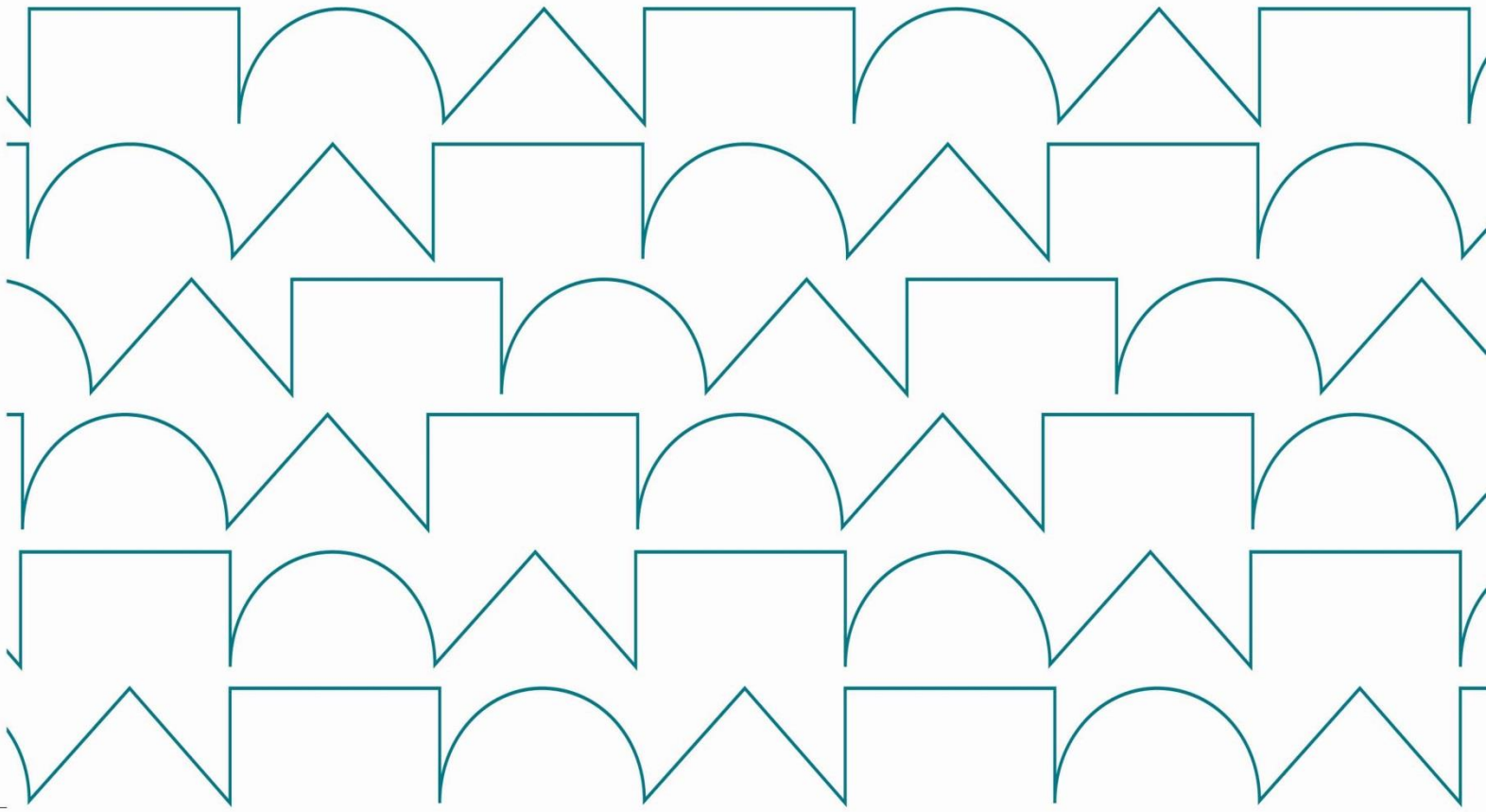
מיסודם של
משרד הבינוי והשיכון

המכון הלאומי לחקר הבנייה

הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

גורמים טכנולוגיים המשפיעים על חוזק החיבור של חיפוי חוץ קשיח והיבטי מכניקת השבר
שלב א': חוזק הידבקות של חיפוי אריחי קרמיקה בקירות בטון

רינה ווסרמן ולדימיר יאגוסט



Founded by מיסודם של

MINISTRY OF CONSTRUCTION AND HOUSING משרד הבינוי והשיכון

TECHNION ISRAEL INSTITUTE OF TECHNOLOGY הטכניון –מכון טכנולוגי לישראל

Faculty of Civil & Environmental Engineering הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

NATIONAL BUILDING RESEARCH INSTITUTE

המכון הלאומי לחקר הבנייה

7900202

גורמים טכנולוגיים המשפיעים על חוזק החיבור של חיפוי חוץ קשיח והיבטי מכניקת השבר
שלב א': חוזק הידבקות של חיפוי אריחי קרמיקה בקירות בטון

ד"ר רינה ווסרמן ד"ר ולדימיר יאגוסט

מלווי מחקר: אדר' ל. זיידמן, צ. לנדאו, אינג' ג. טרכטנברג

בהזמנת משרד הבינוי והשיכון
הזמנה מס. 5181516

Copyright © 2007 by R. Wasserman V. Yagust and, the Ministry of Construction and Housing and the Technion Research and Development Foundation, Ltd, Haifa

תמוז תשס"ח חיפה יולי 2008

למען הסר ספק מודגש בזאת כי החוקר, מוסד הטכניון למחקר ולפיתוח בע״מ והטכניון המכון הטכנולוגי לישראל – אינם ולא יהיו אחראים לכל פגיעה ו/או נזק ו/או הוצאות ו/או הפסד, מכל סוג ומין, שנגרם או עלול להיגרם לרכוש ו/או לגוף, כתוצאה ישירה או עקיפה, למקבל הדו״ח או לצד ג׳ כלשהו, עקב דו״ח זה או בהקשר אליו, לרבות בשל יישום האמור בו.

תוכן עניינים

עמוד

תקציר..... 4

חלק א'. אפיון של מערכות חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה וגורמים המשפיעים על חוזק החיבור של האריח לקיר 6

1. תאור הבעיה וסקר ספרות 6

1.1. סוגים של חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה 6

1.2. מבנה של מערכת חיפוי חוץ שכבתית מאריחי קרמיקה 7

1.3. סוגי כשל במערכת חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה המיושמים בהדבקה 8

1.4. גורמי כשל במערכת חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה המיושמים בהדבקה 8

1.4.1. השפעת גורמי אנוש פנימיים על חוזק ההידבקות במערכת חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה 10

1.4.2. השפעת גורמים חיצוניים על חוזק ההידבקות במערכת חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה 11

1.5. דרישות התקנים הישראלים בנושא חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה 13

1.6. מגרעות הידע והתקנים הקיימים 14

2. מטרת המחקר 16

3. תיאור הניסויים 17

3.1. חומרים..... 17

3.2. הכנת חומרי הדבקה 17

3.3. זמן שמישות לעבודה של חומרי הדבקה 18

3.4. מלאכת החיפוי והכנת המדגמים 18

3.5. אשפרת המדגמים 21

3.6. בדיקות 21

3.6.1. תכונות האריחים 21

3.6.2. חומרי הדבקה 22

3.6.3. אפיון מערכות חיפוי מאריחי קרמיקה/פורצלן 22

4. תוצאות 23
4.1. תכונות הדבקים 23
4.1.1. שירוע 23
4.1.2. מעבר אדים 25
4.1.3. תכונות מכאניות של חומרי הדבקה 25
4.2. תכונות האריחים 27
4.2.1. ספיגה כוללת וספיגה קפילרית 27
4.3. אפיון חיבור האריחים במערכות חיפוי 27
4.3.1. סוגי כשל 27
4.4. חוזק הידבקות האריחים במשיכה צירית 35
4.4.1. השפעת תנאים חמים 35
4.4.2. זמני שמישות בתנאים חמים 35
4.4.3. השפעת חשיפת הדבק לקרינת UV במשך זמן חופשי 42
4.4.4. השפעה משולבת של קרינת UV, טמפרטורת הרקע והאריחים, וחשיפה לתנאים חמים 42
4.4.5. השפעה של לחות הרקע והאריחים 52
4.4.6. בלייה לטווח ארוך בתנאים חמים של מערכות החיפוי אשר בהם נחשף הדבק הטרי להשפעת קרינת UV..... 52
4.5. שיעורי דלמינציה 62
4.6. תצפיות המיקרומבנה באמצעות SEM 62
5. דיון 75
5.1. הקשר בין תכונות הדבק הטרי והדבק הקשוי 75
5.2. השפעת סוג האריח על חוזק החיבור במערכת החיפוי 80
5.3. השפעת תכונות הדבק 81
5.4. השפעת תנאי בלייה על חוזק חיבור האריח במערכת חיפוי 85
5.4.1. השפעת טמפרטורות גבוהות 85
5.4.2. השפעת קרינת UV 87
5.5. השפעת הימצאותם של סדקים וליקויים אחרים בשכבת הדבק על הערכים של חוזק ההידבקות הממוצע במשיכה צירית והפיזור שלו 88
5.6. הסתברות הרס החיבור של אריחים 88

חלק ב'. קביעת עבודת הרס של חיבור אריח וקיר 90

6. סוגי עומסים ועיבורים מאולצים 90

7. חוזק החיבור ועבודת ההרס 90

8. עבודת ההרס במתיחה 91

8.1. סכמה ראשונה של ניסויים 91

8.2. סכמה שנייה של ניסויים 93

חלק ג'. סיכום ומסקנות 120

מראי מקום 125

Abstract

תקציר

שיטת ההדבקה היא השיטה הנפוצה ביותר של חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה בבנייה בישראל. מבנה של מערכת חיפוי חוץ שכבתית מאריחי קרמיקה מתואר בתקן ישראלי ת"י 1555 חלק 1 [1]. בספרות המקצועית מקובל להתייחס למערכת החיפוי מאריחי קרמיקה כמערכת תלת-שכבתית, דהיינו: שכבת אריחים (השכבה החיצונית), שכבת הדבקה (לפעמים שכבה זו משמשת כשכבת יישור) והרקע (הכולל את שכבה נושאת, שכבה מישרת וכל השכבות הבידוד והאיטום במידה וצורך).

למרות התקנים הקיימים בנושא חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה, רבים המקרים של כשל החיבור בין האריח לבין הקיר. ייתכן שהסיבות לכשל הנ"ל נעוצות בחוסר התייחסות התקנים להשפעת הגורמים הטכנולוגיים והגורמים הסביבתיים, כגון: השפעת טמפרטורת הרקע והאריחים, קרינת שמש ישירה, זמן שמישות הדבק בתנאי האתר וכו'. אי לכך, חשוב לחקור את ההשפעה של כל אותם הגורמים על חוזק החיבור בין האריח והקיר, על מנת לקבוע את הגורמים החשובים ביותר אשר קובעים את איכות החיבור.

מטרת המחקר הנוכחי הייתה לקבוע את ההשפעה של גורמי הסביבה האופייניים לאקלים ישראלי, סוג האריחים ומאפייני חומרי ההדבקה המתועשים כפי שמוצהרים ע"י היצרן, על חוזק החיבור במערכת חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה המיושמת על גבי רקע הבטון. הגורמים שנבדקו היו, כדלקמן:

- סוג הדבק – נבדקו 3 דבקים מתועשים המיוצרים ע"י יצרנים שונים והנסחרים בארץ;
- סוג אריח – אריחי קרמיקה (ספיגות של 3% (% משקל)) ואריחי פורצלן (ספיגות של כ-0.5%);
- גורמי סביבה – טמפרטורה ולחות של הרקע והאריחים בעת ביצוע מלאכת החיפוי; קרינת UV הישירה על הדבק במשך הזמן החופשי שלו; זמן שמישות הדבק בתנאי סביבה שונים; זמן חופשי של הדבק.

המחקר הנוכחי מתמקד בלימוד הגורמים אשר עלולים להשפיע על חוזק החיבור של אריחי קרמיקה אל רקע עשוי בטון. בשלב זה לא נחקרו מערכות החיפוי עם רקע מבלוקים מטויחים. זהו השלב הראשון של המחקר בכוון זה, אשר נועד לקבל אינדיקציות לגבי הגורמים הטכנולוגיים שמשפיעים על חוזק החיבור של אריחי קרמיקה במערכת חיפוי חוץ ולהתוות כוונים להמשך בדיקות ומחקר.

תכונות פיסיקליות ומכאניות של כל שלושת הדבקים שנבדקו השתנו חזק בהשפעת תנאי אקלים חמים וקרינת UV. אי לכך, הצהרות היצרן לגבי תכונות הדבקים, כגון: זמן שמישות לעבודה, זמן חופשי וערך מודול אלסטיות הינם תקפים רק בתנאי מעבדה, ולא משקפים את התנהגות הדבק אשר נמצא תחת השפעת גורמי הסביבה האופייניים לאקלים ישראלי.

