



מיסודם של
משרד הבינוי והשיכון

הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

המכון הלאומי לחקר הבנייה
National Building Research Institute

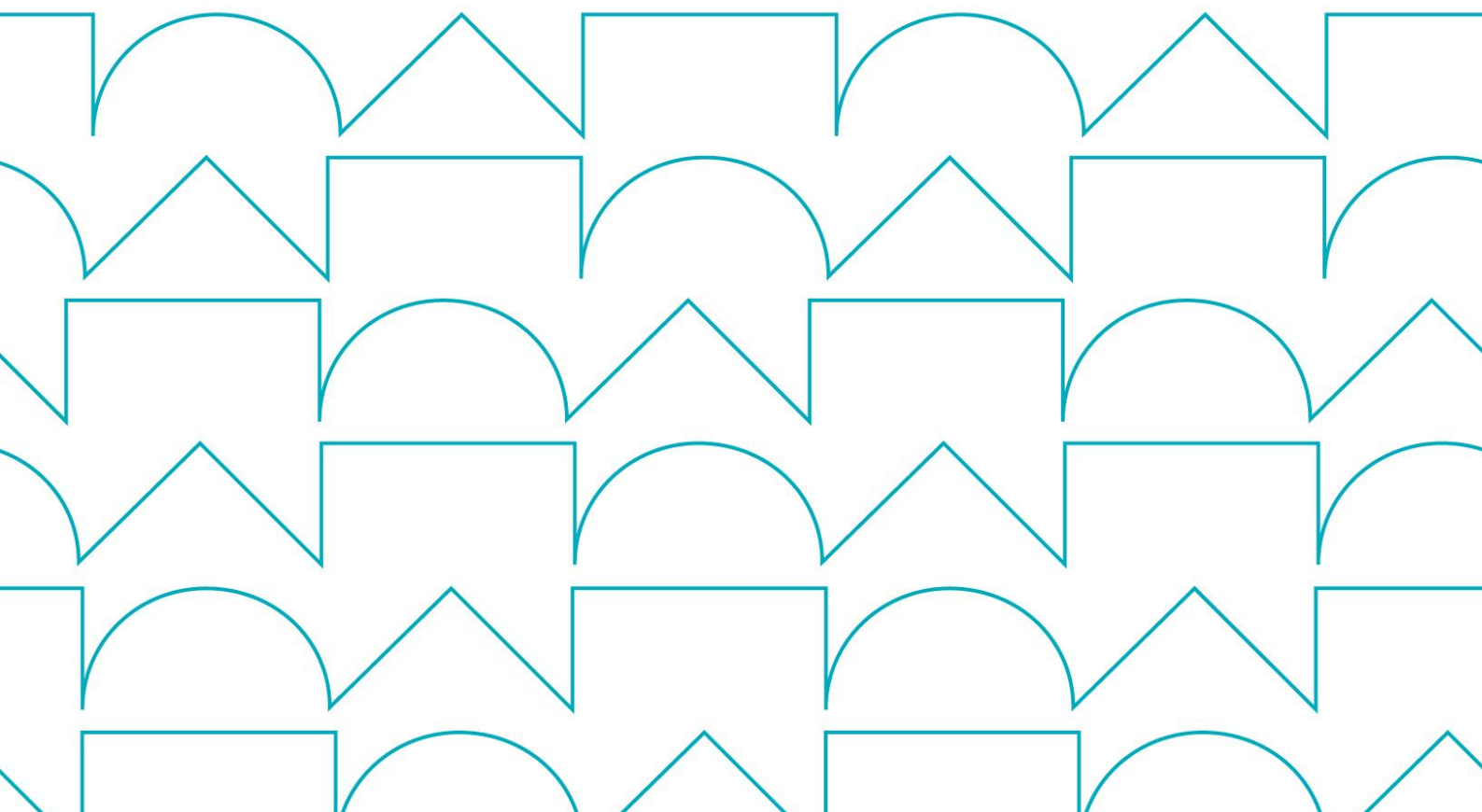


כשלים במבני בטון מזוין בעקבות חשיפה לזרמים תועים

איגור לפירו

רמי עיד

קוסטה קובלר





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



2031518

כשלים במבני בטון מזוין בעקבות חשיפה לזרמים תועים

פרופ' קוסטה קובלר פרופ"ח רמי עיד אינג' איגור לפירו

מלווי מחקר : אינג' יונתן אופק אינג' מנחם קניגסברג אינג' נחמיה מסורי

בהזמנת משרד הבינוי והשיכון
מס' הזמנה 4501609646

Copyright © 2025 by K. Kovler, R. Eid and I. Lapiro
The Israel Ministry of Construction and Housing and the Technion Research and
Development Foundation Limited, Haifa

December 2024

Haifa

המכון הלאומי לחקר הבנייה, קריית הטכניון, חיפה 3200003, ישראל | המכון הלאומי לחקר הבנייה, Technion City, Haifa 3200003, Israel
e-mail: nbri@tx.technion.ac.il | טל. 972-4-8292242/3 | פקס. 972-4-8324534
<http://nbri.net.technion.ac.il>

הכרת תודה

עבודת מחקר זו מומנה על ידי משרד הבינוי והשיכון, מדינת ישראל, ועל כך תודתנו.

כמו כן, ברצוננו להודות לאינג' אלחנן יצחק, מר אדי גרשנגורן ולכל חבר צוות טכני של המכון הלאומי לחקר הבנייה על הסיוע המסור והנאמן במהלך כל המחקר, לגב' הדר הלפרין מחברת ניצוץ על התרומה בהספקת מעכב קורוזיה ולחברת שפיר על שיתוף הפעולה בביצוע בדיקות באתר רכבת קלה בירושלים.

תוכן עניינים

6	מבוא
9	1. היקף המחקר
10	2. שיטות ניסיוניות
10	2.1 מדידות מתח תועה בתנאי שדה
10	2.2 מדידת מתח תועה בתנאי מעבדה
11	2.3 השפעת מתח חשמלי על עמודי בטון מזויין
15	2.4 חומרים
16	2.5 יציקה ואשפרה
16	2.6 בדיקת החדירות של יוני כלוריד
17	3. תוצאות
17	3.1 מדידת מתח חשמלי תועה בתנאי שטח
19	3.2 מדידת מתח תועה בתנאי מעבדה
20	3.3 התנהגות אלקטרוכימית של עמוד בטון מזויין
21	3.4 השפעת הקורוזיה על עמוד הבטון מזויין ללא עומס צירי
22	3.5 דיאגרמות עומס-עיבור לחיצה צירי של העמודים החשופים למחזורי הרטבה ויבוש
24	3.6 דיאגרמות עומס-עיבור לחיצה צירי של העמודים החשופים למתח חשמלי של 18 וולט
24	3.7 דיאגרמות עומס – עיבור לחיצה צירי של העמודים החשופים לשילוב עומס צירי של 60% ומתח חשמלי של 9 וולט
28	3.8 השוואת שיעורי קורוזיה במוטות חיזוק בטון : ניתוח המבוסס על שינוי מסה
30	3.9 השפעת מחזורי הרטבה וייבוש על פוטנציאל חצי תא והתנגדות חשמלית פני השטח
32	3.10 שינויים בקצב קורוזיה עקב שינוי ריכוז כלוריד ועובי הכיסוי הבטון
36	3.11 חדירות כלוריד בשיטה קולורימטרית
38	3.12 קביעת ריכוז יוני כלוריד על ידי טיטרציה
38	3.13 השפעת יישום של מעכבי קורוזיה על פני השטח
38	3.14 חדירות כלוריד בשיטה קולורימטרית במדגמים שעברו טיפול עם מעכב קורוזיה
39	4. דיון בתוצאות
41	5. מסקנות
42	6. מקורות

רשימת האיורים

- איור 1: חיבור ומדידה של מתחים תועים בסביבת רכבת קלה 10
- איור 2: (א) מערך בדיקה ראשי (ב) מכשור המדידה; (ג) כלוב זיון בדגימות עמודות (מידות במ"מ)..... 12
- איור 3: (א) דגימות לבחינת השפעת עובי הכיסוי וריכוז הכלוריד; (ב) מערך בדיקה לבחינת עובי הכיסוי וסף הכלוריד 12
- איור 4: מדידות מתח תועה בתנאי שטח, בחודשי הקיץ 18
- איור 5: מדידות מתח תועה בתנאי שדה, בחודשי החורף 19
- איור 6: מדידת מתח קרקע מבוקרת: (א) שינוי המרחק בין המסילה לנקודת הקליטה; (ב) שינוי מתח כאשר המסילה ונקודת הקליטה קבועות 20
- איור 7: מדידות התנהגות אלקטרוכימיות במערכת 3 אלקטרודות עם מתחים חיצוניים של 9 וולט 21
- איור 8: דיאגרמות עומס צירי-תזוזה של העמודים החשופים למתח של 9 וולט 22
- איור 9: שינוי עיבור בתוך הליבה של המדגם: (א) בטון ב-30; (ב) בטון ב-60 23
- איור 10: עומס לחיצה כנגד עיבורים של מדגמים לאחר מחזורי הרטבה וייבוש: (א) עומס כנגד עיבור אורכי; (ב) עומס כנגד עיבור רוחבי 24
- איור 11: דגימות שנחשפו למתח של 18 וולט בתמיסת מלח לתקופה של 28 ימים ובדיקת לחיצה 25
- איור 12: התפתחות עיבורים 5 ימים ראשוניים ללא מתח חשמלי, ולאחר מכן 28 ימים מתחת ל-18 וולט בבטון: (א) ב-30; (ב) ב-60 26
- איור 13: עומס לחיצה צירי כנגד כוח עיבור של מדגם לאחר חשיפה ל-18 וולט-60% יכולת נשיאת עומס (ב) דיאגרמת עיבור רוחבי כפונקציה של כוח צירי 27
- איור 14: דיאגרמות עומס לחיצה צירי - עביר של דגימות הייחוס (P0_1-3), הדגימות שנחשפו למתח חשמלי של (PV9_L0_1-3) V 9; והדגימות שנחשפו לשילוב של עומס שירות של 1200 קילו-ניוטון ומתח חשמלי של (PV9_L120_1-3) V 9 28
- איור 15: תצלום של המוטות שהוסרו מדגימת SCS 30
- איור 16: השוואה בין פוטנציאל חצי תא ושינוי התנגדות חשמלית עקב מחזורי הרטבה וייבוש: בהשוואה למצב יבש קבוע: (a) NSC ו-(b) MSC 31
- איור 17: שינוי הפוטנציאל החשמלי עקב שינוי ריכוז הכלוריד: (א) בטון ב-60; (ב) בטון ב-30 35
- איור 18: תוצאות בדיקה קולורימטרית בחתכים טריים של דגימות מבטון: (א) בטון ב-60; (ב) בטון ב-30; (1-3) - דגימות עם מוט בעל קוטר של 8 מ"מ; (4-6) - דגימות עם מוט בעל קוטר של 12 מ"מ 37
- איור 19: תוצאות בדיקה קולורימטרית בחתכים טריים של דגימות מבטון ב-60 שעבר טיפול באמצעות מעכב קורוזיה; (1-3) - דגימות עם מוט בעל קוטר של 8 מ"מ; (4-6) - דגימות עם מוט בעל קוטר של 12 מ"מ 39

רשימת הטבלאות

- טבלה 1 : סיכום מספר הדגימות והטיפול בהן 13
- טבלה 2 : רכבי בתערובות הבטון ותכונותיהן 14
- טבלה 3 : תכונות מכניות של מוטות הזיון הרחביים והאורכיים לא קורוזיביים 14
- טבלה 4 : מדידות אובדן מסה של מוטות חיזוק בדיקת קורוזיה מואצת. 28

תקציר

מחקר זה בוחן את ההשפעה הפוטנציאלית ואסטרטגיות הגנה מפני קורוזיה הנגרמת על ידי זרמים חשמליים תועים במבני בטון מזוין. המחקר כלל בחינת זרמים תועים בתנאי סביבה אמיתיים ויישום ממצאים אלה על מודלים המדמים עמודי בטון מזוין. פרמטרים מרכזיים שנחקרו כללו עובי כיסוי, תכולת פלדת הזיון והמרחק ממקור הזרם התועה.

הממצאים מדגישים ששמירה על מרחק בטוח ממקורות של זרמים תועים, כגון מסילות ברזל, היא חיונית להגנה על מבני בטון מזוין. על פי התקנים הנוכחיים, ניתן להשיג הגנה אופטימלית על ידי שמירה על מרחק של 50 מטר מרכבות תחתיות ו-300 מטר מהרכבת על הקרקע, אם כי מרחקים אלו עשויים להיות מאתגרים ליישום בסביבות עירוניות. בקרבה (עד 7 מטר), אמצעי הגנה פסיביים כמו הגדלת עובי כיסוי הבטון או שימוש בבטון בעל חוזק גבוה יותר הוכחו כלא יעילים, מה שחייב טכניקות הגנה אקטיביות כגון הגנה קתודית.

בטווח של 15-30 מטר, שיטות קונבנציונליות המשמשות להגנה מפני קורוזיה הנגרמת מכלוריד, כגון עובי כיסוי מוגבר או שימוש במעכבי קורוזיה, הן בדרך כלל יעילות מכיוון שעוצמת התגובות האלקטרוכימיות דומה. עם זאת, בניגוד לחשיפה רציפה לכלוריד, משך החשיפה לזרמי תועה הוא בדרך כלל קצר יותר, מה שמציע יתרון מסוים בתרחישים אלה.

קורוזיה של מוטות זיון עקב זרמים תועים מפחיתה באופן משמעותי את מודול האלסטיות בעמודי בטון מזוין, ומשפיעה לרעה על יכולת העיוות ועל יכולת נשיאת העומס שלהם. ניתן למתן את ההשפעות המזיקות הללו על ידי שימוש בבטון בעל חוזק לחיצה גבוה יותר. המחקר מצא גם שתגובות אלקטרוכימיות מתחילות במהירות, ללא קשר לעובי או חוזק כיסוי הבטון, אך קצב ההתאוששות מושפע לטובה מגורמים אלו. שיפור כיסוי הבטון וחוזקם יכול להאיץ באופן משמעותי את תהליך ההתאוששות, ובכך לספק הגנה חזקה מפני קורוזיה הנגרמת על ידי זרם תועה.

מבוא

האיום הגדול ביותר על בטון מזוין והבעיה המרכזית עימה מתמודדים חוקרים, מהנדסים ובעלי מלאכה בשטח היא קורוזיה של פלדת הזיון אשר מובילה לסדקים, כתמים וקילוף כיסוי הבטון (spalling – התנתזות). אלו בתורם מובילים לפגיעה באסתטיות, יציבות ובטיחות המבנים. היווצרות קורוזיה באלמנטים מבטון מזוין גורמת להפסד כלכלי משמעותי הן מההיבט המניעתי והן מההיבט הטיפולי ועלולה לפגוע בקיימות באמצעות בזבז משאבי טבע קיימים [1]. עלות התמודדות עם נזקי הקורוזיה במבנים מבטון מזוין בפרט מהווה כ-10% מכלל עלויות ההתמודדות עם נזקי הקורוזיה העולמית שמוערכת בכ-2.5 טריליון דולר ארה"ב, שווה ערך ל-3.4% מהתמ"ג העולמי לשנת 2013 [2,3]. עלות זו כוללת בתוכה עלויות הכרוכות במניעת קורוזיה, בתיקוני נזקים שכבר התרחשו, במעקב ובבקרה בהתפשטותה. באמצעות בקרת קורוזיה, על פי ההערכה, ניתן להשיג חיסכון של בין 15% ל-35% מעלות ההתמודדות עם נזקי הקורוזיה, כלומר בין 37.5 ל-87.5 מיליארד דולר בשנה על בסיס גלובלי. עלויות אלה בדרך כלל אינן כוללות נזק הגורם לבעיות בטיחות כגון ההפחתה בתסבולת האלמנטים או נזק סביבתי הנגרם למשל מחוסר יכולת מחזור תוצרי קורוזיה [3]. קורוזיה עלולה להוביל לכשלים מבניים כאשר המבנה נקלע למצבי חרום כגון רעידת אדמה היות ובעת התכנון בליה מסוג זה לא נלקחת בחשבון [4]. מדינת ישראל נמצאת באזור עם פעילות סיסמית היכולה להוביל לרעידת אדמה בעוצמה גבוהה [5]; שילוב עם קירבה לים התיכון ורמות הקורוזיה הגבוהות השוררות באזור עקב ריכוזי כלורידים מוגדלים באטמוספירה יכול להוביל לאסון לאומי בעקבות אי עמידות המבנים. מעבר לזאת, בימים אלו במדינת ישראל יש השקעה רחבת היקף להקמת מערכות לתחבורה חשמלית ציבורית (הסבה של הרכבת לרכבת חשמלית, מערך רכבות קלות ומטרו). ידוע שבסמוך למסילות רכבת חשמלית לדוגמא, קיים זרם תועה אשר מעלה את קצב הקורוזיה בכללי ובאלמנטי בטון מזוין בפרט [6]. בעקבות פעילות הקמת מערכות לתחבורה שפורטה לעיל, וכיוון שלא היה קיים תקן מתאים בחוק, נאלצו המתכננים לאמץ תקנים בין לאומיים לזרמים תועים, התקנים הללו בעלי דרישות שכיום לא מישמות בפועל עקב אי יכולת לעמוד בהם כגון הרחקה ל-3000 מטר מהמסילה [7]. כיום המודלים הקיימים לחיזוי חיי שירות של מבני בטון מבוססים בעיקר על 2 עקרונות של תכונות הבטון- חדירות לכלורידים וקרבוניצה. זאת ללא התחשבות בסוג הפלדה, כמות הפלדה, העומסים המופעלים על האלמנט והפוטנציאל החשמלי ששורר בסביבתם [11] [10] [9] [8]. שני עקרונות אלה אומצו על ידי תקנים לאומיים ועל פיהם משך חיי השירות מוגבל בדרך כלל באמצעות תנאי סביבה וטיב הבטון שמגן על הפלדה. אם נעקוב אחר מצב אותו מבנה לאורך מספר שנים נראה שהכשל העיקרי נוצר בעקבות נוכחות קורוזיה המופיעה כבר לאחר 25 שנים ולא לאחר 50 שנים כצפוי על פי המתכנן [12]. ידוע שסביבה אלקלית של בטון מגנה על הפלדה על ידי יצירת שכבת פסיבציה המונעת את כניסתו של החמצן לתוך הפלדה ובכך אמורה למנוע את תהליך הקורוזיה, ולמרות זאת בפועל אנו עדים להיווצרות קורוזיה בסביבה זו. ניתן להסביר זאת במספר מישורים:

(א) במישור של טמפרטורה: קצב התפתחות קורוזיה של פלדה המצויה בתמיסה חומצית מכפיל את עצמו כל 10 מעלות בטווח טמפרטורות של $15-70^{\circ}\text{C}$ [13].

(ב) במישור של מאמצים השרויים באלמנט: המאמץ שמתקיים בפלדה הינו גורם שיכול להשפיע על תהליך הקורוזיה ולהרוס את שכבת הפסיבציה. רוב המחקרים בוחנים את השפעת הקורוזיה על התנהגות הפלדה אך לא נערכו מחקרים שבוחנים את השפעת המאמץ על קצב הקורוזיה. יש עדויות ששכבת הפסיבציה אינה יציבה כאשר קיימת הגדלה בעיבורים פלסטיים. במצב זה קצב היווצרות סרט הפסיבציה גדל עקב מעבר חופשי של חמצן ותגובתו הכימית עם הפלדה [14].

(ג) במישור פוטנציאל חשמלי השורר בסביבת האלמנט או זרם תועה: על פי דיאגרמת Pourbaix ידוע כי לפוטנציאל חשמלי יש השפעה על תהליך הקורוזיה [15]. את השפעתם של זרמים תועים ניתן לפגוש בסביבתם של רכבות חשמליות. למשל, רשות התחבורה בשיקגו מציינת שלמרות שעוגני מסילה מתוכננים לחיי שרות של 25 שנים, כבר כעבור 6 חודשים בלבד נצפה בהם נזק משמעותי הדורש טיפול [16]. אישוש ממצאים אלו הודגם בעבודתם של חוקרי טכניון בהנחיית פרופ' קובלר שהראה שבסביבת מתח חשמלי של 1.2 וולט נצפתה סדיקה בבטון מזויין כעבור 54 ימים בלבד ולא כמתוכנן כעבור 50 שנה. מעבר לכך, במתח חשמלי של 32.5 וולט הסדיקה מתרחשת כעבור 6 שעות בלבד. ברכבות המהירות הזרם התועה שיכול לזלוג למבנים סמוכים יכול להגיע לערכי מתח גבוהים הרבה יותר [17].

לא רק פלדה אלא גם אלמנטים מבטון מזוין עלולים להינזק על ידי זרמים תועים או נוכחות של כלורידים. מחקר שבדק את ההשפעה של זרם תועה על שטיפת סידן של חומרים מבוססי צמנט הגיע למסקנות הבאות: חוזק הלחיצה של חומרים מבוססי צמנט יורד הכי הרבה, שהוא נמוך ב-13.7% מזה של דגימות שנאכלו מתחת ל-0 V [18]. זרמים תועים יכולים לגרום לאפקט הגירה המאיץ את קצב הכניסה של יוני SO_4^{2-} , מה שמוביל להתקפת סולפט חיצונית חמורה על חומרים מבוססי צמנט. התקף זה מביא להיווצרות אטרינגיט וגבס, אשר בסופו של דבר גורם לסדקים ולהפחתה משמעותית בחוזק, עד 47.1% [19]. זרמי תועה יכולים להגביר את חדירת הכלוריד ובכך להשיג את סף הכלוריד הקריטי שלהם בתקופה קצרה יותר אשר יאיץ תהליך קורוזיה והנזקים הכרוכים בכך [20,21]. בשל כך, בפועל, העלויות הכספיות גבוהות בהרבה מהמדוע. עם זאת, קיימים מאמצים לבודד עלויות אלו מאלה של קורוזיה הנגרמת מתנאי סביבה טבעיים כגון יוני כלוריד או סולפט במים, המאיצים את החלדת הברזל. כאשר ברזל מחליד בנוכחות יוני סולפט, הוא יוצר ברזל (II) סולפט מסיס. עם אידוי מים, מלחי ברזל (II) גופרתי שונים עשויים להתגבש. עם זאת, בנוכחות אוויר לח, ברזל (II) סולפט עובר תגובה עם חמצן ומים ליצירת הידרוקסידים של תחמוצת ברזל, ששוקעים. תגובה זו משחררת חומצה גופרתית, ומקלה עוד יותר על יוני סולפט להנציח את מחזור הקורוזיה על ידי תקיפת הברזל. כמה יוני סולפט מוסרים מהמים כשהם מתאחדים עם שכבת החלודה, ויוצרים תרכובות בלתי מסיסות יחסית כמו ברזל (III) הידרוקסיד סולפטים או ג'ארוסיט אם קיימים יוני נתרן או אשלגן. ההיבט הקריטי של מחזור זה הוא שיוני כלוריד יוצרים מלח מסיס עם יוני ברזל (II). המסיסות הזו היא שמאפשרת לתהליך הקורוזיה להמשיך. אם מלח הברזל כלוריד לא היה מסיס, הוא היה מזרזף החוצה, עוצר את המחזור [22].

