



מיסודם של
משרד הבינוי והשיכון

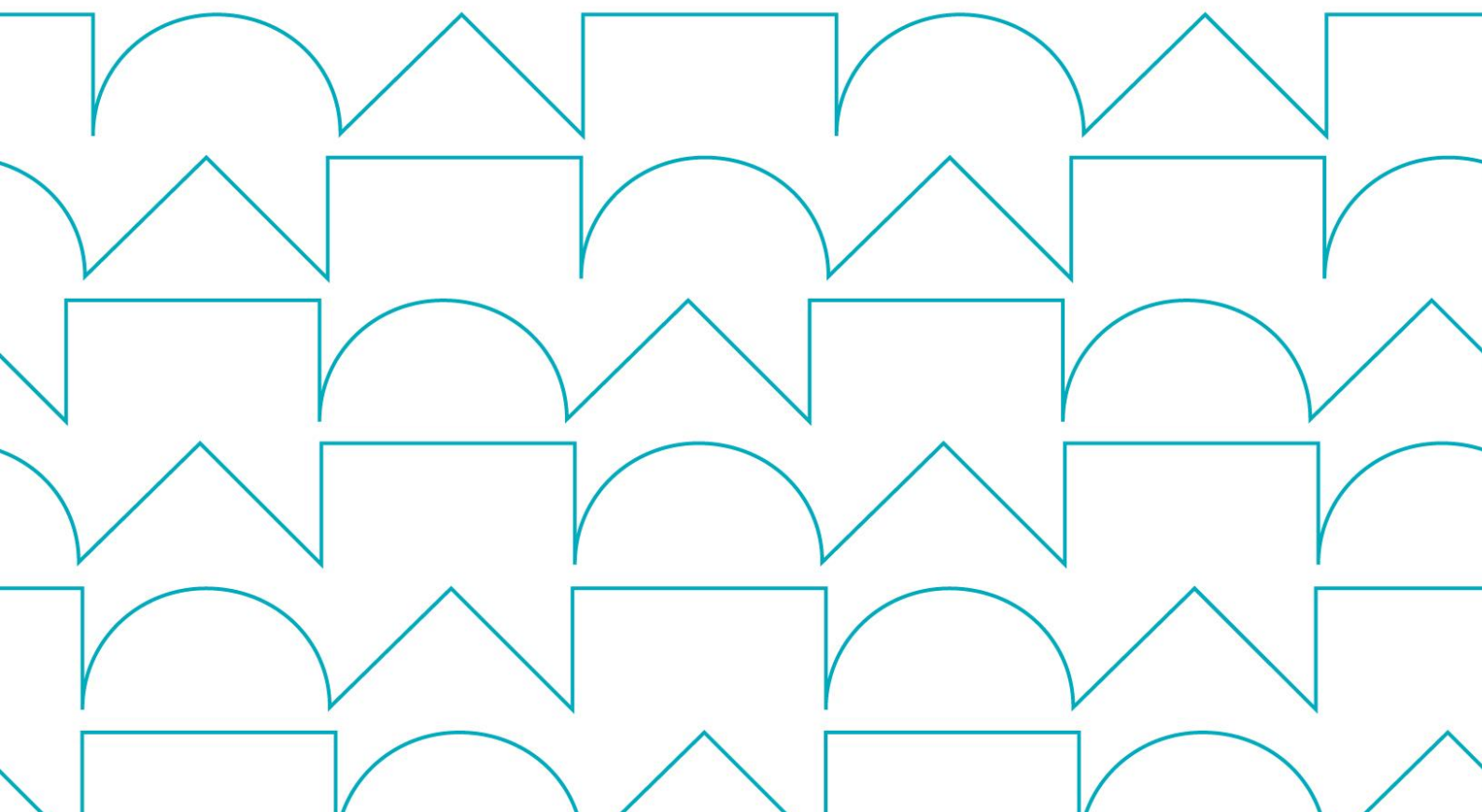
הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

המכון הלאומי לחקר הבנייה
National Building Research Institute



גישה משולבת להארכת מחזור החיים של מבנים מבטון מזוין

קוסטה קובלר איגור לפירו סברינה ספטארי
בוריס דשבסקי אלכסנדר מז'וב





20267716

גישה משולבת להארכת מחזור החיים של מבנים מבטון מזוין

**פרופ"ח קוסטה קובלר אינג' איגור לפירו פרופ"ח סברינה ספטארי
אינג' בוריס דשבסקי ד"ר אלכסנדר מז'וב**

מלווי מחקר: אינג' יונתן אופק אינג' אריה בלפרמן אינג' נחמיה מסורי אינג' גיל אשוח

בהזמנת משרד הבינוי והשיכון
חוזה מס' 4

Copyright © 2021 by K. Kovler and I. Lapiro, S. Spatari, B. Dashevsky, A. Mezhov
The Israel Ministry of Construction and Housing and the Technion Research and Development
Foundation Limited, Haifa

יוני 2021

חיפה

סיון תשפ"א

תקציר

קורוזיה בבטון מזוין היא אחד ממנגנוני ההידרדרות המרכזיים הגורמים להפסדים כלכליים וחברתיים. קיימות כיום אסטרטגיות רבות להארכת זמן השירות של מבנים מבטון מזוין, ובמיוחד מבנים שנחשפו להתקפת כלוריד. אסטרטגיות אלה כוללות שימוש ב: א) בטון בעל חדירות נמוכה (ביצועים מעולים); ב) מעכבי קורוזיה כימיים; ג) ציפויי מגן על מוטות פלדת זיון (לדוגמה פלדה מצופה אפוקסי או פלדה מגולוונת); ד) פלדה עמידה בפני קורוזיה (למשל פלבי"מ); ה) זיון לא ברזלי (למשל פלסטיק מחוזק בסיבים); ו) ממברנות או חומרי איטום עמידים במים המיושמים על משטח הבטון החשוף; ז) הגנה קתודית (מיושמת בזמן הבנייה); ח) שילובים של האמור לעיל. הפרויקט הנוכחי עוסק באסטרטגיות א' וב' ובשילובן. בפרט, הפרויקט בוחן את ההשפעה של כל אסטרטגיה והשילוב ביניהן תוך התמקדות ביישום של מוספים כימיים שונים, שיכולים לשמש כמעכבים או כמוספים על-פלסטיים (פלסטיסייזרים), או כשניהם, כמו מוצרים מבוססי אלקיל בנון סולפונט לינארי (LABS) המיוצרים בישראל.

מטרת הפרויקט הייתה לפתח את האסטרטגיה הטובה ביותר להגנה מפני קורוזיה של בטון מזוין המיוצר ביחס מים-צמנט נתון המכיל סוגים שונים של מוספים כימיים, ולהעריך את השיפור בביצועיו הכלכליים והסביבתיים באמצעות הערכת מחזור החיים (LCA).

פותרה שיטת בדיקה מעבדתית מואצת להערכת פוטנציאל הקורוזיה של בטון מזוין הנתון להתקפת כלוריד ומתח חשמלי. תוצאות הניסוי שהשיגו המחברים קרובות לאלו של המודל האנליטי שפיתח א. לפירו. הן אפשרו לחזות את זמן השירות של סוג המלט הספציפי שנחקר במעבדה על ידי אקסטרפולציה למתחים הנמוכים יותר שנצפו בתנאים טבעיים.

נמצא שבזרם ו/או מתח חשמלי נמוכים יותר, היתרונות של שימוש במעכבי קורוזיה נודדים עולים. בתנאים סביבתיים טבעיים, הכנסת מעכב קורוזיה נודד לתערובת יכולה להאריך את זמן השירות של בטון מזוין בכ-80%.

למרות שמעכבים משפרים את עמידותו של בטון מזוין בפני הקורוזיה, אין ליישם על חשבון טיב הבטון על פי דרישה בתקנים 466 חלק א' טבלה 6.14 ות"י 118 טבלה 11.

תוכן העניינים

5.....	מבוא	.1
7.....	היקף המחקר	.2
7.....	שיטות ניסיוניות	.3
7.....	חומרים	3.1
9.....	תכנון, אשפרה ובדיקה של דגמים בתנאי לחיצה	3.2
9.....	בדיקת קורוזיה מואצת	3.3
10.....	בדיקת חוזק הדבקות	3.4
11.....	תוצאות ודיון	4
11.....	התפתחות חוזק לחיצה	4.1
13.....	השפעת הקורוזיה על חוזק ההדבקות	4.2
13.....	קינטיקה של קורוזיה	4.3
16.....	השפעת מעכבי קורוזיה	4.4
18.....	השפעת מעכבים על כליאת אוויר ונקבוביות	4.5
22.....	הערכת משך שירות	4.6
25(LABSW) LABS	דוגמה להערכת מחזור חיים (LCA) לשימוש במוסף כימי חדש שהופק מפסולת	5
25.....	מבוא	5.1
25.....	הגדרת גבולות המערכת	5.2
29.....	תוצאות הערכת מחזור חיים (LCA)	5.3
33.....	סיכום הערכת מחזור החיים	5.4
33.....	מסקנות	6
34.....	מקורות	7

רשימת האיורים

- איור 1 : תיאור סכמטי של חיי השירות לפי Tuutty (1982) 6
- איור 2 : מערכת להאצת קורוזיה (כל המידות במ"מ) : צילום המערכת מאחד הניסויים ושרטוט המערכת הניסיונית [25] 10
- איור 3 : המערכת הניסיונית לבדיקת חוזק ההדבקות 11
- איור 4 : חוזק לחיצה ממוצע כנגד זמן אשפרה של דגמים שמכילים מעכבי קורוזיה שונים 12
- איור 5 : חוזק לחיצה מנורמל כנגד זמן אשפרה של דגמים של מעכבי קורוזיה שונים 12
- איור 6 : עומס מרבי ממוצע שמתאים לחוזק הדבקות מלט הייחוס כנגד זמן (סטיית התקן מיוצגת ע"י הקווים האנכיים) 13
- איור 7 : התפתחות התנגדות חשמלית תלוית-זמן תחת השפעת מעכבי קורוזיה שונים ומתח קבוע של 3.6 וולט : (א) בקרה ; (ב) MCI-2005 ; (ג) LABS ; (ד) K_2SiF_6 ; (ה) $K_2SiF_6 + Ca(OH)_2$; (ו) CNI 14
- איור 8 : התפתחות התנגדות חשמלית תלוית-זמן תחת השפעת מעכבי קורוזיה שונים ומתח קבוע של 7.2 וולט : (א) בקרה ; (ב) MCI-2005 ; (ג) K_2SiF_6 15
- איור 9 : שלבי קינטיקה של קורוזיה המייצגים את השינוי בהתנגדות החשמלית של דגמי בטון מזוין בסביבה של קורוזיה מואצת 15
- איור 10 : התפתחות התנגדות חשמלית תלוית זמן וצילום הסדק הראשון במלט הבקרה שנבדק במתח קבוע של 1.2 וולט 17
- איור 11 : התפתחות התנגדות חשמלית תלוית זמן וצילום הסדק הראשון במלט עם מעכב MCI-2005 שנבדק במתח קבוע של 1.2 וולט 17
- איור 12 : השפעת תכולת אויר על חוזק לחיצה ב-28 יום 19
- איור 13 : השפעת תכולת האוויר על משקל מרחבי 19
- איור 14 : מערכת היחסים בין משקל מרחבי לחוזק לחיצה ב-28 יום 20
- איור 15 : נקבוביות בדגמים שהתקשו (א) בקרה - 6.0% ; (ב) K_2SiF_6 - 5.1% ; (ג) MCI - 3.6% 21
- איור 16 : זמן סדיקה כנגד מתח חשמלי 22
- איור 17 : זמן סדיקה כנגד זרם חשמלי 23
- איור 18 : זמן סדיקה כנגד זרם חשמלי (תוצאות הניסוי לעומת תוצאות חזויות באופן אנליטי) 23
- איור 19 : חיי השירות של בטון המכיל מעכב קורוזיה נודד משתפרים תחת מתח חשמלי נמוך יותר 24
- איור 20 : משך השירות של בטון שמכיל מעכב קורוזיה נודד משתפר תחת מתח חשמלי נמוך יותר 24
- איור 21 : גבול המערכת עבור שימוש חלופי ב-LABSW כמוסף לבטון 27
- איור 22 : עקומת אברמס לקביעת יחס מים/צמנט אפקטיבי 27
- איור 23 : השפעה על התחממות גלובלית של 1 מ"ק מלט עם מוספים מבוססי-LABSW בהשוואה למוספים מסחריים גנריים באיכות גבוהה (H), בינונית (M) ונמוכה (L) (שגורמים לירידה של 5%, 15% ו-25% בחוזק הלחיצה, בהתאמה) 32
- איור 24 : מערכת היחסים בין הירידה בחוזק AEA וההשפעה על ההתחממות הגלובלית 32

רשימת הטבלאות

8	טבלה 1 : הרכבי המינרלים והכימיים בצמנט
8	טבלה 2 : יחסי הכמויות בתערובות ותכונותיהן
18	טבלה 3 : זמן סדיקה בדגמי מלט שנבדקו תחת מתח של 1.2 וולט
18	טבלה 4 : זמן סדיקה בדגמי מלט שנבדקו תחת מתח של 3.6 וולט
18	טבלה 5 : זמן סדיקה בדגמי מלט שנבדקו תחת מתח של 7.2 וולט
28	טבלה 6 : קיזוזי צמנט לתערובות המלט השונות
29	טבלה 7 : זרימות ייחוס עבור ייצור של 1 ק"ג מוספים מבוססי-LABSW
29	טבלה 8 : פליטות cradle-to-gate של תהליכים וחומרים שנכנסים ל-LCA
31	טבלה 9 : תוצאות הערכת מחזור החיים עבור OD ,GW ו-AD

1. מבוא

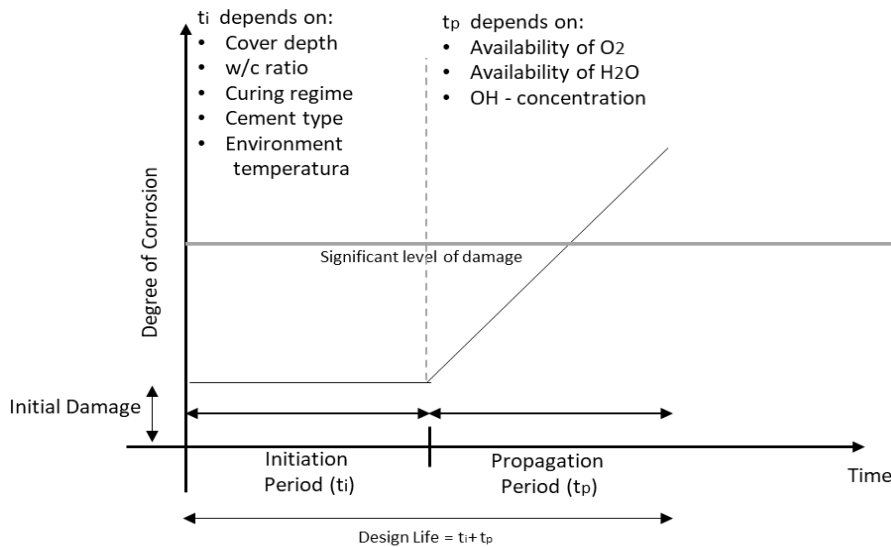
קורוזיה של בטון מזוין (RC) היא אחד ממנגנוני ההידרדרות העיקריים שגורמים להפסדים כלכליים וחברתיים [1], [2]. קצב הקורוזיה תלוי מאוד במיקום המבנה. הגורמים העיקריים להידרדרות במצב ה-RC הם קורוזיה בגלל כלוריד, קורוזיה בגלל סולפאט וקרבוניזציה.

כידוע, אזורי החוף חשופים לתנאים קשים. בישראל, מרבית פעילות הבנייה מרוכזת לאורך רצועת חוף הים התיכון, במרחקים משתנים מהים, שם עשויים מבני RC להיחשף להתקפת כלוריד שתוביל לקורוזיה של פלדת הזיון. טריגר נוסף לקורוזיה ב-RC הוא זרם חשמלי תועה [3]. בעיה זו מקבלת עדיפות גבוהה בערים גדולות. בניית הרכבת הקלה בתל אביב ממחישה במיוחד את בעיית הזרם התועה. זרם תועה יכול להתפשט למרחק של כ-1000 מטרים לצד של קו המסילה¹.

קיימות כיום אסטרטגיות רבות להארכת מחזור החיים של מבנים מבטון מזוין, ובמיוחד מבנים שנחשפו להתקפה ע"י כלוריד. אסטרטגיות אלה כוללות שימוש ב: (א) בטון בעל חדירות נמוכה (ביצועים מעולים); (ב) מעכבי קורוזיה כימיים; (ג) ציפויי מגן על מוטות פלדת זיון (לדוגמה פלדה מצופה אפוקסי או פלדה מגולוונת); (ד) פלדה עמידה בפני קורוזיה (למשל פל"ב"מ); (ה) זיון לא ברזלי (למשל פלסטיק מחוזק בסיבים); (ו) ממברנות או חומרי איטום עמידים במים המיושמים על משטח הבטון החשוף; (ז) הגנה קתודית (מיושמת בזמן הבנייה); (ח) שילובים של האמור לעיל. הדו"ח הנוכחי עוסק בחקר אסטרטגיות א' וב' והשילוב ביניהן.

בעשורים האחרונים מחלקים את חיי השירות בבנייה לשני שלבי קורוזיה: התחלה [5][4] והתפשטות [6] (איור 1: תיאור סכמטי של חיי השירות). מודל זה הוצע ב-1982 ע"י Tuutti ומאז יישומו רווח מאוד. תכנון בטון באיכות ספציפית משמש כהגנה מפני שלב ההתחלה. סוגים שונים של מעכבים משמשים למיתון התפשטות הקורוזיה. הסביבה הבסיסית החזקה של התמיסה המוחדרת לנקבוביות גורמת לפסיבציה של הפלדה המוטמעת בבטון. כל עוד הרכב התמיסה המוחדרת לנקבוביות נשאר קבוע, מוטות הזיון מוגנים. אך כאשר שכבת הפלדה שעברה פסיבציה נהרסת, מתחיל שלב ההתפשטות.

¹ <http://earthingservices.com/stray-current-corrosion-management>



איור 1 : תיאור סכמטי של חיי השירות לפי Tuutty (1982)

יוני כלוריד חודרים לבטון משני מקורות, כמו כלוריד פנימי וכלוריד חיצוני [7]. יוני הכלוריד מגיבים עם C_3A ויוצרים קלציום כלורואלומינט – המלח של Friedel $(Ca_4Al_2(OH)_{12}Cl_2 \cdot 4H_2O)$ [8]. גם סולפאטים מגיבים עם C_3A ויוצרים אטרינגיט, תגובה שמובילה להתרחבות וסדיקה. העלייה בכמות ה- C_3A מעכבת קורוזיה כתוצאה מכלוריד, אך מהווה בעיה חמורה בהקשר של קורוזיה כתוצאה מסולפט [9]. הקרבונציה מובילה לירידה ב-pH וכך לדה-פסיבציה של הפלדה [4]. ישנן שלוש אסטרטגיות להגנה על RC מפני תנאים קשים: (א) הקטנת היחס מים/צמנט [10], (ב) הגנה קתודית על הבטון המזוין, ו-ג) הוספת מעכבים.

