

קביעת קריטריונים לבדיקת יעילות האשפורה של בטון במבנה
ד"ר רינה ווסרמן, פרופ' ארנון בנטור

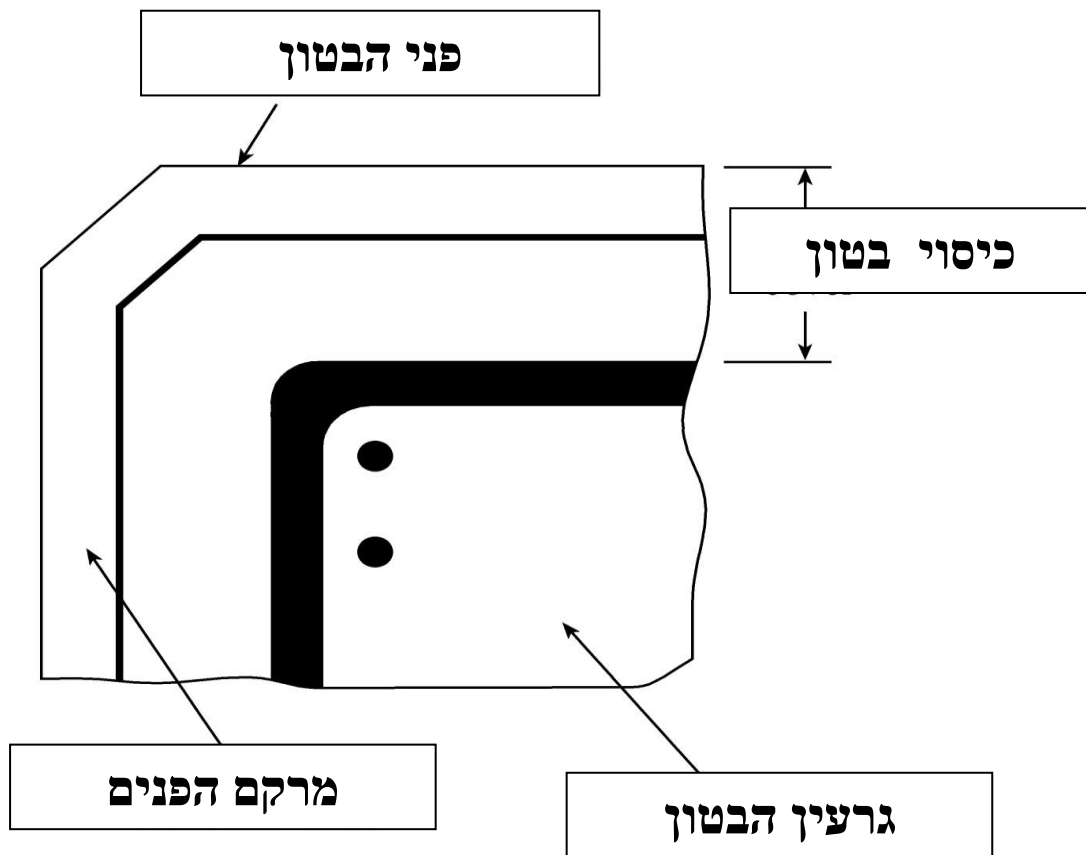
1. מבוא

בשנים האחרונות גברה המודעות לצורך לתכנן ולבצע מבנים מבטון מזוין תוך שמבטיחים גם את תפקודם לזמן ארוך, בעיקר בהיבטים הקשורים לקורוזיה של הפלדה בבטון. המודעות לנושא זה תופסת כיום מקום חשוב בכל תחומי הבטון המזוין [1,2] וזאת משום שמסתבר שכמות המשאבים המושקעת בשיפוץ ובתיקון מבנים שעברו קורוזיה הנה משמעותית ביותר, והנזקים שנגרמים הנם גדולים יותר מאלה שהם תוצאה של אי-יציבות מבנים.

על רקע זה נדרשים היום המהנדסים המתכננים, וגם אלה המופקדים על הביצוע, להיות אחראים על תפקוד הבניין לאורך זמן. מבחינת תהליכי בלייה, אשר בהם יש סיכון בטיחותי, בולטת הבעיה של קורוזיה של פלדה בבטון, הנחשבת כיום כ"בעיה מס' 1" בקיים של מערכות בטון מזוין בעולם. למרות שבצד התיאורטי קיימים הידע והכלים להבטיח תכנון וביצוע נכון כדי להתמודד עם סוגייה זו, הרי בפועל התוצאות הן מאכזבות, ואנו רואים זאת גם בארץ. הפער בין הידע ובין התוצר הוא בחלקו תוצאה של העדר מודעות מספקת אצל המתכננים והמבצעים, דבר הדורש טיפול באמצעות הנחיות, הדרכה, השתלמויות וכד'. לכך מצטרף עוד קושי, במישור ההנדסי-מדעי, הקשור בהתייחסות פשטנית מדי למערכת, כמפורט להלן.

בגישה ה"קונבנציונלית" המקובלת, ההתייחסות לבטון היא כאל מסה בעלת תכונות אחידות אשר חוזק הלחיצה מהווה אמד טוב לתכונותיה, הן המכניות והן אלה הקשורות לקיים, מאחר ובטון חזק יותר הוא גם צפוף יותר ופחות חדיר לגורמים מזיקים. גישה זו נכונה בקירוב ראשון, אך בתנאים מסוימים היא פשטנית מדי, במיוחד בכל הקשור לקורוזיה של הפלדה בבטון. במקרה זה, יש לתת את הדעת לכך שהפלדה ממוקמת קרוב לפני הבטון (בעומק של כ- 30 מ"מ) ושתכונות הבטון קרוב לפניו אינן זהות לאלה הנמצאות עמוק יותר ב"גרעין הבטון". תאור גרפי להיבטים אלה ניתן בצירוף 1.1 אשר בו מוגדר גם המושג "מרקם פנים" הידוע במספר כינויים באנגלית, כגון: cover-crete concrete skin. מונחים אלה מתארים את שכבת הבטון העליונה אשר בה התכונות שונות מאלה של גרעין הבטון. מצב הרטיבות בשכבה חיצונית זו שונה מהפנימית, ועל כן תהליכי ההידרציה, והפועל היוצא של התכונות המתפתחות בה, יכול להיות שונה במידה ניכרת מתכונות הגרעין. לאחר גמר האשפרה ברטוב (ומדובר על אשפרה רציפה במים), הבטון מתחיל להתייבש. המים הנמצאים ב"מרקם הפנים" יכולים לצאת בקצב גדול יחסית, בעוד שקצב איבוד הרטיבות מה"גרעין" בעומק מספר סנטימטרים מפני הבטון יכול להיות איטי, כי על המים לעבור דרך השכבה החיצונית. בפועל מתקבל לעתים מצב שבו הגרעין למעשה נשאר רטוב בעוד שמרקם הפנים יבש. כתוצאה מכך מתקבל "גרדיינט" במבנה הפנימי, והוא צפוף וחזק יותר בגרעין. מבחינת התכונות המכניות, הגרעין הוא החלק החשוב יותר, בעוד שמבחינת ההגנה על הפלדה דווקא "מרקם הפנים" הוא הרלוונטי. כך, יכול להיווצר מצב "פרדוקסלי" אשר בו אומדן טיב הבטון במבנה ע"י קידוחי גלילים יראה שאכות הבטון היא טובה (על כל המשתמע מכך לגבי הערכה בדיעבד של טיב הבטון וטיב האשפרה) וזאת משום שהחוזק תלוי בתכונות של מסה שנקדחה לעומק של כ- 150 מ"מ והשכבה העליונה הוסרה ממנה, בעוד שתכונות מרקם הפנים

יהיו ירודות, למרות שמדובר בבטון שנוצק במהלך אחד מאותו חומר, הן בגרעין והן במרקם הפנים.



ציור 1.1. תאור סכמתי של פני הבטון והגדרות דל עובי כיסוי, מרקם פנים וגרעין הבטון.

ההפרש בין תכונות הבטון באזור החיצוני ("מרקם הפנים") ובין האזור הפנימי ("גרעין הבטון") רגיש מאד לתנאי האשפחה והאקלים, ובמובן מסוים בתנאים בישראל ההפרשים יכולים להיות חריפים במיוחד. בארץ תנאי האקלים הם חמים/יבשים, ועל כן השכבה החיצונית יכולה להתייבש מהר בעוד שהגרעין נשאר רטוב. כתוצאה מכך יכולה להתהוות כאן שכבה של מרקם פנים אשר תכונותיה ירודות בהרבה מהגרעין, ומגרעת זו לא תבוא לידי ביטוי באומדני החוזק השונים. הפרשים אלה בתכונות יהיו יותר גדולים מאלה הקיימים למשל באירופה, אשר שם האקלים לח יותר, גם בתקופת הקיץ. התופעה בארץ אף יכולה להיות חמורה יותר וזאת פועל יוצא של שיטת האשפחה המקובלת של התזת הבטון במים מספר פעמים ביום. התזה זו, במיוחד בימים חמים, מאפשרת אולי לשמור את הגרעין במצב רטיבות תמידי, אך בוודאי לא את שכבת מרקם הפנים. כתוצאה מכך שהשכבה החיצונית תמצא במצב יבש חלקי (בין "ההרטבות") כבר בתחילת דרכה ודווקא בתקופה שנוכחות רציפה של רטיבות הנה הכרחית. בהקשר זה מן הראוי לציין שבמפרטים השונים בארץ נדרשת אשפחה ברטוב במהלך כל השבוע הראשון, ותהליך ההתזה המקובל אינו עונה לדרישה זו.

כדי להתמודד עם סוגיות אלה, יש צורך לפתח כלים אשר יאפשרו את הכימות של תכונות מרקם הפנים, הן בהיבט של קביעת פרמטרים לאפיון התכונות כדי לתת דרישות במפרטים, והן באשר לפיתוח שיטות בדיקה אשר יאפשרו בקרה בשטח ויהוו גם כלי לאומדן היעילות של טכנולוגיות חדשות המיועדות לשיפור תפקוד מרקם הפנים.

על רקע זה התפתחה בשנים האחרונות פעילות מחקר [3-9] לקדם שיטות בדיקה לאפיון תכונות מרקם הפנים. חלק קטן מהן אף שולב בתקינה, וחלק אף פותח לכדי מכשירים מסחריים, אשר למרות שאין עבורם גיבוי תקני, הם משמשים רשויות שונות ומומחים. למרות הפעילות הענפה, נושא זה נמצא עדיין בתחילת דרכו, בכל הקשור לבדיקות עצמן ולאינטרפרטציה שלהן.

במסגרת המחקר הנוכחי ייבחן הנושא בהקשר של תנאי הארץ, הן לגבי ההשפעות של הרכב הבטון ואשפרתו על טיב מרקם הפנים והמשמעויות לגבי מחזור החיים, והן בהיבט של בחינה של מכשור קיים והאפשרויות ליישם אותו בארץ, ואולי אף לשלבו בתקינה. בדיקות מסוג זה וקביעת קריטריונים לנושא הקיים ואיכות מרקם הפנים בהקשר לתפקוד לזמן ארוך.

2. מכשור לאפיון איכות מרקם הפנים

בשנים האחרונות פותחו מספר שיטות בדיקה לטיב מרקם הפנים בבטון ('covercrete').

כל השיטות הנ"ל מבוססות על קביעת חדירת חומרים שונים אל תוך הבטון, במנגנונים מגוונים :

- א. חדירת אוויר וגזים אחרים ;
- ב. חדירת מים בלחץ אן במנגנון של ספיגה קפילרית ;
- ג. דיפוזיה ומעבר יונים, מטען חשמלי וחום.

מבחינת אופן הביצוע שלהן ניתן להבדיל בין שיטות בדיקה שהן מעבדתיות בלבד, ואלה שניתן להשתמש בהן הן במעבדה והן באתר.

מבחינת הנזק האפשרי שהשיטות גורמות לבטון ניתן להבדיל בין :

- שיטות בדיקה שמופעלות על פני השטח של בטון (בדיקות ללא הרס) ;
- שיטות חודרניות (בדיקות הרסניות) או הרסניות מינימליות אשר דורשות ביצוע קידוחים במרקם הפנים של הבטון.

להלן ניתן תיאור שיטות הבדיקה בהתבסס על הספרות המקצועית.

2.1 חדירת אוויר וגזים אחרים

בספרות המקצועית מתוארות ארבע שיטות בדיקה אשר מופעלות על פני שטח וחמש שיטות בדיקה חודרניות. כל השיטות מבוססות על אותו העיקרון הבסיסי, דהיינו : יצירת לחץ יתר (overpressure) או תת לחץ (underpressure) בתוך תא אטום אשר נמצא במגע עם מרקם הפנים של בטון ומדידת קצב החזרה ללחץ האטמוספירי בתא. בדיקה זו מבוססת על כך שנמצא קשר ישיר בין קצב השתוות הלחצים בתא וחדירות הבטון, דהיינו : בטונים בעלי נקבוביות יותר גדולה או נקבים יותר גדולים יראו קצב יותר גבוה של שינוי הלחץ בתא. אלה הם בטונים באכות נחותה מההיבט התפקודי שלהם. מאידך, חשוב לציין שבבטונים באיכות נחותה אבל עם תכולת רטיבות גבוהה יתקבלו ערכים נמוכים של חדירות אוויר או גזים, וגורם לא מקצועי יכול בטעות לפרש תוצאות כאלה כבטון בעל אכות מרקם פנים גבוהה.

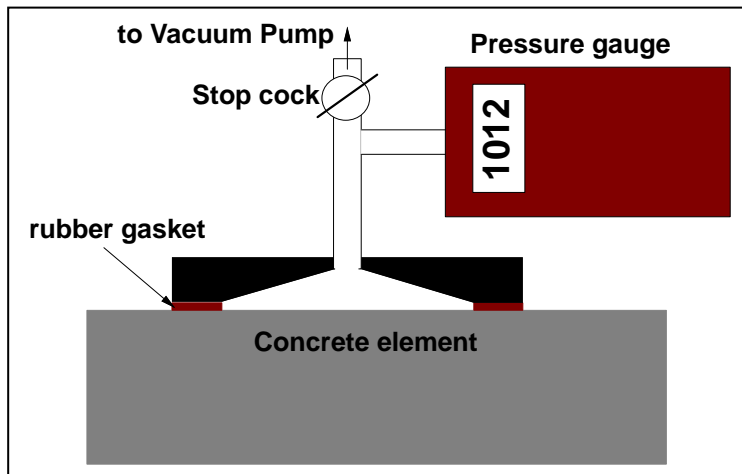
2.1.1 בדיקות ללא הרס

א. שיטת Schönlin

שיטה זו פותחה באופן בלתי תלוי ובו-זמנית בגרמניה ובצרפת [9]. כיום מיצרים בגרמניה מכשיר מסחרי אשר מבוסס על עיקרון שיטה זו.

השיטה כוללת ייבוש פני בטון, הרכבת תא עם אביזר אוטם מגומי (rubber gasket) על פני הבטון והפעלת ווקואום בתוך התא (ציור 2.1). בבדיקה מודדים את הזמן אשר נדרש לעליית הלחץ בתא מ-50 מיליבאר עד ל-300 מיליבאר. במקרה של בטונים צפופים במיוחד רושמים מהו שינוי הלחצים אחרי 120 שניות. היתרון של שיטת Schönlin הוא קצב הביצוע הגבוה : בודק בודד עשוי לבצע בדיקה אחת בכ-3 דקות. החסרון השיטה נובע מרגישותה הגבוהה לתכולת הרטיבות במרקם הפנים של הבטון ('covercrete'). ליקוי נוסף של השיטה נובע מהערכת יתר (overestimating) של חדירות שכבות עליונות של מרקם פנים אשר נגרמת ע"י נשיפת יתר של

אוויר בתוך התא או ע"י "העור" ('skin') העליון הנקבובי של הבטון אשר עלול להיווצר בעת הריטוט והחלקת הבטון באלמנט.



צור 2.1. תאור עקרוני של שיטת Schönlin

מדידות אלה מאפשרות לחשב את מדד (index) החדירות M:

$$M = \frac{P_1 - P_0}{t_1 - t_0} \cdot \frac{V_c}{P_a} \cdot \frac{l}{P_a - \frac{P_1 + P_0}{2}} \quad (2.1)$$

כאשר

M – מדד חדירות, מ"ק לשנייה למיליבאר;

P_a – לחץ אטמוספירי, מיליבאר;

P_0 – לחץ התחלתי בתא, מיליבאר, בזמן t_0 , שניות;

P_1 – לחץ סופי בתא, מיליבאר, בזמן t_1 , שניות;

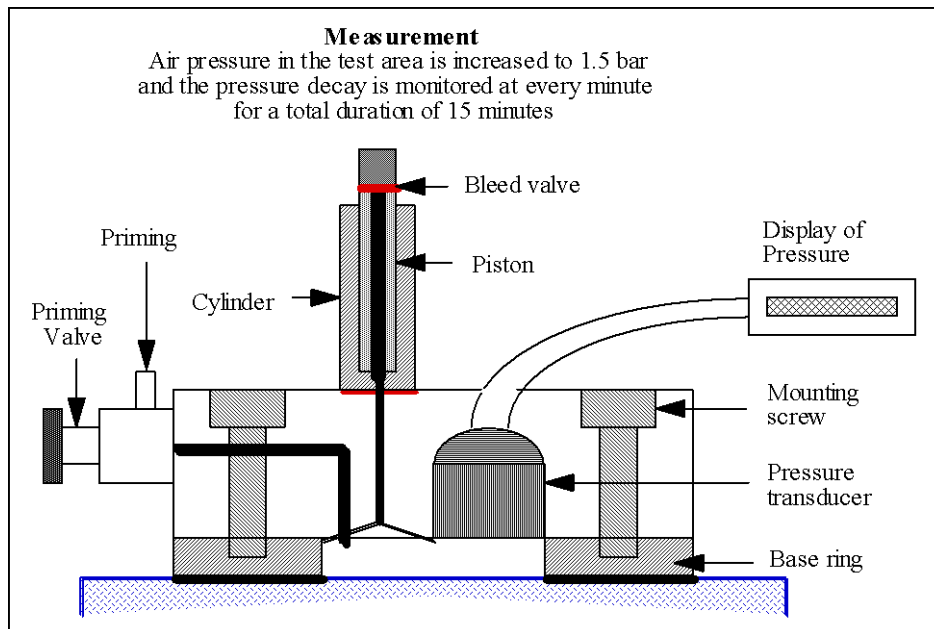
V_c – נפח התא והאביזרים, מ"ק.