האינטראקציה בין זרמים תועים ואלמנטים מבטון מזוין כבר מזמן דאגה בתחום הנדסת הקורוזיה. כאשר זרמים תועים חודרים למטריצת הבטון, הם יוזמים תגובות אלקטרוכימיות שמאיצות את תהליך הקורוזיה של זיון פלדה מוטבע. תופעה זו, המכונה קורוזיה אלקטרוכימית, מערערת את השלמות המבנית של אלמנטים בטון, ועלולה לפגוע בבטיחות ובאורך החיים של התשתית [23]. קיומו של שדה חשמלי שנוצר על ידי רכבת מזרז את הידרדרותם של חומרים מבוססי צמנט עקב התקפת סולפט, וגורם לשינויים ניכרים תוך מספר חודשים. עם הזמן, רמת ההידרדרות הסלימה, כשיחסי מים-צמנט גבוהים יותר שהביאו לקצבי השפלה מהירים יותר. בסביבה של אדמה, נוכחות השדה החשמלי הגבירה את התנועה של יוני סולפט, והראתה נדידה גדולה פי 2-4 בערך בהשוואה למצבים חסרי שדה חשמלי [10]. כדי לחקור תרופות אפשריות, נחקרה ההשפעה של סיגים ואפר פחם מרחף על התקפות הנתרן סולפט של משחות מלט תחת זרם חשמלי מתמשך. התוצאות הצביעו על כך שהחלפה של 30% בלבד של אפר פחם הוכחה כלא יעילה בהפחתת התקיפה הכוללת, והצריכה החלפת סיגים של לפחות 50%. עם זאת, חשוב לציין שבעוד שהחלפה זו הראתה יעילות מסוימת, הסרת הסיד עשויה להופיע כמנגנון דומיננטי בתהליך הפירוק [24].

קורוזיה היא ביסודה תגובה אלקטרוכימית הכוללת שלושה יסודות עיקריים: הקתודה, האנודה והאלקטרווליט, אשר בדרך כלל הינו בצורה של מים בנקבוביות הבטון. אם אחד מהרכיבים הללו חסר, תהליך הקורוזיה עלול להיעצר. תקנים בינלאומיים, כמו [25] ו-[26], מספקים קווים מנחים להפחתת ההשפעות של זרמי תועה במבני בטון מזוין. הם ממליצים להגביל את תנודות המתח החשמלי הנגרמות על ידי זרמים תועים למקסימום של 0.2 וולט. עם זאת, יישום הנחיות אלה עשוי להיות מאתגר. הסיבה לכך היא שבטון מזוין לרוב מציג באופן טבעי פוטנציאלים חשמליים בטווח של 0.78 עד 0.48 וולט לעומת SCE (Standard Calomel Electrode), מה שהופך את הניטור והיישום של תקנים אלה למורכבים [27–29]. בתקן הדין בהגנה מפני זרמי AC [26], שיטת הגנה נוספת מוזכרת שיכולה להיות יעילה גם עבור זרמי DC. לגבי מרחק ההפרעה לתנאי הפעלה רגילים במערכות הפועלות מעל פני הקרקע: באזורים כפריים, מאופיין בצפיפות נמוכה של מבנים מתכתיים מקומיים במגע חשמלי ישיר עם הקרקע, ולהתנגדות קרקע מתחת ל- $3,000 \Omega m$, מרחק הפרעה של 1,000 מ' יש לקחת בחשבון בין המערכת המפריעה למערכת הצינורות המתכתיים. במקרים בהם ערך התנגדות הקרקע גדול מ- $3,000 \Omega m$, ערך מרחק ההפרעה, במטרים, צריך להיות שווה לערך התנגדות הקרקע, ב- $3 \Omega m$, חלקי 3. באזורים עירוניים, המכילים צפיפות גבוהה של מבנים מתכתיים במגע חשמלי ישיר עם הקרקע, כגון צינורות מים, כבלים עם מעטפות מתכת חשופות, פסי רכבת ומבני הארקה של מבנים, תרנים ויסודות, מרחק ההפרעות הנ"ל עשוי להיות מופחת. הפחתה זו צריכה לשקול גורם ממתן סביבתי של המבנים המתכתיים הקיימים באזורים אלה. עם זאת, מרחק ההפרעות לא צריך להיות פחות מ-300 מ'. עבור מערכות תת-קרקעיות עם מערכות חשמל A.C, מרחק ההפרעה צריך להיות 50 מ' [26]. קורוזיה של מוטות פלדה היא הגורם העיקרי לכשלים באלמנטים מבניים העשויים מבטון מזוין כפי שצוין קודם. כיום לא ניתן למנוע אותו לחלוטין אלא רק לעכב מעט את התפתחותו [2]. הפתרון החלקי להגנה מפני תהליך הקורוזיה של מוטות פלדה בבטון מזוין הוא על ידי הגדלת עובי כיסוי הבטון, ובכך בעצם הגדלת נפח הסביבה האלקלינית בה נמצא מוט הפלדה ומתן מרחק הגנה גדול יותר. יוני הגז והכלוריד חייבים לעבור כדי להגיע לממשק בטון-מוט. אולם, עקב הסדקים הקיימים בבטון, שני התהליכים (חדירת יוני כלוריד והפחתת הבסיסיות) מואצים וכך עובי הכיסוי לא ממש מספק הגנה ליסוד [30]. לאחר הופעת קורוזיה, ניתן לצפות לאובדן חוזק הקשר בין הבטון למוט הפלדה ולהפחתה בשטח החתך של מוטות הפלדה. היווצרות תחמוצת ברזל עלולה להוביל לתופעות לוואי לא רצויות נוספות (כגון התרחבות החומר), שיובילו להגברת הסדקים המקבילים ואף לניתוק חלקי הבטון מהאלמנט המבני [9,31]. הוכח כי קורוזיה פלדת הזיון הובילה לירידה בעומס הצירי הסופי ולעלייה הן במתיחות הצירית והן במתיחות הציידית של עמודי RC ללא עומס שירות. בשילוב עם עומס שירות באותם ערכי קורוזיה, הקיבולת האולטימטיבית הציגה ערכי חוזק גבוהים יותר מהדגימות ללא עומס בשילוב עם קורוזיה של מוטות הזיון [32]. מצד שני, בכל שילוב של קורוזיה, ערכי חוזק הלחיצה הצירי היו נמוכים מדגימות ייחוס ללא קורוזיה [32]. כליאת עמודים לא מספקת וקורוזיה של פלדת הזיון זוהו כחלק מהבעיות הקיימות בתוך מבנים כאלה. לבעיות יש גורמים מוגברים להתאים מודלים קיימים לניבוי חוזקות של עמודי בטון מזוין והערכה שגויה. המיקום והכיוון של המוטות הפלדה משפיעים על קצב הקורוזיה עקב זרמים תועים וקורוזיה בכלל. הוכח שלפסים המקבילים לזרם התועה יש פוטנציאל קורוזיה גבוה יותר מאלו הניצבים לזרם התועה [33]. בנוסף, לעובי כיסוי הבטון יש השפעה על הקורוזיה הנוצרת במוטות פלדה ואופן פיזור לשאר המוטות [34]. כל מתכת שמחוברת חשמלית לבטון או לזיון הפלדה תיפגע מזרם תועה, שיפרוק איפשהו במסעו חזרה למקור. במקום שבו הזרם נפלט מתרחשת קורוזיה. התקנת קשרי התנגדות היא טכניקה מוכחת אחת למניעת סוג זה של קורוזיה, אשר שימשה במשך שנים רבות בעסקי צינורות קבורים. חיבור התנגדות כרוך בחיבור חשמלי של

המבנה המושפע למקור הזרם התועה באמצעות כבל שחוזר למסילה. זה מבטיח שהזרם עוקב אחר נתיב מתכתי בחזרה למקורו, ומונע מכל מתכת מהמבנה הפגוע ללכת לאיבוד [16,35]. אנודות גלווניות משמשות בטכניקה שונה כדי לכוון את הזרם שנאסף. הזרם שנאסף נשלח אל האלקטרוליט (מי התהום), שם הוא מופנה בחזרה למקורו מפני השטח של האנודה. במקום שזיון הפלדה יתכלה במקרה זה, האנודה הגלוונית עושה זאת. אלקטרודת הפריקה הנוכחית חייבת לספק את הנתיב של ההתנגדות הקטנה ביותר למקור, ולכן תכנון נכון של מערכת, התקנה ותחזוקה הם חיוניים [35]. כאשר מסתכלים על הסטנדרטים הדנים בתכנון בטון מזוין, איננו יכולים למצוא שום התייחסות להגנה מפני זרמים תועים. מצד שני, ניתן למצוא התייחסות העוסקת בסביבה עשירה ביוני כלוריד [35–37]. מחקרים קודמים בדקו בדרך כלל קורוזיה מואצת מבלי להתייחס להשפעות של עובי כיסוי הבטון בתנאי זרמים תועים. השפעת זרם תועה על עיוותים של היסודות לפני העמסה ויצירת סדקים עדיין לא נחקרת, כמו גם השפעת כמות הפלדה על התפתחות הקורוזיה. מטרת מחקר זה היא לנסות לגשר על פערים אלו ולחזק את הידע על מנגנוני קורוזיה של פלדת הזיון בבטון בפעולה משולבת של העמסה מכנית, חדירת כלוריד וזרם תועה. מחקר זה נערך כדי לבחון את ההיתכנות של ניצול כלים ושיטות קיימים המתוארים בתקני בטון מזוין, כגון שינוי עובי הכיסוי, שינוי סוג הבטון המשמש ומוספים כימיים (מעכבי קורוזיה), כדי לטפל בסוגיית הקורוזיה הנגרמת על ידי זרמים תועים. המטרה הייתה להעריך האם ניתן ליישם או להתאים ביעילות את שיטות העבודה הסטנדרטיות הללו כדי להפחית את האתגרים הספציפיים הנובעים מהקורוזיה המושרה בזרם תועה במבני בטון מזוין.

1. היקף המחקר

מטרת מחקר זה הינה לבחון את השפעתם של זרמים תועים על אלמנטי בטון מזוין תחת מאמץ לחיצה צירי המדמים את תנאי השירות של יסודות ועמודים במפלס הקרקע בתנאים טבעיים. כמו כן, המטרה היא להגדיר את טווחי הביטחון שהם: גודל מתח חשמלי מקסימלי המאפשר תפקוד תקין של האלמנט המצוי בקרבת תשתית חשמלית המבטיח תנאי שירות על פי הגדרת המבנה. מעבר לזאת, נציע אמצעי הגנה פסיביים אפשריים שיבטיחו כאמור את תנאי השירות הללו. במחקר זה נתבסס על בחינת השפעות של מאפייני בטון כגון חוזק הבטון בלחיצה ועובי כיסוי. נבחן את השפעת התנגדות הבטון על קצב דגרדציה (בליה) כללית של האלמנט ונבחן שימוש במוספי בטון קיימים כגון מעכב קורוזיה.

כמו כן, המטרה שלנו להגדיר ולאפיין תנאי סביבה של זרם תועה בדומה לתנאי סביבה אחרים שמצויינים בתקן 466 ו-118. תוצאות מחקר זה יתנו הערכה כמותית ואיכותית לגבי הדרדרות של אלמנטים מבטון מזוין בסביבת זרמים ומתחים תועים. כמו כן התוצאות יהוו מצע לכתיבת תקינה לבנייה בסביבת זרמים תועים. ובנוסף, נמליץ על אופן הגנה פסיבית המבוססת על תכונות הבטון ללא תלות במערכות משלימות כגון הגנה קתודית. בטווח הקצר – נבחן את תסבולת השארית של האלמנטים שיחקרו בתנאי מעבדה במסגרת מחקר זה, זאת על מנת לבחון את בטיחות השירות אחרי חשיפה לזרמים תועים. מעבר לזאת, נבחן ונמליץ על מנגנוני הגנה פסיביים להתגוננות שיתבססו על שינוי הרכב ותכונות הבטון. בטווח הרחוק – ניתן יהיה להגדיר בתקן את אופן ההגנה מרשמית על מבנים שחשופים לזרמים תועים ולהגדיר תנאי חשיפה אלו בתקן 466 ו-118.

בנוסף, ניתן יהיה לחסוך במשאבים ולהגביר את בטיחות התווי רכבות קלות וכבדות המונעות באמצעות תשתית חשמל ובתשתיות חשמליות חדשות שעתידות להיבנות במדינת ישראל. היות ותשתיות אלה משתרעות על שטח גדול מאוד, כמות גבוהה של מבנים מבטון מזוין עתידות להיות חשופות לזרמים תועים. על בסיס תוצאות מחקר זה נלמד כאמור את השפעותיהם של זרמים תועים על מבני בטון מזוין ונגדיר הנחיות התגוננות.

2. שיטות ניסיוניות

2.1. מדידות מתח תועה בתנאי שדה

בהתאם ל-EN 50122, נערך ניסוי לחקור את ההשפעה של זרמי תועה על מבני בטון סמוכים. המתודולוגיה כללה מדידת מתחים במרחקים של 3.5, 7, 15 ו-30 מטרים ממסילת הרכבת (איור 1). הציוד שבו נעשה שימוש כלל מד מתח בעל עכבה גבוהה המסוגל ללכוד במדויק את טווח המתח הצפוי, לוגר נתונים המחובר למחשב ואלקטרודות ייחוס נחושת/סולפט נחושת למדידת מתח. כבלים ומחברים הבטיחו חיבורים מאובטחים בין האלקטרודות ומד המתח. אל המסילה הוצמדה אלקטרודה, שהייתה מוליך נירוסטה 314. אלקטרודות הייחוס הונחו לתוך האדמה במרחקים שנקבעו מראש. לפני תחילת מעברי הרכבת, נרשמו מדידות מתח בסיס בכל מקום כדי לקבוע נקודת ייחוס. כשחלפו רכבות, נמדדו מתחים כדי ללכוד את הווריאציות שנגרמו מתנועות הרכבת. תהליך זה חזר על עצמו מספר פעמים במשך שעה רצופה, שכללו 10 רכבות שעברו לכל כיוון. החברה האחראית לתפעול ותחזוקת הרכבת ערכה את המדידה במרחק של 15 ו-30 מטר.

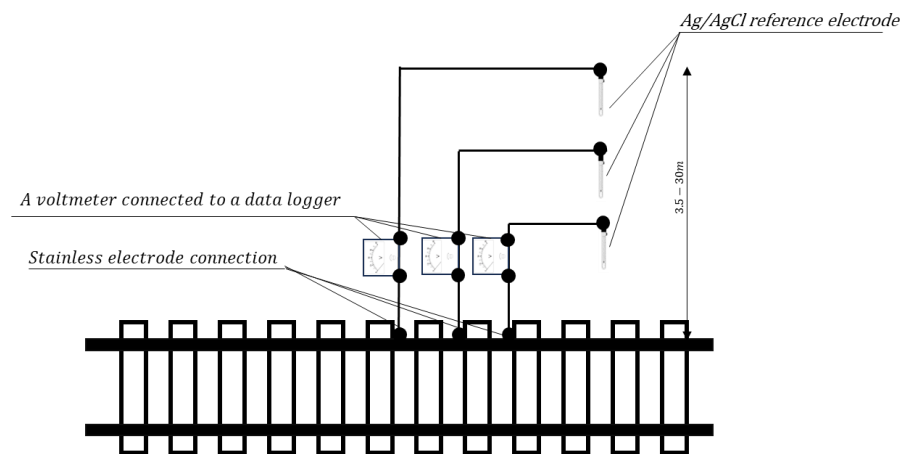


Figure 1: Connecting and measuring stray voltages in a railway environment

איור 1: חיבור ומדידה של מתחים תועים בסביבת רכבת קלה

2.2. מדידת מתח תועה בתנאי מעבדה

כדי לחקור את השפעת מתח המסילה והמרחק על הפחתת המתח בבניינים סמוכים, נבנתה תעלה מבוקרת במעבדה באמצעות חולות חרסית, תערובות חול-חימר בדירוג גרוע וחומרים בעלי התנגדות חשמלית שנועה בין 5,000 ל-20,000 אוהם-ס"מ. אורך התעלה היה 6.5 מטר, רוחב 0.3 מטר ועומק 0.6 מטר. הדפנות היו עשויות מבטון מצופה פוליפרופילן בעובי 3 מ"מ. המדידות בוצעו תחת מתחי כניסה DC של 40 ו-20 וולט, תוך רישום קריאות מתח במרחקים של 2, 4 ו-6 מטרים מהמקור. המתקן כלל מסילה מדומה ונקודת זרם חזרה מתאימה, הממוקמת במרחק של 6.5 מטרים מהמסילה המדומה.

פוטנציאל חשמלי גבוה עלול להוביל להתחשמלות, מהווה איום רציני הן לבני אדם והן לבעלי חיים בקרבת פסי רכבת. כדי להבטיח בטיחות, המתח המרבי המותר בין המסילה לקרקע חייב להישמר מתחת ל-90 וולט. עם זאת, חשוב לשקול עד כמה ערכים נמוכים עדיין יכולים להוות סכנה לבעלי חיים ולאנשים. לפי הדיווח, ערך של 10 וולט נחשב לגבול העליון. לכן, בבדיקת הקרקע, ערכים גבוהים מסף זה מעידים על חשש בטיחותי. כדי לקבוע אם ניתן לשמור על ערך נמוך של 10 וולט במגע עם האלמנט, הופעל מתח קבוע של 9 וולט כדי לאפיין את גבול הבטיחות העליון בניסוי [38].

2.3. השפעת מתח חשמלי על עמודי בטון מזויין

כדי להעריך את ההשפעה של מתח חשמלי תועה על עמודי בטון בממשק עם הקרקע, נבנה מערך בדיקה. מתח קבוע של 9 וולט הופעל ישירות על מוטות הפלדה המחוזקים, המיועדים כאלקטרודת העבודה. כמו כן, הוטמעה אלקטרודת קליטה המורכבת ממוטות נירוסטת מסוג 314. המערכת שילבה מד מתח ואלקטרודת ייחוס Ag/AgCl, אשר רשמה נתונים כל 5 דקות במשך חודש. העמודים היו טבולים בתמיסת נתרן כלורי 3.5% לפי משקל.

בוצעו שני מערכי ניסוי, כאשר העיקרית מורכבת מ-13 דגימות עמודי בטון מזויין בגובה של 750 מ"מ, קוטר של 230 מ"מ וכיסוי בטון של 20 מ"מ (איור c2). שלוש דגימות ייחוס היו נתונים לעומס לחיצה צירי בלבד עד לכשל מבלי להיחשף לתנאים סביבתיים מבוקרים (דגימות ייחוס). שלוש דגימות נוספות הועברו לעומס צירי בלחיצה עד לכשל לאחר שנחשפו במשך ארבעה שבועות למתח של 9 וולט ולסביבה אגרסיבית המכילה 3.5 אחוז כלורידים. שלוש דגימות אחרות נחשפו בו-זמנית למצב מתח/כלוריד דומה ולעומס צירי בלחיצה קבוע המקביל ל-60% מהחוזק הסופי של הדגימות (שנקבע על סמך העומס הסופי הניסוי הממוצע אליו הגיעו שלוש דגימות הייחוס) לפני הפעלת העומס הצירי עד לכישלון. החשיפה המשולבת לתמיסת כלוריד, עומס של 60% ו-9V נמשכה 30 ימים. שלושה עמודים נוספים עברו מחזורי הרטבה וייבוש במי מלח על בסיס הליך נפוץ [39] (ארבעה שבועות במצב רטוב ואחריהם ארבעה שבועות במצב יבש).

לבסוף, עמוד נוסף נשמר כהתייחסות לאורך זמן.

המתח החשמלי בניסויים אלה נבחר על ידי השיקולים הבאים. מצד אחד, תקן 50122 [40,41] מציין מתח מסוכן מרבי של 90 וולט תוך התחשבות בתנאי בטיחות הציבור. מצד שני, המתח שעלול לגרום לקורוזיה נע בין 0.85 ל-1.2 וולט בהתאם ל-pH של הבטון שנע בין 9.0 ל-13.5, בהתאמה [42]. בנוסף, המתח בין המסילה למוטות פלדת הזיון באלמנטים מבטון תלוי במרחק מהמסילה ובהתנגדות החשמלית של ציפוי הבטון. התנגדות זו נעה בין 50 ל-8000 Ωm , בעוד שההתנגדות החשמלית של כדור הארץ נעה בין 50 ל-3000 Ωm [43]. עבור עמידות קרקע ממוצעת של 30-60 Ωm , צפיפות הזרם יורדת בסדר גודל מערכה ההתחלתי במרחק של 100 מטר. ירידה דומה בסדר גודל נוסף מתרחשת במרחק של 500 מטר. מעבר ל-500 מטר, הזרם נעשה קטן מאוד [43].

על פי תקני הבטיחות, מתח תועה מעל 10 וולט חייב להיות מטופל על ידי רשויות [44]. ערך זה קרוב למתח הגבוה ביותר שנמדד בתנאי אתר שיכול להגיע ל-10 V [45–47]. במחקר הנוכחי, נבחרו 9 וולט השווים ל-10% מהמתח המסוכן המרבי וקרוב ל-10 וולט שנמדד בתנאי האתר וצוין על ידי [44].

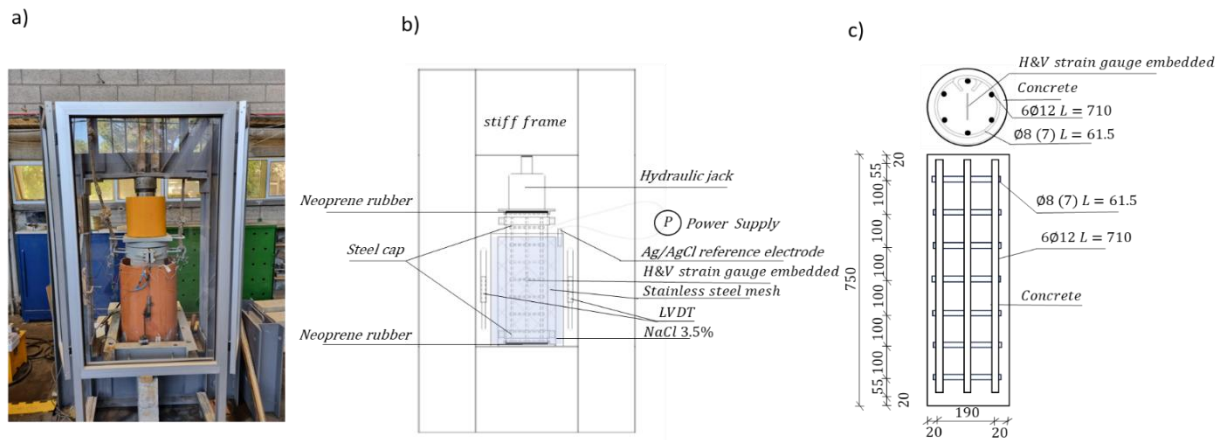


Figure 2: a) Test setup; b) Instrumentation; c) Reinforcement cage (dimensions in mm) : a)2 Figure
 איור 2 : : א) מערך בדיקה ראשי ב) מכשור המדידה ; ג) כלוב זיון בדגימות עמודות (מידות במ"מ)

מערך הניסוי השני נועד לבחון את השפעת ריכוז הכלוריד, עובי כיסוי הבטון וכמות הפלדה על הפוטנציאל האלקטרוכימי לקורוזיה. הוכנו דוגמאות בטון בצורת דיסק בעובי כיסוי משתנה, המכילות מוט פלדה מוטבע בקוטר 8 מ"מ ו-12 מ"מ. עובי כיסוי הבטון היה 20, 30 ו-40 מ"מ (איור 3א). בסך הכל נבדקו 18 דגימות. הדוגמאות היו בקוטר של 100 מ"מ וגובהן משתנים בהתאם לעובי כיסוי הבטון. הכיסוי הבטון היה כ-20 מ"מ.

