

חדשנות וטכנולוגיות מתקדמות באיטום הבטון

אחד האתגרים המרכזיים בענף הבנייה בישראל, מדינה שטופת שמש אך גם רוויית לחות, גשמים עזים ושינויי טמפרטורה קיצוניים, הוא נזילות במבנים חדשים וישנים כאחד. תופעה זו, שאינה רק מטרד אלא סכנה של ממש ליציבותם של המבנים, נובעת פעמים רבות מכשלים בתכנון וביצוע, וכן מהתעלמות ממאפייני הסביבה המקומית. הפתרון טמון בשילוב נכון של ידע הנדסי, תכנון קפדני ויישום טכנולוגיות מתקדמות בתחום הבטון ובפרט, בבטון אטום למים

מהנדס שי ברוקס*



מהו בטון אטום?

בטון אטום למים מתאפיין ביכולת גבוהה להתנגד לחדירת מים בזכות הרכב ייחודי. בניגוד לבטון רגיל, בטון זה מכיל כמויות מצומצמות של נקבוביות וחללים מיקרוסקופיים, רמת האטימות הגבוהה מתבטאת בערכי חדירות נמוכים במיוחד ונבחנת בהתאם לקריטריונים שנקבעו בתקנים הישראליים.

בטון אטום מושג באמצעות:

- יחס מים/צמנט נמוך (לרוב עד 0.45).
- שימוש בתוספים קריסטליים או פולימריים שיוצרים מערכת איטום פנימית.
- שילוב סיליקה פעילה שממלאת נקבוביות ומחזקת את המטריצה.
- תכנון של אגרגטים מדורגים ואיכותיים בצפיפות אופטימלית.

תכנון נכון = בטון עמיד לאורך זמן

הדרך להבטחת איטום איכותי מתחילה עוד לפני היציקה, בתכנון קפדני של תערובת הבטון, כולל התאמת סוג הצמנט, איכות האגרגטים ומינונם. גם אופן פיזור הזיון, עובי כיסוי הבטון, והגבלת רוחב סדקים בהתאם לדרגות החשיפה – כל אלו חייבים להילקח בחשבון.

תקן ישראלי 118

ת"י 118 נדרש לעבור רוויזיה מקיפה על מנת להתאים את דרישותיו לתקן האירופאי EN 1992-2, הנמצא כיום בשלבי אימוץ

תמונה מתוך יציקת מתקן התפלה, גליל מערבי

5.1.2. צמנט

הצמנט המשמש לייצור הבטון יתאים לתקן הישראלי ת"י 1.

צמנט שכיניו לפי חוק הלחיצה הוא 32.5 אסור לשימוש בבטון המיועד לרכיבים מבניים.

בתקן הישראלי ת"י 1 נדונים מינים רבים של צמנט. מביניהם מפורטים להלן מיני הצמנט שיש ניסיון בשימוש בהם בארץ:

- צמנט פורסלנד (CEM I)

- צמנט פורסלנד - טינים (CEM II/A-S), המכיל עד 10% טינים בלבד;

- צמנט פורסלנד - אפר פחם מרחף (CEM II/A-V, CEM II/A-W), המכיל עד 10% אפר פחם מרחף בלבד;

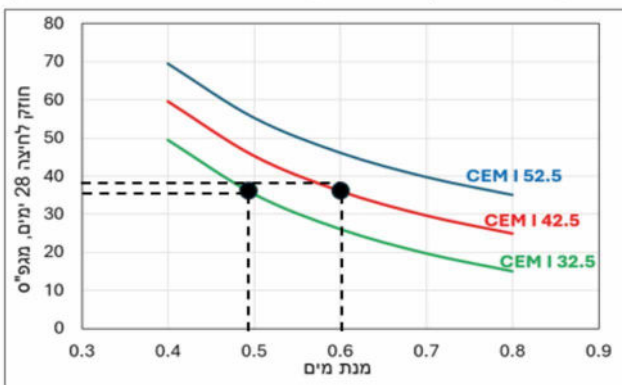
- צמנט פורסלנד - רב-מרכיבים (CEM III/A-S, CEM III/A-V), המכיל עד 10% אפר פחם מרחף ועד 10% טינים;

- צמנט טינים (CEM III/S) (השימוש בו ייעשה בהתאם להנחיות מתכנן שלד המבנה).