התוצאות אשר התקבלו במסגרת המחקר הראו בבירור ש-:

- יש מקום לבחון האם להתיר שימוש בדבקים אשר אינם "נדבקים" לאריח וגורמים לכך שסוג הכשל העיקרי במערכת החיפוי בין הדבק לבין האריח. נושא חיזוק פן הביניים במערכת החיפוי הינו נושא מורכב ומחייב עבודת מחקר מעמיקה ושיטתית אשר תאפשר להציע את הדרכים המעשיות לשיפור ההדבקה בין האריח לדבק;

- כדי למנוע את הפגיעה המשמעותית בחוזק ההידבקות במערכת החיפוי מאריחי קרמיקה/פורצלן יש מקום לבחון האם להתיר ביצוע עבודות החיפוי על גבי רקע חם ועם אריחים חמים;
- במחקר הנוכחי נחשפה לראשונה בעיית האי עמידות בקרינת UV בזמן ביצוע עבודות החיפוי של דבקים צמנטיים פולימריים המשמשים להדבקת חיפוי חוץ בארץ. אי לכך, נראה כי יש מקום לבחון האם להתיר ביצוע עבודות החיפוי בתנאי קרינת שמש ישירה במקרים של השימוש בדבקים הלא עמידים בקרינת UV.

<u>חשוב להדגיש שזהו השלב הראשון של המחקר בכוון זה, אשר נועד לקבל אינדיקציות לגבי הגורמים הטכנולוגיים שמשפיעים על חוזק החיבור של אריחי קרמיקה במערכת חיפוי חוץ ולהתוות כוונים להמשך בדיקות ומחקר. אין לראות בממצאים ראשוניים שהתקבלו במסגרת שלב המחקר הנוכחי אלא תוספת לידע הקיים ובסיס למיקוד תשומת הלב להמשך חקירה לפני יישום כלשהו.</u>

חלק א'. אפיון של מערכות חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה וגורמים המשפיעים על חוזק החיבור של האריח לקיר

1. תאור הבעיה וסקר ספרות

1.1. סוגים של חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה

חיפוי הקירות באריחי קרמיקה היה בשימוש רחב בבנייה מונומנטלית ואורבנית מקדמת דנא. בבנייני מגורים התחיל היישום הרחב של חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה החל משנות ה-60 של המאה הקודמת. הסיבות העיקריות לבחירת אריחי קרמיקה כחומר חיפוי חוץ הן המראה האסתטי והקיים לטווח ארוך. השיטות העיקריות של ביצוע חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה הן:

- <u>אריחי קרמיקה המיושמים בהדבקה</u>[1]. שיטה זו הינה עתירת היסטוריה של שימוש בכל העולם. שיטה זו נפוצה מאוד גם בימינו, הן בבניינים רגילים, והן בבנייה לגובה. בשיטה זו מודבקים האריחים אל הרקע באמצעות מלט צמנטי המוכן באתר או בעזרת הדבקים המתועשים. משנות ה-90 של המאה הקודמת החל בבנייה בארץ השימוש הרחב בדבקים מתועשים. דבקים מתועשים מהווים את התערובת המיוצרת במפעל מצמנט פורטלנד, אגרגטים דקים ופולימרים למיניהם אשר מיועדים, <u>לפי הצהרות היצרן</u>, לשיפור גמישות הדבק בהשוואה למלט צמנטי רגיל ולהגברת כושר הידבקות האריחים אל הרקע;
- <u>יציקת אלמנטים טרומים המחופים באריחי קרמיקה</u>. שיטה זו החלה לראשונה אחרי מלחמת העולם השנייה כאשר באירופה צץ הצורך המיידי לשקם את משק הנדל"ן אשר ניזוק קשות במלחמה. אי לכך, פותחו בשנות ה-60 שיטות בנייה מתועשות המבוססות על השימוש בפאנלים טרומים המחופים באריחי קרמיקה במפעל.

במדינת ישראל התפתחות שיטת בנייה זו מ נבעה גלי העלייה הגדולים של שנות ה-70 וה-90 ומהצורך בתיעוש הבנייה. אי לכך, שיטה זו הינה נפוצה גם בארץ החל משנות ה-80 של המאה ה-20;

בשיטה זו ייצור אלמנטים טרומיים מתבצע בתבניות מיוחדות. בתחתית התבנית מונחים אריחי קרמיקה. על גב האריח שמים את המרווחונים, אשר מיועדים להבטחה של עובי כיסוי הפלדה המספיק וקיבוע אריחי קרמיקה ע"י מילוי בטון בפן הביניים בין האריח לבין רקע.

כאשר אלמנט טרומי עשוי בלוקים, שיטת חיבור החיפוי הינה דומה למתואר לעיל. ההבדל העיקרי מתבטא בכך שהרווח בין גב האריח והבלוקים מתמלאים בדייס צמנטי ולא בבטון יצוק.

- <u>קיבוע מכאני יבש</u>. שיטה זו ידועה בחיפוי קירות בלוחות אבן טבעי. בעשור האחרון חדרה השיטה גם לתחום חיפויים מאריחי קרמיקה. השיטה משמשת לקיבוע מכאני של אריחי פורצלן בשטח מעל 0.16 מ"ר ולוחות קרמיקה דקים וגדולים במיוחד;

מאחר ששיטת ההדבקה היא השיטה הנפוצה ביותר בבנייה בישראל, המחקר הנוכחי מתמקד בשיטה זו.

---

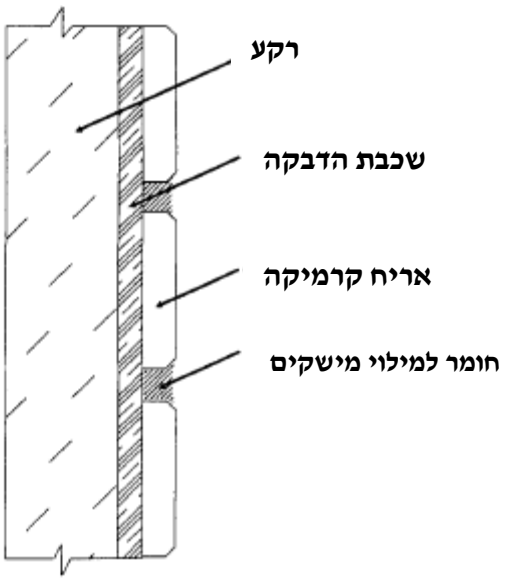
[1] כאן ולהלן בסעיף זה מתיחס המונח "חיפוי באריחי קרמיקה" והנגזרות ממונח זה לכל סוגי אריחי קרמיקה, דהיינו: אריחי קרמיקה, אריחי פורצלאן ואריחי פסיפס.

1.2. מבנה של מערכת חיפוי חוץ שכבתית מאריחי קרמיקה

מבנה של מערכת חיפוי חוץ שכבתית מאריחי קרמיקה מתואר בתקן ישראלי ת"י 1555 חלק 1 [1]. המערכת בנויה ממספר שכבות. כל אחת מהשכבות עשויה מחומרים שונים ולכל אחת מהשכבות יעוד ספציפי משלה, דהיינו:

- שכבת האריחים. זאת השכבה החיצונית ביותר, והיא עשויה מאריחי קרמיקה עם חומר למילוי מישקים בין האריחים. שכבה זו מהווה חזית עמידה בפני השפעות הסביבה ומקנה למערכת החיפוי את המראה הדקורטיבי הרצוי;
- שכבת הדבקה. זאת השכבה בה מיושמים האריחים. שכבה זו מאפשרת את הדבקת האריחים אל הרקע. השכבה עשויה בד"כ ממלט צמנטי או מדבקים צמנטיים-פולימריים מתועשים;
- שכבה מיישרת. שכבה זו מהווה חלק מרקע. שכבה מיישרת קיימת רק בקירות בהם צריך "לתקן" ליקויים כל שהם בפני הרקע, דהיינו: סטיות ממישוריות, חורים, אי-אחידות פני השטח וכו'. בחלק מהמקרים שכבה זו משמשת לבידוד תרמי של הקיר. כמו כן היא עשויה לכלול גם את הרשתות לחיזוק והקשחה של מערכת החיפוי;
- רקע. מהווה את השכבה הנושאת (load-bearing layer) אשר מעבירה את העומסים הן מהחיפוי, והן מהרכיבים האחרים של המבנה. שכבה זו עשויה מבטון יצוק, בלוקי בטון, לבנים או פנלים טרומים.

בספרות המקצועית מקובל להתייחס למערכת החיפוי מאריחי קרמיקה כמערכת תלת-שכבתית, דהיינו: שכבת אריחים (השכבה החיצונית), שכבת הדבקה (לפעמים שכבה זו משמשת כשכבת יישור) והרקע (הכולל את שכבה נושאת, שכבה מישרת וכל השכבות הבידוד והאיטום במידה וצורך). ציור 1 מציג מבנה תלת שכבתי זה של מערכת חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה.



ציור 1. מערכת חיפוי חוץ שכבתית מאריחי קרמיקה [1]

1.3. סוגי כשל במערכת חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה המיושמים בהדבקה

לעומת היתרונות הרבים של חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה, למערכת חיפוי זה קיימות הבעיות אשר מתפתחות בעת תקופת השירות של החיפוי. הבעיות הנפוצות ביותר הן הופעת הסדקים, דלמינציה של שכבת האריחים מהרקע ונשירת האריחים. ליקויים אלה גורמים לגידול דרסטי בהוצאות תחזוקת המבנה, והנשירה או נפילת האריחים מהוות סכנה בטיחותית.

תקן ישראלי ת"י 4004 חלק 1 [2] מפרט את סוגי הכשל במערכת חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה. התקן מבדיל בין שני סוגי הכשל:

- כשל לכידות (cohesion fracture). כשל מסוג זה מתרחש בתוך חומר כל שהו של המערכת השכבתית;
- כשל הידבקות (adhesion fracture). כשל זה מתרחש בפן הביניים בין שכבות המערכת.

שישה דפוסי הכשל במערכת החיפוי מאריחי קרמיקה [2]:

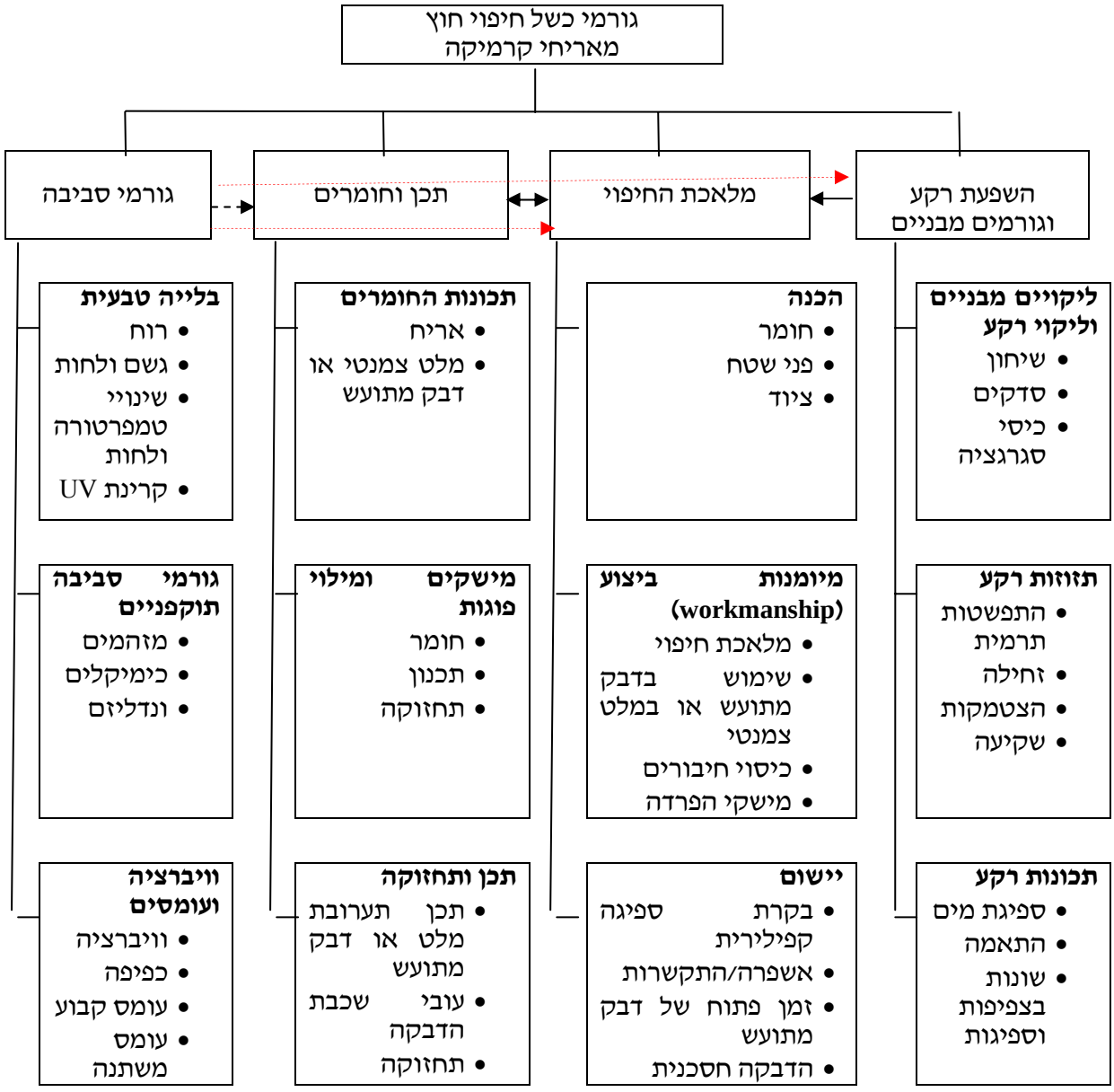
א. כשל לכידות:
- ❖ בדבק עצמו, CF-A (cohesive fracture in adhesive);
- ❖ באריח עצמו, CF-T (cohesive fracture in tile);
- ❖ בתוך רקע, CF-S (cohesive fracture in substrate)

ב. כשל הידבקות:
- ❖ כשל הידבקות בין דבק לתשתית, AF-S (adhesive fracture in substrate);
- ❖ כשל הידבקות בין אריח לדבק, AF-T (adhesive fracture in tile);
- ❖ כשל הידבקות בין האריח לדיסקית המשיכה, BT

מתוך שישה דפוסי הכשל הנ"ל רק חמישה עלולים להתרחש במערכת החיפוי בעת השירות. דפוס הכשל BT הינו כשל מלאכותי שעלול להתרחש רק בעת הביצוע של בדיקת חוזק ההידבקות במתיחה צירית.