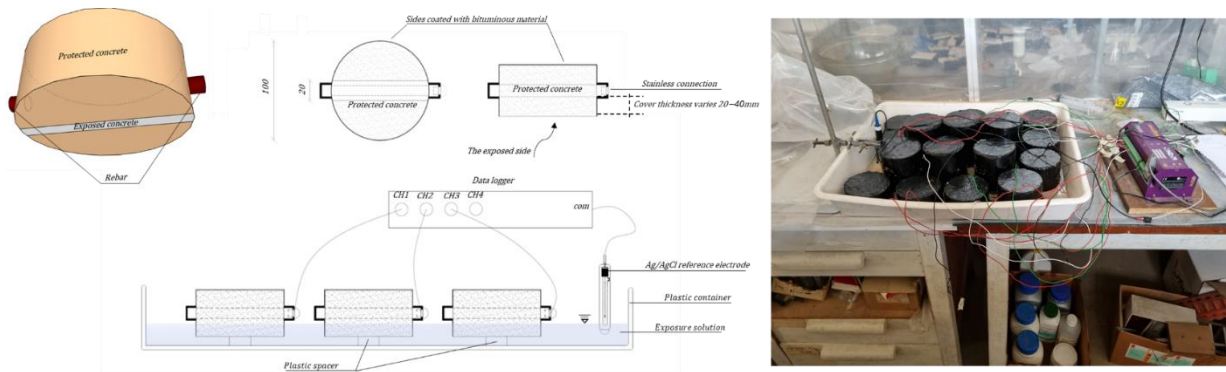


Figure 3: a) Samples for examining the effect of cover thickness and chloride concentration;
 b) Test setup for examining cover thickness and chloride threshold

איור 3 : א) דגימות לבחינת השפעת עובי הכיסוי וריכוז הכלוריד ; ב) מערך בדיקה לבחינת עובי הכיסוי וסף הכלוריד

הפוטנציאלים של הדגימות נמדדים ברציפות מול אלקטרודה זו, כאשר הנתונים מתועדים על פני תקופה של שבוע כאשר המדידה נמדדה כל 5 דקות על ידי לוגר נתונים. המטרה היא לצפות בייצוב פוטנציאלי, המעיד על פסיביות של פלדה, בדרך כלל בין 100- ל-200+ mV לעומת Ag/AgCl. אם נצפו חריגות כלשהן כגון פוטנציאלים שינויים שליליים או משמעותיים יותר, נערכת בדיקה מפורטת נוספת של הדגימות. לאחר תקופה ראשונית זו, התמיסה נטולת הכלוריד מוחלפת בתמיסת NaCl 3.5% שהוכנה באמצעות מים מופחתים, תוך שמירה על אותו עומק טבילה ומכסה את המיכל למניעת אידוי. לאורך שלב החשיפה

לכלוריד, מפלס המים נבדק והותאם באופן שוטף במים דה-יונים, תוך הימנעות מחידוש תמיסה מוחלטת למניעת שטיפת בטון. פוטנציאל הדגימה מנוטר כל הזמן, עם הערכה דו-שבועית של מצב הקורוזיה של כל דגימה על סמך התפתחות פוטנציאלית והקריטריונים הבאים: כאשר דגימות נחשפות למים נטולי כלוריד, הן בדרך כלל שומרות על הפוטנציאל החשמלי שלהן יציב מאוד, ונשארות בטווח הפלוס. או מינוס 30 מילי-וולט (mV) מערכי ההתחלה שלהם. טווח זה מכונה "הרמה הפסיבית", והוא יכול להיות שונה עבור כל מדגם. כדי לקבוע אם החלה קורוזיה, יש לעמוד בשני תנאים מרכזיים: הפוטנציאל של הדגימה חייב לרדת ביותר מ-150 mV מהרמה הפסיבית, וירידה זו חייבת להתרחש בתוך 5 הימים הראשונים. לאחר ירידה זו, הפוטנציאל אמור להישאר יציב יחסית בשפל החדש למשך 10 הימים הבאים. במהלך תקופה זו, הפוטנציאל לא אמור לעלות, לרדת עוד יותר או להתאושש ביותר מ-50 mV. אם מתקיימים תנאים אלו, המעידים על תחילתה של קורוזיה, הדגימה מוסרת מיד מהתמיסה ונרשמת שעת תחילת הקורוזיה. עם זאת, אם יש ירידה משמעותית בפוטנציאל ולאחריה התאוששות חלקית לכיוון הרמה הראשונית, המדגם נשאר בפתרון לתצפית נוספת. ריכוז ה-NaCl בתמיסה עולה בהדרגה: ל-7% במשקל לאחר 60 יום ול-10% לפי משקל לאחר 120 יום, ולאחר מכן נשמר ריכוז זה. מתודולוגיה זו מיועדת לתצפית מבוקרת של קורוזיה של הדגימות בתנאים משתנים, תוך הבטחת ניטור ותחזוקה מדויקים לאורך כל הניסוי [23].

במהלך המחקר נערכה בחינת העמידות של שני סוגי בטון בעלי חוזק לחיצה שונה: ב-60 (MSC – Medium Strength Concrete) וב-30 (Normal Strength Concrete – NSC). הניסויים כללו שלוש מערכות בדיקה נפרדות. במערכת הראשונה, הערכנו את ההשפעות של תנאי הסביבה. כאן נחשפו 6 עמודים – 3 מבטון חזק ו-3 מבטון חלש – למחזורי הרטבה וייבוש מתחלפים. כל מחזור נמשך חודשיים, עם חודש בתמיסת מלח 3.5% ואחריו חודש בסביבה יבשה. תהליך זה נמשך בסך הכל 12 חודשים. במהלך תקופה זו, ניטרנו שינויים שבועיים בהתנגדות החשמלית ובפוטנציאל החשמלי של אלקטרודת ייחוס. במערכת הבדיקה השנייה, התמקדנו בהשפעת עובי הכיסוי. לשם כך הכנו 3 דוגמאות כל אחת בעובי כיסוי שונה של 20 מ"מ, 30 מ"מ ו-40 מ"מ, בסך הכל 18 דוגמאות. כדי להעריך את ההשפעה של זרם תועה, השתמשנו ב-6 גיליונות נוספים. הממצאים שלנו הושוו מול 6 דגימות ייחוס, 3 עשויות מבטון חזק יחסית ו-3 מבטון חלש יותר.

בדיקת פוטנציאל חצי תא, לפי ASTM C876, היא שיטה לא הרסנית שמעריכה את הסבירות לקורוזיה אקטיבית בפלדת הזיון לא מצופה בתוך בטון. בדיקה זו מודדת את הפרש המתח בין הפלדה לאלקטרודת ייחוס Ag/AgCl, ובכך מספקת אינדיקציה לסיכון קורוזיה על פני המבנה. קריאות שליליות יותר מ-473 mV מסמלות סבירות גבוהה (90%) לקורוזיה, בעוד שערכים חיוביים יותר, כמו אלו שמעל -323 mV, מצביעים על סיכון נמוך (10%). אזורים עם קריאות פוטנציאליות הנופלות בין טווחים אלה מעידים על פעילות לא ודאית ודורשים חקירה נוספת [48–50]. בדיקת התנגדות משטח AASHTO TP 95 היא שיטת בדיקה לא הרסנית המודדת את ההתנגדות החשמלית של משטח בטון. הוא מציע אינדיקטור עקיף אך יעיל ליכולת הבטון לעמוד בפני חדירת יוני כלוריד, גורם שכיח לקורוזיה בזיון פלדה. הליך הבדיקה של AASHTO TP 95 כולל שימוש בארבע אלקטרודות ברווח שווה המונחות על פני הבטון. זרם חשמלי ידוע מועבר דרך האלקטרודות החיצוניות, והפרש הפוטנציאל נמדד בין האלקטרודות הפנימיות. הגדרה זו מאפשרת לחשב את התנגדות פני הבטון, המתבטאת בדרך כלל בקילו אוהם סנטימטרים (kΩ · cm). ניתוח התוצאות מבוסס על הפרמטרים הבאים: ערכי התנגדות חשמלית גבוהים (מעל 254 kΩ · cm) מצביעים על חדירות נמוכה של יוני הכלוריד לתוך הבטון, דבר המצביע על עמידות טובה. ערכי התנגדות חשמלית מתונה (בין 37 ל-254 kΩ · cm) מצביעים על חדירות יונים בינונית של כלוריד לתוך הבטון. ערכי התנגדות חשמלית

נמוכים (בין 12 ל-37 $k\Omega \cdot cm$) מסמלים חדירות גבוהה של יוני כלוריד לתוך הבטון. ערכי התנגדות חשמלית נמוכים מאוד (פחות מ-12 $k\Omega \cdot cm$) מצביעים על חדירות גבוהה מאוד של יוני הכלוריד לתוך הבטון, ובכך מרמזים על סיכון גבוה לקורוזיה [51,52]. הניסוי השתמש בשיטה קולוריטרית מבוססת $AgNO_3$ כדי לקבוע את החדירות של יוני כלוריד בבטון. שיטה זו כוללת יישום של תמיסת $AgNO_3$ ישירות על חתך שבר טרי של דגימת הבטון. יישום זה מוביל להיווצרות של אזורים מובחנים ויזואלית – לבנים וחום – התחום על ידי גבול מוגדר בבירור שבו נצפה מעבר צבע חד. בדרך כלל, עומק האזור הלבן מתפרש כעומק חדירת הכלוריד, המעיד על נוכחותם של יונים אלה. לעומת זאת, האזור החום מסמל אזורים שבהם כלוריד נעדר [53]. לאחר שהדגימות נחשפו לכלורידים למשך זמן מוגדר, הן נקדחו בקפידה כדי להגיע לעומק בו נמצא מוט הזיון. בשלב זה, ריכוז הכלוריד נמדד בקפדנות. מדידה זו נערכה במיוחד ברדיוס של 2 מ"מ סביב מוט הזיון, תוך שימוש בשיטת הטיטרציה של Mohr, טכניקה מוכרת לקביעת תכולת הכלוריד [54].

טבלה 1 מסכמת את מספר הדגימות ואופן הטיפול בהן.

Table 1: Summary of the number of samples and their treatment

טבלה 1 : סיכום מספר הדגימות והטיפול בהן

Sample Type סוג המדגם	Number of Samples מספר המדגמים	Treatment טיפול	Testing System מערכת ניסוי/בדיקה
Reference columns NSC	4	Curing of 90 days	- compressive strength - surface electrical resistance - half-cell potential
Reference columns MSC	4	Curing of 90 days	compressive strength test surface electrical resistance and half-cell potential
Wetting and drying cycles of NSC columns	3	Wetting and drying cycles (52 weeks)	compressive strength test surface electrical resistance and half-cell potential
Wetting and drying cycles strong concrete	3	Wetting and drying cycles (52 weeks)	compressive strength test surface electrical resistance and half-cell potential
NSC columns exposed to stray electric voltage (NCWD)	3	Exposure to a stray voltage of 9 volts with a 3.5 percent sodium chloride solution (Curing of 90 days + 28 days of treatment)	compressive strength test surface electrical resistance and half-cell potential, measurement of strain change in the core of the column due to the development of corrosion of the rebar
MSC columns exposed to stray electric voltage (MCWD)	3	Exposure to a stray voltage of 9 volts with a 3.5 percent sodium chloride solution	compressive strength test surface electrical resistance and half-cell potential, measurement of strain change in the core of

		(Curing of 90 days + 28 days of treatment)	the column due to the development of corrosion of the rebar
NSC disk samples	9	Exposure to sodium chloride solution with variable concentration (Curing of 90 days A regimen of changing saline solution up to 120 days)	Measurement of half-cell potential change, measurement of chloride permeability and concentration in the vicinity of a rebar
MSC disk samples	9	Exposure to sodium chloride solution with variable concentration (Curing of 90 days A regimen of changing saline solution up to 120 days)	Measurement of half-cell potential change, measurement of chloride permeability and concentration in the vicinity of a rebar

2.4. חומרים

במחקר זה הוכנה תערובת בטון על בסיס צמנט CEM I 52.5N, אגרגט גיר גס, אגרגט קוורץ דק ומי שתייה, את הפרופורציות ניתן לראות בטבלה 2.

Table 2: Concrete compositions and properties

טבלה 2: הרכבי תערובות הבטון ותכונותיהן

Sample	Content (kg/m ³)						W/C ³	Air content (%)	Unit weight (kg/m ³)	Slump ⁴ (mm)	Strength (MPa)	
	Aggregates ²										Days	
	C ¹	W ¹	S ¹	Fine	Coarse	maximum aggregate size (mm)					28	90
strong concrete (SC)	500	195	5	1100	500	9	0.39	1.9	2281	S5 (138)	48	63
weak concrete (WC)	400	195	4	1200	500	9	0.48	1.8	2360	S4 (89)	33	37

¹ C – Cement; W – Water; S- Superplasticizers.

² Type of Aggregates – coarse: limestone, fine: quartz.

³ W/C – water to cement ratios.

מוטות הזיון היו מסוג B500C העומדים בדרישות התקן האירופאי EN 10080. כאשר המוטות האורכיים היו בקוטר 12 מ"מ החישוקים בקוטר 8 מ"מ. איור 4 מציג את תוצאות חוזק מתיחה ממוצע של 6 מוטות, 3 בקוטר 12 מ"מ ששימשו למוטות אורכיים ו-3 בקוטר 8 מ"מ ששימשו לחישוקים בעמוד בטון מזוין.

Table 3: Mechanical properties of the uncorroded transverse and longitudinal bars

טבלה 3 : תכונות מכניות של מוטות הזיון הרחביים והאורכיים לא קורוזיביים

Reinforcement type	8 mm	12 mm
Yield strength f_y (MPa)	508	516
Ultimate strength f_u (MPa)	642	624
Modulus of elasticity E (MPa)	198,988	208,198
Yield strain, $\epsilon_y = f_y/E$	0.00255	0.00247
Ultimate strain, ϵ_u	0.0436	0.0610
Strain ratio (ϵ_u/ϵ_y)	17.09	24.69
Strength ratio (f_u/f_y)	1.26	1.20
Total elongation at maximum force (%)	4.56	5.98
Total elongation at failure λ_f (%)	6.97	16.4
Unit mass m (kg/m)	0.394	0.876

2.5. יציקה ואשפרה

דגימות העמודים נשמרו בתבניות פלסטיק למשך 24 שעות בתנאי סביבה של 24 ± 3 מעלות צלזיוס ו-RH $65 \pm 5\%$ = לאחר היציקה. לאחר זמן זה הדגימות הוצאו מהמסגרת והוטבלו במים למשך 90 יום. דוגמאות לבדיקת תכונות הבטון כללו 6 צילינדרים בקוטר 150 מ"מ על גובה של 300 מ"מ, מידות הדוגמאות נעשו על פי דרישות תקן EN 12390-1 [56]. כאשר כל הדגימות הללו עברו אשפרה במים עם סידן הידרוקסיד עד ליום הבדיקה. הבדיקות בוצעו 28 ו-90 ימים לאחר יציקת הדגימות. דגימות דיסקים לבדיקת השפעת עובי הכיסוי וריכוז הכלוריד נשמרו במים עם סידן הידרוקסיד למשך 90 יום ולאחר מכן כוסו בחומר אטום למים וגז על בסיס ביטומן (איור 3).

2.6. בדיקת החדירות של יוני כלוריד

החדירות של יוני כלוריד בניסוי נקבעה באמצעות השיטה הקולורימטרית המבוססת על $AgNO_3$. שיטה זו כוללת יישום פתרון $AgNO_3$ אך ורק על חתך בטון שנשבר לאחרונה. תהליך זה מביא ליצירת אזורים לבנים וחומים ברורים, המופרדים על ידי גבול בולט עם מעבר צבע ברור. בדרך כלל, עומק האזור הלבן נחשב למידת חדירת הכלוריד, בעוד שהאזור החום מצביע על היעדר כלוריד [53]. תגובות כימיות המעורבות בשיטה זו הן:

1. $Ag^+ + Cl^- \rightarrow AgCl(white)$ Chemical reactions chloride-containing zone and Chemical reactions in chloride-free zone
2. $Ag^+OH^- \rightarrow AgOH \rightarrow Ag_2O(brown)$

על ידי שימוש בשיטה זו, ניתן לזהות רק כלורידים חופשיים, האחראים על התחלת קורוזיה, בעוד שכלורידים הקשורים כימית מהרכבי המלט נותרים בלתי מזוהים. ההבחנה בין כלור הקשור כימית לכלור חופשי מאפשרת להעריך את הסיכון להידרדרות מבנית מהסיבות הבאות:

- הפחתת ריכוז הכלוריד החופשי ליד פלדת הזיון תפחית את הסיכון לקורוזיה;
- קשירת כלוריד תעכב את חדירת הכלוריד;

היווצרות המלח של פרידל ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), הנובעת מתגובה כימית בין כלורידים ל- C_3A , מאופיינת במבנה פחות נקבובי, מה שמאט את ההובלה של יוני Cl [57].

פרופיל הכלוריד על החתך נבנה לפי הפרוטוקול המתואר בעבודות [58,59] לאחר חשיפה לכלורידים, בוצעו דגימות לבדיקת ריכוז הכלוריד בממשק שבין הבטון למוט הזיון. בשלב הראשוני, להערכת ריכוז הכלוריד פני השטח, בוצע קידוח לעומק של 1 מ"מ, תוך איסוף של כ-5 גרם אבקה. לאחר מכן, הקידוח נמשך במרווחים של 2 מ"מ למניעת זיהום הדגימה הרצויה בכלורידים משכבות קודמות. כל שכבה אוחסנה במיכל פלסטיק אטום ואטום עד לבדיקה למניעת השפעות חיצוניות. הקידוח נמשך עד שהגיע לעומק מוט הזיון.

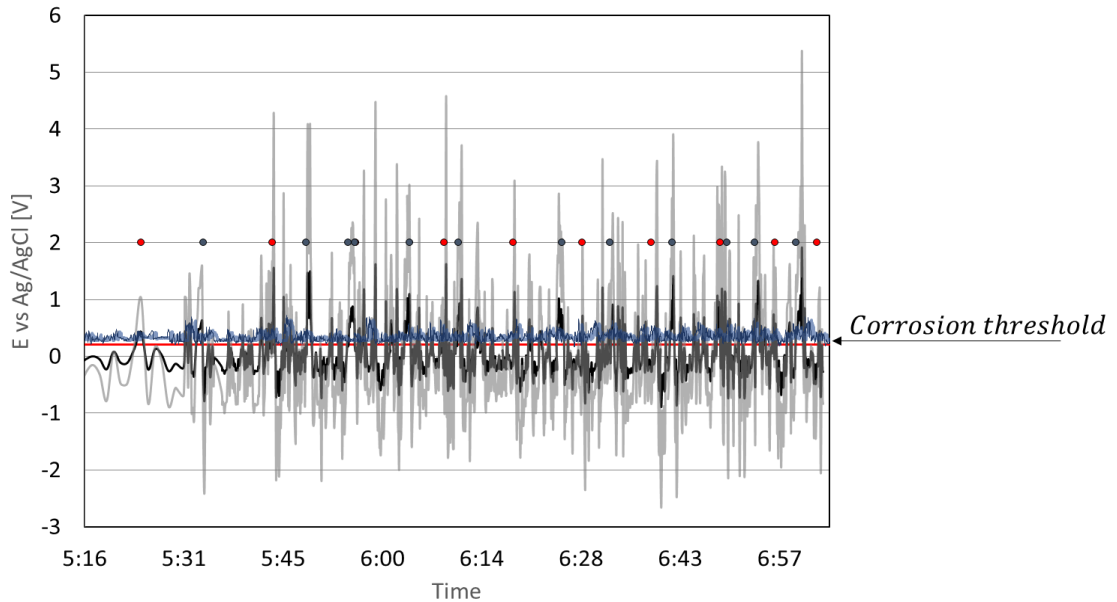
כדי לבחון האם נוצרו תוצרי תגובה של NaCl וכדי לאמת את פרופיל הכלוריד, נעשה שימוש בניתוח XRD (דיפרקציית X-Ray) – הטכניקות הנפוצות ביותר לאפיון חומרים בספרות [60]. הרכב המינרלים של הדגימות שנלקחו בכל שלב קידוח נקבע באמצעות XRD.

להבנה מעמיקה יותר של התפלגות יוני הכלור בדגימות, בוצעו תצפיות SEM (מיקרוסקופ אלקטרוני סורק) וניתוח EDS (ספקטרוסקופיה של פיזור רנטגן) על קטעים מהדגימה הטרייה שנסדקה. הדגימות לבדיקות SEM ו-EDS טופלו מראש. בשלב הראשון, הדגימות צפו בפחמן, ולאחר מכן יובשו בוואקום במנדף פחמן למשך 30 דקות. לאחר מכן שוחרר הוואקום עם חנקן, ומיד לאחר מכן, הדגימות הוכנסו למיקרוסקופ SEM (FEI E-SEM Quanta 200) בתנאי ואקום נמוך; גלאי SE הופעל ומתח העבודה היה 20 kV.

3. תוצאות

3.1. מדידת מתח חשמלי תועה בתנאי שטח

תוצאות מדידות מתח תועה באזור הרכבת הקלה בישראל בעיר ירושלים מוצגות באיור 4. הקו האדום מציין את הסף שמעבר לו קיים סכנת קורוזיה למבנה, בהתאם לתקן [41]. הקו השחור מציג את תוצאות המדידות שנלקחו במרחק של 3.5 מטרים ממסילת הרכבת, בעוד שהקו האפור מייצג מדידות במרחק של 7 מטרים מהמסילה. הקו הכחול העבה מבטא את המידות ב-15 מטר והקו הכחול הדק – במרחק של 30 מטר מהמסילה. נקודות אדומות על הגרף מסמנות את המקרים שבהם רכבת עברה את נקודות המדידה על מסילת הרכבת המרוחקת. לעומת זאת, נקודות אפורות פירושו הרגעים שבהם רכב עבר על המסילה הקרובה ביותר לנקודות המדידה. המסלולים מרוחקים 2 מטרים זה מזה. ב-15 מטר תוצאת המדידה המתקבלת היא 0.34 וולט בממוצע וב-30 מטר הממוצע הוא 0.33 וולט. משך השיא הוא כ-30 שניות ואינו מבודד מספיק מרעשי רקע לעומת המדידות ב-3.5 מטר ו-7 מטר. כדי לנתח את התוצאות בהתאם להנחיה המצוינת בתקן, תהליך הממוצע לוקח בחשבון רק את סך הערכים החיוביים של זרם התועה [41]. בשיטה זו, המתח הממוצע הנמדד במרחק של 7.5 מטר הוא 1.07 וולט, בעוד שבמרחק של 3.5 מטר הוא 0.37 וולט. משך הזמן הכולל של החלקים החיוביים בפעולה הוא שעה, 4 דקות ו-15 שניות. פעילות זו הושפעה מ-21 רכבות. לפיכך ניתן להסיק כי בממוצע מעבר של רכבת בודדת משפיע על נקודה בודדת למשך כ-3.05 דקות.



- Distance from the rail 3.5 meters
- Distance from the rail 7 meters
- Distance from the rail 15 meters
- Distance from the rail 30 meters
- Train on the far track
- Train on the nearest track

4: Stray voltage measurements under field conditions in Figure the summer months

איור 4 : מדידות מתח תועה בתנאי שטח, בחודשי הקיץ

בחודשי החורף, מדידת מתח חשמלי תועה הראתה עליית מתח פי 2.03 במרחק של 7 מטר ובפי 4.16 במרחק של 3.5 מטר, לא נצפה שינוי משמעותי במהלך הניטור, כפי שמוצג באיור 5.

