

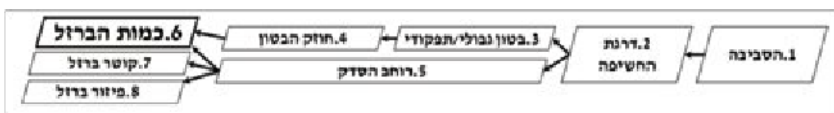
השפעת דרגת החשיפה על כמות הברזל בבטון מזויין

ההחלטה על סוג המענה, תפקודי או גבולי, מביאה להבדלים משמעותיים בכמות הברזל באלמנט ובבטון גבולי ועלולה לגרום לתכנון-חסר של ברזל ואי עמידה בדרישות תקן 466



מהנדס חגי שושני*

ככלל, תהליך תכנון הברזל בהתאם לקיים הינו כמותאר בתרשים הבא.



תכנון הברזל בבטון מזויין מושפע מרוחב הסדק וחוזק הבטון. מכיוון שחוזק הבטון ורוחב הסדק מושפעים מדרגת החשיפה, ההחלטה על סוג המענה, תפקודי או גבולי, מביאה להבדלים משמעותיים בכמות הברזל באלמנט (עד יותר מ-60%) ובבטון גבולי, עלולה לגרום לתכנון-חסר של ברזל ואי עמידה בדרישות תקן 466. בדרגות חשיפה 5 ומעלה, יש עדיפות מובהקת (כלכלית והנדסית) למענה התפקודי. בדרגות חשיפה 1-4, בהן הסביבה אינה מאתגרת את המבנה במשך השרות, יש עדיפות כלכלית למענה הגבולי. בשלב תכנון השלד, שיקולים בתכנון ברזל ובתכנון בטון משתלבים, משפיעים ומושפעים זה מזה.

1. אפיון הסביבה בה מיועד לשרת המבנה
 2. דרגת החשיפה נקבעת על ידי הסביבה
 3. מענה תפקודי או גבולי לבטון, נקבע על ידי דרגות החשיפה (החלטת קונסטרוקטור)
 4. חוזק הבטון נקבע על ידי סוג המענה לדרגות החשיפה
 5. רוחב הסדק נקבע על ידי דרגת החשיפה
 6. כמות הברזל נקבעת על ידי חוזק הבטון ורוחב הסדק
 7. קוטר הברזל נקבע על ידי רוחב הסדק
 8. פיזור הברזל נקבע על ידי רוחב הסדק ועל ידי כמות וקוטר הברזל.
 הקונסטרוקטור מתכנן השלד, הוא האחראי להבטחת קיום המבנה במשך השירות המתוכנן לו. הנוהג התכנוני על פיו סווג המענה לדרגות החשיפה, אינו מוגדר (תקן 118 מחייב ציון דרגת החשיפה בלבד) ועלול להוביל לתכנון ברזל בחוסר ולא-עמידה בדרישות חוקת הבטון (תקן 466 חלק 1).

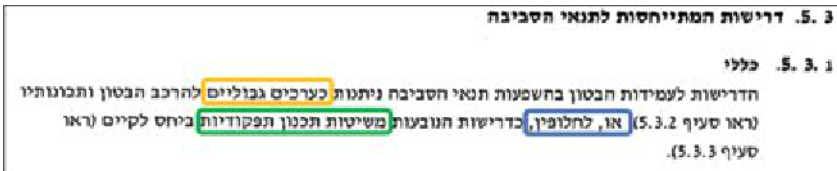


המאריך את תקופת הדגירה עד תחילת הקורוזיה של ברזל הזיון, ללא השפעה על קצב הקורוזיה.

- המענה התפקודי מעלה את עמידות הברזל בבטון מפני קורוזיה, המאריך הן את תקופת הדגירה, הן את קצב התפתחות הקורוזיה.