שיטת Schönlin רגישה מאוד לשינויים בכל המשתנים אשר עשויים להשפיע על מבנה הנקבים, דהיינו: יחס מים לצמנט, משך תקופת האשפחה הרטובה, טמפרטורת האשפחה, סוג הצמנט וכו'. ככל שהיחס מים/צמנט יותר קטן ותקופת האשפחה ברטוב תהיה יותר ארוכה, יהיה מדד החדירות קטן יותר [10].

ב. שיטה 'Autoclam permeability system' (APS)

שיטה זו פותחה באנגליה [11-12]. Autoclam הוא שם המכשיר המיועד למדידת ספיגת מים וחדירת אוויר ומים בבטון או בחומרים נקבוביים אחרים הן באתר והן במעבדה (ציור 2.2). לאחר עליית הלחץ במכשיר לקצת יותר מ-0.5 באר מתבצע מעקב אחרי ירידת הלחץ כל דקה במשך 15 דקות או עד שהלחץ ירד לאפס. הקשר בין לוגריתם טבעי של חדירת האוויר כנגד הזמן הוא קשר ליניארי. תוצאת המדידה היא מדד חדירת אוויר, ביחידות של $(\text{bar}/\text{min})\ln$ אשר שווה לשיפוע של עקום הרגרסיה הליניארית בין הדקה ה-5 והדקה ה-15. במקרה שהלחץ בתא ירד עד לאפס לפני 15 דקות, משתמשים בכל הנתונים לקביעת שיפוע העקום.

משך ביצוע הבדיקה הוא רבע שעה לא כולל זמן הדבקת הטבעת אל פני הבטון וזמן הרכבת המערכת. בסה"כ בודק מקצועי עשוי לבצע עד כ-10 בדיקות ביום באמצעות מכשיר APS. שיטה זו מאופיינת בקורלציה טובה בין מדד חדירת האוויר ועומק הקרבונציה של הבטונים [13].



ציור 2.2. סקיצה של בדיקת חדירת אוויר באמצעות APS

ג. שיטת Torrent למדידת חדירות ('Torrent Permeability Tester')

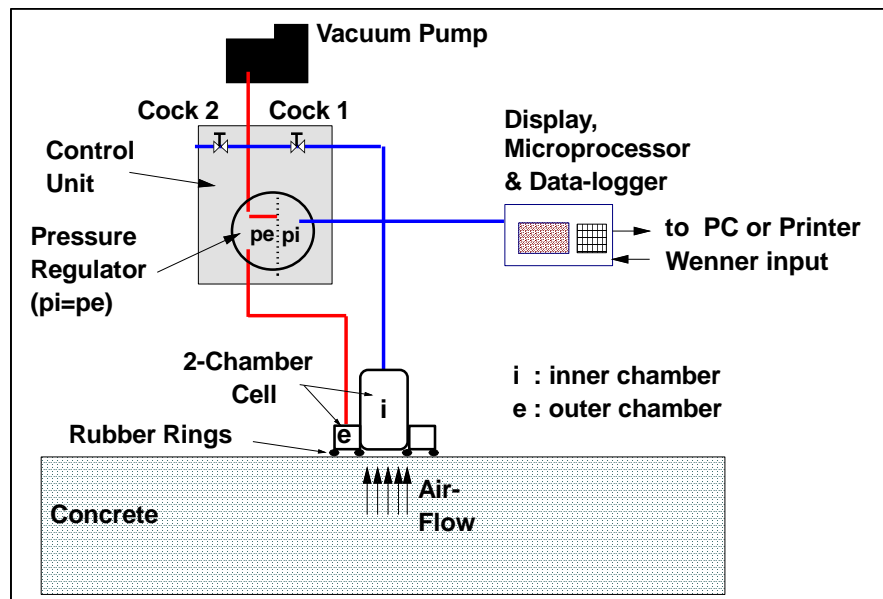
שיטה זו פותחה בשוויץ [8].

המכשיר כולל יחידת שאיבה עם שני תאים (two-chamber vacuum cell) ווסת (regulator) המיועד להשוואת לחצים בתא פנימי (התא המודד) ובתא החיצוני (טבעת הגנה-guard ring),

ציור 2.3

מהלך ביצוע הבדיקה הוא, כדלקמן:

1. הרכבת יחידת השאיבה על פני הבטון והפעלת ווקואום בשני התאים באמצעות המשאבה;
2. הלחץ האטמוספירי החיצוני וטבעות הגומי דוחקים את יחידת השאיבה אל פני הבטון ובכך נאטמים שני התאים וגורמים ליחידת השאיבה להחזיק את עצמה על פני האלמנט הנבדק, ללא צורך בהדבקה (ציור 2.4);
3. כעבור דקה נסגר ברז מס' 1 אשר מבודד את מערכת התא הפנימי. החל מרגע זה הלחץ בתא הפנימי הולך וגדל כתוצאה משאיבת האוויר מבטון;
4. משאבת ווקואום ממשיכה לפעול בתא החיצוני. ווסת הלחץ של המערכת מבטיח שהלחצים בתאים החיצוני והפנימי יהיו תמיד שווים.
5. התא חיצוני פועל כ"טבעת מגן" אשר יוצרת בתא הפנימי תנאים כאלה כך שהאוויר זורם באופן חד כיווני מבוקר. זרימת האוויר החד כיוונית מאפשרת לחשב את מקדם חדירת האוויר, kT , מ"ר.
6. בדיקת החדירות באמצעות מכשיר Torrent מסתיימת כאשר הלחץ בתא הפנימי מגיע ל-20 מיליבאר. משך ביצוע הבדיקה הינו כ-1.5 עד 12 דקות, במקרה של בטונים צפופים במיוחד.



ציור 2.3. תאור עקרוני של מכשיר חדירות האוויר מסוג Torrent

שיטת Torrent היא שיטת בדיקה לא הרסנית ובתום ביצוע הבדיקה לא נשארים סימנים על פני הבטון. יתרה מכך, ביישומה אין צורך בכל פעולת הדבקה. לכן בדיקה זו מתאימה לשימוש הן במעבדה והן באתר.



ציור 2.4. צילום של הבדיקה באמצעות מכשיר Torrent

החישוב של מקדם החדירות לאוויר מבוסס על המודל התיאורטי המתואר ב-[8, 14]:

$$kT = \left(\frac{V_c}{A_c} \right)^2 \cdot \frac{\mu}{2 \cdot \varepsilon \cdot P_a} \cdot \left[\frac{\ln \left(\frac{P_a + P}{P_a - P} \cdot \frac{P_a - P_0}{P_a + P_0} \right)}{\sqrt{t} - \sqrt{t_0}} \right] \quad (2.2)$$

כאשר:

kT – מקדם חדירת לאוויר, מ"ר;

μ – צמיגות דינמית של האוויר, ניוטון בשנייה למ"ר;

V_c – הנפח של התא הפנימי, מ"ק;

ε – הנקבוביות הפתוחה של הבטון, מ"ק/מ"ק;

A_c – שטח החתך של התא הפנימי, מ"ר ;

P_a – לחץ אטמוספירי, ניוטון למ"ר ;

t – זמן, שניות ;

t_0 – זמן הסגירה של ברז מס' 1, 60 שניות ;

P – לחץ בתא הפנימי בזמן t , ניוטון למ"ר ;

P_0 – לחץ בתא הפנימי בזמן t_0 , ניוטון למ"ר

כדי לבצע את החישוב לפי הנוסחה לעיל חשוב לדעת את הנקבוביות הפתוחה של בטון, ε . בשיטת Torrent ההנחה היא ש- $\varepsilon = 0.15$. כאשר נקבוביות הבטון ידועה בפועל, אזי ניתן לתקן את kT לפי הנוסחה לעיל. בתוך מרקם הפנים העובי "הרגיש" L , מ', לבדיקת החדירות לפי מודל Torrent, הוא כ-10 עד 100 מ"מ לבטונים בעלי תפקוד גבוה או נמוך, בהתאמה. מקדם החדירות kT משמש לסיווג הבטונים לפי איכות מרקם הפנים שלהם, טבלה 2.1, [8, 14]:

טבלה 2.1: סיווג הבטונים לפי מקדם חדירת האוויר kT

אינדקס של איכות מרקם הפנים	1	2	3	4	5
איכות	מעולה	טובה מאוד	סבירה	נחותה	גרועה
מקדם חדירת אוויר, $kT \cdot 10^{-16}$, מ"ר	פחות מ-0.01	מ-0.01 עד 0.1	מ-0.1 עד 1	מ-1 עד 10	מעל 10

בשיטת Torrent נעשה מאמץ להביא בחשבון את ההשפעה של מצב רטיבות הבטונים על החדירות לאוויר. מצב הרטיבות של מרקם הפנים בבטון נקבע בעקיפין ע"י מדידת ההתנגדות החשמלית, ρ [$k\Omega\text{cm}$], באמצעות שיטת Wenner [15]. המדידה נעשית באמצעות מכשיר עזר Wenner probe אשר במגע עם פני הבטון יוצר זרם חשמלי בין שתי האלקטרודות החיצוניות. בבדיקה נמדדת נפילת הפוטנציאל בין שתי האלקטרודות הפנימיות של מכשיר עזר probe Wenner. ידוע שלבטון במצב יבש חדירות לאוויר הרבה יותר גדולה מאשר לאותו הבטון במצב רטוב. לכן בבדיקה באמצעות מכשיר Torrent עלול בטון יבש לקבל דרגת איכות יותר נמוכה מאשר ייקבע בבדיקת Torrent לגבי אותו הבטון כאשר הוא במצב רטוב. הבדיקות שנערכו עם מכשיר Torrent במכון הלאומי לחקר הבנייה ודווחו ב-[16] הראו שבטון אשר במצב יבש מאוד קיבל דרגת איכות נחותה נתן במצב רטוב תוצאות המסווגות אותו לכאורה כבעל איכות סבירה (אינדקס של איכות מרקם הפנים של 4 ו-3, בהתאמה), [16].

דווח ששיטת Torrent מאופיינת בהדירות טובה (repeatability). מקדם השוני הממוצע בשיטה זו הוא כ-6.6%.

ב-[17] נדונה ההשפעה של פלדת הזיון על תוצאות המדידה בשיטת Torrent כאשר מרקם הפנים היה בעובי של 20 מ"מ לפחות. נמצא שהיא זניחה.

קורלציה טובה נמצאה בין מקדם חדירות לאוויר הנמדד בשיטת Torrent לבין הספיגה הקפילרית של בטונים [9]. כמו כן נמצאה התאמה טובה בין מקדם החדירות לאוויר kT הנמדד בבטון בגיל של 28 ימים לבין :

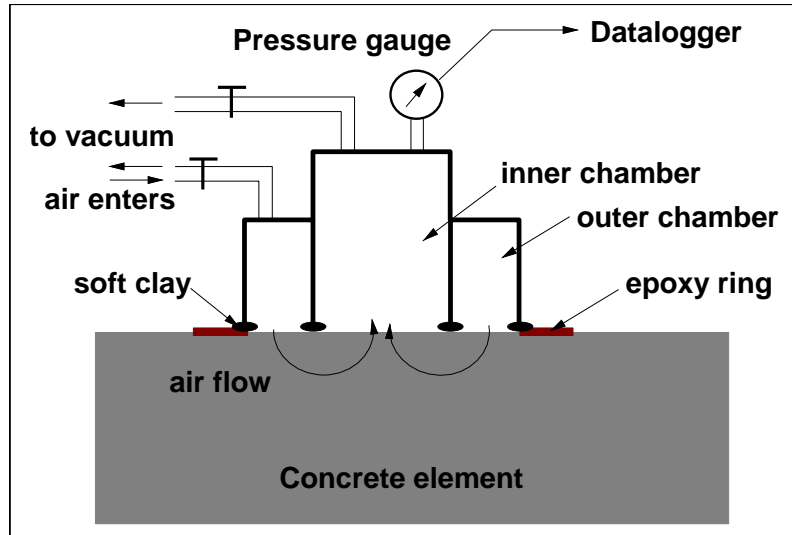
- עומק הקרבונציה באותו הבטון בגיל של 500 ימים הנמדד באמצעות פנולפתלאין ;
- חדירות כלורידים הנמדדת לפי השיטה המקובלת בתקן האמריקאי ASTM C 1202.

ד. שיטת Zia-Guth

שיטה זו אשר פותחה לאחרונה והיא משמשת לקביעת חדירת אוויר בבטון באמצעות זרימת האוויר בפני השטח של הבטון [18]. מכשיר המדידה בנוי משני תאים בצורת גלילים קונצנטריים (ציור 2.5). ברגע שבשני התאים יושג ווקואום מכניסים אוויר לתא החיצוני. האוויר חודר דרך הבטון הנבדק לתא הפנימי. קצב עליית הלחץ בתא פנימי נמדד ונרשם. זוהי בדיקה לא הרסנית. חסרון השיטה הוא הצורך בדבק אפוקסי להדבקה לפני הבטון על כל המשתמע מכך מבחינת העבודה והכתמת פני הבטון. לפי שיטת Zia-Guth ניתן לסווג את הבטונים לשלוש קבוצות (בטבלה 2.2).

טבלה 2.2: סיווג בטונים לפי שיטת Zia-Guth

סוג בטון	סוג A	סוג B	סוג C
מקדם חדירת אוויר, [10 ⁻¹⁶ מ"ר]	< 3	3 - 6	> 6



ציור 2.5. תאור עקרוני של שיטת Zia-Guth

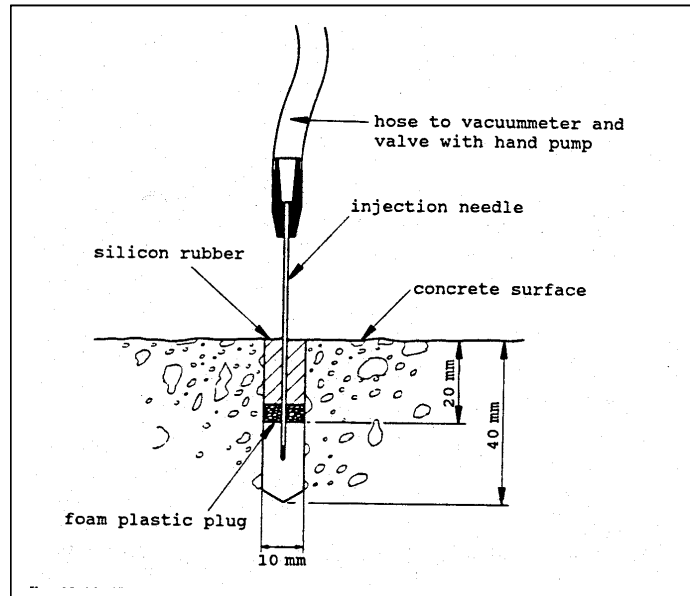
2.1.2 בדיקות הרסניות

א. שיטת פורוסקופ (poroscope)

שיטה זו פותחה באנגליה [19]. ביצוע השיטה כולל:

- קידוח של חור קטן בבטון (קוטר - 10 מ"מ, עומק של 40 מ"מ);
- סגירת החור בפקק עשוי מסיליקון. הפקק המחובר לתא גלילי באורך של 20 מ"מ (ציור 2.6);
- הכנסת מחט מזרק אל תוך התא. המחט מחוברת עם משאבת ווקואום ידנית;
- הפעלת הווקואום בתוך התא;
- מעקב אחרי משך הזמן הנדרש לעליית הלחץ המוחלט בתא מ-45 KPa עד ל-50 KPa.

בבדיקה נמדד זמן פורוסקופ אשר קשור ביחס הפוך לחדירות הבטון שמסביב לחור. משך הבדיקה נע בין כדקה אחת לבטון נקבובי מאוד עד ל-30 דקות לבטון צפוף מאוד. על מנת לקבל תוצאות אמינות מומלץ לבצע מדידות ב-6 חורים באותו האזור. מקדם השוני הממוצע בבדיקה זו הוא כ-13.2%. בטבלה 2.3 ניתן סיווג בטונים לפי שיטת פורוסקופ.



