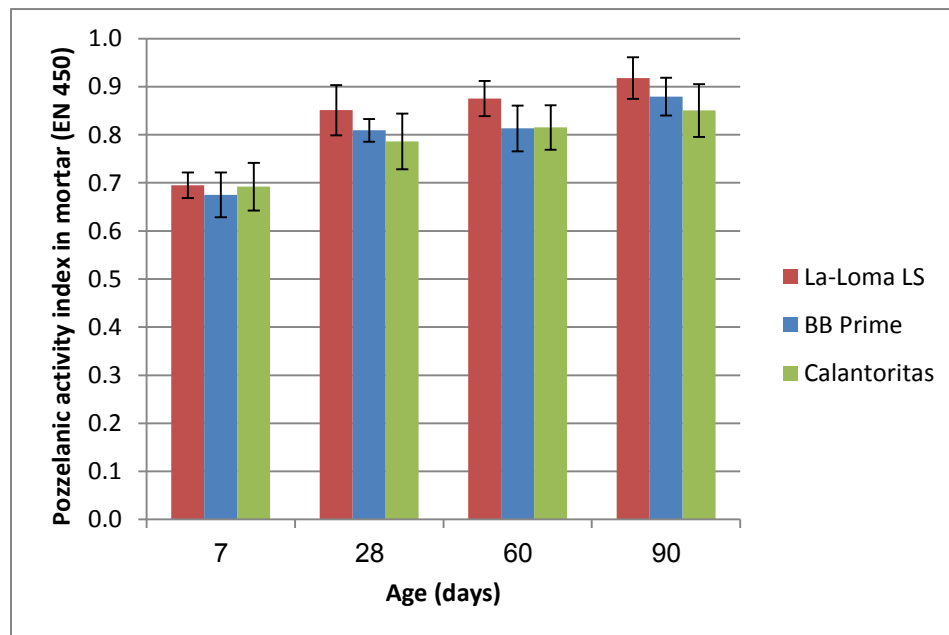
מחזרה על תערובת REF 1-270, אפשר להסיק כי הפרש סומך של 30 מ"מ אינו מהותי. בכל התערובות היה הפרש סומך משמעותי בין התערובות מ-CEM I, לתערובות מ-CEM II, כאשר הירד של התערובות שהוכנו מ-CEM II היה גבוה בכ- 40 עד 90 מ"מ מהירד שהתקבל בתערובות שהוכנו מ-CEM I. החריגים הבולטים לכלל זה הן התערובות עם מלאן גיר - LF-1 ו-LF-2, שם ההפרש היה הפוך. יתכן שריכוז אלומינטים נמוך יותר בצמנט מסוג CEM II הוא הגורם להגדלת האפקטיביות של המוסף מפחית המים. בכל מקרה, אין בכך כדי להסביר מדוע בתערובות עם מלאן הגיר התוצאה הייתה הפוכה.

### 3.2 יעילות במדגמי מלט – בדיקות תקניות

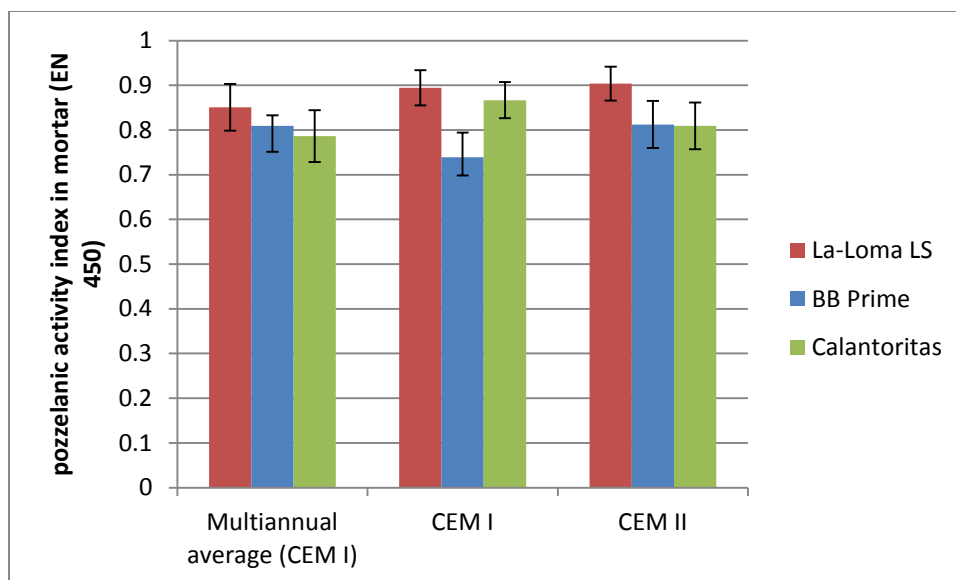
סיכום של כל התוצאות לבדיקות יעילות במלט מוצג בטבלה 9 המתבססת גם על מידע הנמצא באתר של מנהלת אפר הפחם, איור 4-א'. בדיקות אלה בוצעו עם צמנט מסוג CEM I כנדרש בתקן. באיור 4-ב' נערכת השוואה בין התוצאות המצטברות למדגמי אפר אלה שהתקבלו בבדיקות מתמשכות על ידי מנהלת אפר הפחם ובין התוצאות שהתקבלו במדגמי האפר ששימשו במחקר זה, עבור גיל 28 ימים (נתונים מטבלאות 1 ו-4).

**טבלה 9: יעילות פוצולנית בגיל 28 יום של סוגי האפר ששימשו במחקר**

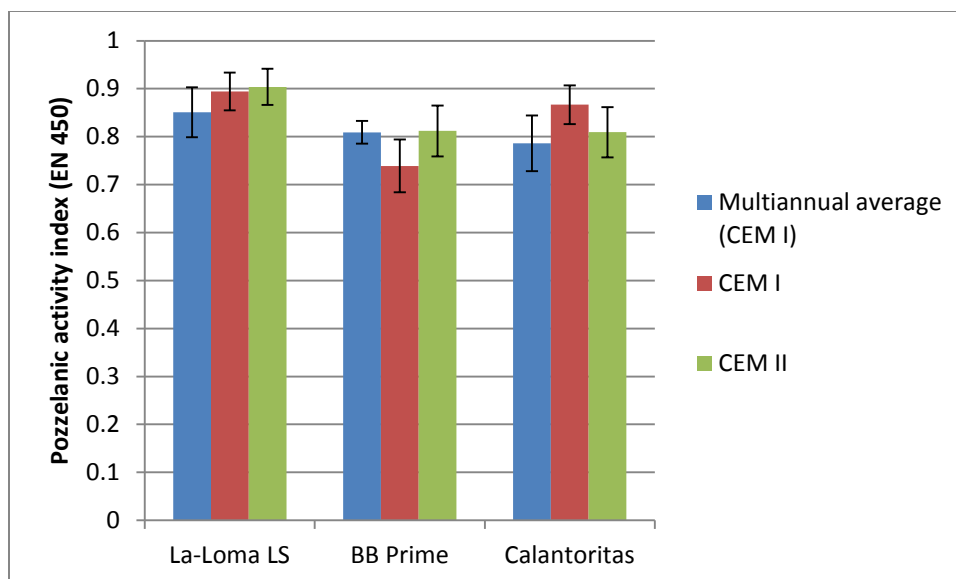
אצווה במחקר	אצווה קודמת	ממוצע רב שנתי	סטיית תקן של הממוצע הרב שנתי
La-Loma LS	0.894	0.918	0.052
BB Prime	0.739	0.795	0.024
Calantoritas	0.867	0.731	0.058



(א)



(ב)



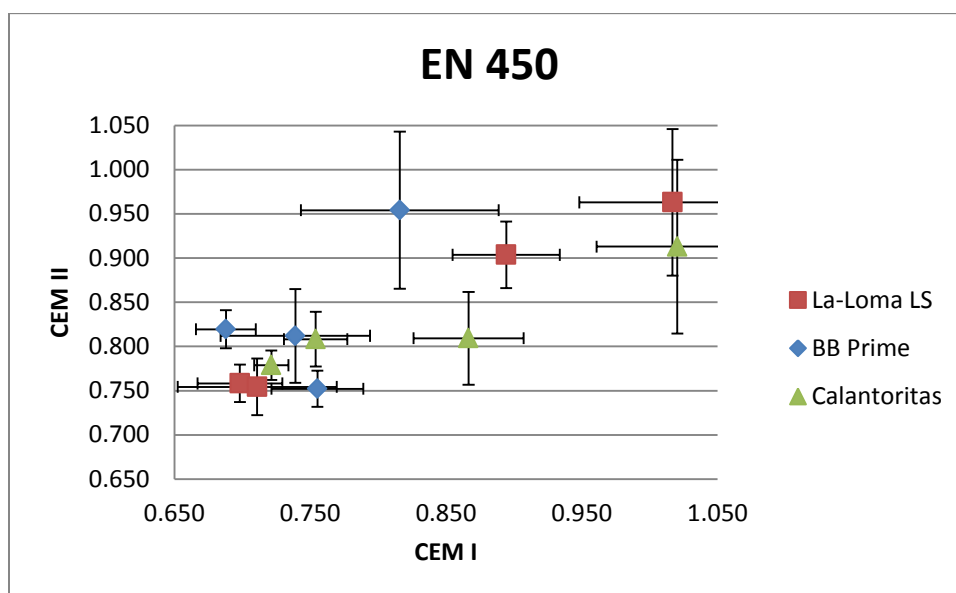
(ג)

איור 4: מקדמי היעילות של מדגמי אפר בבדיקה תקנית של מלטים: (א) ממוצעים מבדיקות מתמשכות על ידי מנהלת אפר הפחם (ב) תוצאות של בדיקות במחקר זה עם האפר והצמנטים שנחקרו בהשוואה לבדיקות המתמשכות של מנהלת אפר הפחם – תוצאות של גיל 28 ימים, השוואה לפי סוג אפר. (ג) תוצאות של בדיקות במחקר זה עם האפר והצמנטים שנחקרו בהשוואה לבדיקות המתמשכות של מנהלת אפר הפחם – תוצאות של גיל 28 ימים, השוואה לפי בדיקה.

ניתן לראות מאיור 3א' שבכל הגילים, אפר LALOMA הוא היעיל ביותר, ולאחריו לפי סדר יורד של יעילות BB PRIME ו CALANTORITAS. יחד עם זאת ההבדלים הנם קטנים יחסית ונמצאים בתחום הסטייה הסטטיסטית. בציור 3ב' ניתן להבחין שבבדיקות שבמחקר זה נמצא שאפר CALANTORITAS הוא הפחות פעיל

ב- CEM II, אך יותר פעיל ב- CEM I, לעומת זאת היעילות של האפר מסוג BB Prime דוקא יותר נמוכה ב- CEM I יחסית ל- CEM II.

מקדמי היעילות הפוצולנית המתקבלים לפי EN 450 (להלן EN 450) מופיעים טבלה 4. הקשר בין מקדמי היעילות המתקבלים בשני הצמנטים אינם ברורים ונראה שיש פיזור גדול, שגיאה! מקור ההפניה לא נמצא.. רגרסיה ליניארית בין התוצאות עבור הצמנטים השונים נותנת מתאם  $r=0.52$ . עבור 12 מדידות מתאם כזה משמעותו הסתברות של כ- 92% לקיום קשר ליניארי בין התוצאות המתקבלות ב- CEM I לאלו המתקבלות ב- CEM II, אך הסטייה מהמתאם היא כה גדולה, כך שאין לו משמעות. מציור זה ניתן להבחין במגמה של מקדם אקטיביות גבוה יותר דווקא בצמנט CEMII.