1.4. גורמי כשל במערכת חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה המיושמים בהדבקה

הבעיות במערכות חיפוי מאריחי קרמיקה ידועות במדינות רבות. אי לכך, בעשור האחרון בוצעו בעולם מספר העבודות אשר בוחנות את סיבות התרחשות הכשל במערכת חיפוי מאריחי קרמיקה המיושמים בהדבקה [3 – 13]. חשוב להדגיש שלדעת רוב אנשי המקצוע, הופעת הליקויים אופיינית לאו דווקא למערכות החיפוי הישנות, אלה הבעיות בחיפוי מאריחי קרמיקה עלולות להתרחש כבר ב-5 שנים הראשונות אחרי הדבקת האריחים כולל במבנים חדשים. הבעיות במערכות החיפוי הישנות נובעות מהתחזוקה הלקויה, בעוד שהופעת הליקויים במערכות חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה במבנים החדשים נובעת מליקויים במלאכת החיפוי של אריחי קרמיקה, מהעדר הפיקוח אחרי ביצוע עבודת החיפוי ומהתכנון הלקוי [4 – 5, 9]. ניתוח סיבות הכשל במערכות החיפוי מאריחי קרמיקה דורשת גישה הוליסטית ומאחדת את כל הגורמים הרלוונטיים, כפי שזה נעשה ב-[9]. מחקר זה מנתח לעומק את כל גורמי הכשל הפוטנציאליים במערכות חיפוי מאריחי קרמיקה, ציור 2.



ציור 2. היאררכיה של גורמי כשל פוטנציאליים במערכת חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה המיושמים בהדבקה (לפי [9])

כפי שמוצג בציור 2 ניתן לסווג את כל גורמי הכשל ל-4 קבוצות עיקריות:

א. גורמי סביבה;

ב. תכן וחומרים;

ג. מלאכת החיפוי;

ד. השפעת רקע וגורמים מבניים.

גורמים אשר שייכים לקבוצות א׳ ו-ד׳ לעיל הינם גורמים חיצוניים (extraneous factors) של תהליך החיפוי. בעוד שהגורמים השייכים לקבוצות ב׳ ו-ג׳ מהווים גורמי אנוש פנימיים (intrinsic human factors) של תהליך החיפוי באריחי קרמיקה.

1.4.1. השפעת גורמי אנוש פנימיים על חוזק ההידבקות במערכת חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה

בקרב אנשי המקצוע מקובל להתייחס לגורמים החיצוניים כגורמים הבלתי נמנעים של תהליך החיפוי. אי לכך, כדי להבטיח את הקיים לטווח ארוך של מערכת החיפוי חשוב שגורמי האנוש הפנימיים יאזנו או אפילו יקזזו את ההשפעה השלילית של הגורמים החיצוניים. מהניסיון המעשי ידוע שגורמי אנוש פנימיים עלולים לגרום להתפתחות הכשל מסוגים CF-A, AF-S ו-AF-T (ראה סעיף 1.3).

הניסיון המעשי המצטבר של תהליכי החיפוי במדינות רבות בעולם מעיד על כך שהגורם האנושי עלול להזיק במידה משמעותית לאיכות החיפוי, וחשוב לדעת לאמוד את הנזק אשר נגרם לתיפקוד המבנה עקב הליקויים במערכת החיפוי.

במחקרים [3 – 13] מדווחות תוצאות המחקרים אשר בדקו את סיבות הכשל במערכת חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה. במחקרים הללו נעשה מאמץ לאמוד את השפעת הגורמים הפנימיים והחיצוניים על חוזק ההידבקות של אריחי קרמיקה. נמצא כי לגורמים הפנימיים, דהיינו בחירת חומרי הדבקה, תכן תערובת הדבקה ומלאכת החיפוי[2], הייתה ההשפעה המכרעת על חוזק הידבקות האריחים.

כך, לדוגמה, נמצא שהערבוב הלקוי של חומר ההדבקה גורם לקבלת שכבת הדבקה לא אחידה בהרכב. כתוצאה מכך, חוזק שכבת ההדבקה עלול להיות לא קונסיסטנטי ולרדת ב-28% עד כ-60% בהשוואה לחוזק מערכת החיפוי התקינה [5].

המינון הלא נכון של מרכיבי חומר ההדבקה עלול לגרום לקבלת חומר הדבקה פריך או חלש עם סדקים עמוקים ורחבים שנוצרים עקב הצטמקות בייבוש. חוזק ההידבקות במערכת זו יהיה ב-33% עד 62% יותר קטן מחוזק מערכת החיפוי התקינה [5].

שיעורי ירידת חוזק דומים נצפו גם כאשר פני הרקע לא הוכנו כהלכה ולא נעשה שימוש בחומר משפר הידבקות (primer) של שכבת ההדבקה עם הרקע. אי לכך נוצרו דלמינציות בין השכבות במערכת החיפוי, עד כדי נשירה מוחלטת של שכבות החיפוי וההדבקה מהרקע.

בספרות המקצועית ניתן למצוא גם התייחסות להערכת ההשפעה של המיומנות בביצוע עבודות חיפוי חוץ עם חומרי הדבקה מסוגים שונים. ב-[5] דווח שהמיומנות הלקויה של ביצוע עבודת החיפוי באמצעות הדבק המתועש במקום מלט צמנטי רגיל עיכבה את משך שלב ההדבקה,

---

[2] - מלאכת החיפוי מוגדרת בספרות המקצועית כמאמץ משותף של צוות הבנאים לקבע את האריחים ע״ג הרקע [5]. מלאכת החיפוי מהווה לקט פעולות רבות והיא משפיעה במידה ניכרת על תיפקוד הקיר המחופה. מלאכת החיפוי כוללת:

- בשלב ההכנה לביצוע החיפוי - ניקוי, שיוף, יישור והרטבת הרקע (במידת הצורך);
- בשלב הכנת החומר - מינון נכון של מרכיבי תערובת ההדבקה וערבובם לפי סדר הפעולות המוצע ע״י יצרן חומר הדבקה;
- בשלב ההדבקה – שמירת ההוראות לגבי זמן פתוח של חומר הדבקה, מניעת התנאים אשר מעודדים את היווצרות הקרום על פני חומר הדבקה; שיפור הדבקת האריחים אל הרקע ע״י הפעלת לחץ עזר על האריח מיד לאחר הדבקתו, הבטחת כיסוי מלא של גב האריח בחומר הדבקה וכו׳;
- אחרי ההדבקה – שמירת החיפוי במצב יבש למשך 24 שעות לפחות.

וכתוצאה, זה גרם לפיזור של כ-50% בתוצאות חוזק ההידבקות, בעוד שבמקרה של שימוש במלט צמנטי רגיל הפיזור היה עד כ-20%.

אי-שמירת הפרמטרים הטכנולוגיים, כגון: הארכת הזמן הפתוח של חומר הדבקה והעדר המגע המירבי בין האריח לבין חומר ההדבקה, עשויים גם כן לגרוע מחוזק הידבקות החיפוי. כך, הארכה ב-50% של זמן פתוח של דבק צמנטי-פולימרי מעבר לזמן המוצהר ע"י יצרן, גרמה לירידה של כ-75% בחוזק הידבקות האריחים במתיחה צירית [5]. שיעור עוד יותר גבוה של ירידת החוזק התקבל כאשר המגע בין האריח לבין שכבת הדבק היה רק 60% משטח האריח. במקרה זה ירד חוזק הידבקות האריחים במתיחה צירית מ-1.3 מגפ"ס עד 0.2 מגפ"ס. ב-[14] קיימת דרישה שכיסוי האריח בדבק טרי בחיפוי חוץ יהיה לפחות 95%. רק במקרה זה ניתן להבטיח את החיבור המלא בין האריח ושכבת החיבור ולקבל חוזקי הידבקות האריחים במתיחה צירית מעל 0.5 מגפ"ס. בארץ טרם נקבעה הדרישה התקנית של בדיקת איכות המגע בין האריח לבין שכבת ההדבקה.

1.4.2. השפעת גורמים חיצוניים על חוזק ההידבקות במערכת חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה

למרות שלגורמי האנוש הפנימיים יש השפעה מדרגה ראשונה על חוזק ההידבקות במערכת חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה, לא ניתן להסביר כל מקרה כשל רק ע"י השפעת הגורמים האלה.

הניסיון המצטבר של המעקב אחרי התיפקוד של מערכות חיפוי חוץ מעיד על כך שלגורמים החיצוניים עלולה להיות ההשפעה השלילית המירבית על חוזק החיבור במערכת החיפוי.

כך למשל, התזוזות וליקוי הרקע והליקויים המבניים עלולים לבוא לידי ביטוי בהתפתחות כשלי לכידות CF-S, CF-T ו-CF-A. בציור 3 ניתן לראות את הופעת הסדיקה ברקע ובחיפוי חוץ מאריחי פסיפס כתוצאה מתזוזות רקע או מהליקויים המבניים בבניין.



ציור 3. הופעת כשל בחיפוי חוץ בפרויקט ורד העיר ברעננה, שנת 1998

מערכת חיפוי חוץ נמצאת בהשפעה מתמדת של גורמי הסביבה אשר עלולים לגרוע מהקיים ומהתיפקוד שלה. הגישה המקובלת היא: גורמי הסביבה הם הגורמים אשר השפעתם אינה

מיידית והיא מתרחשת לאורך זמן רב. נעשו מחקרים רבים להערכת השפעת גורמי הסביבה על המרכיבים הבודדים של מערכות החיפוי, אבל אומדן ההתנהגות של כל המערכת לטווח ארוך אינה מעשית עקב מספר המשתנים הרב. אי לכך, בשנים האחרונות נעשה מאמץ לקבוע את פוטנציאל התפתחות הכשלים במערכות החיפוי. ב-[12] נעשתה הערכת ההסתברות של התפתחות הכשל במערכת חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה בבניינים רבי קומות (מ-27 עד 33 קומות) אשר גילם מעל 20 שנים. המבנים נבנו בסביבה אורבנית בתנאי אקלים סובטרופי . שטח הדלמינציה בחזיתות הבניין נקבע באמצעות בדיקת ההקשה בפטיש גומי. שיעור שטח דלמינציה במערכת חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה בבניינים הנ״ל השתנה בין 0.3% ל-55%. נמצא ששיעור הדלמינציה במערכת חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה היא פונקציה של גיל מערכת החיפוי, הגיאומטריה ושטח החזית, כיוון החזית ותנאי ההצללה. מערכת חיפוי שגילה מעל 20 שנים מעלה את הסתברות של כשל הדלמינציה בשיעור של כ-12% בכל 5 שנים. בבניינים עם גיאומטרית קומות יותר פשוטה (4 ו-6 דירות בקומה עם פחות פינות בהיקף) קטנה ההסתברות לכשל בדלמינציה ב-4% עד 11% בהשוואה לבניינים עם גיאומטריה מורכבת (8 דירות בקומה, פינות רבות בהיקף הקומה). הסתברות כשל הדלמינציה בחזיתות דרום-מערביות היא יותר גדולה מאשר בחזיתות צפון-מזרחיות. החשיפה המלאה לקרינת שמש בחזית המערבית גורמת לעלייה בהסתברות הכשל בדלמינציה. אביזרי הצללה כמו גגונים מעל מתלי כביסה עשויים להקטין את הסתברות הכשל בדלמינציה ב-10% בהשוואה לחזיתות ללא גגונים כאלה.

