

הסכנה: זרם חשמלי תועה, העובר במעגל חשמלי שונה מזה שיועד לו, מחליש את הברזל בבטון מזויין ועלול לגרום להתפוררות הבטון

פורסם ב"הנדסת בנייה ותשתיות" – כתב העת המקצועי של איגוד המהנדסים, גיליון אוקטובר 2014

זרם תועה - להתגונן או להמתין לנזק?

מהנדס חגי שושני

כללי:

הפתרון: אינהיביטור (מעכב קורוזיה) בבטון הוא פתרון עלות-תועלת מעולה להגנת מבנים מפני זרם תועה. אינהיביטורים נודדים נמצאים בשימוש מעל 35 שנים. אינהיביטורים נייחים נמצאים בשימוש מעל 80 שנים. אינהיביטור נודד על בסיס אמין-קרבוקסילאט יוצר לכאורה בידוד חשמלי על זיון הבטון ובכך מקטין את טווח הסכנה בכ-50%, ואת התפתחות הנזק בכ-75%^(1,5). אינהיביטור נודד על בסיס אמינו-אלכוהול מקטין את טווח הסכנה בכ-25%, ואת התפתחות הנזק בכ-40%. לאינהיביטור נייח על בסיס קלציום ניטריט או סודיום ניטריט אין השפעה על זרם תועה. פתרונות אחרים כוללים הגנה קתודית ליסודות, מיסוך יסודות, ניתור קבוע של המתח אדמה-זיון, ועוד.

זרם תועה הוא תופעת לוואי שלילית ומסוכנת של זרמי חשמל ישירים או זרמי חילופין במתחים גבוהים. הזרם החשמלי תועה כאשר הוא עובר במעגל חשמלי השונה מזה שיועד לו (כתוצאה מתכנון, ביצוע או תחזוקה לקויים), לדוגמה דרך ברזל זיון בבטון תת-קרקעי, וגורם להתפתחות חלודה מואצת באזור היציאה שלו מהבטון. מכיוון שזרמים תועים נעים בדרך כלל על ברזל תשתיות כגון: יסודות, כלונסאות, מרתפים, רפסודות, בסיסי עמודים, צינורות וכדומה, הנזק שהם גורמים הינו משמעותי ביותר: הם מחלישים את הברזל ויוצרים סדקים בבטון. החלשת הברזל והתפוררות הבטון פוגעים ביציבותו, בעמידותו, ובמשך השרות של המבנה כנגד משקלו וכנגד נזקים כגון רעידות אדמה, פגעי הסביבה, ופגעי הזמן. דוגמאות נפוצות לזרם תועה כוללות פריצות זרם מהנעת רכבת קלה ופריצות זרם מהגנה קתודית אקטיבית המותקנת על מיכלים ו/או צינורות תת-קרקעיים. ניתן גם למצוא בשכיחות גבוהה פריצה של זרמים מקווי חשמל במתח גבוה ועליון, כמו גם מהגנה קתודית פסיבית המותקנת על צוברי אחסון גז ביתי אל יסודות הבניינים הסמוכים להם.

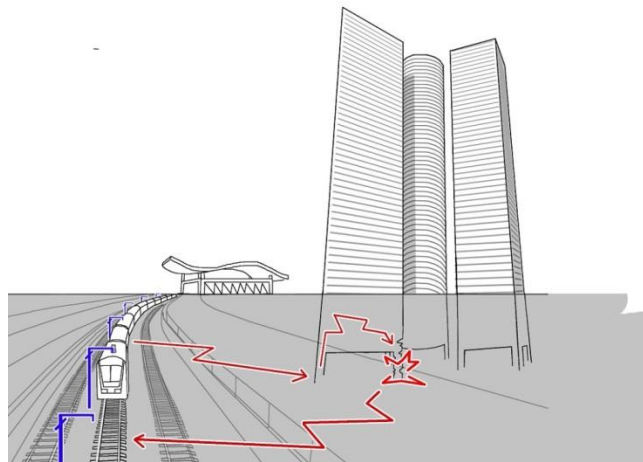
גופים העלולים לפלוט זרם תועה כוללים

באחריות פרטית:

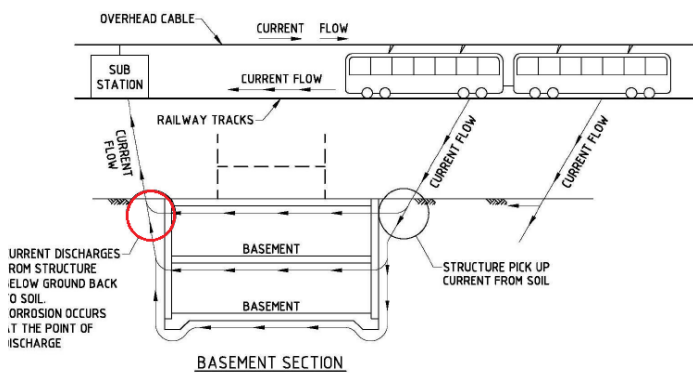
- תחנות דלק: אלפי חוות מיכלי אחסון דלק תת-קרקעיים המחוייבים בהגנה קתודית אקטיבית או פסיבית.
- גז ביתי: הגנה קתודית פסיבית בעשרות אלפי צוברי אחסון גז (גפ"מ) בבתי משותפים בבנייה רוויה.

באחריות גופים סטטוטוריים:

- הרכבת הקלה בירושלים וכן הרכבת הקלה המתוכננת לגוש דן.
- רכבת ישראל: מתכנתת חישמול של כ-420 קילומטר מסילות, גם בתוך ערים⁽¹⁾.
- צנרת המים של מקורות: הגנה קתודית אקטיבית באלפי קילומטרים של צנרת בכל רחבי הארץ.
- צנרת הגז הטבעי: הגנה קתודית אקטיבית בצנרת שתתפתח לכדי אלפי קילומטרים.
- צנרת דלק ארצית: הגנה קתודית אקטיבית בכ-800 קילומטרים צנרת דלק באחריות חברת "תשתיות נפט ואנרגיה" וחברת ק.צ.א.א.^(2,11)
- חברת חשמל: קווי חשמל במתח עליון ובמתח גבוה נפרשים בצפיפות גוברת בסביבות בנייה רוויה ובסביבת מבני דרך כגון גשרים בכבישים והפרדות מפלסיות.



איור אילוסטרציה – זרם תועה זולג מרכבת חשמלית ומסכן יסודות מבנים סמוכים. זליגה של רבע מהזרם המניע נחשבת מצב תקין ברכבת ישראל⁽¹⁾



(15)

התגברות התופעה: בשנים האחרונות, חלה עלייה מהותית בהיקף הגופים העלולים לגרום לזרמים תועים, היקף הצפוי להמשיך ולגדול בעתיד הקרוב והרחוק. התגברות תפוצת גופים אלו מעלה את הסיכון לתקלות תפעול ותחזוקה שיתבטאו בפליטת זרם תועה. זרמים תועים שיעברו דרך יסודות מבנים עלולים לגרום לנזקים משמעותיים למשק הישראלי בכלל, לחברות מסחריות, למפעלי תעשייה, ולאזרחים פרטיים.

טווח הסכנה (האם המבנה שלי פגיע לזרמים תועים):

הערכת טווח הסיכון ממערכת העלולה לפלוט זרם תועה תלויה בגורמים רבים כמו המתח המושרה על ידי גורם הזרם, מוליכות הקרקע, רטיבות הקרקע, סוג הקרקע, ועוד.

- בגישה זהירה, אפשר להתייחס למרחקים הבאים כאזורי סיכון:
- 500 מטר מרכבת קלה
- 300 מטר מצנרת תת קרקעית עליה מופעלת הגנה קתודית אקטיבית
- 300 מטר מקווי מתח עליון
- 100 מטר מקווי מתח גבוה
- 50 מטר מחוות מיכלים קטנות של תחנות דלק
- 10 מטר מצוברי גז ביתי