בשאר מיני הצמנט הנקובים ב-Table 1 שבתקן הישראלי ת"י 1 אין ניסיון בשימוש בארץ.

מתוך ת"י 118 - צמנטים מאושרים לשימוש

השפעת דרגת החוזק של הצמנט על מנת המים ותכולת הצמנט בבטון



סיווג צמנטים לפי התקן האירופאי EN 197-1

גרף מתוך ניסוי מעבדה - סוגי צמנטים שונים

23.01.03.04 בטון חבא במגע עם מים רגילים	בבטון חבא במגע עם מים רגילים, היחס המשקלי שביין כמות המים בתערובת (W) לבין כמות הצמנט (C) על בסיס אגרנט רזי יבש פנים לא יעלה על 0.5.
23.01.03.05 בטון חבא במגע עם מים	אם לא נאמר אחרת במפרט המיוחד, כמות הצמנט בבטון לא תהיה מעט יותר מ-400 ק"ג למ"ק.
	אם לא נאמר אחרת במפרט המיוחד, הבטון יתאים לדרישות עבור בטון ב-30.
	בבטון חבא במגע עם מים, יחס המים בצמנט בחישוב בסעיף 23.01.03.04 לעיל, לא יעלה על 0.4.
	אם לא נאמר אחרת במפרט המיוחד, כמות הצמנט בבטון לא תהיה מעט יותר מ-450 ק"ג למ"ק.
	בנוסף לאמור בת"י 466 חלק 1 ואם לא נאמר אחרת במפרט המיוחד, הבטון יתאים לדרישות עבור בטון ב-40.

מתוך המפרט הכללי פרק 23

מתקדמים. עם זאת, קיימת דחיפות מיידית לפרסום גיליון תיקון לת"י 118 עוד לפני ביצוע הרוויזיה הכוללת, וזאת על מנת לתת מענה לצורך הקריטי והדחוף בשילוב מיני צמנט נוספים במסגרת התקן.

בהתאם למגמות המקובלות במערך התקינה האירופאי, נדרש לעדכן את ת"י 118 בכמה היבטים מרכזיים, כפי שמפורט להלן:

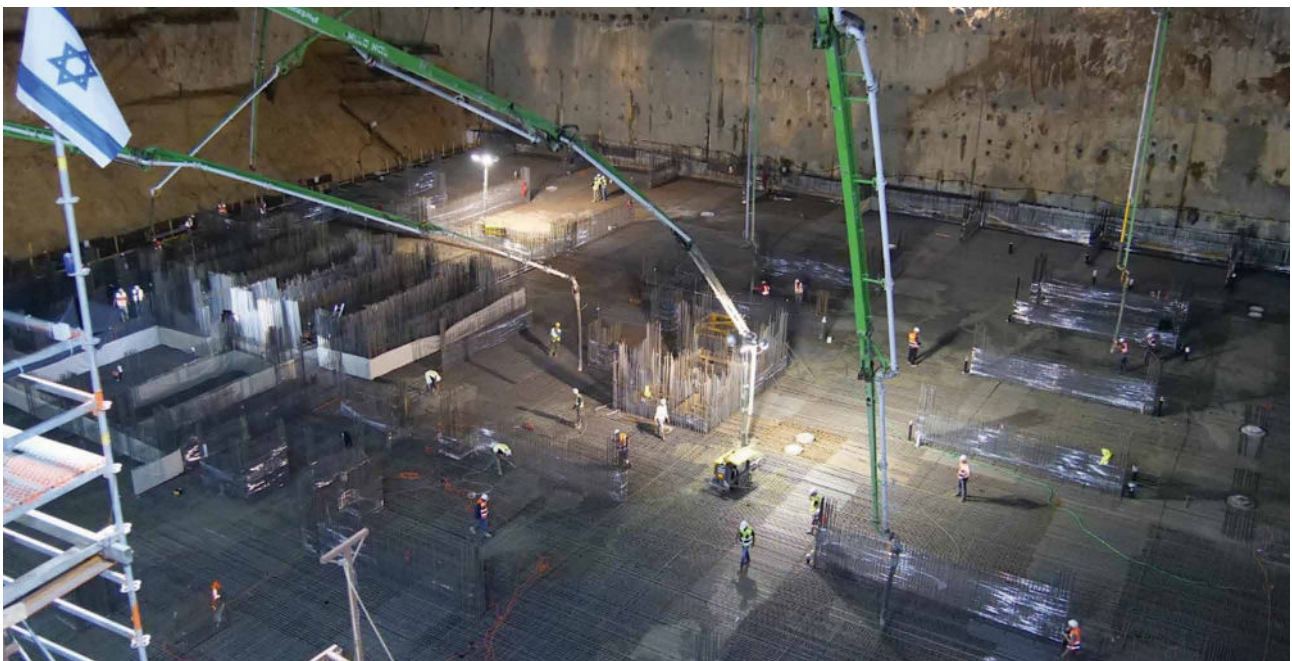
- לאפשר שימוש בצמנטים בעלי דרגת חוזק 32.5 – בהתאם למקובל באירופה.
- הרחבת ההגדרה של מיני הצמנט שמוגדרים כיום כ"מוכרים".
- ביטול מגבלות על תכולת אפר פחם וסיגים בצמנטים המוכרים.
- הסדרת השימוש בצמנט CEM III/B ללא צורך באישור פרטני.
- שילוב של מיני צמנט נוספים בת"י 118.
- דרישה לצמנט חסין סולפטים כדרישה לדרגות חשיפה 10 ו-11.