מבין גורמי הסביבה המפורטים בציור 2 חשוב לציין שהבניינים בישראל חשופים במידה ניכרת לגורמי בלייה טבעית, כמו שינויי טמפרטורה ולחות וקרינת UV, ולגורמי הסביבה התוקפניים, כגון: מזהמים וכימיקלים. מבחינת מדד UVI[3], ישראל תופשת את אחד המקומות הראשונים בין המדינות המתועשות בנוגע למדד UVI הקיצוני.

קרינת UV הינה הסיבה העיקרית של התפרקות פוטוכימית של רוב הפולימרים הטבעיים והמסונטרים. התפרקות פוטוכימית זו עלולה לבוא לידי ביטוי בהיווצרות שכבה מפוררת על פני החומר (chalking), מיקרו-סדיקה (microcracking), דהיית צבע (color fading), חימצון עצמי (auto-oxidation), ופגיעה בתכונות מכאניות. בדיקת העמידות ב-UV של חומרים אורגניים ופולימריים הינה בדיקה תקנית [17]. מההיבט ההנדסי נחשבת קרינת UV כגורם מסוכן לקיים של חומרים פולימריים. עד הזמן האחרון נחשבה קרינת UV כגורם של בליית מערכות צמנטיות. ב-[18] הוכח שלקרינת UV קיימת השפעה מזיקה למערכות צמנטיות.

למרות המודעות של אנשי המקצוע לסכנה הטמונה בקרינת UV לחומרים פולימריים השפעתה על הדבקים המתועשים הכוללים פולימרים לא נבחנה כלל. מחברי דו״ח מחקר זה לא הצליחו

---

[3] - מדד UVI מתאר את רמת קרינת UV על פני כדור הארץ [16]. מדד UVI נמדד במספרים שלמים ללא יחידות. ככל שמדד UVI יותר גבוה, כך הסכנה לבן אדם החשוף לשמש באותו רגע יותר גדולה. רמות מדד UVI הם, כדלקמן:

- 2 > - נמוך;
- 3 – 5 – בינוני;
- 6 – 7 – גבוה;
- 8 – 10 – גבוהה מאוד;
- 11 - 16 – קיצוני.

בישראל מגיע מדד UVI בקיץ לערכים מ-7 עד 11.

למצוא מקורות ספרותיים המתארים בדיקות לקביעת העמידות לקרינת UV של דבקים מתועשים על בסיס צמנטי. לפי הצהרות היצרנים הסיבה לכך היא הזמן הפתוח הקצר לפני הדבקת האריחים , דהיינו: עד 30 דקות. לעומת זאת לאור תוצאות המחקר [12] אשר בוצע במדינה עם רמות מדד UVI דומות לישראל ועקב המחקרים האחרונים המאמתים את הדעה של אנשי המקצוע בדבר סכנת היווצרות הקרום על פני הדבק, [10], נראה לנכון לבדוק את השפעת קרינת UV על חוזק החיבור של מערכת החיפוי מאריחי קרמיקה המיושמים באמצעות דבקים מתועשים.

1.5. דרישות התקנים הישראלים בנושא חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה

כדי להסדיר את תהליך חיפוי החוץ מאריחי קרמיקה, אושר בישראל בשנת 1998 תקן ישראלי 1555 חלק 1 [1]. בעת הכנת דו"ח זה נמצא תקן זה ברוויזיה לאור הופעת כשלים רבים במערכות חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה.

תקן ישראלי זה קובע את הדרישות לתכנון מערכת החיפוי, סדר הפעולות של מלאכת חיפוי חוץ ומפרט את שיטות הבדיקה של חוזק הידבקות האריחים והדרישות לחוזק זה בתלות בסוג האריח, אריחי קרמיקה בגודל עד 0.16 מ"ר או אריחי פסיפס. הדרישות העיקריות של תקן ישראלי ת"י 1555 חלק 1 לגבי חוזק ההידבקות במערכת החיפוי הן:

- אריחי קרמיקה. חוזק הידבקות ממוצע במשיכה צירית – 0.5 מגפ"ס, לפחות. חוזק הידבקות של כל דוגמת בדיקה – 0.25 מגפ"ס, לפחות;
- אריחי פסיפס – 0.3 ו-0.15 מגפ"ס, לפחות, בהתאמה

רוויזית התקן מציעה להגדיל את הספים לחוזק ההידבקות, הממוצע והמינימלי, במערכת החיפוי כפונקציה של גודל האריח.

כמו כן, מפרט תקן ישראלי ת"י 1555 חלק 1 את ההבדלים במלאכת ביצוע עבודות החיפוי בתלות בגודל האריח. כך, אריחים עם צלע עד 200 מ"מ מודבקים ללא מריחת דבק על גב האריח, ז"א הם מודבקים בשכבת דבק אחת אשר נמרחת על פני הרקע. לעומת זאת, בהדבקת האריחים בגודל מעל 200 מ"מ שיטת ההדבקה היא של שתי שכבות דבק, דהיינו: הדבק מיושם הן על פני הרקע, והן על גב האריח סמוך להדבקתו. ברור ששיטת הדבקה בשכבה אחת של דבק מתבטאת בחוזק הידבקות יותר נמוך של מערכת החיפוי בהשוואה לשיטת הדבקה בשתי שכבות הדבק.

נושא איכות הדבקים לחיפוי חוץ מעוגן בתקן ישראלי ת"י 4004 [2], עליו מסתמך גם ת"י 1555.

חלק ממאפייני הדבקים אשר נדונים בת"י 4004 נקבעים ע"י הצהרת היצרן, דהיינו:

- קיים בהחסנה ("חיי מדף") – זמן החסנה בתנאים נקובים, שבמהלכו ניתן לצפות כי יישמרו תכונות העבודה של הדבק;
- זמן הבשלה – פרק הזמן שבין מועד הערבוב של דבק צמנטי לבין המועד שבו הוא מוכן לשימוש;
- זמן השמישות לעבודה – פרק הזמן שבמהלכו ניתן להשתמש בדבק לאחר ערבובו;

הספים הכמותיים לתכונות הדבק מפורטים בתקן ישראלי ת"י 4004 כלהלן:

- <u>זמן חופשי</u> - פרק הזמן המרבי לאחר ההשמה, שבו ניתן להדביק אריחים בדבק תוך עמידה בדרישה הנקובה לחוזק ההידבקות במתיחה. דרישת התקן – 20 דקות, לכל היותר, כאשר חוזק הידבקות החיפוי במערכת חייב להיות מעל 0.5 מגפ"ס בגיל של 28 ימים;
- <u>החלקה</u> - תנועה כלפי מטה של אריח המושם על שכבת דבק מסורקת על גבי משטח אנכי או משופע. דרישת התקן – מותרת החלקה עד 0.5 מ"מ;
- <u>חוזק הידבקות הדבק במשיכה צירית אל פלטת בטון</u> (חוזק ראשוני של הידבקות במתיחה בגיל 28 ימים; חוזק הידבקות במתיחה לאחר טבילה במים; חוזק הידבקות במתיחה לאחר בלייה בחום; חוזק הידבקות במתיחה לאחר מחזורי הקפאה והפשרה) – 0.5 מגפ"ס, לפחות.

<u>1.6. מגרעות הידע והתקנים הקיימים</u>

ניתוח המידע הקיים בנושא חיפוי חוץ מאפשר להגיע למסקנות:

א. המחקרים השיטתיים שבוצעו בתחום זה הינם מעטים. אומנם הם מפרטים את סיבות הופעת הליקויים במערכת חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה, אבל כמעט ולא בוחנים את שירות המערכת בתנאי אמת.

ב. התקנים בנושא חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה נותנים "חופש פעולה" גדול ליצרני הדבקים:

- "במהלך מלאכת חיפוי הקיר ... מקפידים על מילוי הוראות *(של)*... יצרן חומרי ההדבקה" (תקן ישראלי ת"י 1555, חלק 1, קובץ כללים לעבודות בנייה [1]);
- "יחסי הגומלין בין האופיינים לבין תנאי העבודה (יובש או לחות, מזג אוויר חם, ייבוש מהיר וכדומה) אינם נכללים בתקן זה.

היצרן יספק מידע על דרך השימוש במוצר ועל תנאי השימוש המתאימים.
מחבר המפרט הטכני יעריך את מצב אתר העבודה (השפעות מכאניות ותרמיות) ויבחר במוצר המתאים תוך התחשבות בכל הסיכונים האפשריים" (תקן ישראלי ת"י 4004 [2]).
אי לכך, היצרן חייב להעביר למחבר המפרטים הטכניים ולמבצע עבודות החיפוי את כל המידע הרלוונטי, <u>הבדוק והמוסמך</u> על התאמת המוצר שלו לתנאי האתר הספציפיים (מיקום גיאוגרפי; עונה; שעת היום; כיוון החזית המחופה וכו'). עיון במידע שמופיע בעלוני הנתונים הטכניים של <u>כל</u> יצרני הדבקים בארץ יגלה כי אינו מספיק להערכת ההשפעה של כל הסיכונים האפשריים בתנאי האקלים הישראלי;

ג. התקנים בנושא חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה מגבילים ביצוע עבודות החיפוי רק בתנאים קיצוניים של טמפרטורה ולחות יחסית: "לא ניתן לבצע את החיפוי בתנאי כפור וטמפרטורות קיצוניות (מתחת ל-5° צ' או מעל 35° צ'), ובנשוב רוחות חזקות או בימי שרב" [1]. מדרישת תקן הנ"ל לא מובן בכלל לאיזה טמפרטורה שייכות ההגבלות הללו, דהיינו: טמפרטורת האוויר או טמפרטורת הרקע. ידוע, שטמפרטורות הרקע עלולה להגיע ל-66° - 88° צ' אפילו בימים בהם הטמפרטורה ולחות האוויר אינן קיצוניות [19].

ההשפעה של "חום" הרקע על שינוי תכונות הדבקים ועל חוזק הידבקות האריחים לא נלקחת בחשבון כלל ע"י התקנים ולא מאוזכרת כלל במידע המסופק ע"י יצרני הדבקים.

ד. יצרני הדבקים מדווחים בעלוני מידע טכני לגבי זמן שמישות הדבק לעבודה והזמן החופשי שלו אשר נקבעו בתנאי מעבדה (20° צ' ו-50% לחות יחסית). התנהגות הדבק בתנאי האתר הספציפיים אינה ידועה מראש למשתמש. זה עלול להטעות את הצרכנים בנוגע לבחירת הדבק המתאים לתנאי הסביבה הספציפיים.

ה. טרם נערכה כלל בחינה של השפעת קרינת השמש אשר נספגת ע"י הדבק במשך זמן השמישות לעבודה והזמן החופשי שלו. ידוע, שקרינת UV עלולה לגרום לשינויים בהרכב ובמיקרומבנה של החומרים הפולימרים. אי לכך, קיימת סכנה שיתרחשו שינויים בהרכב הדבק עוד לפני הדבקת האריח. קרינת השמש עלולה לגרום להיווצרות הפילם הפוגע בהידבקות האריחים [10]. יחד עם זאת, עדיין לא ברור מתי עלולה להתרחש היווצרות הפילם על פני הדבק ומהם הגורמים העיקריים שמשפיעים על התהליך הזה בתנאי האקלים הישראלי;

ו. מובן שהתקנים הטכניים נשענים על הידע הקיים בתחום הרלוונטי בעת הכנת התקן. כל עוד כמעט שלא נעשו מחקרים מעמיקים בנושא חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה בארץ ובעולם, קשה לצפות שהתקנים והמידע הטכני המסופק ע"י יצרני הדבקים המתועשים יכללו את כל ההיבטים הרלוונטיים לתנאי הסביבה בישראל. לכן, חשוב לבדוק במחקר שיטתי ומעמיק את ההשפעה של אותם גורמי סביבה שטרם נלקחו בחשבון בעבר, על התפתחות הכשל במערכות חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה בישראל;

ז. ניתן לבצע את הערכת ההיתכנות של כשל חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה באמצעות חישובים, וזה כתוצאה של השפעתם הבו זמנית של גורמי כשל רבים, כגון: משקל עצמי של אריחים, רוח, שינוי טמפרטורה ולחות, עיבורי זחילה ברקע, וכו'. כשל החיפוי תמיד מלווה בהתפתחות הסדיקה בדבק בתחום שבין האריח לבין הרקע. הסדק מתפתח במישור המקביל לרקע. האמצעים של מכאניקת השבר מאפשרים לבצע את חישובי ההערכה רק אם ישנו מאפיין לחוזק החיבור, כמו עבודת ההרס. הבעיות שנדונו ונחקרו באמצעות מכאניקת השבר בעבר נגעו במערכות חיפוי מתחומי הנדסה אחרים מאשר הנדסה אזרחית. הם בדקו את חוזק החיבור בהשפעת גורמים שונים מאלה שקיימים בחיפוי קירות חוץ. גם החומרים שנבדקו במחקרים אלה היו שונים מחומרי בנייה הנדונים במחקר זה. חישוב חוזק החיבור במערכת חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה מבוסס על ערכי עבודת ההרס אשר מתקבלים בניסויים מיוחדים שטרם בוצעו בעבר. פיתוח מודל חישובי לקביעת חוזק החיבור עשוי להקנות למתכננים כלי טוב לתכנון חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה.