איור 5: היעילות הפוצולנית ע"פ EN 450 עם CEM II כנגד CEM I

### 3.3 חוזק ויעילות בבטון

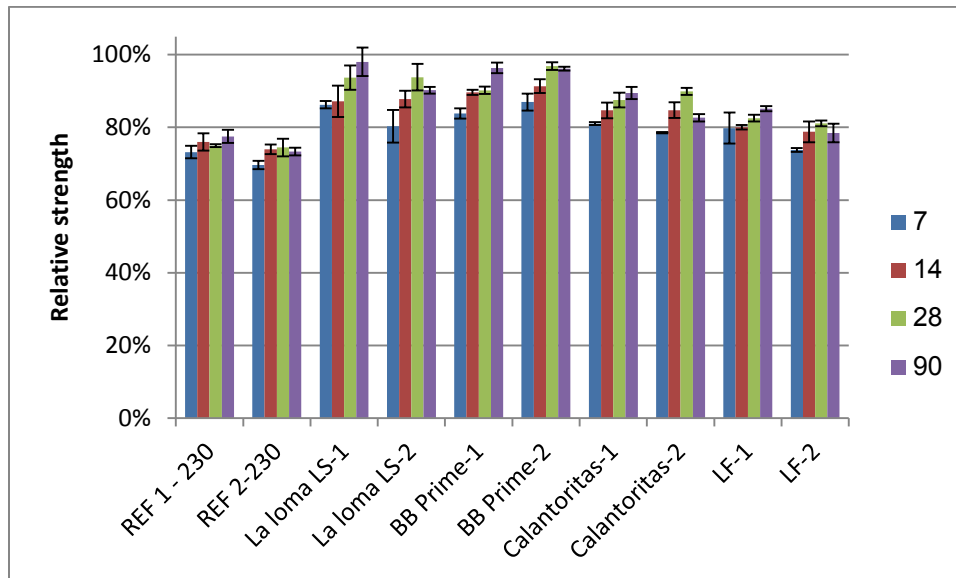
בעבודה זה הגדרנו לצורך השוואה מקדם שניתן לו הכינוי מקדם היעילות בבטון, משוואה 10, ומוצג בטבלה 9 ואיור 6 ו-איור 7.

$$\text{מקדם יעילות בבטון} = \frac{\text{חוזק בטון עם אפר}}{\text{חוזק בטון ללא אפר}}$$

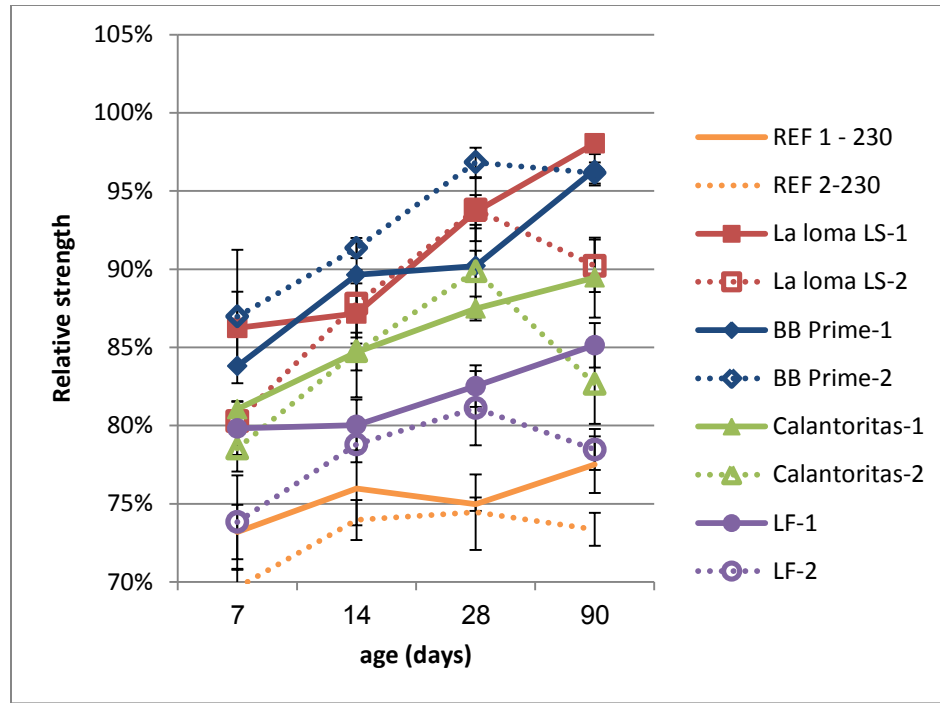
משוואה 10

טבלה 10 : מקדם היעילות בבטון

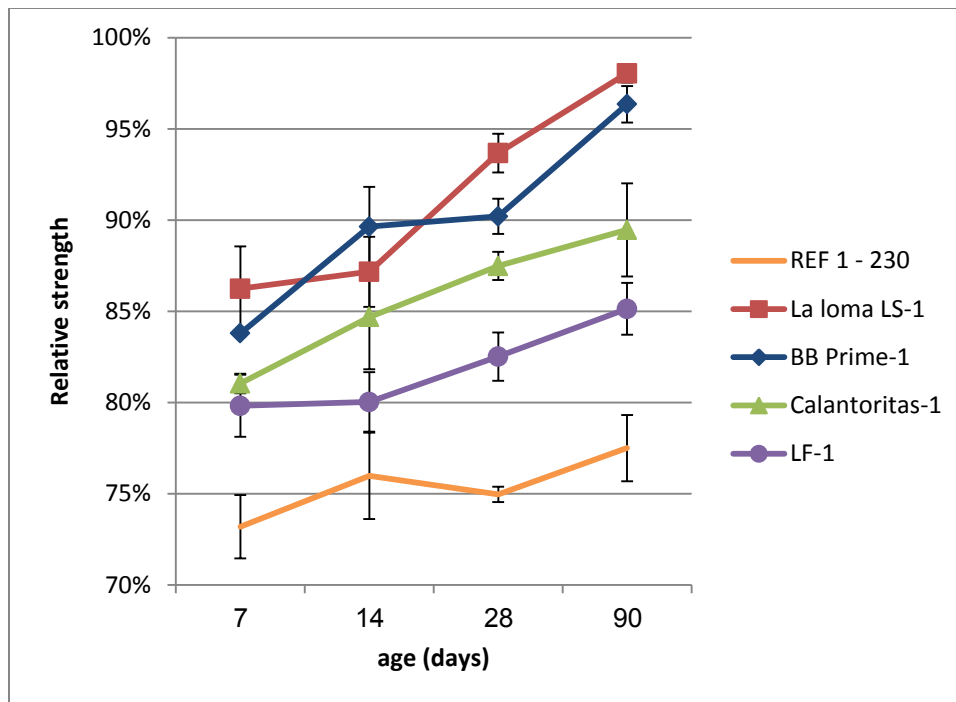
גיל	7	14	28	90
La loma LS-1	0.862	0.872	0.937	0.980
La loma LS-2	0.803	0.878	0.938	0.872
BB Prime-1	0.838	0.896	0.902	0.964
BB Prime-2	0.870	0.913	0.968	0.929
Calantoritas-1	0.810	0.847	0.875	0.895
Calantoritas-2	0.785	0.847	0.899	0.799
LF-1	0.798	0.800	0.825	0.851
LF-2	0.738	0.788	0.811	0.758



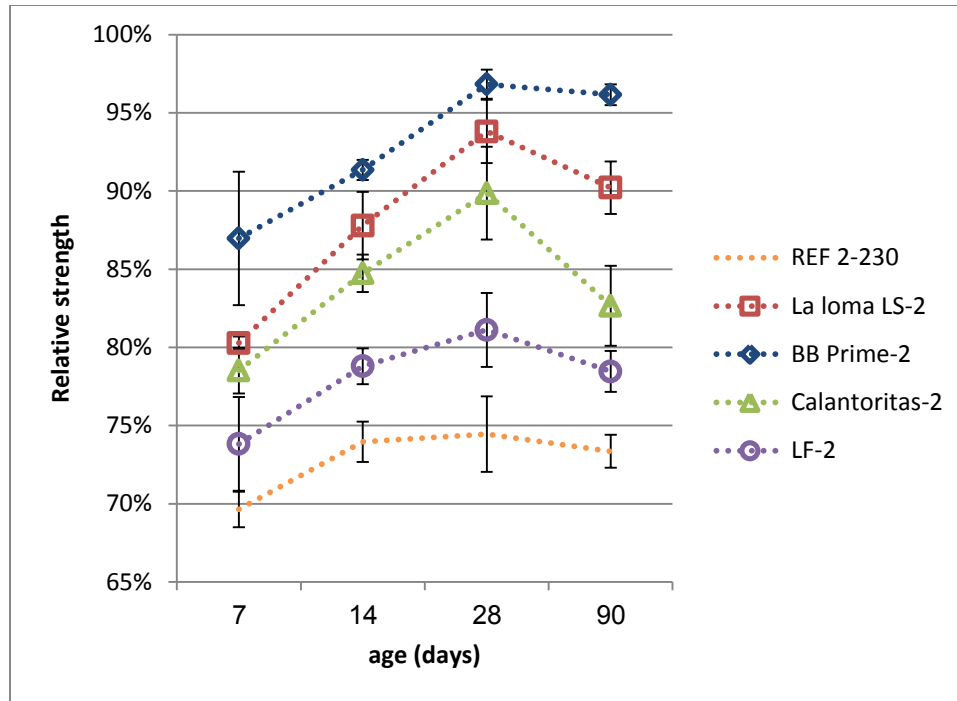
איור 6 : מקדם היעילות בבטון



(A)



(B)



(ג)

איור 7: מקדם היעילות בבטון כנגד גיל הבטון (בימים) (א) כל התוצאות, (ב) תוצאות של מערכות עם צמנט I,

(ג) תוצאות של מערכות עם צמנט II

ניתן לראות שבדרך כלל מקדם היעילות גדל עם הגיל. הוא גבוה ביותר במדגמי אפר BB PRIME ו LA- LOMA, כאשר ההבדל בין שניהם קטן. הוא נמוך יותר באופן משמעותי באפר CALANTORITAS, ונמוך בהרבה במלאן אבן הגיר. כאשר משווים את מקדמי היעילות לגבי אפר פחם ומלאן נתונים במערכות משני סוגי הצמנטים רואים שההבדלים אינם גדולים ולא ניתן לקבוע שבמערכת מצמנט מסוג CEMI היעילות גדולה יותר.

מעניין לציין שבכל המערכות עם צמנט CEMII יש הקטנה במקדם היעילות בגיל 90 יום, בעוד שבצמנט CEMI לא ניכרת תופעה כזו. הסיבה לירידה היא שבמערכת עם CEMII יש גידול בחוזק בין 28 ל- 90 יום שהוא גדול באופן יחסי ל- CEM I (כנראה תוצאה של פעילות המוספים המינרליים ב- CEM II שבאים לידי ביטוי בגיל בגיל מאוחר מ- 28 יום), בשעה שהגידול בחוזק, בתערובות עם אפר הפחם ומלאן הגיר, הנה יותר נמוכה באופן יחסי מהגידול בחוזק של מדגם הבקרה.

מעניין לציין שמהתוצאות שבאיור 5 רואים שיש תרומה לחוזק בנוכחות מלאן אבן גיר שהוא לכאורה אינרטי. התרומה יותר קטנה מזו של אפר פחם אך היא בעלת משמעות. מתוך כך ניתן להגדיר שלושה רכיבים התורמים לחוזק – רכיב הצמנט, רכיב המלאן, והרכיב הפוצולני. לצורך אפיון התרומה של הרכיבים השונים נעשה שימוש בתערובת הבקרה עם 230 ק"ג צמנט למ"ק ועל בסיס זה הוגדרו הפרמטרים הבאים :

**אפקט מלאן** - הפרש החוזק בין תערובת הייחוס, REF 230, וחוזק התערובת עם מלאן הגיר (LF), יחסית להפרש החוזק בין תערובות הבקרה עם 230 ו-270 ק"ג/מ"ק.

**אפקט פוצולני** - הפרש החוזק בין התערובות עם 230 ק"ג צמנט ואפר פחם והתערובות עם 230 ק"ג צמנט ומלאן גיר יחסית להפרש החוזק בין תערובות הבקרה עם 230 ו-270 ק"ג/מ"ק צמנט.

אפקט המלאן נע בין 5.3% ל-9.1% )

טבלה 11). מאחר שמתוצאות אלה לא ניתן לראות מגמה ברורה הקשורה בגיל או בסוג הצמנט, בטווח הערכים הנ"ל, הרי ניתן להעריך שאפקט זה הוא בקרוב קבוע.

**טבלה 11 – אפקט המלאן**

גיל	CEM I	CEM II
7	9.1%	6.0%
14	5.3%	6.5%
28	10.1%	8.9%
90	9.9%	7.0%

האפקט הפוצולני גדל עם הגיל (טבלה 12). עבור אפר פחם מסוג BB Prime ו-La Loma LS האפקט הפוצולני גדול מאפקט המלאן כבר בגיל שבוע. בגיל 14 יום, האפקט הפוצולני גדול מאפקט המלאן לכל סוגי אפר הפחם, כאשר לשני הראשונים, הוא כבר גדול בהרבה. ניכר כי האפקט הפוצולני גדול יותר עבור CEM II, לכל סוגי אפר הפחם, ולכל גיל.