סוגי צמנטים נפוצים

צמנט הוא חומר מליטה הידראולי: חומר המתקשה ומתקיים במגע עם מים ואוויר. הצמנט מהווה חומר הדבקה בין חומרי הבנייה השונים למקשה אחת.

חדשנות באמצעות חומרים צמנטיים מגוונים

ענף הבנייה משתמש במגוון רחב של חומרים צמנטיים ותערובות בטון ליישומים קונסטרוקטיביים. מגמה זו נובעת מהצורך הגובר להתמודד עם אתגרי הקיימות והדרישות הסביבתיות שמציב ענף הבנייה.



יציקת MC CORE של חב' רדימיקס באתר מגדל אדגר, פוג'י, פתח תקווה

נקבוביות, מה שמפחית את הזחילה ומשפר את עמידות המבנה לאורך זמן.

מנגנון חדירות למים בבטון

יחס מים צמנט גבוה - ביחס מים/צמנט גבוה, הנקבים הקפילריים בבטון מחוברים זה לזה, דבר היוצר רשת מסועפת המאפשרת חדירות גבוהה של מים לתוך המבנה.

יחס מים צמנט נמוך - ביחס מים/צמנט נמוך הנקבים אינם רציפים ומבודדים זה מזה, דבר המונע מעבר מים ויוצר אטימות משמעותית לאורך זמן.

אחד הגורמים הקריטיים הוא יחס מים/צמנט:

- יחס גבוה = נקבים קפילריים מחוברים = חדירות גבוהה.
 - יחס נמוך = נקבים מבודדים = איטום אפקטיבי לאורך זמן.
- המפתח הוא לשמור על יחס מים/צמנט סביב 0.45 יחד עם תוספים ודירוג אופטימלי של אגרגטים.

דרגת חשיפה לפי תקן ישראלי 118

דרגת חשיפה מכתובה את יחס מים צמנט ומשפיעה על תכונות הבטון.



טבלה 118 - היחס המקסימלי מים:צמנט ותכולת הצמנט המינימלית בהתאם לדרגת החשיפה⁽¹⁾

דרגת חשיפה	תיאור תנאי הסביבה של המבנה או של רכיבי המבנה ⁽²⁾	יחס מקסימלי מים:צמנט	תכולת צמנט מינימלית ⁽³⁾ (ק"ג למ"ק)
1	רכיב פנים ב"אטמוספירה 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)		
4	רכיב חוץ		
5	סביבה ימית (מים התיכון)	0.55	270
6	כאשר $0.2 < R < 1$, עד גובה 30 מ' - חשוף לרוח מהים	0.45	
7	בנייה ימית (מים התיכון)	0.45	
8	באזור התחתון מים, או בתוך הים, בעומק גדול מ-2 מ'	0.45	320
9	סביבה או קרקע	0.50	270
10	אגרסיביות בינונית	0.45	
11	אגרסיביות חמורה (מחייב ציפוי מגן מפריד)	0.45	320