<u>סיכום:</u> למרות התקנים הקיימים בנושא חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה, רבים המקרים של כשל החיבור בין האריח לבין הקיר. ייתכן שהסיבות לכשל הנ"ל נעוצות בחוסר התייחסות התקנים להשפעת הגורמים הטכנולוגיים והגורמים הסביבתיים אשר מתוארים לעיל. אי לכך, חשוב לחקור את ההשפעה של כל אותם הגורמים על חוזק החיבור בין האריח והקיר, על מנת לקבוע את הגורמים החשובים ביותר אשר קובעים את איכות החיבור.

2. מטרת המחקר

המחקר הנוכחי מתמקד בלימוד הגורמים אשר עלולים להשפיע על חוזק החיבור של אריחי קרמיקה אל רקע עשוי בטון. בשלב זה לא נחקרו מערכות החיפוי עם רקע מבלוקים מטויחים. כפי שהוסבר לעיל, קובע תקן ישראלי ת"י 1555 חלק 1 את שיטת ההדבקה בתלות בגודל האריח. כך, האריחים בגודל עד 20x20 ס"מ מודבקים באמצעות מריחת הדבק על גבי הרקע בלבד. והאריחים יותר גדולים מודבקים באמצעות מריחת הדבק הן על גבי הרקע, והן על גב האריח. במחקר זה נחקרה שיטת ההדבקה באמצעות מריחת הדבק על גבי הרקע בלבד, מאחר שחיבור זה עלול להיות יותר בעייתי בהשפעת גורמים שונים.

המחקר הנוכחי נועד ל-:

- לימוד השפעת הגורמים הטכנולוגיים והסביבתיים השונים על חוזק ההידבקות של אריחי קרמיקה במשיכה צירית. הגורמים שנבדקו בשלב א' של המחקר הם:
  - השפעת תנאי מזג האוויר במהלך ביצוע העבודות, הטמפרטורה והלחות בשכבת הרקע ובאריחים בזמן ביצוע מלאכת החיפוי, ותנאי האשפרה של מערכת החיפוי על חוזק החיבור במערכת חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה המיושמים על פלטת בטון;
  - השפעת השינויים בתכונות חומרי הדבקה מתועשים ובתכונות האריחים על חוזק החיבור במערכת חיפוי הנ"ל;
  - התאמת תכונות הדבקים המתועשים בתנאי שירות ריאליים להצהרות היצרן.
- קביעת הגורמים החשובים ביותר אשר משפיעים על חוזק חיבור האריחים אל קירות חוץ;
- ניסוח המלצות לתיקון הדרישות הקיימות לחיפוי חוץ מאריחי קרמיקה וקביעת דרישות מדויקות של ביצוע עבודות חיפוי חוץ ובקרת איכות מערכת חיפוי חוץ;
- קביעה ראשונית של ערכי עבודת ההרס של חיבור האריח לרקע, הנדרשים להערכת ההתנגדות הגבולית של החיבור במתיחה בניצב למישור הקיר. תוצאות הניסויים יהוו בסיס לחישובים של חוזק החיבור של האריח בהשפעת הגורמים הטכנולוגיים החשובים ביותר כפי שייקבעו במחקר המוצע וגורמי ההעמסה האחרים (משקל עצמי של האריח, רוח, הבדלי טמפרטורה בין האריח והרקע וכו') לפי המודל המתואר ב-[33,20].

<u>חשוב להדגיש שזהו השלב הראשון של המחקר בכוון זה, אשר נועד לקבל אינדיקציות לגבי הגורמים הטכנולוגיים שמשפיעים על חוזק החיבור של אריחי קרמיקה במערכת חיפוי חוץ ולהתוות כוונים להמשך בדיקות ומחקר. אין לראות בממצאים ראשוניים שהתקבלו במסגרת שלב המחקר הנוכחי אלא תוספת לידע הקיים ובסיס למיקוד תשומת הלב להמשך חקירה לפני יישום כלשהו.</u>

3. תאור הניסויים

המחקר התבסס על אפיון מערכות החיפוי עם אריחי קרמיקה ואריחי פורצלן המיושמים על גבי תשתית בטון באמצעות דבקים מתועשים. אפיון חוזק החיבור במערכות הנ״ל נעשה אחרי חשיפתם לתנאי רפרנס (20°C/65%RH) ולתנאי בלייה האופייניים לאקלים ישראלי (טמפרטורה גבוהה, לחות משתנה וקרינת UV). חוזק החיבור אופיין באמצעות בדיקות חוזק ההידבקות במשיכה צירית בגיל 28 ימים. בחלק מהמערכות נעשו בדיקות חוזק החיבור גם בגיל של 90 ימים, וזה לצורך הלימוד של תהליכי בלייה לטווח ארוך במערכת החיפוי מאריחי קרמיקה ואריחי פורצלן. תיאור הבדיקות ששימשו לקביעת עבודת הרס במערכות החיפוי עם אריחי קרמיקה ופורצלן יינתן בחלק ב׳ של דו״ח זה.

3.1. <u>חומרים</u>:

א. <u>חומרי הדבקה</u>:

- המחקר בחן 3 סוגי דבקים צמנטיים-פולימריים מתועשים אשר יכונו להלן ״דבק מס׳ 1״, ״דבק מס׳ 2״ ו״דבק מס׳ 3״. <u>הדבקים שנבחרו מהווים את החומרים המייצגים את משפחת הדבקים המיועדים לחיפוי חוץ מאריחי קרמיקה בארץ</u>. המדובר בדבקים מסחריים המיוצרים בארץ ומשמשים באופן רחב בעבודות חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה/פורצלן. בחירת סוגי הדבק נעשתה בהתייעצות עם היצרנים והתקבל מפרט מלא של המלצות היצרן ליישום הדבקים שנבחרו. כל הדבקים ששימשו היו מסוג C2 – ״דבק צמנטי משופר עם אופיינים נוספים״, כפי שזה מוגדר בתקן ישראלי ת״י 4004 [2].

ב. <u>אריחים</u>:

- בהמלצת מלווי מחקר נבדקו במחקר הנוכחי 2 סוגים של אריחי קרמיקה מתועשים: אריחי קרמיקה בגודל 40*40*0.8 ס״מ עם ספיגת מים מ-3% עד 6% (% משקל) ואריחי פורצלן בגודל 45*45*0.9ס״מ עם ספיגת מים עד 3% (אחוזי משקל). מהאריחים המתועשים נוסרו לוחיות בצורת ריבוע עם צלע 50 מ״מ אשר שימשו בהכנת מערכות החיפוי.

ג. <u>תשתית בטון</u>:

- אריחי בטון מתועשים מסוג אריח טרצו מתוצרת חב׳ אלוני בע״מ שימשו בתור תשתית בטון. אריחי בטון היו מסוג א׳ כפי שמוגדר בתקן ישראלי ת״י 6 [21]. אריחי הבטון המתועשים הללו משמשים בבדיקות הדבקים לפי תקן ישראלי ת״י 4004 חלק 1 [2].

3.2. <u>הכנת חומרי הדבקה</u>

לפני הכנת הדבק אוקלמו התערובות המתועשות היבשות וכן המים בתנאי רפרנס תקניים (21°C/55%RH) או בתנאי חדר אילת (30°C/40%RH) למשך 24 שעות. לאחר האיקלום בוצעה הקטנת המדגם של התערובת המתועשת היבשה. כל אצוות המלט כללה 8.3 ק״ג תערובת יבשה ו-1.7 ק״ג מים, בהתאם למתכון המומלץ ע״י יצרני הדבק. עירבוב המלט בוצע במיקסר-בחש מעבדתי שנפחו 10 ל׳. העירבוב נמשך עד לקבלת תערובת אחידה ללא גושים. לאחר מכן הושהתה

התערובת הרטובה ל-5 – 10 דקות נוספות (זמן הבשלה) לצורך פיזור אחיד של הפולימרים בנפח חומר ההדבקה. לאחר ההמתנה הנ"ל בוצע עירבוב נוסף במיקסר במשך כ-1.5 דקות. עם תום העירבוב התחילה ספירת זמן שמישות הדבק כפי שיפורט להלן.

3.3 זמן שמישות לעבודה של חומרי הדבקה

זמן שמישות לעבודה מבטא את משך הזמן המירבי בו ניתן להשתמש בחומר הדבקה המוכן לפני מריחת הדבק על האריח ועל התשתית, ללא חשש של פגיעה בחוזק ההידבקות של המערכת. תקן ישראלי ת"י 4004 אינו קובע דרישות לתכונה זו והיא נמצאת בתחום "הצהרות היצרן". להלן מובאים זמני השמישות לעבודה המוצהרים ע"י היצרנים:

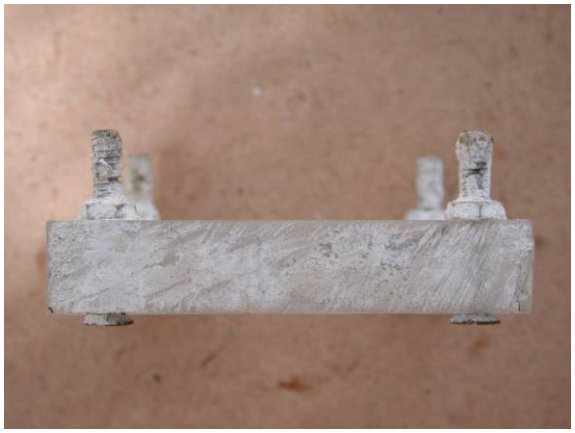
- דבק מס' 1 – עד 3 שעות בטמפרטורות יישום של 5° - 35° צלזיוס;
- דבק מס' 2 – עד 3 שעות בטמפרטורות יישום של 5° - 35° צלזיוס;
- דבק מס 3 - לא קיימת הצהרת היצרן לגבי תכונה זו, תחום טמפרטורות ליישום 5° - 40° צלזיוס.

בחירת זמני השמישות בפועל של הדבקים אשר נבדקו במחקר הנוכחי נעשתה על סמך תוצאות בדיקת קצב שינוי השירוע של הדבקים הטריים כפי שיידון בהמשך הדו"ח.

3.4. מלאכת החיפוי והכנת המדגמים

הדבקת לוחיות קרמיקה ופורצלן בוצעה בהתאם לתהליך המתואר בתקן ישראלי ת"י 1555 חלק 1 [1] לאריחים בגודל עד 20*20 ס"מ. עובי שכבת ההדבקה בכל המדגמים היה כ-6-7 מ"מ. שמירת העובי האחיד של שכבת ההדבקה נעשתה באמצעות אביזר מיוחד העשוי מלוחית פלסטיק ו-4 ברגים ואומים המותקנים בפינות הלוחית, כמתואר בציור 4. על גבה של כל מרצפת טרצו יושמו 5 לוחיות קרמיקה או פורצלן. מדגם אחד כלל 2 מרצפות טרצו עם לוחיות אריחי קרמיקה או פורצלן המיושמות עליהן.





ציור 4. מתקן לשמירת עובי אחיד של דבק במערכת חיפוי

מריחת הדבק בוצעה על גב מרצפת טרצו הלא מלוטשת במועדים שנבחרו כזמן השמישות לעבודה. בחירת זמני שמישות נעשתה על סמך תוצאות בדיקת שירוע הדבקים כפי שיפורט להלן. מרצפות

טרצו ולוחיות קרמיקה ופורצלן אוקלמו לפני ביצוע מלאכת החיפוי במשך 24 שעות בתנאי טמפרטורה ולחות שונים:

- תנאי רפרנס - מעבדת בטונים של המכון (20°C/65%RH);
- תנאי חקר אילת- (30°C/40%RH);
- איקלום בתא אקלים – בתנאים של 30°, 50° ו-70° צ' ו-75%RH

לאחר מריחת הדבק על גב מרצפת טרצו נחשפו מרצפות טרצו למשך 0, 10 או 20 דקות לאחד משלושת משטרי האיקלום, שלהלן:

- תנאי רפרנס - מעבדת בטונים של המכון (20°C/65%RH + כיסוי ביריעת פוליאתילן);
- תנאי חום - (30°C/40%RH + כיסוי ביריעות פוליאתילן);
- תנאי חשיפת הדבק לקרינת UV הישירה. זה משטר האיקלום אשר נועד לדמות את השפעת קרינת השמש על הדבק במשך הזמן החופשי שלו. למטרה זו נבנה במכון מתקן מיוחד, כמתואר בציור 5 . המתקן כלל את ארגז העץ עם 8 נורות UV המותקנות בתקרת הארגז במרחק 8 ס"מ אחת מהשנייה. הנורות ששימשו במחקר הנוכחי היו נורות מסוג UVA-340 עם a peak emission ב-340 ננומטר. נורות אלה מהוות את הסימולציה ההנדסית הטובה ביותר של קרינת שמש בטווח על סגולי שלה של 295 עד 365 ננומטר. עוצמות הקרינה נבחרו מתוך מדידות קרינת UV בשטח, כפי שמפורט בטבלה 1. מדידת רמות הקרינה בשטח ובמתקן קרינת UV נעשתה באמצעות מד קרינת UV דיגיטלי מסוג YK-34UV, תוצרת טייוואן, כמתואר בציור 6.