הקטנת היחס מים/צמנט משפרת את העמידות בפני קורוזיה הודות לעלייה בהומוגניות הבטון שמקטינה את חדירותו. באותו הזמן, ללא לחיצה/ויברציה טובה של הבטון סביב מוטות הזיון, יחס מים/צמנט נמוך לא יהיה אפקטיבי בגלל הנקבוביות המוגברת והחדירות הגבוהה. לאור זאת, השימוש בפלסטיסייזרים אפקטיביים עשוי להיות מועיל. הגנה קתודית היא לא שיטה אמינה כפי שאולי נדמה [10].

כדי להאריך את חיי השירות של RC, מוסיפים מעכבי קורוזיה אשר פועלים בעיקר על פני השטח של הפלדה. השימוש במעכבים ב-RC אוזכר לראשונה בשנות החמישים של המאה העשרים [11]. מאז, המעכב הנפוץ ביותר הוא קלציום ניטריט [12][13], אך ידוע גם על שימוש בתרכובות אורגניות [14]. לרוע המזל, מעכבי הקורוזיה הוכנסו לשימוש מעט באיחור בענף הבנייה בישראל ולכן השימוש בהם עדיין אינו נפוץ כמו בחלקים אחרים בעולם המערבי. מלבד מעכבים, יש כמה סוגים לא קונבנציונאליים של מוספים שכדאי לחקור כמו אלקיל בנון סולפונט לינארי (LABS) ונגזרותיו [15]. LABS הוא אחד מהחומרים פעילי השטח (חפ"ש) האניוניים הנפוצים ביותר בשוק. LABS משמש לייצור של חומרי ניקוי ביתיים, חומרים לניקוי כללי וכדומה. דווח ש-LABS גורם לפסיבציה של מוטות זיון בנוכחות תמיסת NaCl עם pH נמוך יחסית [15].

חלק מפרויקט המחקר מוקדש לעיצוב מוספים כימיים מבוססי-LABS ותוצרי לוואי המכילים LABS לשיפור עמידותו של בטון שנחשף לתנאי סביבה קשים. לפי המחקר הראשוני שלנו, הוספה של LABS למשחת צמנט טרייה משפרת את עמידותה. ניתן להשוות את היעילות של LABS ליעילותו של פולינפטלין סולפונט (PNS) קונבנציונלי. שני הסופר-פלסטיסייזרים שייכים לאותה קבוצה – חפ"ש סולפוניים אניוניים. השימוש במעכבי קורוזיה כמו LABS הוא אמצעי מבטיח להארכת חיי השירות של RC. מכיוון שחומרים אלה מופקים מפסולת, הם מציעים דרך להפחית את עוצמת האנרגיה ועוצמת פליטת ה-GHG (גזי חממה) של חומרי בטון משום שהם מסיטים את הפסולת

ומורידים את עלויות ניהול הפסולת. ואולם, אך תהליך העיבוד שלהם עלול להיות כרוך בזבוז אנרגיה תרמית וחשמלית נוספת בזמן הפקת חומרי גלם לייצור RC.

2. היקף המחקר

סקירת הספרות מראה שעמידות RC (ללא שינוי יחסי מים/צמנט מירביים שנקבעו בת"י 118 עבור סוג המבנה/החשיפה הנתון) יכולה להשתפר בשתי דרכים: (א) הארכת שלב התחלת הקורוזיה באמצעות כיסוי בטון באיכות גבוהה יותר (חדירות נמוכה), ובפרט, שימוש במוספים על-פלסטיים (פלסטיסייזרים) יעילים לבטון; (ב) הארכת שלב ההתפשטות באמצעות פסיבציה של מוטות הזיון, ובפרט שימוש במעכבים.

הפרויקט חוקר את השפעתה של כל אסטרטגיה ואת השילוב ביניהן, תוך התמקדות ביישומם של מוספים כימיים שונים שיכולים לשמש כמעכבים או כפלסטיסייזרים (או שניהם, דוגמת מוצרים מבוססי LABS המיוצרים בישראל). המטרה היא לפתח את האסטרטגיה הטובה ביותר להגן מקורוזיה על RC שמיוצר באותו יחס מים/צמנט ולהעריך את השיפור בביצועיו הכלכליים והסביבתיים באמצעות הערכת מחזור חיים (LCA).

הפרויקט משלב הכנה של מוספים כימיים, בדיקות עמידות, והערכות עלות ו-LCA מקיפות, להערכת הביצועים הכלכליים והסביבתיים של גישה זו להארכת חיי השירות של בטון ע"י טיפול בקורוזיה. נקבעה תערובת ייחוס של בטון שמבוססת על CEM I 52.5 מתוצרת חברת נשר ביחס מים/צמנט מסוים, וכן אגרגטים מקומיים אופייניים פופולריים. התכונות העיקריות של הבטון שנקבעו בפרויקט הן: משקל מרחבי, נקבוביות, ריאולוגיה (סמיכות סטנדרטית ומדידות מתוחכמות של מאמץ כניעה וצמיגות פלסטית), זמן התקשרות, בדיקות הקשורות לעמידות המבוססות על מדידות מואצות של חדירות הבטון לכלוריד וקצב הקורוזיה של פלדה המוטמעת בבטון.

התועלת הצפויה מפרויקט זה היא פיתוח טכניקה חדשה שתאפשר בדיקה מואצת של עמידות RC לקורוזיה. יישום תוצאות המחקר יאפשר להקטין את הוצאות חיי השירות של הבטון. ניתן יהיה ליישם את תוצאות המחקר על מבני בטון מזוין החשופים לתנאי סביבה קשים, כולל התפשטות של זרם תועה.

3. שיטות ניסיוניות

התוכנית הניסיונית בחלק זה של הפרויקט הייתה לבדוק חמישה מעכבי קורוזיה ולחקור את יכולתם לעכב סדיקה במקביל למוטות הזיון עקב התפתחות חלודה. השתמשנו בשני מעכבי קורוזיה מסחריים ובשלושה מעכבים שיוצרו במעבדה ע"י החוקרים מתוצרי לוואי תעשייתיים. כל הדגמים נחשפו לארבעה משטרי קורוזיה מואצים כולל מתחים קבועים שונים. נבדקה ההתנגדות החשמלית של הדגמים, כולל דגם הייחוס. נחקרה גם השפעת מעכבי הקורוזיה על התכונות המכאניות של דגמי המלט בהתאם התקנים הבאים: ASTM C1437-15, [16]; ASTM C185-15a, [17]; ו-ASTM C109 / C109M, [18]. לבסוף, נבחנה השפעת הקורוזיה על RC ע"י בדיקת חוזק ההדבקות בין מוט הזיון למלט הייחוס בכמה נקודות זמן.

3.1 חומרים

במחקר זה השתמשנו בבטון בעל אגרגטים דקים (מלט), צמנט פורטלנד CEM I 52.5 N, בחול קוורץ טבעי עם גודל גרגיר מירבי של 2.36 מ"מ בספיגת מים של 0.5% ומשקל סגולי של 2.60 גרם לסמ"ק.

טבלה 1 מציגה את הרכבו המינרלי והכימי של הצמנט. בכל הדגמים נעשה שימוש במוטות זיון חלקים בקוטר 10 מ"מ. חוזק הכניעה של המוטות היה 240 מגפ"ס והם עמדו בת"י 4466, חלק 2.

טבלה 2 מציגה את יחסי הכמויות בתערובות ששימשו במחקר.

טבלה 1: הרכבי המינרלים והכימיים בצמנט

הרכב כימי	
62.16	CaO
19.02	SiO ₂
5.42	Al ₂ O ₃
3.82	Fe ₂ O ₃
1.31	MgO
0.53	TiO ₂
0.37	K ₂ O
0.22	Na ₂ O
0.4	P ₂ O ₅
0.05	Mn ₂ O ₃
2.48	SO ₃
0.76	Insoluble residue (IR)
2.8	Free lime (FL)
2.93	Loss on ignition (LOI) total

הרכב מינרלי	
61.02	Alite
12.95	Belite
5.86	C ₃ A cubic
12.42	C ₄ AF
1.87	Bassanite
0.28	Anhydrite
1.83	Portlandite
2.25	Calcite
0.97	Arcanite
0.55	Aphthitalite

טבלה 2: יחסי הכמויות בתערובות ותכונותיהן

יחסי הכמויות בתערובות המלט ותכונותיהן							
שולחן זרימה [ס"מ]	תכולת אוויר [%]	משקל מרחבי [ק"ג/מ"ק]	נפח [ל']	מסה [ג']	צפיפות	רכיבי המלט	סדרה
	5.2	2165	1.87	4872	2.6	חול	ייחוס
			0.52	1624	3.1	צמנט	
			0.89	893	1.0	מים	
17.2	1.9	2261	1.87	4871	2.6	חול	MCI-2005 0.6/1000 Liquids
			0.52	1624	3.1	צמנט	
			0.89	892	1.0	מים	
			0.002	2.49	1.2	מוסף	
16.4	7.9	2128	1.87	4856	2.6	חול	K ₂ SIF ₆ 1% Cement
			0.52	1624	3.1	צמנט	
			0.89	893	1.0	מים	
			--	16	--	מוסף	
17.3	9.1	2085	1.87	4840	2.6	חול	K ₂ SIF ₆ 1%Cem ent + Ca(OH) ₂ 1% Cement
			0.52	1624	3.1	צמנט	
			0.89	893	1.0	מים	
			--	32	--	מוסף	
16.6	.17	2146	1.87	4826	2.6	חול	CNI 10/1000 Liquids
			0.52	1624	3.1	צמנט	
			0.89	852	1.0	מים	
			0.04	46	1.3	מוסף	
19.9	13	1960	1.87	4826	2.6	חול	LABS 1% Cement
			0.52	1624	3.1	צמנט	
			0.89	852	1.0	מים	
			--	16	2.7	מוסף	

מעכבים הם מוספים לא מתכתיים שמוספים לבטון בכמויות קטנות ויש להם השפעה משמעותית על קצב הקורוזיה של הפלדה. בעבודה זו התמקדנו בשני מעכבים מסחריים הנמצאים בשימוש נרחב בתעשיית הבנייה, ובשלושה מעכבים שסונתזו במעבדה שלנו. הראשון הוא מעכב קורוזיה נודד מסחרי המבוסס על אמין-קרבוקסילט (MCI-2005). המעכב השני מבוסס על קלציום ניטריט (CNI) המסייע בהגנה אנודית הודות להיווצרות שכבת פסיבציה (Fe_2O_3) שמקורה בתגובה אלקטרוכימית בין NO_2 ל- Fe^{2+} . מעכב ה-CNI מכיל לפחות 30% קלציום ניטריט במונחי מסה. שני המעכבים עומדים בדרישות ASTM C1582.

המעכב המסונתז הראשון היה אלקיל בנזן סולפונט (LABS), אשר נבחר בהתבסס על דיווחים קודמים על פעילות חיובית נגד קורוזיה במתכות [19], [20]. המעכבים הסינתטיים השני והשלישי היו אשלגן פלואורוסיליקטים מבוססי מוצק, K_2SiF_6 טהור ו- K_2SiF_6 בתוספת $Ca(OH)_2$. פלואורוסיליקטים הם נגזרות של חומצה פלואורוסיליצית – פסולת רעילה מתעשיית דשני הפוספט – מוצר המזיק לסביבה שערכו הכלכלי שלילי. בזמן ייצור דשנים פלואורוסיליקטיים, נוצרים פלואורוסיליקטים מבוססי-מוצק שגורמים לזיהום סביבתי [21]. לאור האמור לעיל, מן הראוי לבדוק אפשרות של מחזור פסולת זו והפיכתה למוצר בעל ערך, כמו מעכבי קורוזיה בבטון.

קיימות גם עדויות לכך שפלואור משפר את חוזק הטיח ויוצר שכבה עמידה לשחיקה [22], [23]. חוזק הטיח ידוע בעיקר בגלל התגובה בין נתרן הידרוקסיד, אחד מתוצרי הידרציה של צמנט במערכות צמנט פורטלנד, כשפחמן דו-חמצני מהאוויר חודר לתוך החומר הצמנטי (במה שמכונה תגובת קרבונציה). לכן, הרעיון היה לחקור את השפעת המוסף שעבר מודיפיקציה מבוססת K_2SiF_6 כמעכב קורוזיה משופר אפשרי בנוכחות קלציום קרבונט ($CaCO_3$), אשר נוצר בשכבות החיצוניות של הבטון כתוצאה מקרבונציה. אנו מצפים לתגובה הבאה, אשר יכולה להתרחש בבטון [22]:



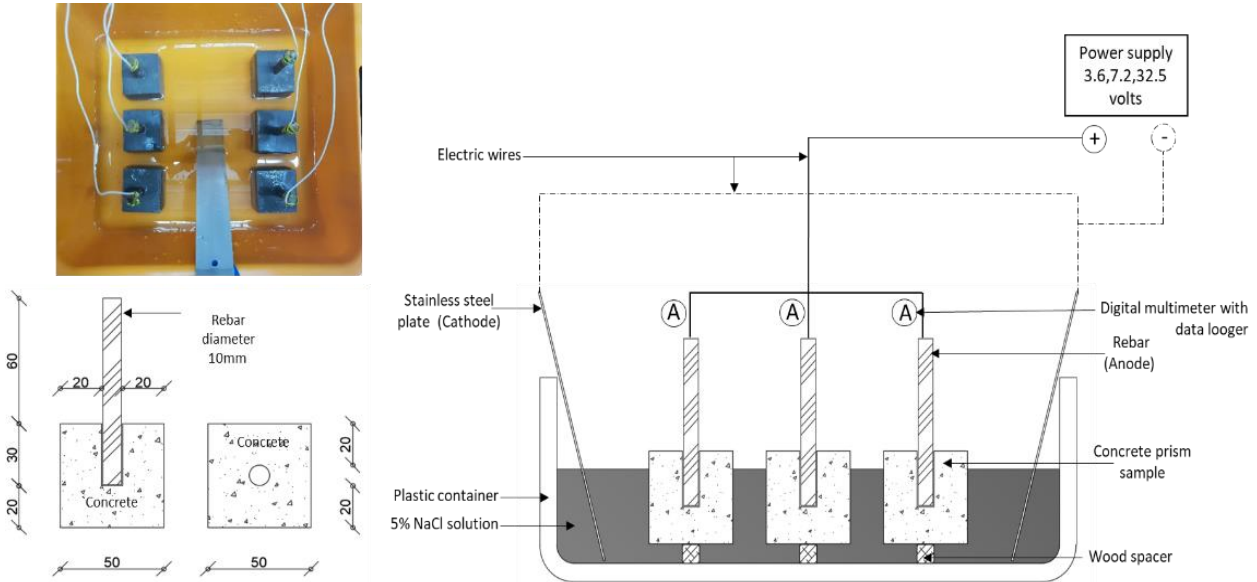
בעבודה זו, השתמשנו ב- $Ca(OH)_2$, במקום ב- $CaCO_3$ כדי לדמות את תנאי הסביבה הטבעיים ולהגביר את הסבירות להתרחשות התגובה המוזכרת לעיל.

3.2 תכנון, אשפורה ובדיקה של דגמים בתנאי לחיצה

איור 1 מציג את המידות הגיאומטריות של הדגמים. כדי לבדוק את השפעת המעכב על חוזק הבטון, נבדקו שלוש קוביות של 10 מ"מ בכל סדרה. הדגמים עברו אשפורה במעבדה בלחות יחסית של 100% ובטמפרטורה של $23 \pm 2^\circ C$. עד למועד חיבורן למתח חשמלי, שהוטבלו כל הדגמים במים כדי לצמצם את האינטראקציה שלהן עם אוויר כדי למנוע חמצון הפלדה והתפתחות חלודה. הדגמים נבדקו לחוזק לחיצה בתנאי רוויה במים עם פני שטח יבשים.

3.3 בדיקת קורוזיה מואצת

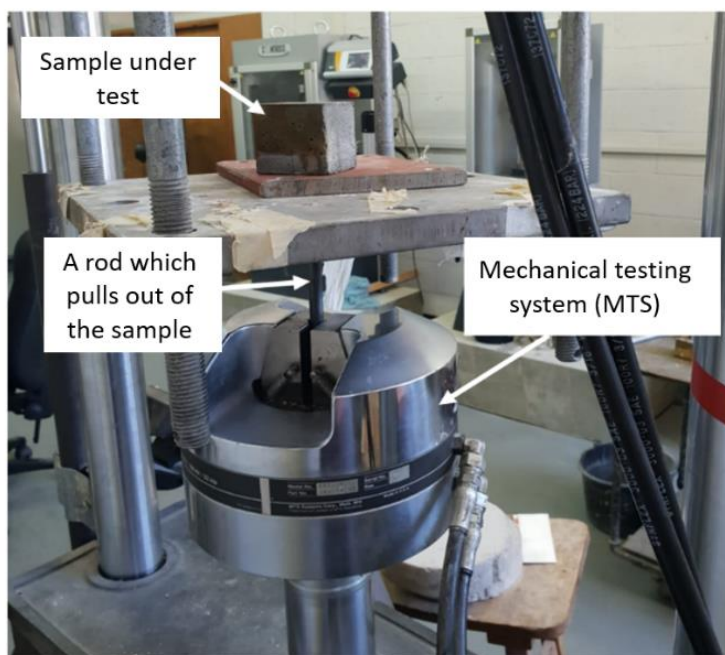
כדי לדמות את הקורוזיה הטבעית שמתרחשת במבנה בטון מזוין, נחשפו 12 דגמים עשויים ממלט עם מוטות זיון מוטמעים לסביבה קורוזיבית במעבדה. מערכת האצת הקורוזיה כללה שש דגמי בטון מזוין שהוצבו על ספייסר מעץ; כל הדגמים הונחו במכל פלסטיק מבודד גדול (איור 2) לתוכו נמזגה תמיסת 5% NaCl ($pH=6.2-7.1$) עד 1 ס"מ מתחת לקו העליון של המדגם. מוטות הזיון המזדקרים מתוך קוביות הבטון שימשו כאנודה שחברה להדק חיובי. לוחית מפלדת אלחלד (קתודה) חברה להדק השלילי של ספק כוח זרם ישר (DC). התהליך הותחל ע"י יישום מתח קבוע על המערכת, אשר נקבע ל-1.2, 3.6, 7.2 ו-32.5 וולט. הזרם החשמלי שעבר דרך הדגמים נמדד כל דקה והערכים נשמרו במערכת רישום הנתונים. הניסוי הסתיים כשעובי הסדק הגיע ל-0.10-0.15 מ"מ מיני. ערכים אלה מתאימים לגבול העליון שנקבע ב-ACI 224 עבור מבנים שנחשפו להתקפת כלוריד [24]. איור 2 מציג את המערכת הניסיונית, אשר מתוארת בהרחבה ב-[25].