ציור 2.6. תאור עקרוני של שיטת פורוסקופ

טבלה 2.3: אפיון של אכות מרקם הפנים של בטון לפי זמן פורוסקופ

סימון הטיב	0	1	2	3	4
זמן פורוסקופ, שניות	< 30	100 - 30	300 - 100	1000 - 300	> 1000
איכות הבטון	נחותה	בינוני	סבירה	טובה	מעולה
סוג החומר	מלט נקבובי	בטון ב-20	בטון ב-30 עד ב-50	בטון צפוף, מאושפר טוב	בטון פולימרי

ב. שיטת TUD

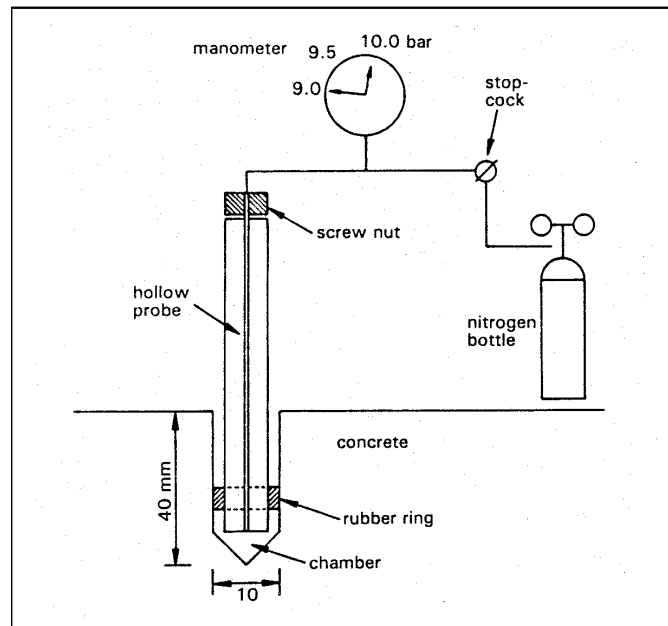
שיטה זו פותחה באוניברסיטה הטכנית של דלפט (Technical University of Delft) [20 - 21].

הביצוע כולל את השלבים הבאים:

- קידוח במרקם הפנים של בטון והוצאת גליל קטן ממנו שקוטרו 10 מ"מ ועומקו 40 מ"מ;
- החדרת מכשיר הבדיקה החלול עם טבעת גומי סמוך לקצהו התחתון אל תוך הקדח עד שהמכשיר נוגע בתחתית הקדח (ציור 2.7);
- איטום התא הקטן שנוצר בתחתית הקדח בעזרת טבעת גומי;
- נשיפת גז חנקן דרך מכשיר הבדיקה בלחץ של כ-10 עד 10.5 באר;
- סגירת הברז ומדידת משך הזמן הנדרש לנפילת הלחץ בתא מ-10 עד 9.5 באר. פרק זמן זה נקרא זמן TUD והוא קשור ביחס הפוך לחדירות הבטון הנבדק.

משך הבדיקה בשיטת TUD היא כמו בבדיקת פורוסקופ. יתרון שיטת TUD הוא איטום מהיר של חלל שבקדח, ללא צורך להיעזר באביזרים נוספים והתקנה מהירה של מכשיר הבדיקה בתוך החלל.

בספרות המקצועית מדווחת התאמה טובה בין שיטת TUD ושיטת חדירת החמצן (Cembureau Method) [22].



ציור 2.7. תאור עקרוני של שיטת TUD

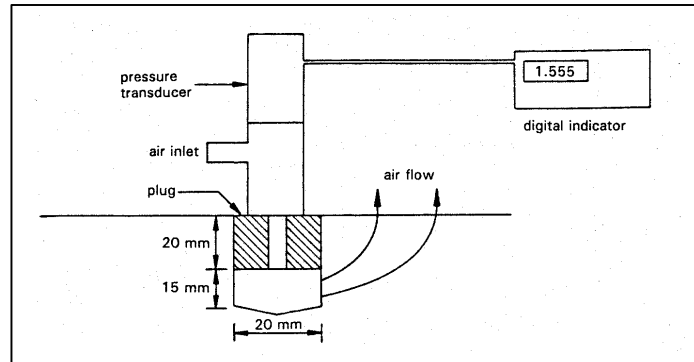
ג. שיטת Hong-Parrott

שיטה זו הומצאה ע"י C.Z. Hong ו-L. Parrott באגודה הבריטית לצמנט (British Cement Association) [23, 24]. בדומה לשיטות אחרות של בדיקות הרסניות כוללת שיטת Hong-Parrott את השלבים הבאים:

- ביצוע הקידוח בתוך מרקם הפנים של הבטון עד לעומק של 35 מ"מ והוצאת גליל בקוטר של 20 מ"מ (ציור 2.8);
- סגירת מקום הקידוח בפקק ואיטום מקום הסגירה;
- הפקק מחובר באמצעות transducer של הלחץ עם מד דיגיטלי.

בבדיקה מודדים את הזמן הדרוש לנפילת הלחץ בחלל מ-50 קילופסקל עד ל-35 קילופסקל. בנוסף לכך נעשית מדידה של לחות האוויר היחסית בתוך החלל.

החסרון הגדול של השיטה הנ"ל הוא קידוח החלל בבטון ששטחו עד פי 4 יותר גדול מאשר בשיטות האחרות.
 נמצא שהתוצאות בשיטה זו הינן בעלות מובהקות גבוהה. לכן מספיקה מדידה אחת לכל אזור.
 בספרות המקצועית מדווחת קורלציה מעולה בין שיטה זו לבין ושיטת חדירת החמצן (Cembureau Method). לעומת את לא נמצא קשר מובהק בין תוצאות בדיקה זו לבין תוצאות בדיקת עומק הקרבונציה או בדיקת דיפוזיה של כלורידים [24].

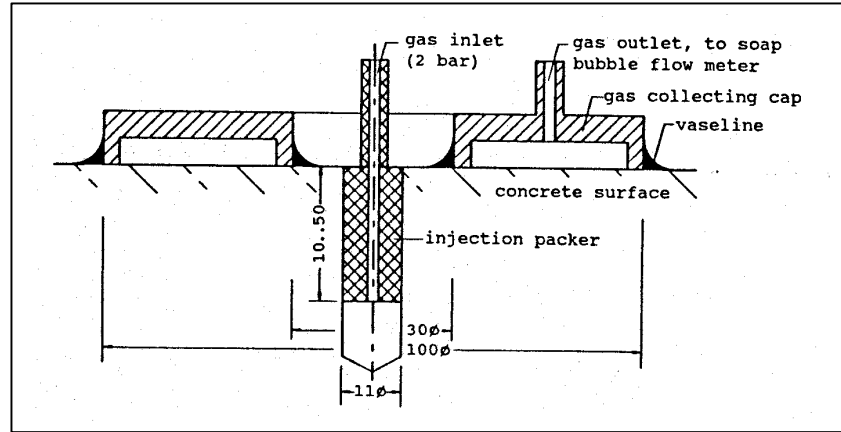


ציור 2.8. תאור עקרוני של שיטת Hong-Parrott

ד. שיטת Paulmann

שיטה זו פותחה באוניברסיטה הטכנית של בראונשווייג בגרמניה [25]. שיטה זו היא עדיין שיטה ניסויית וטרם קיים שימוש מסחרי בה.
 השיטה כוללת:

- קידוח במרקם פנים של בטון עד לעומק של כ-40 – 45 מ"מ והוצאת גליל קטן בקוטר של 11 מ"מ (ציור 2.9);
- איטום של פי הקדח באמצעות פקק גומי מתרחב;
- התקנה מעל הקדח של מכשיר טבעת לאיסוף גז;
- חשיפת מקום הקידוח ללחץ יתר של 2 באר. בבדיקה משמש גז חנקן או אוויר;
- מדידה של זמן עליית הלחץ מ-0.2 מיליבאר עד ל-0.5 מיליבאר;
- גז אשר זורם דרך דפנות הקדח נאסף בטבעת וכמותו נמדדת ע"י מד הזרימה. התוצאות משמשות לחישוב של מקדם החדירות לבטון.



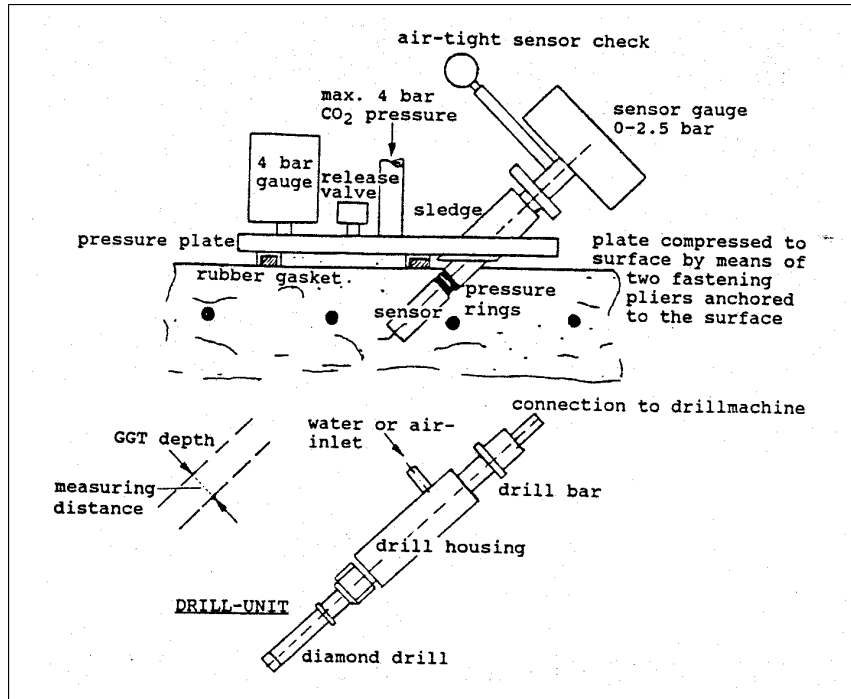
ציור 2.9. תאור עקרוני של שיטת Paulmann

ה. שיטת Germann

שיטה מסחרית זו פותחה בדנמרק, [26]. תיאור סכימטי של השיטה ניתן בציור 2.10. ביצוע השיטה כולל:

- קידוח אלכסוני בקוטר של 18 מ"מ ובזווית של 45° ;
- החדרת דו תחמוצת פחמן אל פני בטון בלחץ של 1 עד 4 באר;
- מעקב אחרי עליית הלחץ בחיישן אשר מותקן בתוך הקדח. חיישן הלחץ מזהה שינויים מינימליים של הלחץ בבטון הנבדק. המדידות נעשות רק כאשר לחות האוויר בחלל הקדח קטנה מ-90%. מדידת לחות האוויר נעשית באמצעות מדי לחות המותקנים בחללי הקדח סמוך לחיישן הלחץ;

ע"ס תוצאות המדידה משרטטים עקום "לחץ בחיישן כנגד זמן" ומוצאים מקדם חדירת אוויר של בטון. נמצא שמקדם חדירת האוויר של בטונים משתנה באופן דרסטי עם ירידת מנת המים. כך, מקדמי חדירת האוויר בבטונים עם מנות המים של 1.0, 0.55 ו-0.45 היו 2.3, 0.064 ו-0.0078 כפול 10^{-16} מ"ר, בהתאמה.



ציור 2.10. תאור עקרוני של שיטת Germann

2.2 שיטות המבוססות על עקרונות של חדירת מים

- ניתן לסווג את כל השיטות לקביעת חדירת מים במרקם פנים לשתי קבוצות:
- שיטות ספיגת מים אשר מבוססות על עיקרון הספיגה הקפילרית של בטון במגע עם מים;
 - שיטות לחץ המבוססות על חדירת מים אל הבטון תחת לחץ.
- חשוב להדגיש שברוב השיטות לבדיקת חדירת מים מקובל להפעיל לחץ של כ-0.01 באר עד 10 באר.

2.2.1 שיטות המבוססות על ספיגת מים

ספיגה קפילרית מהווה מעבר נוזלים דרך מוצק נקבובי כתוצאה מהשפעת מתח פנים (surface tension). כאשר בטון בא במגע עם מים הלחץ שנוצר בנקבים קפילריים הוא [27]:

$$P_w = \frac{1500}{r} \quad (2.3)$$

כאשר

P_w - ספיגה קפילרית, באר ;

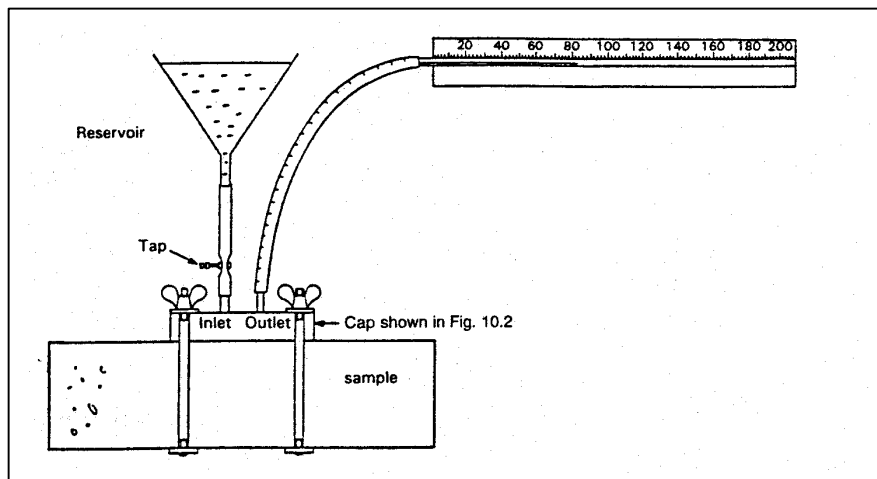
r - רדיוס של נקב קפילרי, ננומטר.

רדיוס הנקבים הממוצע בבטון הוא מ-20 עד 500 ננומטר. לכן הלחץ הקפילרי עשוי להיות בין 3 באר (לבטונים באיכות נחותה) עד ל-75 באר (לבטונים באיכות גבוהה). מובן מאליו שספיגה קפילרית מתרחשת רק בנקבים הריקים. לכן מידת מילוי הנקבים במים משפיעה מאד על תוצאות הבדיקות.

א. שיטת ISAT (Initial Surface Absorption Test)

שיטה זו פותחה ע"י Levitt באנגליה [28 – 30]. היא מעוגנת בתקן האנגלי [31]. שיטה זו מיועדת לבדיקות מעבדה ולבדיקות באתר. השיטה כוללת:

- א. התקנת מכסה אקרילי (cap) על פני הבטון ואיטומו בפני מים (ציור 2.11). השטח המיינמלי של המכסה הוא 5,000 מ"מ²;
- ב. הפעלת לחץ של 200 מ"מ עמוד מים באמצעות מיכל מים (reservoir);
- ג. פתיחת הסגר (tap), מילוי המים במכסה דרך פתח כניסה (inlet) עד שהמים עולים בצינור הקפילרי האופקי המחובר עם פתח היציאה (outlet) שבמכסה;
- ד. סגירת הסגר כעבור 10 דקות;
- ה. מעקב אחרי תזוזות המניסקוס של המים שבקפילרה בפרקי זמן של 10, 30, 60 ו-120 דקות החל מתחילת הבדיקה. תזוזה זאת מאפיינת את קצב ספיגת המים של הבטון.



ציור 2.11. סקיצה של שיטת ISAT

תוצאת הבדיקה היא ערך של ספיגה התחלתית של פני שטח (ISA value):

$$(2.4) \text{ISA} = \frac{0.6 \cdot D}{\delta t}$$

כאשר

ISA - קצב ספיגת מים, מ"ל למ"ר לשנייה;

D - תזוזה של המניסקוס (מספר השנות בסקלה של קפילרה), מ"מ;

δt - זמן של תזוזת מניסקוס בקפילרה בסך של D שנות.

בדיקות ISAT הן בדיקות ממושכות, דהיינו: נדרש שעתיים לביצוע מלא של בדיקה אחת.

שיטת ISAT היא שיטה לא הרסנית, אך היא עשויה להכתים את פני הבטון כתוצאה מאיטום המכסה. חשוב להדגיש שפני שטח הבטון הלא חלקים מהווים מכשול רציני בביצוע הבדיקות. כמו כן איטום של מכסה באלמנטים אנכיים כמעט ולא ניתן לביצוע. נמצא, שבפלטות בטון ובקורות לא ניתן להשתמש בשיטה זו לאפיון של underside פרט לאזורים שליד הקצוות [9]. מאחר והמעקב אחרי תזוזת המניסקוס היא ויזואלית בלבד, הרי הדיוק במדידה הוא מוגבל. בספרות המקצועית ניתן למצוא דיווח על פיזור רב של תוצאות בדיקת ISAT, דהיינו: מקדם שוני של כ-23% עד 25% [32].

התקן הבריטי בנושא שיטת ISAT אינו דן בסיווג של מרקם פנים של בטון לפי ערך ISA. סיווג מסוג זה נעשה ב-[33]. בטבלה 2.4 ניתנת תמצית הסיווג הנ"ל.