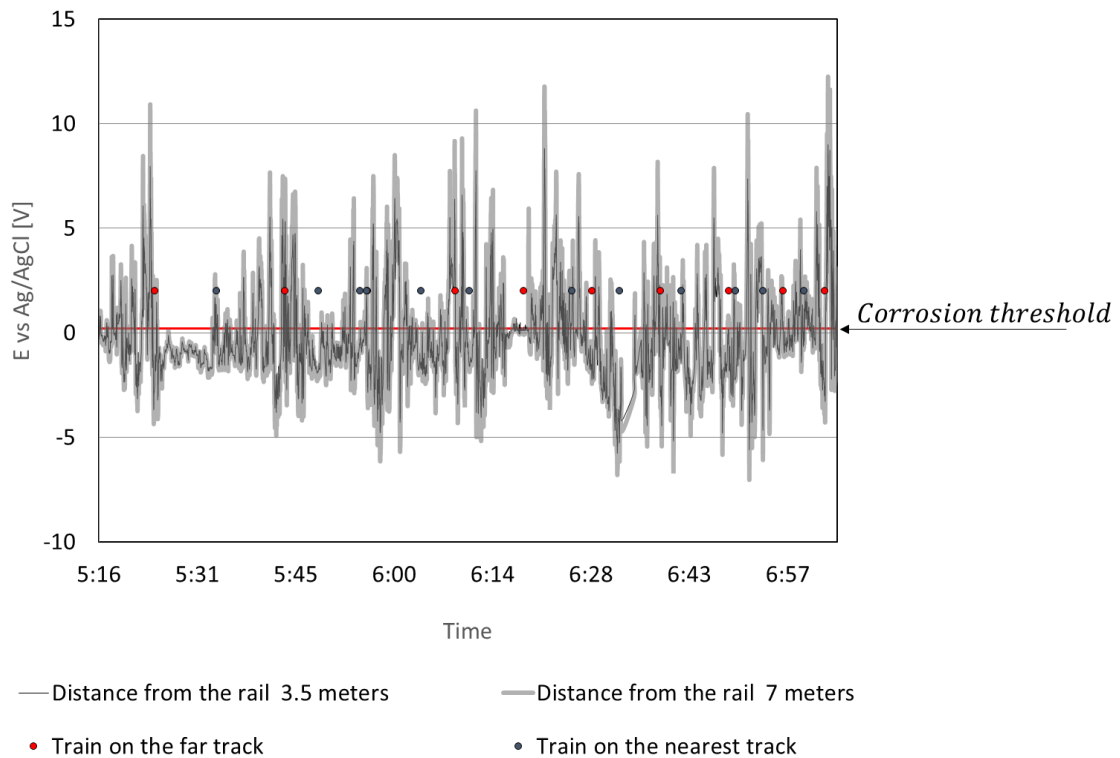


Figure 5: Stray voltage measurements under field conditions, in the winter months

איור 5 : מדידות מתח תועה בתנאי שדה, בחודשי החורף

3.2. מדידת מתח תועה בתנאי מעבדה

איור 6 מציג את תוצאות המדידה של שינוי מתח בתנאי מעבדה. איור 6א ממחיש את התנאים שבהם המרחק בין המסילה לאלקטרודת ייחוס, כמו גם המרחק לנקודת קליטה, משתנה. איור 6ב, לעומת זאת, מתאר תנאים שבהם הן המסילה והן נקודת הקליטה קבועות, בעוד המיקום של אלקטרודת הייחוס משתנה. כפי שמוצג באיור 6א, בוצע ניתוח השוואתי על ירידת המתח בין שתי אלקטרודות במרחקים משתנים, תחת מתחי אספקה שונים. כאשר הופעל מתח אספקה של 20 וולט, נמדדה מפל מתח של 2.4 וולט במרחק של 2 מטר. מפל מתח זה גדל ל-7.06 וולט ב-4 מטר. השפעת המרחק התבלטה ביותר ב-6 מטרים, כאשר מפל המתח הגיע ל-11.83 וולט תחת אותו מתח אספקה. באופן דומה, עם אספקת 40 וולט, נפילת המתח הייתה 4.56 וולט ב-2 מטר, עלתה ל-13.78 וולט ב-4 מטר, והגיעה לשיא של 24.27 וולט במרחק של 6 מטר. נתונים אלה מדגימים כיצד נפילת המתח על פני האלקטרודות מושפעת הן מהמתח המופעל והן מהמרחק בין האלקטרודות. כאשר חקרנו את תופעת ירידת המתח, כפי שמתואר באיור 6ב, שקלנו את המרחק המשתנה של אלקטרודת הייחוס ממקור מתח קבוע ומהאלקטרודה המקבלת. במתח אספקה של 40 וולט, נפילת המתח שנמדדה במרחקים של 2, 4 ו-6 מטר הייתה 9.7, 11.91 ו-16.40 וולט, בהתאמה. באופן דומה, עם אספקת 20 וולט באותם מרחקים, נפילות המתח שנצפו היו 6.71, 7.62 ו-9.68 וולט, בהתאמה. המתח הפנימי שנמדד בתוך מערכת המדידה נרשם ב-0.02 וולט, בעוד המתח החשמלי של המעגל הפתוח על הקרקע, שנמדד ב-6 מטר, היה 0.018 וולט.

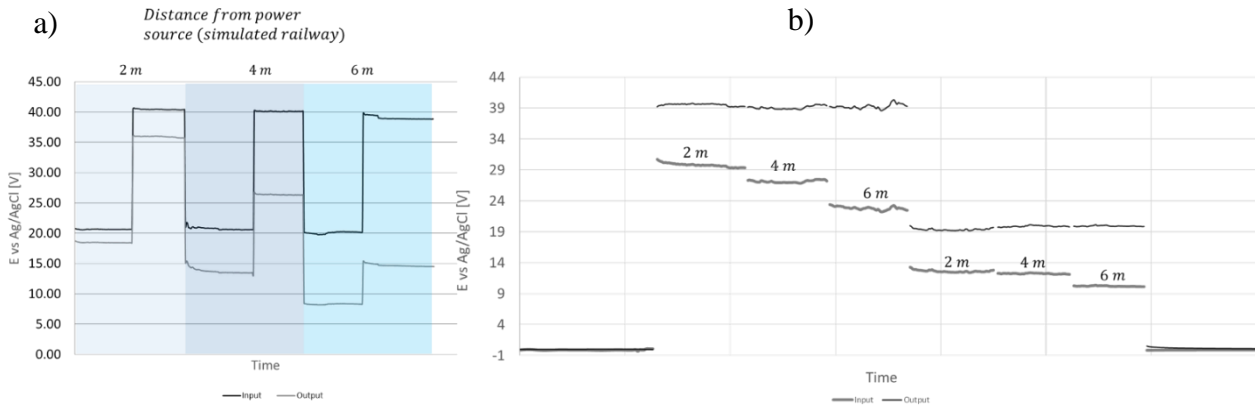
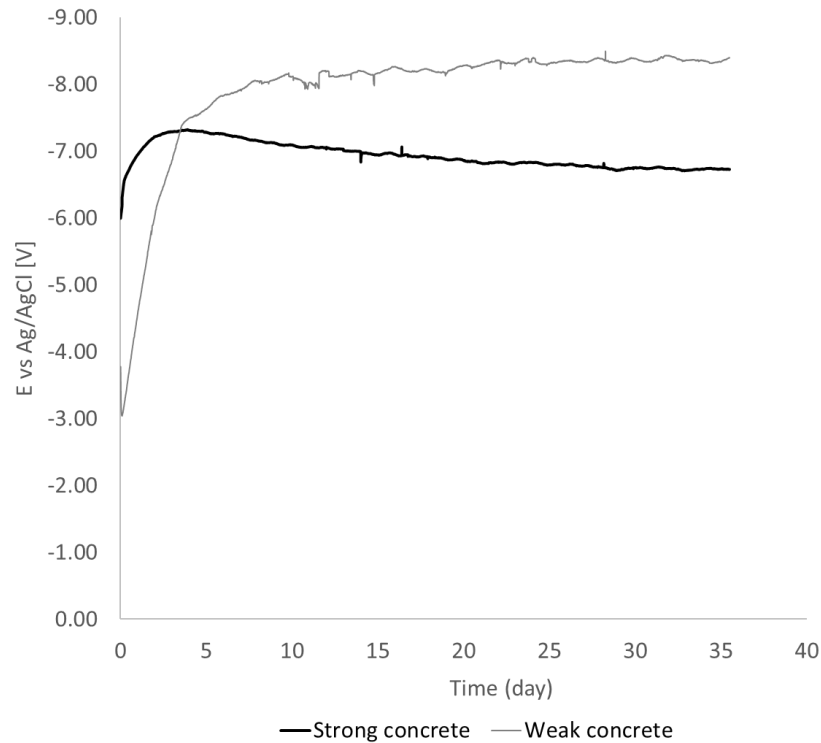


Figure 6: Controlled ground voltage measurement: a) Changing the distance between the rail and the receiving point in time; b) Voltage changes in time, when the rail and the receiving point are fixed

איור 6 : מדידת מתח קרקע מבוקרת : א) שינוי המרחק בין המסילה לנקודת הקליטה ; ב) שינוי מתח כאשר המסילה ונקודת הקליטה קבועות

3.3. התנהגות אלקטרוכימית של עמוד בטון מזוין

איור 7 מציג מדידות ממערכת 3 אלקטרודות, כאשר הקו השחור מייצג בטון בעל חוזק גבוה, בניגוד לקו האפור, הבטון בניסוי היה מטיב המייצג בטון בעל חוזק נמוך יחסית. על הדגימות הופעל מתח חשמלי של 9 וולט. עם זאת, כפי שניתן לראות, תגובת מוטות הזיון אינה מיידית, והמתח אפילו לא מגיע לערך זה בשל ההתנגדות החשמלית של הדוגמאות, המושפעת בין היתר מעובי כיסוי הבטון.



7: Electrochemical behavior measurements in a 3-electrode system Figure with 9 V external voltages

איור 7 : מדידות התנהגות אלקטרוכימיות במערכת 3 אלקטרודות עם מתחים חיצוניים של 9 וולט

3.4. השפעת הקורוזיה על עמוד הבטון מזוין ללא עומס צירי

לאחר הפעלת מתח תועה מדומה של 9 וולט במשך חודש אחד, תסבולת הדגימות נבדקה באמצעות לחיצה בקצב של 18 kN לדקה. התוצאות מוצגות באיור 8 אשר מתאר עקומים של כוח לחיצה כפונקציה של העיבור הצירי (המחושב מהתוצאות של מדידת התזוזות הציריות לאורך העמוד כפי שהוסבר בסעיפים הקודמים). דגימות הייחוס בחוזק בינוני (MSC) מתוארות באמצעות גרף הקו השחור, בעוד שהקווים הכחולים מייצגים דגימות התייחסות בחוזק רגיל (NSC). הקו האפור מציג דוגמאות MSC לאחר הפעלת מתח חשמלי, והקו הצהוב מציין דגימות בעלות חוזק נמוך יותר (NSC) הנתונות למתח החשמלי. עומס השבירה הממוצע של שלוש דגימות ה-MSC היה 2122 kN. לאחר הפעלת המתח החשמלי בסביבה אגרסיבית עשירה בכלוריד, עומס השבירה הממוצע של דגימות אלו היה 1785.4 kN. זה מייצג ירידה של 11.85% בחוזק הלחיצה. לעמודי בטון מסוג NSC היה עומס השבירה הממוצע של 1678 kN. לאחר הפעלת המתח החשמלי באותה סביבה, עומס השבירה הממוצע שלהם היה 1330 kN. זה מייצג ירידה של 20.73% בחוזק הלחיצה. מקדם משיכות התזוזה מוגדר כ- $\mu = \epsilon_{cf50} / \epsilon_p$ כאשר ϵ_{cf50} הוא המתח לאחר עומס שיא כאשר הכוח יורד ל-50% מהעומס המרבי ו- ϵ_p הוא המתח הלחיצה הבטון המתאים לשיא חוזק הבטון [34]. עבור דגימות הייחוס, מקדם המשיכות שווה ל- $\mu = 1.95$ בממוצע, בעוד שהוא שווה ל- $\mu = 1.68$ עבור הדגימות לאחר השפעת מתח/כלוריד. זה מייצג ירידה של 13.8% במשיכות. עבור עמודי בטון חלשים שאינם נתונים לתנאי

סביבה אגרסיביים, גורם המשיכות נרשם ב- $\mu = 1.96$. עם זאת, לאחר חשיפה לתנאי הניסוי שנועדו לדמות סביבות אגרסיביות, גורם זה ירד ל- $\mu = 1.28$. שינוי זה מייצג ירידה משמעותית של 34.8% במשיכות.

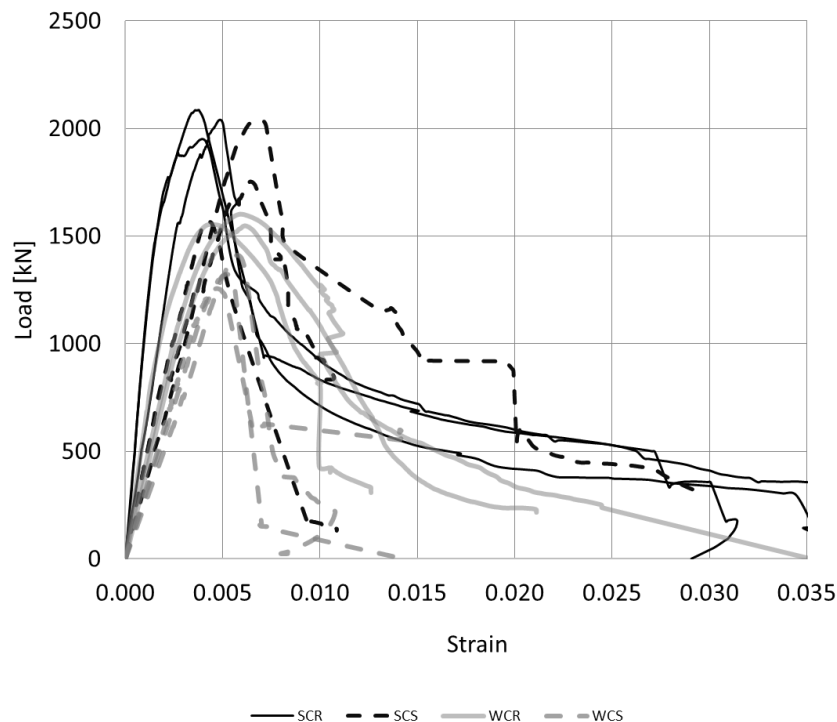


Figure 8: Compressive axial load – strain diagrams of the columns exposed to a voltage of 9 volts

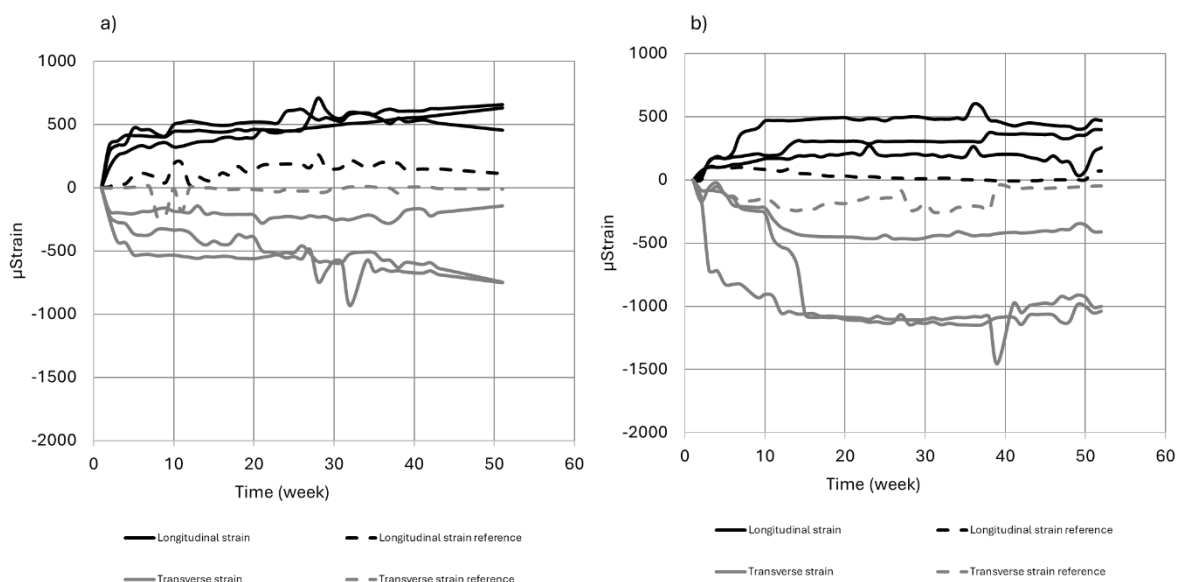
איור 8 : דיאגרמות עומס צירי – תזוזה של העמודים החשופים למתח של 9 וולט

3.5. דיאגרמות עומס-עיבור לחיצה צירי של העמודים החשופים למחזורי הרטבה יבוש

תהליך של הרטבה וייבוש במי מלח מדמה את תנאי החשיפה הקשים אליהם חשופה רוב התשתיות [61]. הפעלת מאמצי לחיצה צידיים לבטון היא דרך טובה למקסם את יעילות הכליאה [63]. לכן בבטון שעבר את שלב התחלת הקורוזיה החלו להתפתח מאמצי לחיצה של מוצרי קורוזיה, אך לפני פיצוח אנו מצפים לראות כוחות מוגברים. עדות לכך ניתן לראות בשינויי המתח האורך והרוחבי לאורך זמן של הדגימות, בהשוואה לדגימה שהייתה במצב יבש קבוע.

במהלך מחזורי הרטבה והייבוש, נמדדו שינויים עיבורים רוחביים ואורכיים בדגימות. איור 9 מציג את התוצאות שהתקבלו, כאשר השינוי בתחילת הגרף הוא תגובה לשינוי בתכולת הלחות של הבטון. מעבר לנקודה זו, ההשפעה נובעת מהכוחות שמפעילים תוצרי הקורוזיה ככל שהם גדלים בנפחם. השפעת ההתכווצות היא בעיקר על כושר הנשיאה המקסימלי, ככל הנראה בשל הגידול במספר וברוחב הסדקים הנגרמים מההתכווצות. ההשפעה של הידרציה נוספת נחשבת זניחה. ישנה מגמה של הגברת חוזק וירידה במודול יאנג ויחס פואסון עם הייבוש. מתח ההתכווצות הייבוש, שינוי המסה, החוזק ומודול יאנג של דגימות

המרגמה משתנים בגודלם. ההבדלים בשינויי החוזק בין הדגימות יכולים לנבוע מהעובדה שיניקה קפילרית הגדילה את החוזק המכני של החומר תוך הרס התכונות האלסטיות באמצעות מיקרו-סדקים [64]. במחקר [65] נבדקה השפעת מחזורי ייבוש-הרטבה על תכונותיו הפיזיקליות והמכניות של הבטון, והקשר בין חוזק הבטון למבנה הנקבוביות שלו נותח במיקרו-סקאלה. התוצאות מראות כי עם מספר הולך וגדל של מחזורי ייבוש-הרטבה, חוזק הבטון עולה בתחילה אך פוחת לאחר 40 מחזורים. ככל שמחזורי הייבוש וההרטבה גדלים, הנקבוביות, נפח הנקבוביות הכולל, קוטר הנקבוביות הממוצע, קוטר הנקבוביות החציוני וקוטר הנקבוביות הסביר ביותר של דגימות הבטון יורדות תחילה ולאחר מכן גדלות. לבסוף, נצפים המאפיינים של התגבשות נקבוביות, שהיא גם הסיבה הפנימית לאובדן מאוחר יותר של חוזק הבטון [65]. לכן, ניתן להסיק כי הצמיחה האורכית של העמוד נובעת מלחיצה של מוצרי קורוזיה, כולל השפעת הצטמקות. בנוסף, השינוי במתח הרוחבי מושפע מהתכווצות, אשר בולטת יותר במהלך מחזורי ההרטבה והייבוש בהשוואה לדגימה שלא נחשפה למחזורים אלו.



Grade 30; : Strain change inside the core of the sample: a) Concrete9Figure
b) Concrete Grade 60

איור 9 : שינוי עיבור בתוך הליבה של המדגם : א) בטון ב-30 ; ב) בטון ב-60

איור 10 מציג את הגרף של הכוח כנגד העיבורים. נתגלתה עלית החוזק למרות הופעת החלודה על המוט וסימני הסדקים של הדוגמאות. העיבור האופקי בבטון חזק יותר נותר ללא שינוי יחסית בליבת הבטון, בניגוד לבטון בעל חוזק רגיל. זה מצביע על כך שבטון חזק יותר אינו מייצר תזוזה מספקת כדי להפעיל את החייון, גם כאשר מתרחשת סדיקה במהלך דפורמציה. כוח השבר הממוצע שנמדד בדגימות בטון ב-60 (SCC) לאחר 40 מחזורי הרטבה וייבוש היה 2266 קילו-ניוטון. עבור בטון ב-30 (WCC), החוזק הממוצע המרבי היה 1569 קילו-ניוטון.

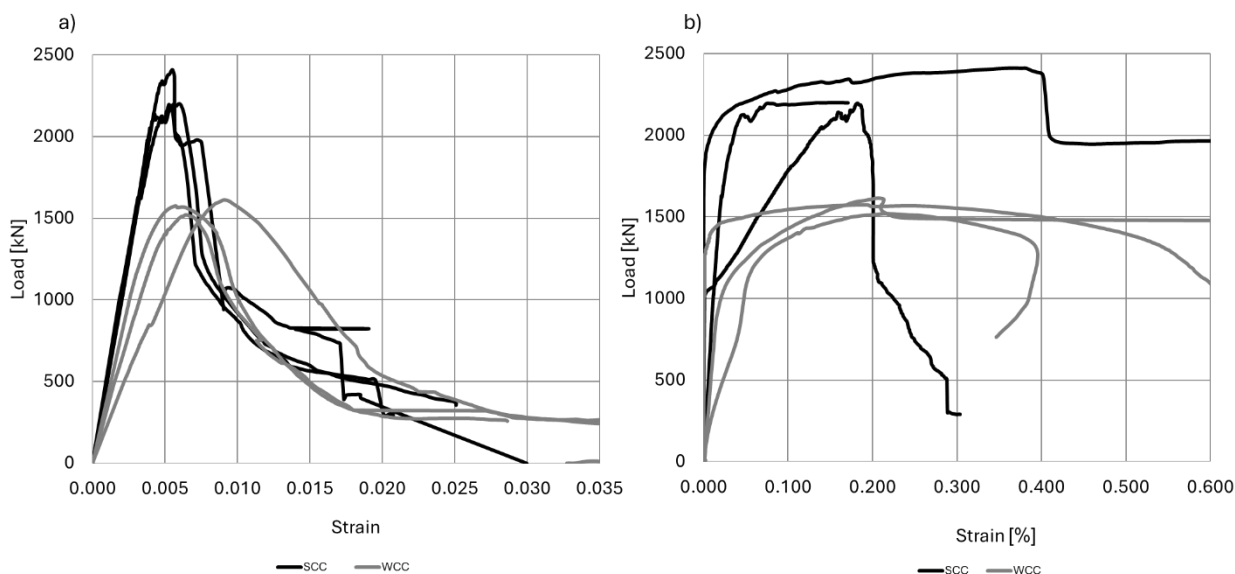


Figure 10: Compressive axial load vs. strain of the specimens after wetting-drying 10 cycles:

a) Load vs. longitudinal strain; b) Load vs. transversal strain

איור 10 : עומס לחיצה כנגד עיבורים של מדגמים לאחר מחזורי הרטבה וייבוש : א) עומס כנגד עיבור אורכי ; ב) עומס כנגד עיבור רוחבי

3.6. דיאגרמות עומס- עיבור לחיצה צירי של העמודים החשופים למתח חשמלי של 18 וולט

דגימות הנתונות למתח של 18 וולט בתמיסת מלח לתקופה של 28 ימים מוצגות באיור מס' 11. הגדלת המתח החשמלי המופעל ל-18 וולט משמשת לאישוש שתי תופעות. ראשית, בטון מזוין תחת מתחים גבוהים מאבד את יכולת ההגנה שלו ברגע שמתפתחים סדקים. בתחילה, לפני פיצוח, הוא עשוי להציע התנגדות מסוימת, אך לאחר היווצרות הסדק, הבטון אינו משתתף עוד במניעת זרימת אלקטרונים. התופעה השנייה שנצפתה היא שהמתח החשמלי והקורוזיה כתוצאה מכך משפיעים לא רק על חיזוק הפלדה, ומפחיתים את המסה שלו, אלא גם מפחיתים ישירות את שטח החתך האפקטיבי של הבטון. בנוסף, הפעלת מתח גבוה מאיצה את תהליך הקורוזיה, ומאפשרת התבוננות והשוואה מהירה יותר של האופן שבו המודל מתנהג בדרגות שונות של קורוזיה במוטות חיזוק אורכיים ורוחביים. גישה זו מאפשרת הבנה מקיפה יותר של האופן שבו קורוזיה משפיעה על הביצועים המבניים, במיוחד במונחים של האופן שבו עמודי בטון מזוין מתדרדרים עם הזמן תחת מתח חשמלי. לגבי ריכוז קורוזיה, לא היה הבדל משמעותי בשינוי המשקל בין מוטות החיזוק.