איור 2 : מערכת להאצת קורוזיה (כל המידות במ"מ) : צילום המערכת מאחד הניסויים ושרטוט המערכת הניסויית [25]

3.4 בדיקת חוזק הדבקות

השפעת הקורוזיה על תפקוד הבטון המזוין נבחנה ע"י בדיקת חוזק ההדבקות בין מוט הזיון למלט הייחוס בכמה נקודות זמן, אשר נקבעו בבדיקת קורוזיה מואצת - היא תידון ביתר הרחבה בהמשך. 18 דגמים נבדקו בניסוי זה. בכל נקודת זמן הוצאו מהמערכת שלושה דגמים, ובוצעה בהן בדיקת חוזק הדבקות כמתואר באיור 3. באיור מוצג משטח (עליו מוקם הדגם) אשר מתרומם כשהמוט של אותו דגם תפוס בהתקן מערכת הבדיקה המכאנית (MTS). המכשיר מודד את הכוח (kN) בתנאי העמסה בקצב תזוזה קבוע של 0.1 מ"מ/שני. עד לתחילת הניסוי, הדגמים נשמרו כשהן שקועות במים כדי לצמצם ככל האפשר גישה של חמצן חופשי במערכת, ולוודא שתהליך הקורוזיה לא יתחיל לפני תחילת הניסוי. מוטות הזיון לא עברו כל טיפול מקדים, אך לא נצפתה על פני השטח שלהם קורוזיה משמעותית לפני תחילת הניסוי.

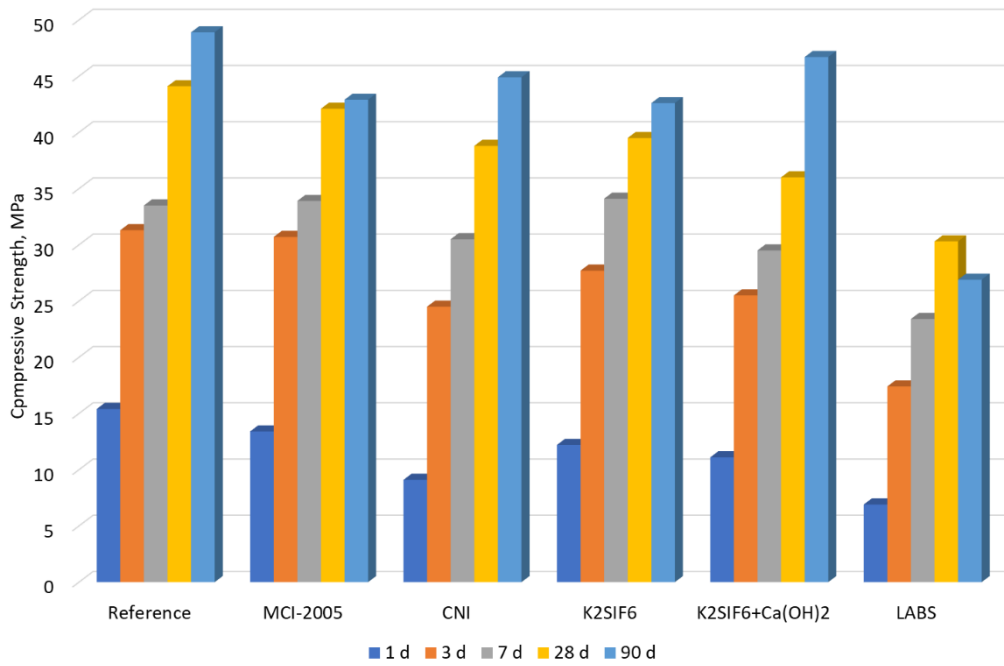


איור 3 : המערכת הניסיונית לבדיקת חוזק ההדבקות

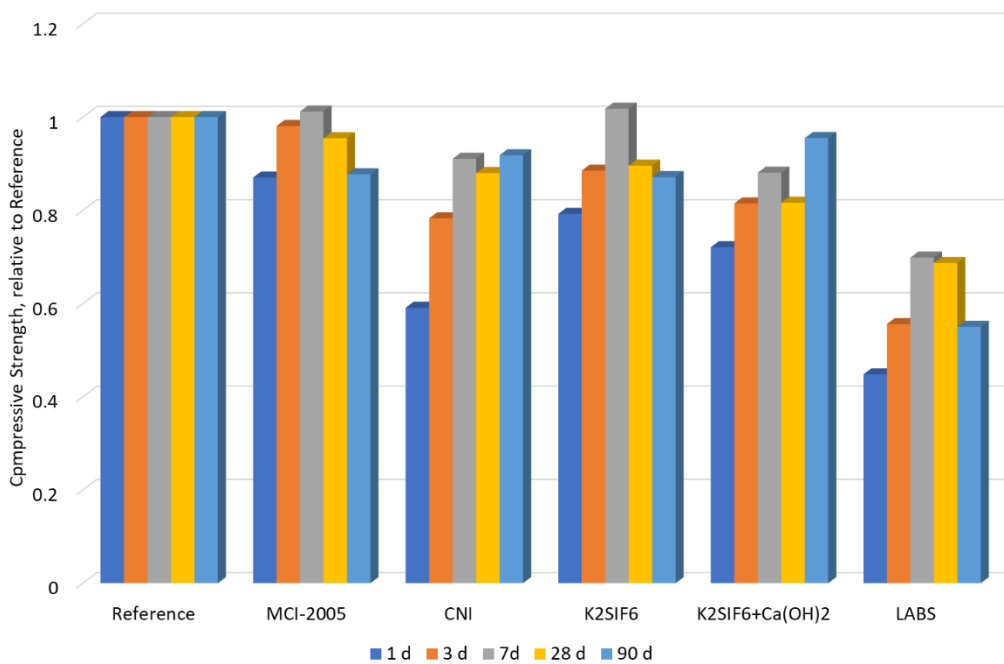
4 תוצאות ודיון

4.1 התפתחות חוזק לחיצה

תוצאות בדיקות החוזק, הן בערכים מוחלטים והן בערכים מנורמלים, מוצגות באיור 4 ובאיור 5, בהתאמה. ניתן לראות שכל מעכבי הקורוזיה פגעו בחוזק הלחיצה של המלט, אך הפגיעה ברוב המקרים (למעט LABS) הייתה קלה מאוד. עקב הוספת כל סוגי המעכבים שנבדקו במחקר זה, למעט MCI, הייתה עלייה בתכולת האוויר בדגמי המלט (ר' טבלה 2). יתרה מכך, נצפו ירידות של 20% בחוזק הראשוני (לאחר 24 שעות) ושל כ-20%-5 בחוזק הסופי (ביום ה-90) עבור כל סוגי המעכבים שנבדקו. לאחר שנמדדה כמות גבוהה מאוד של אוויר בדגם (כפי שנמדדה עבור מעכב ה-LABS), נצפתה ירידה משמעותית בחוזק המלט בכל הגילאים (כ-45%). תוצאות דומות דווחו גם ב-[12].



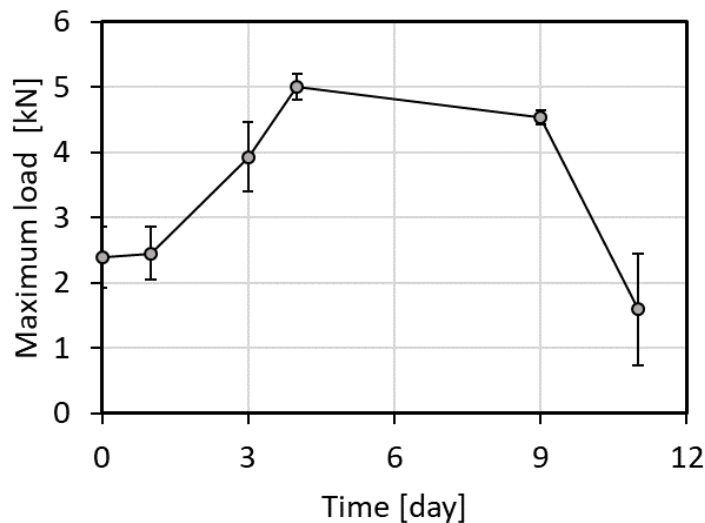
איור 4 : חוזק לחיצה ממוצע כנגד זמן אשפרה של דגמים שמכילים מעכבי קורוזיה שונים.



איור 5 : חוזק לחיצה מנורמל כנגד זמן אשפרה של דגמים של מעכבי קורוזיה שונים.

4.2 השפעת הקורוזיה על חוזק ההדבקות

ביום הראשון של הניסוי, שלושה דגמים נבדקו חזותית ולא התגלו סדקים. העומס הממוצע המתאים לחוזק ההדבקות שנמדד בדגמים היה 2.39 ± 0.47 kN. כעבור 24 שעות בנוכחות 3.6 וולט במערכת תהליך הקורוזיה המואץ, העומס גדל ל- 2.45 ± 0.41 kN וביום השלישי לניסוי, הערך המשיך לעלות ל- 3.93 ± 0.53 kN. ביום הרביעי העומס הגיע ל- 5.00 ± 0.20 kN, וביום התשיעי לניסוי התגלה סדק ברוחב 0.05 מ"מ שלוה בירידה בעומס המרבי שמתאים לחוזק הדבקות של 4.54 ± 0.11 kN. לאחר מכן, ביום ה-11 נצפה סדק ברוחב 0.10 מ"מ והעומס המרבי צנח דרמטית ל- 1.59 ± 0.86 kN (איור 6). מתוך תוצאות אלה אפשר להסיק שלפני היווצרות הסדק, תוצרי הקורוזיה שיפרו את חוזק ההדבקות.



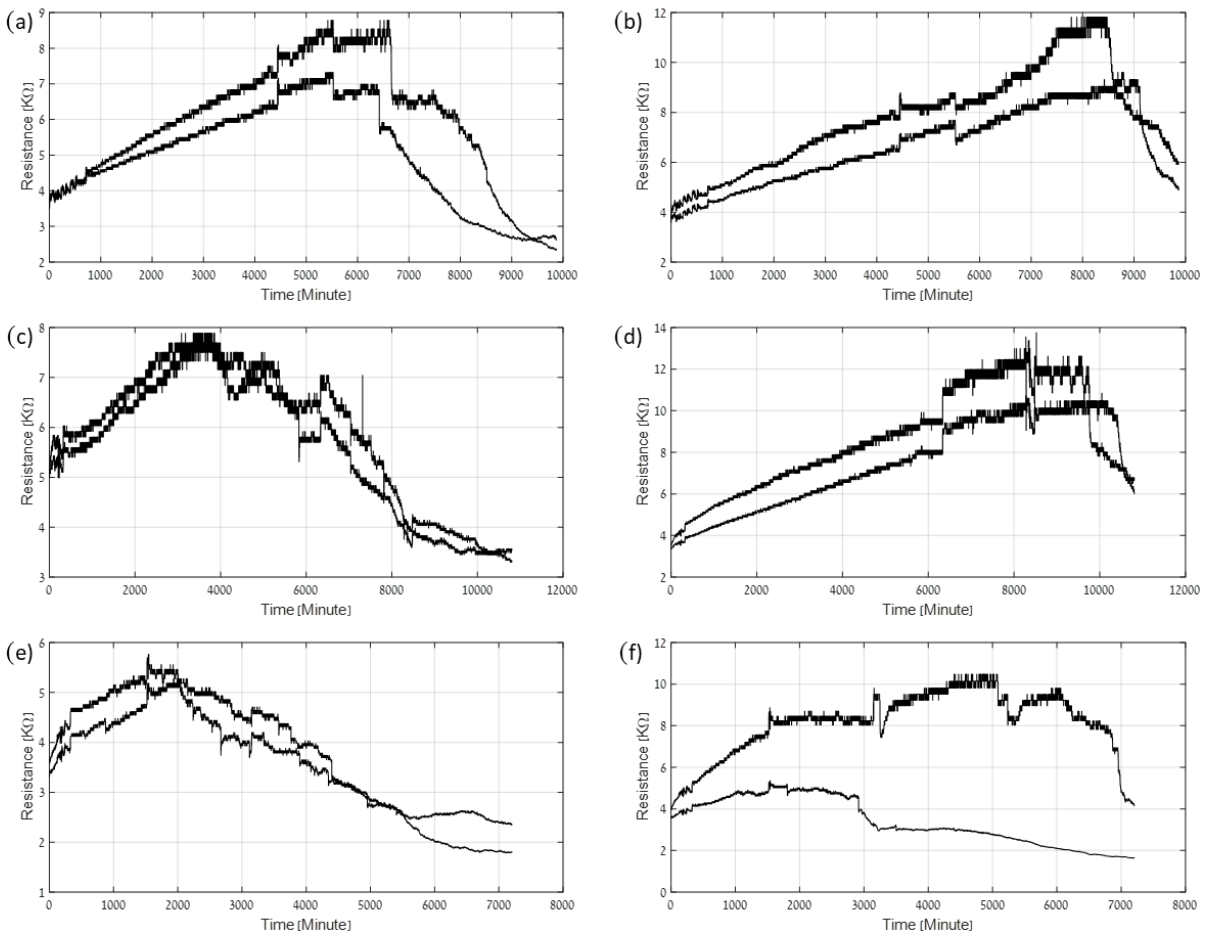
איור 6 : עומס מרבי ממוצע שמתאים לחוזק הדבקות מלט הייחוס כנגד זמן (סטיית התקן מיוצגת ע"י הקווים האנכיים).

4.3 קינטיקה של קורוזיה

איור 7 ואיור 8 מציגים, בהתאמה, את ההתנגדות החשמלית (במרווחים של 1 דקה) שחושבה, לפי חוק אום, עבור כל אחד מהדגמים שנבדקו במתח קבוע של 3.6 וולט ו-7.2 וולט. כל הדגמים, ללא קשר למתח החשמלי, הציגו את אותה ההתנהגות, שניתן לתארה באמצעות חמשת השלבים הרציפים הבאים: (א) התחלת קורוזיה; (ב) הצטברות תוצרי קורוזיה; (ג) דיכוי הקורוזיה; (ד) התפתחות סדקים; (ה) כשל הדבקות. השלבים מפורטים להלן:

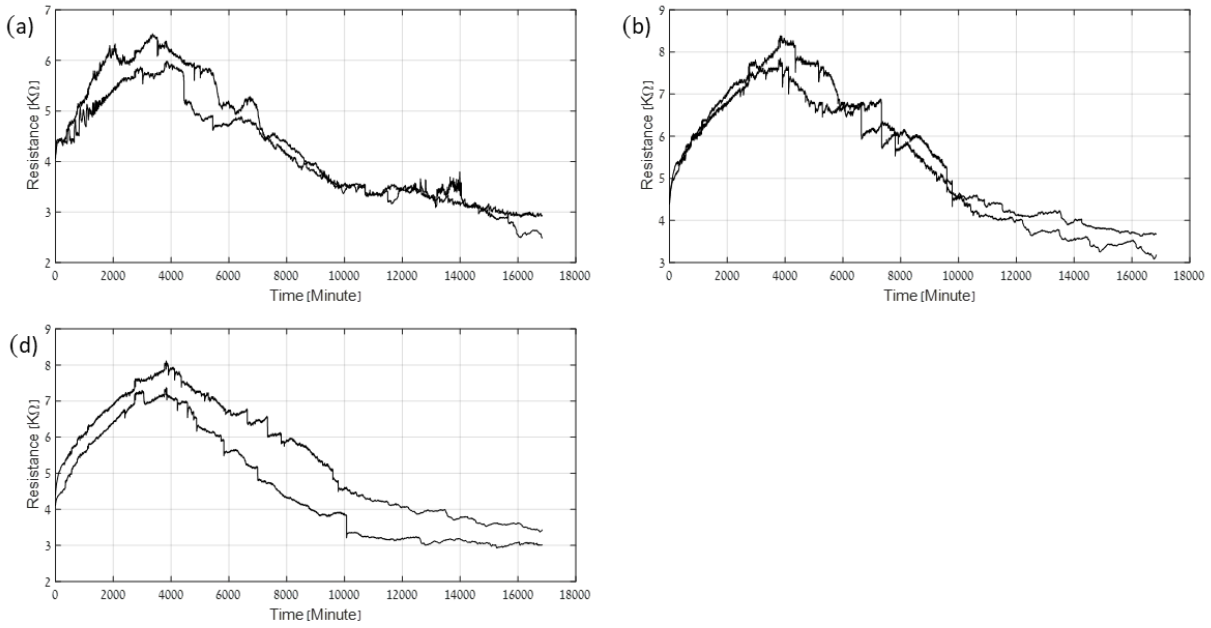
א. הקורוזיה צפויה להתחיל מיד אחרי חיבור הדגמים למתח חשמלי קבוע. בדגמים שלנו המתח החשמלי הטבעי הנמדד היה שווה ל- 0.17 ± 0.09 וולט. ידוע שהמתח המרבי שיכול להתרחש באופן טבעי בבטון מזוין הוא 1.2 וולט [26]. המתחים החשמליים אליהם נחשפו הדגמים במחקר זה נועדו לכסות את טווחי המתח החשמלי המאפיינים סביבות אגרסיביות כמו זרם תועה טיפוסי לסביבת מסילות רכבת חשמליות. אולם, כדי להאיץ את הקורוזיה, יושמו מתחים גבוהים יותר (3.6, 7.2 ו-32.5 וולט). אנו מניחים שמשך שלב "התחלת הקורוזיה" תלוי במתח שמישם. המתח שיושם במחקר הנוכחי היה גבוה בהרבה מזה שצפוי במקרה של זרם תועה *in situ*.