טבלה 2.4 סיווג של כושר הספיגה של מרקם הפנים בבטון לפי ערך ISA

כושר ספיגה	גבוה	בינוני	נמוך
ערך ISA (מ"ל למ"ר לשנייה)	מעל 0.50	0.25 – 0.50	קטן מ-0.25

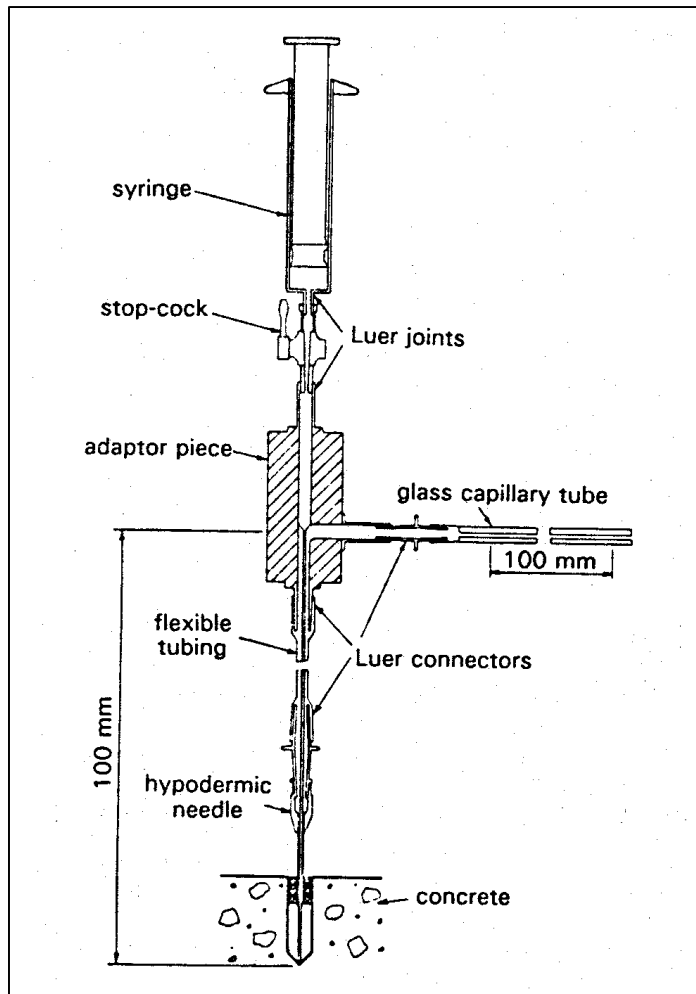
ב. שיטת פורוסקופ

מכשיר פורוסקופ אשר מתואר בסעיף 2.1.2 – א' מאפשר למדוד את ספיגת המים של מרקם הפנים של בטון. הבדיקה מבוצעת באותו הקדח ועם אותו הפקק אשר שימשו בבדיקת חדירת האוויר. ההבדל היחיד הוא בכך שמחט המזרק מחוברת אל הצינור הקפילרי במקום משאבת ווקואום (ציור 2.12). בבדיקה מודדים את הזמן הדרוש לבטון לספוג 0.01 מ"ל מים. גרסה מסחרית אחרונה של מכשיר פורוסקופ כוללת אביזר אלקטרוני דיגיטלי לספירת הזמן. בספרות המקצועית ניתן למצוא נתונים סותרים לגבי האחידות של תוצאות הבדיקות בשיטת פורוסקופ. מקדמי השוני המדווחים הם מ-11% - 13% [27, 34] עד ל-30% - 40% [4, 32].

בטבלה 2.5 ניתן סיווג של בטונים לפי התוצאות של ספיגת מים בבדיקת פורוסקופ [9].

טבלה 2.5: סיווג של כושר ההגנה של מרקם פנים בבטון לפי התוצאות של ספיגת מים בבדיקת פורוסקופ

4	3	2	1	0	סוג בטון
טוב מאוד	טוב	בינוני	סביר	רע	כושר הגנה של מרקם פנים
מעל 500	- 100 500	- 50 100	- 20 50	עד 20	זמן פורוסקופ (פרק הזמן אשר נדרש לספיגה של 0.01 מ"ל מים), שניות



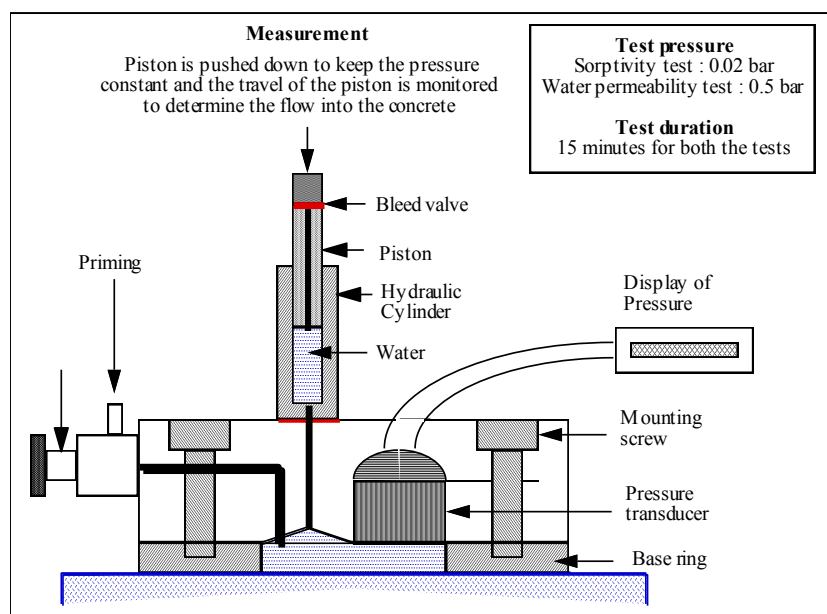
ציור 2.12. תאור עקרוני של שיטת פורוסקופ ל מדידת ספיגת מים של מרקם פנים

ג. שיטת "Autoclam Permeability System" (APS)

שיטת APS מאפשרת בנוסף לקביעת חדירת האוויר לקבוע גם את ספיגת המים וחדירת המים של מרקם הפנים בבטון.

בבדיקת ספיגת המים ניתן להשתמש באותו המקום בפני השטח של הבטון אשר שימש את בדיקת חדירת האוויר. מבצעים את בדיקת ספיגת המים כשעה אחת לאחר בדיקת החדירות לאוויר.

תאור של ביצוע בדיקת ספיגת המים באמצעות שיטת APS ניתן בציור 2.13.



ציור 2.13: תאור עקרוני של בדיקת ספיגת מים וחדירת מים בשיטת APS

הבדיקה כוללת את השלבים הבאים:

- א. המים נשאבים אל שטח הבדיקה ע"י המשאבה. כאשר תא הבדיקה התמלא במים, נפסקת פעולת המשאבה באופן אוטומטי. באמצעות מיקרו-משאבה מגיעים ללחץ יתר של 0.02 באר בתא. לחץ זה נשמר קבוע במשך הבדיקה. נמצא שבלחץ זה מעבר המים לתוך הנקבים הקפילריים הוא התוצאה של ספיגה ולא של זרימה תחת לחץ;
- ב. רישום של נפח המים שבא במגע עם הבטון מתבצע כל דקה במשך 15 דקות. על סמך התוצאות מחשבים את כמות המים אשר נספגה בבטון.
- ג. ע"ס תוצאות המדידה מסרטטים עקום של כמות המים שנספגה כנגד הזמן. כמות המים שנספגה נמצאת בקשר ישיר עם שורש הזמן, בדומה לבדיקה של קביעת מקדם ספיגה קפילרית של חומרי בנייה המתוארת בתקן הגרמני DIN 52617 [35]. שיפוע הקו בין הדקות ה-5 וה-15 נקרא מקדם הספיגה (sorptivity) הנמדד ב-מ"ק לדקה^{1/2}.

הנתונים שבספרות המקצועית מראים שמקדם השוני של תוצאות הבדיקות של ספיגת מים וחדירת מים בשיטת APS היה הרבה יותר גדול מהמקדם שנקבע בבדיקת החדירות לאוויר [36]. לעומת זאת באותו מקור מדווחת קורלציה טובה בין מקדם הספיגה בשיטת APS וחדירת כלורידים. הקורלציה בין עומק הקרבונציה בבטונים ומקדם הספיגה הנקבע בשיטת APS הייתה פחות טובה מאשר עם חדירת האוויר הנמדדת בשיטת APS. מקדם הספיגה הנקבע בשיטת APS משמש לסיווג הבטונים לפי כושר ההגנה של מרקם הפנים שלהם, כפי שזה מופיע בטבלה 2.6.

טבלה 2.6: סיווג תכונות הגנה של מרקם הפנים בבטון לפי מקדם הספיגה APS [36]

איכות הבטון לפי כושר ההגנה של מרקם הפנים	טובה מאוד	טובה	נחותה	גרועה
מקדם ספיגה * APS, $\frac{m^3 \cdot 10^{-7}}{\sqrt{\min}}$	קטן מ-1.3	≥ 1.3 < 2.6	≥ 2.6 < 3.4	≥ 3.4

* - בטונים עם צ.פ רגיל

2.2.2 שיטות המבוססות על חדירת מים בלחץ

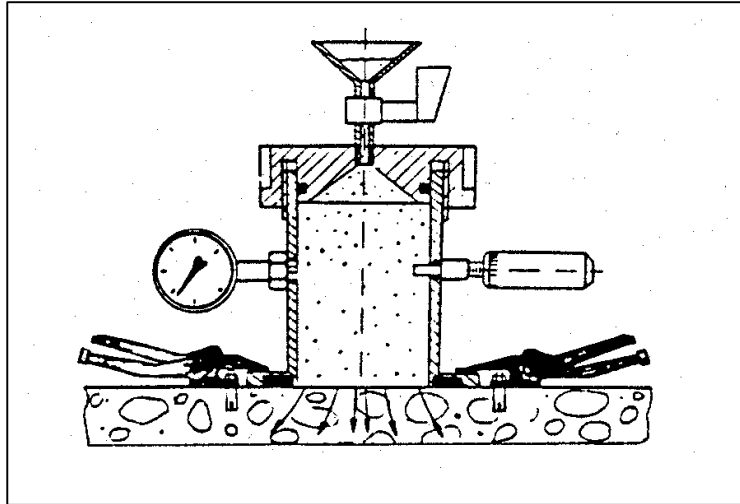
בשיטות הלחץ הפרש הלחצים המופעל על המערכת מבחוץ מהווה את הכוח המניע אשר מאלץ את המים לחדור אל תוך הנקבים בבטון. לחץ המים המופעל על פני הבטון וחדירת המים משמשים להערכת המצב של פני שטח הבטון.

א. שיטת APS

באמצעות שיטת Autoclam המתוארת לעיל ניתן לבצע בדיקת חדירת מים במרקם הפנים של בטון. לבדיקה זו משמש אותו מארז המערכת המיושם גם בבדיקת ספיגת מים (ציור 2.13). הבדיקה נעשית במקום אחר על פני שטח הבטון (אחר מאשר מיקום בדיקות חדירת האוויר וספיגת המים של מרקם הפנים). הלחץ החיצוני המופעל בבדיקה זו הוא 0.5 באר. להבדיל מספיגת המים הנגרמת ע"י כוחות קפילריים של מרקם הפנים בבטון, הפעלת לחץ של 0.5 באר מאיצה מאוד את קצב זרימת המים והחדרתם אל תוך הבטון. זהו ההבדל העיקרי בין בדיקת ספיגת המים בשיטת APS לבין בדיקת חדירת המים באותה השיטה. בדומה לבדיקת ספיגת המים מתבצע רישום אוטומטי במשך 15 דקות של כמות המים המוגשת אל פני הבטון. על סמך תוצאות המדידה מחשבים את כמות המים שחדרו לבטון בכל דקה ומסרטטים עקום אשר מקשר בין כמות המים שחדרו ושורש הזמן שחלף. השיפוע של הקו בין הדקות ה-5 ו-15 מהווה את מקדם חדירת המים הנמדד ב-מ"ק לדקה^{1/2}.

ב. שיטת GWT-4000

שיטה זו הינה מסחרית ותאור שלה ניתן בצירור 2.14. בבדיקה משמשים מים רותחים. הלחץ החיצוני המופעל בשיטה זו הוא עד 6 באר. חדירת המים אל תוך הבטון נקבעת ע"י קריאות מד מיקרומטר בפרקי זמן קצובים. בספרות המקצועית לא נמצאו נתונים לגבי אמינות תוצאות הבדיקות בשיטה זו.



צירור 2.14. תאור עקרוני של מכשיר GWT-4000 לקביעת חדירת מים

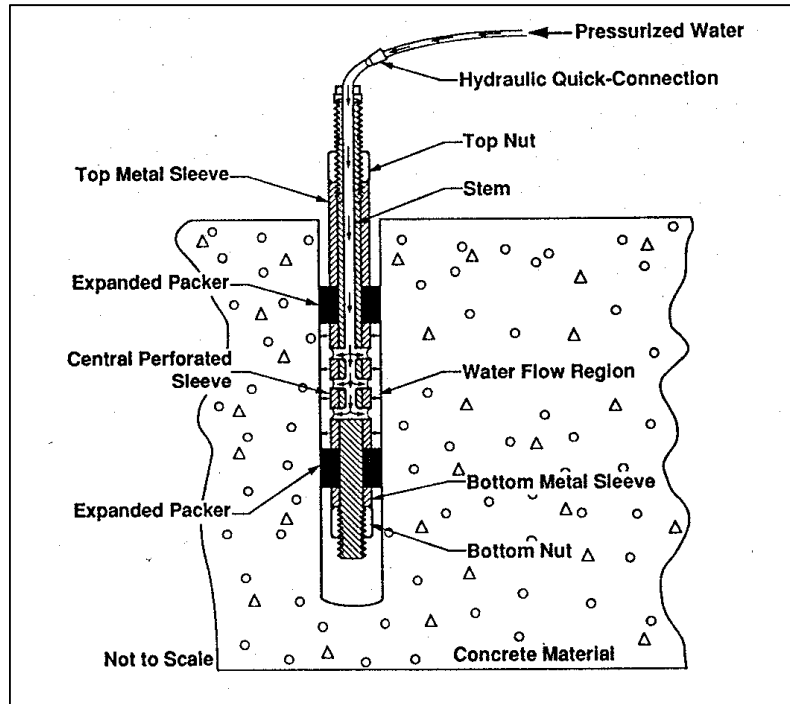
ג. שיטת (Field Permeability Test) FPT

שיטה זו פותחה באוניברסיטה של פלורידה בארה"ב [34] והיא מיועדת לבדיקות באתר. תאור של השיטה ניתנת בצירור 2.15.

ביצוע הבדיקה כולל:

- קידוח בבטון בקוטר של 23 מ"מ ולעומק של 152 מ"מ;
- החדרת מכשיר גלילי אל תוך חלל הקדח, סגירה ואיטום של התא המרכזי של המכשיר;
- הפעלת ווקואום בתא ל-5 עד 10 דקות;
- העברת המים לתא תחת לחץ של כ-10 עד 35 באר;
- מעקב אחרי קצב זרימת המים בפרקי זמן קצובים של 5 – 15 דקות במשך כשעתיים. קצב זרימת המים נמדד ע"י מד זרימה קפילרי;
- חישוב על סמך חוק Darcy של מקדם החדירות במועל (apparent coefficient of permeability), K_{FPT} , שהוא פונקציה של הלחץ החיצוני המופעל וקצב זרימת המים הנמדד בבדיקה [37].

כל בדיקה בשיטה הנ"ל דורשת עד כ-3 שעות כולל זמן להכנות הנדרשת. מקדם השוני של תוצאות הבדיקות בשיטה זו עשוי להיות כ-4% עד 28% [38]. נמצאה קורלציה טובה בין מקדם חדירת המים בפועל, K_{FTP} , ומקדם חדירת מים בבדיקות מעבדה תקינות [39].



ציור 2.15. תאור עקרוני של שיטת FPT

2.3 שיטות המבוססות על מדידת דיפוזיה ומעבר (migration) של יונים

מעבר של יונים בבטון הוא תהליך מורכב אשר כולל תהליכי דיפוזיה, ספיגה קפילרית, זרימה, שדות חשמליים וכו'. כמו כן תהליך זה עשוי להיות מלווה בהיווצרות קשרים פיסיקליים וכימיים. בסעיף הנוכחי ניתנת ההתייחסות למעבר יונים בבטון בהשפעת שני מנגנונים:

- מעבר המונע ע"י הפרשי ריכוזים (דיפוזיה);
- מעבר המונע ע"י שדות חשמליים.

חשוב להדגיש שביצוע הבדיקות לקביעת מקדם הדיפוזיה האמיתי בבטון הוא קשה בתנאי המעבדה ועוד יותר מסובך בתנאי האתר. קביעת מקדם הדיפוזיה דורשת ביצוע בדיקות ממושכות. מאידך, באמצעות הפעלת שדה חשמלי ניתן להאיץ במידה ניכרת את תנועת היונים דרך הבטון. תופעה זו משמשת כאמצעי לפיתוח של שיטות בדיקה מזורזות אשר מתאימות הן למעבדה והן לאתר.

ניתן לסווג את כל שיטות הבדיקה הנ"ל לשתי קבוצות:

- שיטות המבוססות על קביעת ההתנגדות החשמלית;
- שיטות המבוססות על מעבר של יונים.

2.3.1. שיטות המבוססות על מדידת התנגדות חשמלית

זרם חשמלי בבטון הוא פועל יוצא של תנועת יונים המומסים בנוזל שבתוך הנקבים. תכולה יותר גבוהה של מים בבטון, דהיינו: בטון רטוב, נקבוביות גדולה יותר, נקבים גדולים ומחוברים זה לזה (כתוצאה מיחס מים/צמנט גבוה), גורמים להתנגדות חשמלית נמוכה של הבטון. כאשר לחות אוויר והטמפרטורה הינן קבועות, ניתן לצפות שההתנגדות תהיה גבוהה יותר בבטונים עם יחס מים/צמנט נמוך ודרגת הידרציה גבוהה יותר. כמו כן, גידול בהתנגדות החשמלית צפוי בבטונים צפופים יותר המתקבלים בנוכחות מוספים מינרליים, כגון: אפר פחם, מיקרוסיליקה וסיגים מתנורים גבוהים. ייבוש וקרבוניזציה גורמים גם הם לגידול בהתנגדות החשמלית.