מתוך ת"י 118

חשיבות תכנון סוג הצמנט בתערובות הבטון

- פתרונות להפחתת חום - הפחתת כמות הצמנט בתערובות, בחירת צמנט עם חום הידרציה נמוך, שילוב מוספים מינרליים כגון אפר פחם, קירור מבוקר של הבטון הטרי והקשוי, תכנון יציקה בשלבים באלמנטים גדולים.
- גורמים משפיעים - סוג הצמנט ודקות הטחינה שלו, כמות הצמנט בתערובת, חתך האלמנט הנוצק, טמפרטורת הבטון בזמן היציקה וטמפרטורת הסביבה באתר.
- מנגנון החום - תהליך ההידרציה של הצמנט מביא לעליה בטמפרטורות הבטון, פני הבטון מתקררים במהירות בשל תופעות הצטמקות/התפשטות תרמית, והשינויים בטמפרטורה יכולים להוביל להתפתחות מאמצי מתיחה בבטון.

אגרגטים מינרליים וממקורות טבעיים

אגרגטים איכותיים מהווים את הבסיס לבטון עמיד ואטום. דירוג נכון וצפיפות גבוהה מובילים להפחתת נקבוביות ולשיפור התכונות המכניות והפיזיקליות של הבטון הקשוי.

הגורמים המשפיעים על הדירוג:

אטימות - איכות ודירוג האגרגטים משפיעים ישירות על אטימות הבטון.

סיווג וגודל - גודל הגרגר המקסימלי של אגרגט שווה לכינוי הנפה שרוב האגרגט עובר דרכה ושלא משתייר עליה יותר מ-15% מהאגרגט הנבדק.

מקור ואיכות האגרגט.

תרומה מבנית - אגרגטים מהווים את השלד המבני של הבטון ותורמים ליציבותו.

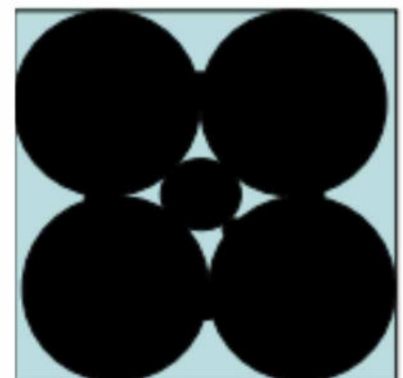
דירוג אופטימלי - דירוג נכון ממקדם את צפיפות האריזה ומקטין נקבוביות.

מנגנון הזחילה - מדוע הבטון "נוזל"?

תופעה המלווה במעבר מים מהנקבים הקטנים ביותר אל הגדולים יותר, מושפעת בעיקר מזחילת העיסה הצמנטית.

כיצד נקטין את תופעת ה"זחילה"?

- תכולת אגרגט גבוהה מובילה לתכולת עיסה נמוכה ולהקטנת הזחילה משמעותית.
- בטון עם אגרגטים איכותיים זוחל פחות מבטון עם אגרגטים נחותים באותו יחס מים-צמנט.
- תכנון נכון של מבנה הבטון והאגרגטים שלו מהווה גורם מכריע ביצירת בטון אטום.
- צפיפות גבוהה של האגרגטים יוצרת מטריצה חזקה עם מינימום



המבנה ה"אופטימלי" הוא המבנה הצפוף ביותר של האגרגט

- תכנון מותאם - התאמת תכנון המבנה לתנאי הסביבה הספציפיים וקביעת עובי כיסוי בטון נכון.
- יישום פתרונות - בחירת בטון אטום למים עם יחס מים/צמנט נמוך ותוספים מתאימים למניעת קורוזיה.
- שליטה ברוחב סדק - הגבלת רוחב הסדק בהתאם לדרגת החשיפה והתאמת עובי הכיסוי לדרישות התקן.