**טבלה 12 – האפקט הפוצולני**

גיל	La loma LS-1	La loma LS-2	BB Prime-1	BB Prime-2	Calantoritas-1	Calantoritas-2
7	0.088	0.093	0.054	0.189	0.017	0.067
14	0.094	0.122	0.126	0.170	0.061	0.080
28	0.149	0.170	0.103	0.211	0.066	0.117
90	0.167	0.160	0.145	0.241	0.056	0.057

הגדרה אחרת של מקדם היעילות בבטון המקובלת בתקנים, אשר אותה נכנה מקדם היעילות הטכנולוגי –  $k$ , נקבעת על פי משוואה 11 ומשמשת למעשה לחישוב מנת מים אפקטיבית :



**משוואה 11**

$$\omega_{eff} = \frac{W + \Delta A}{C + k \cdot FA}$$

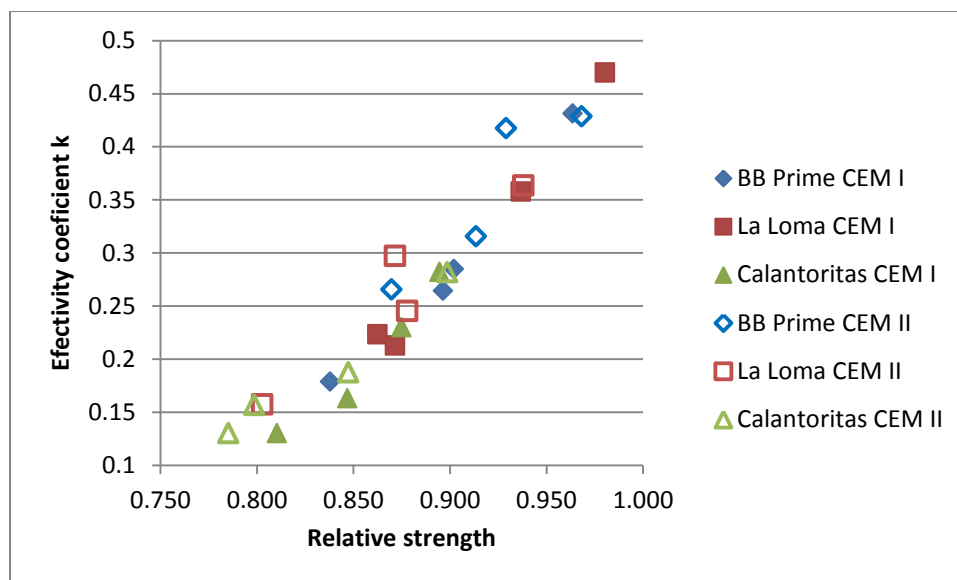
ניתן לחשב בקרוב את יחס המים לצמנט האפקטיבי ע"י אינטרפולציה ליניארית של החוזק כנגד יחס מים לצמנט של התערובות REF-270 ו- REF-230 (יחס מים לצמנט של הראשונה הוא 0.59 ושל השנייה 0.70). את האינטרפולציה מבצעים בנפרד לכל סוג צמנט, ואז ניתן לקבל את מקדם היעילות הטכנולוגי – k על-ידי חילוף ממשוואה 11.

ערכי היעילות המחושבים מופיעים בטבלה 13.

**טבלה 13 - מקדמי יעילות פוצולנית טכנולוגיים – k**

90	28	14	7	age
0.47	0.36	0.21	0.22	La loma LS-1
0.30	0.36	0.25	0.16	La loma LS-2
0.43	0.28	0.26	0.18	BB Prime-1
0.42	0.43	0.32	0.27	BB Prime-2
0.28	0.23	0.16	0.13	Calantoritas-1
0.16	0.28	0.19	0.13	Calantoritas-2
0.20	0.13	0.07	0.11	LF-1
0.08	0.12	0.08	0.06	LF-2

מקדם היעילות הטכנולוגי ומקדם היעילות בבטון (חוזק יחסי) מחושבים על אותו בסיס נתונים של חוזק, ועל כן אין זה מפתיע שיש קשר לינאי אחיד ביניהם, כפי שרואים באיור 8. באיור זה רואים בברור שהמקדמים של אפר CALNTORITAS הינם בטוחים הנמוכים יותר בעוד שהנקודות המייצגות את BB PRIME ו- LALOMA הנם גבוהים יותר ללא נטייה ברורה ליתרון של אחד מהם.



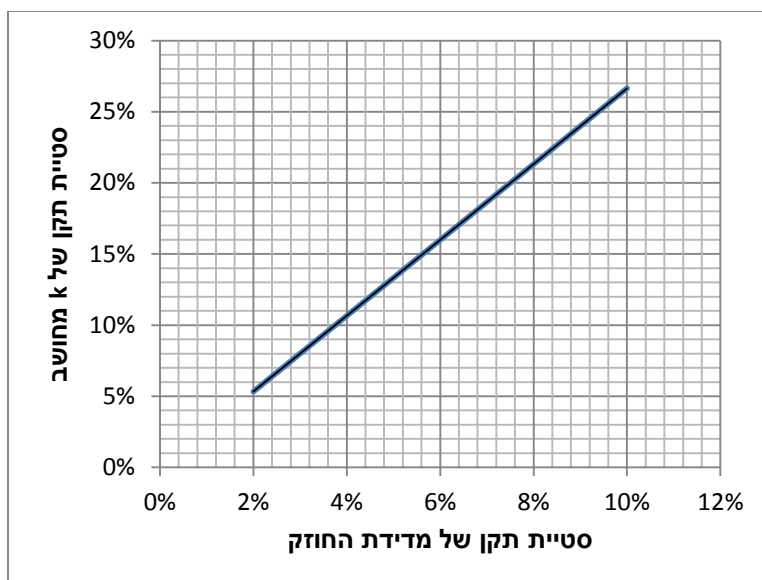
איור 8: הקשר בין מקדמי היעילות בבטון, המקדם הטכנולוגי והחוזק היחסי.

ניתן להעריך את סטיית התקן של מקדם היעילות הפוצולני הטכנולוגי –  $k$  מתוך סטיית התקן של בדיקות החוזק, וזאת מאחר שחישוב מקדם היעילות הפוצולני הטכנולוגי –  $k$  מבוסס על תוצאות החוזק. החישוב של  $k$  מבוסס על חישוב יחס מים לצמנט אפקטיבי. חישוב יחס המים לצמנט האפקטיבי נעשה ע"י התאמת החוזק המתקבל לקו רגרסיה ליניארית שבין שתי נקודות בעלות יחס מים לצמנט בפועל השווה לזה האפקטיבי. שתי הנקודות הללו הן תערובות REF 230 ו- REF 270, שאינן מכילות תוספים פוצולנים או מלאן נוסף. חישוב סטיית התקן המצטברת מבוססת על הקשרים המופיעים בטבלה 14.

טבלה 14: קשרים מתמטיים לחישוב שגיאה נגררת

הפונקציה	הקשר בין השגיאה הנגררת - $\delta F$ לשגיאות של המשתנים – $\delta x, \delta y$	כאשר $\delta x = \delta y$
$F = A \cdot x$	$\delta F = A \cdot \delta x$	
$F = x \pm y$	$\delta F = \sqrt{(\delta x)^2 + (\delta y)^2}$	$\delta F = \sqrt{2} \cdot \delta x$
$F = x \cdot y; F = \frac{x}{y}$	$\frac{\delta F}{F} = \sqrt{\left(\frac{\delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\delta y}{y}\right)^2}$	$\delta F = \sqrt{2} \frac{F}{x} \delta x$

סטיית התקן של החוזק של יציקה במחקר היא 2%. ההבדל בחוזק בין תערובות זהות שנוצקו בתאריכים שונים מגיע עד 5%. איור 9 מציג את הקשר בין סטיית התקן של מדידת החוזק לבין סטיית התקן של מקדם היעילות הפוצולני הטכנולוגי –  $k$  המחושב מתוצאות החוזק. מתוך נתוני המחקר ניתן להעריך שסטיית התקן של  $k$  היא בין 5 ל-13 אחוז.

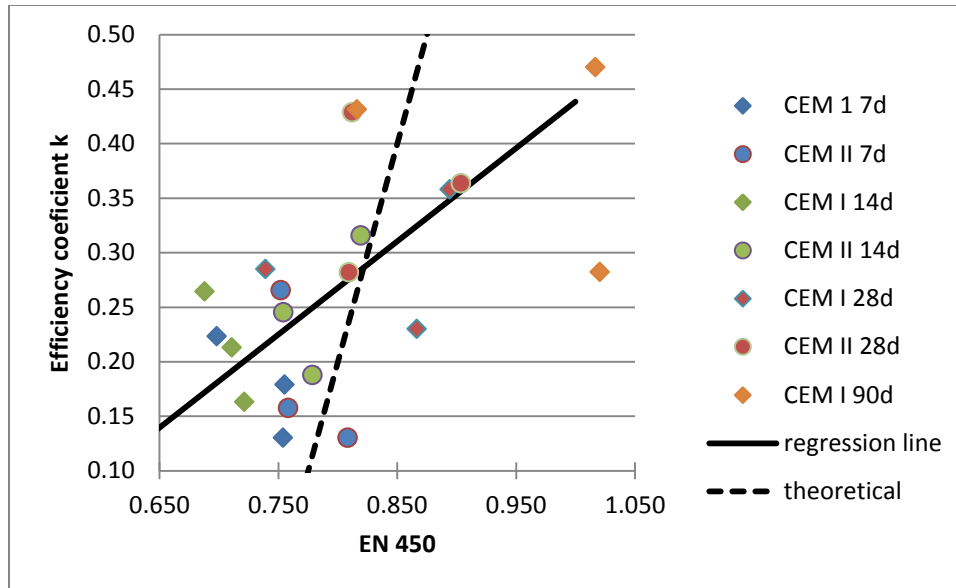


**איור 9: הקשר בין סטיית התקן של מדידת חוזק של תערובת בטון לבין סטיית התקן המתקבלת בחישוב מקדם היעילות הפוצולני הטכנולוגי – k**

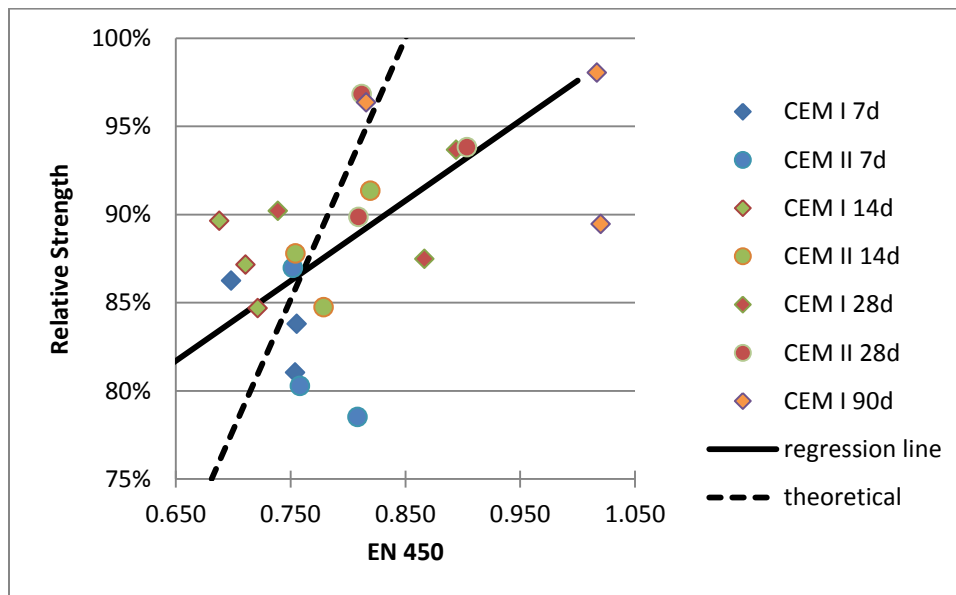
### **3.4 מקדם היעילות במלטים (בדיקת EN 450) בהשוואה ליעילות הנמדדת בבטונים**

במדידת היעילות הפוצולנית במדגמי מלט תקינים, המשמעות של 100% יעילות היא תפקוד שקול של ק"ג אפר לק"ג צמנט, או מקדם יעילות טכנולוגי k של 1. בהתחשב בתכולת אפר הפחם בבטונים שהוכנו במחקר זה, עבור יעילות זו יחס החוזק שצריך להתקבל בין בטון המכיל אפר לבטון ללא אפר הוא 122%. כאשר מקדם היעילות ע"פ EN 450 הוא 75%, הרי שלאפר הפחם לא הייתה כל תרומה לחוזק. במקרה כזה, מקדם היעילות הטכנולוגי k צריך להיות שווה ל-0, ובתערובות הבטון שהוכנו במחקר זה, יחס החוזקים בין תערובת עם אפר לתערובת ללא אפר צריך לעמוד על 85%.

התוצאות שונות מכך באופן משמעותי. עבור מקדמי יעילות בבדיקות תקניות במלטים, הנמוכים מ- 75%, היעילות המתקבלת בבטון גבוהה מהצפוי, ועבור ערכים גבוהים של מקדמי יעילות בבדיקות תקניות של מלטים (90-100%) היעילות המתקבלת בבטון נמוכה מהצפוי. (איורים איור 10 איור 11). את הערכים הגבוהים יותר בבטון עבור מקדמי היעילות הנמוכים במלט ניתן להסביר באפקט מלאן, שהוא משמעותי יותר בבטון, וכנראה זניח במלט.

