

תקן 118 - מענה מרשמי או מענה תפקודי לדרגות החשיפה

מהנדס חגי שושני,

GIC – ייעוץ לתעשייה, ת.ד. 15096 רחובות 7615002, office@gic-eng.com

פורסם במאגדת [כנס הבניה התשיעי](#) של איגוד המהנדסים

בינואר 2015 נכנס לתוקף מחייב תקן 118, לפיו כל הזמנה וכל הספקה של בטון מובא, נדרשת להביא בחשבון את דרגת החשיפה של הבטון לסביבתו. דרגת החשיפה מהווה קידום בהתפתחות ענף הבנייה בישראל. בעבר הוערך טיבה של הבנייה לפי "חוזק", ולאחר מכן לפי "קיימות". בשנים האחרונות התפתחה הבנייה לפי "קיים", כלומר, משך השרות של המבנה. תקן 118 מפרט 11 דרגות חשיפה בהתאם לאופי המבנה וסביבתו. דרגות חשיפה ליסודות בקרקע שונות מדרגות החשיפה לחלקי המבנה מעל מהקרקע. יצרן הבטון המובא נדרש לספק בטון העונה על דרגת החשיפה המוגדרת באחת החלופות: **חלופה מרשמית** – העלאת צפיפות הבטון עבור דרגת חשיפה גבוהה, במטרה לעכב חדירת סביבה אגרסיבית עד פלדת הזיון וכך לעכב את הקורוזיה, התנפחות הפלדה, והסדיקה של הבטון מסביבה. **חלופה תפקודית** – שימוש באינהיביטורים (מעכבי קורוזיה נודדים) שמוכיחים עצמם בעולם ובארץ עשרות שנים, או בטכנולוגיות ומוספים אחרים, לשיפור קיים המבנה, במקום העלאת צפיפות הבטון.

רקע:

הבטון המזויין משמש כמרכיב עיקרי בשלדי בניינים כ-120 שנים בלבד. כבר בתחילת המאה ה-20 הובן כי הבטון המצפה את פלדת הזיון מגן עליה לתקופה מוגבלת. עוד הובן כי חלודה של הפלדה היא הגורם העיקרי לכשל המבנה ולסיום משך השרות שלו, הן כשמדובר במבנים בעלי שלד בטון מזויין, והן כשמדובר במבנים בעלי שלד פלדה, כבלי דריכה ותלייה, וכד'. חוקת הבטון בישראל, באמצעות תקנים 466, 118 ו-4466 הסדירה את כללי הבנייה כבר משנת 1962⁽⁷⁾, כאשר סיווג הבטון נעשה על פי חוזקו בלחיצה. "מספרי הבטון" 200, 300 וכדומה מייצגים חוזק ביחידות של ק"ג לסמ"ר. **עידכון התקנים הישראליים** במקביל לתקינה האירופית והאמריקאית חל בסוף שנות ה-80 של המאה הקודמת. סיווג הבטון על פי קיימות (SUSTAINABILITY) הכניס קריטריונים כמו היחס מים/צמנט, חומרים פוצלניים, מפחיתי מים, ועוד. "מספרי הבטון" 30, 40 וכדומה מייצגים עמידות הבטון בלחץ מכל כיוון ביחידות מגה-פסקאל. **בשנים 2003-2008** חל עידכון מהותי נוסף בתקנים, על פיו סיווג הבטון נעשה לפי קיים (PERFORMANCE). הוגדרו 11 דרגות חשיפה של הסביבה בה מצופה הבטון המזויין לתפקד במשך השרות המתוכנן לפחות. העיקרון הינו שבניינים שונים בסביבות שונות דורשים התאמה של הבטון לתנאים אלו על מנת שיוכלו לשרת את מטרתם למשך הזמן שתוכנן. סביבה אגרסיבית יותר דורשת הגנה אפקטיבית יותר על פלדת הזיון מפני קורוזיה (חלודה), או כפי שהתקן ניסח: "פעולות כימיות ופיסיקליות של גורמים סביבתיים, שהשפעתם על הבטון, על זיון הבטון ועל המתכות הכלולות בבטון אינה מובאת בחשבון כעומסים בתכן המבנה"⁽¹⁾. כאשר הבטון אינו מגן עוד על הפלדה מפני קורוזיה והיא מתחילה להחליד – יהיה צורך בשיקום יקר בתוך כ- 6 שנים, או שהמבנה עלול להגיע לכשל קונסטרוקטיבי בתוך 15-20 שנים. **החל מתחילת 2015**, נכנס תקן 118 לתוקף המחייב כל מזמין בטון לציין בהזמנתו את דרגת החשיפה הצפויה לרכיב הנוצק. בהתאמה, כל ספק בטון מחוייב לייצר ולספק את הבטון בהתאמה לדרגת החשיפה, ובנוסף לעמוד בהגדרות הנוספות של סומך (שקיעה, צמיגות), גודל אגרגאט מאכסימלי, וחוזק לחיצה. כאשר רוצים לשדרג את הבטון, עדיף להעלות את דרגת החשיפה במקום להעלות את חוזק הבטון.