בבטון ב-30, המשקל היה של המוטות 95.2% עבור מוטות אורכיים ו-78.9% עבור מוטות רוחביים. בבטון ב-60, שמירת המשקל הייתה מעט גבוהה יותר, עם 95.9% עבור מוטות אורכיים ו-84.6% עבור מוטות רוחביים. ניתן להבחין כי הפחתת המסה של מוטות החיזוק מתחת ל-9 וולט ו-60% מכושר נשיאת העומס של עמוד הבטון מזוין דומה לירידה מתחת ל-18 וולט. הדבר מתרחש עקב היווצרות סדקים ואיבוד מיידי של התנגדות הבטון בשלב החשיפה הראשוני, בניגוד לדגימות הנתונות ל-18 וולט, בהן יש עיכוב קצר לפני היווצרות סדקים. למרות ההשהיה הקצרה הזו, המתח הגבוה מאיץ את ההידרדרות, מה שהופך את הנזק לבלוט יותר בפרק זמן קצר יותר.

ניתן להבחין כי קורוזיה התפתחה בתחילה כקורוזיה נקודתית (pitting corrosion), ולאחריה הפחתה ניכרת בשטח החתך של החישוקים לאורכם. במוטות האורכיים נתגלתה הן קורוזיה אחידה חריפה והן קורוזיה נקודתית, כאשר בורות מגיעים עד לרדיוס של 0.5 ס"מ. באזורים שבהם נאכלו המוטות על ידי קורוזיה, הידרדרות זו הובילה לקריסת המוטות האורכיים.

תוצאות מחקר קודם מצביעות על כך שמורפולוגיית הקורוזיה של מוטות פלדה הנתונים לקורוזיה מואצת מבחינה אלקטרוכימית תואמת היטב את זו שנצפתה במוצרי פלדה עקב קורוזיה טבעית [66]. הפסד של 20% במסה של מוטות זיון עקב קורוזיה הביא לירידה של 38% עד 35% בחוזק המתיחה, בהתאם לדרגת החוזק של המוט. בנוסף, נתגלתה גם הפחתה של 33% ו-28% במאמץ הלחיצה [66].



Figure 11: Samples exposed to a voltage of 18 volts in a salt solution for a period of 28 days and bearing capacity

איור 11: דגימות שנחשפו למתח של 18 וולט בתמיסת מלח לתקופה של 28 ימים ובדיקות לחיצה

איור 12 מציג את התנהגות העיבורים של דגימות שנחשפו ל-18 וולט למשך 28 ימים, עם 7 ימים נוספים של חשיפה קודמת למים מלוחים. הנתונים חושפים מגמה ברורה שבה מוצרי קורוזיה שנוצרו תחת מתחים גבוהים יותר מציגים התנהגות שונה, מה שמצביע על כך שהם אינם מתמקמים במלואם בסדקים. זה מביא להפחתה זמנית במתח לאחר תקופה מסוימת. הסבר אפשרי אחד הוא שמוצרי קורוזיה אלו מכילים כמות משמעותית של מים, מה שגורם להם להתנהג כמו גוש נוזלי בתוך הסדקים, המושפע מההתנגדות המכנית של הבטון.

בנוסף, הנתונים מצביעים על הפסד במקדם פואסון. תוצרי הקורוזיה שנוצרו תקועים בסדקים פועלים כמו טריזים, ומונעים מהדגימה לחזור למצבה המקורי. ככל שמצטברים יותר מוצרי קורוזיה, או אם תוצרי הקורוזיה מתרחבים עקב שינויים בנפח, הדבר מגדיל את המתח האורך מבלי להשפיע בהכרח על המתח הרוחבי. תופעה זו מדגישה את האינטראקציה המורכבת בין קורוזיה, מתח מכני של הבטון.

בנוסף, החשיפה האגרסיבית ל-18 וולט מצביעה על כך שמוצרי קורוזיה אינם משפיעים באופן משמעותי על מדי המתח המוטבעים עמוק יותר בתוך הבטון. זה יכול להסביר מדוע לא נצפתה השפעה על המתח בתחילה. אולם ברגע שנוצרים סדקים, המצב משתנה, ומדי המתח מתחילים לרשום תגובות בולטות יותר.

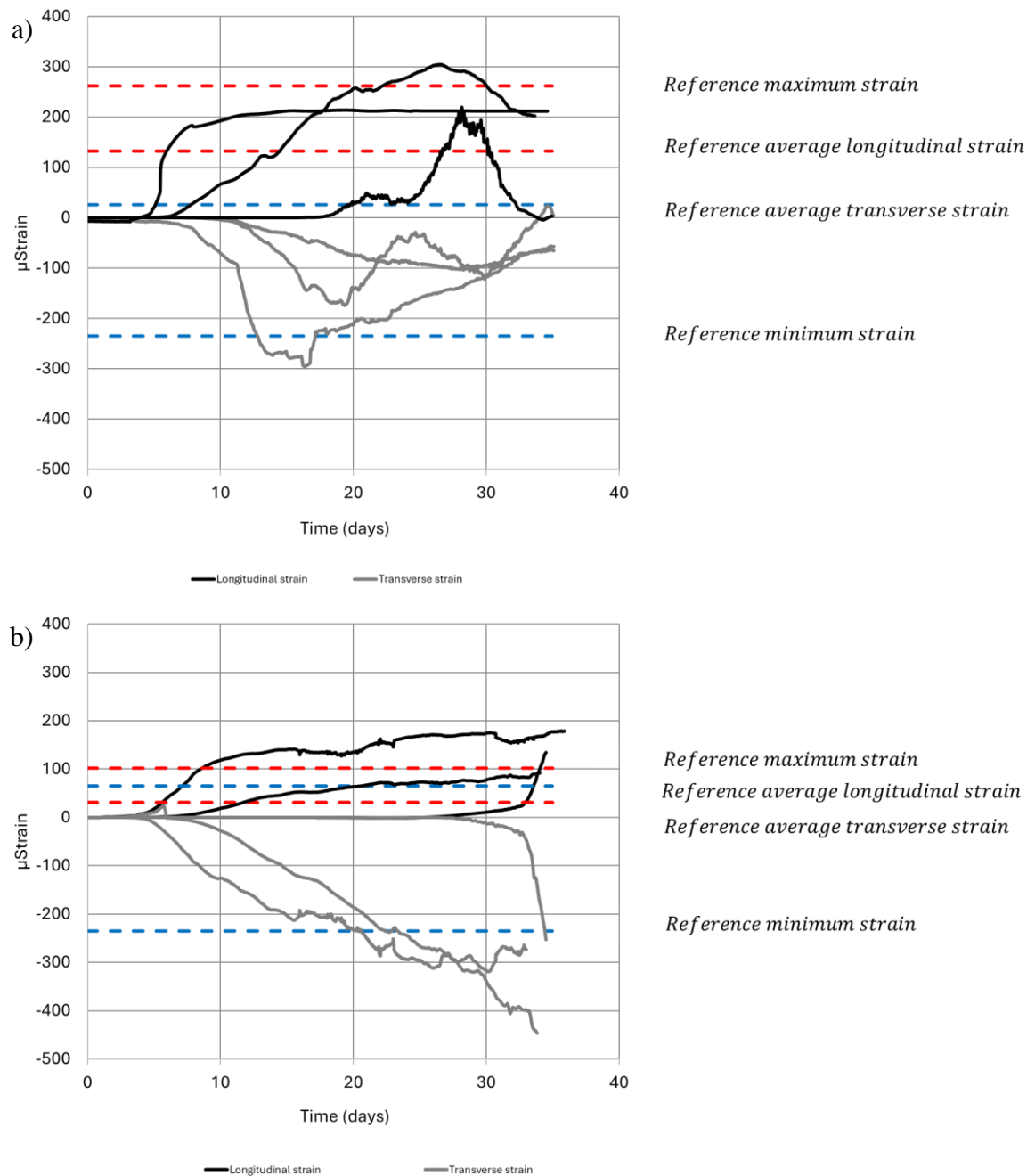


Figure 12: Strain development in concrete after initial 5 days of exposure without external voltage, followed by 28 days under 18 volts: (a) Concrete Grade 30; (b) Concrete Grade 60
 איור 12: התפתחות עיבורים 5 ימים ראשוניים ללא מתח חשמלי, ולאחר מכן 28 ימים מתחת ל-18 וולט
 בבטון: (א) ב-30; (ב) ב-60

איור 13 מציג את הקשר בין כוח לעיבור, תוך הדגשת ההשפעה של הפעלת 18 וולט במשך 28 ימים על יכולת נשיאת העומס של דגימות הבטון בנקודת השבר. עבור דגימות ה-NSC חוזק השבר הממוצע נרשם ב-1127 kN, המייצג ירידה של 32.8% בהשוואה לדגימות הייחוס. בינתיים, בדגימות הבטון של MSC חוזק השבר הממוצע היה 1345 kN, והראה ירידה גדולה עוד יותר של 36.5%. זה מצביע על כך שחוזקו של הבטון אינו מעכב באופן משמעותי את השפלה הנגרמת על ידי קורוזיה תחת מתחים חשמליים גבוהים כגון 18 וולט.

עבור המדגמים שלאחר השפעת של מתח חשמלי/כלוריד גורם המשיכות היה $\mu = 1.18$ בבטון ב-60%. עם זאת, בבטון ב-30% גורם המשיכות היה $\mu = 1.91$. בבטון ב-60% הירידה הייתה משמעותית והגיע ל-40% לעומת הבטון החלש שבתנאים הללו הירידה הייתה מזערית של 3% בלבד. פרמטר זה הינו מטה היות ותזוזה גדולה נובעת מסגירת סדקים מתיחה במהלך הלחיצה ולקיחת נקודת יחוס מנקודת התחלה של ניסוי הלחיצה.

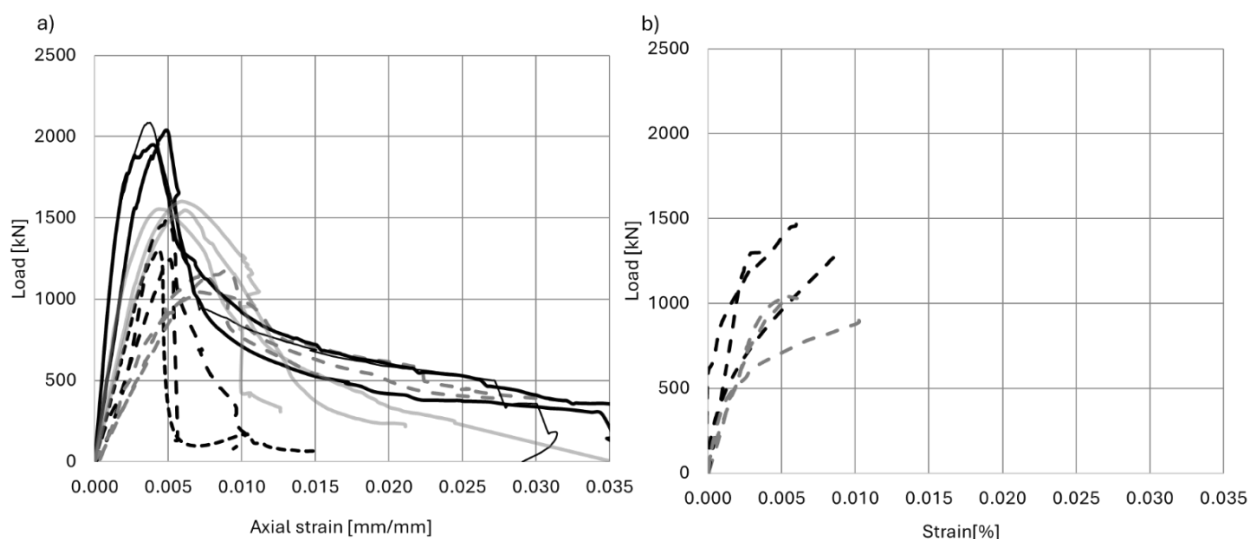


Figure 13: a) Compressive load – axial strain diagrams of the after exposure to 18 V and 60 % load carrying capacity

b) Compressive load - transverse strain diagrams

איור 13 : א) עומס לחיצה צירי כנגד כוח עיבור של מדגם לאחר חשיפה ל-18 וולטו-60% יכולת נשיאת עומס ב) דיאגרמת עיבור רוחבי כפונקציה של כוח צירי

3.7. דיאגרמות עומס – עיבור לחיצה צירי של העמודים החשופים לשילוב עומס צירי של 60% ומתח חשמלי של 9 וולט

השפעת הקורוזיה עם ובלי עומס לחיצה צירי קבוע (המייצג עומס שירות) על ההתנהגות המבנית של דגימות עמודי הבטון מזוין מתוארת להלן. עבור הדגימות שעברו יישום משולב של מתח/כלוריד ועומס שירות של 1200 קילו-ניוטון, הכוח הממוצע שנמדד היה 1491 קילו-ניוטון ומקדם המשיכות שחושב היה $\mu=1.22$ אשר מייצג ירידה של 34.7% ו-37.4% בחוזק כושר הנשיאה וגמישות, בהתאמה.

איור 9 מציג את ההשפעה של השילובים עבור מדגם MSC.

איור 14 : דיאגרמות עומס לחיצה צירי - עביר של דגימות הייחוס (P0_1-3), הדגימות שנחשפו למתח חשמלי של 9 V (PV9_L0_1-3); והדגימות שנחשפו לשילוב של עומס שירות של 1200 קילו-ניוטון ומתח חשמלי של 9 V (PV9_L120_1-3)

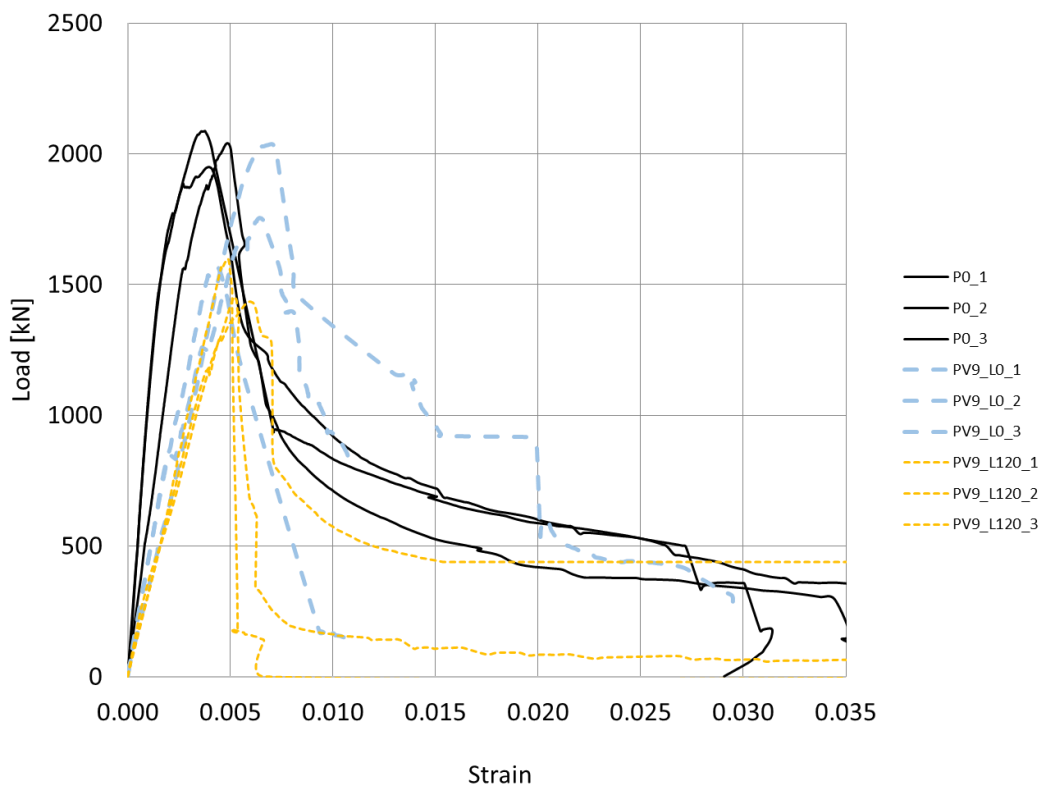


Figure 14: Compressive axial load - strain diagrams of the reference samples (P0_1-3), the samples exposed to the voltage of 9 V (PV9_L0_1-3), and the samples exposed to the combination of service load of 1200 kN and the electrical voltage of 9 V (PV9_L120_1-3)

איור 14 : דיאגרמות עומס לחיצה צירי - עביר של דגימות הייחוס (P0_1-3), הדגימות שנחשפו למתח חשמלי של 9 V (PV9_L0_1-3); והדגימות שנחשפו לשילוב של עומס שירות של 1200 קילו-

3.8. השוואת שיעורי קורוזיה במוטות חיזוק בטון: ניתוח המבוסס על שינוי מסה

טבלה 3 מסכמת את התוצאות של מדידות אובדן מסה של מוטות חיזוק לאחר חשיפה למתח חשמלי של 9 וולט בבדיקת קורוזיה בשילוב עם סביבת כלוריד לדגימות שעברו רק הרטבה וייבוש בתמיסת מלח. המוטות הוסרו לאחר תקופת הבדיקה. לאחר מכן, תוצרי הקורוזיה טופלו בליטוש עדין, והמסה הנותרת השווה למסה הראשונית של המוטות. פסים אורכיים חוו אובדן מסה של 94.6%, ואילו פסים רוחביים היו בעלי אובדן מסה של 80.0% עבור דגימות NSC. לעומת זאת, בדגימות בטון MSC, הערכים היו 96.7%-88.4%, בהתאמה. יתרה מכך, בדגימות שנחשפו למשטר של הרטבה וייבוש במשך 47 שבועות, תוצאות המדידות בדגימות NSC היו 96.6%-97.7%, ובדגימות MSC 96.8%-97.6%, בהתאמה. כל הערכים מבוטאים כאחוז ממשקלם של מוטות חדשים שלא נחשפו כלל. עלייה במתח לא מהכרח משנה את כמות הקורוזיה היות ותוצרי קורוזיה אטומים יותר נוצרים בקצב זמן מהיר יותר מה שמעכב את תהליך להתפתח בהמשך.

Table 4: Mass loss measurements of reinforcing bars after corrosion test

טבלה 4: מדידות אובדן מסה של מוטות חיזוק בבדיקת קורוזיה מואצת

Sample Type	longitudinal bars [%]	transverse bars [%]
Samples NSC exposed to stray electric voltage 9 V	94.6	80.0
Samples MSC exposed to stray electric voltage 9 V	96.7	88.4
Samples NSC exposed to stray electric voltage 18 V	95.2	78.9
Samples MSC exposed to stray electric voltage 18 V	95.9	84.6
Wetting and drying cycles, NSC	96.6	97.7
Wetting and drying cycles, MSC	96.8	97.6

איור 15 מציג את מוטות החיזוק שהוסרו לאחר הטעינה על מדגם MSC. באיור המוטות האורכיים ניכרת קורוזיה במוט בהשוואה לחישוקים, קורוזיה מקומית והפחתה משמעותית בשטח חתך. בנקודת המינימום, הקוטר ירד ל-46% מהקוטר ההתחלתי. מאידך לא נצפתה ירידה בקוטר למוטות אורכיים, אלא הופיעו נישות קטנות בעומק המוט.



Figure 15: Photograph of the rebars removed from SCS sample
איור 15 : תצלום של המוטות שהוסרו מדגימת SCS

3.9. השפעת מחזורי הרטבה וייבוש על פוטנציאל חצי תא והתנגדות חשמלית פני השטח

איור 10 מתאר דגימות העוברות מחזורי הרטבה וייבוש, עם מדידות של פוטנציאל חצי תא והתנגדות חשמלית. איור 10a מציג תוצאות עבור בטון חלש, ואילו איור 10b ממחיש את אלו עבור בטון חזק. בדגימות הנתונות להרטבה וייבוש (איור 10a), נצפית עלייה בפוטנציאל החשמלי של חצי תא, המסומנת על ידי ירידה במתח (ערכים הופכים שליליים יותר) בין המדגם לבין אלקטרודת ייחוס. זה מרמז על סבירות מוגברת לתהליך הקורוזיה. במקביל, ההתנגדות החשמלית של דגימות אלו יורדת, מה שמסמל חדירת כלורידים לבטון ושינוי באלקטרוליט בתוך נקבוביות הבטון. לעומת זאת, בטון יבש באופן עקבי מראה ערכים חיוביים של פוטנציאל חצי תא, המעיד על פסיביות הפלדה. בנוסף, מצוינת עלייה בהתנגדות החשמלית של בטון, המיוחסת לנקבוביות מופחתת כתוצאה מהידרציה המאוחרת ותהליך הקרבונציה וסבירות נמוכה יותר לקורוזיה. עם זאת, בטון NSC מפגין התנגדות חשמלית נמוכה משמעותית. לפי הנחיות AASHTO TP 95, ערכי התנגדות חשמלית מתחת ל-12 קילו-אום לס"מ (או 9.5, תלוי בגודל המדגם) מרמזים על חדירות יוני כלוריד גבוהה. לפיכך, בטון חזק יותר עשוי להכיל יותר כלורידים תוך שמירה על עמידות בפני קורוזיה. אפילו בדגימות שהיו נתונות לתנאי יובש קבועים, נצפו ערכי התנגדות נמוכים, המשקפים את מאפייני מטריצת הבטון. תוצאות המדידה של פוטנציאל חצי תא לדגימות WS בתנאים של תמיסת כלוריד 3.5% מושוות לדגימות במצב יבש, ללא חשיפה לכלורידים כלל. מחזורי הרטבה וייבוש פעלו לפי לוח הזמנים הבא: ארבעה שבועות במצב רטוב ואחריהם ארבעה שבועות במצב יבש. המדידה הראשונה נעשתה לאחר 90 יום מיום היציקה.

לאחר חמישה שבועות, נצפית תגובה אלקטרוכימית ברורה, המובילה לעלייה בערכי חצי התא של 524 ו-74 mV בהתאמה. לאחר תקופה זו, נצפתה עלייה קבועה בפוטנציאל החשמלי. כמו כן, לא היה שינוי משמעותי לאורך זמן, במיוחד כאשר משווים בין דגימות הנתונות למחזורי רטובים ויבשים לעומת הדגימה

שנשארה במצב יבש באופן עקבי. ההבדל הוא בערך 600 mV שהוא קרוב מאוד לערך המקסימלי של 700 mV כאשר בוחנים קורוזיה במוט זיון חשוף [49].