טבלה 6.14 - עובי מינימלי מוכתב של כיסוי הבטון c בהתחשב בתנאי הסביבה (א) (ב)

סוגי המבנה או הרכיב	יחס מים-צמנט מרבי (על בסיס אגרנט רווי יבש-פנים)	הפתחות				
		0.40	0.45	0.50	0.60	0.70
		קטן	0.39	מ-0.39	מ-0.39	מ-0.39
סוג הבטון לפחות f_{ct}	הפתחות	הפתחות				
		20-ב	25-ב	30-ב	40-ב	50-ב

על סמך חוות דעת של יועץ מומחה - ניתן להפחית מעובי הכיסוי באמצעות שימוש בבטון צפוף במיוחד, בצפיפות או במסוף, המקנים אטימות לבטון (הכול לפי מפרט היועץ)	7	8	9	10	11
אסור	אסור	אסור	אסור	אסור	אסור
אסור	אסור	אסור	אסור	אסור	אסור
אסור	אסור	אסור	אסור	אסור	אסור
אסור	אסור	אסור	אסור	אסור	אסור
אסור	אסור	אסור	אסור	אסור	אסור
אסור	אסור	אסור	אסור	אסור	אסור
אסור	אסור	אסור	אסור	אסור	אסור
אסור	אסור	אסור	אסור	אסור	אסור
אסור	אסור	אסור	אסור	אסור	אסור

מתוך ת"י 466 - עובי כיסוי - תלוי במענה לדרגת החשיפה

המפתח למניעת סדקים בבטון

- מדוע נוצרים סדקים? לבטון עמידות נמוכה למאמצי מתיחה. שינויים בנפח המלווים בריסון מובילים למאמצי מתיחה ולסדקים. יציאת מים מהנקבים הקפילריים, יוצרת לחצים פנימיים בעיסה הקשויה הגורמים להקטנת הנפח בהצטמקות. גורמים המשפיעים על סדיקה:
- תנאי טמפרטורה קיצוניים, רוחות, לחות נמוכה.
 - שטח פנים רחב החשוף לסביבה.
 - תכולת עיסת צמנט גבוהה בתערובת הבטון.
 - תכולת מים גבוהה ויחס מים/צמנט גבוה.
 - אפשרה לא מספקת או לא אחידה.



שימוש בתוסף קריסטלי מתוך פרויקט בשטח

תוספים כלי עזר - לא פתרון קסם

למרות הפופולריות של תוספים קריסטליים, יש לזכור שהם אינם פתרון קסם. לשימוש בתוספי איטום קריסטלים יש מספר מגבלות: הגבלות בתקן האירופי - על פי התקן האירופי EN-934-2, אין אפשרות להרחיב באופן אוטומטי את רוחב הסדק המותר רק בשל

הקשר בין צפיפות לקיים הבטון

חשיבות תכנון מקיף - שילוב נכון של כל האמצעים לשיפור קיימות הבטון, יחד עם תכנון מדויק של תערובת הבטון, מאפשר ליצור בטון אטום למים בעל עמידות גבוהה לאורך שנים, המתאים לתנאי הסביבה של הפרויקט.

אמצעים לשיפור קיים הבטון:

- זיון עמיד קורוזיה: פלדה מגולוונת, פלדת אל-חלד, ציפוי אפוקסי.
- מוספים לבטון: מוסף איטום קריסטלי, מעכבי קורוזיה, מוספים מרסני סדיקה.
- תוספים מינרליים: מיקרו סיליקה, אפר פחם, סיגים.

חשוב לזכור עיקרון מרכזי!

ככל שיחס מים צמנט נמוך החוזק של הבטון גבוה יותר, ככל שיחס מים צמנט עולה החדירות של הבטון עולה בצורה חדה.

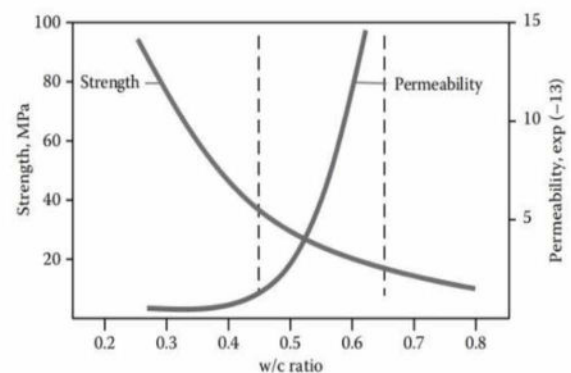


Figure 2.6 Effect of w/c ratio on strength and permeability.

