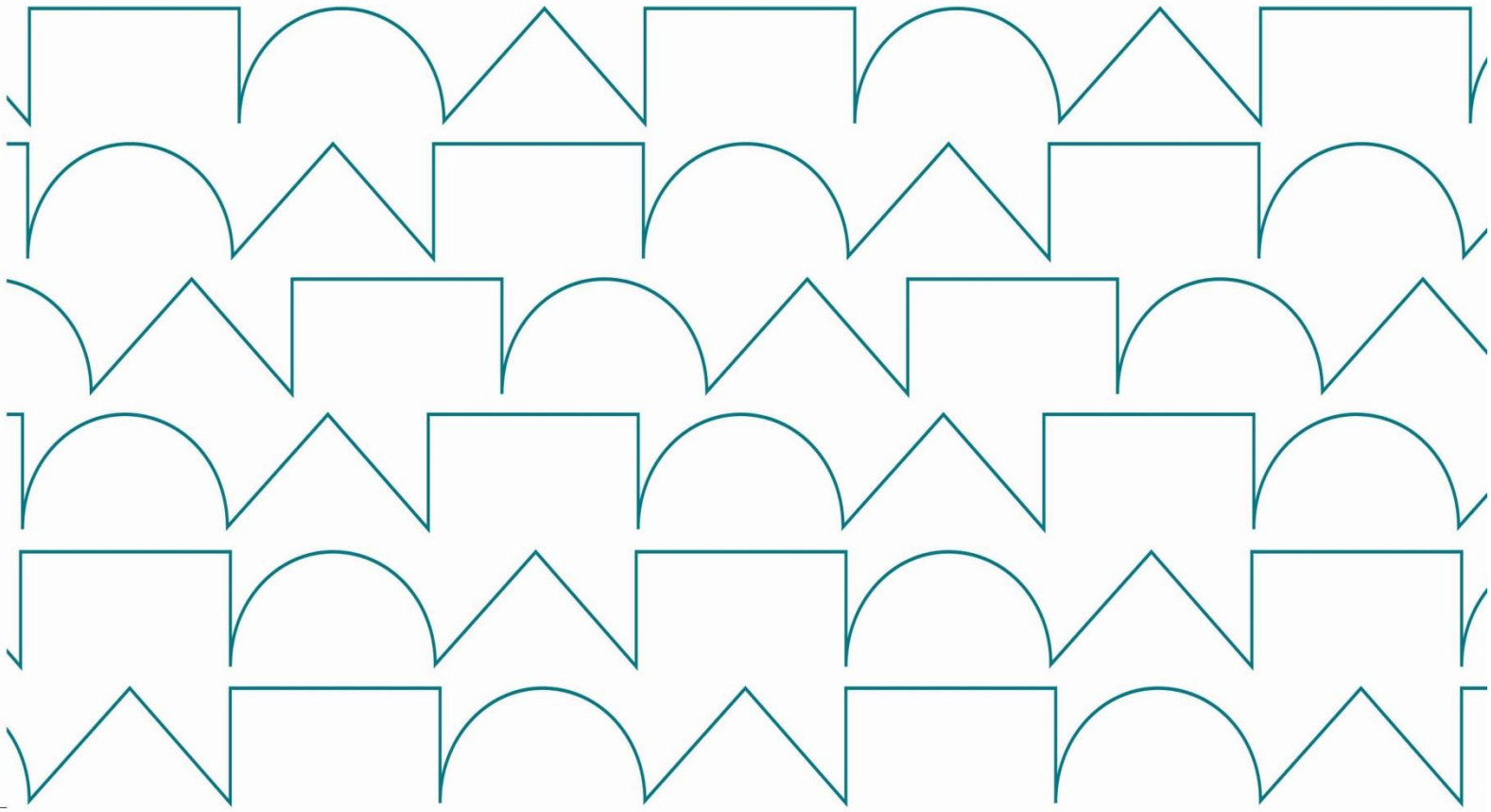
מיסודם של
משרד הבינוי והשיכון

המכון הלאומי לחקר הבנייה

הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

קריטריונים לקביעת יעילות של אשפרת משטחי בטון בחומרי אשפרה מותזים בתנאי אקלים חם ויבש

רינה וסרמן, ארנון בנטור



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 BUILDING RESEARCH INSTITUTE
המכון הלאומי לחקר הבנייה

2011586

קריטריונים לקביעת יעילות של אשפרת משטחי בטון בחומרי אשפרה מותזים בתנאי אקלים חם ויבש

ד"ר רינה וסרמן, פרופ' ארנון בנטור

מלווי המחקר:

אינג' ליאו רובינס, אינג' מנחם קניגסברג, אינג' יוסי סיקולר, אינג' אבנר טרבלסי

בהזמנת משרד הבינוי והשיכון

הזמנה מס' 4500297576

Copyright © 2010 by R. Wassreman and A. Bentur, the Ministry of Construction and Housing and the Technion Research and Development Foundation, Ltd, Haifa

אלול תש"ע ח י פ ה אוגוסט 2010

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 עניינים

עמוד

תקציר.....

1. רקע ותאור הבעיה.....2

2. מטרת המחקר 3

3. שיטת המחקר.....3

3.1 חומרים, הרכב הבטונים, הכנתם ובדיקות בטון טרי 3

3.2 אשפרת בטונים וחשיפתם לתנאי סביבה.....4

3.3 בדיקות 5

4. תוצאות 6

4.1 חוזק לחיצה וכפיפה 6

4.2 הצטמקות בטונים.....11

4.3 חדירות בטון : מקדם חדירת אוויר וספיגה קפילרית 15

4.4 חדירות לאוויר 15

5. דיון 20

5.1 השפעת סוג האשפרה ותנאי חשיפה על חוזק בטון קשוי.....20

5.2 השפעת סוג האשפרה ותנאי חשיפה על קיים הבטון.....20

6. מסקנות 24

7. מראי מקום 25

נספח א' 26

נספח ב'..... 27

נספח ג' 28

Abstract

תקציר

הניסיון והמחקר בטכנולוגיה של בטון מזוין, במיוחד בעשור האחרון, המחישו והבליטו חשיבות טיב האשפרה. מחקרים רבים אשר בוצעו בעבר הראו שאיכות כיסוי הבטון היא פונקציה של משך האשפרה הרטובה של בטון מיד אחרי היציקה. הוכח שהעדר אשפרה רטובה בכלל או אשפרה רטובה חלקית והלא רצופה גורמות לעלייה דרסטית של חדירות הבטון בכל הנוגע למים, כלורידים וקרבונציה אשר מהווים גורמים עיקריים של קורוזית פלדה בבטון. לאשפרה לקויה משמעויות כלכליות ניכרות והן יכולות אף להביא לסיכונים בטיחותיים.

בשנים האחרונות ניתנת תשומת לב רבה למהירות תהליכי הבנייה. עקב כך מהנדסים אזרחיים וקבלנים נוטים להשתמש בחומרי אשפרה. זאת הסיבה שבשנים אחרונות הוחדרו לשוק חומרי אשפרה שונים בעלי תכונות מגוונות. קיימים יישומים רבים, בהם השימוש בחומרי אשפרה (curing compounds) נראה כיותר מעשי וחסכוני, כגון: מסעות בטון; רצפות בטון; מעטפת בטון לבריכות מים מתוקים; שלד בבניינים גבוהים וכו'.

חומרי אשפרת בטונים חייבים להתאים לדרישות התקן האמריקני ASTM-C-309. ההשוואה של דרישת התקן האמריקאי עם תוצאות המחקר לעיל מאפשרת להגיע למסקנה שחומרי איטום מונעים במידה ניכרת את הפסדי המים מהבטון. יחד עם זאת לא ניתן לסכם מהו תיפקוד של חומרי איטום הללו בתנאי מזג האוויר הישראלי. תקן הישראלי ת"י 466. קובע שהשימוש בחומרי איטום מותזים טעון באישור של מתכנן שלד הבניין. חשוב להדגיש כי נושא זה טרם נבדק בארץ במידה הנדרשת, והוא מבוסס רק על המידע שמתקבל מהחברות המשווקות חומרי איטום בארץ. כתוצאה מכך אין בידי מתכנני הבניין מספיק ידע מקצועי כדי להחליט האם האשפרה בחומרי אשפרה נוזליים הינה שוות ערך לאשפרה רטובה או אשפרה תקנית אחרת בכל הקשור לתיפקוד ארוך טווח של בטונים.

מחקר זה בחן בצורה שיטתית את השפעת תנאי מזג האוויר האופייניים לאקלים ישראלי על תיפקוד וקיים של בטונים המאושפרים בחומרי אשפרה. במחקר שימשו בטונים עם תכולת צמנט זהה של כ- 350 ק"ג ל-1 מ"ק בטון ו-2 מנות מים לצמנט: 0.5 ו-0.6. במחקר הנוכחי נחשפו הבטונים למספר סוגי אשפרה: אשפרת תקנית (בקרה); אשפרת ייחוס באמצעות בד גיאוטכני מסחרי מסוג אשפרית; אשפרה בחומר אשפרה מסחרי על בסיס סיליקוני; אשפרה בחומר אשפרה מסחרי על בסיס אקרילי; ללא אשפרה רטובה כלל.

נבדקו חוזק לחיצה של בטונים בגילים 1, 7 ו-28 ימים, וחוזק כפיפה של בטונים בגיל 28 ימים. בוצע מעקב אחרי הצטמקות הבטונים החל מגיל 7 ימים למשך כחודשיים. נערך מעקב אחרי ספיגה קפילירית של הבטונים החל מגיל 28 ימים. בגיל 28 ימים נחשפו דוגמאות הבטונים לתנאי קרבונציה מואצת ונערך מעקב אחרי שינוי עומק הקרבונציה בבטונים באמצעות תרסיס פנולפתלאין.

על סמך תוצאות המחקר ניתן לסכם שכל סוגי האשפרה האלטרנטיביים אשר נבדקו במסגרת המחקר הנוכחי גרמו להחמרה משמעותית במאפייני חדירות הבטון. לכן לא ניתן להתייחס לשיטות אשפרה אלה כשוות ערך לאשפרה הרטובה הרצופה. אשפרה בבד גיאוטכני מאפשרת להגיע לחוזק שווה ערך לזה של בטון אשר קיבל אשפרה תקנית. אבל מבחינת חדירות הבטון לא מאפשרת האשפרה בבד גיאוטכי לקבל בטון שווה ערך לבטון אחרי אשפרה רטובה רצופה.

אשפרה בחומרי האשפרה לא מאפשרת לקבל בטון שווה ערך, הן מבחינת החוזק והן מבחינת חדירות מרקם הפנים.

1. רקע ותאור הבעיה

הניסיון והמחקר בטכנולוגיה של בטון מזוין, במיוחד בעשור האחרון, המחישו והבליטו חשיבות טיב האשפרה. מחקרים רבים אשר בוצעו במכון בעבר [1-2] הוכיחו בוודאות שחלק ניכר מהבעיות הקשורות במבני בטון מזוין מקורן באיכות ירודה של כיסוי הבטון, הן באשר לתכונות הבטון והן באשר לעובי הכיסוי. מחקרים הללו הראו שאיכות כיסוי הבטון היא פונקציה של משך האשפרה הרטובה של בטון מיד אחרי היציקה. הוכח שהעדר אשפרה רטובה בכלל או אשפרה רטובה חלקית והלא רצופה גורמות לעלייה דרסטית של חדירות הבטון בכל הנוגע למים, כלורידים וקרבונציה אשר מהווים גורמים עיקריים של קורוזית פלדה בבטון. לאשפרה לקויה משמעויות כלכליות ניכרות והן יכולות אף להביא לסיכונים בטיחותיים. התיקון והשיפוץ של מבנה שניזוק הנו מורכב ויקר, בעוד שטיפול נכון במבנה בשעת הקמתו, למניעת בעיות אלה, אינו דורש למעשה השקעה נוספת אלא רק תשומת לב שתהיה מגובה בשיטת לבקרה ואבטחת איכות.

בספרות המקצועית מוגדרת האשפרה כתהליך האבטחה של כמות הרטיבות הסבירה בבטון ושמירת הטמפרטורה שלו במשך תהליך הידרצית הצמנט, וזה כדי שיתפתחו תכונות הבטון הרצויות [3]. חקר השפעת האשפרה הרטובה על התפתחות החוזק והשחיקה החל עוד בשנות ה-30 של המאה הקודם, עם תחילת עידן הבטון בעולם [4-8].

ללא ספק, האשפרה הרטובה הרצופה היא אשפרת הבטון הטובה ביותר מבחינת השלכותיה על חוזק הבטון ועל הקיים שלו. יחד עם זאת, קיימים יישומים רבים, בהם השימוש בחומרי אשפרה (curing compounds) נראה כיותר מעשי וחסכוני, כגון: מסעות בטון; רצפות בטון; מעטפת בטון לבריכות מים מתוקים; שלד בבניינים גבוהים וכו'. בנוסף לכך, בחלק מאזורי הפיתוח שבהם טרם קיימת מערכת הספקת המים המרכזית, העברת המים הדרושים לאשפרה רטובה הינו תהליך יקר וקשה לפיקוח. אי לכך, חומרי האשפרה נחשבים כפיתרון יעיל לאשפרת משטחי בטון.

באופן כללי חומרי האשפרה הם נוזלים אשר אחרי יישומם מייצרים ממברנות על פני בטון ובכך אמורים למנוע את התאיידות המים מהבטון הטרי והמתקשה. כעיקרון מתבצע היישום של נוזלי אשפרה על פני בטון טרי, ושיטות היישום הן התזה או הברשה. אחרי התאדות המרכיב הנוזלי של חומר האשפרה מתרחש הפלמור או ההתאחות של הפולימרים שבו וכתוצאה נוצר קרום דק אשר אוטם את פני הבטון. מנגנון היישום הפשוט הנ"ל תרם רבות להחדרת חומרי האיטום לאתרי הבנייה כאלטרנטיבה לאשפרה הקונבנציאונלית הרטובה. הצהרות היצרנים לגבי יתרונות חומרי האשפרה בהשוואה לאשפרה קונבנציונלית רטובה הן:

- ביצוע פשוט ללא צורך בטיפול המשך;
- יישום בשלב מוקדם, דהיינו: מיד עם היעלמות ברק המים מפני הבטון;
- חיסכון במים מהווה את פן "בנייה ירוקה" של אשפרה זו;
- חיסכון אדיר באזורים נטולים מקורות מים;
- מונע צורך באשפרת ההמשך הממושכת.

בשנים האחרונות ניתנת תשומת לב רבה למהירות תהליכי הבנייה. עקב כך מהנדסים אזרחיים וקבלנים נוטים להשתמש בחומרי אשפרה. זאת הסיבה שבשנים אחרונות הוחדרו לשוק חומרי אשפרה שונים בעלי תכונות מגוונות.

חומרי אשפרת בטונים חייבים להתאים לדרישות התקן האמריקני ASTM-C-309 [9]. תקן זה מגדיר את חומר האשפרה כתרכובות נוזליות אשר יוצרות ממברנה דקה על פני הבטון ומשמשות להקטנת איבוד המים במשך תקופת התקשרות וההתקשות הראשונית של הבטון. התקן האמריקאי הנ"ל קובע שהפסד מים בבטון המאושפר בחומר איטום הנ"ל לא יעלה על שיעור של 0.55 ק"ג למ"ר במשך 72 שעות, כאשר הבדיקה נערכת בתנאי מעבדה תקנית (טמפרטורה של 23±2°C ולחות יחסית של 50±10%RH). בנטור ויגרמן, [10], מצאו שכאשר בטון לא מקבל שום אשפרה במים ונמצא בתנאים קשים של מזג האוויר (30ºC/40%RH), מגיע הפסד המים בבטון לשיעור של כ-4.5% ממשקל הבטון במשך 72 שעות, ז"א עד כ-11 ק"ג למ"ר.

ההשוואה של דרישת התקן האמריקאי עם תוצאות המחקר לעיל מאפשרת להגיע למסקנה שחומרי איטום מונעים במידה ניכרת את הפסדי המים מהבטון. יחד עם זאת לא ניתן לסכם מהו תיפקוד של חומרי איטום הללו בתנאי מזג האוויר הישראלי. באתרי בנייה בארץ חשופים חומרי איטום לאשפרה לתנאים שונים לחלוטין מתנאי המעבדה שבהם נערכת הבדיקה התקנית.

תקן הישראלי ת"י 466, [10], מאפיין את שיטות האשפרה התקניות, כגון:

- אשפרה רטובה ע"י המטרה מתמדת או הזלפה או בהצפה בשכבת מים (בגבולות העומס המותר);
- כיסוי בטון ביריעות פוליאתילן (בעובי 2 מ"מ לפחות);
- בד גאוטכני מצופה פוליאתילן, או שכבת חול נקי רווית מים בעובי כ-50 מ"מ;

התקן קובע שהשימוש בחומרי איטום מותזים טעון באישור של מתכנן שלד הבניין. חשוב להדגיש כי נושא זה טרם נבדק בארץ במידה הנדרשת, והוא מבוסס רק על המידע שמתקבל מהחברות המשווקות חומרי איטום בארץ. כתוצאה אין בידי מתכנני הבניין מספיק ידע מקצועי כדי להחליט האם האשפרה בחומרי אשפרה נוזליים הינה שוות ערך לאשפרה רטובה או אשפרה תקנית אחרת בכל הקשור לתיפקוד ארוך טווח של בטונים.