ציור 5. מתקן קרינת UV



ציור 6 מד קרינת UV דיגיטלי

טבלה 1. רמות קרינת UV שנמדדו בטכניון, חיפה

תאריך	כיוון	מצב העננים	שעת המדידה	קרינת UV, mW/cm^2
17/5/2006	מזרח	בהיר	10:15	1.49
	דרום	מעונן	10:25	0.51
	מזרח	מעונן	13:10	0.55
	דרום	בהיר	13:15	0.51
18/05/2006	מזרח	מעונן	7:35	2.2
	דרום	מעונן	7:35	0.35
	מערב	מעונן	7:35	0.1
	מזרח	מעונן	8:35	1.5
	דרום	בהיר	8:35	0.35
21/05/2006	מזרח	בהיר	7:40	2.4
23/05/2006	מזרח	בהיר	6:55	2.4
4/6/2006	מזרח	חמסין	7:15	1.8
	מזרח		8:35	1.44
	מזרח		10:35	0.77
7/06/2006	מד קרינת UV דיגיטלי	כל 8 נורות UV דלוקות	כל הזמן	2.0 – 1.6

הדבקת אריחי הקרמיקה והפורצלן נעשתה מיד בתום הזמן החופשי, בתנאי רפרנס או בתנאי חדר אילת

3.5. אשפרת המדגמים

בתום ההדבקה אוקלמו מערכות רפרנס בתנאי רפרנס עד גיל 28 ימים. בהמלצת מלווי המחקר אושפרו חלק ממערכות אלה בתנאים הללו עד גיל 90 יום.

שאר מערכות החיפוי אוקלמו למשך 28 ימים בארגז המיוחד בו נשמרו התנאים שלהלן:

- במשך 8 שעות - 35°C/60%RH. הטמפרטורה הקבועה של 35° צ' נשמרה באמצעות Edison Screwbase Ceramic Infrared Heating Element (ESES), 250 ווט, עם פיזור חום בשטח רחב, מתוצרת חברת Infrared Salamander, כמתואר בציור 7. הלחות הקבועה בארגז נשמרה באמצעות תמיסת גליצרין (ריכוז 72%), [22].
- במשך 16 שעות - 30°C/60%RH.

בהמלצת מלווי המחקר אוקלמו חלק ממערכות החיפוי בתנאים הללו עד גיל 90 ימים.



ציור 7. Edison Screwbase Ceramic Infrared Heating Element (ESES)

3.6. בדיקות

3.6.1. תכונות האריחים

תכונות האריחים שנבדקו במסגרת המחקר הנוכחי:

- ספיגת מים כוללת (לפי השיטה המתוארת בתקן ישראלי ת"י 314 [23]);
- ספיגה קפילירית (לפי השיטה המתוארת בתקן אירופאי EN 772-11 [24]);
- מודול אלסטיות של אריחי קרמיקה ואריחי פורצלן לפי השיטה שתתואר בחלק ב' של דו"ח זה

3.6.2. חומרי הדבקה

נבדקו תכונות חומרי הדבקה, כגון:

- בדיקת שירוע של דבקים טריים, לפי השיטה המתוארת בתקן ישראלי ת"י 1920 חלק 1 [25]. תוצאות הבדיקה שימשו לקביעת זמני השמישות המירביים של הדבקים בתנאי חשיפה שונים;

- בדיקת מעבר אדים דרך דבקים קשויים בגיל מעל 28 ימים. הבדיקה נערכה לפי השיטה המתוארת בתקן גרמני DIN 52615 [26]. בבדיקה שימשו לוחיות דבק קשוי במידות 15 x 70 x 70 מ"מ. במצב טרי נחשפו הדבקים ל-3 משטרי האיקלום כפי שפורטו בסעיף 3.4 לעיל. זמן השמישות של כל הדבקים שנבדקו היה 60 דקות; זמן פתוח – 20 דקות. בדיקה זו שימשה לקביעה בעקיפין של השינויים במיקרומבנה שנגרמו לדבקים בזמן חופשי עקב חשיפתם לתנאי הסביבה החמים ולקרינת UV.

- בדיקת תכונות מכאניות של דבקים קשויים. נעשה אפיון הדבקים לפי:
  - חוזק לחיצה וחוזק כפיפה (לפי השיטה המתוארת בתקן ישראלי ת"י 1920 חלק 1 [25]);
  - מודול אלסטיות בגיל 28 ימים (לפי השיטה המתוארת בתקן בריטי BS 6319-3 [27]), בתנאי רפרנס (20°C/55%RH) ואחרי חשיפת הדבקים לקרינת UV ולתנאים חמים כפי שפורטו לעיל.

בבדיקות של התכונות המכאניות שימשו קורות דבק בגיל 28 ימים במידות 285*25*25 מ"מ. קורות הדבקים נחשפו בזמן הכנתם ל-3 משטרי האיקלום המפורטים בסעיף 3.4. זמן שמישות הדבק היה 60 דקות בכל המקרים. זמן חופשי נשמר 20 דקות, בהתאם להצהרות היצרן.

3.6.3. אפיון מערכות חיפוי מאריחי קרמיקה/פורצלן

- בתום אשפרת מערכות החיפוי בתנאי הסביבה המפורטים בסעיף 3.5, נבדק חוזק הידבקות האריחים במשיכה צירית. הבדיקה נערכה בגיל 28 ימים ובגיל 90 ימים (בחלק ממערכות החיפוי) לפי השיטה המתוארת בתקן ישראלי ת"י 4004 חלק 6 [2]. על סמך תוצאות הבדיקה נקבע סוג הכשל ושיעור הדלמינציה אשר חושב כממוצע של היחסים בין שטח האריח בו לא נשאר מודבק הדבק לאחר בדיקת pull-off, לבין כל שטח האריח;
- בחלק מהמערכות עם אריחי פורצלן נעשה אפיון של מיקרומבנה הדבק הקשוי באמצעות SEM. בבדיקה שימשו גופי הדבק שנוסרו מהתשתית לאחר בדיקת חוזק ההידבקות במשיכה צירית.

4. תוצאות

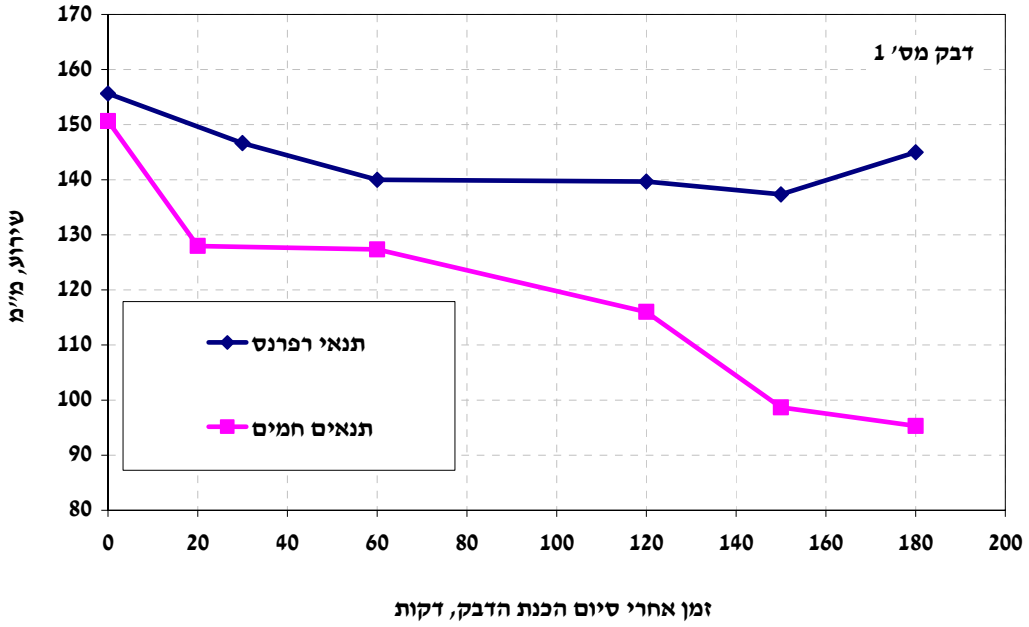
4.1. תכונות הדבקים

4.1.1. שירוע

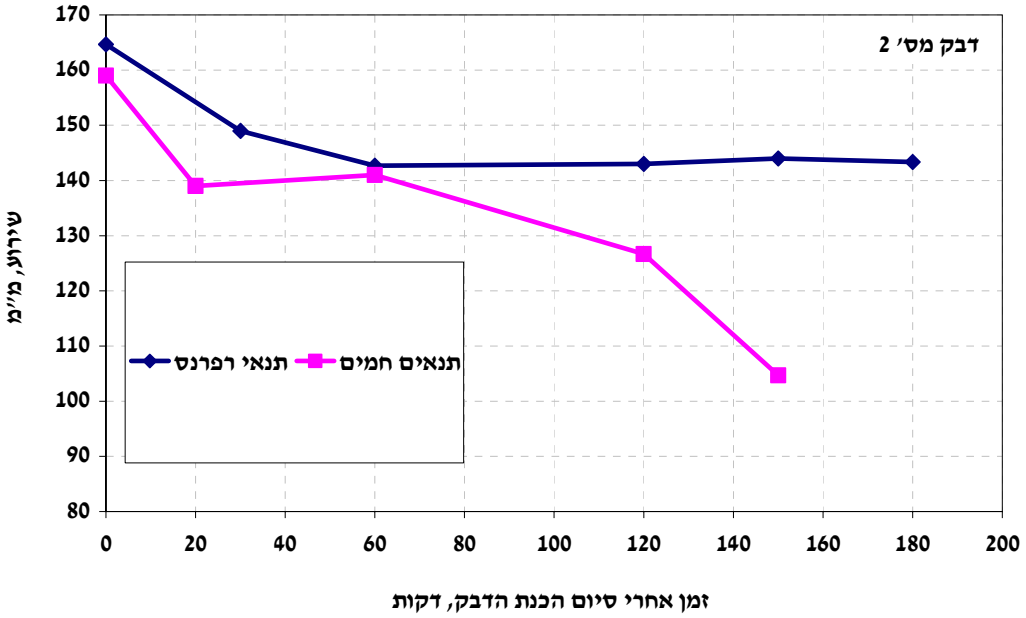
בציורים 8 – 10 מובאים עקומים של שינוי שירוע הדבקים עם הזמן ובהשפעת הטמפרטורה.

בתנאי רפרנס (21°C/65%RH) אופיינו דבקים מס׳ 1 ו-2 בשירוע יותר גבוה מאשר דבק מס׳ 3. בתנאי רפרנס ירד שירוע של דבקים מס׳ 1 ו-3 עד כ-6% במשך 180 דקות (זמן שמישות הדבק המוצהר ע״י יצרני הדבקים). בדבק מס׳ 2 הגיע שינוי זה ל-16%, בערך.

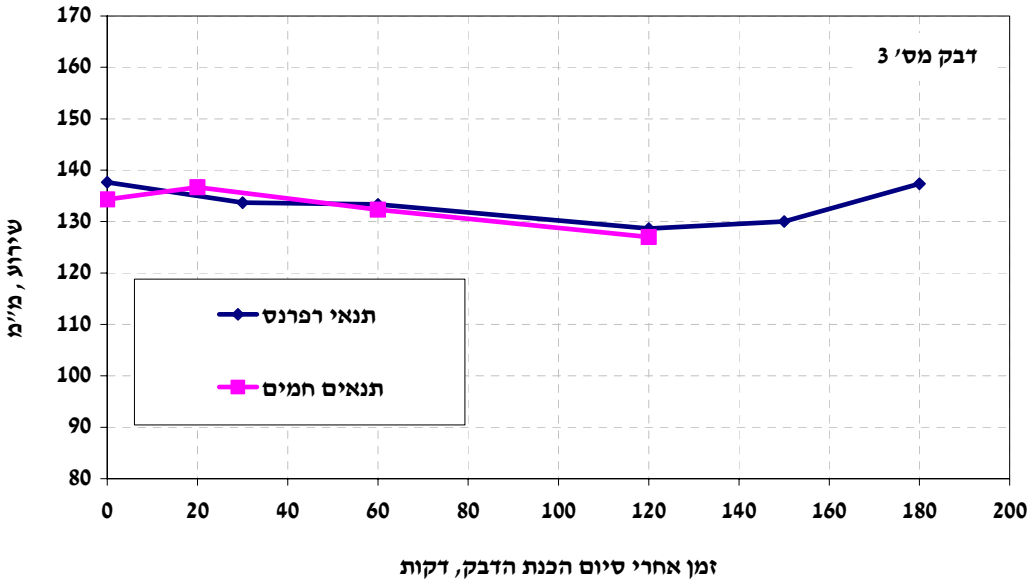
לעומת זאת, חימום חומרי הגלם והכנת הדבק בתנאים חמים השפיע במידה ניכרת על שירוע דבקים מס׳ 1 ו-2, בעוד שדבק מס׳ 3 לא היה רגיש לתנאים חמים במשך כל זמן השמישות שלו. כפי שניתן לראות בציורים 8 ו-9 ירד שירוע דבקים מס׳ 1 ומס׳-2 ב-40% ו-35%, בהתאמה, אחרי 180 דקות החל מסיום הכנת הדבק. שירוע דבק מס׳ 3 נשאר כמעט קבוע במשך כל זמן הבדיקה, ציור 10.