- למרות ששלב התחלת הקורוזיה לא נצפה ישירות באיורים 5-6, שלב זה צפוי להיות מובחן יותר במתחים נמוכים יותר המאפיינים תנאי זרם תועה. יש לחקור בנפרד את שלב התחלת הקורוזיה במסגרת מחקר המשך.
- ב. מתחילת הבדיקות, ההתנגדות החשמלית של הבטון עלתה. אפשר לכוונת של זה, שלב מילוי הקורוזיה. בנוסף לעלייה בהתנגדות החשמלית, הוא מתאפיין בשיפור בחוזק ההדבקות בין מוטות הזיון והבטון. התנהגות דומה הודגמה במחקרים קודמים [27], [28]. ניתן להסביר את התופעה בהתרחבות תוצרי הקורוזיה הממלאים את המרווח שבין מוט הזיון למלט. מרווח של 10-30 מיקרון נצפה בבירור ע"י חוקרים אחרים [29], [30].
- ג. בשלב השלישי, מגיעה ההתנגדות החשמלית לערך קבוע, ל-plateau; הדבר מצביע על כך שתהליך הקורוזיה נעצר או לפחות הואט. אנו מניחים שהלחץ שהפעילו תוצרי הקורוזיה על הבטון הסובב הגיע לערך מספיק כדי ליצור סדק במקביל למוטות הזיון.
- ד. השלב הרביעי מאופיין בהתרחבות הסדק עד לרגע שבו תוצרי קורוזיה יוצאים באופן חופשי מתוך הסדק ונראים בבירור על פני שטח הדגם. הירידה החדה בהתנגדות החשמלית נצפית בשלב זה.
- ה. לבסוף, מוט הזיון והבטון מתנתקים זה מזה ומתרחש כשל הדבקות בתוצרי הקורוזיה. ההתנגדות החשמלית שצונחת לערך מינימלי מתאימה לחשיפה של מוטות הזיון לאוויר, שעשויה להעיד על כשל מבני. התנהגות דומה הודגמה במחקרים קודמים [28], [31].



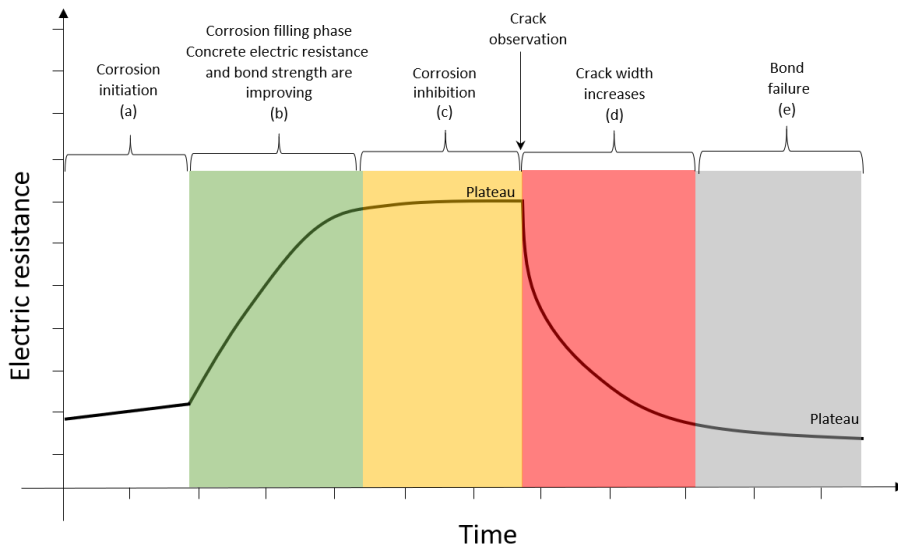
איור 7: התפתחות התנגדות חשמלית תלוית-זמן תחת השפעת מעכבי קורוזיה שונים ומתח קבוע של 3.6 וולט:

(א) בקרה; (ב) MCI-2005; (ג) LABS; (ד) K_2SiF_6 ; (ה) $K_2SiF_6 + Ca(OH)_2$; (ו) CNI



איור 8 : התפתחות התנגדות חשמלית תלוית-זמן תחת השפעת מעכבי קורוזיה שונים ומתח קבוע של 7.2 וולט :
 (א) בקרה ; (ב) MCI-2005 ; (ג) K_2SIF_6 .

איור 9 מדגים את השלבים השונים בקינטיקה של הקורוזיה בדגם מייצג, כדלקמן : האזור הירוק מייצג את שלב העלייה ההדרגתית בהתנגדות החשמלית של הבטון, כאשר חוזק ההדבקות נשלט ע"י תהליך מילוי הקורוזיה ; האזור הצהוב מייצג את דיכוי הקורוזיה ; האזור האדום אופייני להתרחבות הסדק, והאזור האפור מייצג את הכשל המבני.



איור 9 : שלבי קינטיקה של קורוזיה המייצגים את השינוי בהתנגדות החשמלית של דגמי בטון מזוין בסביבה של קורוזיה מואצת.

אנו משתמשים בייצוג מעט שונה של הקינטיקה של הקורוזיה מזה של מודלים קיימים. לדוגמה, הספר המפורסם של Tuutty [32] שפורסם ב-1982 מתאר את הדגדגציה של אלמנטי בטון בשני שלבים בלבד: התחלה והתפשטות. גורס Tuutty ששלב ההתחלה תלוי בעובי הכיסוי, יחס מים/צמנט, משטר האשפרה, סוג הצמנט, וטמפרטורת הסביבה. השלב השני (התפשטות) תלוי בריכוז ה- OH^- ובזמינות ה- O_2 וה- H_2O (איור 1: תיאור סכמטי של חיי השירות). בניגוד למודל של Tuutty, המודל שלנו מתייחס לפוטנציאל החשמלי ולהתנגדות החשמלית, שלהם חשיבות רבה בהתפתחות קורוזיה בבטון מזוין.

4.4 השפעת מעכבי קורוזיה

עבור כל סוג מעכב, נבדקו שני דגמים. התרשימים שמראים את התפתחות ההתנגדות החשמלית של דגמים אלה לאורך זמן ואת זמן הסדיקה שלהן מוצגים באיור 7, איור 8, איור 10, ואיור 11 וכן בטבלה 3, טבלה 4 וטבלה 5, בהתאמה. סדרת הבדיקות הראשונה בוצעה תחת מתח של 3.6 וולט. מעכב קורוזיה נודד (MCI-2005), המבוסס על אמין-קרבוקסילט, האריך את זמן היווצרות הסדקים ב-35% בעוד שחוזק הלחיצה (ר' איור 5) ירד ב-4% בלבד. מעכב ה-LABS האיץ היווצרות סדקים בכ-30%, השפעה שאפשר להסבירה ע"י ירידה של כ-31% בחוזק (ר' איור 5) ועלייה של 13% בלכידת אוויר (ר' טבלה 2). כתוצאה, הבטון נעשה חזיר יותר, דבר שהקל על חדירת כלורידים שהאיצה את הקורוזיה (ר' גרדיאנט גדול יותר וזמן סדיקה קצר יותר באיור 7 ג) במקטע הליניארי שנתחם באזור הירוק, כמוצג באיור 9). איור 7 ג) גם מראה שההתנגדות החשמלית הראשונית של הדגמים הייתה גבוהה מ-5 kΩ בעוד שבתערובות עם מעכבים אחרים, ההתנגדות החשמלית הראשונית לא עלתה על 4 kΩ. יתכן שככל שמספר הנקבוביות בדגמים גדול יותר, כלומר ככל שהמדגם מבודד יותר מבחינה חשמלית, כך ההתנגדות החשמלית גבוהה יותר [33].

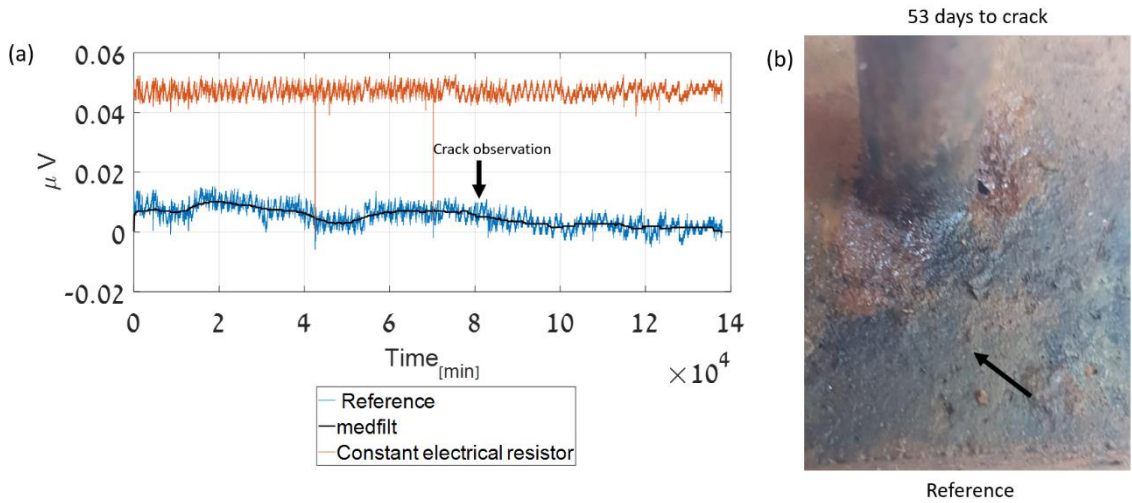
הוספת המעכב מבוסס ה- K_2SiF_6 לתערובת האריכה את זמן היווצרות הסדק בכ-55% בדגמים תחת מתח של 3.6 וולט (טבלה 4). תוצאה זו נובעת מתגובה משולבת של הידרציה וקרבונציה של הצמנט שתוצרי הלוואי שלה הם תהליכי הידרציה וקרבונציה של $\text{Ca}(\text{OH})_2$. בעקבות תגובה זו, נוצרים עוד אזורים בלתי חדירים ליונים, דבר שמגביר את תהליך היווצרות הקורוזיה. כאשר ערבבנו מבעוד מועד את התוסף (K_2SiF_6) עם $\text{Ca}(\text{OH})_2$, נוטרלה התופעה הנ"ל, חוזק הבטון ירד (איור 4), תכולת האוויר עלתה (טבלה 2) ובסופו של דבר הייתה ירידה דרסטית בסדיקת הבטון תחת מתח של 3.6 וולט (טבלה 5).

CNI הוא מעכב מבוסס ניטרט. ידוע שניטריטים אינם מעכבים ביעילות את נוכחותם של יוני כלוריד וסולפט [33] [34] [35]. איור 7 (ו) מראה שתערובות שטופלו ב-CNI התנהגו אחרת משאר התערובות. אף ששני הדגמים הדגימו ירידה של כ-12% בחוזק הבטון ותכולת אוויר גבוהה יותר, אחת מהן התנהגה כמצופה ונסדקה במהירות (לאחר 2917 דקות), בעוד שהשנייה התנהגה בצורה דומה יותר לתערובת הביקורת ונסדקה רק לאחר 6956 דקות. תוצאות אלה מאמתות את הרקע שהוזכר לעיל.

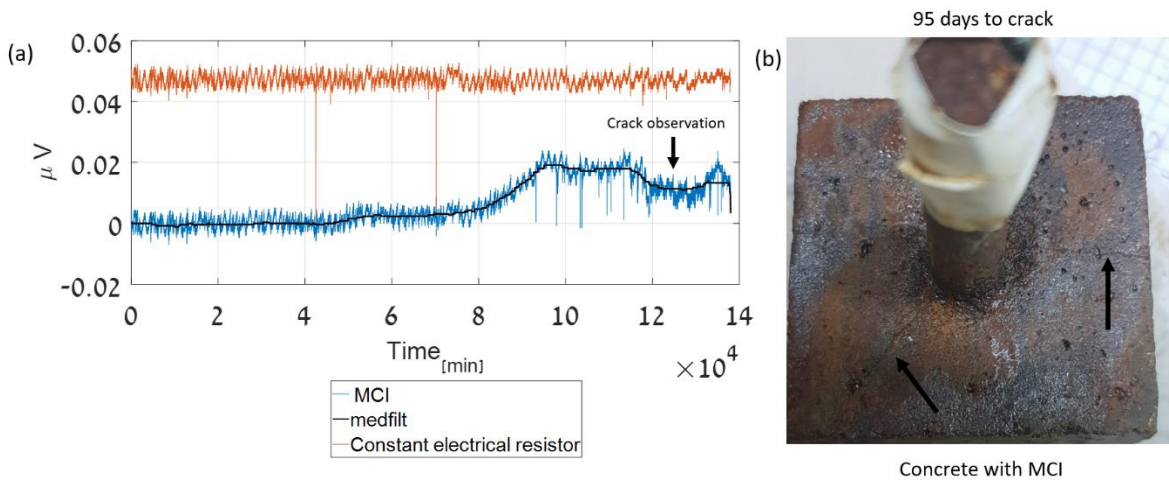
בסדרה השנייה הדגמים שהראו התנגדות מוגברת לפוטנציאל חשמלי נמוך מ-3.6 וולט (K_2SiF_6 , MCI-2005) נבדקו מאוחר יותר תחת פוטנציאל חשמלי גבוה יותר של 7.2 וולט (איור 8; טבלה 5). התנהגות קצב הסדיקה בכל הדגמים הייתה זהה ללא שינויים משמעותיים, למעט ירידה קטנה בחוזק ועלייה בתכולת האוויר.

לאחר העלאת המתח החשמלי ל-32.5 וולט, הדגמים נסדקו במהירות רבה – תוך 330 דקות בלבד, ותוך 4080 דקות מוטות הזיון התפרקו ונעלמו לחלוטין (הנתונים אינם מוצגים). לכן, נמצא שמתח חשמלי כה גבוה אינו מתאים לבדיקת מעכבי קורוזיה.

בחינת דגמים שנחשפו למתח קבוע של 1.2 וולט כללה את דגם הייחוס (איור 10) ואת מעכב הקורוזיה MCI (איור 11). התוצאות הצביעו על מגמה דומה לזו שהוצגה בתרשים הסכמטי שבאיור 9. המתח החשמלי שנמדד בכל דגם היה קרוב מאוד לאפס ואפילו שווה לאפס בחלק מהמדידות. אי לכך לא ניתן היה להמיר את הפוטנציאל החשמלי להתנגדות חשמלית וניתוח התוצאות היה מבוסס על שינוי במתח החשמלי ועל בחינה חזותית עד לאיתור הסדק.



איור 10 : התפתחות התנגדות חשמלית תלוית זמן וצילום הסדק הראשון במלט הבקרה שנבדק במתח קבוע של 1.2 וולט.



איור 11 : התפתחות התנגדות חשמלית תלוית זמן וצילום הסדק הראשון במלט עם מעכב MCI-2005 שנבדק במתח קבוע של 1.2 וולט.

טבלה 3 : זמן סדיקה בדגמי מלט שנבדקו תחת מתח של 1.2 וולט

MCI-2005	בקרה	
011420	77670	דגם 1 [דק']
136800	78300	דגם 2 [דק']
125500	77985	ממוצע [דק']
160	100	אחוז [%]

טבלה 4 : זמן סדיקה בדגמי מלט שנבדקו תחת מתח של 3.6 וולט

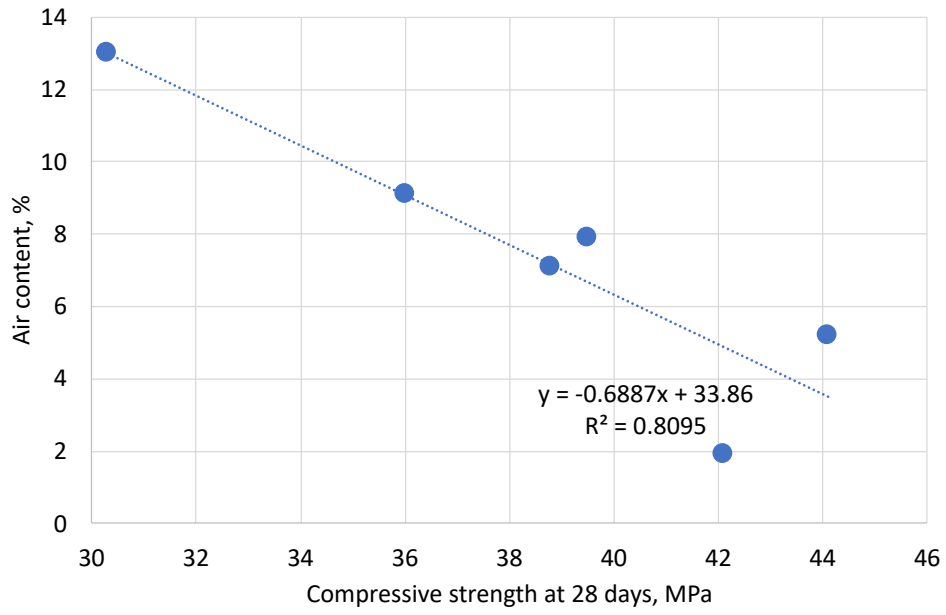
CNI	$K_2SiF_6 + Ca(OH)_2$	K_2SiF_6	LABS	MCI-2005	בקרה	
2917	2000	9755	3900	8511	6423	דגם 1 [דק']
6956	2040	10430	5369	9114	6646	דגם 2 [דק']
4936	2020	10092	4634	8812	6534	ממוצע [דק']
76	31	155	17	135	100	אחוז [%]

טבלה 5 : זמן סדיקה בדגמי מלט שנבדקו תחת מתח של 7.2 וולט

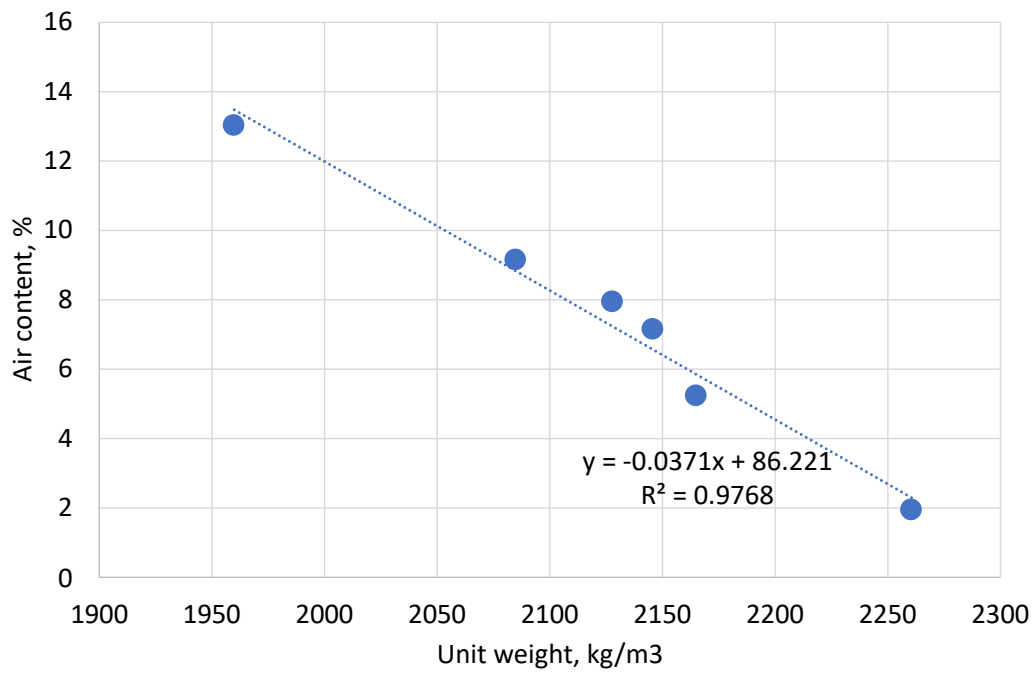
K_2SiF_6	MCI-2005	בקרה	
4497	3546	435	דגם 1 [דק']
4335	4377	3903	דגם 2 גמה [דק']
4416	3961	4128	ממוצע [דק']
107	96	100	אחוז [%]