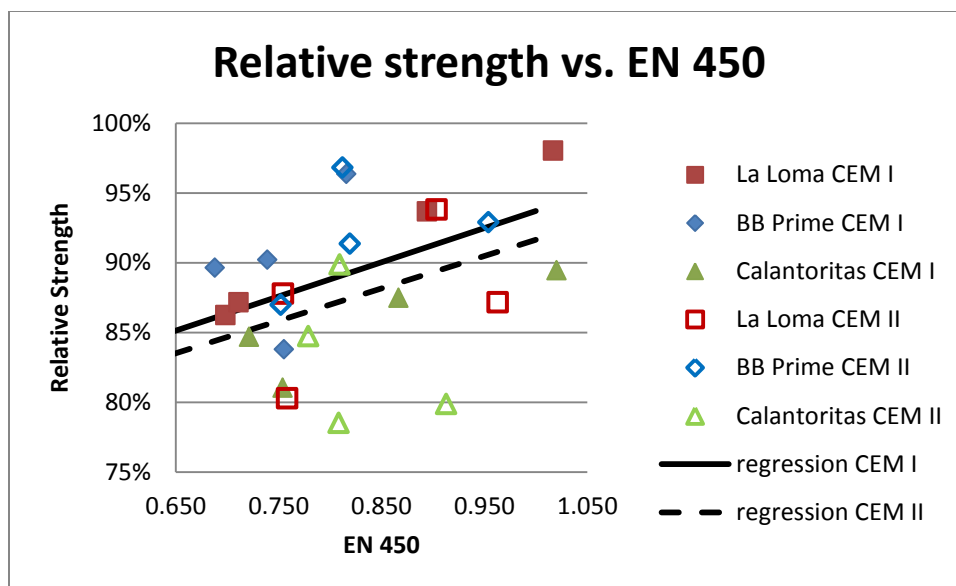


איור 10: מקדם היעילות האפקטיבי בבטון כנגד מקדם היעילות במלט ע"פ EN 450

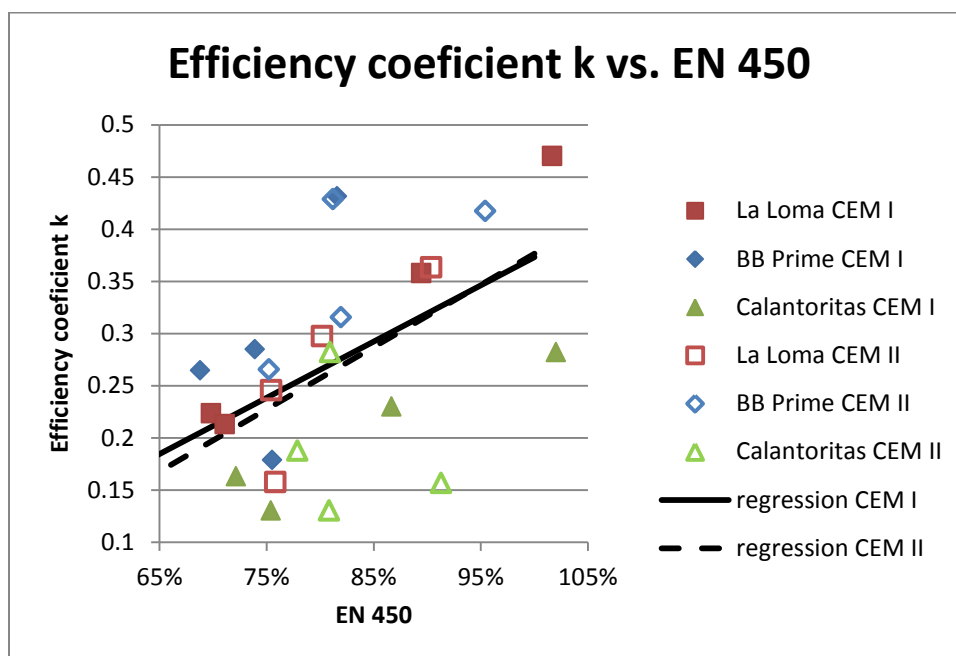


איור 11: חוזק יחסי של תערובות בטון כנגד מקדם היעילות במלט ע"פ EN 450

באיור 10 ואיור 11 הפיזור הוא גדול ולא ניתן למצוא קשר חד משמעי בין היעילות התקנית הנקבעת במדגמי מלט וזו הנקבעת בבטון. באיור 12 מוצגות התוצאות שוב תוך אפיון הנקודות במדגמי האפר השונים. ניתן לראות שיש נטייה ברורה לערכים נמוכים יותר של בטונים שבהם האפר הוא מסוג CALANTORITAS. המשמעות היא שלמרות שלמדגמי אפר זה מקדם יעילות בבדיקת המלט התקנית שהוא קצת יותר נמוך משני מדגמי האפר האחרים, הרי בבטון הוא הרבה יותר נמוך.



(א)



(ב)

איור 12: קשרים בין מקדמי היעילות בבדיקת המלט התקנית, EN 450, ומקדמי היעילות בבטון. (א) חוזק יחסי. (ב) מקדם יעילות טכנולוגי.

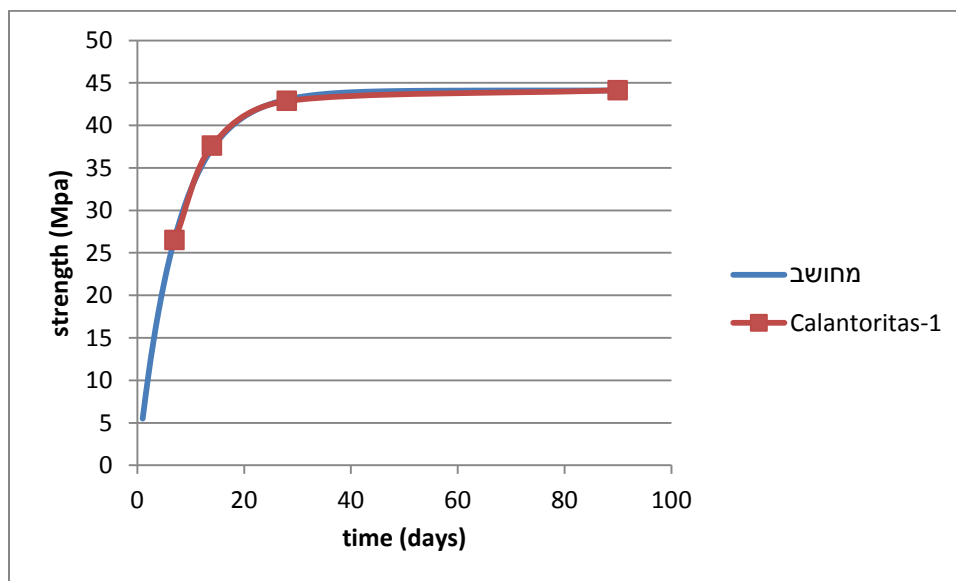
### 3.5 קצב התפתחות החוזק

התפתחות החוזק ניתנת לאומדן באמצעות משוואה שבה שני פרמטרים: קבוע זמן ( $t$ ) וחוזק סופי ( $f_f$ ), משוואה 12.

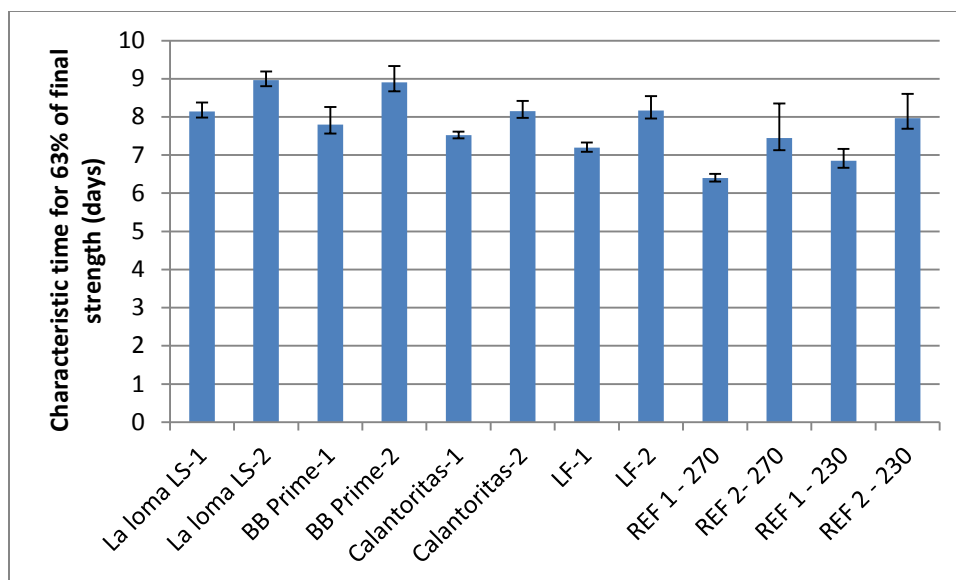
## משוואה 12

$$f(t) = f_f \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

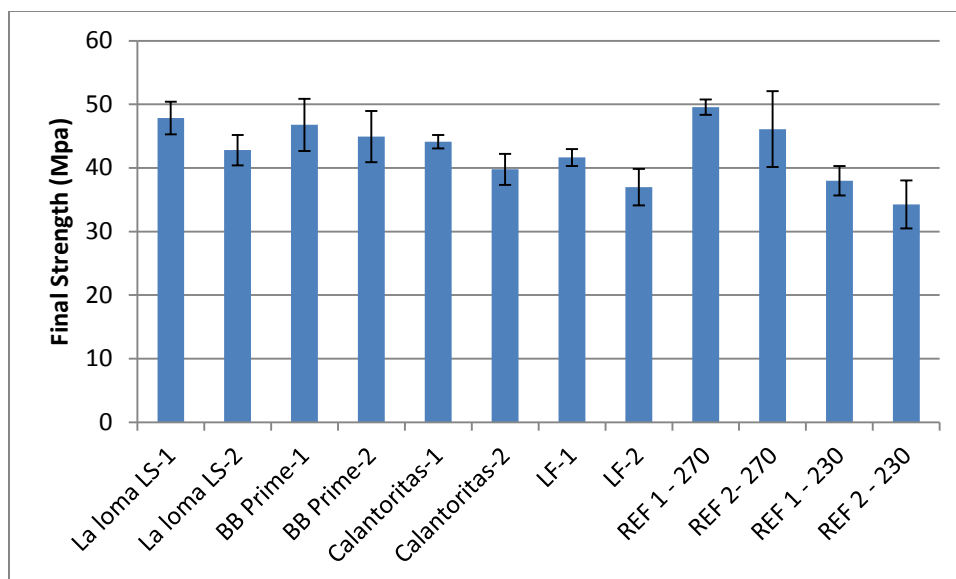
כאשר,  $f(t)$  – חוזק הבטון,  $t$  – זמן,  $f_f$  – חוזק סופי, ו-  $\tau$  – קבוע זמן אופייני. מתוך התאמת פרמטרים של משוואה 12 לתוצאות, ניתן למצוא את קבוע הזמן עבור כל אחת מהתערובות (איור 14) וכן גם את החוזק הסופי (איור 15). באופן עקבי, קבוע הזמן עבור תערובות עם CEM II גדול ביום אחד לערך מקבוע הזמן לתערובת המקבילה עם CEM I. לתערובות הייחוס REF - 270 קבוע הזמן הקצר ביותר (6.4 ו- 7.4 ימים בהתאמה), לתערובת REF 230 קבוע זמן ארוך יותר בכחצי יום, אחריהן התערובות עם מלאן גיר ואפר-פחם Calantoritas, אח"כ תערובות BB-Prime, ולבסוף תערובות La-Loma עם קבוע זמן של עד 1.7 יום מעבר לקבוע הזמן של תערובת הייחוס. החוזק הסופי גם הוא נמוך יותר באופן עקבי בתערובות עם CEMII, אך ההפרשים קטנים יחסית. כמו כן החוזק הסופי בתערובות עם האפר קטן מהחוזק הסופי של בטון הייחוס עם 270 ק"ג/מ"ק צמנט, אך גבוה בהרבה מהחוזק הסופי של בטון הייחוס עם 230 ק"ג/מ"ק צמנט. קבוע הזמן מייצג את האפקט הקינטי של האינטראקציה בין המלאן והצמנט והחוזק הסופי תלוי יותר במבנה הפנימי המתפתח. בשני המקרים, עבור שילוב נתון של אפר וצמנט, מתקבלת מגמה צפויה שקבוע הזמן ארוך יותר והחוזק הסופי גבוה יותר עבור שילוב של אפר פחם עם צמנט CEMI.



איור 13 - החוזק שנמדד בפועל וחוזק מחשב על-פי משוואה 12, לתערובת הבטון Calantoritas-1.