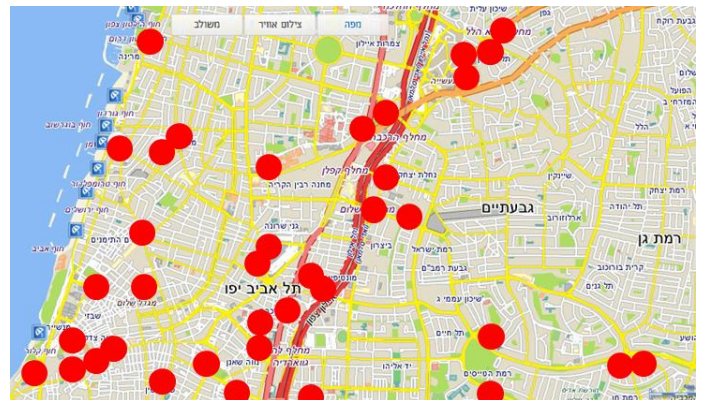
גישה מחמירה טוענת כי טווח הסכנה גדול מקילומטר (13):

An integral part of the problem of stray current is that it can migrate in excess of a kilometer and as a result any corrosion that is detected may not be associated back to the root cause, and as such the stray current problem remains to continue corroding metalwork. The other stray current issue is that electricity is invisible, and when it comes to this variety of the problem, it is occurring beneath the ground, in a place that you can't see it. As a result of the difficulty in identifying areas which are suffering due to stray current corrosion, it is common for it only to be discovered when the damage is already at an advanced stage.

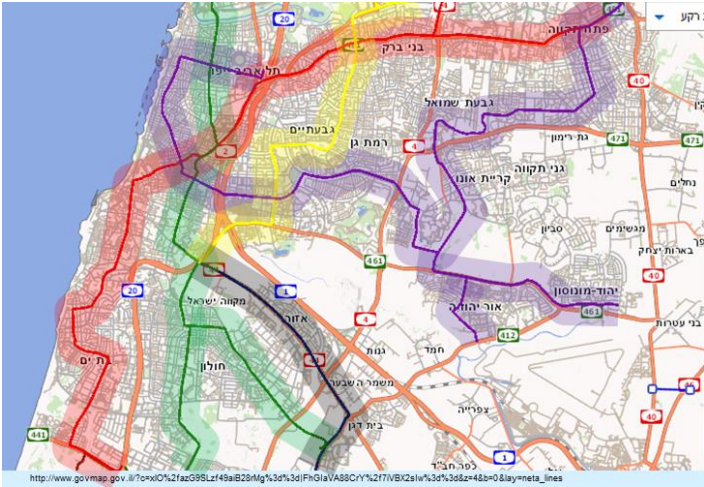
שרטוט טווח הסיכון על מפה מראה כי במרכז הארץ, רוב השטח הבנוי הוא אזור סיכון משולב בו זרם תועה יכול להגיע משני גורמים שונים או יותר.

צוברי הגז הביתיים מביאים את רוב הבנייה הרוויה בערים בארץ לטווח הסיכון מזרם תועה.

אזורי הסיכון מתחנות הדלק באזור המרכז



אזורי הסיכון מקווי הרכבת הקלה באזור המרכז



שאלת האחריות (מה אם המבנה כבר נפגע מזרם תועה):

בישראל, האחריות למניעת נזקי זרם תועה, כמו גם האחריות לנקיטת צעדים מתקנים, מוטלת על "האחרון שמגיע" (12). עם זאת על הניזוק להוכיח כי הנזק הוא תוצאה של זרם תועה, ובמידה והניזוק נמצא בסביבת מספר מקורות אפשריים לזרם תועה אחד, שאלת האחריות על הנזק איננה חד משמעית. כמו כן, על הניזוק לנקוט באמצעים להפחתת חשיפתו לנזק. בהשאלה לתחום התחבורה, לפני שהוא חוצה כביש במעבר חצייה, על הולך הרגל להסתכל לצדדים, למרות שיש לו זכות קדימה.

דוגמה לשאלת האחריות, היא הסיכון למאות אלפי אנשים העוברים ביום בצומת גדול ומרכזי בארץ:

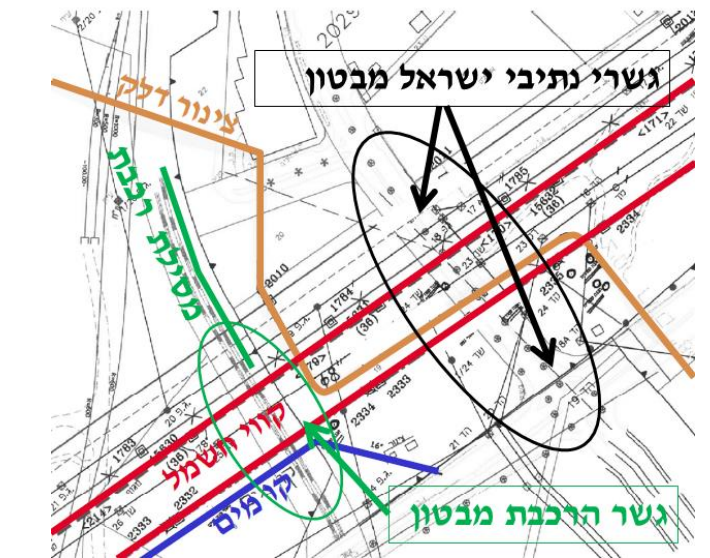
הצומת (6) כולל שני גשרים באחריות נתיבי ישראל וגשר נוסף באחריות רכבת ישראל.

מעל הגשרים ומתחתיהם עוברים מספר נתיבי תחבורה הומים. בסמיכות לצומת נמצאים ארבעה מקורות זרם תועה: צנרת מים עליה מותקנת הגנה קתודית אקטיבית באחריות מקורות, צנרת דלק עליה מותקנת הגנה קתודית אקטיבית באחריות תשי"ג, קווי חשמל במתח גבוה באחריות חברת החשמל, ומסילת רכבת באחריות רכבת ישראל המתוכננת להיות מחושמלת.

המבנים בצומת המדובר, שרויים בסיכון גבוה לנזקים ב-4 תחומים כתוצאה מזרמים תועים:

- התפרקות יסודות הגשרים עקב קורוזיה מואצת.
- התפרקות קירות הדיפון עקב קורוזיה מואצת וסדיקת הבטון בבסיסים.
- התפרקות התומכים בסוללות המצעים עליהם מונחים הכבישים ומסילות הרכבת.
- התפרקות יסודות הבטון של עמודי התאורה, השילוט, והחשמל עקב קורוזיה מואצת.
- אחריותם של הגורמים המפעילים רכבות חשמליות, הגנה קתודית ו/או קווי חשמל, לתחזוק היטב את המערכות כך שלא יפלטו זרמים תועים.

מכיוון שדילמת האחריות על נזקי זרם תועה במקרים של תחזוקה לקויה היא מורכבת, כדאי שמהנדסים ואדריכלים, המתכננים פרויקטים של תשתיות כגון הצומת המדובר, כמו גם קונסטרוקטורים המתכננים מבנים בסביבה דומה (מה שמפרק יסודות של גשר יפרק גם יסודות של בניין), יכירו את נזקי הזרם התועה, יידעו כיצד לאבחן אותו, וימליצו ליזמי הבנייה על אמצעי התגוננות מפניו, כגון תוסף אינהיביטור (מעכב קורוזיה) בבטון תת הקרקע בעת היציקה. לו היו מוסיפים לבטון אינהיביטור (קוד נתיבי ישראל 02.01.0764), סף הרגישות לזרם תועה היה עולה, קצב התפתחות נזקי הקורוזיה היה יורד, סיכון ההתמוטטות ועלויות תחזוקת הגשרים היו פוחתים.



להתגונן או להמתין לנזק?

תמימות דעים שוררת בין המומחים לגבי עצם קיום הזרם התועה ופוטנציאל הנזק ממנו. חילוקי הדעות מתעוררים לגבי טווח הסיכון ממקור הזרם, ואמצעי ההתגוננות בהם כדאי לנקוט. כמו כן קיימת גישה כי "גורם הנזק יתקן", כלומר, במידה ומאובחן חד משמעית נזק זרם תועה, גורם הנזק יישא בעלויות השיקום ובעלויות תיקון המחדל שאיפשר לזרם תועה לפרוץ באזור המסוים.

מכיוון שהוכחת אחריות בלעדית לנזקי זרם תועה היא כמעט בלתי אפשריות, עדיף להחמיר ולהתגונן בעת הבנייה על מנת להימנע מנזקים יקרים בעתיד.