הדגימות היבשות מראות רק 10% סבירות לעבור תהליך קורוזיה. לעומת זאת, הדגימות הנתונות למחזורים מראות הסתברות גבוהה משמעותית של 90%.

בבטון ב-60 ניתן לראות שהדגימות שעברו מחזורי הרטבה וייבוש בשלב הראשוני של 4 שבועות חוו ירידה בפוטנציאל חצי תא, ירידה נמוכה עד 620 mV, ולאחר מכן התאוששות לפוטנציאלים שנעים בין 420 עד 290 mV, הדבר מראה מגמה של התאוששות הדרגתית לאורך זמן. לעומת זאת, דגימות יבשות הראו תחילה ערכים חיוביים במשך 4 שבועות, ולאחר מכן ירידה והתאוששות לאחר מכן לערכים חיוביים סביב 100 mV, מה שמצביע על הסתברות של 10% בלבד לקורוזיה. בנוסף, שתי הדגימות שהועברו למחזורי הרטבה וייבוש והדגימה שנשמרה יבשה באופן עקבי הראו עלייה בו-זמנית בהתנגדות החשמלית בקצב דומה, דבר המצביע על חיזוק הבטון ותהליך הקרבונציה שלו.

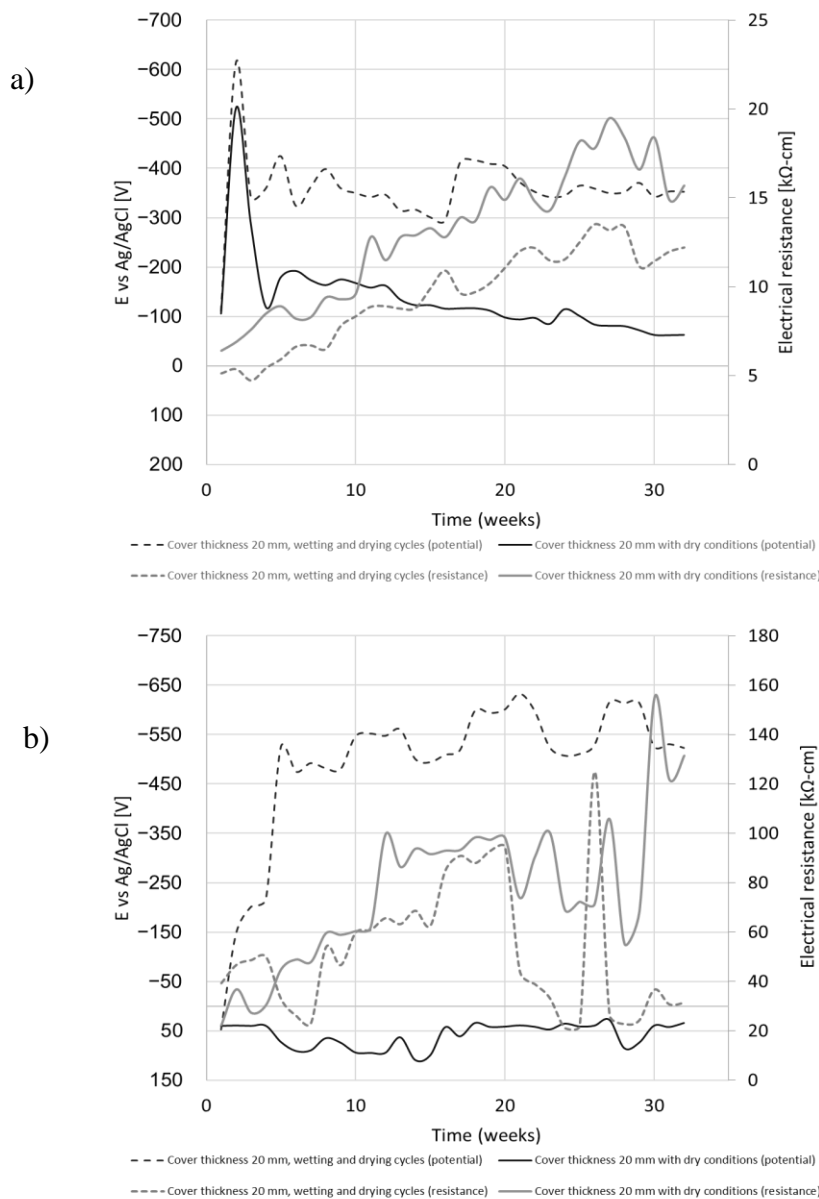


Figure 1 Comparison of half-cell potential and electrical resistance change due to wetting and drying cycles compared to a constant dry state: a) NSC, b) MSC

איור 16 : השוואה בין פוטנציאל חצי תא ושינוי התנגדות חשמלית עקב מחזורי הרטבה וייבוש : בהשוואה

3.10. שינויים בקצב קורוזיה עקב שינוי ריכוז כלוריד ועובי הכיסוי הבטון

יונים נעים בדרך כלל בזוגות עם מטענים מנוגדים כדי לשמור על ניטרליות חשמלית. אם הם לא מצליחים לנוע יחד, מצטבר פוטנציאל חשמלי, הגורם להם לחזור אחד לעבר השני עקב אלקטרומגרציה. אלקטרומיגרציה מתרחשת כאשר יש שדה חשמלי, שעלול להיגרם על ידי גורמים שונים כולל דליפה מאספקת חשמל או פוטנציאל חשמלי מקורוזיה על פלדת חיזוק. בבטון, למשל, אם מופעל עליו שדה חשמלי, יונים שליליים ינדו לעבר האלקטרודה החיובית. אלקטרומיגרציה זו היא תנועה בבטון בנתיב מפתח המוליך חשמל וניתן לכמת אותו על ידי מדידת ההתנגדות החשמלית של הבטון [67] [68].

להלן פתרון משולב למשוואת Nernst-Planck שנותנת את ריכוז יוני הכלוריד בזמנים שונים [67–69]:

$$(5) \quad C_{cl} = \frac{C_0}{2} \cdot \left[e^{a \cdot x} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x+a \cdot D \cdot t}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{x-a \cdot D \cdot t}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}} \right) \right]$$

בו: $a = \frac{zF_a E}{RT}$ או מתח חיצוני, C_0 , הוא הריכוז ההתחלתי על פני השטח x הוא המרחק מהמשטח, D הוא מקדם הדיפוזיה ו- t הוא זמן. הפתרון הנגזר ממשוואת Nernst-Planck עבור יון בודד בבידוד, במתח חיצוני אפס, מתיישב עם התוצאה של החוק השני של פיק. משוואה זו מייצגת למעשה תרחיש ללא מתח מופעל. בתחילה, הוא מניח ריכוז אפס של כלורידים בתוך המדגם. מתודולוגיה זו שולבה בתקני בנייה ובקודים שונים [10] [70]. נוסחה מס' 1 מצביעה על כך שריכוז הכלורידים משתנה עם הזמן, בתנאי שכל שאר הפרמטרים נשארים קבועים ונקבעים על פי הצורה הגיאומטרית של עובי הכיסוי או סוג הבטון.

הגישה הסטנדרטית מציעה שכאשר ריכוז הכלוריד על פני הפלדה עובר רמה מסוימת, הוא פוגע בשכבת התחמוצת המגן, מה שמוביל לקורוזיה. תהליך קורוזיה זה יכול בסופו של דבר לגרום לסדקים, הידרדרות וכשל מבני [71]. תקופת ההתחלה היא הזמן שלוקח לכלורידים או פחמימה לפגוע בשכבת ההגנה על החיזוק. לאחר ההתחלה, במהלך תקופת ההתפשטות, חיזוק הפלדה חווה ירידה בשטח החתך [71] [72].

איור 11 מציג את התוצאות של חשיפת דגימת בטון לרמות כלוריד משתנות לאורך זמן. כל שינוי בריכוז הכלוריד עורר תגובה מיידית בפוטנציאל החשמלי, הניכר כפסגות בגרף. נעשה שימוש בדגימות המסומנות D8_C20, D8_C30 ו-D8_420, דגימות עם עובי כיסוי של 20 מ"מ, 30 מ"מ ו-40 מ"מ בהתאמה, הכוללות ברזלים בקוטר 8 מ"מ וסוג MSC בטון (איור 11א). בתחילה, בתמיסה נטולת כלוריד, ערכי הפוטנציאל של המעגל הפתוח היו בממוצע סביב -1.5 mV. עם המעבר לתמיסת כלוריד של 3.5%, נצפו ירידות משמעותיות בפוטנציאל החשמלי, בממוצע של -120.4 mV ו-74.4 mV עבור עובי כיסוי של 20 מ"מ, 30 מ"מ ו-40 מ"מ בהתאמה. ירידה זו נמשכה במשך ממוצעים של 57 שעות, 64 שעות ו-64 שעות בהתאמה עד שהגיעה למינימום המקומי. לאחר מכן, החל שלב התאוששות, עם עלייה ממוצעת בפוטנציאל של +75.7 mV ו-80.2 mV, +62.18 mV בהתאמה. משך ההחלמה עמד בממוצע על 182 שעות עבור כל עובי הכיסוי. לאחר כ-60 יום, ריכוז המלח של התמיסה עלה ל-7% במשקל. התגובה המיידית הראתה פחות שינויים שליליים בהשוואה לריכוז של 3.5%, עם ירידות פוטנציאליות בממוצע ב-90.2 mV ו-56.7 mV בהתאמה. לאחר מכן, לא נצפתה התאוששות, והשינוי התרחש עם הגדלת ריכוז הכלוריד ל-10%. השינויים הנמדדים בפוטנציאל חצי תא היו ממוצעים של -423.5 mV עבור כל עובי הכיסוי, כאשר משך הירידה בממוצע היה 52 שעות. לאחר 218 ימים, הניסוי הופסק כאשר נצפתה התאוששות בפוטנציאל חצי תא בדגימות עם עובי כיסוי של 40 מ"מ ו-30 מ"מ. הערכים הנמדדים היו -167.35 mV ו-176.5 mV בהתאמה, בעוד שדגימות עם עובי כיסוי של 20 מ"מ הציגו פוטנציאל נמוך במיוחד ב-377 mV, מה שמצביע על קורוזיה מתמשכת ללא התאוששות. נעשה שימוש בדגימות המסומנות D12_C20, D12_C30 ו-D12_C40, עם עובי

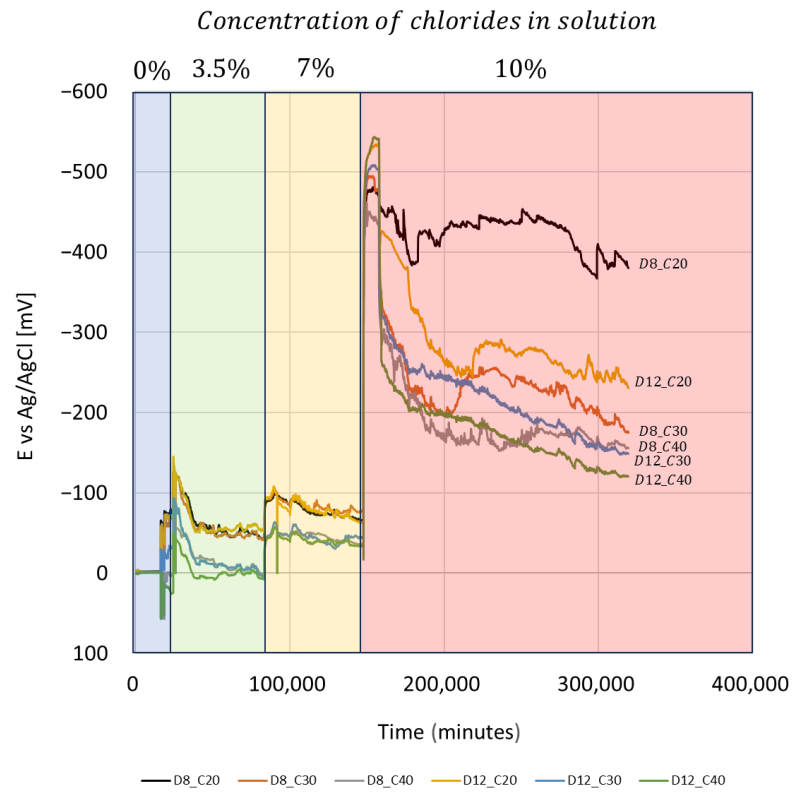
כיסוי של 20 מ"מ, 30 מ"מ ו-40 מ"מ בהתאמה, כולן כוללות מוטות בקוטר 12 מ"מ. בתחילה, בתמיסה נטולת כלוריד, ערכי פוטנציאל המעגל הפתוח היו בממוצע כ-3.4 mV. עם החלפת תמיסה זו בתמיסת כלוריד 3.5%, נצפתה ירידה משמעותית בפוטנציאל החשמלי. הפוטנציאל ירד למוצעים של -87.2 mV, -91.4 mV, ו-45.2 mV עבור עובי כיסוי של 20 מ"מ, 30 מ"מ ו-40 מ"מ בהתאמה. ירידה זו נמשכה במשך ממוצעים של 75 שעות, 111 שעות ו-64 שעות בהתאמה עד שהגיעה למינימום המקומי. בעקבות ירידה זו, החל שלב התאוששות, עם ערכים ממוצעים של +61.2 mV, +71.0 mV, ו-40.6 mV עבור עובי כיסוי של 20 מ"מ, 30 מ"מ ו-40 מ"מ בהתאמה. תהליך ההחלמה נמשך ממוצעים של 112 שעות, 381 שעות ו-387 שעות בהתאמה. לאחר שינוי ריכוז המלח בתמיסה ל-7% במשקל, נצפתה תגובה מיידית, כאשר הפוטנציאל החשמלי יורד תוך ממוצעים של 79 שעות, 96 שעות ו-73 שעות בהתאמה עבור עובי הכיסוי השונים. ערכי הפוטנציאל ירדו למוצעים של -48.6 mV, -40.5 mV, ו-46.8 mV בהתאמה. לאחר מכן, תהליך ההחלמה נמשך עד שריכוז התמיסה הועלה עוד יותר ל-10%. בשלב זה, השינוי הנמדד בפוטנציאל היה ממוצע של +25.03 mV, +14.90 mV, ו-23.59 mV בהתאמה עבור עובי הכיסוי השונים. לאחר הגדלת הריכוז ל-10%, הפוטנציאלים הנמדדים של חצי תא הגיעו למוצעים של -481.5 mV, -462.0 mV, ו-511.9 mV בהתאמה, כאשר משך הירידה בממוצע היה 70 שעות, 75 שעות ו-75 שעות בהתאמה. זמן של הגדלת ריכוז הכלוריד בתמיסה. עד סוף תקופת הניסוי, נצפתה עלייה בערכי הפוטנציאל של חצי תא, בממוצע של +328.00 mV, +356.39 mV. אותו סימון שימש עבור דגימות בטון NSC המסומנות D8_C20, D8_C30 ו-D8_420, שלהן עובי כיסוי של 20 מ"מ, 30 מ"מ ו-40 מ"מ, בהתאמה, וקוטר כולל של 8 מ"מ (איור 11ב). בתחילה, בתמיסה נטולת כלוריד, ערכי פוטנציאל המעגל הפתוח היו בממוצע סביב 40.7 mV. במעבר לתמיסת כלוריד של 3.5%, נצפו ירידות בפוטנציאל החשמלי, בממוצע -98.9 mV, -157.69 mV, ו-94.64 mV עבור עובי כיסוי של 20 מ"מ, 30 מ"מ ו-40 מ"מ, בהתאמה. ירידה זו נמשכה בממוצע 87.8 שעות, 147.9 שעות ו-177.83 שעות עד להשגת המינימום המקומי. לאחר מכן החל שלב התאוששות, עם עלייה ממוצעת בפוטנציאל של +98.5 mV, +80.2 mV, ו-65.0 mV בהתאמה. זמן ההתאוששות היה ממוצע של 242 שעות עבור כל עובי הכיסוי.

לאחר כ-60 יום, ריכוז המלח של התמיסה עלה ל-7% במשקל. התגובה המיידית הראתה את אותה מגמה כמו דגימות בטון חזקות בשלב זה של השינוי בריכוז הכלוריד, בממוצע -66.4 mV, -80.4 mV, ו-24.2 mV. לאחר מכן, לא נצפתה התאוששות, בדומה לדגימות בטון חזקות, כאשר הגדלת ריכוז הכלוריד ל-10%. הממוצעים הפוטנציאליים היו -625.2 mV, -466 mV, ו-506.3 mV בהתאמה, כאשר משך הירידה היה ממוצע של 120, 130 ו-35 שעות. לאחר 218 ימים, הניסוי הופסק כאשר נצפתה התאוששות פוטנציאלית של חצי תא בכל הדגימות. עם זאת, דגימה בעובי ציפוי של 20 מ"מ עדיין שמרה על רמה גבוהה של הסתברות קורוזיה. נעשה שימוש גם בדגימות המסומנות D12_C20 ו-D12_C40. לדגימות אלו היו עובי כיסוי של 20 מ"מ, 30 מ"מ ו-40 מ"מ, בהתאמה, והציגו מוטות בקוטר 12 מ"מ. בתחילה, עם בטון WSR חלש בתמיסה נטולת כלוריד, ערכי פוטנציאל המעגל הפתוח היו בממוצע כ-47.6 mV. עם החלפת תמיסה זו בתמיסת כלוריד 3.5%, נצפתה ירידה משמעותית בפוטנציאל החשמלי, בממוצע -120.6 mV, -105.9 mV, ו-107.0 mV עבור עובי כיסוי של 20 מ"מ, 30 מ"מ ו-40 מ"מ, בהתאמה. הירידה נמשכה ממוצעים של 156.5 שעות, 150 שעות ו-127 שעות, בהתאמה, עד שהגיע למינימום המקומי. בעקבות ירידה זו, החל שלב התאוששות, עם ערכים ממוצעים של +87.6 mV, +90.1 mV, ו-75.5 mV עבור עובי כיסוי של 20 מ"מ, 30 מ"מ ו-40 מ"מ, בהתאמה. תהליך ההחלמה נמשך בממוצע 332 שעות, 352 שעות ו-224 שעות. לאחר שינוי ריכוז המלח בתמיסה ל-7% לפי משקל, נצפתה תגובה מיידית, עם ירידה בפוטנציאל החשמלי תוך ממוצעים של 140, 172 שעות ו-125 שעות, בהתאמה, לעובי הכיסוי השונים. ערכי הפוטנציאל ירדו למוצעים של -66.4 mV, -80.45 mV, ו-75 mV בהתאמה. לאחר מכן, תהליך ההחלמה נמשך עד שריכוז הכלוריד של התמיסה הועלה

ל-10%. בשלב זה, השינוי הנמדד בפוטנציאל היה ממוצע של $+25.03 \text{ mV}$ ו- $+23.59 \text{ mV}$ עבור עובי כיסוי שונים. לאחר הגדלת הריכוז ל-10%, הפוטנציאלים הנמדדים של חצי תא היו בממוצע -399 mV , -608 mV ו- -560 mV , בהתאמה, כאשר משך הירידה היה בממוצע 271.5 שעות, 164.9 שעות ו-172 שעות, בהתאמה.

בתקופת הניסוי נצפתה עלייה בערכי הפוטנציאל של חצי תא, עם ממוצעים של $+342.00 \text{ mV}$ ו- $+381 \text{ mV}$ ו- $+423 \text{ mV}$. בנייתוח השוואתי בין בטון חזק (MSC) ובטון חלש (NSC), פוטנציאל המעגל הפתוח הראשוני של MSC גבוה משמעותית ב-96.31%. בחשיפה לתמיסת כלוריד של 3.5%, הירידה הפוטנציאלית של MSC ב-20 מ"מ גבוהה ב-17.85% מ-NSC, בעוד שב-30 מ"מ ו-40 מ"מ, הירידה הפוטנציאלית של NSC גבוהה ב-36.29% ו-21.39%, בהתאמה. משך הירידה הפוטנציאלית עבור NSC ארוך יותר ב-35.09% ב-20 מ"מ, אך 56.72% ב-30 מ"מ ו-64.11% ב-40 מ"מ. בשלב ההתאוששות, NSC מראה עלייה של 23.14% ב-20 מ"מ, אך הערכים משתווים ל-30 מ"מ, וב-40 מ"מ, NSC גבוה ב-4.33% בלבד. הירידה הפוטנציאלית של MSC בתמיסת כלוריד של 7% גבוהה ב-26.39% ב-20 מ"מ, ב-10.85% ב-30 מ"מ ושיעור משמעותי של 57.27% ב-40 מ"מ. בתמיסת כלוריד מרוכזת יותר, הירידה בפוטנציאל חצי תא של NSC גבוהה משמעותית, ב-32.27% ב-20 מ"מ, 9.11% ב-30 מ"מ ו-16.37% ב-40 מ"מ. לבסוף, הפוטנציאל הסופי של חצי תא של NSC גבוה ב-5.51% ב-20 מ"מ, 72.43% ניכר ב-30 מ"מ ו-68.45% ב-40 מ"מ.

a)



b)

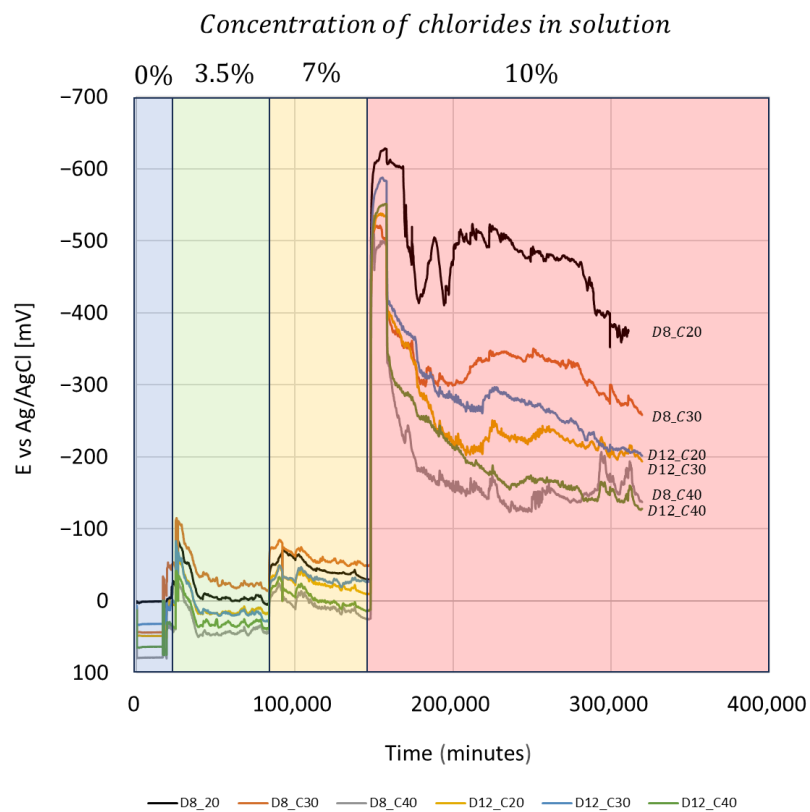


Figure 17: Electric potential change due to chloride concentration change: a) Concrete Grade 60; b) Concrete Grade 30

איור 17 : שינוי הפוטנציאל החשמלי עקב שינוי ריכוז הכלוריד : א) בטון ב-60 ; ב) בטון ב-30

3.11. חדירות כלוריד בשיטה קולורימטרית

תוצאות התגובה של AgNO_3 עם יוני כלוריד וקטע טרי של דגימות בטון מזוין עשוי MSC עם מוטות בקוטר 8 מ"מ מוצגות באיור 12 (a1-3). הקו הכתום מסמל את הגבול שבו כלורידים חופשיים הגיבו עם AgNO_3 . ניתן לראות באיור זה, בעובי כיסוי הבטון של 2 ס"מ, הכלורידים הגיעו לממשק עם המוט ב-59% מאורך המוט. לעומת זאת, בדגימה בעובי כיסוי של 3 ס"מ ובקוטר מוט של 8 מ"מ, הממשק עם כלוריד יורד ל-13% בלבד מאורך המוט. בדגימה בעובי כיסוי של 4 ס"מ ובקוטר מוט של 8 מ"מ, יוני הכלוריד החופשיים אינם מגיעים כלל אל המוט. בדגימות עם מוטות בקוטר 12 מ"מ התוצאות שהתקבלו היו כדלקמן: עבור עובי כיסוי של 20 מ"מ הכלורידים הגיעו ל-72% מאורך המוט, אולם בדגימות בעובי כיסוי של 30 מ"מ הכלורידים הגיעו רק 16% מאורך המוט, בעוד שבדגימות בעובי כיסוי של 40 מ"מ כלורידים כלל לא הגיעו אל המוט.