ציור 8. שינוי שירוע של דבק מס׳ 1



ציור 9. שינוי שירוע של דבק מס' 2



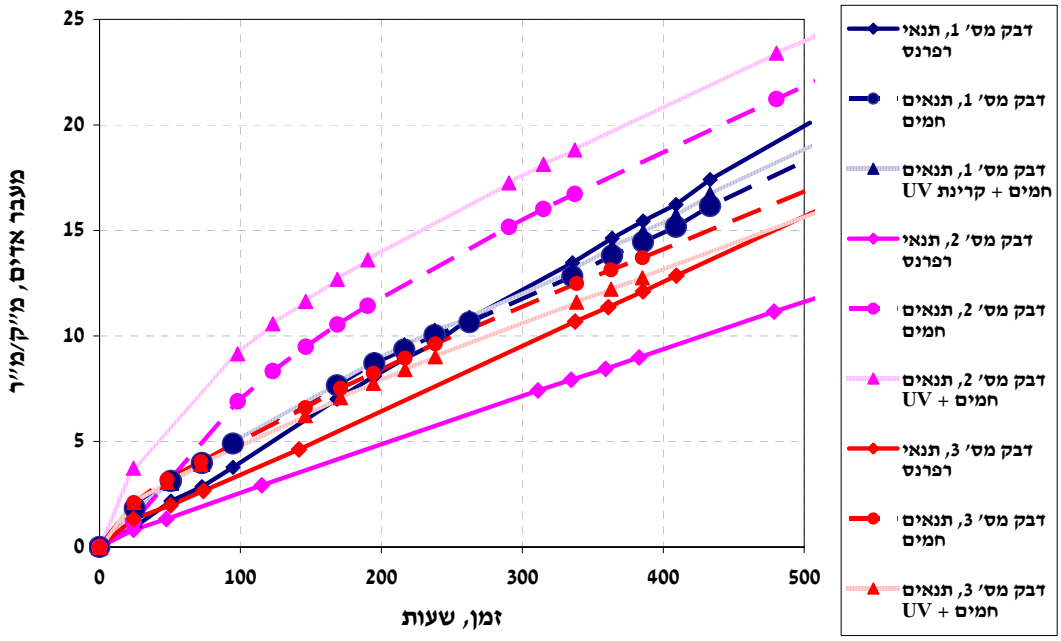
ציור 10. שינוי שירוע של דבק מס' 3

4.1.2. מעבר אדים

תוצאות בדיקת מעבר אדים מוצגות בציור 11. דבק מס׳ 2 אשר הוכן בתנאי רפרנס מאופיין בחדירות אדים הנמוכה ביותר. תנאים חמים וקרינת UV גרמו לעלייה דרסטית במעבר אדים של דבק מס׳ 2. שינוי זה עשוי להיות התוצאה של השינויים במיקרומבנה של הדבק אשר נגרמים כתוצאה מהשפעת תנאי האקלים על הדבק הטרי. מעבר אדים יותר גדול עלול להיות תוצאה של נקבוביות יותר גדולה של החומר ושינוי האופי ההידרופובי לאופי הידרופילי של החומר בדפנות הנקבים דרכם מתבצע מעבר האדים. בדבקים מס׳ 1 ומס׳ 3 כמעט שלא חלו השינויים במעבר האדים בהשפעת תנאי סביבה שונים.

4.1.3. תכונות מכאניות של חומרי הדבקה

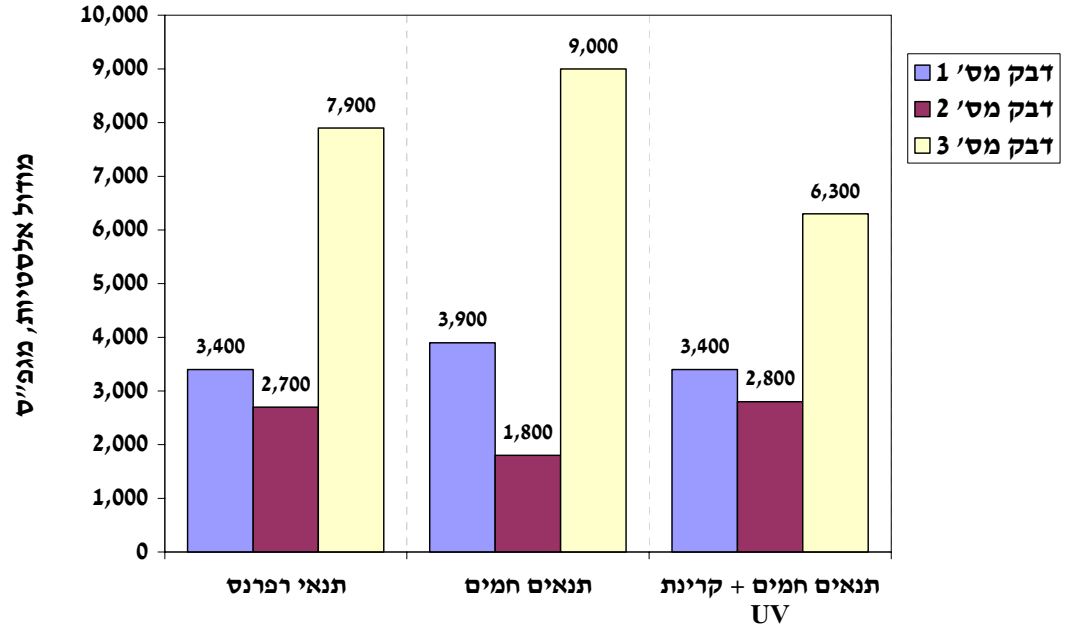
בטבלה 2 מובאות התוצאות של חוזק לחיצה, חוזק כפיפה ומודול אלסטיות של הדבקים אשר הוכנו בתנאי אקלים שונים. בציורים 12 – 13 מוצגים הערכים הממוצעים ומקדמי השוני של מודול אלסטיות הדבקים אשר הוכנו בתנאי אקלים שונים. השינויים בתנאי אקלים בעת הכנת הדבקים גרמו לשינויים דרסטיים במודול אלסטיות של דבק מס׳ 3, בעוד שכמעט שלא הורגשה השפעתם על מודול אלסטיות של דבקים מס׳ 1 ו-2 , כמתואר בציור 12. לעומת זאת, מקדם שוני של מודול אלסטיות עלה במידה מירבית במקרה של דבקים 1 ו-2, כמתואר בציור 13. כמעט שלא נצפה שינוי במקדם השוני של מודול אלסטיות של דבק מס׳ 3. השינויים הדרסטיים ביותר, הן במודול אלסטיות, והן במקדם השוני שלו, התרחשו בהשפעת התנאים החמים.



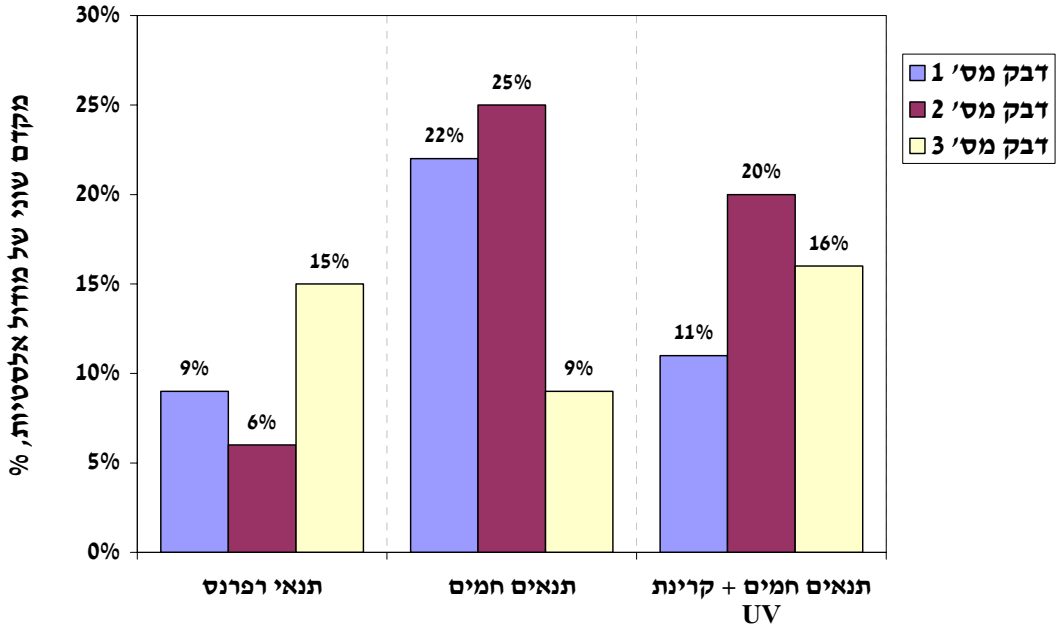
ציור 11. מעבר אדים דרך דבקים אשר הוכן בתנאי אקלים שונים

טבלה 2. תכונות מכאניות בגיל 28 ימים של הדבקים אשר הוכנו בתנאי אקלים שונים

חומר הדבקה	תנאי הכנה	מודול אלסטיות, E		חוזק לחיצה		חוזק כפיפה	
		ממוצע, מגפ"ס	מקדם שוני, %	ממוצע, מגפ"ס	מקדם שוני, %	ממוצע, מגפ"ס	מקדם שוני, %
דבק מס' 1	תנאי רפרנס	3,400	9%	9.7	6%	2.7	20%
	תנאים חמים	3,900	22%	7.0	14%	1.9	8%
	תנאים חמים + קרינת UV	3,400	11%	6.2	6%	2.1	7%
דבק מס' 2	תנאי רפרנס	2,700	6%	9.7	6%	3.0	8%
	תנאים חמים	1,800	25%	5.3	9%	1.4	9%
	תנאים חמים + קרינת UV	2,800	20%	4.9	14%	1.5	18%
דבק מס' 3	תנאי רפרנס	7,900	15%	19.7	11%	3.8	7%
	תנאים חמים	9,000	9%	17.5	12%	3.4	7%
	תנאים חמים + קרינת UV	6,300	16%	19.6	12%	2.6	20%



ציור 12. מודול אלסטיות של דבקים אשר הוכנו בתנאי אקלים שונים



ציור 13. מקדם שוני של מודול אלסטיות הדבקים אשר הוכנו בתנאי אקלים שונים

4.2. תכונות האריחים

4.2.1. ספיגה כוללת וספיגה קפילרית

בטבלה 3 מובאות התוצאות של ספיגה כוללת וספיגה קפילרית של האריחים אשר היו בשימוש במחקר הנוכחי.

טבלה 3. ספיגה כוללת ומקדם ספיגה קפילרית של האריחים

סוג אריחים	ספיגה כוללת, % (אחוזי משקל)	מקדם ספיגה קפילירית, גר' ל-1 מ"ר לשעה$^{1/2}$
קרמיקה	3%	0.04
פורצלן	1%	0.0

מודול אלסטיות E של אריחים אלה שווה לאריחי קרמיקה - 46,100 MPa ולאריחי פורצלן – 52,600 MPa.

4.3. אפיון חיבור האריחים במערכות חיפוי

4.3.1. סוגי כשל

דיווח על סוגי כשל במערכות החיפוי שהוכנו ואושפרו בתנאי אקלים שונים מובא בטבלאות 4 – 5. כפי שניתן לראות, סוג הכשל העיקרי במערכות החיפוי מאריחי קרמיקה ופורצלן הוא כשל הידבקות האריח. כשל לכידות הדבק התרחש רק במקרים בודדים. במערכות חיפוי עם דבק מס' 2 התרחש הכשל רק באזור פן הביניים בין האריח והדבק בכל תנאי הסביבה, כולל תנאי רפרנס. במערכות חיפוי מאריחי קרמיקה עם דבקים מס' 1 ו-3 אשר הוכנו ואושפרו בתנאי רפרנס,

התרחש כשל לכידות הדבק. בתנאים חמים התרחש כשל לכידות הדבק רק במערכות החיפוי מאריחי קרמיקה המיושמים עם דבק מס׳ 1. בכל מערכות החיפוי עם אריחי קרמיקה אשר בהם נחשפו הדבקים הטריים להשפעת קרינת UV התרחש כשל הידבקות האריח בלבד.

במערכות החיפוי עם אריחי פורצלן התרחש כשל לכידות הדבק רק במערכת עם דבק מס׳ 3 אשר הוכנה בתנאי רפרנס. במערכות החיפוי עם אריחי פורצלן אשר הוכנו בתנאי אקלים אחרים התרחש כשל הידבקות האריח בלבד.