2. מטרת המחקר

מטרתו של מחקר זה היא לבחון בצורה שיטתית את השפעת תנאי מזג האוויר האופייניים לאקלים ישראלי על תיפקוד וקיים של בטונים המאושפרים בחומרי אשפרה. לימוד שיטתי זה יאפשר לקבוע האם האשפרה של הבטון בחומרי אשפרה מאפשרת להבטיח קבלת משטחי בטון בעלי תכונות המבטיחות שירות תקין וקיים ארוך של רצפות בטון. על בסיס התוצאות ניתן יהיה לנסח דרישות תקניות לחומרי אשפרה נוזליים אשר יותאמו לתנאי מזג האוויר הישראלי.

3. שיטת מחקר

3.1. חומרים, הרכב הבטונים, הכנתם ובדיקות בטון טרי

במחקר שימשו בטונים עם תכולת צמנט זהה של כ- 350 ק"ג ל-1 מ"ק בטון ו-2 מנות מים לצמנט: 0.5 ו-0.6, ר' טבלה 1. הרכב כימי של צמנט ניתן בנספח א' לדו"ח מחקר זה.

הכנת בטונים

הכנת תערובות בטון בוצעה במערבל בחש שנפחו 200 ל׳. הרכב תערובות בטון מוצג בטבלה 1. כל אצווה הייתה 120 ל׳. לכל סוג מנת המים הוכנו 3 אצוות.

הכנת תערובת הבטון בוצעה בתהליך רב שלבי. בשלב הראשון הוכנסו למערבל כל האגרגטים הגס והבינוני ותערובת אגרגטים עורבבה למשך 3 דקות. לאחר מכן נוספו לתערובת הבטון מים בכמות של 2/3 מסך תכולת המים בבטון, בוצע ערבוב קצר של כ-30 שניות והתערובת נשארה במערבל עוד כ-10 דקות כדי לאפשר ספיגת מים של האגרגטים. לאחר מכן הוספו לתערובת צמנט פורטלנד וחול ורוב המים שנשארו עם מוסף כימי. התערובת עורבבה למשך כ-2 דקות. לאחר מכן בוצע תיקון כמות המוסף (במידה וצורך) אשר נוסף לתערובת עם שאר המים. והתערובת עורבבה בפעם האחרונה למשך 30 שניות.

מיד עם תום הערבוב בוצעו בדיקות של בטון טרי: סומך, משקל מרחבי ותכולת אוויר. הבדיקות נערכו בשיטות המתוארות בתקנים ישראלים הרלוונטיים. תוצאות הבדיקות מדווחות בטבלה 1.

טבלה 1. הרכב בטונים ותכונות בטון טרי

תכולת מרכיב, ק״ג ל-1 מ״ק/ תכונת בטון טרי	w/c = 0.5	w/c = 0.6
מים	175	207
צ.פ. CEM I 52N	351	344
פוליה	794	810
שומשום	376	405
חול טבעי	693	617
מוסף כימי גלניום 51	3.15	0.69
משקל מרחבי, ק״ג ל-1 מ״ק	2,392	2,383
תכולת אוויר, %	1.8%	1.3%
סומך, מ״מ	165	158

3.2. אשפרת בטונים וחשיפתם לתנאי סביבה

במחקר הנוכחי נחשפו הבטונים למספר סוגי אשפרה:

א. **אשפרת תקבית** (בקרה) במים בטמפרטורה 21°C כעבור 24 שעות מיציקת הבטון ועד גיל 7 ימים. לאחר מכן נחשפו הבטונים לתנאי מעבדת בטונים תקנית, דהיינו: 21°C/60%RH, עד למועד ביצוע הבדיקות הרלוונטיות;

ב. **אשפרת ייחוס באמצעות בד גיאוטכני מסחרי מסוג אשפרית.** כפי שנזכר לעיל נחשבת שיטת אשפרה זו כתקנית ושוות ערך לאשפרה רצופה במים. בד גיאוטכני מהווה מוצר תעשייתי אשר בו יריעת פוליאתילן מחוברת אל בד בעל ספיגה גבוהה מאוד. לפני תחילת האשפרה נספג הבד במים עד לרווית יתר. במחקר הנוכחי שימש סוג אשפרה זה רק

בבטונים עם יחס מים צמנט של $\omega = 0.5$. דוגמאות בטון פורקו מהתבניות בגיל 24 שעות וכוסו בבד גיאוטכני כאשר יריעת הפוליאתילן פונה כלפי מעלה והבד הספוג במים בא במגע עם פני הבטון. על פי הוראות היצרן של הבד הגיאוטכני אין צורך בהרטבות נוספות של בבטון למשך כל תקופת האשפרה. האשפרה נמשכה עד גיל 7 ימים. לאחר מכן חלק מדוגמאות הבטון נחשפו לתנאי מעבדת בטונים תקנית, דהיינו: 21°C/60%RH, וחלק אחר לתנאי יובש (30°C/40%RH) עד למועד ביצוע הבדיקות הרלוונטיות;

ג. **אשפרה בחומר אשפרה מסחרי על בסיס סיליקוני**. יישום החומר בוצע בהתאם להוראות היצרן מיד עם היעלמות ברק המים מפני הבטון הטרי. כמות החומר המפוזר על פני הבטון הייתה כ-200 מ"ל/מ"ר. בגיל 24 שעות פורקו דוגמאות הבטון מהתבניות ושאר פאות הבטון כוסו בחומר האשפרה. עם תום יישום חומר האשפרה נחשפו חלק מדוגמאות הבטון לתנאי מעבדת בטונים תקנית, דהיינו: 21°C/60%RH, וחלק אחר נחשף לתנאים חמים של 30°C/60%RH עד למועד ביצוע הבדיקות הרלוונטיות. תנאים חמים היו אמורים לדמות את תנאי האתר האופייניים ביותר לאקלים ישראלי בקיץ, בעוד שתנאי המעבדה אפיינו באופן חלקי את האקלים הישראלי בתקופות האביב והסתיו.

ד. **אשפרה בחומר אשפרה מסחרי על בסיס אקרילי**. יישום החומר בוצע בהתאם להוראות היצרן מיד עם היעלמות ברק המים מפני הבטון הטרי. כמות החומר המפוזר על פני הבטון הייתה כ-200 מ"ג/מ"ר. בגיל 24 שעות פורקו דוגמאות הבטון מהתבניות ושאר פאות הבטון כוסו בחומר אשפרה. תנאי החשיפה של דוגמאות הבטון היו כפי שמתוארים בסעיף ג' לעיל.

ה. **ללא אשפרה רטובה כלל**. מיד אחרי פריקת הדוגמאות מהתבניות נחשפו הבטונים לתנאים חמים של 30°C/65%RH עד למועד ביצוע הבדיקות הרלוונטיות.

3.3. בדיקות

- **חוזק בטונים**. נבדקו חוזק לחיצה של בטונים בגילים 1, 7 ו-28 ימים, וחוזק כפיפה של בטונים בגיל 28 ימים. בדיקות חוזק לחיצה וחוזק כפיפה נערכו על קוביות בטון 100x100x100 מ"מ וקורות בטון 280x70x70 מ"מ, בהתאמה.הבדיקה נערכה לפי דרישות תקן ישראלי ת"י 26 חלק 4 [12]. בכל מדגם בדיקה היו 3 דוגמאות בטון והחוזק חושב כממוצע אריתמטי של 3 מדידות;
- **הצטמקות בטונים.** בוצע מעקב אחרי הצטמקות הבטונים החל מגיל 7 ימים למשך כחודשיים. תנאי ביצוע הבדיקה היו בהתאם לתנאי חשיפת הבטונים כפי שתוארו בסעיף 3.2 לעיל. חושבו הפסדי משקל ועיבורים בבטון עקב ההצטמקות הבטון בהתייבשות. בכל מדגם בדיקה היו 3 דוגמאות בטון וההצטמקות חושבה כממוצע אריתמטי של 3 מדידות;
- **בדיקת חדירת אוויר.** הבדיקה בוצעה באמצעות מכשיר טורנט כפי שמתואר ב-[1 – 2]. הבדיקה נערכה על בטונים בגיל 28 ימים. בבדיקה שימשו דוגמאות בטון בצורת דיסק, קוטר Ø200 מ"מ ועובי 50 מ"מ. לפני ביצוע הבדיקה יובשו הדוגמאות בתנור בטמפרטורה של 60°C עד לקבלת משקל קבוע (שינוי המשקל של 0.01% במשך 24 שעות).

בכל מדגם בדיקה היו 3 דוגמאות בטון ומקדם חדירת אוויר, kT, חושב כממוצע אריתמטי של 3 מדידות;

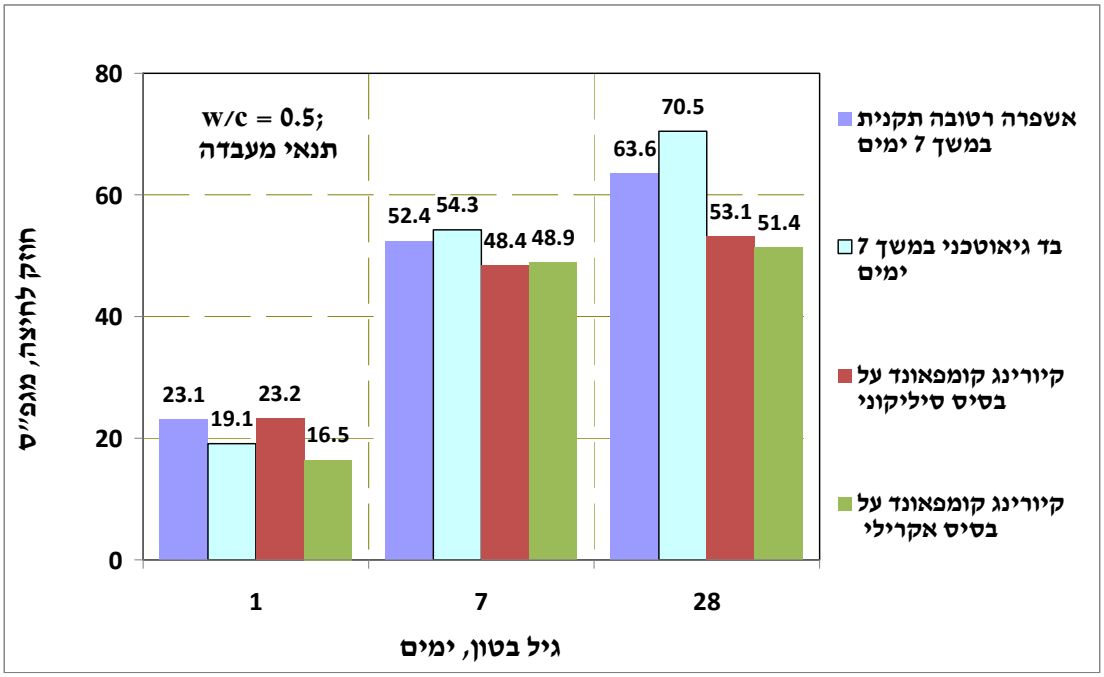
- **ספיגה קפילרית של בטונים.** נערך מעקב אחרי ספיגה קפילרית של הבטונים החל מגיל 28 ימים. בבדיקה שימשו דוגמאות בטון אחרי בדיקת חדירת אוויר. הפאות העליונה והצדדית של דוגמאות בטון נאטמו עם חומר ביטומני. בבדיקה נערך המעקב אחרי שינוי משקל של דוגמאות בטון כתוצאה מספיגת המים דרך פאת הבסיס. הבדיקה נערכה בהתאם לשיטה המתוארת בתקן ישראלי ת"י 26 חלק ??? [13]. תוצאות הבדיקות שימשו לקביעת מקדם הספיגה הקפילרית כממוצע אריתמטי של 3 בדיקות;
- **קרבונציה מואצת.** בגיל 28 ימים נחשפו דוגמאות הבטונים לתנאי קרבונציה מואצת, דהיינו: טמפרטורה ולחות של 30°C/50%RH וריכוז CO_2 של 5%. הדוגמאות בבדיקה היו פלטות בטון במידות 400x400x50 מ"מ. לפני תחילת הקרבונציה נאטמו פאות צד של בטונים בחומר ביטומני. במועדים של 1, 7, 14, 28 ו-35 ימים אחרי תחילת תהליך הקרבונציה המואצת נקדחו והוצאו גלילי בטון בקוטר Ø50 מ"מ. נערך מעקב אחרי שינוי עומק הקרבונציה בבטונים באמצעות תרסיס פנולפתלאין. עומק הקרבונציה נקבע באמצעות ניתוח התמונות הדיגיטליות של דוגמאות הבטון כפי שצולמו אחרי יישום פנולפתלאין. ניתוח התמונות בוצע באמצעות תוכנה ImageJ [14]. תוצאות המדידות שימשו לקביעת מקדם הקרבונציה המואצת של הבטונים

4. תוצאות

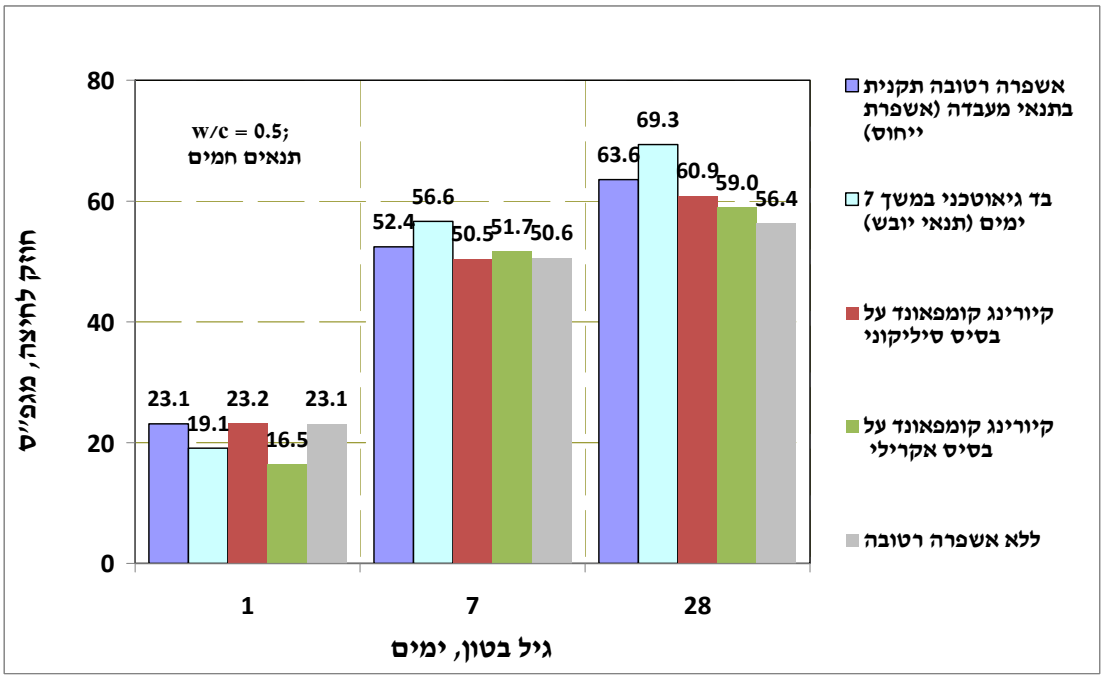
4.1. חוזק לחיצה וכפיפה

בציורים 1 - 4 מוצגות תוצאות בדיקות חוזק לחיצה וחוזק כפיפה של בטונים אשר קיבלו אשפרה מסוגים שונים ונחשפו לתנאים שונים אחרי האשפרה. התוצאות המוצגות בציורים 1 – 4 מראות בבירור שמבחינת חוזק הלחיצה וחוזק כפיפה מהווה האשפרה בבד גיאוטכני אשפרה שהיא שוות ערך לאשפרה תקנית במים במשך 7 ימים. לא נצפתה החמרה כל שהיא ביעילות האשפרה בבד גיאוטכני בתנאי יובש והחוזקים שהתפתחו בבטון אשר קיבל אשפרה בבד גיאוטכני, הן בתנאי המעבדה והן בתנאי היובש, היו שווי ערך לאלה של בטון אשר קיבל אשפרה תקנית בתנאי המעבדה.

לעומת זאת האשפרה בחומרי אשפרה (קיורינג קומפאונד) גרע מחוזק הבטון במידה ניכרת אשר הייתה קרובה לזו של העדר האשפרה הרטובה. בתנאי מעבדה נצפתה ירידה יותר משמעותית בחוזק הבטון אשר קיבל אשפרה בחומרי אשפרה ונחשף לאחר מכן לתנאי מעבדה, מאשר בבטון אשר אחרי שיושמו בו חומרי האשפרה נחשף לתנאים חמים. הדבר נובע כנראה מתהליכי הפלמור וההתאחות אשר מואצים בתנאי חום ויובש וגורמים להיווצרות פילם על פני הבטון אשר מונע התאיידות מים מתוכו. כידוע, תהליכי פלמור הינם יעילים יותר בתנאים חמים ויבשים. אי לכך, ניתן לסכם שבתנאים החמים אשר שימשו במחקר הנוכחי נוצרה ע"ג הבטון ממברנה פחות חדירה של חומרי אשפרה מאשר בתנאי מעבדה.