כאשר בודקים את הדגימות בעובי כיסוי של 20 מ"מ ובקוטר סרגל של 8 מ"מ (איור 12b) עשויות בטון חלש יותר (NSC), הכלורידים הגיעו לממשק עם המוט ב-58% מהאורך. עבור סרגל בקוטר 12 מ"מ, 94% מהאורך הושפע מכלורידים. זה מצביע על כך שבעובי כיסוי של 20 מ"מ, יש עקביות בין שני הניסויים. קוטר המוט משפיע באופן משמעותי על משיכת הכלורידים. כאשר בודקים את הדגימות בעובי כיסוי של 20 מ"מ ובקוטר של 8 מ"מ (איור 12b) העשויות מהבטון החלש יותר (NSC), ניתן, לראות שהכלורידים הגיעו לממשק עם המוט ב-58% מאורך החזית של המוט (מגע כלורידים פלדה) לעומת המוט עם קוטר של 12 מ"מ בו ב-94% קיים ממשק עם כלורידים והמוט. ניתן לראות שבעובי כיסוי של 20 יש התאמה בין שני הניסויים והמוט. קוטר המוט הוא טריגר למשיכת כלורידים.

בעובי כיסוי של 30 מ"מ ובקוטר מוט של 8 ו-12 מ"מ, הממשק היה 89% ו-63% בהתאמה. בעובי כיסוי של 40 מ"מ, הממשק היה 74% ו-10% בהתאמה, לפי קוטר המוט.

בהשוואה בין בטון חזק יחסית (MSC) לבטון חלש יותר (NSC), עולים הבדלים בולטים באחוזי חדירת הכלוריד. בדגימות MSC, בעובי כיסוי של 20 מ"מ ובקוטר סרגל של 8 מ"מ, הגיעה חדירת הכלוריד ל-72% מאורך המוט, בעוד שבדגימות NSC באותם תנאים, החדירה הייתה מעט נמוכה יותר, 58%. מגמה זו נמשכת עם הגדלת עובי הכיסוי: ב-30 מ"מ, MSC הפגין חדירה של 16%, בעוד של-NSC היה אחוז גבוה יותר ב-89%. יתר על כן, בעובי כיסוי של 40 מ"מ, MSC לא הראה מגע עם כלוריד, בניגוד ל-NSC, שם עדיין הייתה חדירה מסוימת, אם כי מוגבלת ל-74% בקוטר בר של 8 מ"מ ורק 10% בקוטר בר של 12 מ"מ.

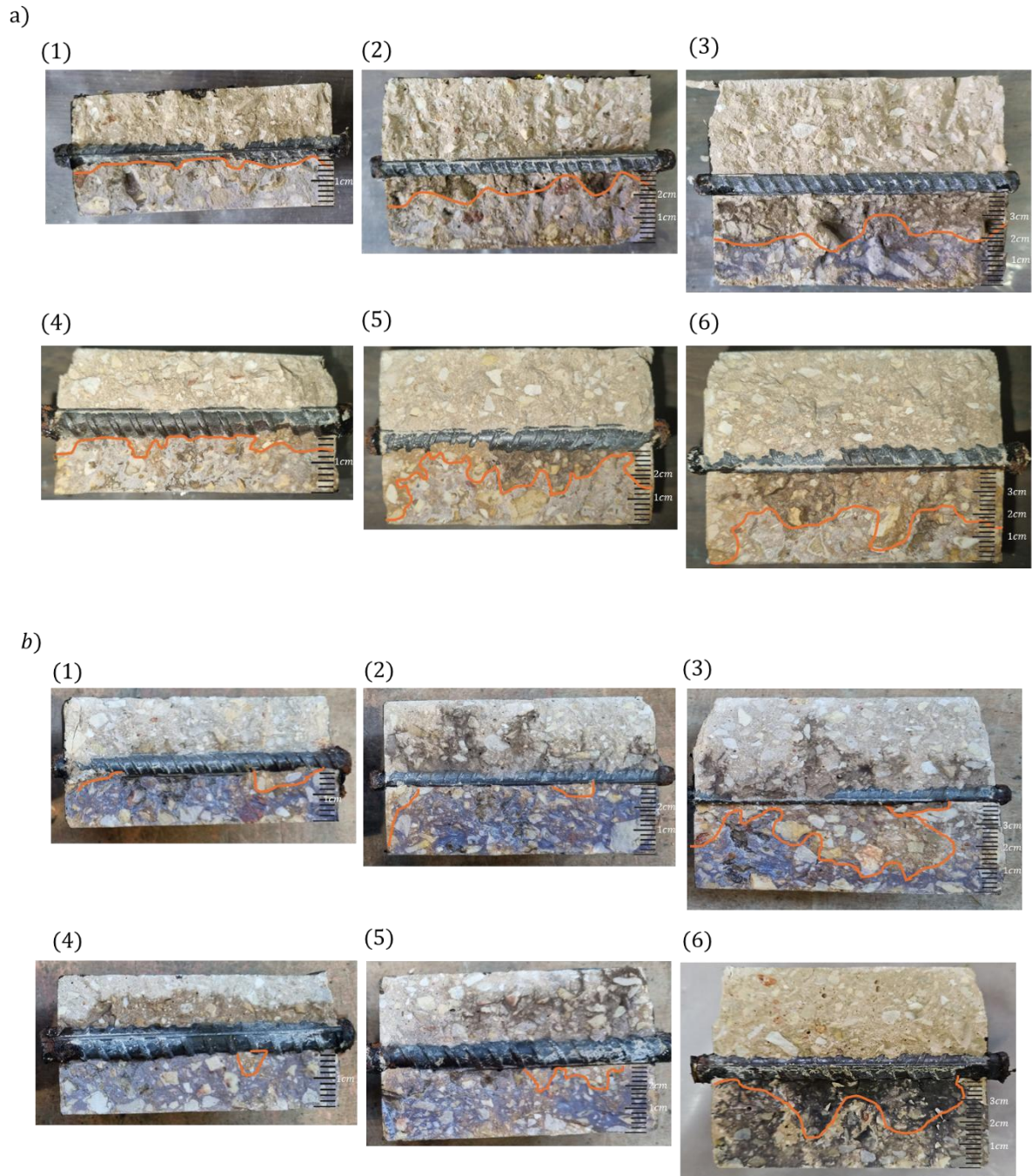


Figure 18: Results of the colorimetric test in fresh cross-sections of reinforced concrete specimens: a) Concrete Grade 60; b) Concrete Grade 30; (1-3) - specimens with 8-mm diameter steel rods; (4-6) - specimens with 12-mm diameter steel rods

איור 18 : תוצאות בדיקה קולורימטרית בחתכים טריים של דגימות מבטון : א) בטון ב-60 ; ב) בטון ב-30 ; (1-3) – דגימות עם מוט בעל קוטר של 8 מ"מ ; (4-6) – דגימות עם מוט בעל קוטר של 12 מ"מ

3.12. קביעת ריכוז יוני כלוריד על ידי טיטרציה

בוצעה בדיקת טיטרציה כדי להעריך את ריכוז הכלוריד בממשק שבין משטח הבטון למוט הפלדה. בניגוד לציפיות המסורתיות, ריכוזי הכלוריד בתמיסה במגע עם פני השטח עלו עם הזמן, כאשר ריכוזים נרשמו 0%, 3.5%, 7%-10%. עם ניתוק הדגימות ממערכת מדידת המתח, ריכוזי הכלוריד על פני השטח נקבעו כ-0.33% בדיוק של $\pm 0.022\%$ ממשקל דגימת הבטון לבטון MSC ו-0.42% בדיוק של $\pm 0.035\%$. בעומק באמצע הדגימות (20 מ"מ), שבו לא נצפה מגע כלוריד עם מוט החיזוק לפי איור 12, התקבלו ערכים יורדים שהגיעו ל-0.11% $\pm 0.06\%$. עם זאת, בדגימות שבהן ניכר מגע של כלוריד עם מוט החיזוק (עובי כיסוי 20 מ"מ), המגמה שונה. במרכז העומק לא צוין שינוי משמעותי בתכולת הכלוריד בהשוואה למשטח. עם זאת, בממשק הבר, הערכים עלו ל-0.38% $\pm 0.049\%$ ו-0.44% $\pm 0.065\%$ בהתאם לחוזק הבטון.

3.13. השפעת יישום של מעכבי קורוזיה על פני השטח

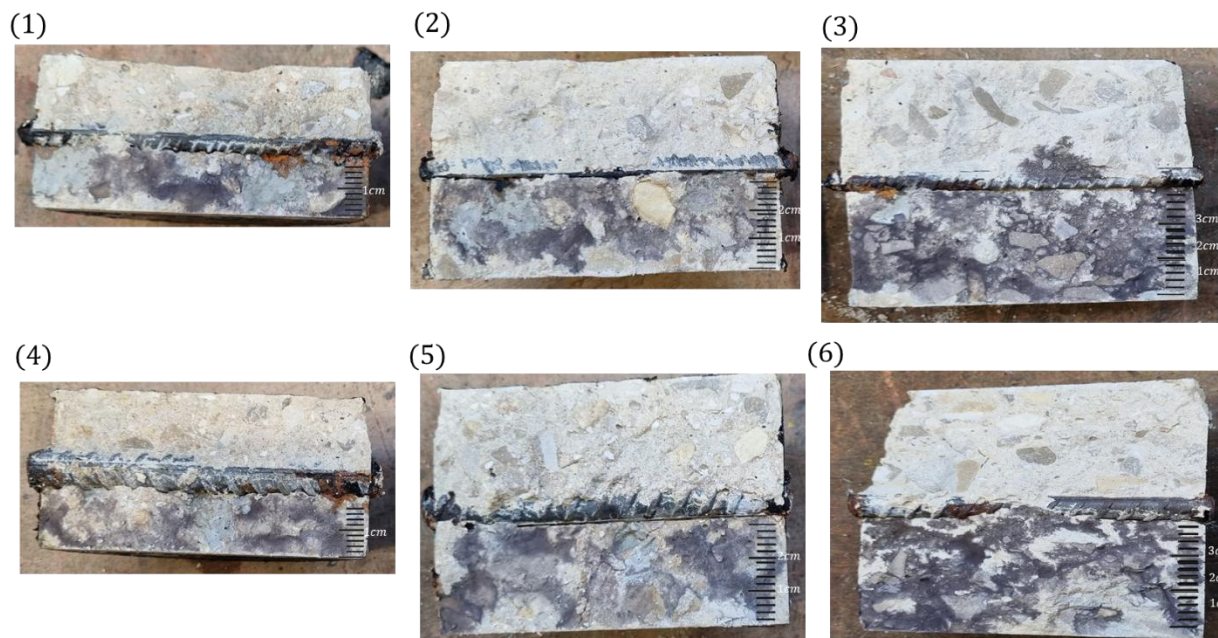
מעכבי קורוזיה הם כימיקלים שכאשר הם נמצאים בריכוזים ספציפיים, מפחיתים את קצב הקורוזיה מבלי לשנות באופן משמעותי את הריכוז של חומרים קורוזיביים אחרים. הם מציעים אלטרנטיבה חסכונית וקלה ליישום לשיטות הגנה ותיקון קונבנציונליות וניתן להשתמש בהם הן במניעה והן כפעולה מתקנת. ניתן לסווג מעכבי קורוזיה על סמך שיטות יישום, מנגנוני הגנה או הרכב. הם עשויים להיות אורגניים או אנאורגניים, לתפקד כמעכבים אנודיים היוצרים סרט פסיבי או כמעכבים קתודיים המגבירים את הקוטביות ומפחיתים את פוטנציאל הקורוזיה. מעכבים מסוימים פועלים בשני הדרכים. שיטות היישום כוללות יישום ישיר לחיזוק באמצעות טיפול מקדים, תוספת למי הערבוב, או יישום פני השטח על מבני בטון מזוין, המאפשרים למעכב לחדור לבטון באמצעות נימיות [73]. במחקר הנוכחי נעשה שימוש ב-MCI-2020, מעכב קורוזיה אורגני. המעכבים מסוג הזה נחשבים מעכבים מעורבים, כלומר הם מגנים על האנודה והקתודה כאחד באזורים בתוך תא קורוזיה. הם מכילים תערובת של אמינו-אלכוהולים ומלחים של חומצות קרבוקסיליות, היוצרות שכבת הגנה על חיזוק מוטבע, עיכוב הופעת קורוזיה וכן הפחתת שיעורי קורוזיה קיימים על פי היצרן [74].

3.14. חדירות כלוריד בשיטה קולורימטרית במדגמים שעברו טיפול עם מעכב קורוזיה

מעכב קורוזיה מסוג יושם באמצעות התזה על פני השטח בשכבה אחת של-7.36 מ"ר/ליטר על פי המלצת היצרן. תוצאות התגובה של $AgNO_3$ עם יוני כלוריד וקטע טרי של דגימות מבטון חזק יותר (MSC) עם מוטות בקוטר 8 מ"מ מוצגות באיור 13. הקו הכתום מסמל את הגבול שבו כלורידים חופשיים הגיבו עם $AgNO_3$. ניתן לראות שבשונה ממדגמים ללא מעקב כאן יש זירוז התהליך וניתן לזהות תוצרי קורוזיה בעין לא מזויינת ואף הדירות מוגברת בכל עובי הכיסוי. זאת ניתן להסביר על פי מנגנון פעולה של מעכבי קורוזיה היוצרים שכבת תחמוצת אך בנוכחות כלורידים היא לא יציבה. כפי שנמצא גם בעבודות קודמות. מעכבים אורגניים עלולים לקיים אינטראקציה עם יוני כלוריד, מה שמוביל לחוסר יציבות של שכבות תחמוצת מגן על מתכות, שהוא חיוני בתנאים אלקליים [75].

בנוסף המבנה המולקולרי של מעכבים אורגניים, במיוחד אלה עם קבוצות פונקציונליות קוטביות, יכול להשפיע על יעילותם. במקרים מסוימים, קבוצות אלו עשויות לשפר את מסיסות הכלורידים, ולהחמיר את הקורוזיה [76].

בעוד שמעכבים אורגניים מסוימים יכולים לספק הגנה משמעותית בריכוזים אופטימליים, היעילות שלהם עלולה להצטמצם בנוכחות רמות כלוריד גבוהות, מה שמוביל לשיעורי קורוזיה מוגברים [76]. גם באבדתנו הקודמת נימצא שיעילות מעקבי קורוזיה מושפעים מהמתח החשמלי [77,78].



19: Results of the reaction between AgNO_3 and chloride ions in fresh cross-sections of Figure the specimens made of concrete (Grade 60) treated with corrosion inhibitor: (1-3) - specimens with 8-mm diameter steel rods; (4-6) - specimens with 12-mm diameter steel rods

איור 19 : תוצאות בדיקה קולורימטרית בחתכים טריים של דגימות מבטון ב-60 שעבר טיפול באמצעות מעכב קורוזיה; (1-3) – דגימות עם מוט בעל קוטר של 8 מ"מ; (4-6) – דגימות עם מוט בעל קוטר של 12 מ"מ

4. דיון בתוצאות

ההתנגדות החשמלית של הקרקע היא גורם מכריע בהפחתת המתח החשמלי והזרם התועה של פסי רכבת חשמליים. הדבר ניכר בהנחיות הממחישות את השינוי במתח החשמלי באדמה כפונקציה של המרחק ממקור המתח חשמלי [29,43]. למרות הצפי שעלייה בהתנגדות החשמלית עם המרחק ממקור מתח תקטין את גודל המתח החשמלי, תוצאות המדידה בתנאי שדה, כמתואר בסעיף 4.1, לא תאמו מגמה זו. בניגוד לתחזיות תיאורטיות ואפילו מדידות מעבדה המפורטות בסעיף 4.2, הנתונים הציגו תרחיש שונה. סתירה זו עוררה חקירה של התיאוריה לפיה הזרם הנמדד בתנאי שטח אינו משקף את הזרם היוצא מהמסילה אלא את הזרם החוזר אליו. תומך ברעיון זה, שינוי המתח נצפה לפני שהרכבת הגיעה לנקודת המדידה, מה שמעיד על כך שהזרם יצא ממרחק וחזר לאתר המדידה. כתוצאה מכך, מתחים גבוהים יותר נרשמו רחוק יותר מהמסילה, בהתאם לתיאוריה שהזרם עוקב אחר נתיב מנקודות מרוחקות, כאשר המתח יורד ככל שהוא

מתקרב למקום המדידה. הבנה זו פותרת כל סתירה לכאורה בין ציפיות תיאורטיות למדידות בשטח ומציעה הסבר קוהרנטי לתופעות הנצפות הן בתנאי מעבדה והן בתנאי שטח.

המתח התועה שנמדד ומדווח נרשם על כ-10 וולט במצב זרם חילופין. מדידה זו מתאימה כמתח תועה הדורש תשומת לב מהרשויות בשל הפוטנציאל שלו לפגוע במבני בטון מזוין; ההגדרה קובעת כל סטייה העולה על 0.2 וולט. כתוצאה מכך, מדידות שדה מצביעות על מצב רעוע לקורוזיה, המחמיר על ידי תנודות בלחות הקרקע. שונות זו מובילה להפחתת מוליכות ולעלייה במתחים הנמדדים בין תקופות החורף והקיץ. בהתבסס על דוח ממדינת ניו יורק לשנת 2022, כל מתח גדול מ-1 וולט זקוק לטיפול מידי [79]. כאשר בוחנים התנגדות על ידי העברת מבנים הרחק ממסילת רכבים, כפי שנקבע בתקן למבנים תת קרקעיים של 50 מטר, זהו אכן הפתרון האופטימלי, כפי שהוכיחו תוצאות הניסוי בסעיף 3.2. בבדיקה שכללה מתחים של 20-40 וולט, המתח במרחק של 6 מטר מהמסילה ירד כשליש מהערך ההתחלתי. למרחק יש תפקיד מכריע בהנדסת הארקה [43]. הגדלת המרחק עשויה להיראות כפתרון ישים למבנים חדשים, אך בשל הרצון להנגיש את התחבורה הציבורית, היא אינה ישימה ולא ממש מיושמת הלכה למעשה [80].

ההתנגדות החשמלית של בטון תלויה ביחס מים צמנט [52]. בטון בעל חוזק גבוה יותר מציג בידוד טוב יותר מפני זרמים תועים. זה ניכר באיור 7, שבו בטון בעל חוזק גבוה יותר אינו מתקרב למתח החשמלי המופעל על המדגם. יתרה מכך, קיימת דעיכה ניכרת במתח החשמלי, ככל הנראה כתוצאה מהצטברות של מוצרי קורוזיה על המוטות, מה שמגביר את ההתנגדות החשמלית שלהם [81]. בבטון חלש, הצטברות של מוצרי קורוזיה אינה סבירה עקב פיצוח הממשק לאורך המוטות. שחזור סריקת CT וניתוח נתונים מציעים תובנות חשובות לגבי ההיבטים התלת מימדיים של תהליך הקורוזיה בבטון מזוין. לימוד התפתחות הנקבוביות במהלך מחזורי בדיקת קורוזיה מוצאים מאיר את הדינמיקה הכרוכה בכך. תצפיות במסגרות זמן שונות חושפות שינויים משמעותיים בנפח הנקבוביות, נדידת תוצרי קורוזיה והתחלה והתפשטות של סדקים. נשיפה של מוצרי קורוזיה לנקבוביות והשפעתם על צמיחת הסדקים מצביעים על מתאם ישיר בין התפתחות הנקבוביות לבין נזקי קורוזיה. ישנם שני סוגים של סדקים: אלה שנוצרו עקב נפח מוצר קורוזיה מוגבר וכאלה הנובעים מעיוותים של מטריצת בטון עקב כוחות מתרחבים. ההבחנה העיקרית בין סדקים אלה היא נוכחותם של מוצרי קורוזיה [82]. שכבה נקבובית בממשק הפלדה/טיט משפרת את רגישות הפלדה באזורים אלה, ומקלה על קורוזיה מהירה. כתוצאה מכך, סדקים נוטים להיווצר במקביל לחישוב הפלדה ובסופו של דבר לאורך מוטות אורכיים. לאחר מכן, מתרחשת ירידה בהתנגדות החשמלית עקב חדירות מוגברת לזרם חשמלי בין עובי הכיסוי לבין מוט החיזוק. איור 15 מתאר את המדגם בעקבות חשיפה למתח של 9 וולט. מוצרי קורוזיה ניכרים לעין, בולטים החוצה דרך עובי כיסוי הבטון ויוצרים סדקים. לאחר הטעינה, מוצרי קורוזיה אלו יצרו ציפוי פנימי וגרמו להפרדה בין מוטות החיזוק. תצפית זו מציעה כי מוצרי קורוזיה לא רק מקטינים את שטח החתך של ליבת הבטון, אלא גם, יחד עם הקטנת שטח החתך של המוט, עלולים להשפיע על עקומת העומס-דפורמציה.

איור 15 מציג את המדגם לאחר חשיפה למתח של 9 וולט. ניתן לזהות את תוצרי הקורוזיה שהתפרצו החוצה דרך עובי כיסוי הבטון ויצרו סדקים. לאחר הטעינה ניתן לראות שמוצרי הקורוזיה יצרו ציפוי פנימי והפרדה בין מוטות חיזוק. על בסיס זה ניתן להבין כי תוצרי הקורוזיה אף מקטינים את שטח החתך של ליבת הבטון ובשילוב עם הקטנת שטח החתך של המוט, הדבר יכול להשפיע על עקומת העומס-דפורמציה. תוצאות אלו נצפו גם בעבודה קודמת שהדגימה כי עמודי RC ללא חלודה פעלו טוב יותר במונחים של עומס צירי אולטימטיבי ועיוות צירי, בהשוואה לעמודי RC קורוזיביים בתנאים טעונים ובלתי טעונים כאחד [32,83].

קיימים מבנים שמזדקנים באזורים מועדים לרעידות אדמה אשר נמצאים בסיכון לכשל סיסמי. למבנים הנ"ל חוזק הבטון וכמות הזיון לא מספקים. נושאים כמו כליאת עמודים לא מספקת וקורוזיה של פלדת הזיון בולטים במבנים אלה. קורוזיה מערערת באופן משמעותי את יכולת נשיאת העומס, את הקשיחות ואת הגמישות של עמודי בטון מזוין, כפי שהוכח בעבר. הקורוזיה שחווה זיון רוחבי נוטה להיות חמורה יותר בהשוואה לקורוזיה במוטות אורכיים בצפיפויות זרם דומות. ניתן לייחס זאת לקרבתם של חישוקים רוחביים לפני שטח הבטון, שעלולה לגרום לריכוזי יוני כלוריד גבוהים יותר ולהופעת קורוזיה מוקדמת [81]. במחקר זה נצפתה התנהגות דומה. קורוזיה בחישוקים רוחביים הייתה גבוהה ב-14.6% מזו שבמוטות אורכיים בבטון חלש וחזק כאחד. יתר על כן, חלה עלייה של 8.3% בקורוזיה בהשוואה למוטות אורכיים, וכתוצאה מכך סיבולת מירבית מופחתת ב-20%-11. זה מתיישב עם ממצאים קודמים המצביעים על כך שרמות קורוזיה מוגברות מובילות לירידה בעקירה הסופית.