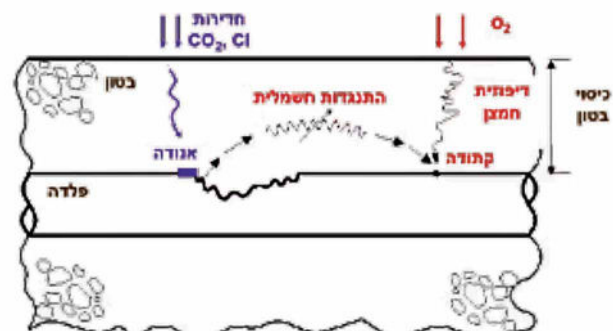
הגרף מדגים בצורה ברורה את החשיבות לבקרה על יחס מים צמנט בתכנון תערובת בטון כדי להגיע לאיזון בין חוזק בטון לעומק חדירות למים

מניעת קורוזיה וסדיקה - אתגר הנדסי ראשון במעלה

קורוזיה בפלדת הזיון מהווה אחת הסכנות המשמעותיות ליציבות מבני בטון מזוין. התכנון הנכון והיישום הקפדני של בטון אטום למים, יחד עם שליטה ברוחב הסדקים ועובי כיסוי מתאים, מהווים את קו ההגנה הראשון בפני התופעה המסוכנת.

טיפול נכון בקורוזיה:

- זיהוי הבעיה - קורוזיה מואצת של פלדת הזיון מובילה להגדלת נפח, סדקים בבטון והחלשת האלמנט המבני.



רוחב סדק - מוכתב על ידי דרגת החשיפה

כיצד נמנע סדקים? תכנון נכון של כמות הזיון ופיזורו, יחד עם בחירת תערובת בטון מתאימה ויישום שיטות אשפזה נאותות, מאפשרים שליטה ברוחב הסדק ובמיקומו. התקן מגדיר ערכים מקסימליים מותרים לרוחב סדק בהתאם לתנאי הסביבה ולדרגת החשיפה.

תכנון בטון אטום

בתכנון מבנה אטום קיימים שני היבטים שלובים המשפיעים ומושפעים זה מזה. הגישה האינטגרטיבית מחייבת התייחסות הן להיבטי הבטון עצמו והן להיבטי הזיון כמערכת אחת כוללת. רק תכנון מקיף המביא בחשבון את כל ההיבטים יוביל לקבלת מבנה אטום בעל עמידות גבוהה לאורך שנים.

בקרת איכות – המפתח להצלחה

בקרת איכות בתהליך הייצור והיציקה היא תנאי הכרחי להשגת בטון אטום:

- בדיקות איכות חומרי הגלם לפני הכנת התערובות: צמנט, אגרגטים, תוספים.
- מערכת מחשוב לשקילה וייצור אוטומטי.
- נטילות דגימות בטון טרי.
- בקרה על חוזק הבטון הקשוי – לפי התקן הישראלי.



הוספת תוסף קריסטלי לתערובת הבטון. מגבלות רוחב סדק - מחקרים מראים כי תוספים קריסטליים יעילים בעיקר בסדקים עד 0.4 מ"מ, אך יעילותם יורדת משמעותית בסדקים רחבים יותר וזאת בניגוד לטענות שיווקיות מסוימות. מנגנון פעולה - תוספים קריסטליים פועלים על ידי יצירת גבישים במבנה הנקבובי של הבטון, אך איטום זה מוגבל לסדקים מיקרוסקופיים בלבד, ואינו יכול לאטום סדקים רחבים. בדיקות התאמה - יש לבצע בדיקות מקיפות לפני השימוש בתוספים קריסטליים בפרויקטים מורכבים כדי לוודא את יעילותם בתנאי הפרויקט הספציפיים, ובשילוב עם שאר מרכיבי תערובת הבטון.