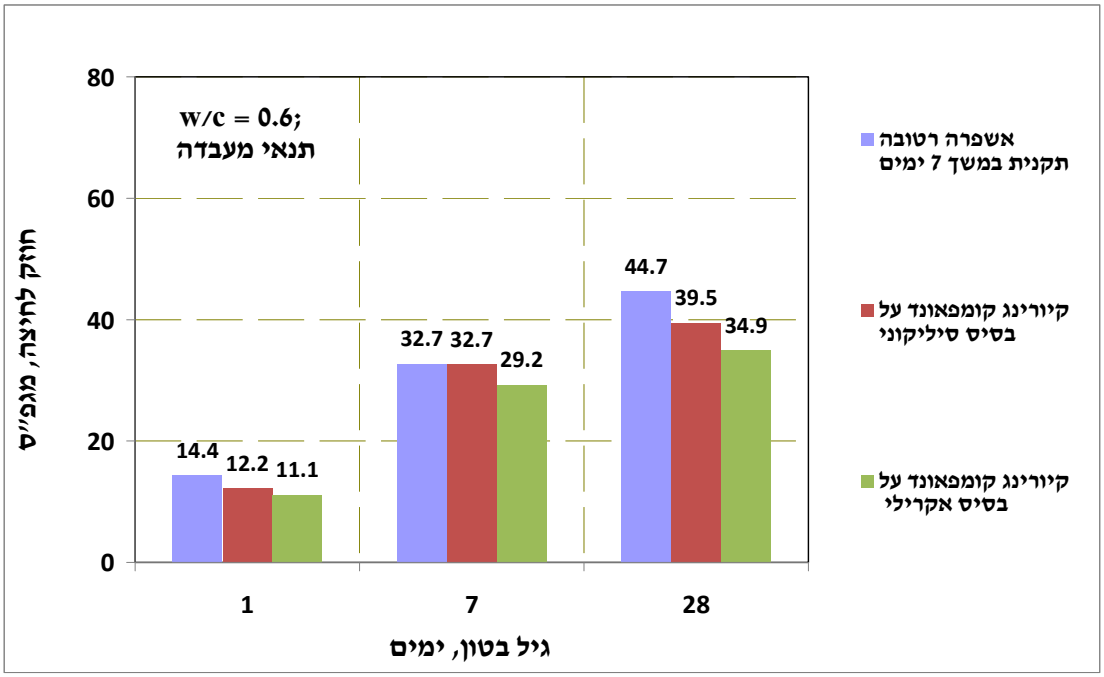


א'

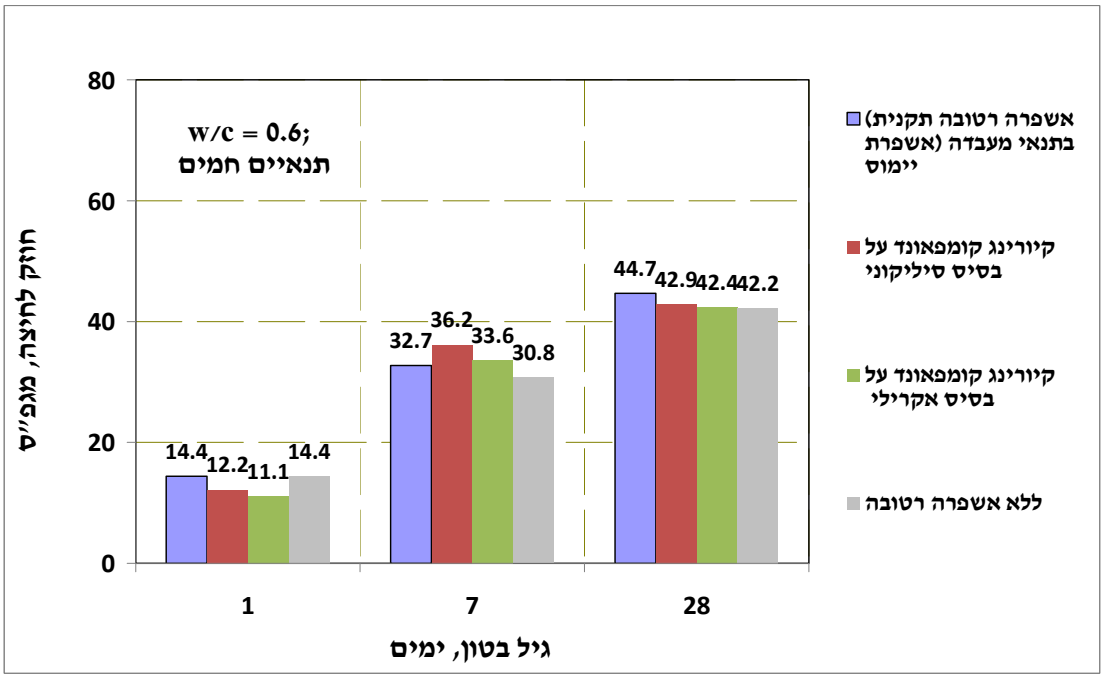


ב'

ציור 1. חוזק לחיצה של בטון עם יחס מים לצמנט של $\omega = 0.5$, אחרי שקיבל אשפרה מסוגים שונים ונחשף לתנאי אקלים שונים: א' - תנאי מעבדה - 21°C/60%RH; ב' - תנאים חמים - 30°C/60%RH ותנאי יובש - 30°C/40%RH. הערה: אשפרה רטובה תקנית נבחרה כאשפרת ייחוס

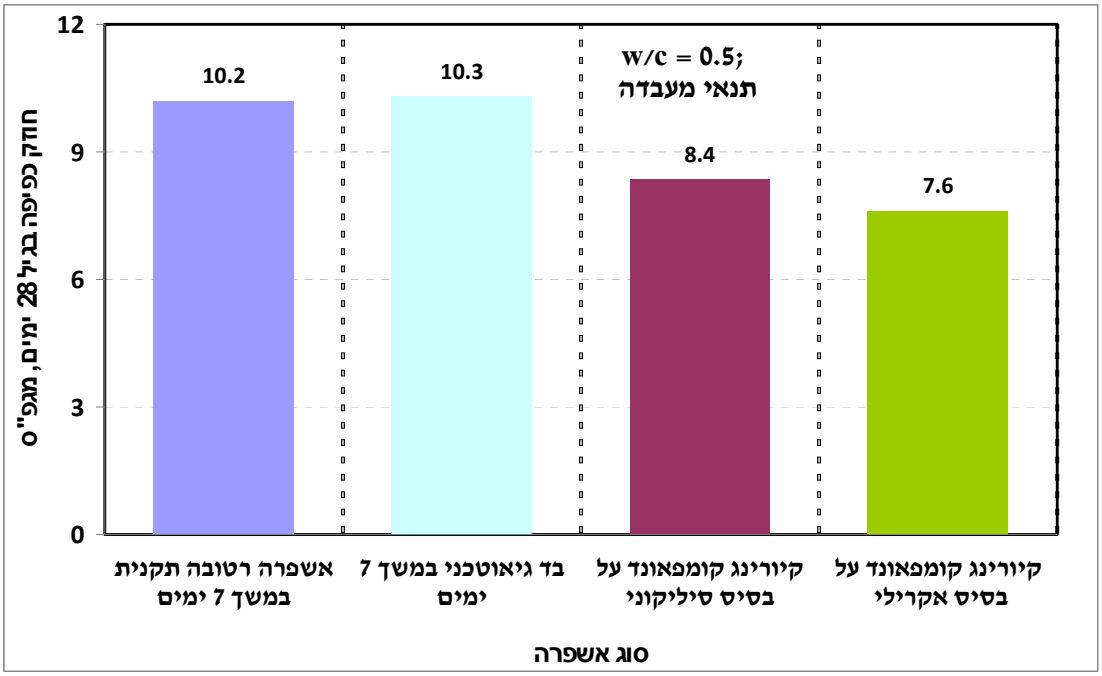


א'

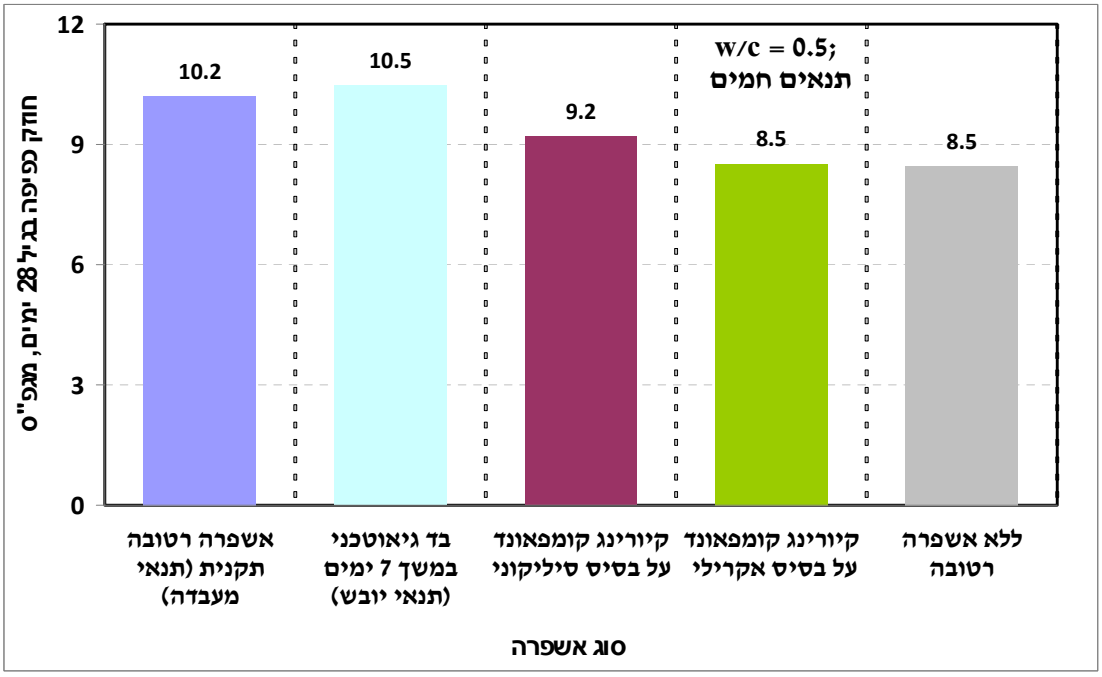


ב'

ציור 2. חוזק לחיצה של בטון עם יחס מים לצמנט של $\omega = 0.6$, אחרי שקיבל אשפרה מסוגים שונים ונחשף לתנאי אקלים שונים: א' - תנאי מעבדה - 21°C/60%RH; ב' – תנאים חמים - 30°C/60%RH. הערה: אשפרה רטובה תקנית נבחרה כאשפרת ייחוס

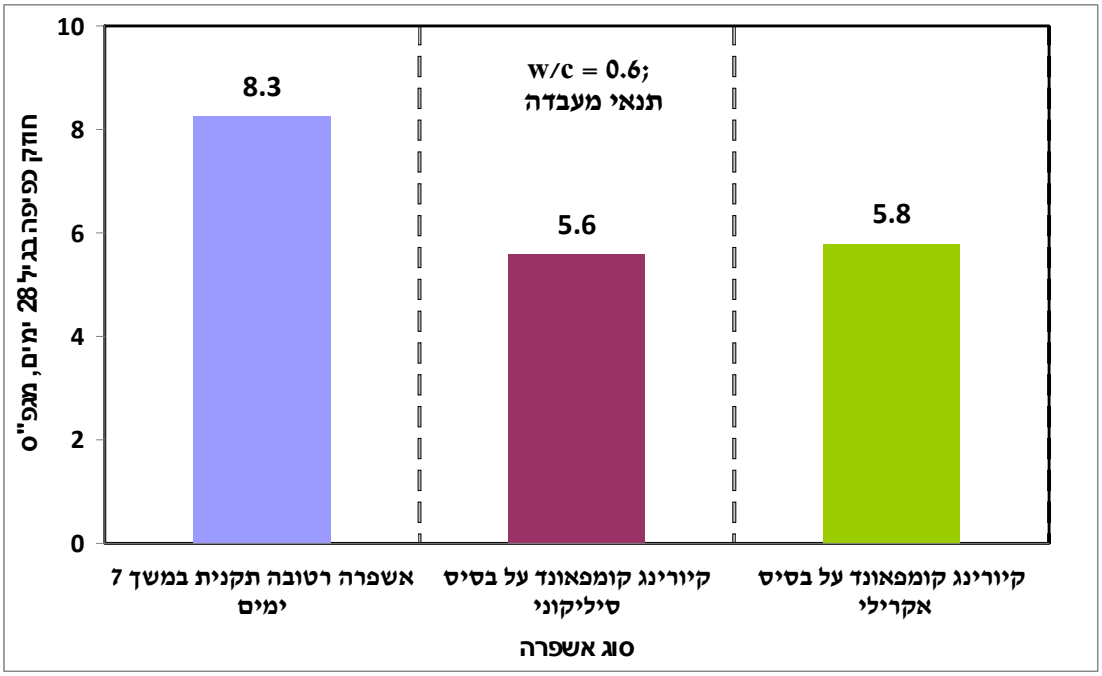


א'

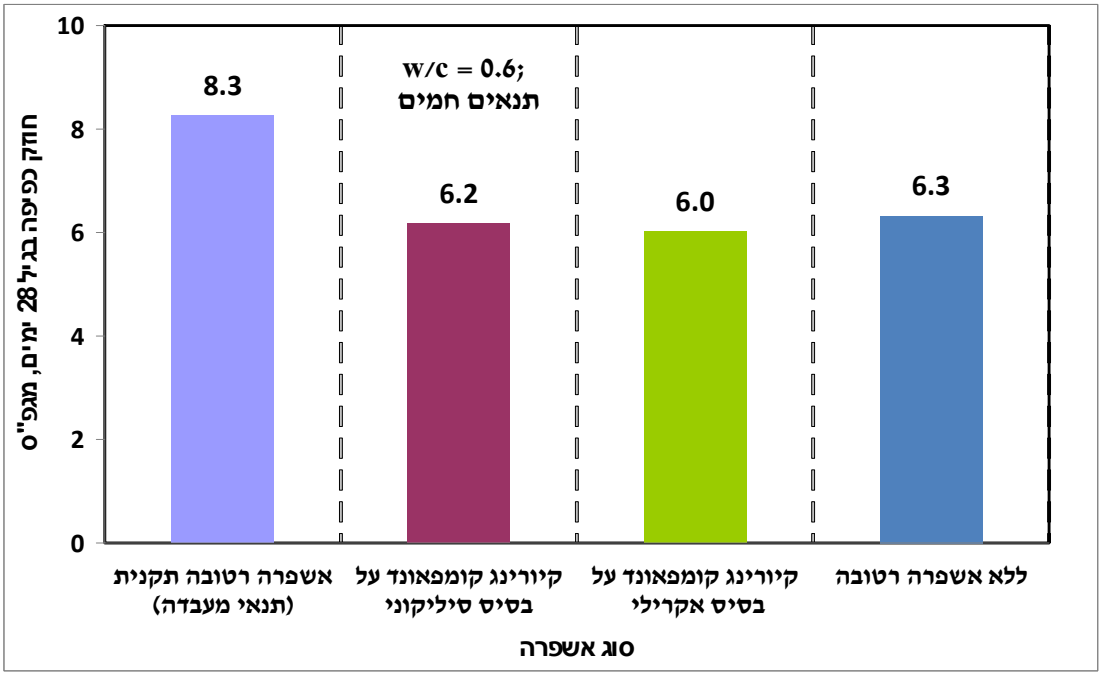


ב'

ציור 3. חוזק כפיפה של בטון עם יחס מים לצמנט של $\omega = 0.5$, אחרי שקיבל אשפרה מסוגים שונים ונחשף לתנאי אקלים שונים: א' - תנאי מעבדה - 21°C/60%RH; ב' - תנאים חמים - 30°C/60%RH ותנאי יובש - 30°C/40%RH. הערה: אשפרה רטובה תקנית נבחרה כאשפרת ייחוס



א'



ב'

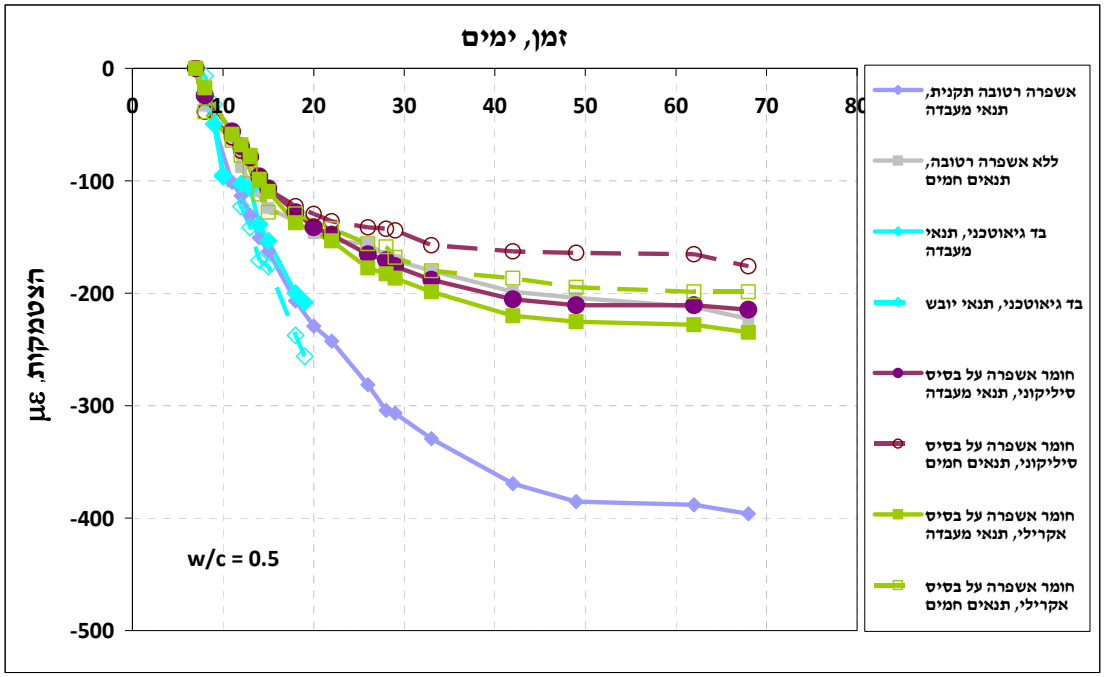
ציור 4. חוזק כפיפה של בטון עם יחס מים לצמנט של $\omega = 0.6$, אחרי שקיבל אשפרה מסוגים שונים ונחשף לתנאי אקלים שונים: א' - תנאי מעבדה - 21°C/60%RH; ב' - תנאים חמים - 30°C/60%RH ותנאי יובש - 30°C/40%RH. הערה: אשפרה רטובה תקנית נבחרה כאשפרת ייחוס