דרגות החשיפה:

את דרגות החשיפה, המופיעות בטבלאות 3 ו-11 בתקן, אפשר לחלק לשלושה טווחים בהתאם לחלקי המבנה. דרגת החשיפה היא המרכיב הראשון בתכן הבטון, אליה יותאמו הסומך, גודל האגרגאט, וחוזק הלחיצה. ניתן לסווג מבנה בדרגת חשיפה בודדת על ידי שימוש בדרגה המאפיינת את הסביבה האגרסיבית ביותר במבנה (בדרך כלל עבור רכיב הבטון שביסודות המבנה). במידה ורוצים "להקל" ולהשתמש בבטונים בעלי הגנה פחותה על פלדת הזיון – יש לסווג את דרגות החשיפה בהתאם לאלמנט הנוצק, כלומר – עד שלושה סוגי בטון לכל בניין:

- רכיבי מבנה בקרקע ועד 2 מטר מעליה (כולל הקומה הראשונה מעל האדמה) – דרגות חשיפה 3, 7, 9, 10, 11
- רכיבי מבנה במעטפת, 2 מטר ומעלה מעל הקרקע (רצפת קומה 2 ומעלה) – דרגות חשיפה 2, 4, 5, 6, 8
- רכיבי מבנה פנימים, שאינם חשופים לאווירה קורוזיבית או אגרסיבית – דרגת חשיפה 1

אגרסיביות הקרקע מוגדרת בטבלה 1 בתקן 118. את אגרסיביות הקרקע יכול הקונסטרוקטור לקבל מיועץ הקרקע או ממעבדת הקרקע. דגימה ובדיקות קרקע נעשות ממילא לקביעת ביסוס המבנה. **אין צורך בדגימה מיוחדת**, כך, בעלות שולית, ניתן להשתמש בשאריות בדיקות חוזק הקרקע לאנליזה כימית של אגרסיביות.

טבלה 1 - סיווג אגרסיביות כימית של סביבה רטובה (לרבות קרקע רטובה)

מספר סידורי	תיאור קריטריון האגרסיביות	רמת האגרסיביות	
		קלה	בינונית
1	ערך pH	6.5 - 5.5	5.5 - 4.5
2	חומצה פחמתית מסיסה CO ₂ (מ"ג לליטר)	40 - 15	100 - 40
3	NH ₄ ⁺ (מ"ג לליטר)	30 - 15	60 - 30
4	Mg ⁺⁺ (מ"ג לליטר)	1000 - 300	3000 - 1000
5	SO ₄ ⁻ (מ"ג לליטר)	600 - 200	3000 - 600