טבלה 6.5 - רוחב סדק מקסימלי בשל תנאי סביבה (המידות במילימטרים)

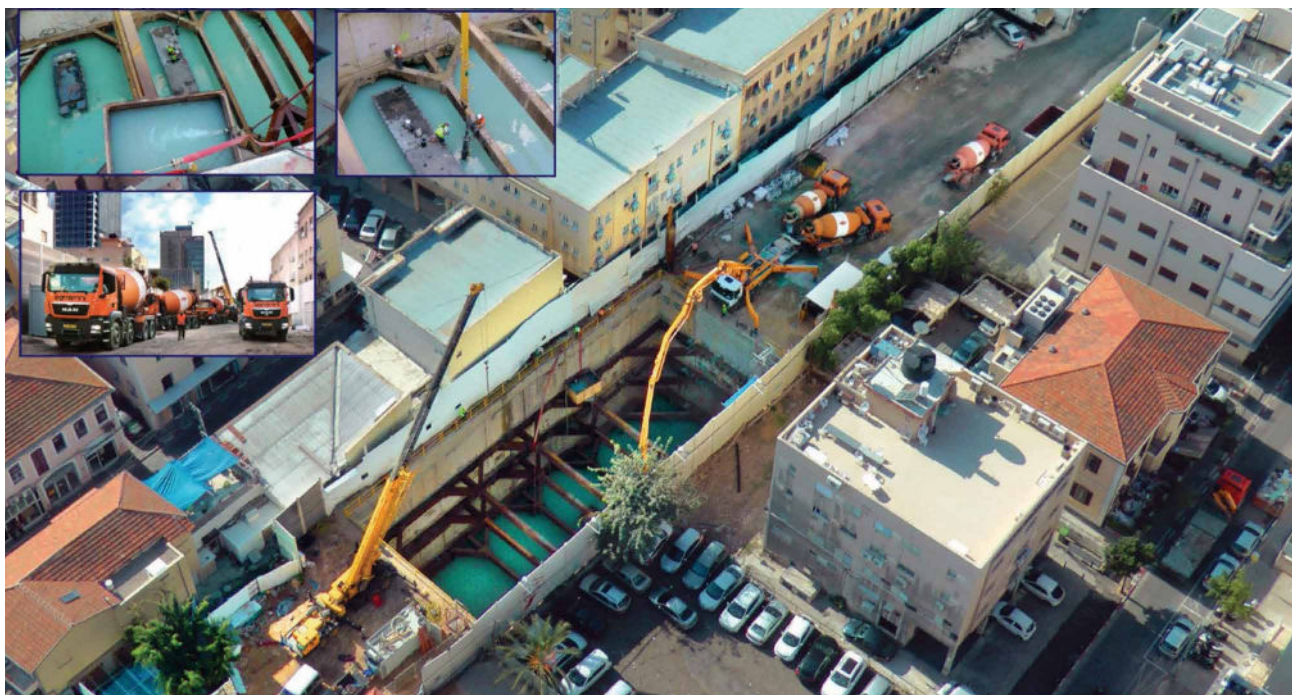
סוג המבנה או הרכיב (א)(ב)	רוחב הסדק המקסימלי ברכיב מבטון מזוין
1	0.30
2	0.30
3	0.20
4	0.20
5	0.15
6	0.10
7	0.10
8	0.10
9	0.15
10	0.10
11	0.10

הערות לטבלה:

(א) סיווג המבנים ורכיביהם הוא לפי סעיף 6.1.2.

(ב) רכיבים מבטון חשוף העומדים בתנאי לחץ מים ונדרשת אטימותם למים, יתוכננו לרוחב סדק רק עד 0.10 מ"מ.

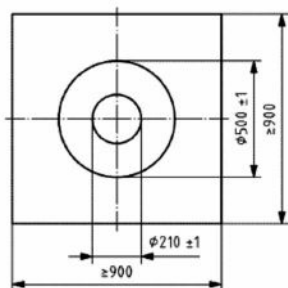
חתוך ת"י 466



שימוש במוצר WATER CONTROL של חב' רדימיקס, ביציקה מתחת למים, ברח' הרצל בתל אביב

טבלה 6 – דרגות סומך לפי דרגות חמיטה-זרימה	
דרגת הסומך	חמיטה-זרימה (א) ת"י 26 חלק 2.9 (מ"מ)
SF1	550 עד 650
SF2	660 עד 750
SF3	760 עד 850

מתוך ת"י 118



פלטת שירוע -
מתוך ת"י 26, חלק 2.9

חיסכון כלכלי לטווח הארוך

מניעת חדירות מים אינה רק עניין של נוחות אלא של יציבות וחיסכון. עלות שיקום נזקי קורוזיה עשויה להיות גבוהה פי עשרה מההשקעה בבטון אטום כבר בשלב התכנון והבנייה. בטון אטום הוא אם כן לא רק פתרון הנדסי – אלא גם החלטה כלכלית חכמה.