4.2. הצטמקות בטונים

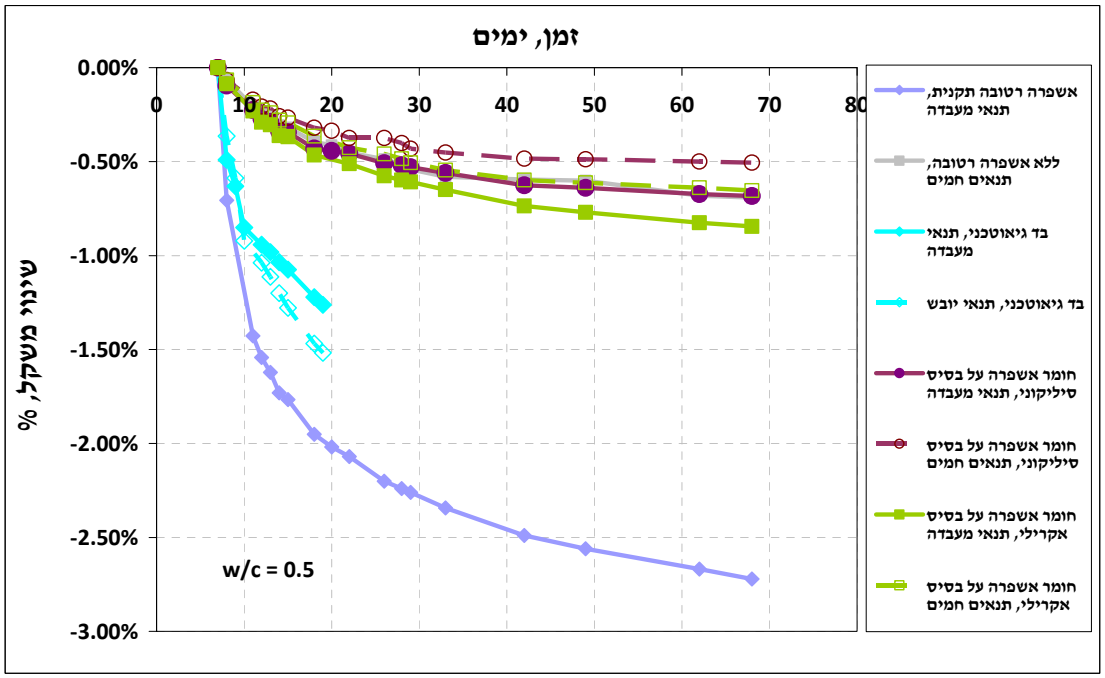
בציורים 5 ו-6 מוצגות עקומות של הצטמקות (א') ושינוי משקל (ב') של הבטונים שאפיינו במסגרת המחקר הנוכחי. בציור 7 ניתן לראות את היחס בין הצטמקות הבטון ושינוי משקל כפי שהתקבלו במעקב אחרי התייבשות הבטונים עם יחס מים לצמנט של $\omega = 0.5$ (א') ו-$\omega = 0.6$ (ב'), בהתאמה.

כפי שניתן לראות בציורים 5 -7 ההתנהגות בייבוש וההצטמקות של בטונים אשר עברו אשפרה עם חומרי אשפרה, ללא הבדל בתנאי החשיפה לאחר האשפרה, הייתה יותר קרובה לבטון שלא קיבל אשפרה רטובה. לעומת זאת בטון אשר קיבל אשפרה בבד גיאוטכני התנהג בהצטמקות בדומה לבטון אשר קיבל אשפרה רטובה תקנית.

אומנם בטונים אשר קיבלו אשפרה רטובה תקנית ואשפרה בבד גיאוטכני היו מאופיינים בערכי ההצטמקות הגבוהים ביותר, אך זה היה מלווה גם בהפסדי משקל הגבוהים ביותר. עובדה זו מעידה על כך שההתייבשות בטונים הללו החלה רק כעבור 7 ימים בתום האשפרה. לעומת זאת בבטונים אשר קיבלו אשפרה בחומרי האשפרה, בדומה לבטון שלא קיבל אשפרה רטובה כלל, החלה התאיידות המים עוד בשלב האשפרה ולכן מבחינה זו האשפרה בחומרי האשפרה אינה שוות ערך לאשפרה רטובה תקנית.

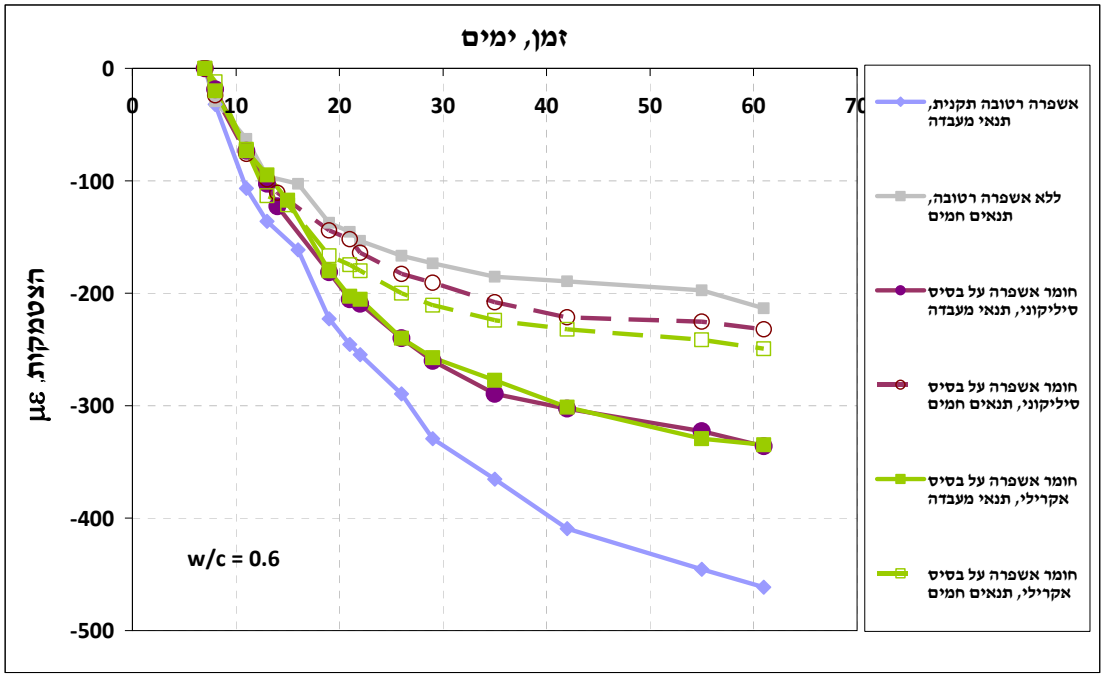


א'

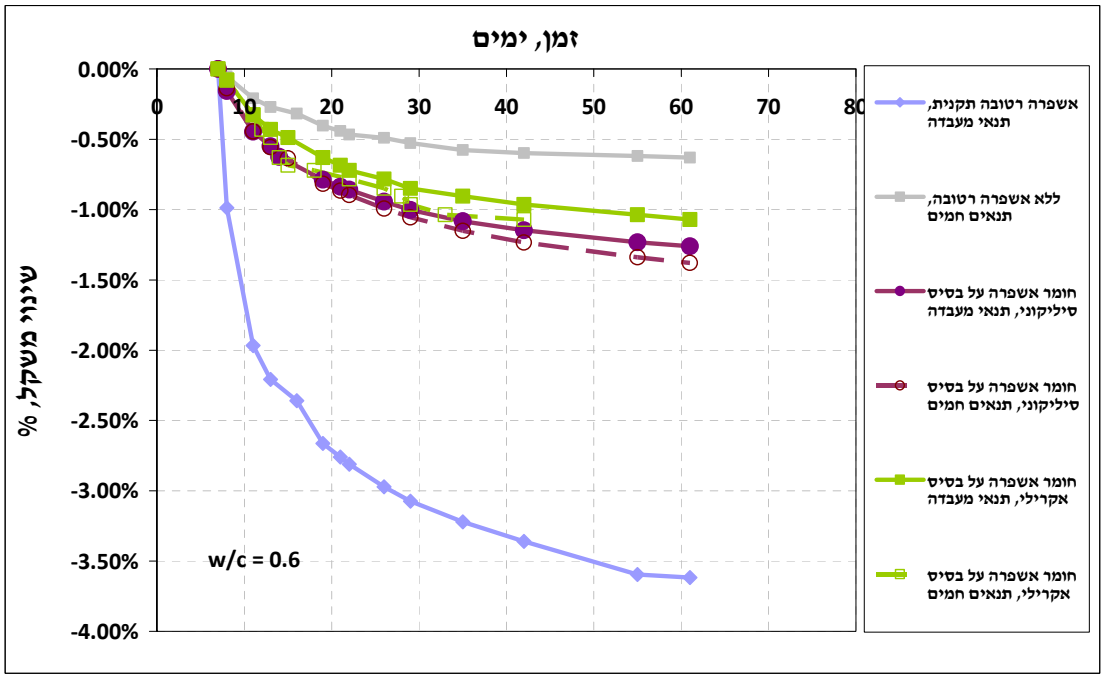


ב'

ציור 5. הצטמקות (א') ושינוי משקל (ב') של בטון עם יחס מים לצמנט של $\omega = 0.5$, אחרי שקיבל אשפרה מסוגים שונים ונחשף לתנאי אקלים שונים: תנאי מעבדה - 21°C/60%RH; תנאים חמים - 30°C/60%RH ותנאי יובש - 30°C/40%RH. הערה: אשפרה רטובה תקנית נבחרה כאשפרת ייחוס

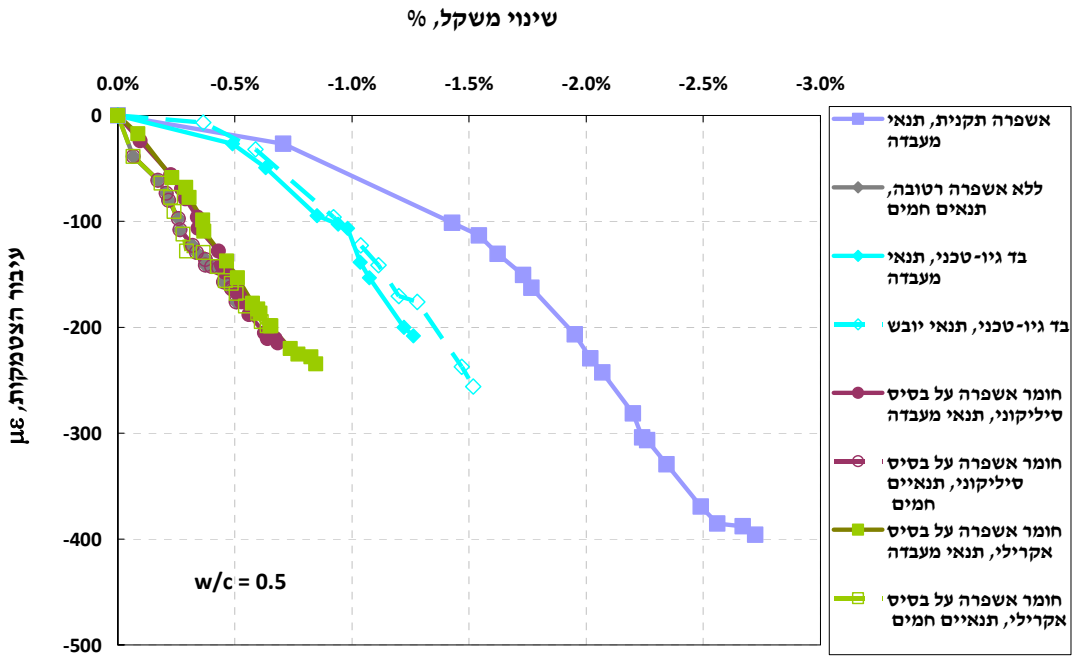


א'

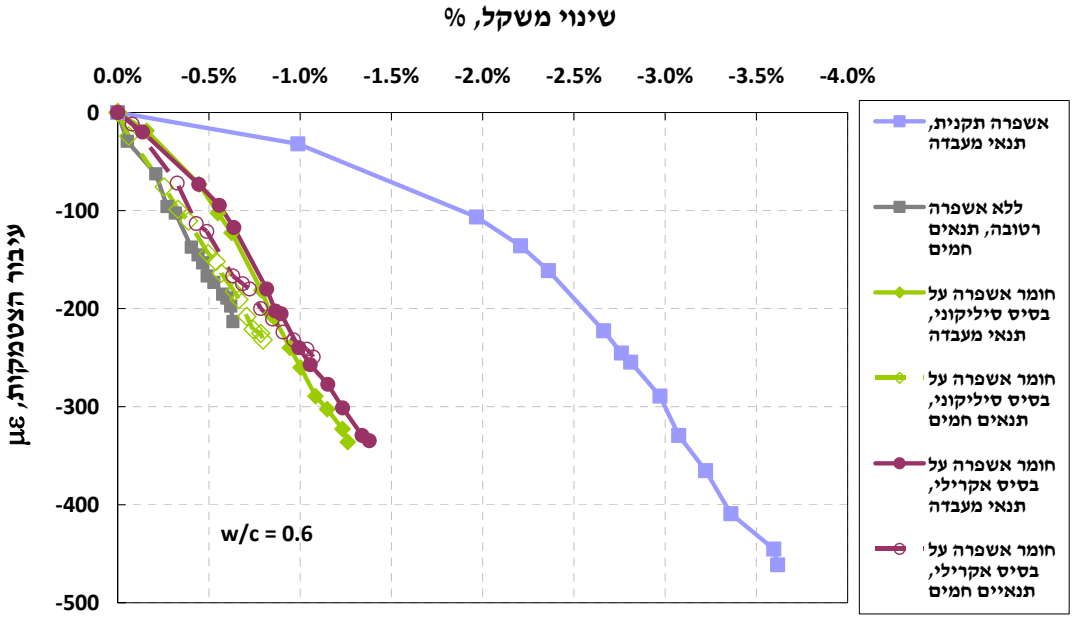


ב'

ציור 6. הצטמקות (א') ושינוי משקל (ב') של בטון עם יחס מים לצמנט של $\omega = 0.6$, אחרי שקיבל אשפרה מסוגים שונים ונחשף לתנאי אקלים שונים: תנאי מעבדה - 21°C/60%RH; תנאים חמים - 30°C/60%RH ותנאי יובש - 30°C/40%RH. הערה: אשפרה רטובה תקנית נבחרה כאשפרת ייחוס



א'



ב'

ציור 7. הקשר בין הצטמקות ושינוי משקל בבטונים עם יחס מים לצמנט של 0.5 = ω (א') ו-0.6 = ω (ב') אחרי שקיבלו אשפרה מסוגים שונים ונחשפו לתנאי אקלים שונים: תנאי מעבדה - 21°C/60%RH; תנאים חמים - 30°C/60%RH ותנאי יובש - 30°C/40%RH. הערה: אשפרה רטובה תקנית נבחרה כאשפרת ייחוס