אגרסיביות הקרקע נקבעת על פי החמור מחמשת הפרמטרים בטבלה 1. הקונסטרוקטור צריך להביא בחשבון, בהתאם לסעיף 4.1 בתקן, כי עליו להחמיר יותר במקרים של שני פרמטרים באותה אגרסיביות, אזורי תעשייה, מחזורי הרטבה - ייבוש, התמשכות הבנייה מעבר לשישה חודשים, שיקול דעת, ועוד. מומחים טוענים כי עד שיתווספו לתקן, כדאי להתייחס לשלושה פרמטרים נוספים בקביעת אגרסיביות הקרקע:

- ריכוז כלורידים - בעלי השפעה שלילית על קיים גם בקרקע, בנוסף לקירבה לים.
- זרם חשמלי תועה - בקרבת רכבת חשמלית, קווי מתח גבוה ועליון, צינורות ו/או מיכלים עם הגנה קתודית.⁽²⁾
- החמרה באגרסיביות קרקע מזיהום שיתפתח במהלך השרות עקב השקיה, דישון, שפכים וכד' בקרבת המבנה.

דירוג חשיפה של רכיבי חוץ נעשה על פי מרחקם מהים ועל פי גובהם מעל האדמה. חשוב להבין, כי עד 2 מטר מעל הקרקע מתייחסים לבטון כאילו הוא באדמה, כלומר, גם הרצפה והעמודים של הקומה הראשונה נחשבים לבנייה בקרקע. רכיבי חוץ יהיו קורות, עמודים, וקירות בטון מזויין במעטפת המבנה רק מהקומה השנייה ומעלה. עוד מנחה התקן את הקונסטרוקטור כי "דרגת החשיפה **תוחמר** אם בתקופת הבנייה נחשף המבנה או הרכיב לתנאים גרועים למשך זמן ארוך משישה חודשים (כגון אם אינו מטוייח או מחופה בתקופה זו)".⁽¹⁾

רכיבי פנים הם רצפות/תקרות שאינם מרתף או גג, וגם עמודים וקורות פנימיים.

כאשר רוצים לשדרג את הבטון, עדיף להעלות את דרגת החשיפה במקום להעלות את חוזק הבטון. החמרת דרגות החשיפה איננה לינארית ומפורטת בטבלאות להלן, וגם בצבעים מתכנים על טבלה 11 בהמשך. **לדוגמה** - החמרת דרגת חשיפה 3 מעבירה את הרכיב לדרגה 9 (ולא לדרגה 4).

אגרסיביות הקרקע - דרגות חשיפה לרכיב בטון בקרקע ועד קומה 1				
אגרסיביות שולית	בניה ימית בעומק גדול מ- 2 מטר	אגרסיביות קלה	אגרסיביות בינונית	אגרסיביות חמורה
דרגת חשיפה 3	דרגת חשיפה 7	דרגת חשיפה 9	דרגת חשיפה 10	דרגת חשיפה 11

מרחק מהים - דרגות חשיפה לרכיב בטון חוץ (מעטפת בניין) מקומה 2 ומעלה				
יותר מ- 2 ק"מ	1-2 ק"מ	0.2-1.0 ק"מ	עד 0.2 ק"מ חשוף לרוח אך ללא התזה של מי ים	חשוף להתזה של מי ים
דרגת חשיפה 2	דרגת חשיפה 4	דרגת חשיפה 5	דרגת חשיפה 6	דרגת חשיפה 8

פנים מבנה - דרגת חשיפה לרכיב בטון באווירה מבוקרת בתוך מבנה
דרגת חשיפה 1

מענה תפקודי לעומת מענה מרשמי לדרגות החשיפה:

לאחר קביעת דרגות החשיפה של המבנה/רכיב, ממזין הקבלן בטון בטופס בו מצוינים לפחות דרגת החשיפה, הסומך, גודל האגרגאט המאכסימאלי, וחוזק הבטון בלחיצה. יצרן הבטון המובא מייצר ומספק בטון על פי ההנחיות בסעיף 5.3.1 בתקן באחת משתי חלופות - **מענה מרשמי** (ערכים גבוליים) או לחילופין, **מענה תפקודי**: "כללי: הדרישות לעמידות הבטון בתנאי הסביבה ניתנות כערכים גבוליים להרכב הבטון ותכונותיו (ראו סעיף 5.3.2) **או, לחילופין, כדרישות הנובעות משיטות תכנון תפקודיות ביחס לקיים (ראו סעיף 5.3.3)**"⁽¹⁾