התנגדות חשמלית שווה ליחס בין המתח המופעל והזרם הנוצר. התנגדות חשמלית שווה למכפלה של התנגדות סגולית של החומר ואורך המסלול של הזרם החשמלי. התנגדות סגולית תלויה במבנה החומר ואינה תלויה בגיאומטריה שלו. התנגדות חשמלית נמדדת ב- $\Omega \cdot m$ (Ohm*m). מוליכות חשמלית היא ההיפוך של התנגדות חשמלית.

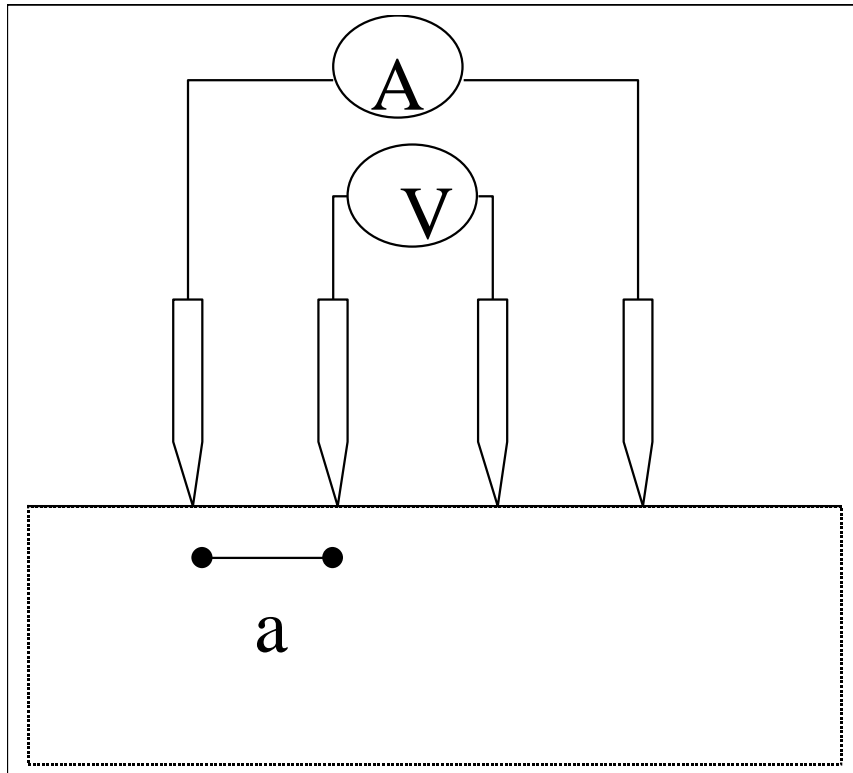
התנגדות חשמלית של בטון עשויה להשתנות בתחום מ- 10^1 עד $10^6 \Omega \cdot m$ כתוצאה מתכולת הרטיבות (השפעת תנאי הסביבה) והרכב הבטון, [40 - 41]. בטון אינו מוליך חשמל באופן הומוגני וזאת משום שרק היונים הנמצאים במי הנקבים של עיסה צמנטית עשויים להוליך זרם חשמלי. גרגירי אגרגטים מהווים, בעצם, גושים מבודדים. גרגירי האגרגט עשויים להיות בסדר גודל של עובי מרקם הפנים של בטון. לכן תנועת מטענים במרקם הפנים של הבטון עלולה להיות לא הומוגנית.

פני השטח של הבטון עלולים לעבור תהליך קרבוניזציה או להיות יבשים מאוד, מחד, דבר שיבוא לידי ביטוי בהתנגדות חשמלית יותר גבוהה של שכבות הבטון אשר סמוכות אל פני השטח בהשוואה לשכבות הפנימיות שלו. מאידך, מיד אחרי ההרטבה לשכבות הבטון העליונות והסמוכות אל פני השטח תהיה התנגדות חשמלית יותר נמוכה מאשר לשכבות הפנימיות של בטון.

כל השיטות המיועדות למדידת התנגדות חשמלית של בטון באתר מבוססות על הפעלת שתי אלקטרודות לפחות, כאשר מוט זיון עשוי לשמש בתור אלקטרודות.

א. שיטת ארבע נקודות (Wenner method)

שיטה זו ידוע מזמן ושימשה שנים רבות למדידת התנגדויות הקרקע [42]. שיטה זו אומצה לבדיקת בטונים החל מסוף שנות ה-60 של המאה הקודם [43 - 44], והיא מקובלת כיום כשיטה מסחרית. מכשיר Wenner כולל ארבע אלקטרודות נקודתיות אשר נמצאות במרחקים זהים זו מזו. המדידה נעשית ע"י הנחת האלקטרודות ולחיצתן אל פני הבטון (ציור 2.16). שתי אלקטרודות נקודתיות חיצוניות משרות את הזרם הנמדד. ושתי האלקטרודות הפנימיות מודדות את נפילת הפוטנציאל הנוצר. התנגדות חשמלית סגולית שווה ליחס בין המתח והזרם.

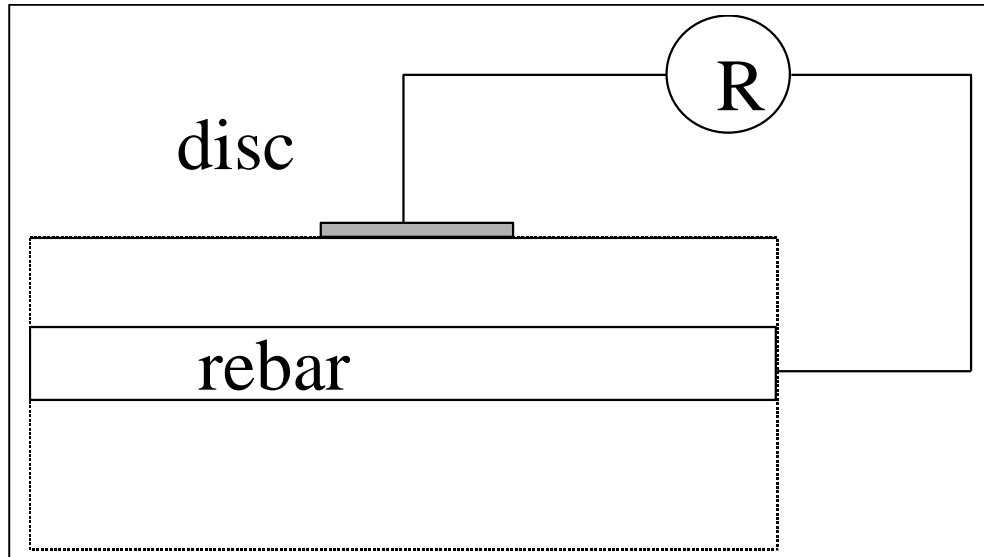


ציור 2.16. תאור עקרוני של שיטת Wenner

ניסויי מעבדה הראו שהפיזור בקביעת התנגדות חשמלית ע"י שיטת Wenner הוא עד 25%,
[46 – 45].

ב. שיטה של אלקטרודה אחת

השיטה מבוססת על הנחת אלקטרודה עשויה ממתכת על פני הבטון ומדידת ההתנגדות בין האלקטרודה ופלדת הזיון. בבדיקה זו נדרש חיבור של אלקטרודה אל פלדת הזיון והמשכיות כוללת של הזיון. בציור 2.17 ניתן תאור של השיטה.



ציור 2.17. תאור עקרוני של שיטת האלקטרודה האחת לקביעת התנגדות חשמלית

התנגדות סגולית של בטון מחושבת בשיטה זו לפי הנוסחה, [47]:

$$\rho = 2 \cdot a \cdot R_{disc-bar}$$

כאשר

a - קוטר של דיסק, מ';

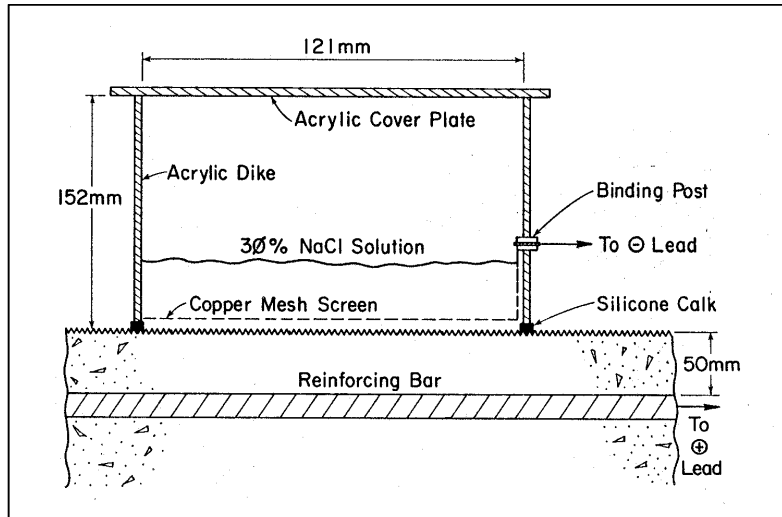
$R_{disc-bar}$ - התנגדות חשמל אשר מתקבלת מתוצאות המדידה, Ω .

2.3.2 שיטות המבוססות על מעבר יונים

א. שיטת Whiting

שיטה זו פותחה בארה"ב [48]. העיקרון הפיסיקלי הבסיסי של השיטה בא לידי ביטוי בכך שפלדת הזיון הופכת להיות קוטב חיובי (+) אשר אליו נעים יונים של כלור ממקור חיצוני, דרך הבטון. התנועה בבטון תחת ההשפעה של השדה החשמלי החיצוני היא בקצב מואץ יחסית לזה המתקבל בתהליך דיפוזיוני. הבדיקה מבוצעת על בטונים במצב קרוב לרוויה. נמצא שעובי מרקם הפנים וטמפרטורת הסביבה משפיעים מאוד על הזרם העובר בבטון. תאור של שיטת Whiting ניתן

בציור 2.18.



ציור 2.18. תאור עקרוני של שיטת Whiting

תוצאות המדידות בשיטת Whiting נמצאות בקורלציה טובה מאוד עם התוצאות של חדירת כלורידים הנמדדת לפי שיטת AASHTO T259-80 (ASTM C 1202) [48].

ב. בדיקת מעבר של כלורידים באתר

שיטה זו פותחה לא מזמן באוניברסיטה של בלפסט. התיאור המפורט של שיטה ניתן ב- [13].
צילום של המכשיר ניתן בציור 2.19.



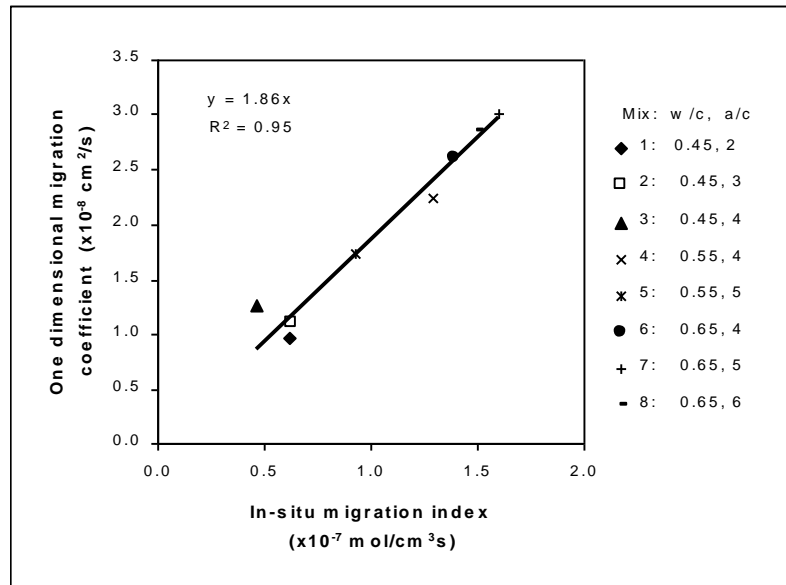
ציור 2.19. צילום של המכשיר לבדיקת מעבר של כלורידים באתר

בבדיקה משמשת תמיסה של סודיום כלוריד בריכוז של 0.55M. לאחר התקנת המכשיר על פני הבטון ואיטום מקום הבדיקה, מפעילים מתח של 60 V בין אנודה וקטודה. מפל מתח זה גורם לתנועה של יוני כלור מהאנודה לקתודה בסמוך לפני הבטון. הבדיקה נמשכת מ-6 עד 10 שעות

בהתאם לאיכות הבטון. תוצאת הבדיקה היא קצב של תנועת הכלורידים אשר מדווח כאינדקס

מיגרצית כלורידים באתר (in-situ) ביחידות של $\frac{\text{mole}}{\text{cm}^3 \cdot \text{s}}$. באמצעות משוואת Nernst-Planck

ובהתחשב בגיאומטריה של תא הבדיקה ובמסלול הזרימה של יוני כלור דרך הבטון, ניתן להמיר את אינדקס מיגרצית כלורידים למקדם מיגרציית כלורידים ביחידות של מ"ר לשנייה. תוצאות בדיקת אינדקס מיגרציית כלורידים in-situ הראו קורלציה מעולה עם תוצאות בדיקת מקדם מיגרצית כלורידים חד-צירי (one-dimensional), כפי שניתן לראות בצירור 2.20 [9].



צירור 2.20. קורלציה של מקדם מיגרצית כלורידים in-situ ומקדם מיגרצית יונים חד צירית (one-dimensional)

בבדיקות שנערכו במונטריאול בקנדה נמצא ששיטת מיגרצית יונים in-situ מאפשרת לחזות ברמת אמינות גבוהה את קצב הקורוזיה של הפלדה בגשר מבטון מזוין [9].

ג. חדירות כלורידים (ASTM C 1202) [49]

הבדיקה התקנית לחדירות כלורידים הנה בדיקה מואצת המבוססת על מדידת התנועה של יוני הכלור דרך הבטון, תחת כוח מניע של הפרשי מתח. המדגמים בבדיקה זו הם גלילים בקוטר 100 מ"מ ובעובי של 51 מ"מ. בבדיקה זה נמצא הגליל, לאחר שהורטב למצב רווי במים, במתקן מיוחד כך שאחת מפאותיו נמצאת במגע עם תמיסה רוויה בסיד והפיאה השני במגע עם תמיסה רוויה בסיד המכילה גם ריכוז נקוב של יוני כלור. בין שתי הפאות מופעל מתח חשמלי של 60 וולט הגורם לתנועה של יוני הכלור מצד אחד לשני דרך הבטון. הזרם החשמלי בין שתי הפאות נמדד באופן רציף במשך שש שעות. אינטגרציה של עקום הזרם כנגד זמן בתקופה זו נותן את כמות המטען שעברה מצד אחד לשני (ביחידות של קולון). כמות מטען זו היא האמד לחדירות של הבטון

לכלורידים. כפי שנראה בהמשך, קיים קשר בין ערך זה ובין מקדם הדיפוזיה לכלורידים של הבטון.

סיווג של חדירת כלורידים לבטון ניתן בטבלה 2.7 שלהלן:

טבלה 2.7: סיווג של חדירת יונים של כלור לפי ASTM C1202 - 97 [49]

גבוהה	בינונית	נמוכה	נמוכה מאוד	זניחה	חדירת יונים של כלור
> 4,000	2,000 – 4,000	1,000 – 2,000	100 - 1,000	< 100	המטען שעבר, קולומב

3. ניסויים

3.1 חומרים

במחקר הנוכחי נבדקו שתי קבוצות בטונים עם וללא אפר פחם. ההרכבים היו בשתי תכולות של צמנט, 200 ו-320 ק"ג למ"ק (עם וללא אפר פחם). אפר הפחם היה מתחנת הכוח בחדרה בעל הפסד בקלייה של 7.5% (אחוזי משקל). אפר פחם נוסף בכמות של 150 ק"ג למ"ק בטון, על חשבון

החול. כל הבטונים הוכנו עם מוסף משפר עבידות מסחרי RHEOBUILD TDS. זה מוסף בצורת אבקה המכיל מוספים על-פלסטיים וחומרים פוצולניים. הסומך של כל הבטונים היה קבוע – S5.

הרכב, סומך וסוג של בטונים שנחקרו במסגרת העבודה הנוכחית ניתן בטבלה 3.1.

3.2 תנאי אשפּרה

במחקר הנוכחי נבדקה היעילות של חמישה סוגי האשפּרה של בטונים, כדלקמן:

- ללא אשפּרה ברטוב - אשפּרה זו קיבלה את הכינוי A ;
- 3 ימי התזת מים – אשפּרה B ;
- 5 ימי התזת מים – אשפּרה C ;
- 7 ימים במים (אשפּרה תקנית) – אשפּרה D ;
- 28 ימים במים – אשפּרה E .

א. ללא אשפּרה – שיטת אשפּרה A

לאחר פריקת התבניות נחשפו הדגמים לתנאי יובש ($30^{\circ}\text{C}/40\%\text{RH}$) עד לגיל של 90 יום. חשוב להדגיש ששיטה A מאפיינת "very bad practice" באתר.

ב. סימולציה של אשפּרה בהתזה – שיטות אשפּרה B ו-C

לאחר פריקת התבניות הוכנסו הדוגמאות לאמבט מים ל-5 דקות, שלוש פעמים ביום למשך 3 ימים – אשפּרה B, או למשך ששה ימים – אשפּרה C. בין טבילות במים נחשפו דוגמאות בטון לתנאי יובש ($30^{\circ}\text{C}/40\%\text{RH}$) עד לגיל של 90 יום. אשפּרה B מהווה סימולציה של אשפּרה המקובלת בבנייה בישראל. ניתן לאפיין את אשפּרה C כ- common site practice .