מי שקורא את ה"אותיות הקטנות" במגוון המחקרים, המאמרים והמכרזים המתפרסמים, מבין שהסיכון מוחשי ואמיתי. ניתן למצוא התייחסויות לצורך להיערך לנזקי זרם תועה בפרסומים רבים, כולל של גורמים המרכזיים העלולים לגרום לנזקים. להלן מספר דוגמאות:

נתיבי ישראל, רכבת ישראל, ונתיבי גז: מסילת רכבת העמק נסללת בתוואי מקביל וסמוך לצינור גז טבעי. לרכבת תהיה אפשרות להיות חשמלית. על צינור הגז מותקנת הגנה קתודית

אקטיבית. הן הרכבת והן צינור הגז מסכנים זו את זה, ושניהם מסכנים את יסודות מבני הדרך בסביבתם, כפי שכתוב במכרז 97/12 (3) של נתיבי ישראל, הבונה את המסילה: "על הקבלן לקחת בחשבון כי בעת קבלת ההיתר לעבודה מחברת נתג"ז יידרש ממנו לבצע תכנון השפעות הדדיות של הגנה קתודית בין הקו והגנת הבטון (כלובי הזיון של הכלונסאות עלולים להשפיע על קו הגז ולהיפך - ההגנה הקתודית של הגז עלולה ליצור קורוזיה בזיון הבטון) ויישום המסקנות בשטח.."

פרויקט הרכבת הקלה בגוש דן: מצגת של חברת "נתיבי תחבורה עירוניים" (4), המתכננת ובונה את הרכבת הקלה בגוש דן, מציגה את הסיכונים הצפויים לרכבת המסילה מזרם תועה. במקום השני בסיכונים, ובנפרד מהסיכון לצנרת תת קרקעית, מופיעים "מבנים מתכתיים תת קרקעיים" או במילים פשוטות - יסודות וכלונסאות מבטון מזויין.

חברת החשמל: מצגת של חברת החשמל (6) מציגה נזקים בפועל מזרמים תועים. עמודי מתח עליון של חברת החשמל הוחלפו שנתיים בלבד לאחר הקמתם בגלל זרם תועה מהגנה קתודית על צינור תת קרקעי במרחק מאות מטרים. נפגעו גם בסיסים של עמודי מתח גבוה ונמוך, במספר מקומות.



ביבליוגרפיה

1. רכבת ישראל
<https://www.rail.co.il/HE/Development/Ttl18/>
2. תשתיות נפט ואנרגיה בע"מ
<http://www.pei.co.il/content.asp?type=20>
3. נתיבי ישראל – מרכז 97/12
<http://www.iroads.co.il/sites/default/files/97-12>
4. המכון הישראלי לאנרגיה ולסביבה – הרצאה של ברברה לוין, נתיבי תחבורה עירוניים
<http://www.energy.org.il/info/m-energy/nrg190.pdf>
5. המכון הישראלי לאנרגיה ולסביבה – הרצאה של דר' אלכ גרויסמן, מרץ 2014
http://www.energy.org.il/media/sal/pages_media/211/
6. המכון הישראלי לאנרגיה ולסביבה – הרצאה של אילן גביאן, חברת החשמל, ינואר 2010
http://www.energy.org.il/info/about/hashpeot_haddiot
7. פרק 14 בהנחיות ממשלת איטליה משנת 2010 - שליטה ובקרה בזרם תועה ממסילות רכבת חשמלית
http://www.lta.gov.sg/content/dam/ltaweb/corp/SUMMARY_REPORT_STRAY_CURRENT_CORROSION_CONTROL_EVALUATION
8. SUMMARY REPORT STRAY CURRENT CORROSION CONTROL EVALUATION
<http://digitalcommons.library.tmc.edu/cgi/viewcontent>
9. Dincel Solution for stray current corrosion protection
[http://www.dincelconstructionssystem.com/documents/Corrosion protection of reinforcement from stray current by MCI-2005/2006 NS admixtures](http://www.dincelconstructionssystem.com/documents/Corrosion%20protection%20of%20reinforcement%20from%20stray%20current%20by%20MCI-2005/2006%20NS%20admixtures)
10. Corrosion protection of reinforcement from stray current by MCI-2005/2006 NS admixtures
<http://www.cortecvci.com/Publications/Reports/>
11. חברת קו צינור אילת אשקלון
<http://eapc.co.il/about-us/company-profile/>
12. המכון הישראלי לאנרגיה ולסביבה – הרצאה של משה קמינר
<http://www.energy.org.il/cgi-webaxy/sal/>
13. FM SUDAFIX
<http://www.fmsudafix.com/services/stray-current->

על המחבר:

מהנדס חגי שושני, בעלים ומנכ"ל חברת ניצוץ - יעוץ לתעשייה, העוסקת בייבוא פתרונות לבנייה ותשתיות ובייעול תהליכי ייצור. יליד קבוץ גניגר, בן 56. שרת בצה"ל כקצין מודיעין. למד הנדסה כימית בטכניון (מחזור 1990).



