

תהליכי קורוזיה במבני בטון מזוין ודרוך בישראל - סכנות שלא היו בעבר למבנים

מהנדס נחום נוה *

מבוא

בשנים האחרונות אנו עדים לשינויים לרעה באיכות החול המשמש ליציקות בטון בישראל. אם בעבר תעשיית הבנייה בישראל השתמשה בחול שמקורו בדיונות החוף ובמקורות חול באזורי הנגב ליציקות בטון למבנים הידלדלות הדיונות מחד ותודעת השמירה על איכות הסביבה מאידך גרמה לאיסור מוחלט של השימוש בחול הדיונות לכל מטרה וגם לא כחול ליציקות בטון במבנים. מקורות חול החדשים שאושרו לשימוש נמצאו בערבה ובמישור הרום, אך מתברר כי אלה כבר מוצו ובעיית החול לבטונים הפכה לבעיה לאומית קשה. המחסור החמור בחול לבנייה מסוג סיליקה גרם למנכ"ל חברת "תרמוקור", המייצרת מוצרי טיח, בידוד תרמי, חומרי איטום ודבקים, להכריז: "אם הממשלה רוצה לטפל בבעיית יוקר המחיה שתטפל בכל שרשרת האספקה. בלי חול אין ענף בנייה. זה החמצן שלנו".

דיון בנושא מקורות החול לבנייה בישראל התקיים בוועדת הכלכלה של הכנסת כבר ב-22 ליוני 2011 בהשתתפות כל הגורמים שיש להם עניין בדבר (מעל 20 נציגים, כמו המפקח על המכרות ממשרד התשתיות הלאומיות ועוד מומחים רבים וטובים). חשוב לציין, כי הדיון התקיים לפני כשש שנים בהשתתפות וכן כי בינתיים הפתרון הטבעי שנמצא למחסור בחול היה יבוא חול ממצרים ומירדן (שגם הוא חול מדברי). על הבעייתיות של יבוא חול מאזורים שחונים כמו הנגב, סיני וירדן, שהמאפיין אותם הוא הסביבה המדברית היבשה, ניתן לקבל מושג ממחקר המקרה הבא שבוצע על-ידי כותב המאמר עבור מכון התקנים הישראלי בהזמנת משרד הביטחון. בתקופת כיבוש סיני החל משרד הביטחון לבנות עבור צה"ל בשארם א-שייח מספר מבני משרדים מהירי הקמה מחלקי מפלדה מגולוונים מוכנים מראש שיובאו מחו"ל, שגם רצפותיהם היו עשויות מפח גלי מגולוון ומעליו יציקת בטון שמטרתה למנוע רעש הנגרם מדריכה על חלקי פלדה חשופים.

תקופה קצרה מאד אחרי התחלת השימוש במבנים אלה התגלו חורים בלוחות המגולוונים שעליהם נצוקה שכבת הבטון. אלה נצפו על-ידי העובדים בחדרים בתקרות שמעליהם.

בבדיקת שנערכה על-פי דרישתי במכון התקנים נמצאה תכולת מלחים גבוהה בבטון - והיא זו שהייתה אחראית ליצירת החורים בתקרת הפח המגולוון. מובן שבעקבות תוצאה זו נערכה לפי דרישתי בבדיקת החול ששימש ליציקת הבטון וזו גילתה כי החול הכיל מלחים. מסתבר, שעם הזמן כל החול העליון נצרך ובתחתית שכבת החול נמצאת אדמת הלס המלווה המאפיינת את קרקעות הנגב, הערבה וחצי האי סיני, אשר במגען עם מים הן נאטמות והחול הנמצא

* מומחה NACE לקורוזיה ולהגנה קתודית, הנדסת קורוזיה חומרים וצינורות בע"מ. ת.ד. 10437 רמת-גן

במגע איתן הוא מלוח. מובן שהיה צורך להפסיק את השימוש במבנים מחשש להתמוטטות תקרות הפלדה.

דברי הקדמה אלו נועדו להבהיר את הבעיה הרצינית שאנו נתקלים בה כיום בישראל: חול עם מלחים המשמש ליצירת בטון במבני בטון מזוין ודרוך.

יצוין, כי מחבר המאמר החליט לבדוק את החול שנמצא בשלושה אתרי בנייה ברמת-גן ומצא כי הם מכילים מלחים. אחד מהבניינים שבו נמצא חול מלוח הוא מבנה מגורים רב-קומות.

בדיקת תופעת קורוזיה מהירה בשני מגדלי ענק בתל-אביב

בדיקת תופעת קורוזיה מהירה שפגעה בצנרת ספרינקלרים וחיבוריה לתקרות בכל הקומות של שני מגדלי ענק בתל-אביב ומסקנותיה:

בפנייה להגשת הצעה שכ"ט לעבודה, שקיבל כותב המאמר במאי 2016 מקבלן משנה שהיה אחראי על התקנת מערכות הספרינקלרים בשני המגדלים הנ"ל צוין כדלקמן:

"שמי מנהל פרויקט עובד בחברת..... תברה המתמחה בתחום חשמל, מים ומיזוג. יש לנו פרויקט בתל-אביב שאנו מבצעים בו עבודות ספרינקלרים לשני מגדלים צמודים ... מיקום הפרויקט ... בתל-אביב. מצורפת תמונה של צנרת מורכבת חדשה שחטפה קורוזיה. כמו כן, ישנן קומות שהעבודות (צנרת הספרינקלרים) הורכבו לפני כחודשיים שאין כיסוי חלונות מסביב למעטפת הבניין ויש קורוזיה.