5. מסקנות

- במחקר זה נבדקו השפעות זרמים תועים בתנאי שדה ובמעבדה ואמצעי הגנה פסיביים פוטנציאליים על פי תקני בנייה קיימים. הסיכונים והמסקנות העיקריים הם כדלקמן:
1. כדי להגן מפני זרמים תועים ולהפחית את השפעתם, מומלץ לשמור על מרחק מהמסילה. על פי התקנים, המרחקים האופטימליים הם 50 מטרים מרכבת תחתית ו-300 מטרים מרכבת עילית, אם כי בסביבות עירוניות ייתכן שהדבר אינו ישים.
 2. ממצאי המחקר מצביעים על כך שהשמירה על סטיה בפוטנציאל חשמלי מעל 0.2 וולט, בהתאם לדרישות התקנים EN 50122-2: 2010 ו-EN 62128 Part 2 (2019), אינה מעשית. לכן, מומלץ להסתמך על תקן EN 50443, אשר עוסק בזרמים חלופיים (AC), אך דורש שמירה על אותם מרחקים, קרי 50 מטרים ממטרו (רכבת תת-קרקעית) ו-300 מטרים מרכבת קלה על-קרקעית. בטווח זה, יש צורך באמצעי הגנה אקטיביים.
 3. בהתחשב בכך שמערכת AC מחמירה יותר ממערכת זרם קבוע (DC) מבחינת המתח הקיים, ניתן להניח שהמרחקים הנדרשים בה יהיו קצרים יותר.
 4. במרחקים של עד 7 מטר, אסטרטגיות הגנה פסיביות כמו הגדלת עובי הכיסוי, שימוש במעכב קורוזיה או בבטון בעל חוזק גבוה יותר אינן יעילות, מה שמחייב שימוש בטכניקות אקטיביות כמו הגנה קתודית. על סמך תוצאות מדידה בשטח רואים שהמתח עקב הרכבת משתנה ולא אחיד. לכן יש צורך בפיתוח של מערכת בקרה שעוקבת לאחר המתח לאורך זמן. במידה והמתח החשמלי יהיה גבוה מהנדרש הוא עלול לגרום לקורוזיה.
 5. במרחקים של 15-30 מטר, טכניקות סטנדרטיות להגנה מפני התקפת כלוריד יכולות להיות יעילות, שכן עוצמת התגובה האלקטרוכימית דומה. עם זאת, משך החשיפה לזרם תועה קצר יותר בהשוואה לחשיפה רציפה לכלוריד. לכן אסטרטגיה של הגנה יכולה להיות יותר מקילה.
 6. על פי המחקר מקדם המראה בין התנאים בשטח ובמעבדה (מתח קבוע של 9 וולט) שווה ל-3.7 לנקודת זמן פיצוח (קרי אורך שירות) ול-1.16 בכמות תוצרי הקורוזיה. בנוסף, הגענו למסקנה שכנראה קיים מנגנון נוסף כאשר זרם תועה יעבור תמיד במקום בעל התנגדות נמוכה ביותר. יכול להיות שכל עוד אין סדיקה בבטון מוט הזיון יחליד בצורה אחידה. כדי להוכיח קיום המנגנון הנ"ל, מומלץ לבצע מחקר

- ניסויי השוואתי נוסף ולדמות שני המצבים בהם הקורוזיה היוזמה תהיה אחידה וממוקדת (עקב הסדיקה בבטון).
7. נתיב הזרם התועה בתנאי שדה יהיה תמיד בנתיב עם התנגדות חשמלית הקטנה ביותר בשונה מתנאי ניסוי שבוצעו במחקר (אילוץ לנתיב אחד קבוע) מה שיגדיל את משך החשיפה עד להיווצרות סדיקה ודגרדציה של המבנה.
8. קורוזיה של מוטות פלדת הזיון מפחיתה את מודול האלסטיות של עמודי בטון מזוין, אשר בתורו מקטין את יכולת העיוות וכושר הנשיאה של האלמנטים. ניתן למתן את ההשפעות הללו על ידי שימוש בבטון בעל חוזק גבוה יותר.
9. תגובה אלקטרוכימית מתרחשת כמעט מיד ללא קשר לחוזק הבטון או לעובי הכיסוי, אך הגדלת כיסוי הבטון וחוזק הבטון משפיעים על התאוששות התגובה.
10. מעקב קורוזיה המיושם בהתזה על פני שטח המדגם תחת השפעה של כלורידים לא הציג יעילות ואף הגביר את ההיווצרות של תוצרי הקורוזיה.
11. יש לציין שזהו המחקר הראשון מסוגו בנושא. המחקר לא בוצע על מבנה בגודל מלא הכולל את כל הבידוד והאיטום שמיושמים בפועל, והנושא לא נחקר במסגרת מחקר זה. לכן, אם יתאפשר בעתיד לבצע מחקר על מבנים בגודל אמיתי, זה יאפשר להגדיר בצורה טובה יותר את הטווח הבטוח של הקרבה המינימלית למסילה (למשל, 50 או 300 מטרים).

6. מקורות

- [1] ACI 224 (2010) Service life design and modelling of concrete structures – background, developments, and implementation, ACI Committee 224 8 (n.d.) 224–245. <https://doi.org/10.21041/ra.v8i3.325>.
- [2] U.M. Angst, Challenges and opportunities in corrosion of steel in concrete, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 51 (2018) 1–20. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1131-6>.
- [3] G. Koch, Cost of corrosion, *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies: Production and Transmission* (2017) 3–30. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00001-2>.
- [4] M. Dogan, Corrosion failure in concrete reinforcement to damage during seismic, *Engineering Failure Analysis* 56 (2015) 275–287. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.01.015>.
- [5] O.P. Rozenshaft, Y. Hamiel, Map of the main seismic sources of Israel: explanation pages, (n.d.). <https://www.gov.il/en/Departments/General/mps-the-seismic-sources>.
- [6] T. Bremner, K. Hover, R. Poston, J. Broomfield, T. Joseph, R. Price, K. Clear, M. Khan, D. Reddy, J. Clifton, Protection of metals in concrete against corrosion, in: *Technical Report for ACI Committee 222: Farmington Hills, MI, USA, 2001*.
- [7] SI 62128 Part 1 (2018) Railway applications – Fixed installations – Electrical safety, earthing and the return circuit – Part 1: Protective provisions against electric shock, n.d.
- [8] M.D.A. Thomas, E.C. Bentz, Computer program for predicting the service life and life-cycle costs of reinforced concrete exposed to chlorides, *Life365 Manual*, SFA (2002) 12–56.
- [9] CEB-FIP, Model Code 2010, 2010.

- [10] Model code for service life design (2006), Fib Bulletin 34 International Federation for Structural Concrete (Fib) (n.d.).
- [11] A C I Committee 356 Service life prediction: state-of-the art report, American Concrete Institute, n.d.
- [12] W.P.S. Dias, Factors Influencing the Service Life of Buildings, Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka 46 (2013) 1.
<https://doi.org/10.4038/engineer.v46i4.6801>.
- [13] V.S. Sastri, Challenges in Corrosion, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey (2015). <https://doi.org/10.1002/9781119069638>.
- [14] X. Feng, Y. Zuo, Y. Tang, X. Zhao, J. Zhao, The influence of strain on the passive behavior of carbon steel in cement extract, Corrosion Science 65 (2012) 542–548.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.08.060>.
- [15] M. E, Introduction to Corrosion Science., 2010.
<http://link.springer.com/10.1007/b97510>.
- [16] T.J. Barlo, A.D. Zdunek, Stray Current Corrosion in Electrified Rail Systems --Final Report, U.S. Department of Transportation, 1995.
- [17] G. Santi, L. Sandrolini, Stray Current Interference on High-Speed Rail Transit Systems and Surrounding, Proceedings of the 6th International Congress (2003) 1–12.
- [18] F. Liu, Y. Zou, B. Wang, X. Yuan, The Effect of Stray Current on Calcium Leaching of Cement-Based Materials, Materials 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15062279>.
- [19] G. Li, B. Wang, D.K. Panesar, Effect of Stray Current on Cement-Based Materials under Sulfate Attack, Journal of Materials in Civil Engineering 34 (2022) 4021439.
- [20] Y. Ni, E. Zhu, Combined Effect of Stray Current and Sustained Compressive Loading on Chloride Transport in Concrete, Advances in Materials Science and Engineering 2021 (2021). <https://doi.org/10.1155/2021/9975168>.
- [21] U. Angst, B. Elsener, C.K. Larsen, Ø. Vennesland, Critical chloride content in reinforced concrete — A review, Cement and Concrete Research 39 (2009) 1122–1138.
<https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2009.08.006>.
- [22] R. Gani, S. Devi, S. Goundar, E. Reddy, F. Saber, Y.-L. Cheng, C.-Y. Lee, Y.-L. Huang, C.A. Buckner, R.M. Lafrenie, J.A. Dénommée, J.M. Caswell, D.A. Want, G.G. Gan, Y.C. Leong, P.C. Bee, E. Chin, A.K.H. Teh, S. Picco, L. Villegas, F. Tonelli, M. Merlo, J. Rigau, D. Diaz, M. Masuelli, S. Korrapati, P. Kurra, S. Puttugunta, S. Picco, L. Villegas, F. Tonelli, M. Merlo, J. Rigau, D. Diaz, M. Masuelli, M. Tascilar, F.A. de Jong, J. Verweij, R.H.J. Mathijssen, Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS): A Review Study of Basic Aspects of the Corrosion Mechanism Applied to Steels, Intech 11 (2016) 13.
- [23] K. Tuutti, Corrosion of steel in concrete, Cement-och betonginst, Stockholm, 1982.
- [24] C. Li, J. Li, Q. Ren, Y. Zhao, Z. Jiang, Degradation mechanism of blended cement pastes in sulfate-bearing environments under applied electric fields : Sulfate attack vs . decalcification, Composites Part B 246 (2022) 110255.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110255>.
- [25] SI 62128 Part 2 (2019) Railway applications – Fixed installations – Electrical safety, earthing and the return circuit – Part 2: Provisions against the effects of stray currents caused by d.c. traction systems, n.d.
- [26] EN 50443 Effects of electromagnetic interference on pipelines caused by high voltage a.c. electric traction systems and/or high voltage a.c. power supply systems, (n.d.).
- [27] Stray Current Control of Direct Current-Powered Rail Transit Systems : A TCRP RESEARCH REPORT 212 Stray Current Control of Direct Current-Powered Rail Transit Systems : A Guidebook, 2020. <https://doi.org/10.17226/25768>.

- [28] J. Bongiorno, A. Mariscotti, Track insulation verification and measurement, in: MATEC Web of Conferences, 2018. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818001008>.
- [29] H. Markiewicz, A. Klajn, Earthing & EMC Earthing Systems - Basic Constructional Aspects, 2004.
- [30] C.-M. Aldea, S.P. Shah, A. Karr, Effect of cracking on water and chloride permeability of concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering* 11 (1999) 181–187.
- [31] R. Al-Mahaidi, R. Kalfat, Introduction, Rehabilitation of Concrete Structures with Fiber-Reinforced Polymer (2018) 1–5. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811510-7.00001-x>.
- [32] Q. Li, Z. Dong, Q. He, C. Fu, X. Jin, Effects of Reinforcement Corrosion and Sustained Load on Mechanical Behavior of Reinforced Concrete Columns, *Materials* 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15103590>.
- [33] Z. Chen, L. Gao, D.A. Koleva, Evaluating the stray current corrosion of steel rebar in different layouts, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 196 (2022) 111217. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111217>.
- [34] W. Yao, J. Xu, Current distribution in reinforced concrete cathodic protection system, *Tongji Daxue Xuebao/Journal of Tongji University* 37 (2009) 1014–1018.
- [35] ACI Committee 222, Protection of Metals in Concrete Against Corrosion, *Aci 222R-01* (2001) 1–41.
- [36] A.C.I.C. 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19): An ACI Standard: Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-19), in: American Concrete Institute, 2019.
- [37] Eurocode 2: design of concrete structures-part 1–1: general rules and rules for buildings, British Standard Institution, London (2005).
- [38] Hrycyshyn Erik, Veneman Jason, Report of the Ground Current Working Group to the Utility Advisory Council, 2007.
- [39] ASTM G109 (2013), Standard Test Method for Determining Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments, n.d.
- [40] B.S. EN, 50122-1: 2022.Railway applications. Fixed installations. Protective provisions relating to electrical safety and earthing, BSI (2022).
- [41] B.S. EN, 50122-2:2010,Railway applications. Fixed installations. Electrical safety, earthing and the return circuit. Provisions against the effects of stray currents caused by d.c. traction systems, BSI (2010).
- [42] M. Büchler, On the Mechanism of Cathodic Protection and Its Implications on Criteria Including AC and DC Interference Conditions, *Corrosion* 76 (2020) 451–463. <https://doi.org/10.5006/3379>.
- [43] H. Markiewicz, A. Klajn, Power Quality Application Guide Earthing & EMC Earthing Systems-Fundamentals of Calculation and Design Copper Development Association IEE Endorsed Provider, (2003). www.lpqi.org.
- [44] B. Staff, Staff Discussion Paper Farm Stray Voltage: Issues and Regulatory Options, (2008).
- [45] M. Siranec, M. Regula, A. Otcenasova, J. Altus, Measurement and Analysis of Stray Currents, 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE) (2019) 1–6.
- [46] J. Burke, The Confusion Surrounding “ Stray Voltage ,” (2007) 0–5.
- [47] C. Denardo, Stray and Contact Voltage An Update on IEEE PES P1695 Working Group Activities, 2012 Rural Electric Power Conference (2012) A3-1-A3-7. <https://doi.org/10.1109/REPCon.2012.6194563>.
- [48] R.F. Stratfull, Half-cell potentials and the corrosion of steel in concrete, 1973.

- [49] B. Elsener, C. Andrade, J. Gulikers, R. Polder, M. Raupach, Half-cell potential measurements - Potential mapping on reinforced concrete structures, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 36 (2003) 461–471. <https://doi.org/10.1617/13718>.
- [50] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C 876/09 - Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in concrete., *Annual Book for ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials. 91 (2009) 1–6.
- [51] T. 358, Surface resistivity indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. AASHTO, *American Association of State Highway and Transportation Officials* (2015) 1–9.
- [52] P. Azarsa, R. Gupta, Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review, *Advances in Materials Science and Engineering* 2017 (2017). <https://doi.org/10.1155/2017/8453095>.
- [53] F. He, C. Shi, Q. Yuan, C. Chen, K. Zheng, AgNO₃-based colorimetric methods for measurement of chloride penetration in concrete, *Construction and Building Materials* 26 (2012) 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.003>.
- [54] K. Goyal, N. Singh, S. Jindal, R. Kaur, A. Goyal, R. Awasthi, Precipitation Titration, *Advanced Techniques of Analytical Chemistry: Volume 1* 1 (2022) 120.
- [55] SI 26 part 2.1 The Standards Institution of Israel-Testing concrete: Fresh concrete – Consistency – Slump test, (2022).
- [56] EN, 12390-1:2012 Testing hardened concrete - Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds, *BSI* 3 (2012) 1–14.
- [57] M. Maes, N. De Belie, Resistance of concrete and mortar against combined attack of chloride and sodium sulphate, *Cement and Concrete Composites* 53 (2014) 59–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.06.013>.
- [58] T.D. of Transportation, T.D. of Transportation, Determining Chloride in Concrete, 60 (2005) 14.
- [59] E. Standard, EUROPÄISCHE NORM Products and systems for the protection and repair of concrete the sand column test, (2004).
- [60] K. Scrivener, R. Snellings, B. Lothenbach, *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*, 2018. <https://doi.org/10.1201/b19074>.
- [61] M. Alexander, *Marine concrete structures: design, durability and performance*, Woodhead Publishing, 2016.
- [62] F. Qu, W. Li, W. Dong, V.W.Y. Tam, T. Yu, Durability deterioration of concrete under marine environment from material to structure: A critical review, *Journal of Building Engineering* 35 (2021) 102074. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102074>.
- [63] C. Loong Chin, C. Khun Ma, J. Yang Tan, A. Zawawi Awang, W. Omar, Effect Of Pre-Tensioned Level on Axial Stress-Strain Behaviour of Confined Concrete: A Review, *IJET* 7 (2018) 18. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.9.15265>.
- [64] I. Maruyama, Impact of drying on concrete and concrete structures, *RILEM Tech Lett* 7 (2022) 1–11. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2022.154>.
- [65] S. Huajian, L. Zongli, X. Shuapeng, Y. Xiwang, Z. Ning, Mechanical Properties and Microstructure of Concrete under Drying-Wetting Cycles., *Bulletin of the Chinese Ceramic Society* 40 (2021).
- [66] D. Wu, Y. Ding, J. Su, Z.-X. Li, B. Zhao, Experimental investigation into corrosion effect on buckling and low-cycle fatigue performance of high-strength steel bars, *Engineering Structures* 312 (2024) 118230. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118230>.

- [67] Electrical tests to analyse the transport properties of concrete – I: modelling diffusion and electromigration, *Transport Properties of Concrete* (2021) 157–186. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-820249-4.00010-9>.
- [68] A.F. Rotta Loria, D. Shirole, G. Volpatti, A. Guerini, D. Zampini, Engineering concrete properties and behavior through electrodeposition: a review, *Journal of Applied Electrochemistry* 53 (2023) 193–215. <https://doi.org/10.1007/s10800-022-01770-2>.
- [69] R. Maex, *Encyclopedia of Computational Neuroscience*, *Encyclopedia of Computational Neuroscience* (2013) 1–7. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7320-6>.
- [70] R.D.H. and M.D.A.T. K.D. Stanish, Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review, *Ceramics - Silikaty* 65 (2021) 305–315. <https://doi.org/10.13168/cs.2021.0032>.
- [71] C. Andrade, *Corrosion data interpretation in concrete structures*, 2012. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2703-8_1.
- [72] E. Chen, S. Tang, C.K.Y. Leung, Corrosion-induced cracking in reinforced concrete due to chloride contamination and ingress, *ACI Materials Journal* 116 (2019) 99–111. <https://doi.org/10.14359/51716831>.
- [73] Marianna Luna Sousa Rivetti, José da Silva Andrade Neto, Nilson Santana de Amorim Júnior, Daniel Véras Ribeiro, *Corrosion Inhibitors for Reinforced Concrete*, in: Mahmood Aliofkhaezai (Ed.), *Corrosion Inhibitors, Principles and Recent Applications*, IntechOpen, Rijeka, 2017: p. Ch. 2. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72772>.
- [74] MCI®-2020 | Cortec® MCI®, (n.d.). <https://www.cortecmci.com/product/mci-2020/> (accessed September 8, 2024).
- [75] D. Zhang, J. Yang, P. Gan, W. Zhang, Chapter 5 - Corrosion inhibitors used in alkaline environments, in: L. Guo, C. Verma, D. Zhang (Eds.), *Eco-Friendly Corrosion Inhibitors*, Elsevier, 2022: pp. 55–70. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91176-4.00005-2>.
- [76] X. Guo, C. Wang, H. Fu, L. Tian, H. Song, Rust Prevention Property of a New Organic Inhibitor under Different Conditions, *Materials* 17 (2024) 2168. <https://doi.org/10.3390/ma17092168>.
- [77] Kovler.K., Lapiro.I, Spatari.S, Dashevsky.B, Mezhov.A, “Integrated approach to extend the life cycle of reinforced concrete structures”, Research Report to the Ministry of Construction and Housing of Israel, No. 2026716, Technion, Haifa, 2021, (n.d.).
- [78] I. Lapiro, A. Mezhov, K. Kovler, Performance of corrosion inhibitors in reinforced concrete elements under electrical voltage, *Construction and Building Materials* 342 (2022) 127656.
- [79] State of New York Public Service Commission Case 04-M-0159 Niagara Mohawk Power Corporation d/b/a National Grid Stray Voltage Testing and Facility Inspection 2021 Annual Report, n.d.
- [80] M.A. Saif, M.M. Zefreh, A. Torok, Public transport accessibility: A literature review, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering* 47 (2019) 36–43. <https://doi.org/10.3311/PPtr.12072>.
- [81] O. Gouda, S. Dessouky, A. Kalas, M. Hamdy, Corrosion Effects on the Grounding Resistance of Grounding System Buried in Two-Layers Soil, *International Journal of Applied Energy Systems* 1 (2019) 21–34. <https://doi.org/10.21608/ijaes.2019.169958>.
- [82] J. Taheri-Shakib, A. Al-Mayah, 4D evolutions of cracks, voids, and corrosion products in reinforced concrete materials, *Scientific Reports* 13 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48058-9>.
- [83] H.O. Aminulai, A.F. Robinson, N.S. Ferguson, M.M. Kashani, Impact of corrosion on axial load capacity of ageing low-strength reinforced concrete columns with different

confinement ratios, *Construction and Building Materials* 384 (2023) 131355.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131355>.

- [84] H.O. Aminulai, A.F. Robinson, N.S. Ferguson, M.M. Kashani, Impact of corrosion on axial load capacity of ageing low-strength reinforced concrete columns with different confinement ratios, *Construction and Building Materials* 384 (2023) 131355.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131355>.

Abstract

This study examines the potential impact and protection strategies against corrosion caused by stray electrical currents in reinforced concrete structures. The research included examining stray currents under real environmental conditions and applying these findings to models simulating reinforced concrete columns. Key parameters investigated included cover thickness, reinforcement steel content, and distance from the stray current source. The findings emphasize that maintaining a safe distance from sources of stray currents, such as railways, is essential for protecting reinforced concrete structures. According to current standards, optimal protection can be achieved by maintaining a distance of 50 meters from underground trains and 300 meters from ground trains, although these distances may be challenging to implement in urban environments. In close proximity (up to 7 meters), passive protection measures such as increasing concrete cover thickness or using higher-strength concrete have proven ineffective, necessitating active protection techniques such as cathodic protection. Within a range of 15-30 meters, conventional methods used to protect against chloride-induced corrosion, such as increased cover thickness or the use of corrosion inhibitors, are generally effective because the intensity of electrochemical reactions is similar. However, unlike continuous chloride exposure, the duration of exposure to stray currents is usually shorter, offering some advantage in these scenarios. Corrosion of reinforcement bars due to stray currents significantly reduces the modulus of elasticity in reinforced concrete columns, adversely affecting their deformation capacity and load-bearing capacity. These harmful effects can be mitigated by using higher compressive strength concrete. The study also found that electrochemical reactions start quickly, regardless of concrete cover thickness or strength, but the recovery rate is positively influenced by these factors. Improving concrete cover and strength can significantly accelerate the recovery process, thereby providing strong protection against stray current-induced corrosion.



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



2031518

Failures in reinforced concrete structures following exposure to stray currents

Prof. Konstantin Kovler Assoc. Prof. Rami Eid Eng. Igor Lapiro

Copyright © 2024 by K. Kovler, R. Eid and I. Lapiro

The Israel Ministry of Construction and Housing and the Technion Research and
Development Foundation Limited, Haifa

December 2024

Haifa