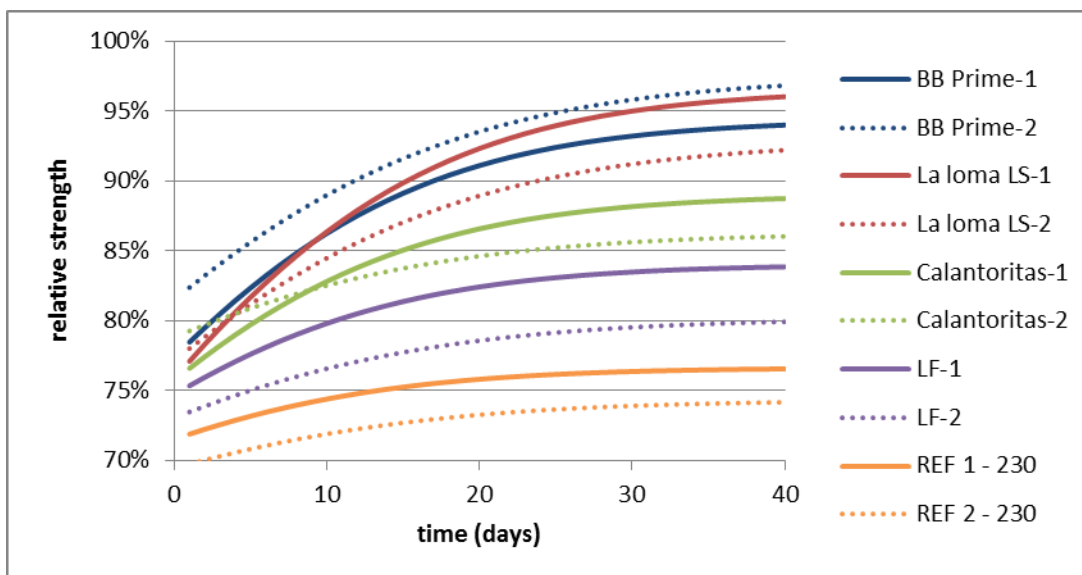
איור 14 – קבוע זמן אופייני להתפתחות החוזק, ע"פ משוואה 12, לתערובות השונות



איור 15: החוזק הסופי על פי משוואה 11 לתערובות השונות

מקדם היעילות בבטון (חוזק יחסי) מביא לידי ביטוי גם את השיפור שבנוכחות האפר יחסית לתערובות הבקרה, ומתוך הפרמטרים שבאיורים 13 ו-14 ומשוואה 11 ניתן לחשב מקדם זה. התוצאות המוצגות באיור 15 מצביעות על מגמה מורכבת המשתנה על ציר הזמן. בתערובות עם אפר הפחם, המקדם גבוה יותר בגיל מוקדם בבטונים עם צמנט מסוג CEM II וזו כנראה תוצאה של אפקט מלאן ניכר יותר בבטונים אלה. אפקט המלאן מוצא את ביטויו בעיקר בגיל צעיר לפני שבא לידי ביטוי אפקט פוצולני משמעותי. ייתכן ופילוג החלקיקים הרחב יותר של צמנט מסוג CEM II וגודל החלקיקים הקטן יותר בו מאפשר אפקט מלאן יעיל יותר. עם התקדמות האשפורה מקדם היעילות במערכות עם צמנט מסוג CEM I עולה על זה של המערכות עם

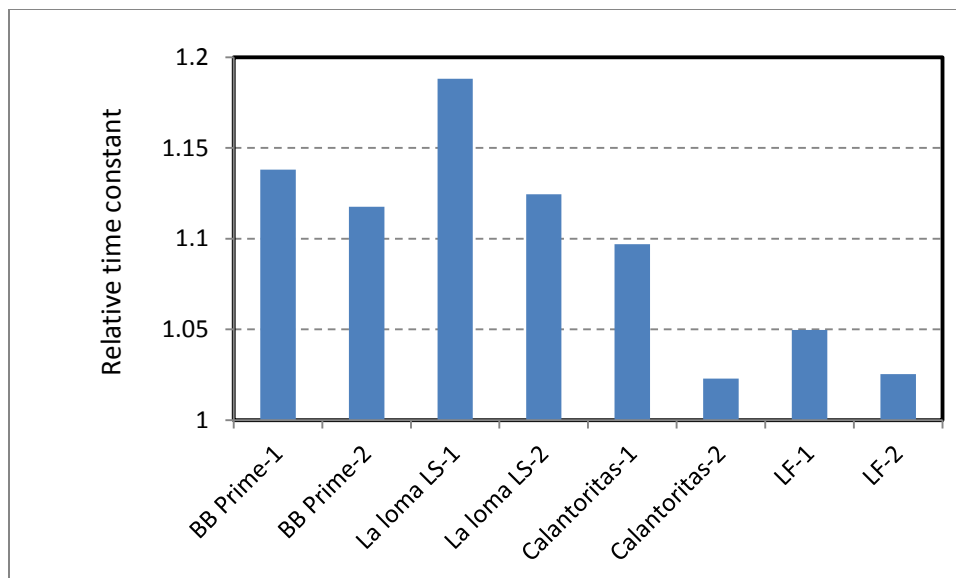
צמנט מסוג CEM II במדגמי אפר LALOMA ו- CALANTORITAS בשעה שבאפר BB PRIME ההפרש בין המקדמים מצטמצם אך נשאר עדיין יתרון קטן למערכת עם צמנט מסוג CEM II. ככל הנראה, שינוי מגמה זה הוא פועל יוצא של אפקט מלאן גדול יותר במערכות עם צמנט מסוג CEM II.



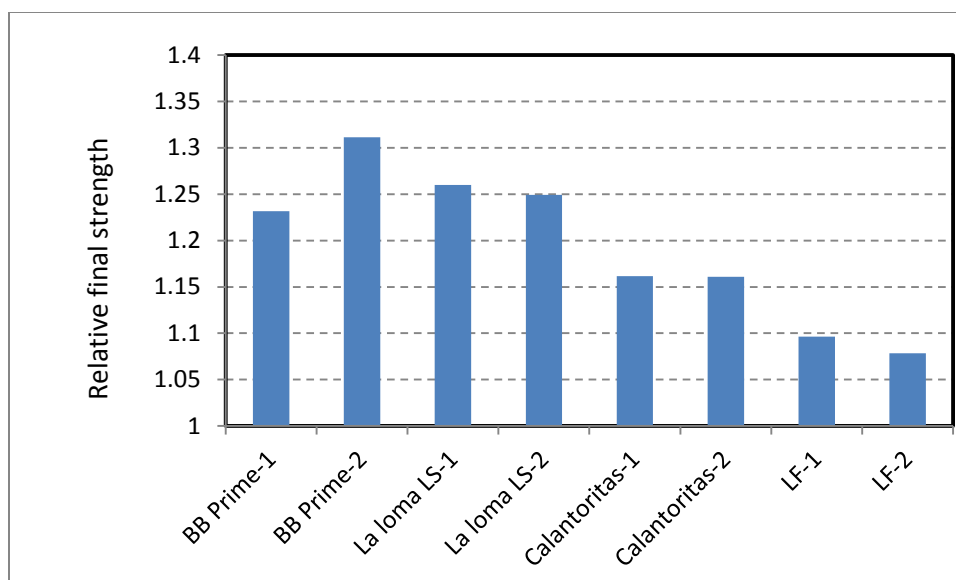
**איור 16: מקדמי יעילות בבטון (חוזק יחסי) מחושבים לפי משוואה 11 ועבור הערכים האופייניים של קבוע הזמן והחוזק הסופי.**

על המורכבות של קשרי גומלין אלו ניתן לקבל היזון נוסף אם מחשבים את הפרמטרים היחסיים של חוזק הבטונים עם אפר ומלאנים יחסית לחוזק בטון בקרה עם 230 ק"ג/מ"ק צמנט אשר אליו הוספו חומרים אלה, איור 17 ואיור 18. מתוכם ניתן לראות שכל התוספות משפרות את החוזק הסופי (איור 18), כאשר השיפור הגדול יותר הוא במדגמי אפר BB PRIME ו- LALOMA. קבועי הזמן גדולים יותר בבטון עם אפר ומלאן דבר המביא לידי ביטוי את העובדה שהתהליכים הגורמים לתוספת חוזק בנוכחות חומרים אלה איטיים יותר מאשר תהליכי ההידרציה של הצמנט. העובדה שהזמנים קצרים מאד במלאן הגירי קשורים כנראה בכך שהאפקט העיקרי שלו הוא אפקט מלאן, הבא לידי ביטוי בגיל מוקדם, להבדיל מאפקט פוצולני שנדרש זמן עברו. בהשוואה בין הערכים האופייניים היחסיים, במערכות עם צמנטים מסוג CEM I ו- CEM II, רואים שהחוזק הסופי איננו יותר נמוך ב- CEM II, בשעה שקבועי הזמן במערכות שלו הם קצת קצרים יותר.





**איור 17: קבוע זמן אופייני יחסי להתפתחות החוזק (בטון עם אפר או מלאן יחסית לבטון בקרה עם 230 ק"ג/מ"ק צמנט), ע"פ משוואה 12**

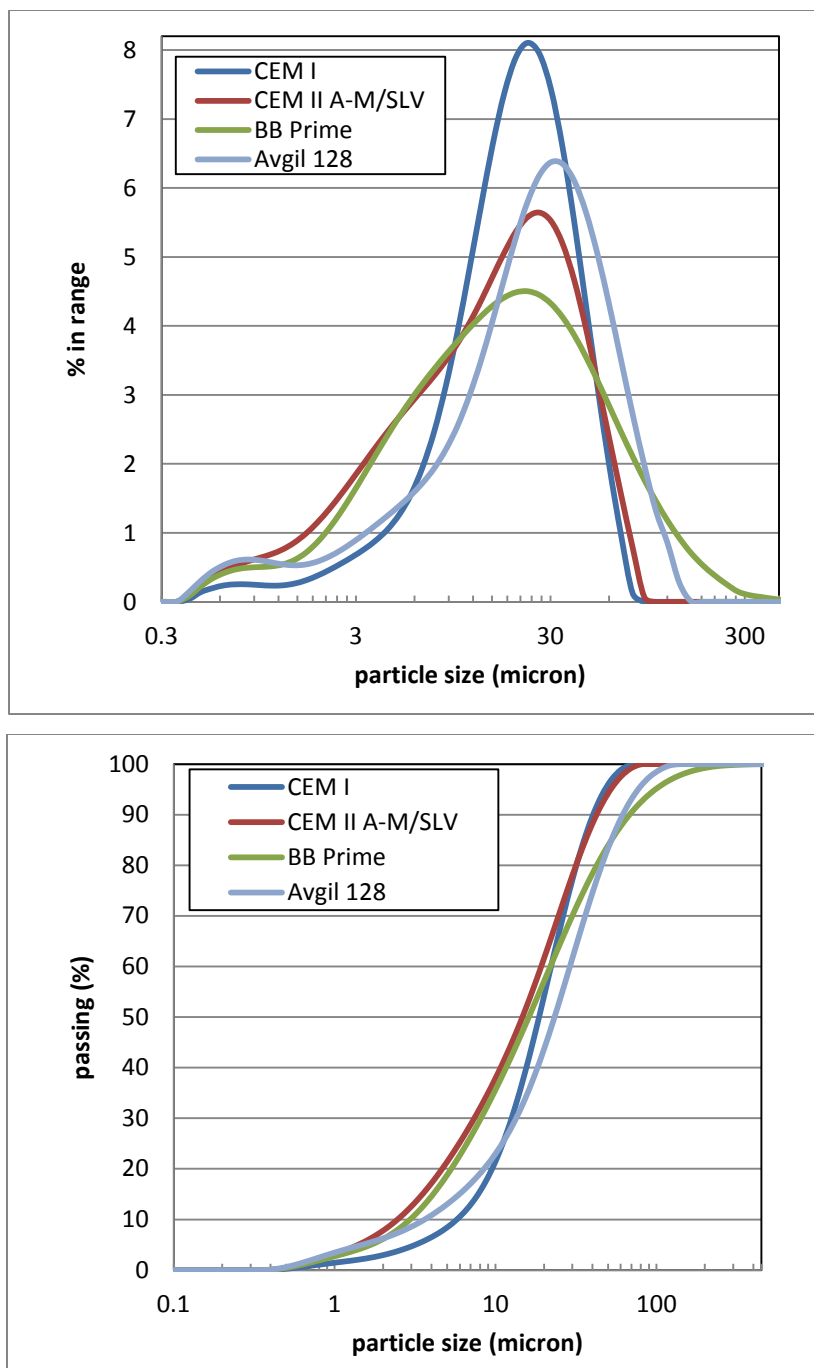


**איור 18: חוזק סופי אופייני יחסי להתפתחות החוזק (בטון עם אפר או מלאן יחסית לבטון בקרה עם 230 ק"ג/מ"ק צמנט), ע"פ משוואה 12**

בדיון על אפקט מלאן יש להביא בחשבון שהוא תלוי לא רק באופי החלקיקים אלא גם בפילוג הגודל שלהם. אפקט המלאן כפי שנקבע ב

טבלה 11 מבוסס על אמדן המתקבל מאפיון החוזק של תערובות עם מלאן אבן גיר. פילוג החלקיקים של מלאן זה מצומצם, והוא גדול יותר מאשר חלקיקי הצמנט, איור 19. לעומת זאת, פילוג החלקיקים של מדגמי האפר

הוא רחב יותר ויש בו מרכיב ניכר של חלקיקים קטנים. לכן, ייתכן והאומדן של אפקט המלאן המתבסס על חוזקי בטונים עם מלאן אבן גיר איננו מייצגת כראוי את האפקט הזה בגרגירי אפר פחם אשר ייתכן והוא גדול יותר הודות לפילוג שלהם.