טבלה 3.1: הרכב, סומך וסוג בטונים

כינוי בטון				תכונה
5-150-ח	2-150-ח	5-ח	2-ח	
125	120	140	145	סומך S5, ירד הקונוס, מ"מ
				סוג צמנט – צ.פ 250 תכולת צמנט, ק"ג למ"ק

324	203	320	200	
150	152	0	0	תכולת אפר אפר, f, ק"ג/מ"ק
192	176	175	175	תכולת מים, W, ק"ג/מ"ק
0.59	0.87	0.55	0.88	יחס מים/צמנט, $\frac{w}{c}$
0.52	0.71	0.55	0.88	יחס מים לצמנט ואפר פחם $\frac{w}{c + 0.3 \cdot f}$
0.46	0.75	0	0	יחס אפר/צמנט, $\frac{f}{c}$
1,705	1,631	1,887	1,978	תערובת אגרגטים, סה"כ, ק"ג/מ"ק הרכב האגרגטים: פולית, ק"ג/מ"ק עדש, ק"ג/מ"ק חול מודרג, ק"ג/מ"ק חול ים מאשדוד, ק"ג/מ"ק
0.9	1.1	0.5	0.5	מוסף משפר עבידות, סוג SP, % ממשקל הצמנט

ג. אשפרה ממושכת במים – שיטות אשפרה D ו-E

לאחר פריקת התבניות הוטבלו הדוגמאות במים למשך 6 ימים – אשפרה D, או למשך 28 ימים – אשפרה E. לאחר האשפרה במים נחשפו דוגמאות הבטון לתנאי יובש (30°C/40%RH) עד לגיל 90 יום. שיטה D מהווה את האשפרה התקנית והיא מאפיינת "good construction site practice". שיטה E אינה שיטת אשפרה מעשית בתנאי האתר. במחקר הנוכחי שימשה שיטת אשפרה E בתור אשפרת ייחוס (reference curing).

3.3 ייצור דוגמאות

ערבוב תערובות בטון נעשה במערבל שנפחו 150 ליטר. תהליך הערבול נעשה בחמישה שלבים. בהתחלה עורבבו האגרגטים, פוליה ועדש, עם 2/3 מכמות המים במשך 5 דקות. לאחר 5 הדקות הנוספות המיועדות לאפשר את ספיגת האגרגטים, הוספו לתערובת צמנט, אפר פחם, מוסף על-פלסטי ויתרת המים, והערבוב נמשך דקה נוספת. לאחר מכן הוכנסה תערובת חולות למערבל והערבול נמשך 15 דקות נוספות.

לפני יציקת הדוגמאות בוצעו בדיקות של הסומך והמשקל המרחבי של בטונים טריים כנדרש בתקן הישראלי ת"י 26 חלק 2 [50]. כמו כן נוצקו קוביות בטון $10 \times 10 \times 10$ ס"מ לקביעת חוזק הבטון בגיל 28 יום בהתאם לנדרש בתקן ישראלי ת"י 26 חלק 4 [51].

דוגמאות הבטון לבדיקות ISAT (לפי התקן הבריטי BS 1881 Part 5 [31]) וחדירות אוויר היו בגודל של $200 \times 200 \times 100$ מ"מ.

דוגמאות הבטון לבדיקת הקרבונציה המואצת היו פריזמות במדות $70 \times 70 \times 280$ מ"מ.

בבדיקת ספיגה קפילרית (לפי התקן הגרמני DIN 52617 [35]) שימשו פרוסות של גלילי בטון בקוטר של 200 מ"מ ובעובי של 50 מ"מ.

לבדיקת חדירת כלורידים לפי השיטה המתוארת בתקן האמריקאי ASTM C1202 - 97 [49] שימשו גלילים בקוטר של 100 מ"מ ואורך של 165 מ"מ.

כל הדוגמאות שנבדקו היו בגיל 90 יום, לאחר שהיה בתנאי מעבדה של $30^{\circ}\text{C}/40\%\text{RH}$ שהתחילו מיד עם גמר האשפורה ברטוב.

3.4 תיאור הבדיקות

שיטות הבדיקה שנבחרו במחקר הנוכחי נועדו לבדוק את קריטריונים של תפקוד בטונים שונים. גישה תפקודית מאפשרת לתאר את הפוטנציאל האמיתי של תערובת בטון. קרבונציה וחדירות כלורידים מכמתים באופן ישיר קריטריוני תפקוד של הבטונים. ספיגת מים התחלתית (initial surface absorption), חדירת גזים וספיגה קפילרית מאפיינים קריטריונים לא ישירים של תפקוד הבטונים.

א. חדירות כלורידים

תיאור השיטה ניתן בסקר הספרות לעיל. לפני ביצוע הבדיקה נאטמה הפיאה הגלילית של הדוגמאות בחומר דוחה מים ועמיד באלקלים והדוגמאות הורו במים בתנאי ווקואום במשך 24 שעות. בבדיקה שימשה תמיסת סודיום כלוריד בריכוז של 3%. בבדיקה שימשו דוגמאות בטון בגיל של 90 יום לאחר שאוחסנו בתנאי חדר יבשים ($30^{\circ}\text{C}/40\%\text{RH}$).

ב. בדיקת קרבונציה מואצת

המלצות בדיקה RILEM CPC 18 כוללות נוהל לקביעת עומק הקרבונציה בבטון הקשוי [52]. תמיסת האינדיקטור המשמש למטרה זו היא תמיסת 1% פנולפתלאין באתיל אלכוהול 70%. לפי ההמלצות הנ"ל חייב להיות שטח החתך של הפריזמות 100×100 מ"מ. במחקרים שבוצעו בעבר במכון הלאומי לחקר הבנייה נמצא שניתן לבצע בדיקת קרבונציה גם בדוגמאות במידות $280 \times 70 \times 70$ מ"מ [53 - 56]. בבדיקה שימשו דוגמאות בטון בגיל של 90 יום לאחר שאוחסנו בתנאי חדר יבשים ($30^{\circ}\text{C}/40\%\text{RH}$). ריכוז דו תחמוצת פחמן היה 5% וזאת כדי להבטיח קצב

קרבוניצה מהיר. הריכוז הטבעי של CO_2 הוא כ-0.03%. במשך הבדיקה הובטחה גישה חופשית של אוויר לפני שטח הבטון הנבדק. האוויר שבתא הקרבוניצה היה בטמפרטורה של $30^{\circ}C$ והלחות היחסית הייתה 50%. עומק הקרבוניצה נמדד אחרי 1, 4, 7, 14, 28, 35 ו-56 ימי חשיפה לאוויר עם התכולה גבוהה של דו תחמוצת פחמן. לצורך המדידה של עומק הקרבוניצה נבקעו פלחים בעובי של 20 מ"מ, בכל אחד ממועדי הבדיקה. פני השטח "הטריים" שנוצרו בבקיעה נוקו מיד מהלכלוך ותמיסת האינדיקטור הותזה על פני השטח. באזור שנצבע באדום ערך ההגבה, pH, הוא מעל 9.2. לאחר ביצוע הבדיקה נאטמו פני שטח השבורים והדוגמאות הוחזרו להמשך בדיקת הקרבוניצה המואצת. עומק הקרבוניצה הנמדד באמצעות הסרגל נקבע כממוצע של 4 – 9 מדידות.

ג. בדיקת ISAT

תאור הבדיקה ניתן בסקר הספרות של הדו"ח הנוכחי. הבדיקה נערכה לבטונים ללא אפר פחם. כפי שנוכח לעיל, דוגמאות בטון היו בגודל של $100 \times 200 \times 200$ מ"מ. מעקב אחרי הספיגה התחלתית של בטונים נעשה ב- 10, 30, 60 ו-120 דקות. לכל סוג בטון נבדקו 3 דוגמאות ונקבע ערך הספיגה הממוצע.

ד. בדיקת ספיגה קפילרית לפי תקן גרמני DIN 52617

דוגמאות הבטון (פרוסות של גליל) בקוטר של 200 מ"מ ובעובי של 50 מ"מ שימשו בבדיקה זו. גיל הבטונים שנבדקו היה 90 יום. לכל סוג בטון נבדקו 3 דוגמאות ונקבעה ספיגה קפילרית ממוצעת של הבטון. לפני הבדיקה נשקלו הדוגמאות ופאות הצד שלהן נאטמו. הדוגמאות הונחו על התמיכות בתוך המים בעומק של כ-2 – 3 מ"מ למשך 24 שעות. בבדיקה שימשו מים מהברז. בפרקי זמן קצובים הוצאו הדוגמאות מהמים ונקבעה העלייה במשקל כתוצאה מהספיגה הקפילרית של הבטון. המדידות נעשו כעבור 10, 30, 60 דקות, 2, 6 ו-24 שעות. על סמך תוצאות הבדיקה שורטט עקום של כמות המים שנספגו (ביחידות של ק"ג למ"ר של שטח) כנגד שורש הזמן, שעה^{1/2}. מקדם הספיגה הקפילרית נקבע לפי התקן כשיפוע של קו הספיגה המתרחשת במשך 6 שעות.

ה. בדיקת חדירות לאוויר (באמצעות מכשיר Torrent)

תיאור השיטה ניתן בסקר הספרות של הדו"ח הנוכחי. בבדיקה שימשו פרוסות גליל בקוטר של 200 מ"מ ובעובי של 50 מ"מ. לכל סוג בטון נבדקו 3 דוגמאות (ונקבע הממוצע) בגיל של 90 ימים לפחות לאחר שאוחסנו בתנאי היובש.

בדיקת החדירות לאוויר רגישה למצב הרטיבות של הגוף. בבדיקה המבוססת על מכשיר Torrent פותחה דרך להביא את מצב הרטיבות בחשבון וזאת ע"י מדידת ההתנגדות החשמלית. נמצא שכאשר ההתנגדות החשמלית מתקרבת ל- 1000 קילו-אווהם בס"מ ($k\Omega cm$), הבטון מספיק יבש כך שאין צורך בתיקוני רטיבות. במהלך הבדיקות שבוצעו כאן נמצא שבכל המקרים ההתנגדות המדודה הייתה 1000 קילו-אווהם בס"מ ($k\Omega cm$), דבר המעיד שאחסון הגופים בתנאי חדר

לתקופה של חודשיים לאחר סיום האשפורה ברטוב היה בו די כדי להגיע לדרגת יובש זו. מכאן ניתן להסיק, שבתנאי האקלים בארץ, במיוחד בתקופת הקיץ, יש סיכוי להשתמש בבדיקה זו ללא חשש מהשפעת הרטיבות, אלא במקרים יוצאי דופן בהם רכיב המבנה נמצא במגע עם מים. נקודה זו דורשת כמובן אימות בתנאי השטח, במיוחד כשמביאים בחשבון אלמנטים עבים יחסית אשר בהם תהליך ההתייבשות קשור במעבר כל הרטיבות דרך השכבה החיצונית, בשונה מגופי המעבדה שיובשו מכל צדדיהם.

כדי להבין טוב יותר את השפעות הרטיבות, נערכה סדרת ניסויים מוגבלת אשר בה גופים יבשים באוויר, לאחר בדיקת החדירות לאוויר הורטובו עד רוויה, ולאחר מכן יובשו באוויר ומדי יום נמדדה ההתנגדות החשמלית שלהם. למטרה זו, שתי דוגמאות מכל סוג בטון הוטבלו במים למשך 72 שעות. לאחר מכן הם נחשפו לתנאי היובש למשך 24, 48, 72, 96, 118, 144, 168 ו-196 שעות. במועדים הנ"ל נשקלו הדוגמאות כדי לקבוע את הירידה במשקל הנובעת מאידוי המים ובמקביל נמדדו המוליכות החשמלית וחדירת אוויר של בטון. הבדיקה הופסקה במועד בו הייתה המוליכות החשמלית 999 קילו-אהום לס"מ. לאחר מכן בוצע ייבוש של אותן דוגמאות הבטון בתנור בטמפרטורה של כ-60°C ונקבעה תכולת הרטיבות הכוללת שהייתה בבטון אחרי שהוצא מהמים. במקרה הנוכחי, הייבוש ל-60°C נותן מצב שבו למעשב כל החללים הקפילריים ריקים, ומים נמצאים רק בחללי הגל.

התוצאות מוצגות בציור 3.1, כאשר תכולת הרטיבות היא ביחס למצב ייחוס של ייבוש ל-60°C. במצב ייבוש זה הוצאו למעשה כל המים הקפילריים, מבלי שהייתה פגיעה בגל הצמנטי ובמים שבתוכו. ניתן לראות, שכאשר מגיעים למצב רטיבות זה ההתנגדות החשמלית בכל המקרים עולה ל-1000 קילו-אהום ס"מ. בתנאי המעבדה כל הגופים היו באופן טבעי (בייבוש בתנאי החדר) מתחת היו בעלי התנגדות חשמלית של 1000 קילו-אהום ס"מ, דבר המעיד שהייבוש בתנאי החדר מביא את מרקם הפנים לדרגת יובש דומה לזו של ייבוש ב-60°C. מבחינה מעשית מראה הדבר שהייבוש בתנאי החדר די בו כדי להגיע לדרגת יובש אשר בה הבדיקה אינה רגישה למצב הרטיבות. יש לבדוק בתנאי השטח, במיוחד בקיץ האם אמנם מתקיים תנאי זה כפי שעולה מבדיקות המעבדה, ובאיזה מידה יש צורך בתיקון למצב הרטיבות.

עמוד עם ציור 3.1 א'

עמוד עם ציור 3.1 ב'

4. תוצאות

4.1. השפעת האשפיה על איכות מרקם הפנים

השפעת האשפיה וטיב הבטון על איכות מרקם הפנים מוצגת בציורים 4.1-4.3, באמצעות הפרמטרים של ספיגות שטח פנים (ISAT), מקדם ספיגות קפילרית ומקדם החדירות לאוויר. המגמות של ספיגות שטח הפנים אינן עקביות (ציור 4.1) וזאת בשונה משאר שתי הבדיקות: ככל שהאשפיה במים אינטנסיבית יותר מקדם הספיגות הקפילרית ומקדם החדירות לאוויר קטנים, וזאת באופן משמעותי; הקטנה בפקטור של כ-2 במקדם הספיגות הקפילרית (ציור 4.2) בין אשפיה A ל-E, והפרש גדול יותר המתקרב לסדר גודל במקרה של מקדם החדירות לאוויר (ציור 4.3). לכן, על פניו נראה שאמד זה של החדירות לאוויר הרבה יותר רגיש לאשפיה.

המגמות הנוספות המסתמנות בניתוח התוצאות של מקדם הספיגות הקפילרית ומקדם החדירות לאוויר הן, שכצפוי, המקדמים הללו קטנים במידה משמעותית בתערובת עם תכולת הצמנט הגבוהה, דהיינו מנת המים הנמוכה. לאפר הפחם השפעה חיובית ברורה על מקדמים אלה בתערובת עם תכולת צמנט נמוכה (השווה H-2 עם H-2-150) אך השפעה מתונה בתערובת עם תכולת הצמנט הגבוהה (H-5): במקרה זה נוכחות האפר גורמת אף לגידול קל בערכים של המקדמים, בעיקר באשפרות המוגבלות במים (C,B,A).

4.2. השפעת האשפיה על תפקוד מרקם הפנים

האומדנים לתפקוד מרקם הפנים התקבלו בעבודה הנוכחית באמצעות אפיון החוזק, החדירות לכלורידים, והקרבוניציה, כמתואר בציורים 4.4-4.6. מן הראוי לציין שהחוזק נקבע על קוביות בגודל 100 מ"מ אשר נחשפו מכל צדדיהן לתנאי האשפיה השונים. על כן, בפועל ניתן להעריך שכל נפח הקוביה (50 מ"מ מכל צד) היו תחת השפעת האשפיה, ועל כן ערכי החוזק כאן יכולים להיחשב כאמד סביר לחוזק מרקם הפנים. זאת בשונה מגליל הנקדח מגוש בטון, אשר רק חלקו העליון חשוף לתנאי האשפיה בפועל.

כצפוי, החוזק גדל עם הגידול באינטנסיביות של האשפּרה (ציור 4.4) בעוד שהחדירות לכלורידים (ציור 4.5) ועומק הקרבונציה (ציור 4.6) קטנו. השפעת האפר על החוזק הייתה קטנה יחסית בכל התערובות (ציור 4.4). כמו כן השפעתו הייתה מוגבלת גם על עומק הקרבונציה, וזאת בתערובת עם 320 ק"ג/מ"ק צמנט. לעומת זאת בתערובת עם 200 ק"ג/מ"ק צמנט תוספת האפר גרמה לירידה ניכרת בעומק הקרבונציה. לגבי החדירות לכלורידים הייתה לאפר השפעה משמעותית על הקטנתו בכל התערובות שנבחנו.