4.5 השפעת מעכבים על כליאת אוויר ונקבוביות

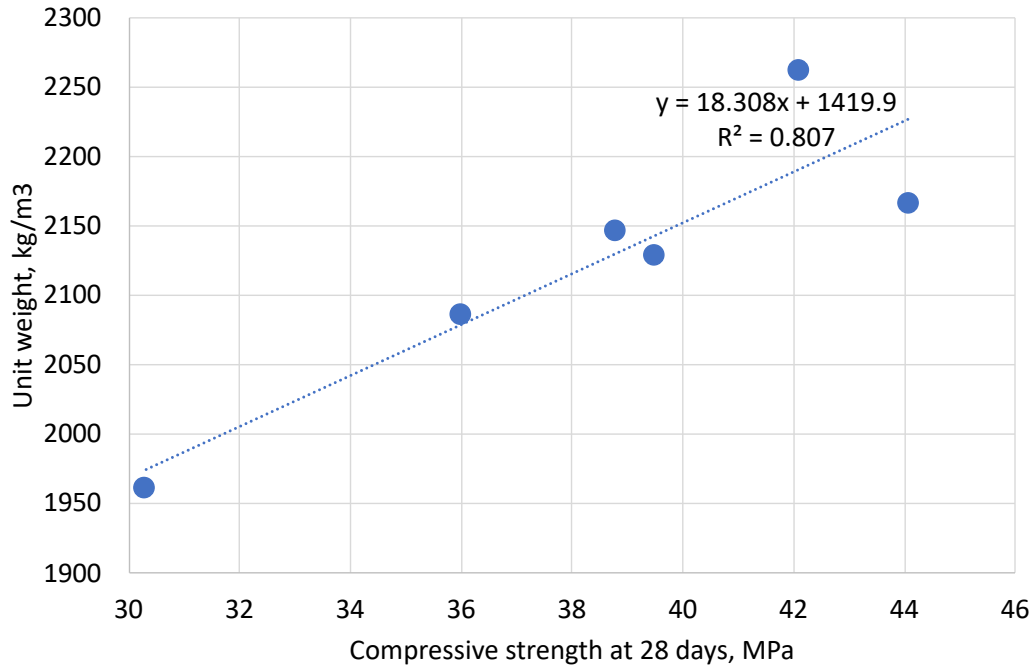
השפעת כליאת האוויר על חוזק הלחיצה ועל משקל מרחבי מוצגת באיור 12 ובאיור 13, בהתאמה. חוזק הלחיצה קשור למשקל מרחבי (איור 14). ניתן לראות שהעלייה בכליאת האוויר מובילה לירידה בחוזק. כבר לפני זמן רב, ציינו חוקרים תלות זו [36]. למרות זאת, שהערכים שהתקבלו במחקר זה גבוהים מהערכים הידועים בבטון קונבנציונאלי. ואולם, ברצוננו להזכיר שהמחקר הנוכחי מתמקד בחקר סוגי מלט שבהם תכולת האוויר ידועה כגבוהה יותר יחסית לתערובות בטון רגילות המכילות אגרגטים גסים [37].
ראוי לציין שמשקל מרחבי, תכולת אוויר, וחוזק לחיצה הם שלושה ניסויים בלתי תלויים שיש ביניהם קורלציה טובה ($R^2 = 0.97$ ו- 0.80).



איור 12 : השפעת תכולת אוויר על חוזק לחיצה ב-28 יום.

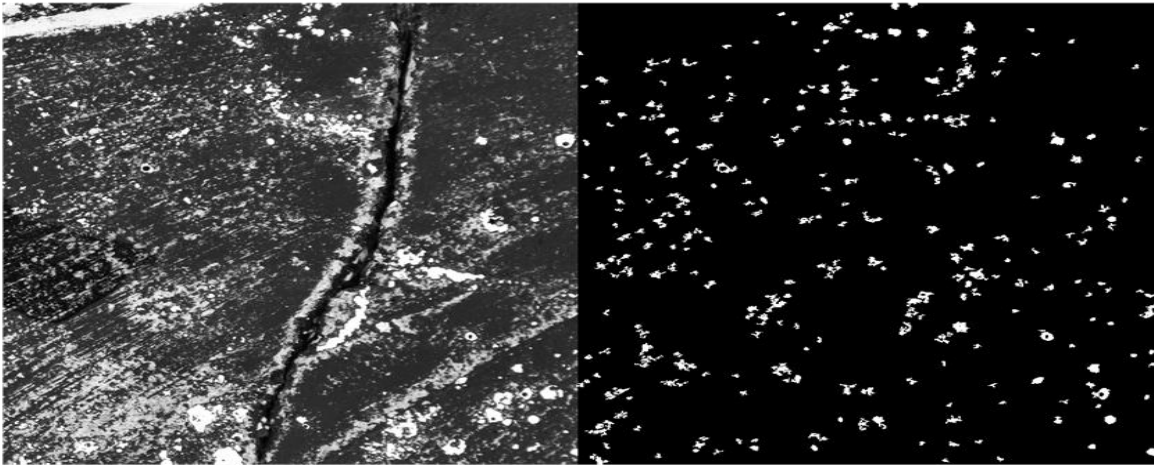
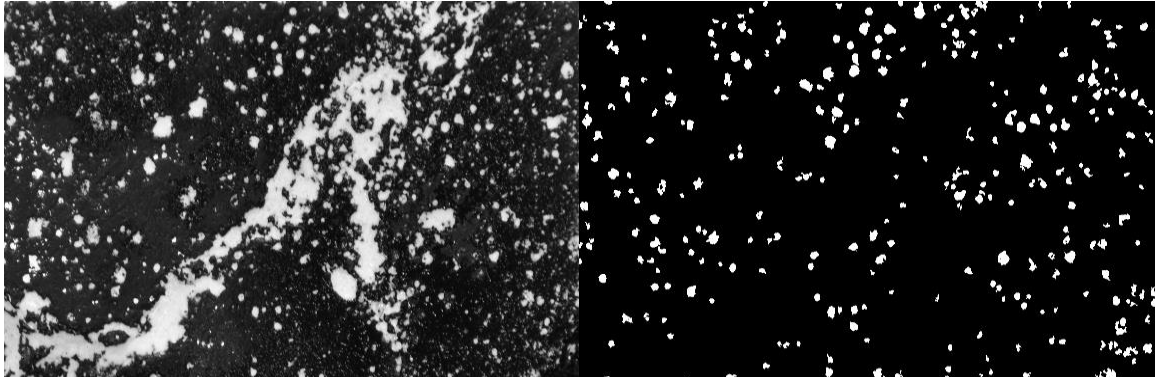
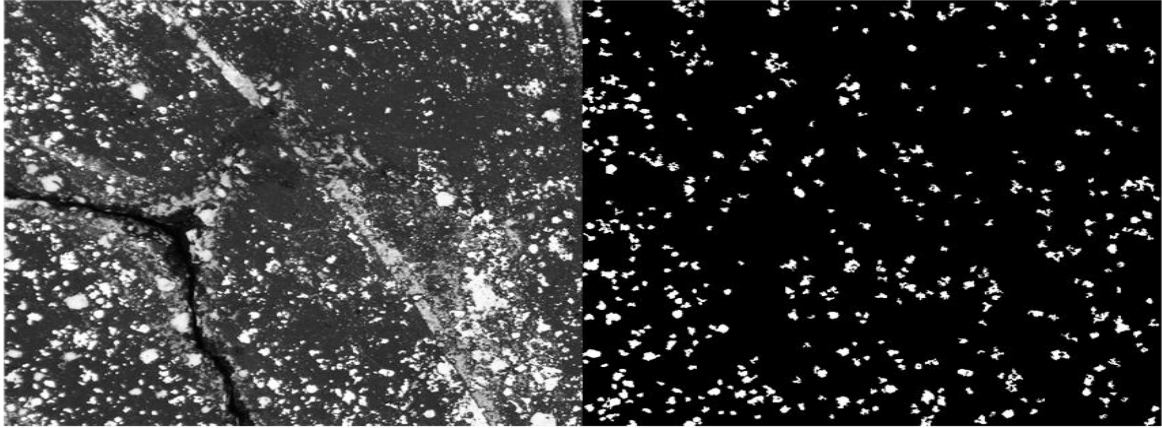


איור 13 : השפעת תכולת האוויר על משקל מרחבי.



איור 14 : מערכת היחסים בין משקל מרחבי לחוזק לחיצה ב-28 יום.

איור 15 מציג תמונות של נקבוביות הדגמים שהתקשו. מדובר בדגמים עם המעכבים שהציגו את התוצאות הטובות ביותר. ניתן לראות שנוכחות ה- K_2SiF_6 וה-MCI הקטינה את נפח הנקבוביות הכולל, מגמה שמתאימה למדידות הישירות של תכולת האוויר בתערובות מלט טריות ולחישובי השינויים בנקבוביות מערכי המשקל המרחבי.



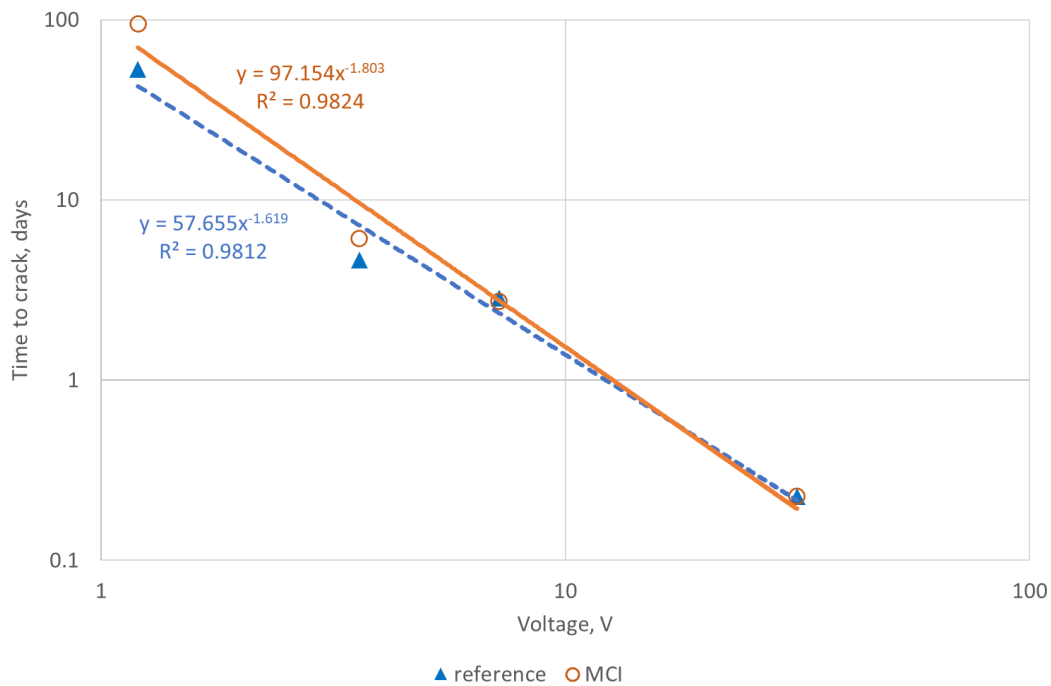
איור 15 : נקבוביות בדגמים שהתקשו : בקרה - 6.0% (למעלה) ; K_2SiF_6 - 5.1% (באמצע) ; MCI - 3.6% (למטה).

4.6 הערכת משך שירות

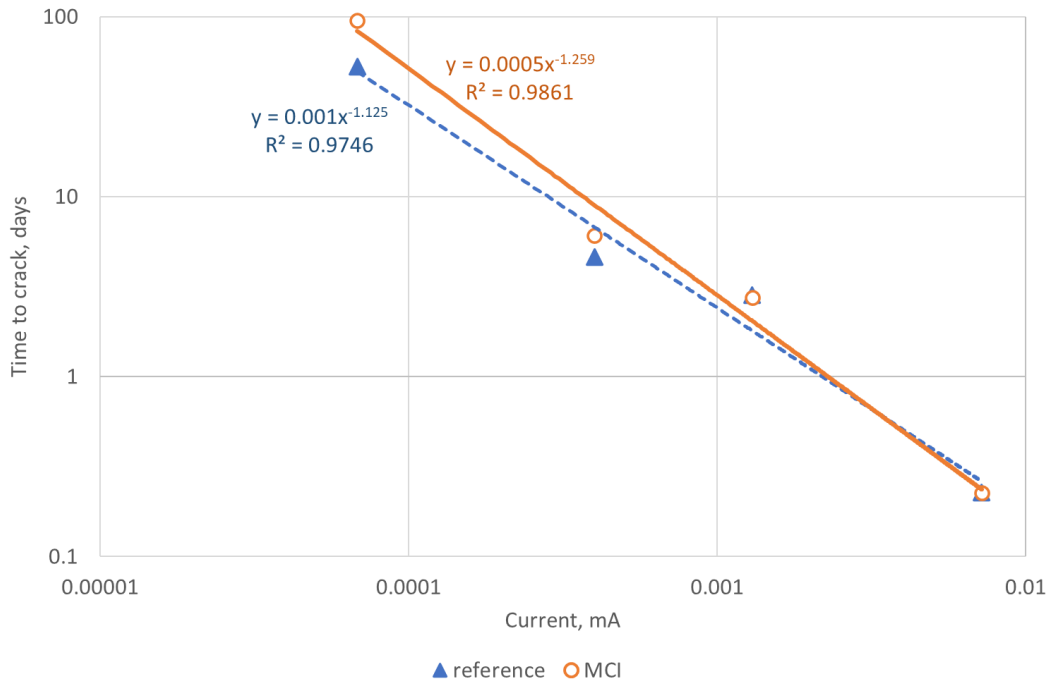
הערכת חיי השירות מבוצעת באמצעות ארבע סדרות של בדיקות שמוודות את המתח החשמלי בכל מדגם הבטון המזוין. סדרת הבדיקות הראשונה בוצעה תחת מתח של 3.6 וולט (איור 7).

בסדרה השנייה, הדגמים הראו התנגדות מוגברת לפוטנציאל חשמלי תחת מתח של 1.2 וולט ונבדקו בהמשך תחת פוטנציאל מתח גבוה יותר של 7.2 וולט (איור 8). אחרי הגברת המתח החשמלי ל-32.5 וולט, הדגמים נסדקו במהירות רבה – תוך 330 דקות בלבד. ותוך כ-4080 דקות מוטות הזיון התפרקו ונעלמו לחלוטין. לכן נקבע שמתח חשמלי גובה זה אינו מתאים לבדיקת מעכבי קורוזיה בבטון מזוין.

איור 16 מציג את זמני הסדיקה הממוצעים של דגמי המלט (תערובת הבקרה לעומת תערובת MCI-2005) שנחשפו למתחים חשמליים שונים. תלות זו הכרחית לחיזוי חיי השירות של בטון שנחשף בו-זמנית להתקפת כלוריד ולמתח חשמלי. עקב מגבלת זמן המחקר, לא התאפשר לבדוק סדרה נוספת של דגמים המכילים מעכב על בסיס פוטסיום אך על פי התוצאות שמוצגות בטבלאות 4 ו-5 דגמים מסוג זה הציגו דפוס התנהגות דומה ואף בפוטנציאל להיות טובים יותר מתוצאות מעכב MCI.

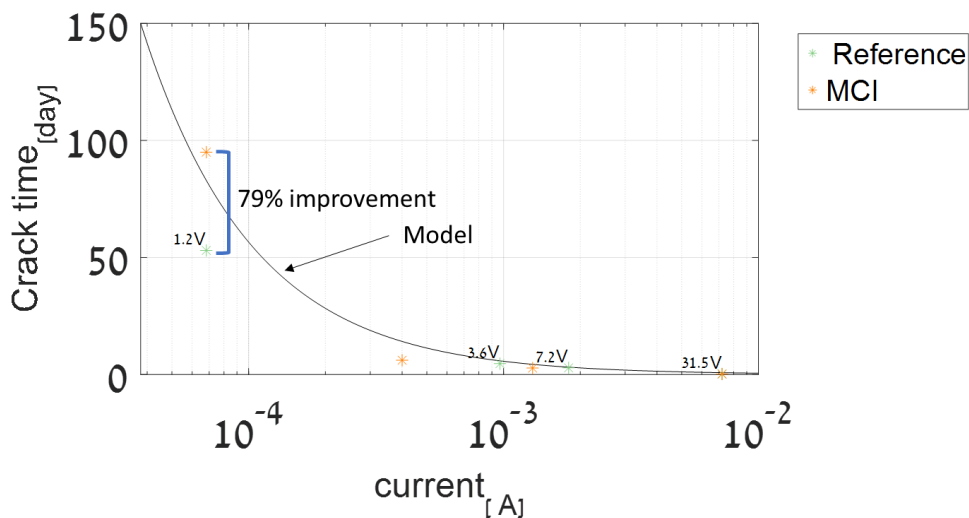


איור 16 : זמן סדיקה כנגד מתח חשמלי.



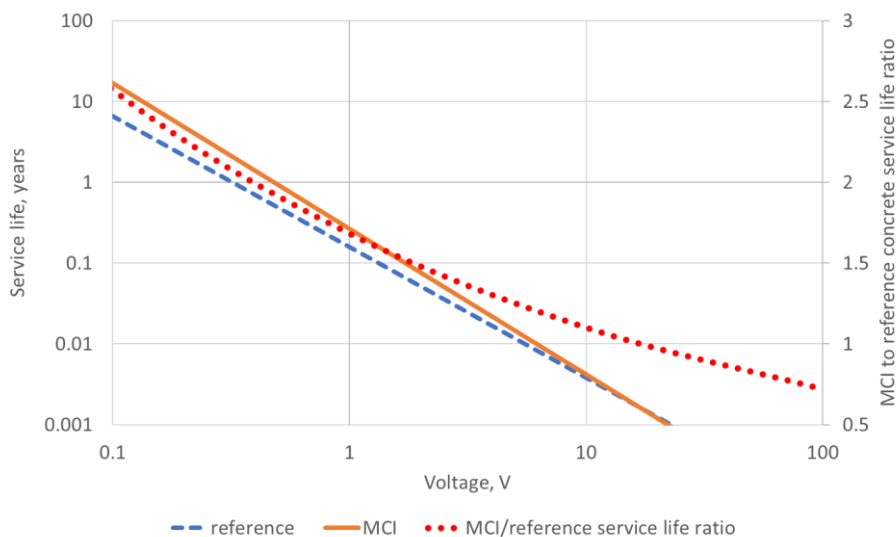
איור 17 : זמן סדיקה כנגד זרם חשמלי.