ככל שהבטון חזק יותר, כך צריך יותר ברזל על מנת לרסן את הסדיקה

4. חוזק הבטון: ברוב המקרים, ב-30 או ב-40 - מספיקים מבחינת חוזק לחיצה.
- המענה הגבולי מעלה את חוזק הבטון מעל הצורך הקונסטרוקטיבי (ב-60) וגם מעלה את נטיית הבטון לסדיקה וסגרגציה.



- המענה התפקודי אינו משפיע על חוזק הבטון, מאפשר להקטין את עובי הכיסוי על הברזל בסביבה אגרסיבית וכולל בתוכו גם מענה לשגיאות יישום כגון כיסוי חסר, סדקים, סגרגציות.
- 5. רוחב הסדק: רוחב הסדק הדינמי המקסימאלי מוכתב על ידי דרגת החשיפה בסעיף 6.3 ובטבלה 6.5.

טבלה 6.5 - רוחב סדק מקסימלי בשל תנאי הסביבה (מ"מ)

סוג הסביבה או הכיב	תנאי הסביבה	ברכיב
1	רכיב פנים ב"אווירה רגילה", או רכיב חוץ באזור מדברי, 2 מ' לפחות מעל פני הקרקע	0.30
2	רכיב חוץ כאשר $R > 2$, 2 מ' לפחות מעל הקרקע	0.30
3	פני רכיב (פנים או חוץ) במגע עם מים שאינם אגרסיביים או עם קרקע שאינה אגרסיבית (ועד 2 מ' מעל לקרקע)	0.20
4	רכיב חוץ אם $1 < R < 2$, 2 מ' מעל הקרקע	0.20
5	סביבה ימית אם $1 < R < 0.2$ חשוף לרוח מהים או כאשר קיים $R < 0.2$, מעל גובה 30 מ'	0.15
6	סביבה ימית (הים התיכון) כאשר $R > 0.2$ עד גובה 30 מ' - חשוף לרוח מהים, אך לא להתזה ישירה של מים	0.10
7	בנייה ימית (הים התיכון) בתוך הים, בעומק נדול מ-2 מ'	0.10
8	בנייה ימית (הים התיכון) באזור התחתון מים, או בתוך הים, בעומק עד 2 מ'	0.10
9	סביבה או קרקע אגרסיביות קלה	0.15
10	אגרסיביות בינונית	0.10
11	אגרסיביות חמורה	0.10

המתכנן רשאי וצריך להחמיר את דרגות החשיפה מעל המינימום, על פי הנחיות התקנים, מיקומו המסוים של הבניין, השימוש הצפוי בחלקי הבניין, ושיקול דעתו. לאחר קביעת דרגות החשיפה של חלקי הבניין, מתחיל תכנון השלד בשני היבטים שלובים, המשפיעים ומושפעים זה מזה:

- **תכנון הברזל** - כמות, קוטר, מיקום בבטון, עובי הכיסוי על הברזל החיצוני באלמנט הבטון המזויין.
 - **תכנון הבטון** - צפיפות, סומך, חוזק, סוג וגודל אגרגאט, סוג צמנט, כמות צמנט, מוספים, ועוד.
3. **בטון גבולי או בטון תפקודי:** בתכנון הבטון באלמנט בטון מזויין על הקונסטרוקטור להגדיר את סוג המענה לדרגות החשיפה:

כיום, התכנון הנפוץ בדרגות חשיפה גבוהות, מתאים לבטון תפקודי, בעוד אספקת הבטון הנפוצה מתאימה לבטון גבולי. מרבית הקונסטרוקטורים מתכננים את כמות הברזל על פי חוזק "רגיל" (ב-30 או ב-40), כאשר במענה הגבולי מסופק בטון עם עודף חוזק (ב-60), שמחייב הגדלה של עד 62% בכמות הברזל.