לסיכום: שילוב בין מדע, תכנון וביצוע

איטום בטון איכותי נשען על מספר יסודות מרכזיים:

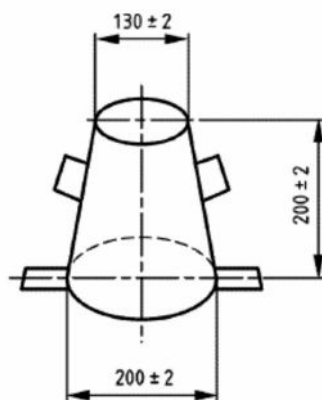
- תכנון הנדסי מקיף - מתכנון הבטון עצמו ועד לזיון המתאים אשר מחייב תשומת לב מיוחדת גם לטיפול בחיבורים בין אלמנטים אנכיים לאופקיים, ולהתאמת כמות הברזל ומיקומו כדי למנוע סדיקה.
- עמידה בתקנים - הקפדה על דרישות התקנים הישראליים והבינלאומיים ונהלי העבודה המקובלים. התכן לקיים בהתבסס על התקינה מאפשר תכנון מבנים לתנאי שירות מיוחדים, ומספק בסיס טוב לחדשנות טכנולוגית.
- ביצוע מקצועי - יישום נכון של כל שלבי העבודה, מההכנות הראשוניות ועד האשפפה הסופית, תחת פיקוח הדוק ותוך שימוש בחומרים איכותיים ומתאימים לדרישות הפרויקט.

***מהנדס שי ברוקס** - חבר איגוד, תא חומרים וקיימות, בעל תואר ראשון בהנדסה אזרחית ותואר שני בהנדסה כימית, עובד בקבוצת רדימיקס כ-25 שנה ומשמש כיום בתפקיד מנהל אגף הטכנולוגיה והבטחת איכות של החברה. חבר באגודה לייצרני בטון מובא ומשתתף בוועדות תקינה בתחום הבטון של מכון התקנים, מרצה בקורס לבקרי בטון.

קבוצת "תעשיות רדימיקס (ישראל) בע"מ" - אחת מהחברות המובילות בישראל בייצור ואספקת חומרי-גלם לתעשיית הבנייה. בנוסף לייצור בטון מובא, מייצרת הקבוצה טווח רחב ומגוון של חומרי גלם חיוניים לענף הבנייה והתשתיות.

טבלה 3 - דרגות סומך לפי בדיקת חמיטה		
דרגת הסומך	שקיעה	גבולות קבלה (מ"מ)
S1	25	±10
S2	50	±20
S3	75	±20
S4	100	±25
S5 (א)	125	±25
S6	150	±25
S7	175	±25
S8	200	±25

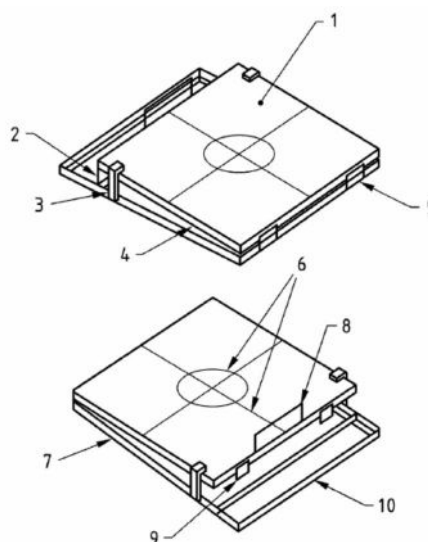
מתוך ת"י 118



קונוס - מתוך ת"י 26,
חלק 2.4

טבלה 5 – דרגות סומך לפי בדיקה בשולחן זרימה	
דרגת הסומך	קוטר זרימה ת"י 26 חלק 2.4 (מ"מ)
F1 (א)	340 ≥
F2	350 עד 410
F3	420 עד 480
F4	490 עד 550
F5	560 עד 620
F6 (א)	630 ≤

מתוך ת"י 118



שולחן שירוע -
מתוך ת"י 26,
חלק 2.4