כדי לחזות מתי ייווצר הסדק, פיתח איגור לפירו, במסגרת תזת ה-M.Sc שלו, מודל אנליטי המבוסס על פתרון מערכת משוואות המתארת את המתח המתפתח במטריצת בטון כתוצאה מהתרחבות תוצרי הקורוזיה באלמנט שעשוי מבטון מזוין שנחשף למתח חשמלי. המודל שילב בתוכו את חוק פאראדיי. במחקר זה, אשר בדק את ההשפעה המשולבת של מתחים מכאניים וזרם חשמלי, הדגמנו שאפשר להעריך את זמן ההיווצרות של סדק כפונקציה של פוטנציאל חשמלי שקיים בדגם. ברגע שזמן היווצרות הסדק ידוע, אפשר לתכנן באופן פרטני את זמני ביצוע הסקירה עבור מגוון מבני בטון, וכך למנוע עבודה מיותרת וכן הוצאות הקשורות לכוח אדם וזמן. חישובי זמני הסדיקה שביצע המודל מדגימים התאמה משביעת רצון של התוצאות החזויות לתוצאות שהתקבלו בניסויים שערכנו (איור 18).

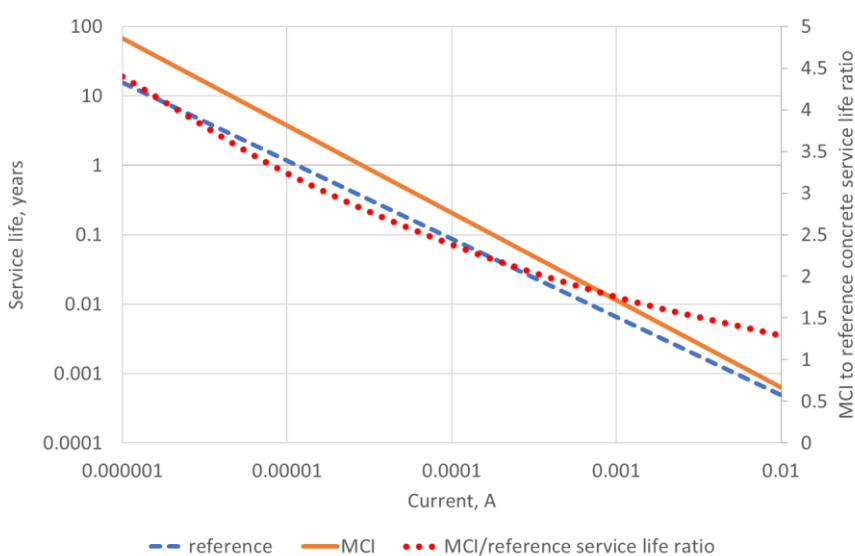


איור 18 : זמן סדיקה כנגד זרם חשמלי (תוצאות הניסוי לעומת תוצאות חזויות באופן אנליטי).

איור 18 מדגים שהוספת מעכבי הקורוזיה הנודדים מאריכה של חיי השירות של סוג המלט הספציפי שנחשף למתח חשמלי קבוע של 1.2 וולט ב-79%.
 חשוב לא פחות: ככל שהזרם/המתח החשמלי נמוך יותר, כך השיפור בחיי השירות משמעותי יותר (איור 19, איור 20).



איור 19: חיי השירות של בטון המכיל מעכב קורוזיה נודד משתפרים תחת מתח חשמלי נמוך יותר.



איור 20: משך השירות של בטון שמכיל מעכב קורוזיה נודד משתפר תחת מתח חשמלי נמוך יותר.

לפי תקן ASTM C876-15, ההסתברות לקורוזיה באלמנט בבטון מזוין שנחשף לסביבת מתח חשמלי של 0.2 וולט היא רק 10% [38]. כלומר, לפי התכנון ההנדסי, המבנה אמור להחזיק מעמד לתקופה של 50 שנה או יותר, כמוצג בטבלה 2.1 בדרישות תקן הירווקוד או AASHTO [39]–[42]. אולם בפועל, לפי תוצאות הניסוי המדווחות באיור 16, אם זמן הסדיקה מחושב ע"י אקסטרפולציה של עקומה לינארית במתח החשמלי זה (0.2 וולט), המבנה עלול להיכשל כבר אחרי שנתיים.

5 דוגמה להערכת מחזור חיים (LCA) לשימוש במוסף כימי חדש שהופק מפסולת LABS (LABSW)

5.1 מבוא

חלק זה של הפרויקט עוסק במוספים כימיים מבוססי-LABS ובתוצרי לוואי שמכילים LABS המיועדים לשיפור עמידות בטון שחשוף לתנאי סביבה קשים. לפי המחקר הראשוני שלנו, יש להוספת LABS למשחת צמנט טרייה אפקט של פלסטיסייזר [43]. אפשר להשוות את היעילות של LABS לזו של פולינפטלין סולפונט (PNS) רגיל. שני הסופר-פלסטיסייזרים משתייכים לאותה קבוצה – חפ"שים סולפוניים אניוניים. נעשה ניסיון לשלב ניתוח עלות סיסטמתי עם הערכת מחזור חיים סביבתי (LCA) [44], כדי להעריך את הביצועים הכלכליים והסביבתיים של מוספים כימיים (במקרה זה חפ"שים מפסולת תעשייתית), במטרה לשפר את הביצועים והעמידות של RC, וכתוצאה מכך להאריך את חיי השירות שלו.

הערכת מחזור החיים (LCA) היא כלי אנליטי מקיף המשמש להבנת עמידותם של מוצרים, תהליכים, ופעילויות. בשנים האחרונות, יש שימוש גובר ב-LCA בקבלת החלטות בתחום ההנדסה אזרחית, במיוחד בהקשר של הערכת הביצועים הסביבתיים של חומרים המשמשים בבניינים ובתשתיות [45]–[48]. בשנים האחרונות, נעשה שימוש ב-LCA כדי לאתר ולהעריך חומרים ומוצרים חדשים שטרם הגיעו לפיתוח מסחרי, תהליך שנקרא LCA פרוספקטיבי. LCA פרוספקטיבי הוא אמצעי שימושי להערכת ההשפעות הסביבתיות על מחזור החיים של חומרים שנמצאים בשלבי פיתוח מוקדמים, ולבחינת ביצועיהם של חומרים אלה מבחינת הסביבה, המשאב, והעלות, במקביל לפיתוחם בקני"מ מעבדתי ובייצור ניסיוני כאמצעי למיטוב ביצועיהם כאשר ייעשו מסחריים.

השימוש במעבדי קורוזיה כמו LABS הוא אמצעי מבטיח להארכת חיי השירות של RC. מכיוון שמחומרים אלה מופקים מפסולת, הם מהווים אמצעי להקטנת עוצמת האנרגיה וה-GHG (גזי חממה) של חומרי בטון משום שהם מסיטים את הפסולת ומקטינים את עלויות ניהול הפסולת. ואולם, תהליך העיבוד שלהם עלול להצריך אנרגיה תרמית וחשמלית נוספת בזמן ייצור חומרי גלם ל-RC. LCA הוא לכן כלי סקירה חשוב להערכת הביצועים הכלכליים והסביבתיים של RC.

5.2 הגדרת גבולות המערכת

כפי שהראו התוצאות הניסיוניות שדווחו בסעיף השפעת מעבדי קורוזיה הוספת LABS כמוסף כימי רגיל לתערובת הבטון הטרייה הובילה לכליאת אוויר דרמטית. מעבד ה-LABS האיץ היווצרות סדקים ב-30%, תוצאה שנובעת אולי מירידה של 31% בחוזק ועלייה של 13% בכליאת אוויר שנצפו. למרות התוצאה השלילית שהתקבלה מהוספת LABS מתוך הנחת קיומם של מאפייני עיכוב אפשריים, ממצא זה פותח אפשרות מעניינת ומושכת של שימוש ב-LABS כחומר כולא אוויר (AEA) יעיל, במקום כמעבד קורוזיה. בהתחשב בתוצאה זו, החליטו מחברי המחקר למקד את המחקר בחלק זה של הפרויקט בשימוש במוצרים מבוססי-LABS כפתרון חלופי ל-AEA קונבנציונאליים.

יתרה מזאת, המחברים זיהו אפשרות נוספת, מעניינת אף יותר, והיא לחקור את האפשרות להשתמש, כ-AEA יעילים, במוצר מבוסס-LABS מזהם במקום ב-LABS נקי ששימוש בחלקים הקודמים. לכן, הדוגמה עליה מדווח בסעיף זה מתארת ניסיון ליישם הערכת מחזור חיים להערכת ההשפעה הסביבתית של טיפול חלופי בפסולת LABS (פסולת אלקיל בנזן סולפונט ליניארי, או LABSW) שמקורה בייצור דטרגנטים. נעשה שימוש ב-LCA לפי שיטות תקן ISO 14040/44 [49], [50]. השערת המחברים הייתה שאפשר להשתמש ב-LABSW כתחליף ל-LABS כ-AEA בבטון. התכונות המעכבות של LABS לא נידונות כאן, שכן הן מחייבות טכנולוגיה שונה לחלוטין להוספת המוסף למערכת. שיטה חלופית להוספת מוספים מבוססי-LABS יכולה להתבסס, לדוגמה, על ריסוס על פני שטח מוטות הפלדה. מחברי המחקר מניחים שטכניקה כזו לא תשפיע על תכולת האוויר בבטון. המחברים מפתחים בימים אלה רעיון זה, אשר ראוי בהחלט למחקר עתידי נפרד.

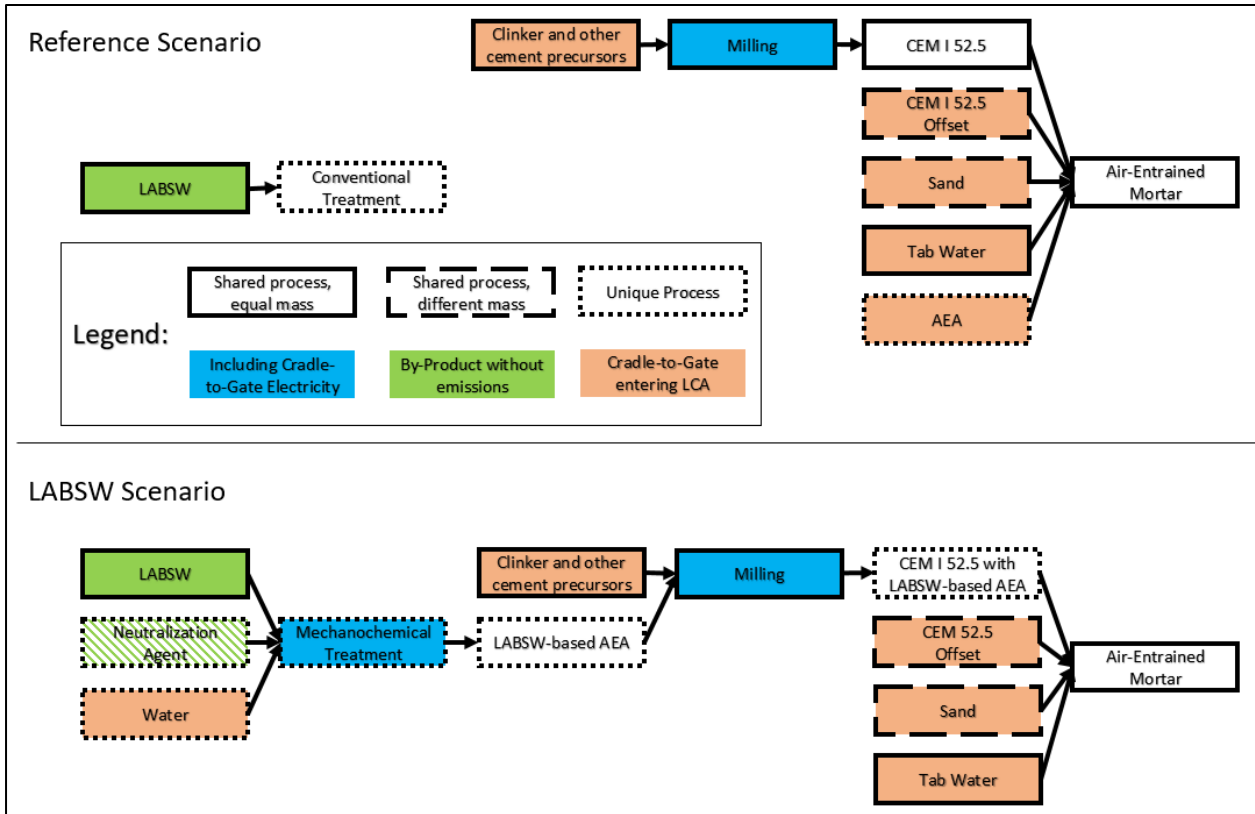
בחלק זה של הפרויקט, השתמשנו ב-LCA כדי להעריך מחזור (up-cycling) אפשרי של LABSW כ- AEA בבטון ולהעריך את הייצור של 1 מ"ק מלט, היחידה הפונקציונאלית, תוך שימוש ב-LABSW כ- AEA. בהינתן העובדה ש-LABSW מטופל כיום כפסולת מסוכנת ע"י שריפה (איפרור), המרתו ל-AEA באמצעות טיפול מיוחד שמבוסס על נטרול תמנע את הנטל הסביבתי הכרוך בשריפתו.

מחקרים הראו [43] שאפשר לנטרל את ה-LABSW החומצי מאוד באמצעות חומרים לא יקרים במיוחד (כמו NaOH) או אפילו באמצעות תוצרי לוואי של ענפים אחרים בתעשייה ($CaCO_3$, Fe_2O_3), שעשויים להיות עדיפים מנקודת מבט סביבתית. בפרק זה נחקרו שלושה סוגים שונים של מוספי LABSW: Na-LABSW, Ca-LABSW ו-Fe-LABSW שהופקו ע"י נטרול ב-NaOH, $CaCO_3$ ו- Fe_2O_3 בהתאמה. כל מוסף נבדק בשני ריכוזים: 0.5% ו-1.0% ממשקל הצמנט.

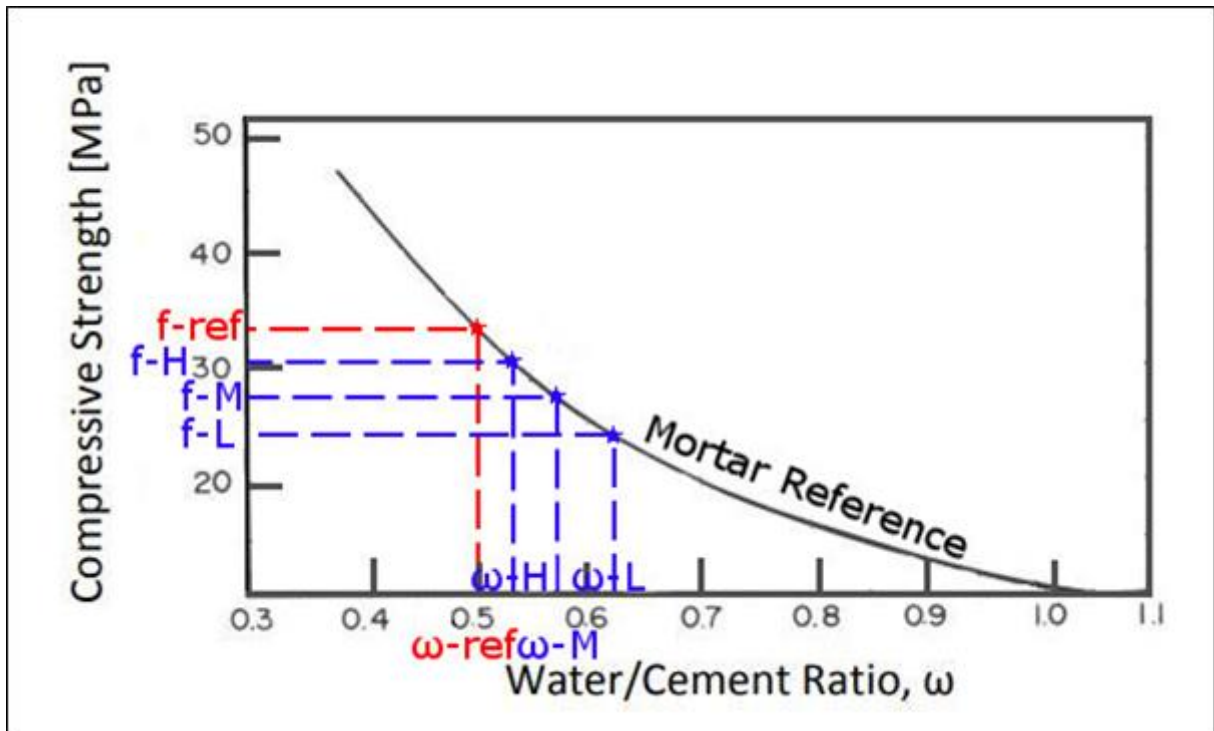
במונחים של מנגנון פעולה והשפעה על המערכת הצמנטית, הודגם שמוספים משפרים עמידות וכולאים כמות נוספת של אוויר. עוד נמצא [43] שקיים טווח מינונים אופטימלי ליישום, בהם הירידה בחוזק הלחיצה הוא מינימלי בהשוואה לעלייה בנקבוביות. חוזק הדחיסות תמיד קטן כשהנקבוביות עולה כתוצאה מירידה בתכולת משחת הצמנט ליחידת נפח. יש לקזז ירידה זו בחוזק ע"י הוספת צמנט, כנהוג גם בתעשייה.