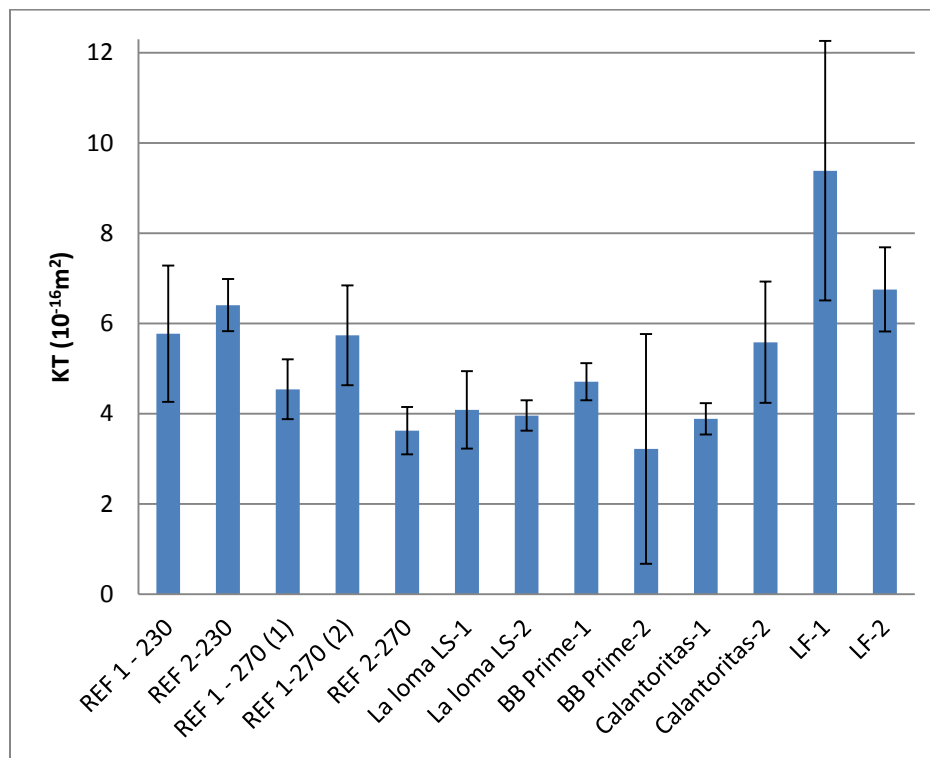


איור 19: פילוג גודל חלקיקים של שני הצמנטים, מלאן אבן גיר ואחד ממדגמי האפר

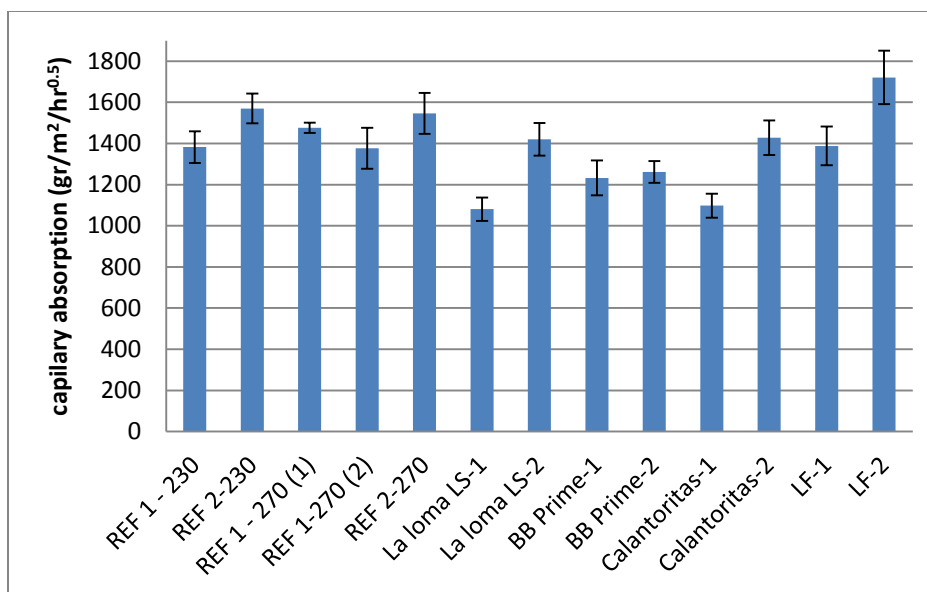
### 3.6 קיים

את ההתנהגות מנקודת מבט של קיים ניתן לאמוד מתוך פרמטרים של חדירות ובעבודה הנוכחית נקבעו לצורך כך ערכים של חדירות לאוויר וספיגות קפילרית, איורים איור 20 ו-איור 21. עבור שתי התכונות הערכים הנם נמוכים יותר עבור הבטונים המכילים אפר פחם, אך לא ניתן להצביע על יתרון בולט של אחד מסוגי האפר. יתרה מכך, ההקטנה בערכי החדירות איננה בסדר גודל המשנה באופן משמעותי את הקיים של המערכת – לשינוי כזה דרושה הקטנה של לפחות 50% וזה לא המקרה כאן. ראוי לציין שתוצאות אלה התקבלו באשפיה תקנית שמשמעותה שרק בשבוע הראשון היו המדגמים בסביבה מימית. אלה אינם תנאים המתאימים למיצוי הריאקציה הפוצלנית ועל כן העובדה שלמרות זאת הייתה ירידה במקדמי החדירות מעידה על תרומה חיובית של האפר.

באיורים 17 ו-18 לא ניתן להבחין במגמה המפרידה בין תערובות שנעשו עם CEM I או CEM II.



איור 20: מקדם חדירות אוויר, בדיקת טורנט



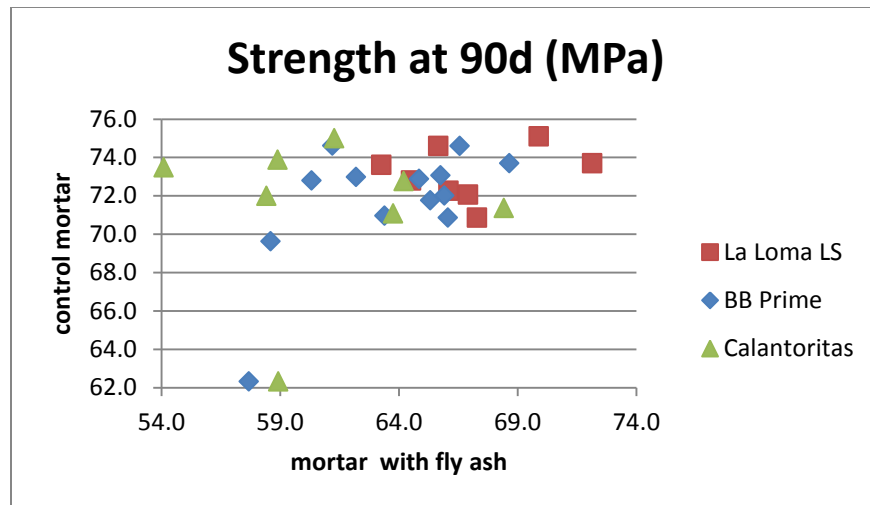
איור 21: ספיגות קפילרית

### 3.7 ניתוח תוצאות של בדיקות תקניות מתמשכות שבוצעו במעבדות בדיקה

בנוסף לבדיקות שנעשו ספציפית לצורך מחקר זה, נערך ניתוח של תוצאות שהתקבלו בבדיקות מתמשכות במעבדות בדיקה אשר נעשו עבור מנהלת אפר הפחם. הבדיקות כוללות בדיקות סדירות של אקטיביות פוצולנית לאורך שנים על-ידי איזוטופ, בדיקות אקטיביות פוצולנית של אפר פחם מהשנה האחרונה עם 3 סוגי צמנט שונים שנעשו על-ידי איזוטופ, ובדיקות של תערובות בטון שנעשו במכון התקנים. התוצאות של בדיקות אלה נותחו כאן במגמה לבחון אותן לאור המסקנות שהתקבלו במחקר הנוכחי. ניתוח של תוצאות אלו מוסיף נדבך לחיזוק המסקנות.

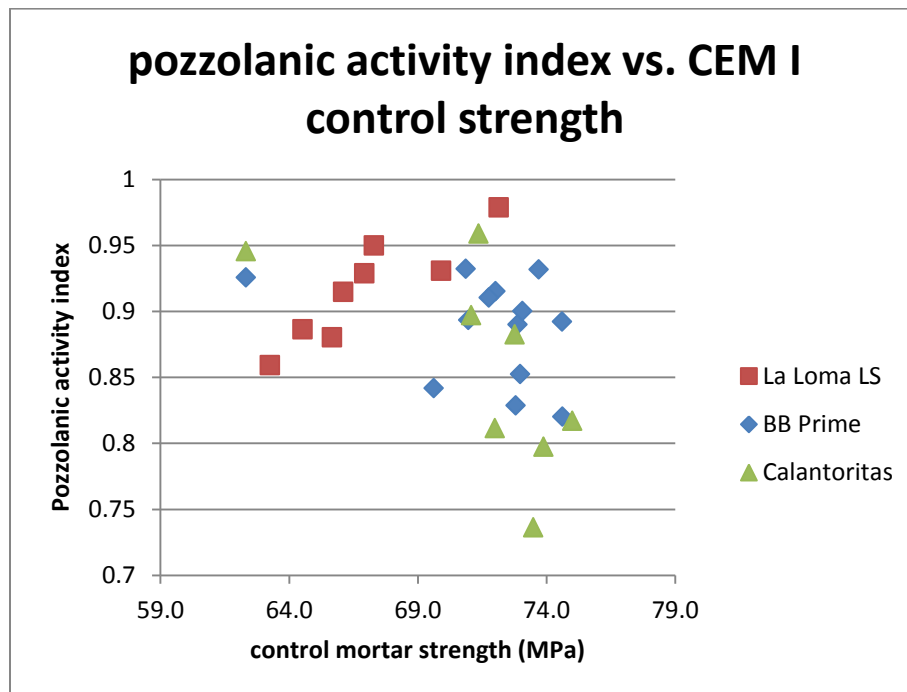
#### תוצאות רב-שנתיות של אקטיביות פוצולנית

הממוצעים וסטיות התקן של התוצאות הרב-שנתיות של האקטיביות הפוצולנית במלטים של שלושת סוגי האפר ששמשו במחקר הופיעו כבר באיור 4. מתוכו ניתן היה להסיק שהתכונות של אצוות אפר הפחם ששמשו למחקר הנוכחי אינן חורגות מהתוצאות המקובלות, ולכן ניתן להתייחס למדגמים כאל מדגמים מייצגים. לא ניתן להבחין בקשר בין חוזק מלט הבקרה (מלט מצמנט פורטלנד CEMI בלבד) לחוזק המתקבל במלט המכיל 25% אפר פחם מרחף ו- 75% צמנט פורטלנד (איור 22). זוהי אינדיקציה לכך שחוזק הצמנט אינו משפיע על האקטיביות הפוצולנית. כאשר משרטטים את האקטיביות הפוצולנית כנגד חוזק מלט הבקרה (איור 23), מתקבל קשר בין חוזק מלט הבקרה ומקדם האקטיביות הפוצולני רק עבור אפר פחם La Loma LS. עם זאת, אם הקשר היה קשר מהותי, התלוי במנגנון בו חוזק צמנט הבקרה משפיע על האקטיביות של אפר הפחם, הרי שקשר כזה היה צריך להתקבל עבור כל סוג אפר פחם. נראה על פניו שאין תלות ברורה בין מקדם האקטיביות הפוצולנית של האפר ובין האקטיביות של הצמנט כפי שניתנת לאמדן מתוך חוזק מלט הבקרה.