המענה המרשמי מפורט בסעיף 5.3.2 בתקן ומתומצת בטבלה מספר 11. על פי המענה המרשמי, בהתאמה לעלייה באגרסיביות הסביבה המבוטאת בדרגות החשיפה, ייוצר בטון צפוף, המבוטא בעלייה בתכולת הצמנט ובריידה ביחס מים/צמנט. ההיגיון במענה המרשמי הוא הקטנת קצב חדירת גורמי קורוזיה דרך כיסוי הבטון על פלדת הזיון. העלייה בדרגות החשיפה בדרך זו, כדאית לכל המעורבים, **למרות העלייה במחיר הבטון**, בשל הארכת קיים המבנה בשנים רבות.

הפרמטרים בהם צריך יצרן הבטון לעמוד הם ברורים ומדידים: מינימום צמנט, מאכסימום מים, מאכסימום גודל אגרגט, סומך, חוזק (עד ב-40 החוזק הוא פועל יוצא של מינימום הצמנט ומאכסימום היחס מים/צמנט). עיון בטבלה 11 בתקן 118 (לאחר גיליון עידכון 4) מראה כי במענה המרשמי יש שוויון בין דרגות החשיפה 2=3=4, 6=7=10, 8=11, כלומר, בפועל יש רק 6 דרגות חשיפה, והעלייה בדרגת החשיפה איננה במרווחים קבועים. **לדוגמה** – החמרת דרגת חשיפה 2 (רכיב חוץ) מעבירה את הרכיב לדרגת חשיפה 5, לא לדרגה 3 (רכיב בקרקע), וגם לא לדרגה 4 (זהה לדרגה 2 במענה המרשמי). למענה המרשמי שלושה חסרונות עיקריים:

ראשית – קיים ויכוח האם עלייה בכמות הצמנט בבטון משפרת את קיים המבנה. תוצאות ויכוח זה מתבטאות בגיליון תיקון 4 לתקן, בו הופחתו ערכי תכולת הצמנט המינימלית בדרגות החשיפה הגבוהות. שנית – תכונות הבטון, טובות ככל שיהיו, אינן תורמות לקיים הבטון המזויין באזורי תורפה הנוצרים לעיתים ביציקה (כיסוי חסר של פלדת הזיון, סגרציות, סדיקת התכווצות, סדיקת הפסקות יציקה, ועוד). שלישית – תכונות הבטון, טובות ככל שיהיו, אינן תורמות לקיים הבטון המזויין במקרה של חשיפה לזרם חשמלי תועה⁽²⁾ אשר מגדיל בצורה משמעותית את פגיעות יסודות המבנה לנזקי חלודה. הדרך המעשית היחידה לצמצום אזור הסיכון והפחתת נזקי זרם תועה היא תוסף מעכב קורוזיה נודד בבטון (הרחבה בהמשך).

טבלה 11 - היחס המקסימלי מים:צמנט ותכולת הצמנט המינימלית בהתאם לדרגת החשיפה^(א)

דרגת חשיפה	תיאור תנאי הסביבה של המבנה או רכיבי המבנה ^(ב)	יחס מקסימלי מים:צמנט	תכולת צמנט מינימלית ^(ג) (ק"ג למ"ק)
1	רכיב פנים ב"אווירה רגילה", או רכיב חוץ באזור מדברי, 2 מ' לפחות מעל פני הקרקע	0.70	230
2	רכיב חוץ	0.60	230
3	פני רכיב (פנים או חוץ) כמגע עם מים שאינם אגרסיביים או עם קרקע שאינה אגרסיבית (ועד 2 מ' מעליה), או באווירה לחה		
4	רכיב חוץ		
5	סביבה ימית	0.55	270
6	(הים התיכון) כאשר $R < 0.2$, עד גובה 30 מ' - חשוף לרוח מהים, אך לא להתזה ישירה של מים	0.45	
7	בנייה ימית	0.45	
8	(הים התיכון וים סוף) באזור התות מים, או בתוך הים, בעומק עד 2 מ'	0.45	320
9	סביבה או קרקע	0.50	270
10	אגרסיביות	0.45	
11	(ראו טבלות 1, 2) אגרסיביות חמורה (מחייב ציפוי מגן מפריד)	0.45	320