לפיכך, גבול המערכת (איור 21) עבור מלאי מחזור החיים (LCI) שנקבע עבור הוספת LABSW ל-1 מ"ק מלט שמכיל אוויר כלוא, מקצה נטל נוסף על מלט ה-AEA הקונבנציונאלי (תרחיש הייחוס), שהוא שווה ערך לזיכוי תרחיש ה-LABSW על כך שנמנע סילוק LABSW בשריפה. איור 21 מראה את כל תשומות החומר שנדרשו כדי לשמור על אקוויוולנטיות פונקציונלית במוצר המלט הסופי. גבול המערכת הוגדר במטרה להעריך את ההבדלים התוספתיים בין AEA-ים חלופיים, בהם הוערכה ההשפעה של מוסף מבוסס-LABSW בהשוואה לתרחיש ייחוס שהכיל AEA מסחרי. נעשה שימוש בשלושה מוספים מסחריים גנריים באיכות גבוהה (H), בינונית (M), ונמוכה (L); ההנחה הייתה שהם יגרמו לירידה של 5%, 15%, ו-25% בחוזק הלחיצה באותה כליאת אוויר, בהתאמה. כדי לפצות על הירידה בחוזק בהתאם לעקומת אברמס (איור 22), התאמנו את תוספת הצמנט כך שתישמר אקוויוולנטיות פונקציונלית בין הפורמולציות החלופיות. מוספים שונים גורמים לירידה בחוזק באותה רמת נקבוביות; יישמנו את הרעיון של תכולת מים אפקטיבית, לפיו כמות דמיונית של תוספת אוויר גורמת לעלייה בתכולת המים האפקטיבית בהתאם למשוואה 1. טבלה 6 מסכמת את קיזוזי הצמנט הנדרשים עבור מלטי ה-AEA וה-AEA LABSW המסחריים שנבדקו.

$$\omega_{actual} = \frac{W_{eff}}{c} = \frac{(W + \Delta A_{imaginary})}{c} \quad \text{Eq. 1}$$



איור 21 : גבול המערכת עבור שימוש חלופי ב-LABSW כמוסף לבטון.



איור 22 : עקומת אברמס לקביעת יחס מים/צמנט אפקטיבי.

טבלה 6 : קיזוזי צמנט לתערובות המלט השונות.

תערובת	קיזוז צמנט [ק"ג/מ"ק] נדרש כדי להגיע לחוזק הייחוס
תרחיש ייחוס : AEA מסחרי באיכות גבוהה (ירידה של 5%)	33.9
תרחיש ייחוס : AEA מסחרי באיכות בינונית (ירידה של 15%)	79.2
תרחיש ייחוס : AEA מסחרי באיכות נמוכה (ירידה של 25%)	135.6
0.5% Na-LABSW	180.8
1% Na-LABSW	101.7
0.5% Ca-LABSW (CaCO ₃)	226.0
1% Ca-LABSW (CaCO ₃)	90.4
0.5% Fe-LABSW	180.8
1% Fe-LABSW	113.0

תוך שימוש במאזני חומרים שפותחו מתוך מדידות ניסיוניות של S. Ulka [43], נבנה מודל LCI להערכת תשומות החומרים והאנרגיה cradle-to-gate לייצור מלט עם אוויר כלוא שמכיל LABSW ובהשוואה למקרה ייחוס של מלט קונבנציונאלי עם AEA שכולל שריפה של ה-LABSW. ב-LCI נכללו רק הבדלים תוספתיים בין ה-LABSW-AEA ו-AEA הייחוס. נתוני ייצור cradle-to-gate עבור האנרגיה הכימית והחשמלית נלקחו מתוך בסיסי הנתונים ecoinvent [49], [50] ו-GaBi 6.0 [51] כדי לבנות את מודל ה-LCI ולהעריך ערכי זמן-אמצע סביבתיים. תשומות cradle-to-gate של הכימיקלים והאנרגיה החשמלית מייצגות אספקה בגרמניה או אספקה ממוצעת באירופה בהתחשב בעובדה שנתוני ה-LCI נלקחו מבסיסי נתונים אירופאים. טבלה 7 : זרימות ייחוס עבור ייצור של 1 ק"ג מוספים מבוססי-LABSW מסכמת את זרימות הייחוס, שהן תשומות החומרים והאנרגיה הדרושות לייצור 1 מ"ק מלט, כמצוין ב-LCI. ההנחה היא שמוצרי פסולת נכנסים למצאי ללא פליטה קודמת. כמות הצמנט שמוסיפים כדי לקזז את הירידה בחוזק הלחיצה (ר' איור 13, משוואה 1) של המלט שמכיל אוויר כלוא מוסברת בזמן ביצוע ה-LCI, משום שכל מוסף מציג רמה אחרת של ירידה בחוזק הלחיצה עבור אותן רמות של כליאת אוויר. לבסוף, סך כל התשומות שמשמשות בכל מוסף (טבלה 7 : זרימות ייחוס עבור ייצור של 1 ק"ג מוספים מבוססי-LABSW) מייצג את ההשפעה הסביבתית של השימוש במלט עם אוויר כלוא שמכיל מוספים מבוססי-LABSW בהשוואה למוספים מסחריים.

טבלה 7: זרימות ייחוס עבור ייצור של 1 ק"ג מוספים מבוססי-LABSW

מוסף	LABSW	מי ברז	חומר מנטרל	חשמל	CO ₂ שנפלט בריפקציה
יחידה	[ק"ג]	[ק"ג]	[ק"ג]	[קוט"ש]	[ק"ג]
Na-LABSW	0.901	1.22	0.135 (NaOH)	11	0
Ca-LABSW	0.833	1.08	0.167 (CaCO ₃)	11	0.108
Fe-LABSW	0.926	0	0.0741 (Fe ₂ O ₃)	11	0

אנו משתמשים במדד ההתחממות הגלובלית (GW) בנקודת אמצע של הערכת ההשפעה של מחזור החיים (LCIA), המבוסס על פוטנציאל ההתחממות הגלובלית (GWP) ל-100 שנים של גזי חממה שלקוח מתוך דו"ח AR5 על דלדול האוזון (OD) והחמצה (AD) של הפאנל הבין-ממשלתי בנושא שינוי אקלימי (IPCC) תוך שימוש בשיטת נקודת האמצע ההיררכית של ReCiPe 2016 [54] כדי להשוות את הביצועים הסביבתיים של סוגי מלט חלופיים. טבלה 8: פליטות cradle-to-gate של תהליכים וחומרים שנכנסים ל-LCA מסכמת את הגורמים המאפיינים שישומו עבור כל יחידת תשומת מחזור חיים של חומר ואנרגיה ומקורות נתונים.

טבלה 8: פליטות cradle-to-gate של תהליכים וחומרים שנכנסים ל-LCA

פריט יחידה	יחידה	GW ^a kg CO ₂ eq	OD ^b μg CFC-11 eq	AD ^c g SO ₂ eq	משאב	מקור
חומרים						
CEM I 52.5	1 ק"ג	0.849	50.5	0.979	צמנט (CEM I 52.5) (EN15804 A1-A3), EU-28	GaBi9.0
מי ברז	1 ק"ג	0.000375	0.235	0.00058	מי ברז ממים עיליים, אירופה	GaBi9.0
NaOH	1 ק"ג	1.20	507	1.70	תערובת נתרן הידרוקסיד (סודה קאוסטית) (100%), גרמניה	GaBi9.0
חול	1 ק"ג	0.00282	3.77	0.0168	חול (גודל גרגר 0/2) (EN15804 A1-A3) (מיובש), EU-28	GaBi9.0
תערובת כולאת אוויר (AEA)	1 ק"ג	0.527	0.0756	1.30		
חשמל	1 קוט"ש	0.403	137	0.910	חשמל (תמהיל ממוצע ללקוח) (EU-28)	GaBi9.0
תהליכים						
טיפול קונוונציונלי ABSW	1 ק"ג	2.65	810	2.1	פסולת מסוכנת לשריפה טיפול RoW בפסולת מסוכנת, שריפה של פסולת מסוכנת APOS, S	ecoinvent

^aIPCC AR5 GWP100 לא כולל פחמן ביוגני

^b[54] ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Stratospheric Ozone Depletion

^c[54] ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Terrestrial Acidification

5.3 תוצאות הערכת מחזור חיים (LCA)

אנו מציגים את תוצאות ה-LCA עבור GW, OD ו-AD עבור LABSW-AEA (טבלה 9) ובצורה גראפית עבור GW (איור 23) ואנו דנים במגמות עבור כל שלוש המדדים כאשר LABSW משמש כתחליף ל-AEA מסחריים

באיכות גבוהה, בינונית ונמוכה. התוצאות מוצגות כהבדלים תוספתיים בין LABSW-AEA ל-AEA מסחרי בשלוש דרגות החוזק. כך, תוצאות LCIA בטבלה 9 שהן מתחת לאפס מייצגות מקרים של שימוש ב-LABSW כ-AEA שהם עדיפים מבחינה סביבתית.

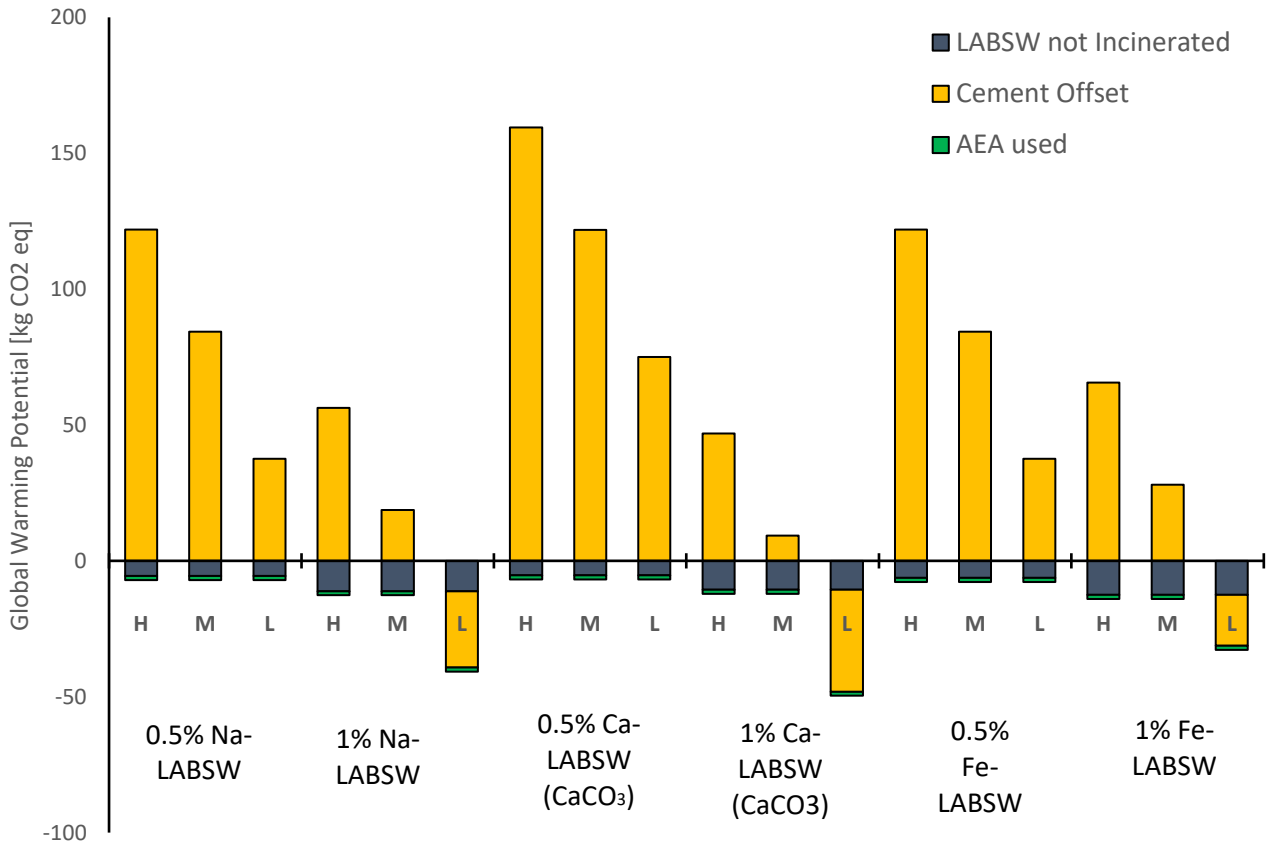
תוצאות LCA עבור התחממות גלובלית (איור 23 טבלה 9 מראות ירידה בחוזק עם תוספת של 0.5% מוספי LABSW, שהיא גבוהה מכדי להצדיק את יישומה. בהתחשב בעלות הסביבתית הגבוהה של ייצור צמנט פורטלנד, עלותה של כמות הצמנט הנוספת הדרושה כדי להגיע לאותו חוזק לחיצה גבוהה מהיתרונות המתקבלים ממיחדוש LABSW שמוסף ברמה של 0.5%, למרות הצורך בטיפול ב-LABSW בשריפה. מצד שני, מוספים מבוססי LABSW במינון 1% משתווים ל-AEA מסחריים בחוזק בינוני או נמוך, כפי שמראה השפעת ה-GW התוספתית שהייתה קרובה לאפס או שלילית (טבלה 9).

מבין המוספים מבוססי-LABSW רמת ה-GW של Na-LABSW היא הגבוהה ביותר כתוצאה מהוספת NaOH בעל פליטת GHG חזקה מאוד. ההערכות שלנו לגבי AD ו-OD דומות ל-GW (9), כאשר תוספות של 0.5% LABSW מובילות להשפעה חזקה על AD ו-OD ותוספת של 1% LABSW הובילה לתרומה הנמוכה ביותר ל-AD ו-OD עבור AEA ברמות בינונית ונמוכה. עבור כל מדדי ה-LCIA שנחקרו, השפעתו של Ca-LABSW על מחזור החיים הסביבתי היא הנמוכה ביותר בקרב כל הפורמולציות של AEA-ים באיכות בינונית ונמוכה.

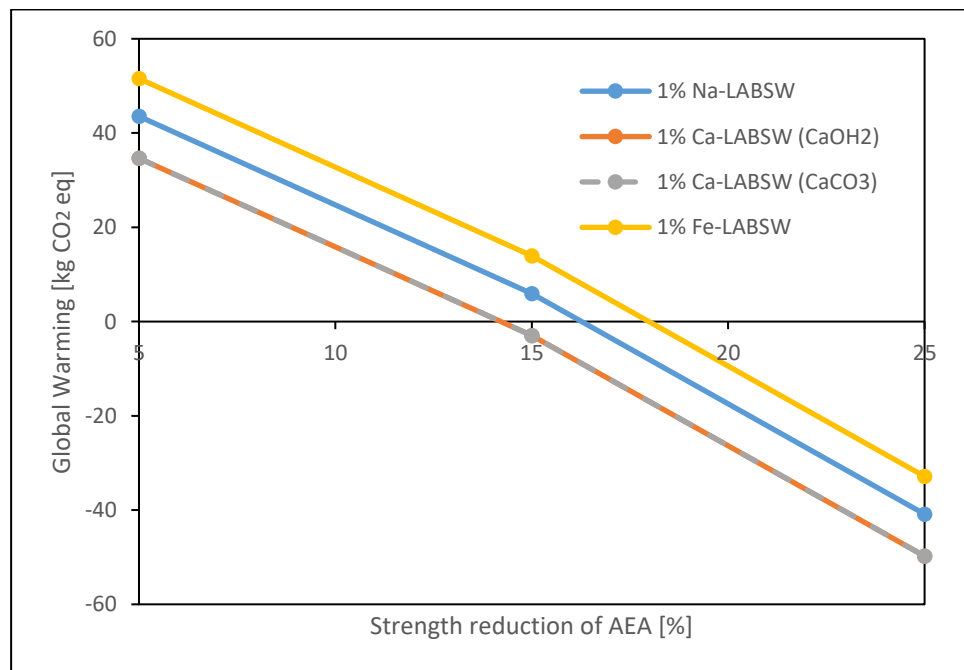
ההיתכנות האקולוגית של שימוש ב-LABSW תלויה במוסף הייחוס שאליו משווים אותו ובירידה בחוזק שהוא מייצר. נקודה אחרונה זו דורשת להגדיר את סף ירידת החוזק שמאפשרת הוספת LABSW. איור 24 מראה את הקשר בין GW לירידה בחוזק. המוסף הופך למעשי מבחינה אקולוגית אם חצה את ציר ה-X, כלומר, עבור Ca-LABSW הדבר קורה בירידת של ~14.5% בחוזק, שהיא שוות ערך ל-AEA באיכות בינונית. אחריו נמצא Na-LABSW עם ירידה של ~16.4% בחוזק, ועבור Fe-LABSW נדרשת הירידה הגבוהה ביותר בחוזק, של ~18%, על מנת שיהיה מעשי.

טבלה 9 : תוצאות הערכת מחזור החיים עבור OD ,GW ו-AD

AD [kg SO ₂ eq]	OD [kg CFC-11 eq]	GW [kg CO ₂ eq]	Admixtures
Comparison: High Quality AEA			
Total			
0.166	3.49E-06	115	0.5% Na-LABSW
0.0690	1.66E-06	43.5	1% Na-LABSW
0.216	4.28E-06	153	0.5% Ca-LABSW (CaCO ₃)
0.0503	8.34E-07	34.7	1% Ca-LABSW (CaCO ₃)
0.162	3.18E-06	114	0.5% Fe-LABSW
0.0755	1.31E-06	51.6	1% Fe-LABSW
Comparison: Medium Quality AEA			
Total			
0.112	2.42E-06	77.2	0.5% Na-LABSW
0.0156	5.88E-07	5.95	1% Na-LABSW
0.163	3.21E-06	115	0.5% Ca-LABSW (CaCO ₃)
-0.00299	-2.3E-07	-2.92	1% Ca-LABSW (CaCO ₃)
0.109	2.12E-06	76.5	0.5% Fe-LABSW
0.0222	2.44E-07	14.0	1% Fe-LABSW
Comparison: Low Quality AEA			
Total			
0.0459	1.09E-06	30.4	0.5% Na-LABSW
-0.0507	-7.4E-07	-40.9	1% Na-LABSW
0.0964	1.88E-06	68.2	0.5% Ca-LABSW (CaCO ₃)
-0.0693	-1.6E-06	-49.7	1% Ca-LABSW (CaCO ₃)
0.04256	7.89E-07	29.7	0.5% Fe-LABSW
-0.0442	-1.1E-06	-32.9	1% Fe-LABSW



איור 23 : השפעה על התחממות גלובלית של 1 מ"ק מלט עם מוספים מבוססי-LABSW בהשוואה למוספים מסחריים גנריים באיכות גבוהה (H), בינונית (M) ונמוכה (L) (שגורמים לירידה של 5%, 15% ו-25% בחוזק הלחיצה, בהתאמה).



איור 24 : מערכת היחסים בין הירידה בחוזק AEA וההשפעה על ההתחממות הגלובלית.

5.4 סיכום הערכת מחזור החיים

מבין המוספים מבוססי ה-LABSW במינון של 1%, Ca-LABSW הוא ה-AEA העדיף ביותר מבחינה סביבתית. עבור המדדים שנחקרו, FE-LABSW הוא בעל ההשפעה הגבוהה ביותר וגם ל-Na-LABSW יש השפעה גבוהה על GW, החמצה ודלדול האוזון מתוך כל תערובות ה-LABSW בגלל תוספת ה-NaOH, שמתאפיין בפליטה חזקה מאוד, כחומר מנטרל. אפשר לייצר Ca-LABSW תוך שימוש הן ב-Ca(OH)₂ והן ב-CaCO₃. אין לבחירה בחומר המנטרל השפעה משמעותית על פליטות המוצר, שכן ההשפעה על GW של ייצור Ca(OH)₂ דומה לזו של CaCO₃ בגלל פליטת ה-CO₂ במהלך התגובה בין LABS ל-H₂SO₄.