"אבקש את עזרתכם לתת לנו מענה - קרי בבדיקה מקצועית מדגמית יחד עם חוות דעת וייצוג משפטי כמו כן פירוט הצעת המחיר.

נ.ב. יש תחנת טרנספורמציה בצמוד למגדלים".

בביקור ראשון שערכתי במגדלים ציין בפני מנהל הפרויקט, כי בכל יום שהוא מגיע בבוקר לעבודה הוא צפה בתמונה הבאה: התקרות והרצפה היו רטובות. בבדיקת המוליכות החשמלית של אבק ומוצרי קורוזיה שהוסרו מעל צנרת הספרינקלרים גילתה, כי בהשוואה למוליכות החשמלית של מים מזוקקים, תמיסת האבק במים המזוקקים הייתה גבוהה מאד. במילים אחרות: האבק שעל הצנרת הכיל מלחים בריכוז גבוה והם שגרמו לקורוזיה המהירה.

מאחר ומיקום המגדלים מרוחק מספר ק"מ מהים מקור המלחים לא יכול היה להיות התזת מלחים מגלי הים המתנפצים על החוף. כל המחקרים בעולם הגיעו למסקנה, שמרחק ההתזה המרבי של התזת טיפות מלח יכול להגיע למאות מטרים בודדות מקו החוף.

המפתיע היה, שמזמין העבודה החליט להפסיק את עבודתי. למרות שהפסקת עבודה זו מרמזת, כי כאשר דו"ח ראשוני זה נמסר לקבלן הבניין הוא החליט לגנוז את הדו"ח ובמקביל לא לחייב את קבלן הספרינקלרים באחריות לתופעה. במילים

מתוך שלוש העובדות הנ"ל ניתן להסיק:

הלחות שמצא מנהל הפרויקט של הקמת מערכות הספרינקלרים, שנראתה על פני כל הבטונים בשני המגדלים, מעידה על נוכחות כלורידים בבטון שגרמו לספיחת הלחות מהסביבה. חלק מהכלורידים מהבטון טיפסו יחד עם טיפות המים כלפי מטה ונחת על צנרת הספרינקלרים וגרם לקורוזיה שלהם ושל עיגוניה בתקרות - תהליך שיגרום לקריסת צנרת הספרינקלרים (שאמורה להיות מלאה במים בעתיד) ומשקלה יגדל בהשוואה למצבה היום (כשהיא ריקה ממים).

טיפסוף המים מהתקרה המכילים מלחי כלור גורם גם לחדירת כלורידים לתוך בטון הכיסוי של הלוח"דים של הרצפות (שהן תקרות הקומה שמתחת). הכלורידים שבבטון גורמים ויגרמו לרמת לחות בבטונים שמזרזת את הקרבונציה ומביאה כבר עתה להתקפת קורוזיה מהירה של הפלדות בבטונים - התקפה שתחליש את חוזק מוטות הזיון ועלולה להביא בסופו של דבר לקריסת המגדלים בעשרות רבות של שנים לפני המועד המתוכנן. עלול להיגרם אסון שיגרום לאובדן חיים לאלה שיימצאו במגדלים ביום הקריסה ולא לה שיימצאו בסביבת המגדלים.

בבדיקה פנולפתלאין שנעשתה על-ידי ד"ר מני בן בסט לגילוי בטון שנקדחו מתוך מסת הבטון - נמצאה קרבונציה מלאה של 3.5 ח"מ (חלקים למיליון) לאחר כשנה בלבד ממועד היציקה, כלומר, פי שבעה מקצב הקרבונציה של בטון טוב ללא מלחים. אם נביא בחשבון שגם קרבונציה חלקית שתוריד את ה-pH לרמה של 10-11 ותאפשר למלחים שבבטון שערכם לבטח גדול מ-100 ח"מ כיון כלוריד, לתקוף את ברזלי הזיון.

לסיכום סקירה זו יאמר:

הבעיה שהוצגה במאמר הנ"ל אינה רק בעיה של שני מגדלי ענק המוזכרים לעיל - היא אמורה להתרחש בכל מבני הבטון המזוין והדרוך שישתמשו בחול מלוח ליציקות הבטון. חשוב להדגיש, כי מוטות פלדה דרוכים שעליהם פועלים מאמצי מתיחה נתונים לתופעה חריפה ומהירה הרבה יותר - קורוזיית סידוק מאמצים (stress corrosion cracking) - והם ייכשלו בקצב מהיר הרבה יותר.