איור 22: חוזק מלט בקרה, כנגד חוזק מלט המכיל 25% אפר פחם מרחף ו- 75% צמנט פורטלנד בבדיקת

אקטיביות פוצולנית על-פי EN 450

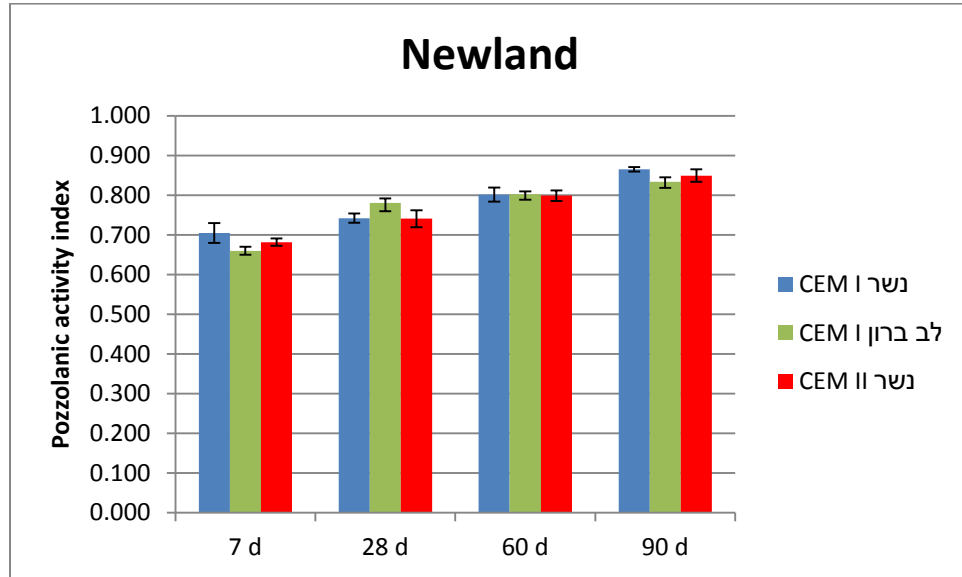


איור 23: אקטיביות פוצולנית כנגד חוזק מלט הבקרה

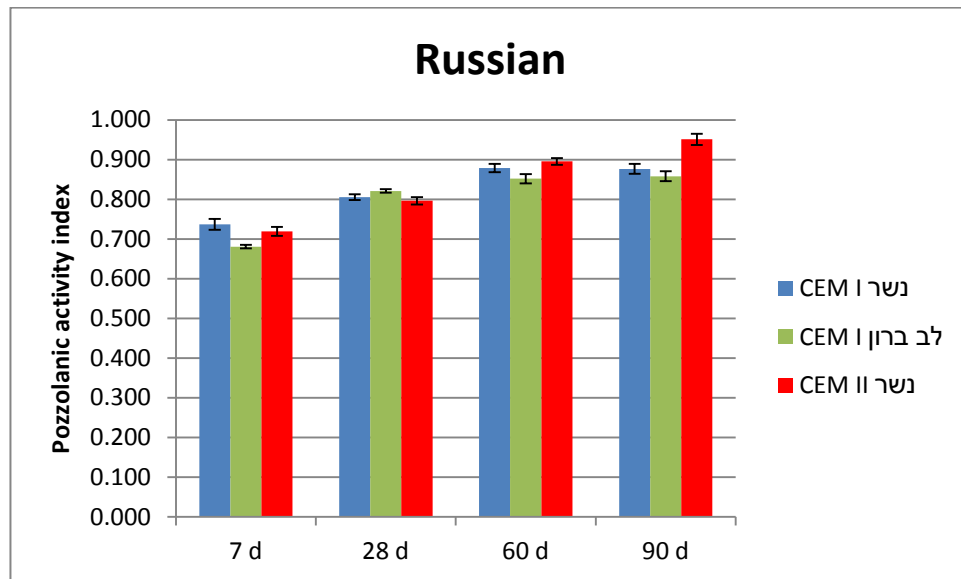
**בדיקות אקטיביות פוצולנית של אפר פחם עם 3 סוגי צמנט שונים**

בדיקות מקדם אקטיביות פוצולנית על-פי EN 450 נעשו עם 7 סוגי אפר פחם מרחף שונים, ושלושה סוגי צמנט שונים. התוצאות עבור מקדם האקטיביות הפוצולנית בתלות בסוג הצמנט מוצגות באיור 24. ניתן לראות שעבור כל מדגמי האפר לא היה הבדל משמעותי במקדם האקטיביות בבדיקות עם סוגי הצמנט השונים, CEM I מתוצרת מקומית ומיבוא (לב ברוך) ו- CEM II מתוצרת מקומית. כאשר יש הבדל, הוא מופיע בגיל 90 יום,

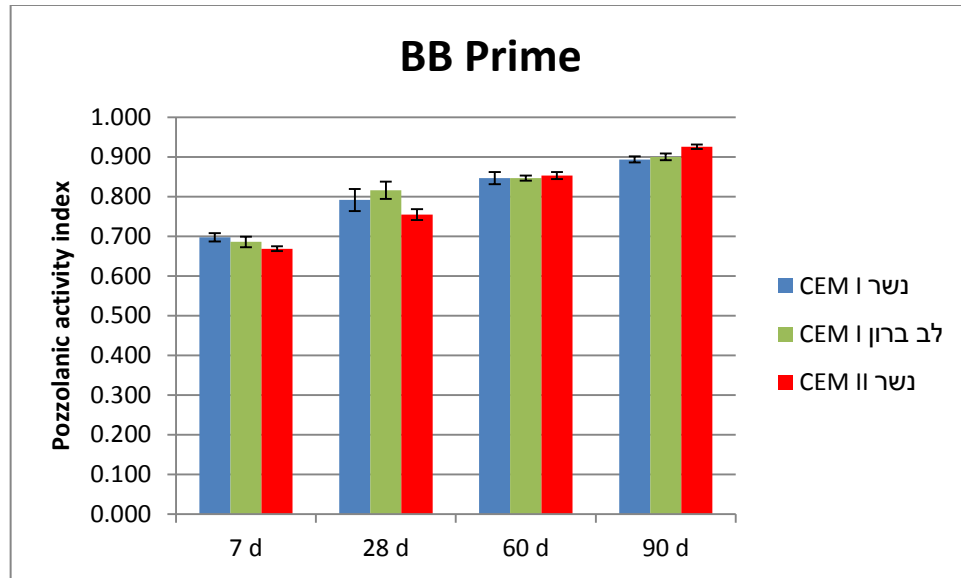
והאקטיביות הגבוהה יותר מתקבלת עבור CEM II מתוצרת מקומית. המגמה הזו דומה לתוצאות שהתקבלו במחקר הנוכחי.



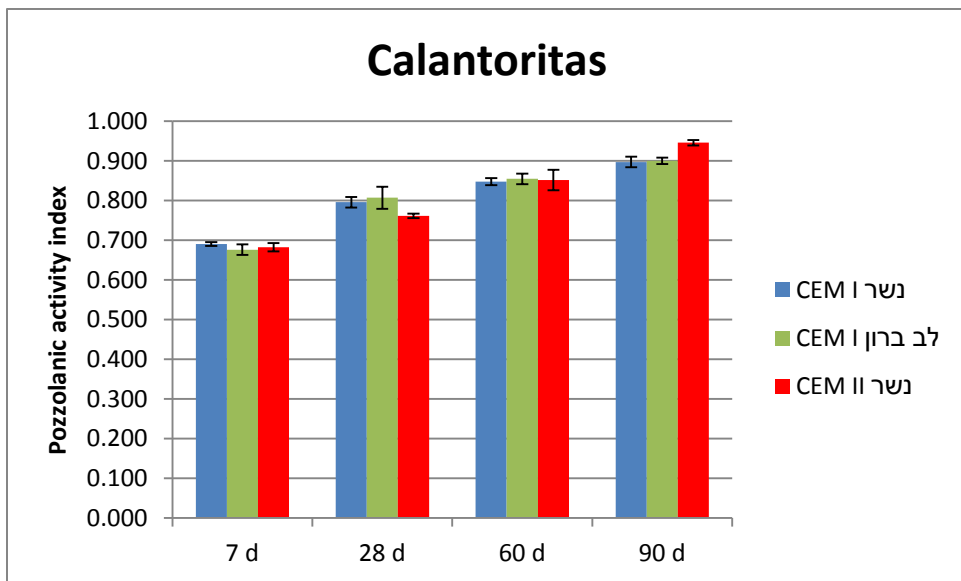
(א)



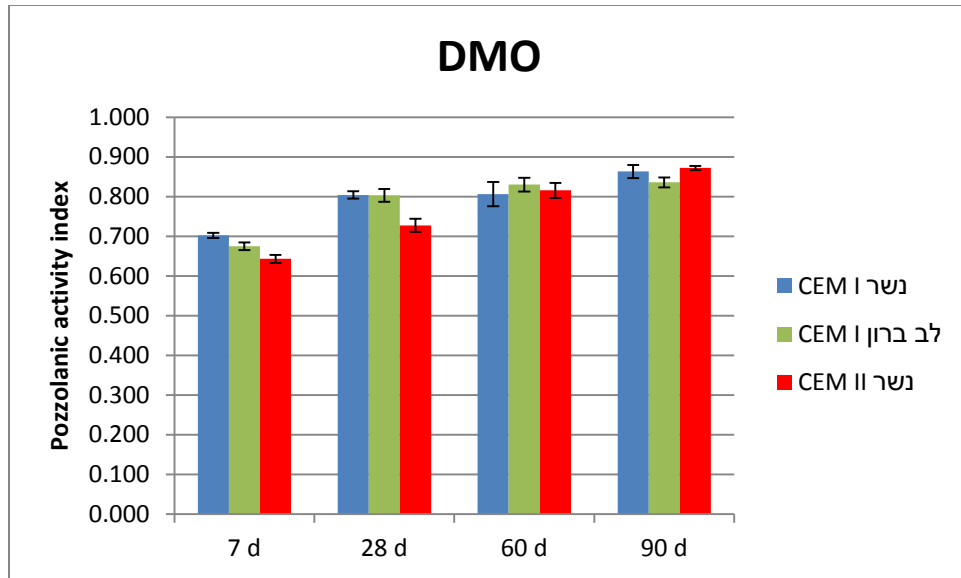
(ב)



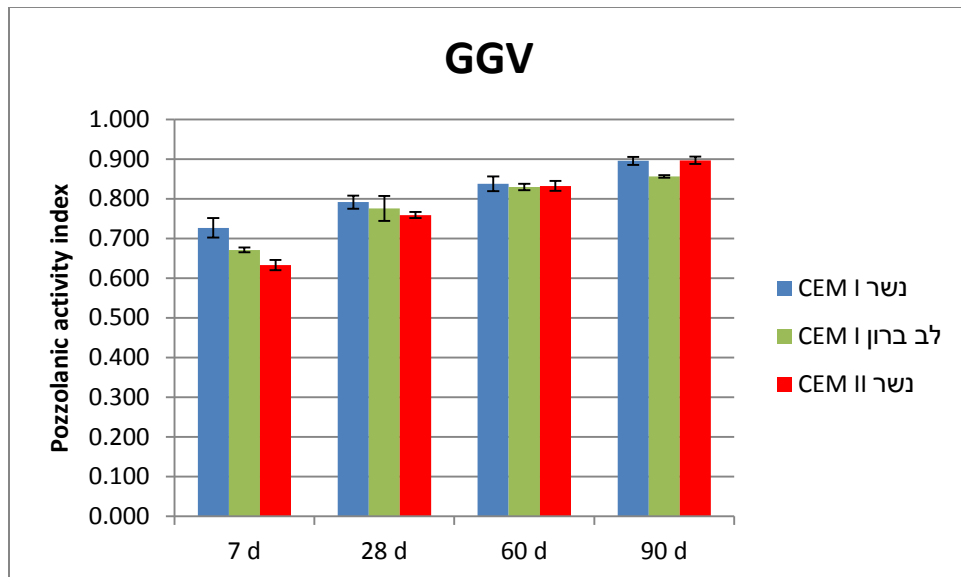
(ג)



(ד)