המינון המעשי היחיד שבו מוסף מבוסס-LABSW כלשהו נחשב ליעיל כמוסף למלט הוא מינון של 1% ממשקל הצמנט. כל מינון אחר גורם לירידה משמעותית בחוזק שיש לקזזה ע"י הוספת צמנט, אשר ייצורו מתאפיין בפליטות חזקות מאוד שמבטלות כל יתרון שעשוי להתקבל ממחזור של LABSW.

החלפת ה-AEA במוסף מבוסס-LABSW מעשית בהשוואה למוספים באיכות בינונית עד נמוכה (טבלה 9), (איור 21).

כשה-AEA שהוחלף ע"י מוסף מבוסס-LABSW מפחית את חוזק המלט ביותר מ-14.5%, השימוש ב-Ca-LABSW הופך מעשי, ולאחריו Na-LABSW עם ירידה של ~16.4% ולבסוף Fe-LABSW עם ירידה של ~18% בחוזק הלחיצה.

6 מסקנות

ניתן לנסח את מסקנות המחקר שלנו כדלקמן:

(1) קינטיקת הקורוזיה, כפי שנצפתה בבדיקות מואצות בדגמים מבטון מזויין לאחר מדידת השינויים בהתנגדות החשמלית במתחים שונים (מ-3.6 עד 32.5 וולט), הייתה שונה ממודל התנהגות שלבי הקורוזיה של פלדה בבטון [32] שכלל שני שלבים בלבד: חניכה והתפשטות הקורוזיה.

(2) ישנם חמישה שלבים מובחנים היטב בקינטיקת קורוזיה המייצגים את השינוי בהתנגדות החשמלית של דגם בטון מזויין מייצג בסביבה של קורוזיה מואצת: (א) התחלת הקורוזיה, שמתחילה מיד לאחר חיבור הדגמים למתח חשמלי קבוע; (ב) הצטברות תוצרי הקורוזיה - תוצרי הקורוזיה מתרחבים וממלאים את המרווח הראשוני שנוצר בין מוטות הזיון לבטון. נמצא שהתהליך המתרחש בשלב זה משפר את ההתנהגות המכאנית והחשמלית של בטון מזויין לא סדוק; (ג) היווצרות סדקים כתוצאה מהמתחים שמגיעים לערך סף ליצירת סדק שמקביל למוטות הזיון; (ד) גדילת הסדק עד שתוצרי הקורוזיה יוצאים מהסדק בחופשיות ונראים לעין בבירור על פני שטח הדגם ו-(ה) כשל כתוצאה מנתק מוחלט בין מוט הזיון לבטון.

(3) מעכב קורוזיה נודד המבוסס על אמין-קרבווקסילט ומעכב מבוסס K₂SIF₆ הדגימו התנגדות טובה לקורוזיה תחת מתח חשמלי מאולץ של עד 3.6 וולט. בערכים גבוהים יותר (7.2 ו-32.5 וולט), חוזק הלחיצה של הבטון היה הגורם העיקרי שקבע את זמן היווצרות הסדק.

(4) הוספת מעכבי קורוזיה אחרים הקטינה מעט את חוזק הבטון. רוב הירידה בחוזק נצפתה בגילאים מוקדמים (1, 3 ו-7 ימים) ומאוחרים (28 ו-90 יום). החוזק בגיל המוקדם ירד ב-13-40%, בעוד שהחוזק הסופי ירד ב-10-13%.

(5) כל התועלות של מעכבי קורוזיה ותוצרי קורוזיה במצב הכלוא (confined state) הן חסרות השפעה משמעותית כשהסדק נוצר במקביל למוטות הזיון.

6) הוספת מעכב הקורוזיה מבוסס ה-LABS שיוצר במעבדה לתערובת הבטון לא הייתה מוצדקת בגלל הירידה המשמעותית בחוזק של 45% והעלייה בתכולת האוויר (25%). יחד עם זאת, תוספים מבוססי-LABS, כולל כאלה שיוצרו ע"י נטרול פסולת LABS מייצור דטרנגנטים, הראו פוטנציאל מצוין כמוספים כולאי אוויר. הערכת מחזור החיים מדגימה שמבין המוספים מבוססי-LABSW במינון 1%, Ca-LABSW שהופק ע"י נטרול של פסולת LABS חומצית באמצעות CaCO_3 , הוא ה-AEA העדיף ביותר מבחינה סביבתית.

7) ככל הזרם/המתח החשמלי נמוך יותר, כך עולות תועלות השימוש במעכבי קורוזיה נודדים. בתנאי סביבה טבעיים, הוספת מעכבי קורוזיה נודדים לתערובת יכולה להאריך את חיי השירות של בטון מזוין ב-80%~.

8) מעכבים משפרים את התנגדות של בטון מזוין לקורוזיה אך אין ליישם על חשבון איכות הבטון על פי דרישות תקן 466 חלק א' ות"י 118.

9) נדרש מחקר נוסף כדי להעריך את יעילות המעכבים באלמנטי בטון סדוקים.

7 מקורות

- [1] A. Michel, M. Otieno, H. Stang and M. R. Geiker, "Propagation of steel corrosion in concrete: Experimental and numerical investigations," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 70, pp. 171–182, Jul. 2016.
- [2] Y.-C. Ou and N. D. Nguyen, "Influences of location of reinforcement corrosion on seismic performance of corroded reinforced concrete beams," *Eng. Struct.*, vol. 126, pp. 210–223, Nov. 2016.
- [3] L. Bertolini, M. Carsana and P. Pedferri, "Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current," *Corros. Sci.*, vol. 49, no. 3, pp. 1056–1068, Mar. 2007.
- [4] P. F. Marques and A. Costa, "Service life of RC structures: Carbonation induced corrosion. Prescriptive vs. performance-based methodologies," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 3, pp. 258–265, Mar. 2010.
- [5] L. Marsavina, K. Audenaert, G. De Schutter, N. Faur and D. Marsavina, "Experimental and numerical determination of the chloride penetration in cracked concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 1, pp. 264–274, Jan. 2009.
- [6] P. Garcés, M. C. Andrade, A. Saez and M. C. Alonso, "Corrosion of reinforcing steel in neutral and acid solutions simulating the electrolytic environments in the micropores of concrete in the propagation period," *Corros. Sci.*, vol. 47, no. 2, pp. 289–306, Feb. 2005.
- [7] B. Pradhan and B. Bhattacharjee, "Role of steel and cement type on chloride-induced corrosion in concrete," *ACI Materials Journal*, vol. 104, no. 6, pp. 612–619, Nov. 2007.
- [8] Z. Shi, M. R. Geiker, B. Lothenbach *et al.*, "Friedel's salt profiles from thermogravimetric analysis and thermodynamic modelling of Portland cement-based mortars exposed to sodium chloride solution," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 78, pp. 73–83, Apr. 2017.
- [9] O. S. B. Al-Amoudi, Rasheeduzzafar, M. Maslehuddin and S. N. Abduljauwad, "Influence of chloride ions on sulphate deterioration in plain and blended cements," *Mag. Concr. Res.*, vol. 46, no. 167, pp. 113–123, Jun. 1994.
- [10] P. C. Aïtcin, "24 – Corrosion inhibition," in *Science and Technology of Concrete Admixtures*, 2016, pp. 471–479.

- [11] V. M. Moskvina, "Corrosion protection of reinforcing steel in various types of concrete," in V. M. Moskvina and S. N. Alekseev, *Research in the Field of Protection of Concrete and Other Building Materials from Corrosion*: NIIZhB. Moscow, 1958, vol. 2, pp. 134-146.
- [12] C. L. Page, V. T. Ngala and M. M. Page, "Corrosion inhibitors in concrete repair systems," *Mag. Concr. Res.*, vol. 52, no. 1, pp. 25–37, Feb. 2000.
- [13] A. Królikowski and J. Kuziak, "Impedance study on calcium nitrite as a penetrating corrosion inhibitor for steel in concrete," *Electrochim. Acta*, vol. 56, no. 23, pp. 7845–7853, Sep. 2011.
- [14] M. Ormellese, L. Lazzari, S. Goidanich, G. Fumagalli and A. Brenna, "A study of organic substances as inhibitors for chloride-induced corrosion in concrete," *Corros. Sci.*, vol. 51, no. 12, pp. 2959–2968, Dec. 2009.
- [15] S. Zor, B. Yazici and M. Erbil, "Inhibition effects of LAB and LABS on iron corrosion in chlorine solutions at different temperatures," *Corros. Sci.*, vol. 47, no. 11, pp. 2700–2710, 2005.
- [16] ASTM 1437(2005) Test method for slump of hydraulic cement concrete. pp. 12–15.
- [17] "ASTM C185(2020) Standard Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar."
- [18] "ASTM C109/C109M (2020)a Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars," *Chem. Anal.*, vol. 04, no. C109/C109M – 11b, pp. 1–9.
- [19] S. Zor, B. Yazıcı and M. Erbil, "Inhibition effects of LAB and LABS on iron corrosion in chlorine solutions at different temperatures," *Corros. Sci.*, vol. 47, no. 11, pp. 2700–2710, 2005.
- [20] A. K. Maayta, M. M. Fares and A. F. Al-shawabkeh, "Influence of linear alkyl benzene sulphonate on corrosion of iron in presence of magnetic field: Kinetic and thermodynamic parameters," *Int. J. Corros.*, vol. 2010, 2010.
- [21] M. El Guendouzi, M. Skafi and A. Rifai, "Hexafluorosilicate Salts in Wet Phosphoric Acid Processes: Properties of $X_2SiF_6-H_2O$ with $X= Na^+, K^+,$ or NH_4^+ in Aqueous Solutions at 353.15 K," *J. Chem. Eng. Data*, vol. 61, no. 5, pp. 1728–1734, 2016.
- [22] S. M. Kim, B. K. Lee, H. S. Lim, C. G. Kim and J. S. Rho, "The effects on the cement paste and mortars adding magnesium fluorosilicate prepared from hydrofluorosilicate produced as industrial by-product," *Korea Solid Wastes Eng. Soc.*, vol. 14, no. 7, pp. 701–711, 1997.
- [23] O. Khotyanovich, "Fluats based on fluosilikates of zinc to enhance the durability of concrete," in *Materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (Energ-i materialosberegayushchiye ekologicheski chistyye tekhnologii) [X International Scientific and Technical Conference (Energy-and material-saving environmentally friendly technologies)]*, 2014, pp. 230–235.
- [24] "ACI Committee 224R (2010), Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures."
- [25] I. Lapiro, A. Mezhev and K. Kovler, "A Rapid Method to Test the Effectiveness of Corrosion Inhibitors in Reinforced Concrete," in *Concrete Durability and Service Life Planning. ConcreteLife 2020. RILEM Bookseries*, vol. 26, no. January, K. Kovler, S. Zhutovsky, S. Spatari and Jensen O. M., Eds., Springer International Publishing, 2020, pp. 153–157.
- [26] *Corrosion understanding the basics*, Joseph R. Davis, Ed., Materials Park, OH: ASM International, 2000.

- [27] A. A. Almusallam, A. S. Al-gahtani and A. R. Aziz, “Effect of reinforcement corrosion on bond strength,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 10, no. 2, pp. 123–129, 1996.
- [28] E. P. Kearsley and A. Joyce, “Effect of corrosion products on bond strength and flexural behaviour of reinforced concrete slabs,” *J. South African Inst. Civ. Eng.*, vol. 56, no. 2, pp. 21–29, 2014.
- [29] W. Zhu and P. J. M. Bartos, “Application of depth-sensing microindentation testing to study of interfacial transition zone in reinforced concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 8, pp. 1299–1304, 2000.
- [30] P. Thoft-Christensen, “Stochastic modeling of the crack initiation time for reinforced concrete structures,” in *Advanced Technology in Structural Engineering*, vol. 5, 2006, pp. 1–8.
- [31] H. Yalciner, O. Eren and S. Sensoy, “An experimental study on the bond strength between reinforcement bars and concrete as a function of concrete cover, strength and corrosion level,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 5, pp. 643–655, 2012.
- [32] K. Tuutti, *Corrosion of steel in concrete*. Stockholm: Cement-och betonginst, 1982.
- [33] Z. Ahmad, “Corrosion Control by Inhibition,” in *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*, no. 2, 2006, pp. 352–381.
- [34] K. Y. Ann and N. R. Buenfeld, “The effect of calcium nitrite on the chloride-induced corrosion of steel in concrete,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 59, no. 9, pp. 689–697, 2007.
- [35] Y. Song, J. Liu, H. Wang and H. Shu, “Research Progress of Nitrite Corrosion Inhibitor in Concrete,” *Int. J. Corros.*, vol. 2019, no. 2, 2019.
- [36] H. F. W. Taylor, *Cement chemistry*, Second ed., Thomas Telford Publishing, 1997.
- [37] B. Lazniewska-Piekarczyk and J. Gołaszewski, “Relationship between Air-Content in Fresh Cement Paste, Mortar, Mix and Hardened Concrete Acc. to PN-EN 480-1 with Air-Entraining CEM II/B-V,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 471, no. 3, pp. 1–12, 2019.
- [38] ASTM C876-15 (2015), Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org, vol. 03, no. Reapproved.
- [39] BS EN, “1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures–Part 1-1: General rules and rules for buildings,” *Eur. Comm. Stand.*, 2004.
- [40] American Association of State Highway Transportation Officials, “AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 8th Edition - Table of Contents and Introduction,” 2017.
- [41] Z. Chen, D. Koleva and K. Van Breugel, “A review on stray current-induced steel corrosion in infrastructure,” *Corros. Rev.*, vol. 35, no. 6, pp. 397–423, 2017.
- [42] G. Santi and L. Sandrolini, “Stray Current Interference on High-Speed Rail Transit Systems and Surrounding,” *Proc. 6th Int. Congr.*, no. 9821, pp. 1–12, 2003.
- [43] S. Ulka, “Upcycling of chemical waste containing Linear Alkylbenzene Sulfonates (LABS) for application in Cementitious Systems,” M.Sc Thesis, Technion – Israel Institute of Technology, 2019.
- [44] “ISO 14044: 2006, Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines.” [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:en>. [Accessed: 03-Feb-2021].

- [45] G. E. Kendall, A. Keoleian and G. A. Helfund, “Integrated Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Analysis Model for Concrete Bridge Deck Applications,” *J. Infrastruct. Syst.*, vol. 14, no. 3, pp. 214–222, 2008.
- [46] H. L. McIntyre, J., Spatari and S., MacLean, “Environmental Implications of Closing the Concrete Loop,” *J. Infrastruct. Syst.*, vol. 15, no. 4, pp. 361–370, 2009.
- [47] L. M. Herstein, Y. R. Filion and K. R. Hall, “Evaluating Environmental Impact in Water Distribution System Design,” *J. Infrastruct. Syst.*, vol. 15, no. 3, pp. 241–250, Sep. 2009.
- [48] L. Nguyen, G. Y. Hsuan and S. Spatari, “Life Cycle Economic and Environmental Implications of Pristine High Density Polyethylene and Alternative Materials in Drainage Pipe Applications,” *J. Polym. Environ.*, pp. 1–23, Oct. 2016.
- [49] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz and B. Weidema, “The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 21, no. 9, pp. 1218–1230, Sep. 2016.
- [50] S. Spatari, M. Betz, H. Florin, M. Baitz and M. Faltenbacher, “Using GaBi 3 to perform Life Cycle Assessment and Life Cycle Engineering,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 6, no. 2, pp. 81–84, 2001.
- [51] “Life Cycle Assessment (LCA) Software - Sphera.” [Online]. Available: <https://sphera.com/life-cycle-assessment-lca-software/>. [Accessed: 03-Feb-2021].
- [52] “Anthropogenic and Natural Radiative Forcing — IPCC.” [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/anthropogenic-and-natural-radiative-forcing/>. [Accessed: 03-Feb-2021].
- [53] M. A. J. Huijbregts *et al.*, “ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 22, no. 2, pp. 138–147, Feb. 2017.

Abstract

Corrosion of steel reinforced concrete is one of the major deterioration mechanisms causing economic and social losses. There are currently numerous strategies available for increasing the service life of reinforced concrete structures, especially those exposed to chloride attack, including the use of (a) low-permeability (high-performance) concrete, (b) chemical corrosion inhibitors, (c) protective coatings on steel reinforcement (e.g. epoxy-coated or galvanized steel), (d) corrosion-resistant steel (e.g. stainless steel), (e) non-ferrous reinforcement (e.g. fiber-reinforced plastics), (f) waterproofing membranes or sealants applied to the exposed surface of the concrete, (g) cathodic protection (applied at the time of construction), and (h) combinations of the above.

The present project deals with the strategies (a) and (b) and their combination. In particular, the project studies the effect of each strategy and their combination, while the focus is given on application of different chemical admixtures, which can serve as either inhibitors or plasticizers (or both, such as LABS²-based products manufactured in Israel).

The goal of the project was to develop the best strategy of corrosion protection of reinforced concrete made with the same w/c ratio and containing different types of chemical admixtures and estimate an improvement in its economic and environmental performance using life cycle assessment (LCA).

The new accelerated laboratory method of evaluating the corrosion potential of reinforced concrete subjected to chloride attack and electrical voltage is developed. The experimental results obtained by the authors are close to those by the analytical model developed by I. Lapiro; they allowed predicting the service life of the specific type of mortar studied in the lab by extrapolation to the lower voltages observed in natural conditions.

It was found, that at lower electrical current/voltage, the benefits of using migrating corrosion inhibitor improve. Under natural environmental conditions introduction of migrating corrosion inhibitor in the mix can extend the service life of reinforced concrete by ~80%.

Although inhibitors improve the corrosion resistance of reinforced concrete, they should not be applied at the expense of the concrete quality defined by the Israeli Standards 118 and 466.

² Linear Alkyl Benzene Sulphonate



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

מיסודם של
משרד הבינוי והשיכון
הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

המכון הלאומי לחקר הבנייה
National Building Research Institute



20267716

Integrated approach to extend the life cycle of reinforced concrete structures

Assoc. Prof. Konstantin Kovler Eng. Igor Lapiro

Assoc. Prof. Sabrina Spatari Eng. Boris Dashevsky

Dr. Alexander Mezhov

Copyright © 2021 by K. Kovler and I. Lapiro, S. Spatari,

B. Dashevsky, A. Mezhov, The Israel Ministry of Construction and Housing and the Technion
Research and Development Foundation Limited, Haifa

Haifa

June 2021