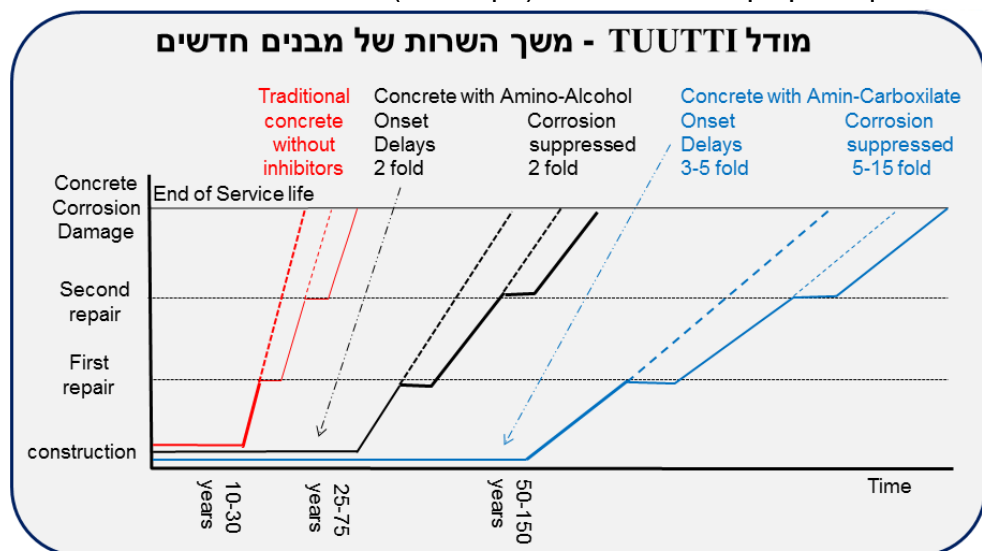
המענה התפקודי לדרגות החשיפה מופיע בסעיף 5.3.3 בתקן ומפורט בנוסח ג' בתקן 118: "..... שיטת תכנון המבוססת על הגישה התפקודית מביאה בחשבון כל מנגנון הרס רלוונטי, את משך החיים של הרכיב או המבנה ואת הקריטריון המגדיר את סיום משך החיים בדרך כמותית. שיטה כזו יכולה להיות מבוססת על ניסיון מספק בשיטות המקובלות בסביבה המקומית, על נתונים שהתקבלו מבדיקה תפקודית המבוססת על המנגנון הרלוונטי, או על שימוש במודלים בעלי כושר חיזוי מוכח".⁽¹⁾

מעכב קורוזיה נודד (אינהיביטור) הוא תוסף לתערובת בטון מובא, המהווה מענה תפקודי לשיפור והארכת הקיים של המבנה. אינהיביטורים כגון VpCl, MCI מוכיחים עצמם בשטח כבר כ- 40 שנה, ומאריכים קיים פי 5-15. מעכבי קורוזיה נודדים בבטון כגז בריכוז אפסי, נמשכים אל פלדת הזיון ונספחים אל פני השטח שלה. הם יוצרים שכבת מגן חד מולקולארית (ללא עובי) מתחדשת. שכבת המגן נוצרת ומתחדשת החל משלב היישום ועד עשרות שנים לאחריו, גם כאשר הפלדה מכוסה בטון, נוזל (מים), גז (אוויר), ציפוי או צבע, בכל נקודה מיקרוסקופית בה "נפרצה" ההגנה. מוסף אינהיביטור לבטון טרי פעיל למשך לפחות 25 שנה מהיישום. אינהיביטורים על בסיס אמין-קרבווקסילאט (VpCl, MCI) מדכאים ומפחיתים את התפתחות הקורוזיה פי 5-15 לעומת המצב בלעדיהם. משך השרות של רכיבי הבטון המזויין, ובמיוחד אזורי התורפה הנוצרים בעת היציקה, מתארך באותה המידה. בנוסף, אינהיביטורים יפחיתו משמעותית את פגיעות המתכות לקורוזיית מאמצים (STRESS), קורוזיית נקיקים (CREVICE), קורוזיית גימום (PITTING), וקורוזיית זרם תועה (התקפה אנודית).