4.3. חדירות בטון: מקדם חדירת אוויר וספיגה קפילרית

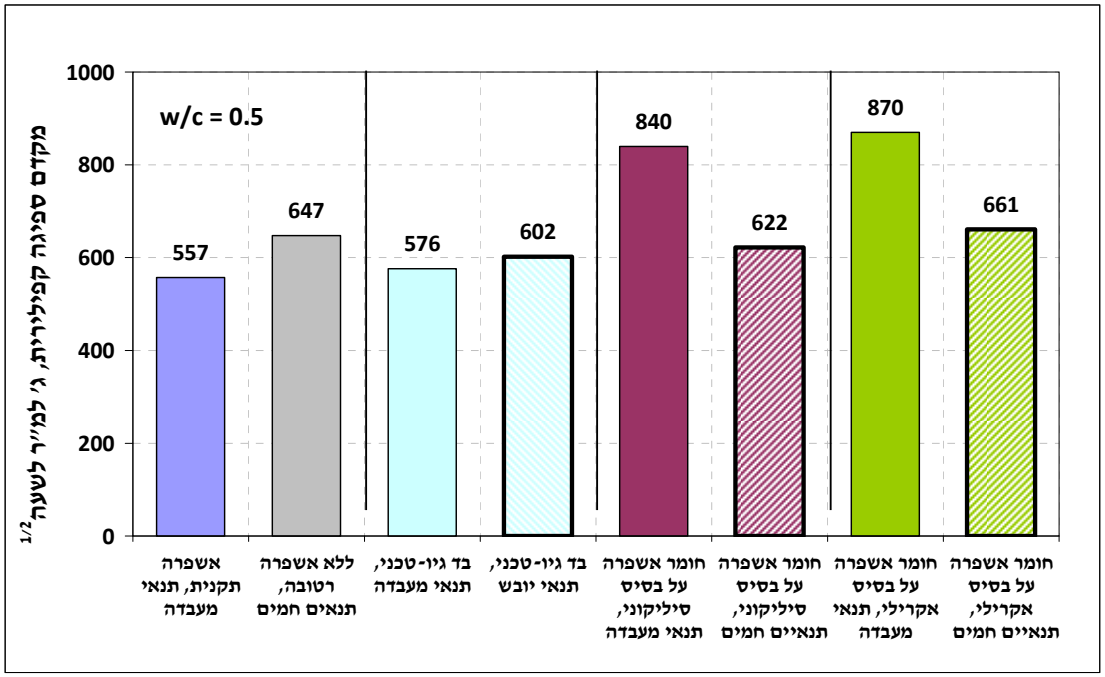
בנספח ב׳ של הדוח מוצגות עקומות ספיגה קפילרית של הבטונים שנבדקו במסגרת המחקר הנוכחי. העקומות שימשו לקביעת מקדם הספיגה הקפילרית של בטונים. בציורים 8 – 9 מוצגות תוצאות הבדיקות של ספיגה קפילרית ומקדם חדירת אוויר של בטונים אשר קיבלו אשפרה מסוגים שונים ונחשפו לתנאי אקלים שונים לאחר מכן. כפי שניתן לראות בציורים הנ״ל מאפייני חדירות הבטונים אשר קיבלו אשפרה בבד גיאוטכני בתנאי מעבדה היו כמעט וזהים לאלה של בטון אשר קיבל אשפרה רטובה תקנית. חשיפה לתנאי יובש של בטון אשר קיבל אשפרה בבד גיאוטכני כמעט ולא השפיעה על מקדם הספיגה הקפילרית אך החמירה את חדירת אוויר עד למצב שווה ערך עם בטון שלא קיבל אשפרה רטובה כלל ונחשף לתנאים חמים. חשוב לציין שבבטון עם יחס מים לצמנט של 0.5 נצפתה השפעה שלילית יותר קטנה של העדר האשפרה הרטובה והחשיפה לתנאים חמים מתונים (30°C/60%RH) על מאפייני חדירות הבטון: מקדם ספיגה קפילרית ומקדם חדירת האוויר, מאשר נצפו בבטון עם מנת מים יותר גבוהה של 0.6.

האשפרה בחומרי אשפרה משני הסוגים גרמה לעלייה בכל המאפיינים של חדירות הבטון, במיוחד במקדם חדירת האוויר. בהשוואה לחשיפה לתנאי המעבדה גרמה חשיפת הבטון לתנאים חמים לירידה במקדם הספיגה הקפילרית של הבטון. לעומת זאת כמעט ולא הייתה לתנאי החשיפה ההשפעה על מקדם חדירת אוויר והוא נשאר גבוה בהרבה בהשוואה למקדם חדירת בטון של בטון שקיבל אשפרה רטובה תקנית.

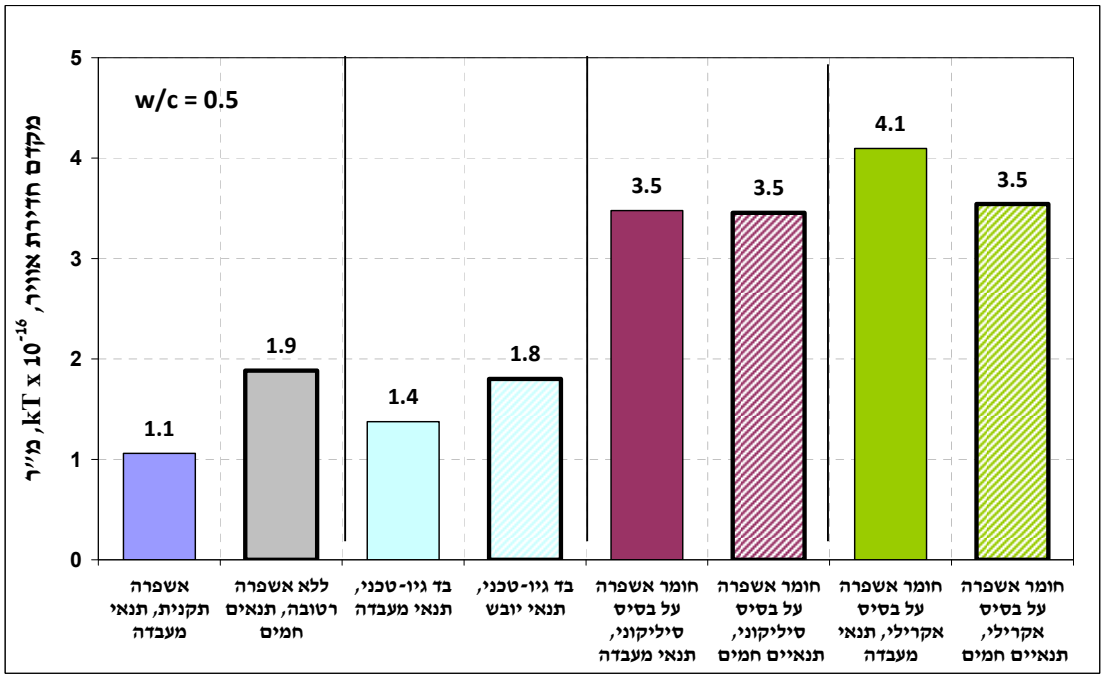
4.4. קיים בטון: קרבונציה מואצת

בנספח ג׳ של הדוח הנוכחי מוצגים עקומי קרבונציה של בטונים שקיבלו אשפרה מסוגים שונים ונחשפו לתנאי אקלים שונים. חשוב לציין שבבטון אשר קיבל אשפרה בחומר אשפרה אקרילי התרחשה במועדים המאוחרים של קרבונציה מואצת הירידה בעומק הקרבונציה, ראה ציור 10. הדבר נובע כנראה מתהליכים כימיים שהתרחשו בין חומר אשפרה על בסיס אקרילי ודו תחמוצת הפחמן. במחקר [15] הראו מחברי הדוח הנוכחי שנוכחות החומרים האורגניים מסוגים מסוימים בבטון עלולה לשנות את התנהגותם בבדיקת קרבונציה מואצת. כנראה, שדבר זה קרה גם עם בטון שקיבל אשפרה בחומר אשפרה על בסיס אורגני. נדרשת עבודת מחקר נוספת כדי לקבוע את מנגנון ההתנהגות של בטון זה בתהליכי קרבונציה. בבטון אשר קיבל אשפרה בחומר אשפרה סיליקוני חלה האטה של תהליך הקרבונציה במועדים המאוחרים.

בציור 11 מוצגים מקדמי קרבונציה מואצת של בטונים שקיבלו אשפרה מסוגים שונים ונחשפו לתנאי סביבה שונים. כפי שניתן לראות בציור 11 בבטון אשר קיבל אשפרה בבד גיאוטכני ונחשף לתנאי יובש, עלה מקדם הקרבונציה באופן משמעותי. וזה בדומה לבטון שלא קיבל אשפה כלל ונחשף לתנאים חמים. לעומת זאת בבטונים שקיבלו אשפרה בחומרי אשפרה ונחשפו לתנאים חמים חלה הירידה במקדם קרבונציה מואצת, וזה, כנראה, עקב תהליכים כימיים המתרחשים בין חומר האשפרה הפולימרי ודו-תחמוצת הפחמן.

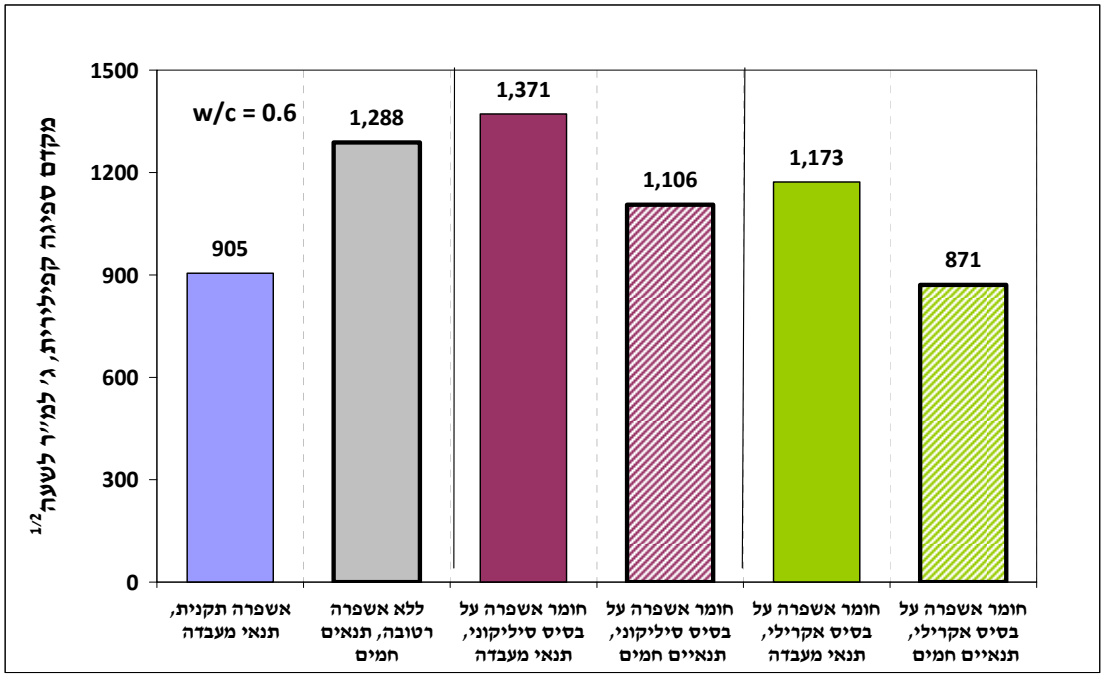


א'

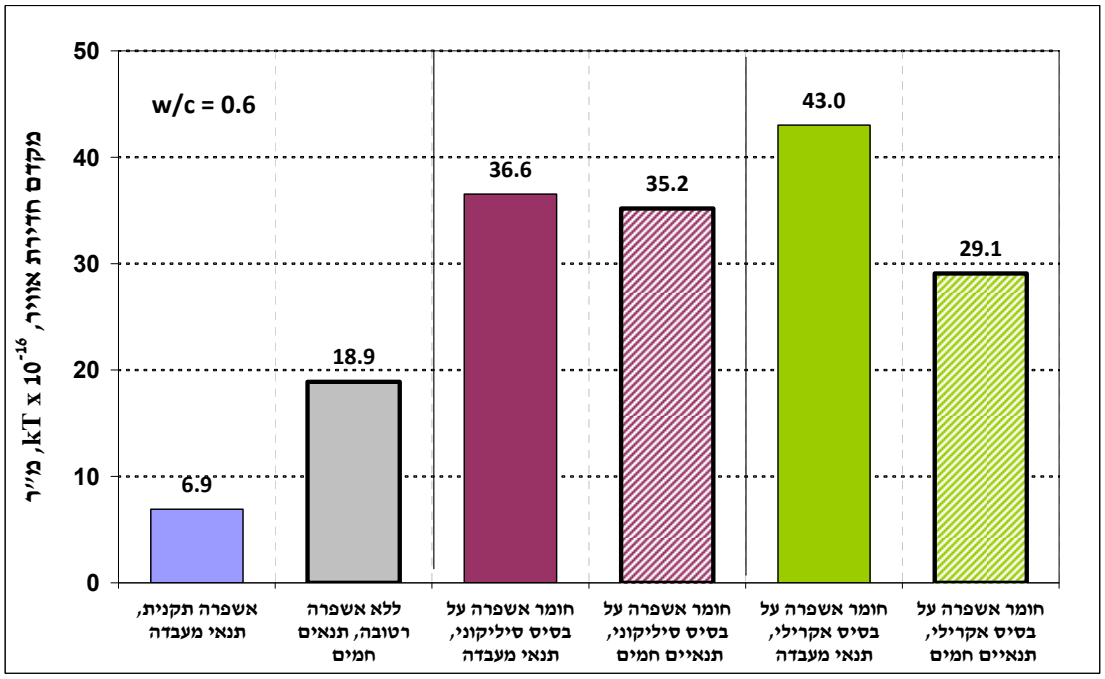


ב'

ציור 8. מקדם הספיגה הקפילרית (א') ומקדם חדירת האוויר (ב') של בטון עם יחס מים לצמנט של $\omega = 0.5$, אחרי שקיבל אשפרה מסוגים שונים ונחשף לתנאי אקלים שונים: תנאי מעבדה - 21°C/60%RH; תנאים חמים - 30°C/60%RH ותנאי יובש - 30°C/40%RH. הערה: אשפרה רטובה תקנית נבחרה כאשפרת ייחוס

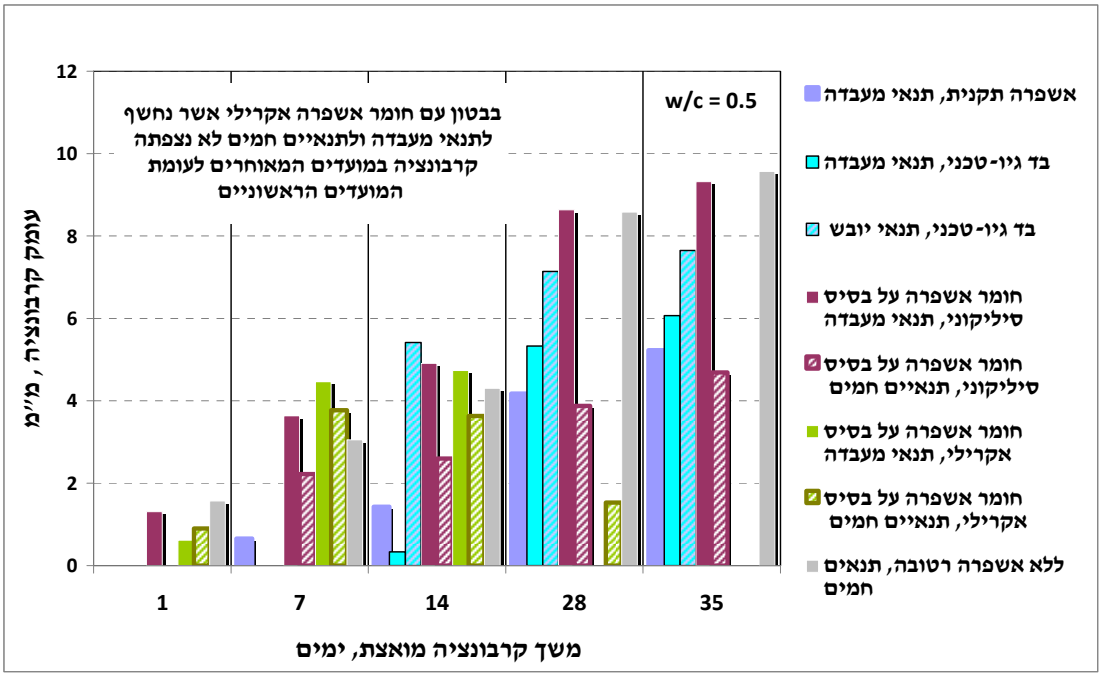


א'

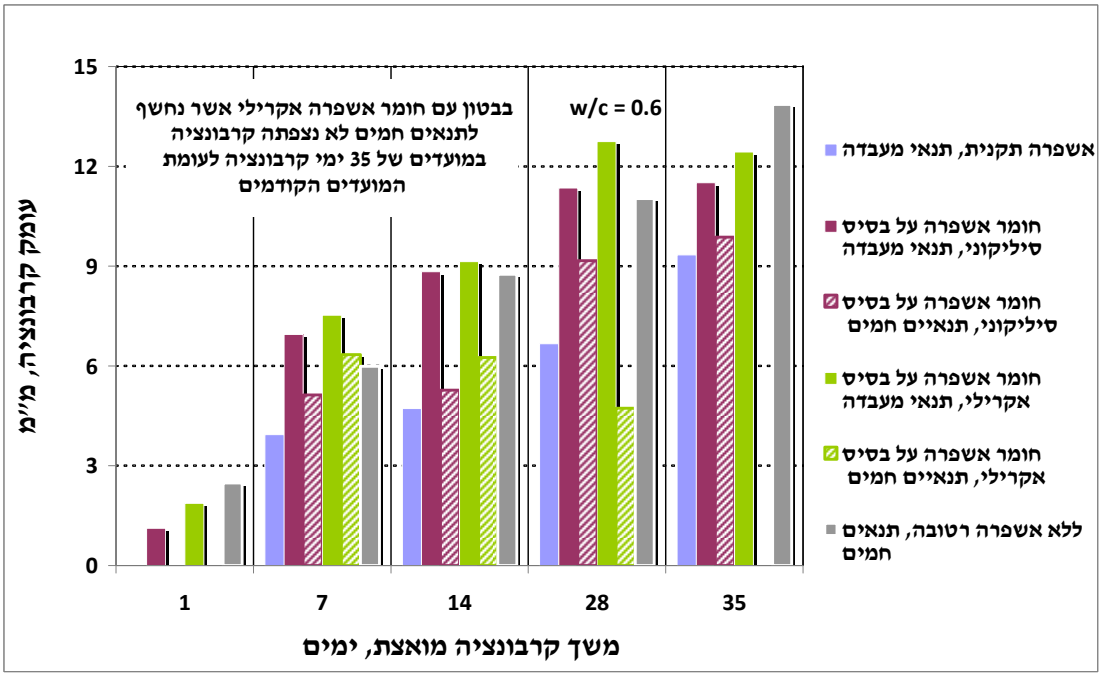


ב'