הקונסטרוקטור אחראי להבטחת קיום המבנה במשך השירות המתוכנן לו

הגדרת מענה תפקודי אינה דורשת התאמות בתכנון הנפוץ של השלד. הגדרת מענה גבולי דורשת תוספת משמעותית לכמות הברזל (ועלותו) וכן תוספת עלות לתערובת הבטון עצמה. על כן, חשוב מאוד לכלול את סוג המענה לדרגות החשיפה בכל תכנית, מפרט וכתב כמויות, כדי להימנע מחוסר ברזל בפועל, קיצור משך השירות בפועל, ומחשיפה לאחריית ביטוחית-משפטית.

בדרגות חשיפה 5 ומעלה, ישעדיפות מובהקת (כלכלית והנדסית) למענה התפקודי. להלן ציטוטים רלוונטיים מתקנים 1-466 ו-118 והסברים מפורטים.

1. **אפיון הסביבה בה מיועד לשרת המבנה:** למיקום המבנה בסביבתו, השפעה מהותית על תכנון השלד, כך שיתפקד לפחות במשך השרות המתוכנן, ללא עלויות תחזוקה משמעותיות. משך השרות ה"רגיל" הוא 50 שנה.

2. **דרגות החשיפה נקבעת על ידי הסביבה:** סיווג אגרסיביות הסביבה בה מתפקד המבנה במשך השרות המתוכנן לו מוגדר בטבלאות 6.1 ו-6.3. טבלאות אלו זהות לטבלאות 1 ו-3 בתקן 118. באוגוסט 2016 הוחלט במכון התקנים על הוספת טבלת אגרסיביות הקרקע לתקן 940 חלק 1 (טרם בוצע).

לכל מבנה שלוש דרגות חשיפה שונות:

סוג האלמנט	דרגות חשיפה
בטון בקרקע ועד 2 מ' מעליה	3 או 9 או 10 או 11
בטון במעטפת (חוץ) 2 מ' מעל הקרקע ומעלה	2 או 4 או 5 או 6 או 8
בטון פנים	1

* דרגת חשיפה 7 היא עבור בנייה בעומק הים (בעומק גדול מ-2 מטר)

חשיפה (עודף צמנט) יוצרת מצב בו מתקבל בטון ב-60 (חזק בהרבה מהצורך הקונסטרוקטיבי).

כלומר, בבטון גבולי, יש צורך בתוספת משמעותית של ברזל על מנת לעמוד במגבלת הסדקה. בחירה במענה תפקודי אינה משנה את חוזק הבטון וכמות הברזל בהתאמה (ב-30 נשאר ב-30).

המתכנן צריך להחמיר את דרגות החשיפה מעל להינימום, לפי הנחיות התקנים

7. קוטר הברזל: הקוטר המקסימאלי של מוטות הזיון מוכתב על ידי רוחב הסדק, שנקבע על ידי דרגת החשיפה (טבלה 6.6). ככל שרוחב הסדק צר יותר, קוטר הברזל קטן יותר. כלומר, אותה כמות ברזל תתבטא ביותר מוטות דקים ועליה בעבודת התפסנות בהתאם.

למיקום המבנה בסביבתו, השפעה על תכנון השלד, כך שיתפקד לפחות במשך השרות המתוכנן

8. פיזור הברזל: המרחק המקסימאלי בין מוטות הזיון מוכתב על ידי רוחב הסדק, שנקבע על ידי דרגת החשיפה (טבלה 6.7). ככל שרוחב הסדק קטן יותר, המרחק בין מוטות הזיון יהיה קטן יותר. כלומר, אותה כמות ברזל תתבטא ברשת זיון צפופה יותר והקטנת גודל האגרגאט המקסימלי בבטון בהתאם. המרחק בין המוטות בבטון גבולי עם כמות ברזל גדולה בקוטר קטן, עלול להיות קטן מהמוצג בטבלה 6.7.

*מהנדס חגי שושני - חבר איגוד, תא קונסטרוקציה (מבנים), בעלים של חברת "GIC - יעוץ לתעשייה", יועץ בטון וקורוזיה לנתיבי ישראל, משהב"ט, האוניברסיטה העברית ועוד.