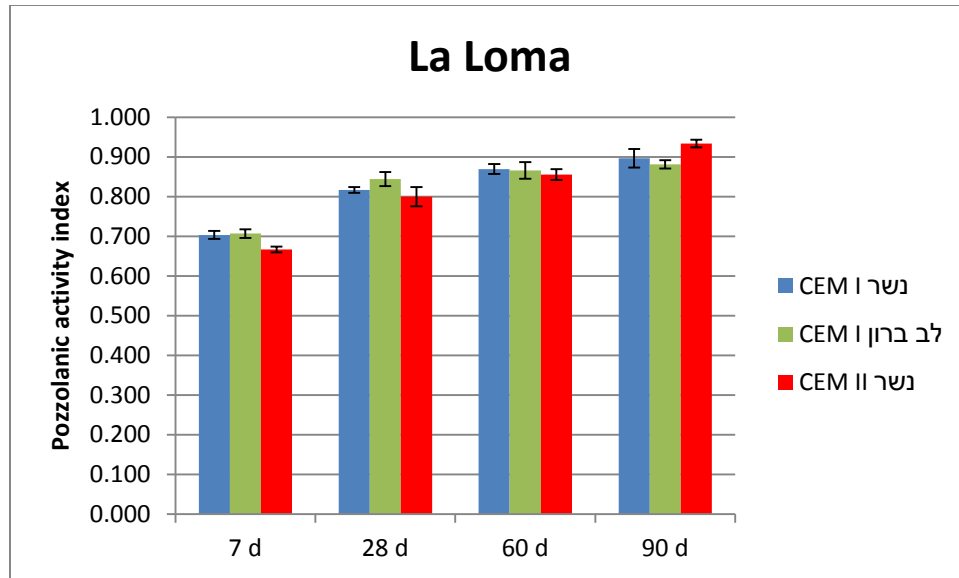


(ה)

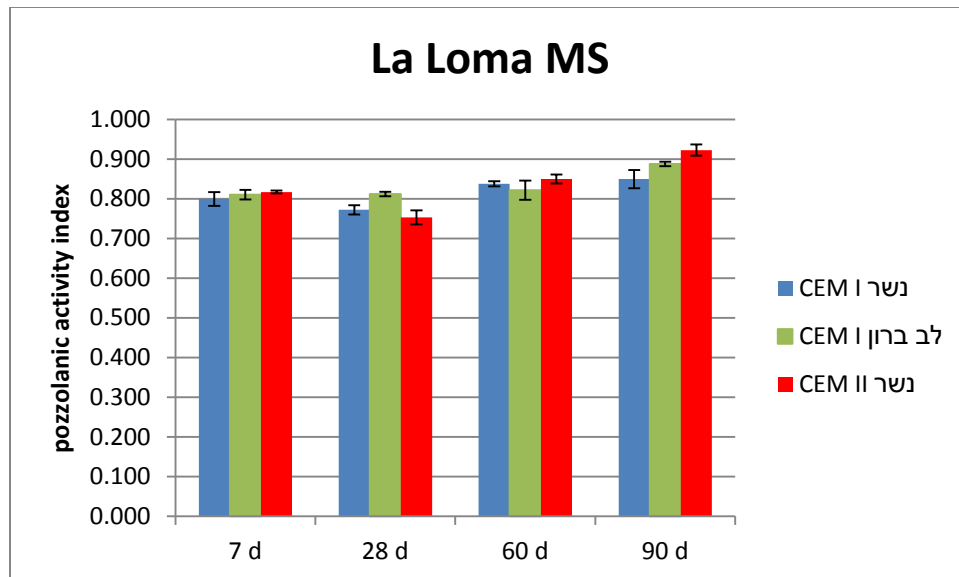


(ו)





(ז)



(ח)

איור 24 : האקטיביות הפוצולנית בגילאים שונים של 7 סוגי אפר פחם מרחף עם 3 סוגי צמנט : CEM I תוצרת נשר, CEM I מיובא ע"י לב ברון, ו- CEM II A/M-SLV תוצרת נשר

#### 4. מסקנות

1. אקטיבציה פוצולנית בבדיקות תקניות במלט לעומת אקטיבציה בפועל בבטון : לא נמצאה קורלציה ברורה בין האקטיבציה כפי שנקבעה בבדיקה התקנית במלט ובין האקטיבציה שהתקבלה בפועל בבטון. מדגם האפר שאופיין במקדם האקטיבציה הנמוך ביותר במלט היה אמנם החלש ביותר בבטון, אך ההבדלים בינו ובין האחרים בבדיקת המלט היו קטנים בעוד שבבטון הם היו גדולים.

2. אקטיבציה במערכות עם צמנט CEM I לעומת CEM II: תוצאות בדיקות תקניות במלט לא הראו באופן ברור יתרון למערכות עם צמנט CEM I וניתן אף לומר שהייתה אינדיקציה למגמה הפוכה. באפיון הפעילות בבטון היה יתרון לשימוש בצמנט CEM I, בשני מדגמי אפר, בעוד שבשלישי היה יתרון לשימוש בצמנט CEM II. מכאן המסקנה שבמערכות שנבדקו כאן לא היה יתרון ברור לאקטיבציה על ידי צמנט CEM I. נראה על כן שההנחיה בתקן למקדם יעילות עבור CEM II בשיעור של חצי מ- CEM I (0.2 לעומת 0.4) איננה מבוססת ויש לבדוק כל מקרה לגופו.
3. ניתוח התפתחות החוזק בבטונים עם אפר פחם מראה שכל מערכת ניתנת לאיפיון על יד שני פרמטרים, האחד הוא הזמן האופייני והשני הוא החוזק הסופי. באמצעות שני אלה ניתן לחשב את האקטיביות בבטון ואת השינויים בה על ציר הזמן.
4. העדר קשרי גומלין ברורים בין האקטיביות התקנית במלטים ובין התפקוד בפועל בבטון ניתנת להסבר בכך שיש להביא בחשבון בנוסף לאפקט הפוצולני גם אפקט של מלאן אשר השפעתו שונה בבטונים ומלטים. אפקט זה קשור כנראה בפילוג גודל החלקיקים של הצמנט והאפר.
5. המשמעויות של מסקנות אלה שהבדיקה התקנית של אקטיביות פוצולנית איננה מספקת לצורך חיזוי מדויק של התנהגות האפר בבטון וגם לא לחיזוי האינטראקציה בינו ובין צמנטים מסוג צמנט CEM I ו- CEM II, ויש צורך באפיון ישיר של ההתנהגות בבטון. פיתוח של בדיקות פשוטות ומהירות יותר שיאפשרו חיזוי על בסיס ההרכב הכימי והפיזיקלי של האפר מחייב כנראה הבנה טובה יותר של השפעת פילוג גודל החלקיקים של הצמנט והאפר בכל הקשור לאפקט מלאן.
6. התוצאות בעבודה זו מאששות מסקנות של בדיקות קודמות המראות שניתן להפיק מאפר פחם יעילות בבטון מצמנט CEM II שאינה נופלת מזו המתקבלת במערכת צמנט CEM I. יש להניח שהדבר קשור באופטימיזציה של פילוג גודל החלקיקים. מבחינה מעשית פרוש הדבר שהחיסכון בקלינקר בצמנט על ידי תוספת מוספים מינרליים אינה חייבת בהכרח לפגוע באקטיביות של מוספים מינרליים המשולבים ישירות בבטון.
7. בבטונים שנבדקו כאן, נמצא שללא תלות בהרכב אפר הפחם היה שיפור בהתנגדות לחדירה של אוויר ומים לתוך הבטון למרות האשפרה המוגבלת במים. שיפור זה משמעותו שהקיים של בטונים אלה איננו פחות טוב מזה של בטונים מצמנט בלבד, למרות האשפרה המוגבלת. יש לציין שהאשפרה כאן היא אמנם מוגבלת, 7 ימים במים, אך זו האשפרה המינימלית הנדרשת על פי תקנים ומפרטים לביצוע בשטח. הקטנת משך האשפרה מתחת לזמן זה עלולה לגרום לפגיעה באכות הבטון עם אפר פחם מנקודת מבט של קיים ולכך יש סימוכין בעבודות קודמות.

## 5. רשימת ספרות

- [Atis2005] Atiş, C.D., Strength properties of high-volume fly ash roller compacted and workable concrete, and influence of curing condition, Cement and Concrete Research, Volume 35, Issue 6, June 2005, Pages 1112-1121
- [Brandt1995] Brandt, A.M Cement-based composites: materials, mechanical properties and performance, Books on concrete materials and structures from E & FN SPON. Taylor & Francis, 1995
- [Cyr2006] Cyr, M. , Lawrence, P., Ringot, E., Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength, Cement and Concrete Research, Volume 36, Issue 2, February 2006, Pages 264-277
- [Felekoglu2009] Felekoğlu, B., Türkel, S., Kalyoncu, H., Optimization of fineness to maximize the strength activity of high-calcium ground fly ash - Portland cement composites, Construction and Building Materials, Volume 23, Issue 5, May 2009, Pages 2053-2061
- [Huang2013] Huang, C., Lin, S.K. ,Chang, C.H., Chen, H.J., Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash, Construction and Building Materials, Volume 46, September 2013, Pages 71–78
- [Oner2005] Oner, A., Akyuz, S., Yildiz, R., An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete, Cement and Concrete Research, Volume 35, Issue 6, June 2005, Pages 1165-1171
- [Papadakis2002] Papadakis, V.G., Antiohos, S., Tsimas, S., Supplementary cementing materials in concrete. Part II: A fundamental estimation of the efficiency factor, Cement and Concrete Research, Volume 32, Issue 10, October 2002, Pages 1533-1538
- [Rajamane2007] Rajamane, N.P., Annie Peter, J., Ambily, P.S., Prediction of compressive strength of concrete with fly ash as sand replacement material, Cement and Concrete Composites, Volume 29, Issue 3, March 2007, Pages 218-223
- [Sharma1993] Sharma, R.C., Jain, N.K., Ghosh, S.N., Semi-theoretical method for the assessment of reactivity of fly ashes, Cement and Concrete Research, Volume 23, Issue 1, January 1993, Pages 41-45

[Torrent 1992] Torrent, R.J., A two chamber vacuum cell for measurement of the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site. *Mat. & Str.* 25, 358–365.

[Wang2004] [Wang, A., Zhang, C., Sun, W., Fly ash effects: II. The active effect of fly ash, *Cement and Concrete Research*, Volume 34, Issue 11, November 2004, Pages 2057–2060

[Wang2004a] Wang, A., Zhang, C., Sun, W., Fly ash effects: III. The microaggregate effect of fly ash, *Cement and Concrete Research*, Volume 34, Issue 11, November 2004, Pages 2061–2066

[Yildirim2011] Yildirim, H., Sümer, M., Akyüncü, V., Gürbüz, E., Comparison on efficiency factors of F and C types of fly ashes, *Construction and Building Materials*, Volume 25, Issue 6, June 2011, Pages 2939-2947

## **Abstract**

The study deals with the behavior of different types of fly ash in concretes made with CEMI and CEMII cements with the objective of characterizing the efficiency of fly ash added directly to the concrete and resolve whether the use of blended cements compromises the efficiency of the fly ash.

The experimental work included characterizing the properties of concretes with different contents of cement and fly ash, as well as similar additions of fly ash using inert calcium carbonate filler with similar size gradation to resolve chemical and physical (filler) effects. Mortar specimens were also studied to characterize pozzolanic activities as defined by the standards. The properties characterized were strength and durability which was assessed by air and water penetration tests.

1. No correlation was found between the standard activity index in mortars and the actual activity in concretes.
2. The standard mortar activity tests did not show clear cut advantage of using CEMI and in numerous cases the opposite was observed. Therefore the recommendations in standards to use higher efficiency coefficient for fly ash in CEMI concretes should be questioned and each case should be judged on its own.
3. The lack of clear cut correlations between the activity in mortars and in concretes can be explained by the need to consider not just the pozzolanic effect but also a filler effect which may become more significant in concretes. This effect is sensitive to the particle size distribution of the cement and the fly ash.
4. This conclusion indicates that in order to determine the activity of fly ash added to concretes prepared with blended cements there is a need to develop test methods to characterize the behavior in the concrete.
5. The trends observed in this study indicate that the efficiency of fly ash added to concrete with blended cements can be as high as or higher than with those of CEMI. From a practical point of view this implies that the activation of the

fly ash in the blended cement does not necessarily compromises the activity of additional fly ash added directly to the concrete.

6. The tests carried out here indicate that the durability of the concretes with fly ash was not inferior to that of the straight Portland cement concrete in spite of the limited water curing which was employed during the first 7 days only.



Founded by מיסודם של

MINISTRY OF CONSTRUCTION AND HOUSING משרד הבינוי והשיכון

TECHNION ISRAEL INSTITUTE OF TECHNOLOGY הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל

Faculty of Civil & Environmental Engineering הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

**NATIONAL** המכון  
**BUILDING** הלאומי  
**RESEARCH** לחקר  
**INSTITUTE** הבנייה

---

2016421

# **Technological infrastructure for reducing the clinker content in concretes: Fly ash with CEMII cements**

**Dr. Amit Kenny    Prof. Arnon Bentur**

Copyright © 20014 by A. Kenny and A. Bentur  
The National Coal Ash Board and The Technion Research and Development  
Foundation, Ltd, Haifa

Haifa

April 2014

**המכון לאומי לחקר הבנייה**

**קרית הטכניון, חיפה 3200003**

**טל. 04-8292242/3**

**[nbri@tx.technion.ac.il](mailto:nbri@tx.technion.ac.il)**