ציור 9. מקדם ספיגה קפילרית (א') ומקדם חדירת אוויר (ב') של בטון עם יחס מים לצמנט של 0.6 = ω, אחרי שקיבל אשפרה מסוגים שונים ונחשף לתנאי אקלים שונים: תנאי מעבדה - 21°C/60%RH; תנאים חמים - 30°C/60%RH ותנאי יובש - 30°C/40%RH. הערה: אשפרה רטובה תקנית נבחרה כאשפרת ייחוס

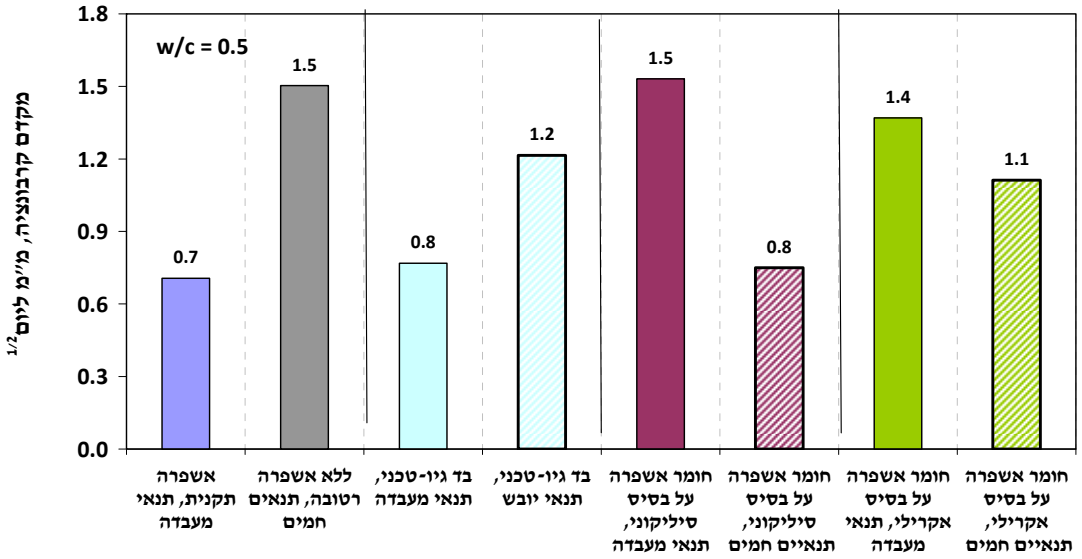


א'

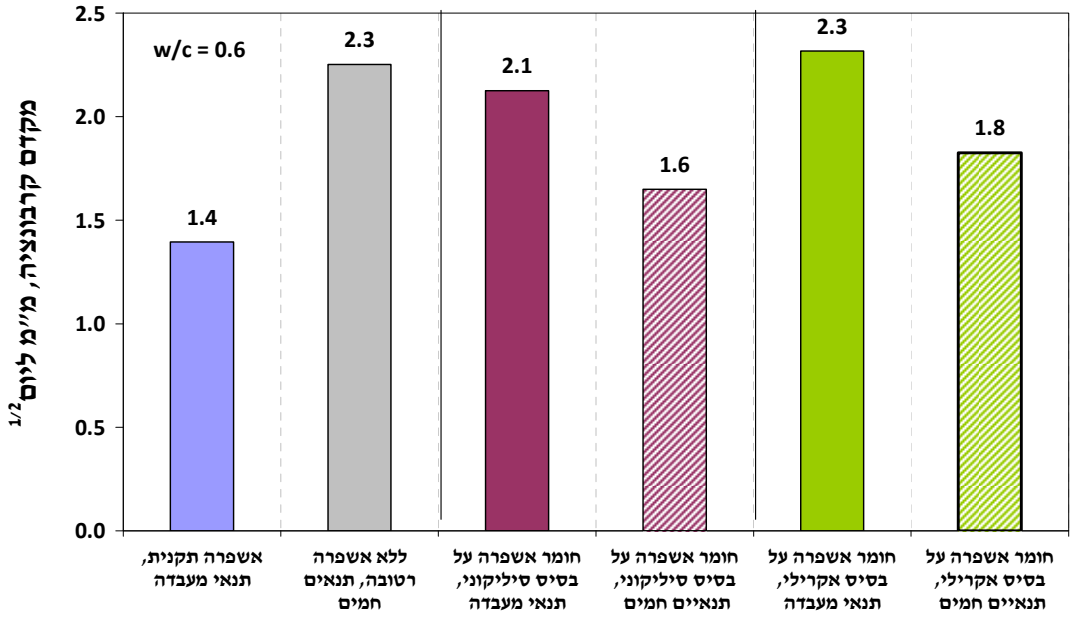


ב'

ציור 10. עומק קרבונציה של בטונים עם יחס מים לצמנט של $\omega = 0.5$ (א') ו-$\omega = 0.6$ (ב') אחרי שקיבלו אשפרה מסוגים שונים ונחשפו לתנאי אקלים שונים: תנאי מעבדה - 21°C/60%RH; תנאים חמים - 30°C/60%RH ותנאי יובש - 30°C/40%RH. הערה: אשפרה רטובה תקנית נבחרה כאשפרת ייחוס



א'



ב'

ציור 11. מקדם קרבונציה של בטונים עם יחס מים לצמנט של $\omega = 0.5$ (א') ו-$\omega = 0.6$ (ב') אחרי שקיבלו אשפרה מסוגים שונים ונחשפו לתנאי אקלים שונים: תנאי מעבדה - 21°C/60%RH; תנאים חמים - 30°C/60%RH ותנאי יובש - 30°C/40%RH. הערה: אשפרה רטובה תקנית נבחרה כאשפרת ייחוס

5. דיון

5.1. השפעת סוג האשפרה ותנאי חשיפה על חוזק בטון קשוי

במחקרים רבים אשר בוצעו במכון בעבר הוכח בוודאות שהעדר האשפרה הרטובה הרצופה עלולה לגרום לשינויים ניכרים בחוזק הבטון ולפגוע באופן המשמעותי ביותר בתכונות מרקם הפנים של הבטון.

מטרת המחקר הנוכחי היא לקבוע את יעילות האשפרה של בטונים באמצעות שיטות אשפרה אלטרנטיביות המוזכרות בתקן ישראלי 466, דהיינו: שימוש בבד גיאוטכני ואשפרה בחומרי אשפרה נוזליים. ברור הוא שסוגי האשפרה האלטרנטיביים הללו חייבים להבטיח שלבטון יהיו התכונות שוות ערך לאלה שמתפתחות בבטון אחרי האשפרה הרטובה הרצופה.

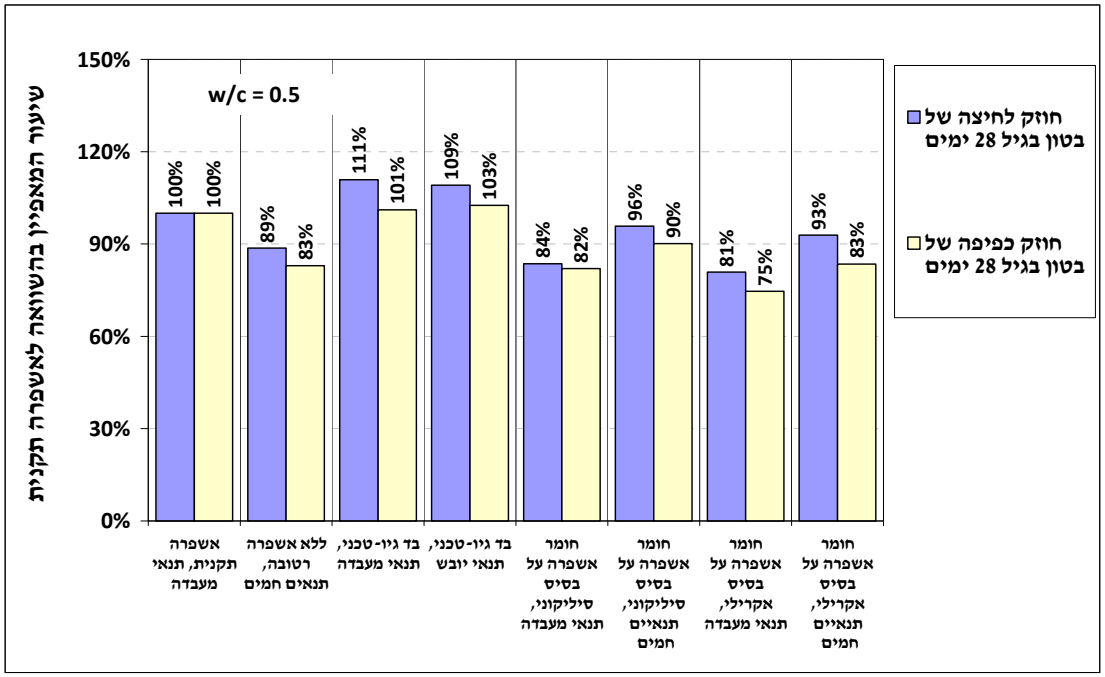
בציור 12 מוצגים שיעורים של חוזק לחיצה וחוזק כפיפה של בטונים אחרי שקיבלו אשפרה מסוגים שונים ונחשפו לתנאי הסביבה השונים. שיעורים אלה חושבו על בסיס תוצאות הבדיקות המוצגות בציורים 1 – 4. האשפרה באמצעות בד גיאוטכני לא גרעה מחוזק הבטון, ללא תלות בתנאי החשיפה אחרי האשפרה. לעומת זאת האשפרה עם חומרי האשפרה משני הסוגים גרמה לירידה משמעותית בחוזק הלחיצה של 12% עד 22% בתנאי מעבדה ולירידה עד 7% בתנאים חמים. חוזק כפיפה של בטונים אשר קיבלו אשפרה בחומרי אשפרה נפגם במידה יותר ניכרת, דהיינו: 18% עד 32% בחשיפה לתנאי המעבדה ו-10% עד 27% אחרי החשיפה לתנאים החמים. שיעורי ירידת החוזק הללו היו אפילו יותר משמעותיים מאשר נצפו בבטון אשר לא קיבל את האשפרה הרטובה כלל ונחשף לתנאים חמים עד לגיל 28 ימים, דהיינו: ירידת חוזק לחיצה של 6% עד 11% וירידת חוזק כפיפה של 17% עד 23% בהשוואה לאשפרה רטובה רצופה. שיעורי ירידת החוזק היו יותר משמעותיים בבטון עם יחס מים לצמנט של 0.6, וזאת כנראה

כתוצאה של התאדות מים יותר אינטנסיבית מבטון בעל נקבוביות יותר גבוהה והעדר הידרצית צמנט מלאה כפי שהתרחשה בבטון שקיבל אשפרה רטובה רצופה. תנאים חמים תרמו כנראה לתהליכי פלמור והתאחות מואצים של חומר אשפרה על פני הבטון והדבר בא לידי ביטוי ביעילות גדולה יותר של חומר האשפרה יחסית לתנאי מעבדה רגילים. אי לכך בבטונים הללו נצפתה ירידת חוזק יותר קטנה בהשוואה לבטונים עם אותו טיפול אשפרה אך חשיפה לתנאי מעבדה רגילים.

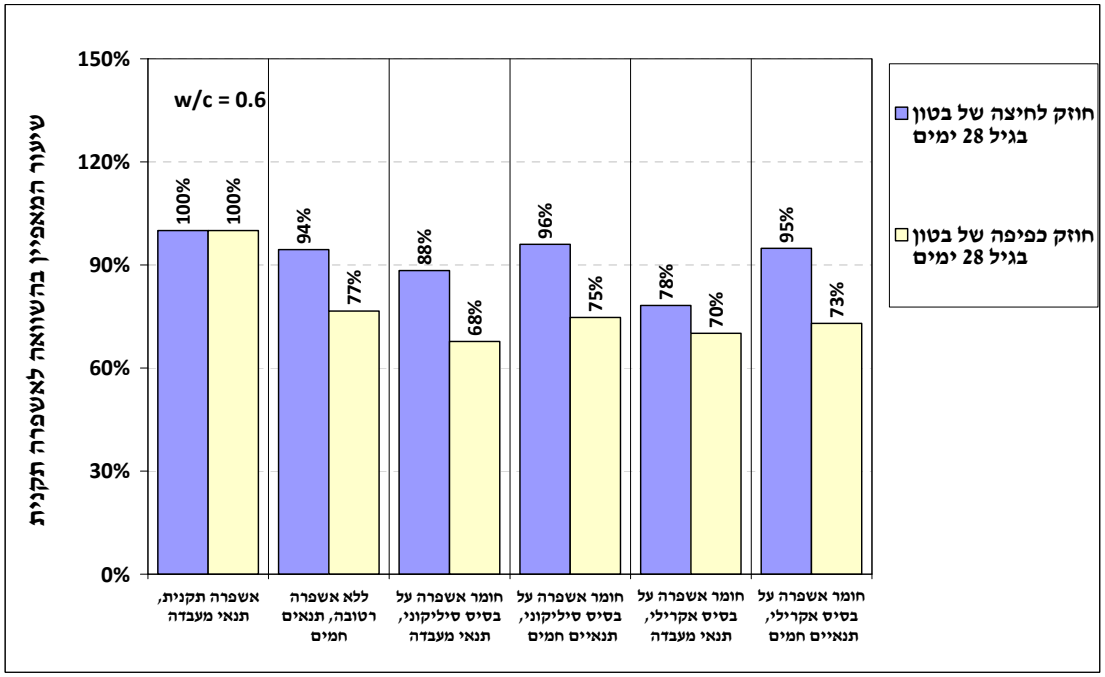
5.2. השפעת סוג האשפרה ותנאי חשיפה על קיים הבטון

כפי שדווח במחקרים [1-2] לאשפרה השפעה משמעותית על חדירות מרקם הפנים של הבטון, וכתוצאה מכך לסוג האשפרה יש השפעה על התפתחות קורוזית הפלדה בבטון מזוין.

בציור 13 מוצגים שיעורים של מאפייני חדירות של בטונים אחרי שקיבלו אשפרה מסוגים שונים ונחשפו לתנאי הסביבה השונים. השיעורים חושבו על בסיס תוצאות הבדיקות המוצגות בציורים 8-9 ו-11.

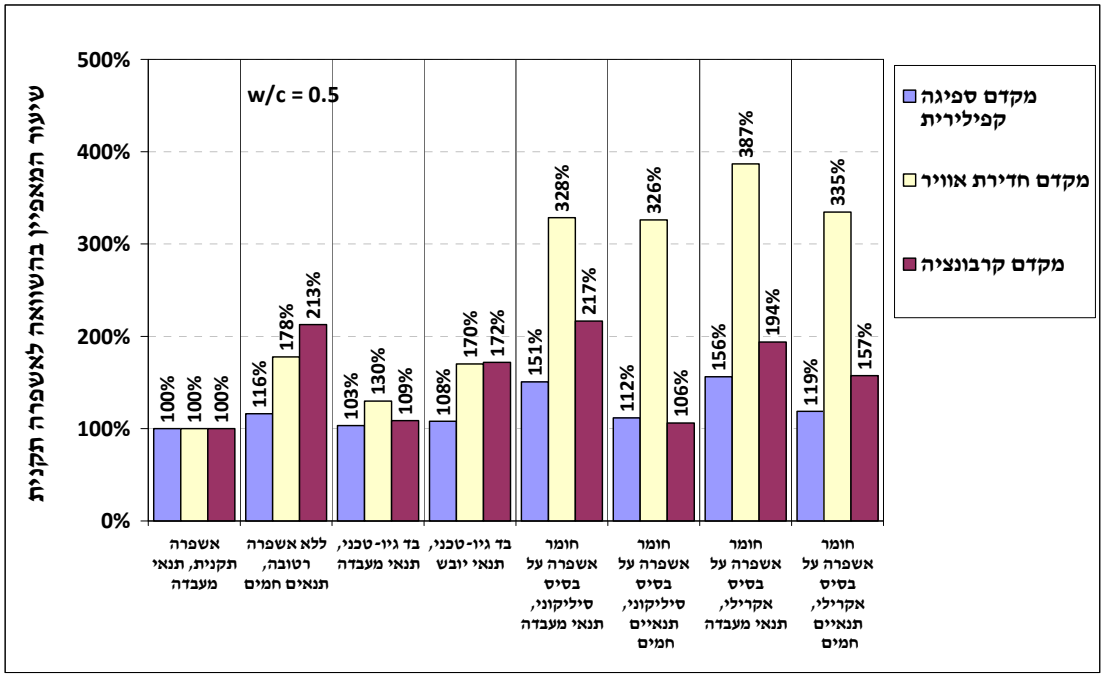


א'