עמוד עם ציור 4.1

עמוד עם ציור 4.2

עמ' עם ציור 4.3

עמוד עם ציור 4.6

ניתוח כולל יותר של מהלך הקרבונציה, לא רק באמצעות העומק בגיל מסוים, כפי שמוצג בציור 4.6, ניתן לקבל באמצעות אפיון עקומי עומק קרבונציה-זמן בתנאי הבדיקה המואצת. קשר אופייני כזה מתואר בציור 4.7, כולל גם משוואה אמפירית לאפיונו, באמצעות הנוסחה:

$$y = k_a \cdot (t)^{\frac{1}{n}} \quad (4.1)$$

כאשר:

y - עומק קרבונציה

t - זמן

k_a, n - מקדמים

בטבלה 4.1 מוצגים ערכי k_a ו- n עבור התערובות השונות כולל גם מקדם המתאם R^2 . בקרוב ראשון המקדם n הנו בלתי תלוי בתערובת ובתנאי האשפחה בעוד ש- k_a קטן עם תכולת הצמנט ועם אינטנסיביות האשפחה. מגמות אלה מתאימות לדיווח בספרות, אשר שם נלקח בדרך כלל ערך קבוע של n , שהוא בסביבות 2. במקרה הנוכחי נמצא שהתאמה טובה של כל התוצאות מתקבלת ע"י הצבת ערך קבוע עבור n של 2.5. נערך ניתוח מחודש של כל העקומים בהנחה זו, והתוצאות מוצגות בטבלה 4.2. גם כאן מקדם המתאם גבוה, ומשמעות הדבר שניתן לאפיין את ההתנגדות לקרבונציה ע"י פרמטר אחד שהוא k_a שבטבלה 2.2, המייצג את כל העקום. היחידות של המקדם המוצג בטבלה 2.2 הן מ"מ/ימים)^{0.4}. השפעת האשפחה והרכב הבטון על פרמטר זה מוצגת בציור 4.8; המגמות דומות לאלה של עומק הקרבונציה המוצגות בציור 4.6.

טבלה 4.1: פרמטרים לאפיון עקום הקרבונציה המואצת עבור n משתנה

R^2	n	K_a	סוג אשפיה	בטון
-------	-----	-------	-----------	------

0.85	2.50	16.76	A	2-n (200 ק"ג צ.פ. 250)
0.80	2.86	14.82	B	
0.95	2.40	11.84	C	
0.94	2.43	10.34	D	
0.99	2.22	7.31	E	
0.97	3.27	10.72	A	5-n (320 ק"ג צ.פ. 250)
0.97	3.00	7.83	B	
0.95	3.15	7.07	C	
0.95	2.69	4.95	D	
0.88	2.14	3.06	E	
1.00	4.19	17.88	A	2-150-n (200 ק"ג צ.פ. 250, 150 ק"ג אפר פחם)
0.98	2.50	8.57	B	
0.99	2.40	7.58	C	
0.87	2.73	7.62	D	
0.92	2.17	3.70	E	
0.98	3.23	11.20	A	5-150-n (320 ק"ג צ.פ. 250, 150 ק"ג אפר פחם)
0.94	2.54	5.75	B	
0.98	3.11	5.71	C	
0.97	4.05	5.42	D	
0.94	2.36	2.33	E	

טבלה 4.2: פרמטרים לאפיון עקום הקרבונציה המואצת עבור n קבוע

R^2	K_a	סוג אשפרה	בטון
-------	-------	-----------	------

0.92	16.74	A	ח-2 (200 ק"ג צ.פ. 250)
0.86	13.33	B	
0.99	12.24	C	
0.98	10.63	D	
0.96	8.49	E	
0.87	8.40	A	ח-5 (320 ק"ג צ.פ. 250)
0.90	6.46	B	
0.97	5.43	C	
0.98	4.53	D	
0.87	3.43	E	
0.67	12.96	A	ח-150-2 (200 ק"ג צ.פ. 250, 150 ק"ג אפר פחם)
0.97	8.65	B	
0.93	8.12	C	
0.67	7.27	D	
0.99	4.52	E	
0.92	9.36	A	ח-150-5 (320 ק"ג צ.פ. 250, 150 ק"ג אפר פחם)
0.98	5.67	B	
0.96	4.64	C	
0.76	3.60	D	
0.98	2.52	E	

5. דיון

5.1. תחשיבי מחזור החיים

ניתן לחשב את מחזור החיים מנקודת מבט של הקורוזיה של הפלדה בתנאי קרבונציה וחדירת כלורידים בהתבסס על ערכי k_a עבור קרבונציה והערכים של החדירות לכלורידים. העקרונות של החישוב מוצגים להלן, עבור פלדה עם עומק כיסוי של 30 מ"מ.

5.1.1. מחזור חיים בתנאים של חדירת כלורידים

חישוב מחזור החיים מתבסס על העקרונות הבאים:

א. באמצעות משוואת הדיפוזיה של Fick ניתן לתאר את תכולת הכלורידים בבטון כתלות בעומק מפני הבטון, במקדם הדיפוזיה של הבטון ובזמן:

$$(5.1) \quad C(x,t) = C_0 \cdot [1 - \operatorname{erf}(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}})]$$

כאשר:

$C(x,t)$ = תכולת כלורידים בעומק x מפני הבטון, בזמן t (ק"ג למ"ק);

X = עומק מפני הבטון (מ');

t = זמן (שנים);

$C(0)$ = תכולת כלורידים על פני הבטון (ק"ג למ"ק);

D = מקדם הדיפוזיה (מ"ר לשנייה).

ב. הקשר בין החדירות לכלורידים לבין מקדם הדיפוזיה של הבטון נחקר ואחד הביטויים הכמותיים שניתן לו הוא:

$$D_{eff} = 0.1371 \cdot 10^{-13} \cdot (\text{Chloride Permeability})^{0.854} \quad (5.2)$$

כאשר: ה- *Chloride Permeability* היא החדירות לכלורידים, המבוטאת בקולון.

ג. נסמן את משתני העזר הבאים:

$$Z = 1 - \frac{C(x,t)}{C(0)}$$

$$Y = \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}$$

ג. חישוב מחזור החיים (t):

- מתוך הקשר המתואר במשוואה (5.2) לעיל ונתוני חדירות הבטון לכלורידים שנמדדו במעבדה, מחושבים מקדמי הדיפוזיה המתאימים, (D_{eff}).
- ערכי Z השונים (ראה לעיל), מחושבים על סמך הנחות, כפי שיוסבר בהמשך, ביחס לערכים של תכולת כלורידים קריטית ותכולת כלורידים על פני הבטון.
- על-פי משוואת Fick (משוואה 5.1) ניתן להגיע לקשרים הבאים:

$$(5.3) \quad Y = \operatorname{inverf}(Z) \quad (\text{א 5.3}) \quad \text{ומכאן: } Z = \operatorname{erf}(Y)$$

ד. מחזור החיים, t , מתקבלת מתוך הקשר:

$$t = \frac{\left(\frac{x}{y}\right)^2}{4 \cdot D} \quad (5.4)$$

על בסיס זה ניבנה תהליך המאפשר חישוב של מחזור החיים עבור בטון בעל תכולות שונות של צמנט ואפר פחם וזאת לאחר שנחשף לתנאי אשפחה שונים, בהנחות מתאימות עבור $C(x,t)$, $C(0)$ ו- x , כמפורט להלן:

- א. עובי הכיסוי שלגביו חושב מחזור החיים היה 30 מ"מ. ז.א. חושב משך הזמן עד שתכולת הכלורידים הקריטית תגיע לעומק של $x = 0.03$ מ'.
- ב. החישובים נעשו בהנחה שתכולת הכלורידים הקריטית, היא 0.4% ביחס לתכולת הצמנט בתערובת. זוהי הערכה המקובלת בספרות המקצועית.
- ג. עבור תכולת הכלורידים על פני הבטון, $C(0)$, נבחר ערך משוער של 1.5 ק"ג למ"ק. ההנחה לגבי ערך זה מתבססת על תוצאות קודמות והערכות בספרות, אך יש להביא בחשבון שהיא תלויה במיקום המבנה ובתנאי חשיפתו.

השפעת הרכב הבטון והאשפחה על מחזור החיים בתנאי חדירת כלורידים מוצגת בציור 5.1. ניתן לראות שרק בתערובות עם תכולת צמנט של 320 ק"ג/מ"ק מושגים ערכים של מחזור חיים של מספר עשרות שנים. כמו כן בולטת ההשפעה המשמעותית של אפר הפחם בתנאים אלה וגם רגישותו לאשפחה. מבחינה מעשית בתערובת עם 320 ק"ג/מ"ק צמנט מושג מחזור של כ- 20 שנה או קצר יותר (נמוך אמנם מ- 50 שנה הנדרש במבנה קבע, אך יש להביא בחשבון שמדובר בתערובת בעלת מנת מים של 0.55, בעוד שהתקן דורש 0.45 בתנאים אלה), אך ע"י תוספת אפר פחם ואשפחה נאותה במים ניתן להגיע לערכים של מעל 50 שנה.

עמוד עם ציור 5.1

5.1.2. מחזור חיים בתנאים של קרבונציה

את מחזור החיים עבור קרבונציה ניתן לחשב מתוך נוסחה (4.1) בהנחות מתאימות לגבי הקשר בין הקרבונציה המואצת ובין הטבעית. בעבודה קודמת נמצא שהקשר בין k_a בתנאים מואצים ובין התנאים הטבעיים הוא באמצעות מקדם שערכו 200. עבור עובי כיסוי של 30 מ"מ, כדוגמת זה שנלקח עבור הכלורידים ניתן לחשב את מחזור החיים t (בשנים) על פי הנוסחה הבאה:

$$t = \left(\frac{200}{360} \right) \cdot \left(\frac{30}{k_a} \right)^{2.5} \quad (5.5)$$

היחידות של t הן בשנים והיחידות של k_a הן מ"מ/מ(ימים)^{0.4}.

השפעת הרכב הבטון והאשפרה על מחזור החיים בתנאי קרבונציה מוצגת בציור 5.2. ניתן לראות בברור את ההשפעה החיובית של גידול בתכולת הצמנט והאפר וכן גם את החשיבות של האשפרה במים. השוואה של התוצאות בציור זה עם ציור 5.1, מלמדת שניתן להגיע למחזור חיים ארוך יותר בתנאי קרבונציה. תערובת עם 320 ק"ג/מ"מ צמנט מאפשרת מחזור חיים של מעל 50 שנה באשפרה תקנית במים (אשפרה D). כמו כן, ע"י שילוב של אפר פחם בתערובת עם 200 ק"ג/מ"מ צמנט, ניתן גם כן באותם תנאי אשפרה להשיג מחזור חיים של 50 שנה. כאמור, בתנאי חדירת כלורידים מחזור החיים בתערובות ותנאי אשפרה אלה היה נמוך מ- 50 שנה.

5.2. קשרי גומלין בין הפרמטרים לאפיון מרקם הפנים

כדי לקבל אינדיקציה טובה יותר על המשמעות של הפרמטרים לאפיון מרקם הפנים הוצגו קשרי הגומלין ביניהם בציורים 5.3 – 5.5. ניתן לראות מציור 5.3 על קשרים בעלי מובהקות גבוהה בין מקדם החדירות לאוויר ומקדם הספיגות הקפילרית, תוך סיווג הקשרים לשתי קבוצות, עם ובלי אפר פחם. לעומת זאת לא ניתן לגבש קשר או קשרים בעלי מובהקות סבירה בין מקדם הספיגות הקפילרי ומקדם החדירות לאוויר ובין ספיגות שטח הפנים (ציורים 5.4 ו- 5.5).

5.3. קשרי גומלין בין תפקוד מרקם הפנים ובין הפרמטרים לאפיונו

כדי לבחון את האמינות של הפרמטרים השונים לאפיון מרקם הפנים, נערך ניתוח של קשרי הגומלין בינם ובין תכונות מרקם הפנים המצביעות על תפקודו מהיבטים שונים (חוזק, חדירות כלורידים וקרבוניצה). קשרי הגומלין עבור כל אחד מההיבטים התפקודיים הללו נבחנו בנפרד.

5.3.1. חוזק לחיצה

קשרי הגומלין עבור חוזק הלחיצה מוצגים בציורים 5.6 – 5.8. ניתן לראות שקיימים קשרים מובהקים בין החוזק ובין מקדם הספיגות הקפילרית (ציור 5.6) ומקדם החדירות לאוויר (ציור 5.7). הקשרים הם ברמת מובהקות גבוהה עבור תערובות ללא אפר פחם (ציור 5.6א' ו- 5.7א'), בעוד שעבור התערובות עם האפר מתקבל קשר מובהק רק בתחום של כל הרכב בנפרד (ציור 5.6ב' ו- 5.7ב'). מעניין לציין שעבור מקדם נתון (ספיגות או חדירות אוויר) שווה, החוזק גבוה יותר בתערובת עם תכולת הצמנט הגבוהה יותר. לא נמצאו קשרים בעלי רמת מובהקות סבירה בין החוזק ובין ספיגות מרקם הפנים (ציור 5.8). עמוד עם ציור 5.2

עמוד עם ציור 5.3

עמוד עם ציור 5.4

עמוד עם ציור 5.5

עמוד עם ציור 5.6 א'

עמוד עם ציור 5.6 ב'

עמוד עם ציור 5.7 ב'

עמוד עם ציור 5.8

5.3.2. קרבונציה

קשרי הגומלין בין עומק קרבונציה והמקדם k_a ובין מקדמי ספיגות קפילרית (ציור 5.9) וחדירות לאוויר (ציור 5.10) מראים על קשרים בעלי רמת מובהקות גבוהה גם כשכוללים בהם את כל ההרכבים ותנאי האשפיה שנבחנו. במקרה של חדירות לכלורידים ניתן להבחין שהתערובת עם 200 ק"ג/מ"ק צמנט נתנה ערכים שהם גבוהים במקצת, אבל באופן שיטתי, מהקשר הכולל (ציור 5.9 ב').

לא נמצאו קשרים בעלי רמת מובהקות סבירה בין הקרבונציה ובין ספיגות מרקם הפנים (ציור 5.11).

5.3.3. חדירת כלורידים

קשרי הגומלין בין חדירת כלורידים ובין מקדמי ספיגות קפילרית (ציור 5.12) וחדירת אויר (ציור 5.13) מראים על קשרים בעלי רמת מובהקות גבוהה גם כשכוללים בהם את כל ההרכבים ותנאי האשפיה שנבחנו. יחד עם זאת, הפיזור גדול יותר במקרה של הקשר עם מקדם הספיגות הקפילרית (ציור 5.12 א') ומתקבל קשר ברמת מובהקות גבוהה יותר עם הניתוח מבוצע לגבי כל הרכב בנפרד (ציור 5.12 ב').

לא נמצאו קשרים בעלי רמת מובהקות סבירה בין החדירות לכלורידים ובין ספיגות מרקם הפנים (ציור 5.14).

5.3.4. שיטת בדיקה מומלצת

הניתוח של קשרי הגומלין מצביע על כך שבכל המקרים הבדיקה לספיגות מרקם הפנים איננה מאפשרת פיתוח קשרים בעלי מובהקות סבירה עם הפרמטרים המאפיינים את תפקוד מרקם הפנים. כזכור, גם הביצוע של בדיקה זו לא היה פשוט.

הבדיקות של מקדם הספיגות הקפילרית ומקדם החדירות לאוויר נתנו בכל המקרים קשרים עם רמת מובהקות סבירה, ולעתים אף גבוהה. במקרה של החוזק היו קשרים אלה תלויים בהרכב הבטון, בעוד שעבור חדירת כלורידים וקרבוניציה הם היו הרבה פחות רגישים להרכב הבטון. מבחינה מעשית העניין שלנו בבדיקות אלה הוא באפיון מחזור החיים בתנאי קרבוניציה וחדירת כלורידים, ועל כן העובדה שעבור החוזק הקשרים היו תלויים בהרכב אינה גורעת מהיעילות של בדיקות אלה לאפיון מרקם הפנים.

עבור קרבוניציה רמת המובהקות של הקשר הכולל עם מקדם הספיגות הקפילרית הייתה 0.80 ועבור הקשר עם מקדם החדירות לאוויר רמת המובהקות הייתה 0.90. עבור חדירות לכלורידים רמת המובהקות של הקשרים הייתה 0.70 עבור הספיגות הקפילרית ו- 0.88 עבור מקדם החדירות לאוויר. לכן, נראה שהבדיקה המבוססת על קביעת מקדם החדירות לאוויר היא אמינה יותר. לכך יש להוסיף את העובדה שבדיקה זו היא "ידידותית" ומאפשרת ביצוע באתר הבנייה על פני הבטון עצמו. על כן זוהי הבדיקה המומלצת בהתבסס על התוצאות כאן.

עמוד עם ציור 5.9 א'

עמוד עם ציור 5.9 ב'

עמוד עם ציור 5.10

עמוד עם ציור 5.11

עמוד עם ציור 5.12 א'

עמוד עם ציור 5.13

עמוד עם ציור 5.14

לאור מסקנה זו מוצגים להלן (ציורים 5.15 ו-5.16) מחדש הקשרים שבין הפרמטרים התפקודיים של מרקם הפנים (חדירות לכלורידים, באמצעות הבדיקה החשמלית הנותנת תוצאות המבוטאות ביחידות מטען, קולון, והקרבוניצה, באמצעות המקדם k_a המתקבל בבדיקה המואצת) ובין מקדם החדירות לאוויר, בתחומים שהם רלוונטיים ומעשיים. משמעות הדבר היא מרקם פנים שבו החדירות היא פחות מכ-7,000 קולון (דהיינו מקדם חדירות לאוויר של עד כ- 4×10^{-16}) במקרה של חדירות כלורידים, ומקדם קרבוניצה k_a שערכו פחות מכ-10 (דהיינו מקדם חדירות לאוויר של עד כ- 10×10^{-16}) במקרה של קרבוניצה. מרקם פנים בעל איכויות ירודות מערכים קריטיים אלה מייצג מחזור חיים קצר במיוחד של מספר שנים ספורות ועל כן הוא פסול על הסף.