6.3.3. זיון מינימלי לסדקה

חתך הזיון האורכי המתוח המינימלי $A_{s,min}$ לריסון הסדקה ברכיבי בטון מזוין יעמוד בדרישות אלה לפחות:

(6.10) $\rho_{min} = 0.28 f_{ctm} / f_{sk}$ ברכיב הנתון בכפופה,

(6.11) $\rho_{min} = 0.70 f_{ctm} / f_{sk}$ ברכיב הנתון במתיחה צירית.

כנוסחות אלה:

- ρ_{min} - מנת הזיון המתוח המינימלי ביחס לחתך הדופן, $\rho_{min} = A_{s,min} / (b_t d)$
- f_{ctm} - החוזק הממוצע של הבטון במתיחה צירית (טבלה 3.9);
- b_t - רוחב ממוצע של הבטון באזור המתוח של החתך;
- f_{sk} - חוזק אופייני של פלדת הזיון (טבלה 3.13).

טבלה 3.9 - ערכי חוזק התכן בלחיצה ובמתיחה של בטון מזוין (מגפ"ס)

שורה	מצב גבולי	הסדרה	חוזק התכן	סוג הבטון					
				ב-60	ב-50	ב-40	ב-30	ב-25	ב-20
1	חרס	לחיצה	$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$	26.9	22.1	17.5	13.0	10.8	8.6
2		מתיחה צירית	$f_{ctk} \cong 0.168 f_{ck}^{2/3}$	2.65	2.27	1.94	1.63	1.40	1.20
3	שירות	מתיחה צירית ממוצעת	$f_{ctm} \cong 0.24 f_{ck}^{2/3}$	3.78	3.24	2.77	2.33	2.00	1.72

6. כמות הברזל: בסעיף 6.3.3. בתקן 466, מופיעות הנוסחאות לחישוב כמות הברזל לריסון הסדקה.

כמות הברזל תלויה לינארית (ישירות) בחוזק הבטון. כלומר: ככל שהבטון חזק יותר, כך צריך יותר ברזל על מנת לרסן את הסדקה. חוזק הבטון הדרוש הוא לרוב ב-30 או ב-40, אבל בחירה במענה גבולי לדרגות

בדרגות החשיפה הגבוהות, רוחב הסדק קטן (0.10 מ"מ).

אותה כמות ברזל תתבטא ביותר מוטות דקים ועליה בעבודת התפסנות

דרגת חשיפה	חוזק דרוש	בטון גבולי		בטון תפקודי	
		F _{ctm}	חוזק בפועל	F _{ctm}	חוזק בפועל
5-11	ב-30	3.78	ב-60	2.33	ב-30
	ב-40	3.78	ב-60	2.77	ב-40

טבלה 6.6 - קוטר מקסימלי של מוטות זיון מצולעים (להגבלת הסדקה)

המאמץ σ_s בפלדה במצב גבולי של שירות לאחר הסדקה (מגפ"ס)	קוטר המוט (מ"מ), עבור סדק ברוחב :			
	0.30 מ"מ	0.20 מ"מ	0.15 מ"מ	0.10 מ"מ
140 או פחות	36	28	18	14
160	32	25	16	12
180	28	20	14	10
200	25	16	12	8
220	22	14	10	7
240	20	12	8	6
260	18	10	6	5

טבלה 6.7 - מרחק מקסימלי של מוטות זיון מצולעים (להגבלת הסדקה)

המאמץ σ_s בפלדה במצב גבולי של שירות לאחר הסדקה (מגפ"ס)	המרחק המקסימלי בין מרכזי המוטות (מ"מ) כשהסדק המקסימלי הוא ברוחב :			
	0.30 מ"מ	0.20 מ"מ	0.15 מ"מ	0.10 מ"מ
160 או פחות	300	200	150	100
200	250	175	125	85
240	200	150	100	70
280	150	100	75	50