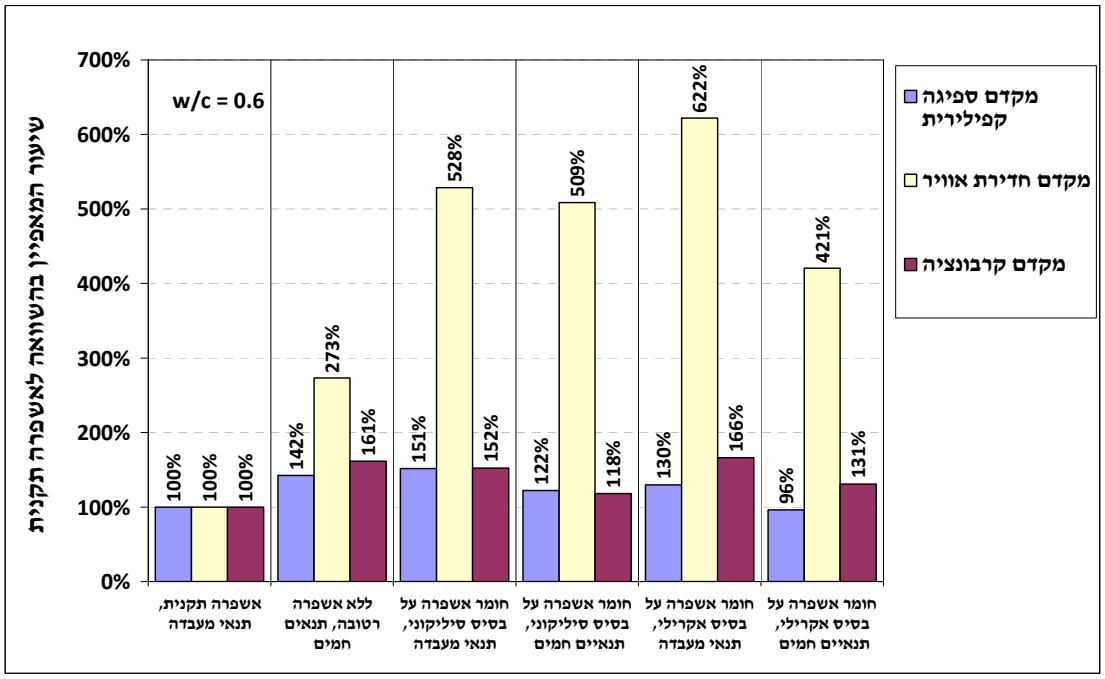


ב'

ציור 12. חוזק יחסי של בטונים עם יחס מים לצמנט של $\omega = 0.5$ (א') ו-$\omega = 0.6$ (ב') אחרי שקיבלו אשפרה מסוגים שונים ונחשפו לתנאי אקלים שונים: תנאי מעבדה - 21°C/60%RH; תנאים חמים - 30°C/60%RH ותנאי יובש - 30°C/40%RH. הערה: אשפרה רטובה תקנית נבחרה כאשפרת ייחוס



א'



ב'

ציור 13. מאפיינים יחסיים של חדירות בטונים עם יחס מים לצמנט של $\omega = 0.5$ (א') ו-$\omega = 0.6$ (ב') אחרי שקיבלו אשפרה מסוגים שונים ונחשפו לתנאי אקלים שונים: תנאי מעבדה - 21°C/60%RH; תנאים חמים - 30°C/60%RH ותנאי יובש - 30°C/40%RH. הערה: אשפרה רטובה תקנית נבחרה כאשפרת ייחוס

כפי שניתן לראות בכל סוגי האשפרה, הן בבד גיאוטכני והן בחומרי אשפרה, בחשיפה לתנאי המעבדה, נצפתה עליה משמעותית של מאפייני החדירות, אם כי היא הייתה מתונה יותר עבור האשפרה עם בד גיאוטכני. בתנאי יובש נצפתה גם כן עלייה במקדמי החדירות, אך היא הייתה מתונה יותר בטיפול האש]רה האקרילי והסיליקוני ואינטנסיבית יותר בבד הגיאוטכני, וזה למרות שהחוזק בטיפול אשפרה זה לא נפגע. לעומת שיעורי החוזק בבטון שקיבל אשפרה בבד גיאוטכני גרמה החשיפה לתנאי יובש לעלייה משמעותית של מאפייני החדירות אשר היו כמעט ושווים לאלה של בטון שלא קיבל אשפרה רטובה כלל. האשפרה בחומרי האשפרה והחשיפה לתנאים חמים גרמה לצמצום קל של העלייה במאפייני החדירות. אבל מאפיינים הללו היו ברוב המקרים כמעט שווים או יותר גבוהים מאלה של בטון אשר לא קיבל אשפרה רטובה כלל ונחשף לתנאים חמים.

לצורך ניתוח בעל משמעות מן הראוי לאפיין את קיים הבטונים אשר נבדקו במסגרת המחקר הנוכחי יחסית לבטון הנחשב לבעל קיים גבוה. על סמך מחקרים רבים אשר בוצעו בנושא בטונים בעלי קיים גבוה ניתן לסכם שמאפייני החדירות של בטון בעל תפקוד גבוה כמפורט להלן:

- <u>מקדם ספיגה קפילרית</u> קטן מ-500 ג׳ למ״ר לשעה^{½}. ערך זה של מקדם ספיגה קפילרית מקובל בספרות המקצועית בתור הסף המירבי המותר לחומרי בנייה אשר משמשים כחומרי גמר חיצוניים במעטפת הבניין כולל בטונים חשופים [16]. במחקרים רבים שבוצעו במכון נמצא שערך זה של מקדם הספיגה הקפילארית אופייני לבטונים בעלי תפקוד גבוה אשר הוכנו עם מנות מים עד 0.5 וקיבלו אשפרה תקנית. לעומת זאת בטונים אשר הוכנו במחקר זה עם מנות מים מ-0.5 עד 0.6 וקיבלו אשפרה תקנית, היו מאופיינים במקדמי ספיגה קפילרית עד כ-1,000 ג׳ למ״ר לשעה^{½}. אי לכך, ניתן להשתמש בערכים הללו כערכי סף לחיזוי נטיות הקיים של בטונים;
- <u>מקדם חדירת אוויר</u> (טורנט) עד $1.5\cdot10^{-16}$ מ״ר בבטונים בעלי תיפקוד גבוה אשר הוכנו עם יחס מים לצמנט של 0.35 – 0.5, ועד כ-$10\cdot10^{-16}$ מ״ר בבטונים אשר הוכנו עם יחס מים לצמנט של 0.6 – 0.7, בתנאי שהם קיבלו אשפרה רטובה רצופה כפי שנדרש בתקן ישראלי ת״י 466 [2-1, 17];
- <u>עומק קרבונציה מירבי</u>. לפי מחקרים רבים ודרישות תקן נקבע סף של 20 מ״מ כעובי הכיסוי המינימלי אשר מאפשר להגן על פלדת הזיון בפני חדירת גורמי הקורוזיה המזיקים.

השוואת הערכים הללו עם התוצאות המוצגות בציורים 8 – 10 מאפשר להגיע למסקנות שלהלן:

- <u>בטונים עם יחס מים לצמנט של 0.5 אשר קיבלו אשפרה בבד גיאוטכני</u> היו מאופיינים במקדמי הספיגה הקפילרית וחדירת האוויר קטנים או כמעט שווים לאלה של בטונים בעלי תיפקוד גבוה. עומק הקרבונציה המירבי שהתקבל בבטונים אלה בתהליך קרבונציה מואצת, היה קטן במידה ניכרת מהסף של 20 מ״מ
- <u>בטונים עם יחס מים לצמנט של 0.5 אשר קיבלו אשפרה בחומרי אשפרה</u> היו מאופיינים במקדמי הספיגה הקפילארית וחדירת האוויר גבוהים מאלה של בטון בעל תיפקוד גבוהה עם אותו יחס מים לצמנט.

עומקי קרבונציה מואצת של בטונים אשר קיבלו אשפרה בחומר אשפרה על בסיס סיליקוני היה פי 2 יותר גבוה מאשר בבטון שקיבל אשפרה רטובה רצופה, ללא תלות בתנאי החשיפה אחרי האשפרה.

בבטונים אשר קיבלו אשפרה בחומר אקרילי לא ניתן לאפיין באופן חד משמעי את נטיות הקרבונציה שלהם, וזאת עקב הממברנה הפולימרית של חומר האשפרה אשר שינתה את אופי תהליך הקרבונציה במועדים המאוחרים. ניתוח עקומי הקרבונציה של בטונים אלה (ציור ג-1, נספח ג') מאפשר לראות שבמועדים עד 28 ימי קרבונציה מואצת היה עומק הקרבונציה בבטונים עם חומרי אשפרה עד פי 1.5 – 3 יותר גבוה מאשר בבטון שקיבל אשפרה רטובה רצופה וקרובה לזו של בטון שלא קיבל אשפרה רטובה כלל.

אי לכך, בהתחשב בכל הנ"ל ניתן לסכם שאשפרה בחומרי אשפרה לא מאפשרת לקבל בטון עם יחס מים לצמנט של 0.5 ובעל תיפקוד גבוה.

<u>בטונים עם יחס מים לצמנט גבוה מ- 0.5 אשר קיבלו אשפרה בחומרי אשפרה</u>. בבטונים אלה כל המאפיינים של החדירות היו נחותים או כמעט שווים למאפיינים של בטון ללא אשפרה רטובה. התכונות הללו חורגות בהרבה מהערכים המפורטים עבור בטונים בעלי תיפקוד גבוה או בעלי קיים ממושך. אי לכך, גם בבטונים עם מנות מים גבוהות אין מקום להחשיב אשפרה בחומרי האשפרה כאלטרנטיבה לאשפרה רטובה רצופה.

חשוב לציין שכפי שהודגש לעיל שחל שיפור במאפיינים העיקריים של בטונים שקיבלו אשפרה בחומרי האשפרה אחרי חשיפתם לתנאים חמים לעומת תנאי מעבדה. במילים אחרות ניתן לסכם שבתנאי האקלים הישראלי צפויה יעילות חומרי אשפרה יותר טובה בתקופות חמות מאשר בתקופות עם טמפרטורות יותר מתונות ולחות מוגדלת.

6. מסקנות

- תקן ישראלי ת"י 466 דורש שהאשפרה האלטרנטיבית תהיה שוות ערך לאשפרה רטובה רצופה;
- על סמך תוצאות המחקר ניתן לסכם שכל סוגי האשפרה האלטרנטיביים אשר נבדקו במסגרת המחקר הנוכחי גרמו להחמרה משמעותית של מאפייני חדירות הבטון ולכן לא ניתן לחשב אותם כשווי ערך לאשפרה הרטובה הרצופה;
- אשפרה בבד גיאוטכני מאפשרת להגיע לחוזק שווה ערך לזה של בטון אשר קיבל אשפרה רטובה רצופה במשך 7 ימים. אבל מבחינת חדירות הבטון לא מאפשרת האשפרה בבד גיאוטכי לקבל בטון שווה ערך לבטון אחרי אשפרה רטובה רצופה;
- אשפרה בחומרי האשפרה לא מאפשרת לקבל בטון שווה ערך, הן מבחינת החוזק והן מבחינת חדירות מרקם הפנים.
- אי לכך, לעומת בטונים אשר יקבלו אשפרה תקנית רטובה רצופה, ניתן לצפות שלכל הבטונים אשר יקבלו אשפרה אלטרנטיבית מהסוגים אשר נבדקו במסגרת המחקר הנוכחי, יהיה אורך חיים יותר קצר ותיפקוד נחות בכל הקשור להתפתחות הקורוזיה של פלדת הזיון בבטון.

- מומלץ שבכל מקרה של תכנון השימוש בסוג אשפרה אלטרנטיבית יבוצע בדיקת יעילות האשפרה הן מבחינת החוזק, והן לגבי איכות מרקם הפנים אשר בא לידי ביטוי במאפייני חדירות הבטון.

מראי מקור

1. ווסרמן, ר., בנטור, א. "קביעת קריטריונים לבדיקת יעילות האשפרה של בטון במבנה". דו"ח מחקר בהזמנת משרד הבינוי והשיכון, המכון הלאומי לחקר הבנייה, טכניון, חיפה, ספטמבר 2002

2. ווסרמן,ר., בנטור, א. "פיתוח שיטה לא הרסנית למעקב אחר האשפרה של גשרים מבטון". דו"ח מחקר. בהזמנת מע"צ – חברה לאומית לדרכים בישראל בע"מ, , המכון הלאומי לחקר הבנייה, טכניון, חיפה, ספטמבר 2009

3. Recommended Practice for Curing Concrete. ACI American Concrete Institute. Detroit, USA, 308-1-11 (1971)

4. Gonnerman, H.F., Study of Methods of Curing Concrete. *Journal Amer. Concrete Inst.*, Feb. 1930, *Proceedings*, Vol. 26, p.359

5. Ruettgers, A., Whitmore, A.A., Construction of Main Canal Lining of Kittitas Division. *Journal Amer. Concrete Inst.*, Oct. 1930, *Proceedings,* Vol. 27, p. 117

6. Report of Investigations Curing of Concrete Pavement Slab, *Proceedings of the Thirteenth Annual Meeting of the Highway Research Board,* Part II, 1934

7. Tuthill, L.H., Solving the Problem of Concrete Curing on the Colorado River Aqueduct. *Western Construction News,* Aug. 1935

8. Meissner, H.S., Smith, S.E., Concrete Curing Compounds, *Journal Amer. Concrete Inst.*, May – June 1938, Vol. 34, p. 549 – 559

9. ASTM-C-309 "Standard Specification for Liquid Membrane – Forming Compounds for Curing Concrete

10. א. בנטור, ח. יגרמן. "השפעת שיטות אשפרה בתנאי אקלים חם על טיב מרקם הפנים ועל חדירות הבטון". דו"ח מסכם, שנה א'. הטכניון, חיפה (1986)

11. ת"י 466 "חוקת הבטון" מכון התקנים הישראלי

12. *תקן ישראלי ת"י 26, חלק 4: "שיטות לבדיקת בטון : תכונות בטון קשוי-חוזק"*, מכון התקנים, יוני 1985

13. *. תקן ישראלי ת"י 26, חלק 5 (1995): "שיטות לבדיקות בטון : תכונות בטון קשוי למעט חוזק"*

14. ImageJ. National Health Institute. Available at http://rsbweb.nih.gov/ij/

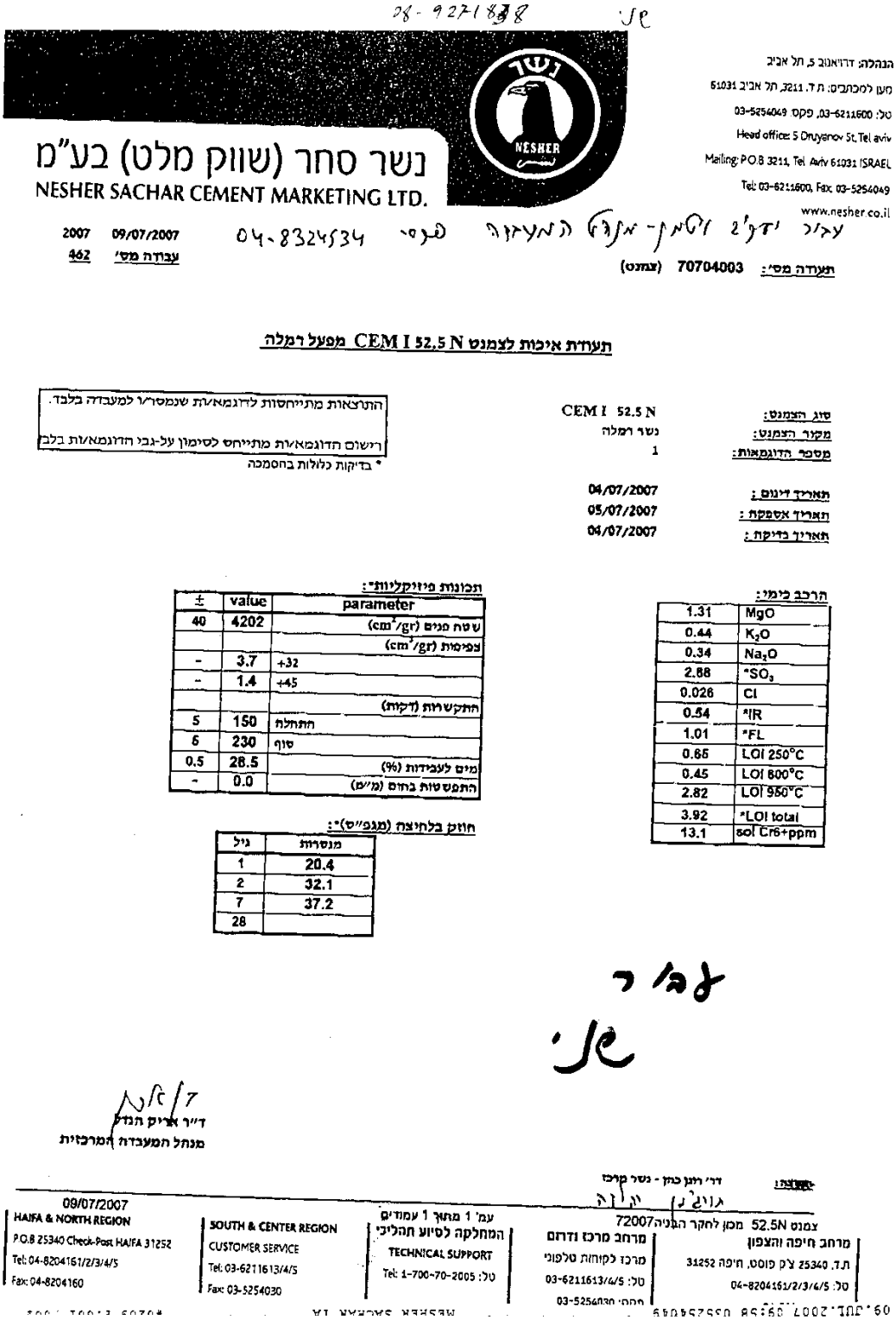
15. ווסרמן, ר.,.בנטור, א. "בלייה של בטון מזוין בתנאי גשם חומצי וקרינת UV בישראל" בהזמנת משרד הבינוי והשיכון, המכון הלאומי לחקר הבנייה, טכניון, חיפה, יולי 2009

16. Lutz, P. et al, Lehrbuch der Bauphysik., B.G. Teubner Stuttgart 1994

נספח א'

טבלה א' – 1. הרכב כימי של צמנט פורטלנד

08-9271838 שני



נשר סחר (שווק מלט) בע"מ
NESHER SACHAR CEMENT MARKETING LTD.