בדרגות החשיפה הגבוהות, אינהיביטור כמענה תפקודי לדרגת החשיפה של המבנה מאפשר את הארכת הקיים (משך השרות) של המבנה, במיוחד באזורי תורפה של היציקה, **בעלות דומה או נמוכה** מהמענה המרשמי.

תוכנת המחשב LIFE-365 ⁽³⁾ מציגה מודל בעל כושר חיזוי מוכח. התוכנה, שפותחה על ידי פאנל בינלאומי, זמינה לכל המעוניין בחינם. קישור לתוכנה מופיע באתר www.glimmer.co.il. ניתן להזין לתוכנה פרטי בטון, אלמנט היציקה, תנאי הסביבה, סוגי מוספים, וכדומה לקבלת השוואה ותחזית משך שרות.

בדוגמה שבתרשים ניתן לראות את האופן בו שימוש במעכבי קורוזיה בשלב הבנייה מאפשר משך שירות ארוך. שיקום ראשון נדרש רק לאחר כ-60 שנה (הקו הכחול) לעומת בנייה ללא מעכבי קורוזיה, בה במקרים רבים נדרשות פעולות שיקום בטון תוך כ-10 שנים בלבד (הקו האדום).



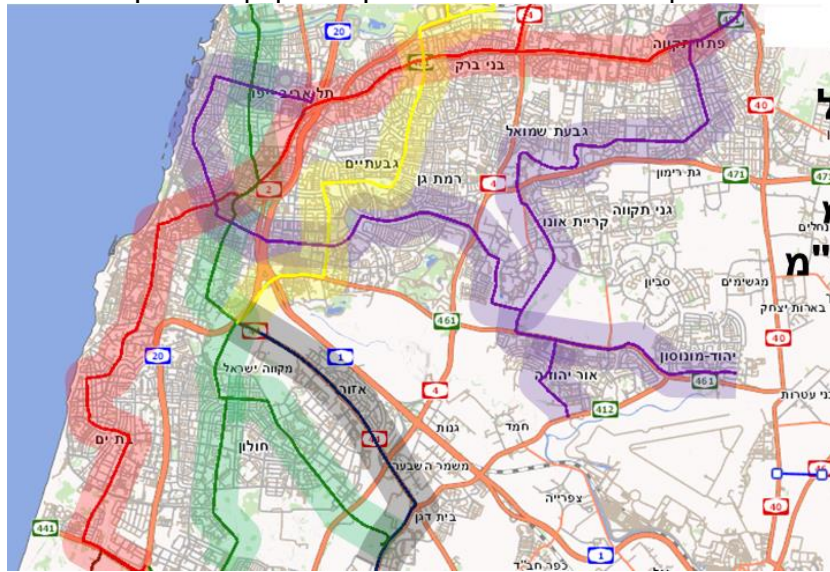
ועוד מילה על הרכבת הקלה, צינורות הגז הטבעי, צינורות הדלק, קווי מתח עליון, וכדומה:

זרם תועה הוא תופעת לוואי שלילית ומסוכנת בעיקר בקרקע. הזרם החשמלי תועה כאשר הוא עובר במעגל חשמלי שונה מזה שיועד לו (כתוצאה מתכנון, ביצוע או תחזוקה לקויים), לדוגמה דרך פלדת זיון בטון, וגורם להתפתחות חלודה מואצת באזור היציאה שלו מהבטון. דוגמאות נפוצות לזרם תועה כוללות פריצות זרם מפסי רכבת חשמלית, וגם ידועות לפרוץ מהגנה קתודית אקטיבית המותקנת על מיכלים ו/או צינורות תת קרקעיים, מקווי חשמל במתח גבוה ועליון, ומהגנה קתודית פסיבית המותקנת סמוך ליסודות מבנים. בשנים האחרונות, חלה עלייה מהותית בהיקף הגופים העלולים לגרום לזרמים תועים, היקף הצפוי להמשיך ולגדול בעתיד הקרוב והרחוק.

זרם תועה של 1 אמפר יעכל 20 ס"מ פלדת זיון בקוטר 12 מ"מ תוך שבוע בלבד ⁽⁴⁾. עיכול הפלדה יגרום התנפחות של כ- 10 ס"מ שתסדוק ותפרק את הבטון מבפנים.

בגישה זהירה, אפשר להתייחס למרחקים הבאים כאזורי סיכון: ⁽²⁾ 500 מטר מרכבת חשמלית, 300 מטר מצנרת תת קרקעית של גז, דלק, או מים, 300 מטר מקווי מתח עליון, 100 מטר מקווי מתח גבוה, 50 מטר מחוות מיכלים קטנות של תחנות דלק, 10 מטר מצוברי גז ביתי. ⁽⁶⁾⁽²⁾ גישה מחמירה טוענת כי טווח הסכנה גדול מקילומטר ⁽⁵⁾

בתרשים מודגש טווח של 500 מטר מקווי נת"ע המתוכננים. כל בטון תת הקרקע בגוש דן נמצא בסיכון זרם תועה.



**זרם תועה של
1 אמפר
יעכל 20 ס"מ
ברזל זיון 12 מ"מ
בשבוע**

סיכום:

דרגות החשיפה של תקן 118 מהוות המשך השיפור בהכנסת קיים מבני הבטון לתקנים הישראליים. בכל מבנה יש להגדיר לחוד את דרגת החשיפה מהיסודות ועד הקומה הראשונה (דרגות 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11), מעטפת המבנה מהקומה השניה ומעלה (דרגות 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20), מעטפת כאשר רוצים לשדרג בטון, עדיף להעלות את דרגת החשיפה במקום להעלות את חוזק הבטון. בקביעת אגרסיביות הקרקע מומלץ להתייחס, בנוסף לקריטריונים המוגדרים בטבלה 1 בתקן, גם לגורמי סיכון שעדיין אינם נכללים בתקן כמו זרם תועה, זיהום הקרקע במהלך השרות של המבנה, וכלורידים. מענה תפקודי של אינהיביטור בבטון מהווה חלופה עדיפה - איכותית וכלכלית - על פני מענה המרשמי של בטון צפוף יותר בעל תכולת צמנט גבוהה ויחס מים/צמנט נמוך, במיוחד בדרגות החשיפה הגבוהות.

מראי מקום:

1. תקן ישראלי 118, ניתן לצפייה בחינם בקישור <http://ibr.sii.org.il/IBRSystemWEBClient/html/index.html>
2. זרם תועה – להגיב או להמתין לנזק, הנדסת בנייה ותשתיות, גיליון 61, אוקטובר 2014, עמוד 71 http://www.glimmer.co.il/file_library/StrayCurrentArticle2014.pdf
3. LIFE-365 – תכנה לחיזוי משך השרות של בטון מזויין <http://www.life-365.org>
4. Stray Current Corrosion Control Evaluation, Texas Medical Center, 2007
5. <http://digitalcommons.library.tmc.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1000&context=tmcreports> Earthing Services
6. הגנה קטודית לצוברי גז, מט מור טכנולוגיות 2010 <https://www.articles.co.il/article/73171>
7. בטון מזויין - עקרונות, בטון במצב גבולי דר' אברהם פיזנטי <http://www.pisanty.com/gvuli.pdf>