עבד כמנהל תפעול ופיתוח בתעשיות פלסטיקה, איטום וכימיקלים. המציא מספר פטנטים בינלאומיים בתחומי בטון, גבס, לבידים, אנרגיה חליפית, ועוד. נשוי + 3 וסב לשניים. תושב רחוב

רכבת קלה בארה"ב: מחקר שנערך ביוסטון טקסס (8) הראה כי המבנים בבית החולים Mayer, המרוחקים עד מאות מטרים ממסילת רכבת חשמלית כפולה, נמצאים בסכנת קורוזיה מזרם תועה. בגרף מוצג הפרש המתחים אדמה-זיון. הפרש המתחים עולה ויורד כל פעם שעוברת רכבת במסילה. מעבר של שתי רכבות בו זמנית מעלה משמעותית את תנודת המתח באדמה בסביבת המסילות.

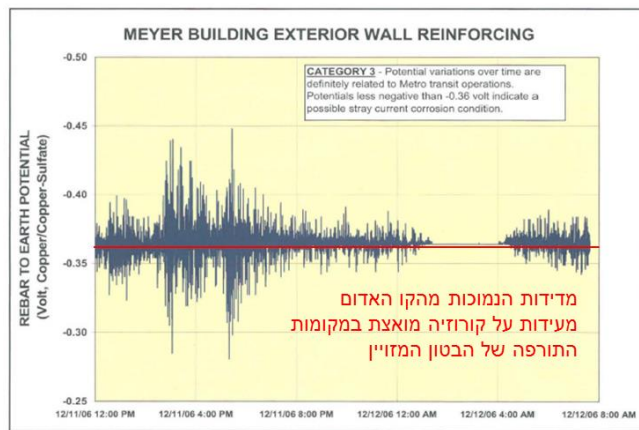


FIGURE 6 – Sample Stray Current Data, Significance Category 3

CORRPRO COMPANIES, INC.

7000-B Hollister • Houston, Texas 77040 • (713)460-6000 • Fax (610)460-6060

לסיכום:

הבנתנו את האתגרים בבנייה מתקדמת עם השנים. הבנייה בישראל אתגרית יותר מאזורים רבים בעולם בגלל מגוון הסיכונים באזורנו:
- סיכוני רעידות אדמה מחייבים השקעה בבניית מבנים עמידים יותר בתנודות קרקע.
- סיכוני ביטחון מחייבים השקעה במרחבים מוגנים.
- התחשבות באיכות הסביבה לטווח ארוך מעודדת השקעה בבנייה ירוקה.

זרם תועה של 1 אמפר יעכל במשך שנה כ- 9 ק"ג ברזל זיון, שיתנפח בכ- 10 ליטר לעומת מצבו המקורי, ויבקע את הבטון שמסביבו בהתאמה.

לאור התרבות הגופים העלולים לפלוט זרמים תועים, מתבקשת השקעה בהתגוננות בפניהם (כאמור, הוספת מעכבי קורוזיה בעת יציקת הבטון בבניה חדשה ובעת שיקום בנייה קיימת). השקעה באינהיביטור בהיקף של פחות מחצי אחוז מעלות הבנייה, תקטין את נזקי הזרם תועה בכל מקום בהם הוא פורץ. אינהיביטור נודד על בסיס אמין-קרבוקסילאט מקטין את טווח סכנה בכ- 50%, ואת התפתחות הנזק בכ- 75% (5,10). אינהיביטור נודד על בסיס אמינו-אלכוהול מקטין את טווח הסכנה בכ- 25%, ואת התפתחות הנזק בכ- 40%. לאינהיביטור ניח על בסיס קלציום ניטריט או סודיום ניטריט אין השפעה על זרם תועה.