הקשרים בציורים 5.15 ו- 5.16 מראים על קורלציה ברורה וברמת משמעות גבוהה בתחומים הרלוונטיים בין הפרמטרים התפקודיים של כל התערובות והאשפרות השונות, ובין פרמטר אחד המייצג את איכות מרקם הפנים שהוא מקדם החדירות לאוויר. כעיקרון, עקומים אלה הם "אב-טיפוס" של עקומי כיול אוניברסליים.

כדי לקבל אינדיקציה נוספת לגבי המשמעות של האומדנים המתקבלים מעקומים אלה חושבו ערכי מחזור החיים באופן ישיר מתוצאות האפיון התפקודי של מרקם הפנים (חדירות כלורידים, בקולון וקרבוניצה באמצעות מקדם k_a) עם הערכים המתקבלים מחישוב המתבסס על תוצאות מדידות איכות מרקם הפנים באמצעות בדיקת החדירות (ציורים 5.17 ו-5.18). מציורים אלה ניתן לקבוע את מרווח האמינות של אומדן מחזור החיים באמצעות בדיקת החדירות לאוויר.

5.3.5 סיכום הדיון

שיטת הבדיקה המומלצת לאפיון מרקם הפנים היא בדיקת החדירות לאוויר, שאמינות ביצועה גבוהה והיא נותנת אינדיקציה טובה לתפקוד מרקם הפנים. ניתן באמצעות בדיקה זו לקבל אומדן

למדדים אופייניים לחדירת כלורידים (בבדיקת חדירות כלורידים לפי התקן ASTM C 1202) וקרבוניצה (בדיקה מואצת אשר בה עקום הקרבוניצה מאופיין באמצעות פרמטר k_a). הקשרים מוצגים בציורים 5.19 ו-5.20 בתחומים שהם רלוונטיים לבטון מזוין.

א. כלורידים

התוצאות המוצגות בציור 5.19 מתייחסות רק לתערובות עם 320 ק"ג/מ"ק צמנט, משום שרק הן נתנו הרכבים אשר בהם מחזור החיים הוא מסדר גודל של מספר עשרות שנים. התערובות עם 200 ק"ג/מ"ק צמנט היו "רחוקות" במידה ניכרת, עם מחזור חיים מחושב של כ-10 שנים. מתוך הקשרים ניתן לראות שברמה "חצי כמותית" חדירות לאוויר מתחת לכ- 0.2×10^{-16} מטר² מייצגת מחזור חיים של מעל כ-50 שנה וחדירות לכלורידים הקטנה מכ-1500 קולון. נראה אבל, שבחינה ברמה "כמותית" מובהקת יותר איננה אפשרית בהסתמך על עקום ה"מסטר" וזאת לאור פיזור מסוים שקיים סביבו. ייתכן ולצורך קידום השיטה לרמה כמותית מובהקת יש צורך בפיתוח עקומי "קליברציה" עבור תחומים צרים יותר של הרכבים או אכויות בטון (למשל: ב-30, ב-40, ב-50, ב-60). נושא זה מחייב בחינה ולימוד נוספים, תוך הרחבת העבודה להרכבים בעלי תכולות צמנט הגבוהות מ-320 ק"ג/מ"ק.

ב. קרבוניצה

התוצאות בציור 5.20 מראות שבהיבט ה"חצי כמותית" חדירות אוויר הקטנה מכ- 0.6×10^{-16} מטר² מייצגת מחזור חיים של כ-50 שנה ויותר. כאן, בשונה מחדירת כלורידים, מתאפשרת בחינה "כמותית" מאחר והפיזור סביב עקום ה"מסטר" הוא קטן ביותר, וניתן לתרגם סטייה כלפי מעלה מהגבול של 0.6×10^{-16} מטר² לקיצור במחזור החיים מתחת לערך של 50 שנה.

עמוד עם ציור 5.15

עמוד עם ציור 5.16

עמוד עם ציור 5.17

עמוד עם ציור 5.20

6. מסקנות

- א. עבור בטון בעל הרכב נתון נמצא שלצורת האשפפה השפעה ניכרת על תפקוד מרקם הפנים וכתוצאה מכך על מחזור החיים. השפעה זו הרבה יותר גדולה מהשפעת האשפפה על החוזק. למשל, עבור בטון בעל מנת מים של 0.55 נמצא שמחזור החיים המוערך בהשפעת קרבונציה יהיה כ- 40 שנה באשפפה המבוססת על התזת הבטון במים, מדי פעם, במהלך השבוע הראשון. לעומת זאת, אשפפה רציפה במים (כפי שנדרש במפרטים) תאפשר מחזור חיים של כ- 70 שנה.
- ב. בדיקת הספיגות הראשונית של שטח הפנים (ISAT) לא נתנה כל קורלציה סבירה עם הפרמטרים השונים של תפקוד מרקם הפנים. בדיקת מקדם הספיגות הקפילרית נתנה קשרים הרבה יותר טובים, אך בחלקם הם היו תלויים בהרכב הבטון. בדיקת החדירות לאוויר נתנה קורלציות טובות עם הפרמטרים של תפקוד מרקם הפנים שהיו פחות רגישות, ולעתים אף לא רגישות לחלוטין להרכב הבטון. על כן זוהי הבדיקה המומלצת לאפיון אכות מרקם הפנים. בהקשר זה יש לציין שבדיקה זו לא רק שהיא אמינה יותר אלא היא גם "ידידותית" לביצוע בתנאי השטח.
- ג. לאור המסקנה ב – ב' נבחנו בצורה מעמיקה יותר הקשרים המבוססים על בדיקה זו, הן בהקשר של שימוש בה לאומדן פרמטרים תפקודיים של מרקם הפנים (חדירות לכלורידים וקרבונציה) וכן גם בהקשר של אומדן מחזור החיים אשר חושב מתוך הפרמטרים התפקודיים. לגבי שני ההיבטים נמצא שבדיקה זו יכולה לתת אמד "חצי כמותי" לתפקוד מרקם הפנים: עבור ערך של מקדם חדירות אוויר הנמוך מ- 0.2×10^{-16} מטר² מחזור החיים בתנאי כלורידים הוא מעל כ- 50 שנה (בהנחות החישוב כאן). עבור מקדם חדירות אוויר מתחת ל- 0.6×10^{-16} מטר² מחזור החיים בתנאי קרבונציה הוא מעל 50 שנה (בהנחות החישוב כאן). במקרה של הקרבונציה, מראות התוצאות שניתן לפתח גם אמד כמותי, במובן שניתן להעריך את הפגיעה במחזור החיים כתוצאה מערכי חדירות אוויר הגבוהים מהקריטריון הנ"ל. לגבי הכלורידים לא מתאפשרת גישה "כמותית" מלאה, ויש צורך בעבודה נוספת כדי לפתח גישה כזו, תוך שמביאים בחשבון פרמטרים של הרכב הבטון.
- ד. כדי לממש את המסקנות של הדו"ח, נדרש אימות של המסקנות של הבדיקות המעבדתיות ע"י בדיקות שדה. יחד עם זאת, ניתן כבר בשלב זה לגבש הצעה לתקן של שיטת הבדיקה עצמה.

1. Consideration of durability of concrete structures: Past, present and future, A.Neville, Materials and Structures, Vol. 34, pp114-118, 2001
2. Steel Corrosion in Concrete, A.Bentur, S.Diamond and A.Bentur, E&FN SPON, 1997
3. Dhir, R., K. ; Byars, E., A.: PFA Concrete: Permeation Properties of Cover to Steel Reinforcement. Cement and Concrete Research, Vol 23, pp.554-566, 1993
4. Dhir, R.K. ; Hewlett, P.C. ; Chan, Y.N.: Near-surface characteristics of concrete: assessment and development of in situ test methods, Magazin of Concrete Research, Vol.39, No.141, Dec.1987, pp. 183-195. Discussion: Vol.40, No.145, Dec. 1988, pp. 234-244
5. Dinku, A. ; Reinhardt, H. , W.: Gas permeability coefficient of cover concrete as a performance control. Materials and Structures/Matériaux et Constructions, Vol 30, pp.387-393, August-September 1997
6. Levitt M.: An Assessment of the Durability of Concrete by the Initial Surface Absorption Test. Proceedings RILEM Symposium Durability of Concrete, Prague, 1969
7. Torrent, R. ; Frenzer, G.: A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the covercrete. International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin 26.-28.09.1995
8. Torrent, R., J.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site. Materials and Structures, pp.358-365, Vol 25, 1992
9. Torrent, R., J.: Non-Destructive Methods to Evaluate the Concrete Cover State-of-the-Art Report (First Draft). RILEM TC NEC, 11/2001
10. Schönlin, K. and Hilsdorf, H., "Evaluation of the effectiveness of curing of concrete structures", ACI SP-100, Concrete Durability. Katharine and Bryant Mather Intern. Confer., Vol. 1, Detroit, ACI, 1987, pp. 207-226.
11. Montgomery, F.R. and Adams, A., "Early experience with a new concrete permeability apparatus", Proc. 2nd. Int. Conf. on Structural Faults and Repair, Ed. by Forde & Topping, 1985, pp. 359-363.
12. Montgomery, F.R. and Basheer, M., "Durability assessment of concrete bridges by in-situ testing, early results", The Life of Structures. Physical Testing. Armer, G.S.T., Clarke, J.L., Garas, F.K. (Eds.). London, Butterworths, 1989, pp. 352-359.

- 13 Basheer, P.A.M., "Autoclam Permeability System and In-situ Chloride Migration Test", Contribution to RILEM TC NEC, May, 2001, 25 p.
- 14 Torrent, R. und Frenzer, G. "Methoden zur Messung und Beurteilung der Kennwerte des Ueberdeckungsbetons auf der Baustelle - Teil 2", Office Fédéral des Routes, Suisse, Rapport N° 516, Zürich, Oktober 1995, 106 p.
- 15 "Torrent Permeability Tester", Proceq S.A., Zürich, Switzerland, www.proceq.ch
- 16 S. Kubens "Durability of concretes in hot climates – Properties of concrete cover with respect to performance concept. Diploma Thesis. NBRI – Technion, Haifa, Israel. FIB – University Weimar, Germany. April 2002
- 17 Adey, B., Roelfstra, G., Hajdin, R. and Brühwiler, E., "Permeability of existing concrete bridges", 2nd Intern. PhD Symp. In Civil Engng., Budapest, 1998.
- 18 Guth, D.L. and Zia, P., "Evaluation of new air permeability test device", ACI Materials Journal, v. 98, n. 1, Jan-Feb, 2001
- 19 Figg, J.W., "Methods of measuring air and water permeability of concrete", Magazine or Concrete Research, Vol. 25, No. 85, Dec. 1973, pp. 213-219.
- 20 Reinhardt, H.W., Mijnsbergen J. and Croes, J.H., "Can the quality of the concrete cover be measured in practice (in Dutch), Cement (Netherlands), Vol. 40, No. 1, Jan. 1988, pp. 22-26, 60.
- 21 Reinhardt, H.W. and Mijnsbergen, J.P.G., "In-situ measurement of permeability of concrete cover by overpressure", The Life of Structures. Physical Testing. Armer, G.S.T., Clarke, J.L., Garas, F.K. (Eds.). London, Butterworths, 1989, pp. 243-254.
- 22 Torrent, R., und Ebensperger, L.: Studie über "Methoden zur Messung und Beurteilung der Kennwerte des Überdeckungsbetons auf der Baustelle – Teil 1", Office Fédéral des Routes, Suisse, Zürich, Januar 1993, 119 p.
- 23 Hong, C.Z. and Parrott, L.J., "Air permeability of cover concrete and the effect of curing", British Cement Assoc. Report C/5, October 1989, 25 p.
- 24 Parrott, L. and Hong, C.Z., "Some factors influencing air permeation measurements in cover concrete", Materials and Structures, Vol. 24, 1991, pp. 403-408.
- 25 Paulmann, K. and Rostasy F.S., "Praxisnahes Verfahren zur Beurteilung der Dichtigkeit oberflächennäher Betonschichten im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit", Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Techn. Univ. Braunschweig, 1989.
- 26 Hansen, A.J., Ottosen N.S. and Petersen, C.G., "Gas-permeability of concrete in situ: theory and practice", ACI SP-82, In Situ/Nondestructive Testing of Concrete, V.M. Malhotra (Ed.), ACI, Detroit, 1984, pp. 543-556.

- 27 Kropp, J. and Hilsdorf, H.K. (Eds.), "Performance criteria for concrete durability", RILEM Report 12, TC 116-PCD, E & FN Spon, London, 1995, 323 p.
- 28 Levitt, M., "Non-destructive testing of concrete by the initial surface absorption method", Proc. Symp. Non-destructive testing of concrete and timber, Inst. Of Civil Engineers, London, 11-12 June 1969, pp. 23-28.
- 29 Levitt, M., "An assessment of the durability of concrete by ISAT", Proc. RILEM Symp. Durability of Concrete, Prague, 1969.
- 30 Levitt, M., "The ISAT: A non-destructive test for the durability of concrete", British Journal of NDT, July, 1971, pp. 106-112.
- 31 British Standards Institution, "Methods of testing hardened concrete for other than strength", BS1881, Part 5, 1970.
- 32 Gonçalves, A., Contribution to RILEM TC NEC, 27 Apr., 2001
- 33 Concrete Society Working Party, "Permeability testing of site concrete – a review of methods and experience", Concrete Society Technical Report No. 31, London, 1987, 95 p.
- 34 Torrent, R., und Ebensperger, L.: Studie über "Methoden zur Messung und Beurteilung der Kennwerte des Überdeckungsbetons auf der Baustelle – Teil 1", Office Fédéral des Routes, Suisse, Zürich, Januar 1993, 119 p.
- 35 DIN 52617 - "Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen"
- 36 Basheer, P.A.M., "Autoclam Permeability System and In-situ Chloride Migration Test", Contribution to RILEM TC NEC, May, 2001, 25 p.
- 37 Meletiou, C.A., Tia, M. and Blooquist, D., "Development of a field permeability test apparatus and method for concrete", ACI Mater. Journal, v. 89, n.1, Jan-Feb, 1992, pp. 83-89.
- 38 Concrete Society Working Party, "Permeability testing of site concrete - a review of methods and experience", Concrete Society Technical Report No. 31, London, 1987, 95 p.
- 39 Soongswang, P., Tia, M., Blooquist, D. , Meletiou, C.A. and Sessions, L., "Efficient test set-up for determining the water-permeability of concrete", Transportation Research Record No. 1204, 1988, pp. 77-82.
- 40 Gjørsv, O.E., Vennesland, Ø., El-Busaidy, A.H.S., 1977, Electrical resistivity of concrete in the oceans, 9th Annual Offshore Technology Conference, paper 2803, Houston.
- 41 Tuutti, K., 1982 Corrosion of steel in concrete, CBI Stockholm
- 42 Wenner, F., 1915, A method for measuring earth resistivity, Bulletin of the Bureau of Standards, **12**, 469-478

- 43 Stratfull, R. F., 1968, Materials Protection, 29
- 44 Naish, C.C., Harker, A., Carney, R.F.A, 1990, Concrete inspection: Interpretation of potential and resistivity measurements, in: Corrosion of Reinforcement in Concrete, eds. C.L. Page, K.W.J. Treadaway, P.F. Bamforth, 314-332
- 45 Valente, M., Polder, R.B., Cigna, R., Valente, T., 1991, Experimental investigation of concrete resistivity and corrosion rate of reinforcement in atmospheric conditions, TNO report BI-91-173
- 46 Weydert, R., Gehlen, C., 1999, Electrolytic Resistivity of Cover Concrete: Relevance, Measurement and Interpretation, Eighth Conf. on Durability of Materials and Components,
- 47 Feliu, S., Andrade, C., Gonzalez, J.A., Alonso, C., 1996, A new method for in situ measurement of electrical resistivity of reinforced concrete, Materials and Structures, Vol. 29, 362-365
- 48 Whiting, D., "In Situ measurement of the permeability of concrete to chloride ions", ACI SP 82, In Situ/Non Destructive Testing of Concrete, V.M. Malhotra (Ed.), 1984, pp. 501-524.
- 49 ASTM: "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration", ASTM C 1202-97, 1997
- 50 תקן ישראלי ת"י 26 חלק 2: "שיטות לבדיקת בטון: תכונות הבטון הטרי"
- 51 תקן ישראלי ת"י 26 חלק 4: "תכונות בטון קשוי – חוזק"
- 52 RILEM: "Measurement of hardened concrete carbonation depth CPC 18". Materials and Constructions, Vol. 17, No. 102
- 53 א. בנטור, ח. יגרמן. "השפעת שיטות אשפרה בתנאי אקלים חם על טיב מרקם הפנים ועל חדירות הבטון". דו"ח מסכם, שנה א'. הטכניון, חיפה (1986).
- 54 א. בנטור, ח. יגרמן. "השפעת שיטות אשפרה בתנאי אקלים חם על טיב מרקם הפנים ועל חדירות הבטון". דו"ח מסכם, שנה ב'. הטכניון, חיפה (1987).
- 55 א. בנטור, ח. יגרמן. "השפעת שיטות אשפרה בתנאי אקלים חם על טיב מרקם הפנים ועל חדירות הבטון". דו"ח מסכם, שנה ג'. הטכניון, חיפה (1989).
- 56 א. בנטור, ח. יגרמן. "השפעת אשפרה בתנאי אקלים חם-יבש על התפתחות תכונות מרקם הפנים בבטון". המכון הלאומי לחקר הבנייה, בולטין 1992/2, סדרה 12.