הנהלה: דרויאנוב 5, תל אביב
מען למכתבים: ת.ד. 3211, תל אביב 61031
טל: 03-6211600, פקס: 03-5254049
Head office: 5 Druyanov St, Tel aviv
Mailing: P.O.B 3211, Tel Aviv 61031 ISRAEL
Tel: 03-6211600, Fax: 03-5254049
www.nesher.co.il

עבור יעקב וטמן - מנהל המעבדה פרסי 04-8324534

2007 09/07/2007
עבודה מס' 462

תעודה מס': 70704003 (צמנט)

תעודת איכות לצמנט CEM I 52,5 N מפעל רמלה

סוג הצמנט:	CEM I 52.5 N
מקור הצמנט:	נשר רמלה
מספר הדוגמאות:	1
תאריך דינום:	04/07/2007
תאריך אספקה:	05/07/2007
תאריך בדיקה:	04/07/2007

התוצאות מתייחסות לדוגמא/ות שנמסר/ו למעבדה בלבד.
רישום הדוגמא/ות מתייחס לסימון על-גבי הדוגמא/ות בלבד
* בדיקות כלולות בהסמכה

הרכב כימי:

1.31	MgO
0.44	K_2O
0.34	Na_2O
2.88	*SO_3
0.026	Cl
0.54	*IR
1.01	*FL
0.65	LOI 250°C
0.45	LOI 600°C
2.82	LOI 950°C
3.92	*LOI total
13.1	sol Cr6+ppm

תכונות פיזיקליות*:

±	value	parameter
40	4202	שטח פנים (cm^2/gr)
		צפיפות (cm^3/gr)
-	3.7	+32
-	1.4	+45
		התקשרות (דקות)
5	150	התחלה
6	230	סוף
0.5	28.5	מים לעבידות (%)
-	0.0	התפשטות בחום (מ"מ)

חוזק בלחיצה (מגפ"ס)*:

גיל	מנסרות
1	20.4
2	32.1
7	37.2
28	

עבור
שני

ד"ר אריק הנדל
מנהל המעבדה המרכזית

דר' רונן כהן - נשר מרכז
גוילנן יהודה

09/07/2007

HAIFA & NORTH REGION
P.O.B 25340 Check-Post HAIFA 31252
Tel: 04-8204161/2/3/4/5
Fax: 04-8204160

SOUTH & CENTER REGION
CUSTOMER SERVICE
Tel: 03-6211613/4/5
Fax: 03-5254030

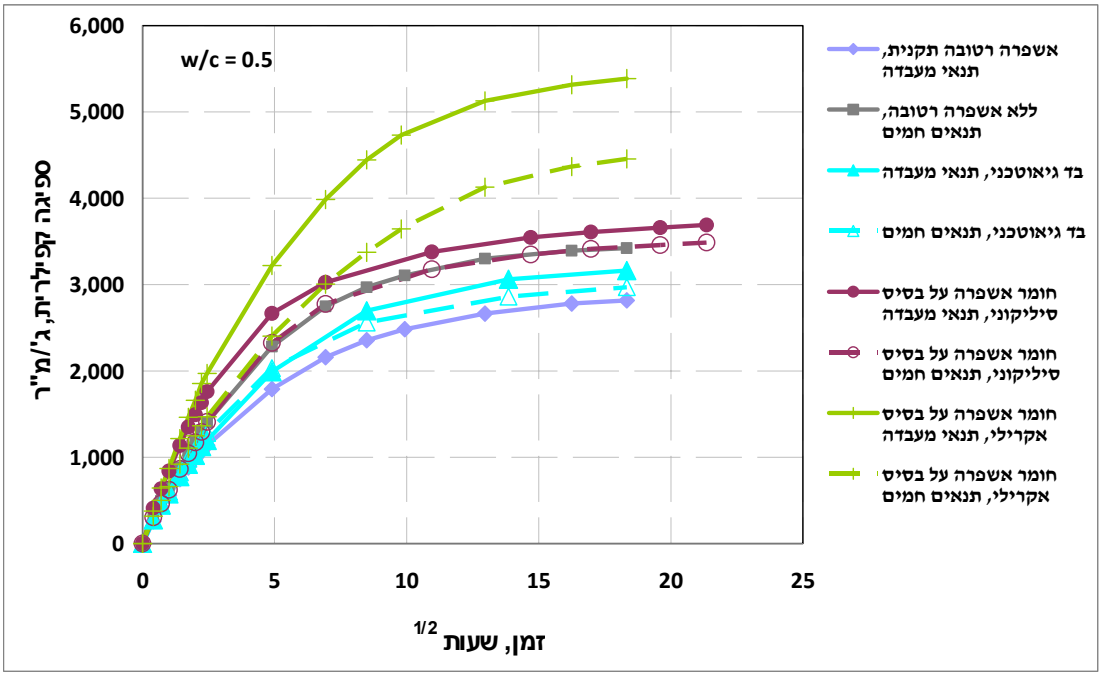
עמ' 1 מתוך 1 עמודים
המחלקה לסיוע תהליכי
TECHNICAL SUPPORT
Tel: 1-700-70-2005 :טל

מרחב מרכז ודרום
מרכז לקוחות טלפוני
טל: 03-6211613/4/5
פקס: 03-5254030

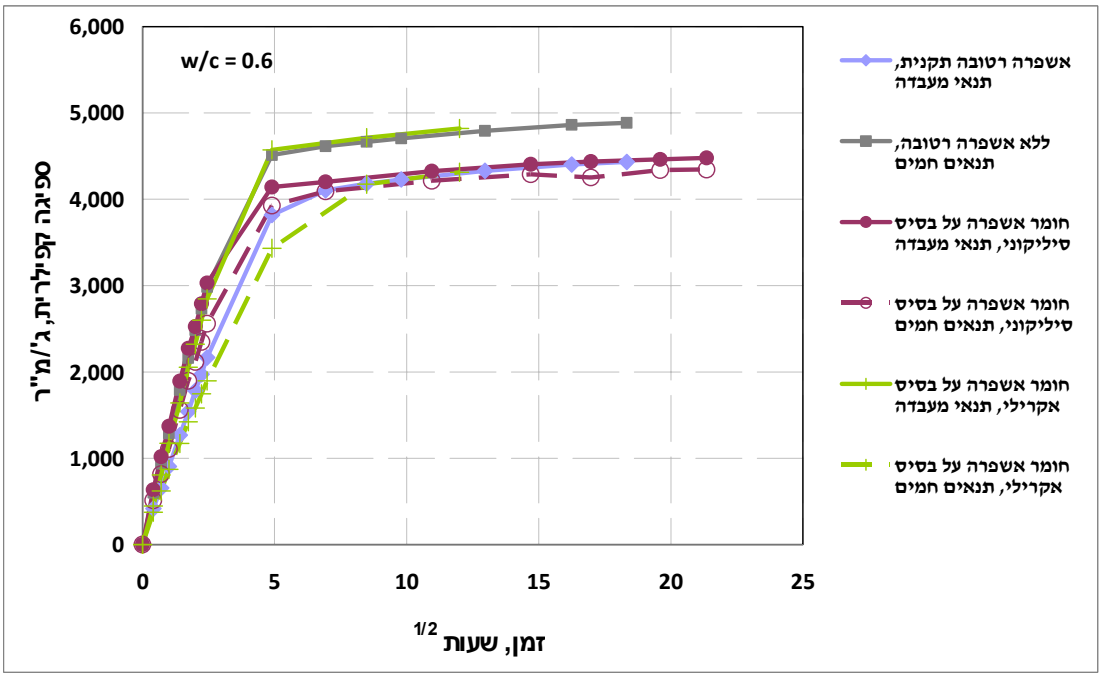
מרחב חיפה והצפון
ת.ד. 25340 צ'ק פוסט, חיפה 31252
טל: 04-8204161/2/3/4/5

צמנט 52.5N מכון לחקר הבניה 72007

נספח ב'. עקומות ספיגה רפילירית של בטונים



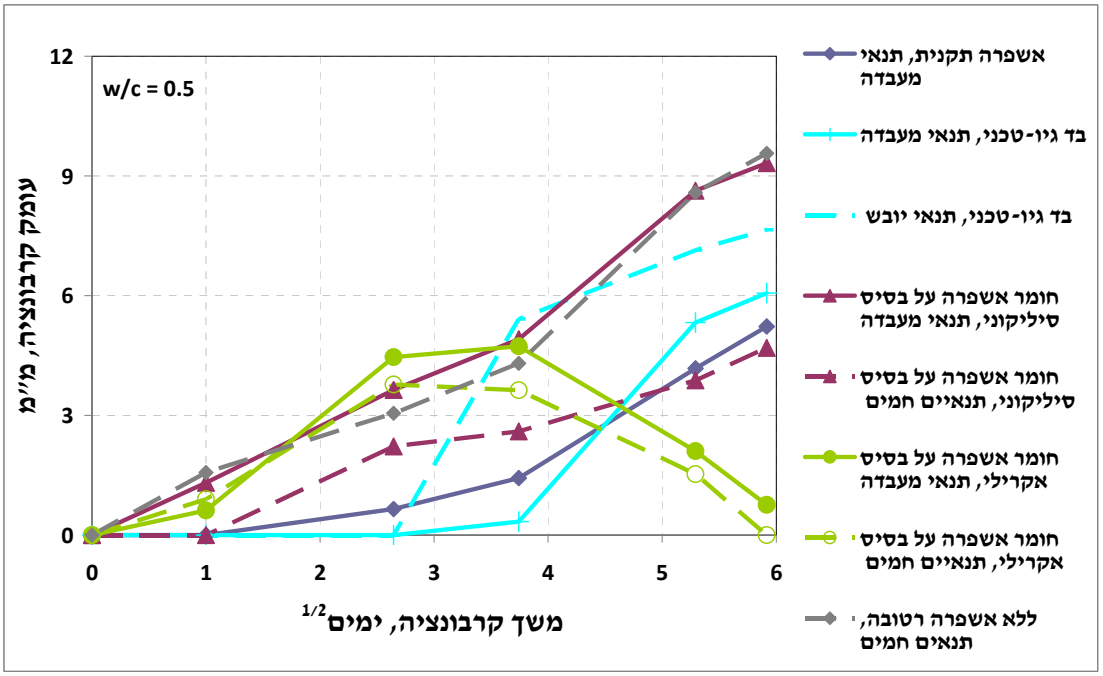
א'



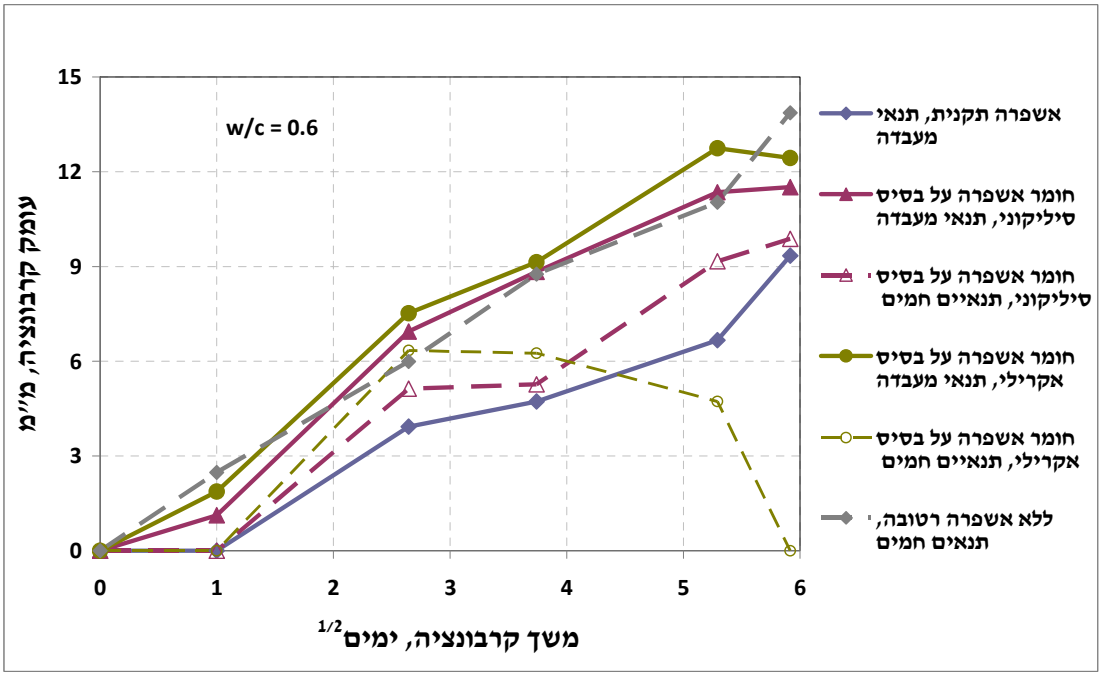
ב'

ציור ב- 1. ספיגה קפילרית של בטונים עם יחס מים לצמנט של $\omega = 0.5$ (א') ו-$\omega = 0.6$ (ב') אחרי שקיבלו אשפרה מסוגים שונים ונחשפו לתנאי אקלים שונים: תנאי מעבדה - 21°C/60%RH; תנאים חמים - 30°C/60%RH ותנאי יובש - 30°C/40%RH. הערה: אשפרה רטובה תקנית נבחרה כאשפרת ייחוס

נספח ג'. עקומות קרבונציה מואצת של בטונים שקיבלו אשפרה מסוגים שונים ונחשפו לתנאי אקלים שונים



א'



ב'

ציור ג-1. עקומי קרבונציה של בטונים עם יחס מים לצמנט של $\omega = 0.5$ (א') ו-$\omega = 0.6$ (ב') אחרי שקיבלו אשפרה מסוגים שונים ונחשפו לתנאי אקלים שונים: תנאי מעבדה - 21°C/60%RH; תנאים חמים - 30°C/60%RH ותנאי יובש - 30°C/40%RH. הערה: אשפרה רטובה תקנית נבחרה כאשפרת ייחוס

Abstract

Research and experience of reinforced concrete in the recent decades emphasized again its importance to concrete performance. Partial curing of the concrete with intermediate water treatment may result in drastic increase in permeability of moisture, chlorides and carbonation, which are the main causes for steel corrosion in concrete.

The need to speed up construction and save in labor has resulted in increased use of curing compounds of a variety of properties and compositions. They are frequently used in concrete pavements, concrete floors, concrete structures and concrete water retaining structures.

The curing compounds must comply with ASTM-C-309 standard. Compounds which comply with this standard are indeed effective in drastic reduction in water loss from the cured concrete. Yet, there is no sufficient data regarding the performance of these compounds in the Israeli weather. The Israeli standard IS 466 for reinforced concrete structures states that the designer of the structure must approve the use of the curing compound. Yet, the performance of such compounds has not been investigated systematically in Israel, and the know-how on its efficiency is largely based on information provided by the producers. Thus, the Israeli designer does not have sufficient objective information to assess the efficiency of the curing compounds relative to other curing methods with respect to the long term performance of the concrete structure.

The current research studied systematically the effect of the characteristic Israeli weather on the performance and durability of concretes cured with curing compounds. The concrete studied were made with 350 kg of cement per cubic meter of concrete, at two different w/c ratios: 0.5 and 0.6. The concretes were exposed to several curing treatments: standard (reference), curing with geotechnical fabric, curing compound based on silicon composition, curing compound based on acrylic composition, and treatment without any water curing.

Compressive strength was determined at 1, 7 and 28 days and flexural strength at 28 days. The free shrinkage was recorded starting at 7 days for a period of two months. Capillary absorption was determined at 28 days. Accelerated carbonation was commenced at 28 days and the depth of carbonation was determined periodically.

The results of the current study indicate that all the curing treatments evaluated resulted in concretes with inferior penetration characteristics relative to the standard curing. Curing with geotechnical fabric enabled to match the strength obtained with standard curing but did not achieve the level of penetration of the standard concrete. The curing compounds did not enable to reach the strength as well as the penetration performance of the concrete cured in standard conditions.

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

2011586

Criteria for Determining the Efficiency of Curing of Concrete Surfaces with Curing Compounds in Hot-Dry Climate

Dr. Rina Wasserman Prof. Arnon Bentur

Copyright © 2010 by R. Wassreman and A. Bentur, the Ministry of Construction and Housing and the Technion Research and Development Foundation, Ltd, Haifa

Haifa August 2010

המכון לאומי לחקר הבנייה
קרית הטכניון, חיפה 3200003
טל. 04-8292242/3
nbri@tx.technion.ac.il