הערה חשובה: התקן הבריטי מגדיר את תכולת הכלורידים המירבית של כל האגרנטים בבטון מזוין רגיל ל-0.05%. אולם אותו תקן מרשה תכולת כלורידים כוללת לכל האגרנטים רק של 0.01% כאשר מדובר בבטון דרוך. התקן האירופאי EN 206-1:2000 משנת 2000 מתייחס גם לרמת האמצעים המצויים לבקרת תכולת הכלורידים באתר, שם הדרישה לכלורידים מתייחסת לתכולת הכלורידים ביחס למשקל הצמנט לבטונים דרוכים. הדרישה של תכולת הכלורידים קטנה פי 2-4 מאשר לבטונים דרוכים. על כן ברור, שבעיית הכלורידים הנמצאים בחול לבטון דרוך מחריפה את הסיכוי לקורוזיה של הזיון הדרוך פי ארבעה יותר מאשר לבטון מזוין רגיל באותם תנאי בקרה.

כידוע, מרבית התקרות בבניינים רבי-קומות בארץ מיוצרים מלוח"דים - קרי בטון עם מוטות זיון דרוכים. מכאן ברור, שהסיכון לקריסת מבנים אלה גדול פי ארבעה מאשר במבנים בעלי תקרות רגילות - שאינן דרוכות.

אחרות: ככל הנראה, קבלן הבניין הוא זה שהחליט להעלים את הממצאים מהאחראים על הפיקוח וכמובן גם מהיום שעבורו נבנו המגדלים.

למרות פניית הרבות ליזם המגדלים לא נחקר מקור המלחים שגרמו לתופעת הקורוזיה של צנרת הספרינקלרים. זהו מחדל ענק שיכול לסכן הן את צנרת הספרינקלרים שתקרוס על האנשים שיאכלסו את המגדלים והן את הבטונים, שלהערכתי הם אלה שבהם נמצאים המלחים שיביאו לאיכול קורוזיה מהיר של הבטונים הדרוכים שמהם נבנו התקרות במגדלים.

תהליכי קורוזיה של בטון מזוין ובטון דרוך

בטון הוא מוצר בעל בסיסיות גבוהה. ה-pH שלו הוא בין 12-13. מוטות זיון מפלדה הנמצאים בסביבה בסיסית כזו נמצאים במצב של פסיבציה מלאה. כלומר, הם אינם נתקפים כלל בקורוזיה. ראה סכימה להלן:

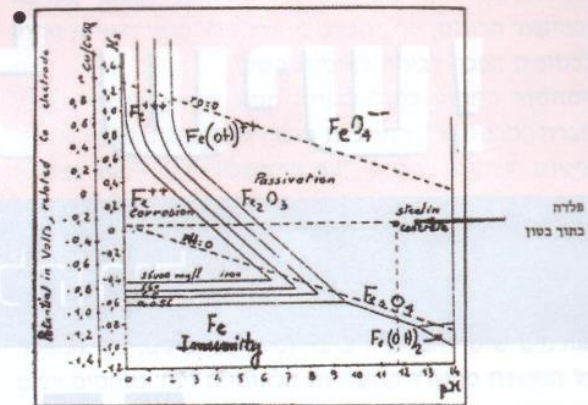


Fig. 1. Pourbaix's Graph

נתון חשוב שחייבים לדעת: להתקפת פלדה בסביבה בה ה-pH הוא בין 12 ל-13 נדרשת תכולת כלורידים בין 7000 ל-8000 ח"מ. כלומר, בבטון שלא עבר תהליך קרבונציה כלל נדרשת תכולת כלורידים ענקית להתקפה על הפלדה. לעומת זאת, התקפת פלדה בסביבה בה ה-pH הוא בין 10 ל-11 (בטון שעבר קרבונציה חלקית) נדרשת תכולת כלורידים נמוכה מאוד - של 100 ח"מ ומטה.

לפיכך ברור, שברזלי הזיון בברזלי הזיון בבטון שעבר קרבונציה חלקית מתחיל להיתקף על-ידי הכלורידים גם כאשר תכולת הכלוריד בבטון היא 100 ח"מ. במילים אחרות: אם קיימים כלורידים בריכוז נמוך של 100 ח"מ בתוך הבטון - יתקפו מוטות הפלדה למרות שתהליך הקרבונציה של הבטון לא הושלם (תהליך קרבונציה מלא מוריד את ה-pH ל-9).

● **נתון שני שחשוב להביא בחשבון** הוא, שבטון המכיל כלורידים סופח לחות מן האוויר וגורם לעלייה ניכרת בלחות של הבטון. מתברר שכאשר לחות הסביבה גבוהה, מטפסות טיפות מים מלוחים כלפי מטה. מי שביקר בערד יכול לראות שסן הרטבה על המדרכה מתחת לעצי האשל שעליהם פולטים מלח.

● **נתון שלישי שחשוב להביא בחשבון** הוא, שכאשר לחות הבטון נמצאת בין 50% ל-75% קצב הקרבונציה מהיר במידה ניכרת מאשר קצב הקרבונציה בבטון יבש. כלומר מלחים בבטון מזרזים מאד את תהליך הקרבונציה.