טבלה 4. סוגי הכשל אשר התרחשו לאחר בדיקת השליפה במערכות החיפוי29מ**<u>אריחי קרמיקה</u>** בגיל 28 ימים

טמפרטורה/לחות הסביבה בעת עירבוב הדבק	טמפרטורה/לחות של רקע ואריחים	טמפרטורה של מרכיבי דבק לפני הכנתו	תנאי הסביבה במשך זמן שמישות	תנאי הסביבה במשך זמן פתוח	תנאי אשפרה וחשיפה	גורם משתנה עיקרי	סוג דבק	סוג כשל עיקרי
תנאי רפרנס **(20°C/65%RH)**		20°C	**תנאי רפרנס; כיסוי ביריעות פוליאתילן**	תנאי רפרנס		אין	מס' 1	**CF-A**
							מס' 2	AF-T
							מס' 3	**CF-A**
תנאי חדר אילת **(30°C/40%RH)**	70°C/75%RH	30°C	**תנאי חדר אילת (30°C/40%RH); כיסוי ביריעות פוליאתילן**		35°C/60%RH	טמפ' רקע	מס' 1	**CF-A**
							מס' 2	AF-T
							מס' 3	AF-T
תנאי חדר אילת **(30°C/40%RH)**	70°C/75%RH	30°C	**תנאי חדר אילת (30°C/40%RH); כיסוי ביריעות פוליאתילן**		35°C/60%RH	זמן שמישות בתנאים חמים	מס' 1	**CF-A**
							מס' 2	AF-T
							מס' 3	AF-T
תנאי רפרנס **(20°C/65%RH)**		20°C	**תנאי רפרנס (20°C/65%RH) כיסוי ביריעות פוליאתילן**	קרינת UV	35°C/60%RH	השפעת קרינת UV	מס' 1	AF-T
							מס' 2	AF-T
							מס' 3	AF-T

המשך טבלה 4

טמפרטורה/לחות הסביבה בעת עירבוב הדבק	טמפרטורה/לחות של רקע וארזים	טמפרטורה של מרכיבי דבק לפני הכנתו	תנאי הסביבה במשך זמן שמישות	תנאי הסביבה במשך זמן פתוח	תנאי אשפרה וחשיפה	גורם משתנה עיקרי	סוג דבק	סוג כשל עיקרי
תנאי חדר אילת **(30°C/40%RH)**	**20°-70°C/75%RH**	30°C	**תנאי חדר אילת (30°C/40%RH) ; כיסוי ביריעות פוליאתילן**	קרינת UV ; לחות אוויר יחסית של 60%RH	35°C/60%RH	טמפ' רקע + קרינת UV	מס' 1	AF-T
							מס' 2	AF-T
							מס' 3	AF-T
תנאי חדר אילת **(30°C/40%RH)**	**70°C/75%RH**	30°C	**תנאי חדר אילת (30°C/40%RH) ; כיסוי ביריעות פוליאתילן**	קרינת UV לחות אוויר יחסית של 60%RH	35°C/60%RH	זמן חופשי + קרינת UV	מס' 1	AF-T/**CF-A**
							מס' 2	AF-T
							מס' 3	AF-T
תנאי חדר אילת **(30°C/40%RH)**	70°C/75%RH 30°C/40%RH	30°C	**תנאי חדר אילת (30°C/40%RH) ; כיסוי ביריעות פוליאתילן**	קרינת UV לחות אוויר יחסית של 60%RH	35°C/60%RH	לחות רקע וארזים	מס' 1	AF-T
							מס' 2	AF-T
							מס' 3	AF-T
תנאי רפרנס **(20°C/65%RH)**		20°C	**תנאי רפרנס (20°C/65%RH) כיסוי ביריעות פוליאתילן**	קרינת UV לחות אוויר יחסית של 60%RH	35°C/60%RH	גיל מערכת החיפוי	מס' 1	AF-T
							מס' 2	AF-T
							מס' 3	AF-T

טמפרטורה/לחות הסביבה בעת עירבוב הדבק	טמפרטורה/לחות של רקע ואריחים	טמפרטורה של מרכיבי דבק לפני הכנתו	תנאי הסביבה במשך זמן שמישות	תנאי הסביבה במשך זמן פתוח	תנאי אשפרה וחשיפה	גורם משתנה עיקרי	סוג דבק	סוג כשל עיקרי
תנאי חדר אילת **(30°C/40%RH)**	70°C/75%RH	30°C	**תנאי חדר אילת (30°C/40%RH); כיסוי ביריעות פוליאתילן**		35°C/60%RH	גיל מערכת החיפוי	מס' 1	AF-T
							מס' 2	AF-T
							מס' 3	AF-T

טבלה 5. סוגי הכשל אשר התרחשו לאחר בדיקת שליפה במערכות החיפוי מ**ארי<u>חי פורצלן</u>** בגיל 28 ימים

טמפרטורה/לחות הסביבה בעת הכנת הדבק	טמפרטורה/ לחות של רקע ואריחים	טמפרטורה של מרכיבי דבק לפני הכנתו	תנאי הסביבה במשך זמן שמישות	תנאי הסביבה במשך זמן פתוח	תנאי אשפרה וחשיפה	גורם משתנה עיקרי	סוג דבק	סוג כשל עיקרי
תנאי רפרנס **(20°C/65%RH)**		20°C	**תנאי רפרנס (20°C/65%RH) כיסוי ביריעות פוליאתילן**	תנאי רפרנס **(20°C/65%RH)**		אין	מס' 1	AF-T
							מס' 2	AF-T
							מס' 3	**CF-A**
תנאי חדר אילת **(30°C/40%RH)**	70°C/75%RH	30°C	**תנאי חדר אילת (30°C/40%RH); כיסוי ביריעות פוליאתילן**		35°C/60%RH	טמפרטורת רקע	מס' 1	AF-T
							מס' 2	AF-T
							מס' 3	AF-T
תנאי חדר אילת **(30°C/40%RH)**	70°C/75%RH	30°C	**תנאי חדר אילת (30°C/40%RH); כיסוי ביריעות פוליאתילן**		35°C/60%RH	זמן שמישות בתנאים חמים	מס' 1	AF-T
							מס' 2	AF-T
							מס' 3	AF-T
תנאי רפרנס **(20°C/65%RH)**		20°C	**תנאי רפרנס (20°C/65%RH) כיסוי ביריעות פוליאתילן**	קרינת UV לחות אוויר יחסית של 60%RH	35°C/60%RH	השפעת קרינת UV	מס' 1	AF-T
							מס' 2	AF-T
							מס' 3	AF-T

המשך טבלה 5

טמפרטורה/לחות הסביבה בעת הכנת הדבק	טמפרטורה/ לחות של רקע ואריחים	טמפרטורה של מרכיבי דבק לפני הכנתו	תנאי הסביבה במשך זמן שמישות	תנאי הסביבה במשך זמן פתוח	תנאי אשפרה וחשיפה	גורם משתנה עיקרי	סוג דבק	סוג כשל עיקרי
תנאי חדר אילת **(30°C/40%RH)**	**20°-70°C/75%RH**	30°C	**תנאי חדר אילת (30°C/40%RH) ; כיסוי ביריעות פוליאתילן**	קרינת UV לחות אוויר יחסית של 60%RH	35°C/60%RH	טמפ' רקע + קרינת UV	מס' 1	AF-T
							מס' 2	AF-T
							מס' 3	AF-T
תנאי חדר אילת **(30°C/40%RH)**	**70°C/75%RH**	30°C	**תנאי חדר אילת (30°C/40%RH) כיסוי ביריעות פוליאתילן**	קרינת UV לחות אוויר יחסית של 60%RH	35°C/60%RH	זמן חופשי + קרינת UV	מס' 1	**CF-A**/AF-T
							מס' 2	AF-T
							מס' 3	AF-T
תנאי חדר אילת **(30°C/40%RH)**	70°C/75%RH 30°C/40%RH	30°C	**תנאי חדר אילת (30°C/40%RH) ; כיסוי ביריעות פוליאתילן**	קרינת UV לחות אוויר יחסית של 60%RH	35°C/60%RH	לחות רקע ואריחים	מס' 1	AF-T
							מס' 2	AF-T
							מס' 3	AF-T
תנאי רפרנס **(20°C/65%RH)**		20°C	**תנאי רפרנס (20°C/65%RH) כיסוי ביריעות פוליאתילן**	קרינת UV לחות אוויר יחסית של 60%RH	35°C/60%RH	גיל מערכת החיפוי	מס' 1	AF-T/**CF-A**
							מס' 2	AF-T
							מס' 3	AF-T

טמפרטורה/לחות הסביבה בעת הכנת הדבק	טמפרטורה/ לחות של רקע ואריחים	טמפרטורה של מרכיבי דבק לפני הכנתו	תנאי הסביבה במשך זמן שמישות	תנאי הסביבה במשך זמן פתוח	תנאי אשפרה וחשיפה	גורם משתנה עיקרי	סוג דבק	סוג כשל עיקרי
תנאי חדר אילת **(30°C/40%RH)**	70°C/75%RH	30°C	**תנאי חדר אילת (30°C/40%RH); כיסוי ביריעות פוליאתילן**		35°C/60%RH	גיל מערכת החיפוי	מס' 1	AF-T
							מס' 2	AF-T
							מס' 3	AF-T

4.4. חוזק הידבקות האריחים במשיכה צירית

4.4.1. השפעת תנאים חמים

בציור 14 מוצגים השינויים בחוזק ההידבקות הממוצע של אריחי קרמיקה ואריחי פורצלן בתנאי רפרנס ולאחר חשיפת המערכת לתנאים חמים.

במערכות חיפוי אשר הוכנו ואוקלמו בתנאי רפרנס היה חוזק ההידבקות הממוצע גבוה פי 3 – 4 מאשר נדרש בתקן הישראלי ת"י 1555 חלק 1 ות"י 4004 . במערכות חיפוי עם אריחי קרמיקה נצפה חוזק עד 30% יותר גבוה מאשר במערכות החיפוי עם אריחי פורצלן.

תנאים חמים גרמו לירידת חוזק ההידבקות במערכות עם אריחי קרמיקה ב-35% עד כ-60%, ובמערכות עם אריחי פורצלן הגיעה ירידה זו ל-60% עד 70%. בכל המערכות אשר הוכנו ואושפרו בתנאים חמים היה חוזק ההידבקות הממוצע יותר גבוה מ-0.5 מגפ"ס, כפי שזה נדרש בתקנים ישראלים ת"י 1555 חלק 1 ות"י 4004 .

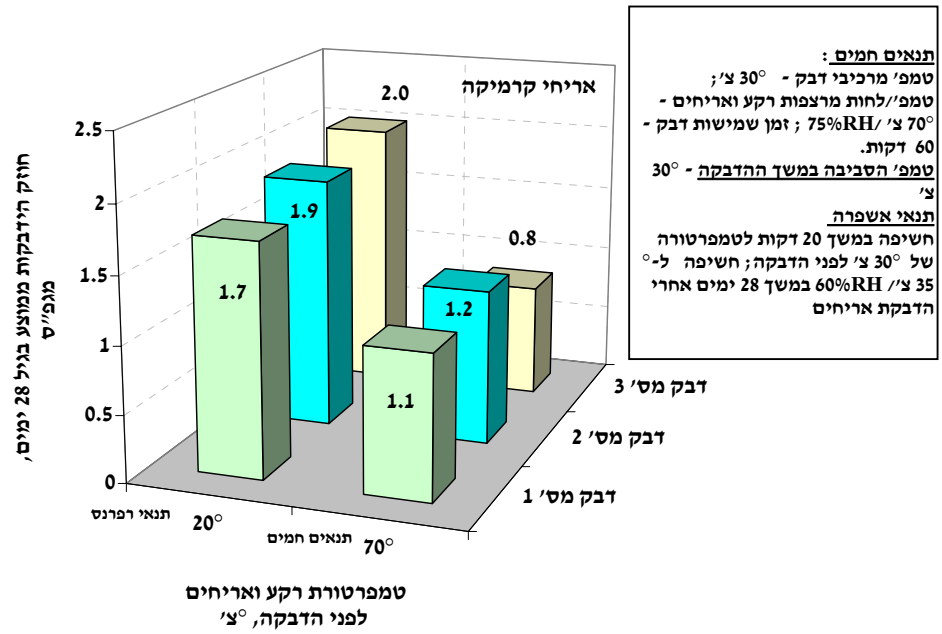
ברוויזית התקן הישראלי ת"י 1555 חלק 1 אשר נמצאת בהכנה בעת כתיבת דו"ח מחקר זה, מוצעת הדרישה לחוזק המינימלי של דוגמת בדיקה בודדת במערכות חיפוי מאריחי קרמיקה/פורצלן. על חוזק ההידבקות המינימלי במערכות חיפוי ששטחם מ-0.04 מ"ר עד 0.11 מ"ר להיות 0.3 מגפ"ס, לפחות. בציור 15 מוצגים החוזקים המינימליים במערכות החיפוי אשר הוכנו ואוקלמו בתנאי רפרנס ובתנאים חמים. כפי שניתן לראות, כל מערכות החיפוי שהוכנו ואוקלמו בתנאי רפרנס ענו לדרישה זאת לגבי החוזק המינימלי. לעומת זאת, כל מערכות החיפוי שנחשפו להשפעת תנאים חמים, פרט למערכת החיפוי מאריחי קרמיקה ודבק מס' 1, לא עמדו בדרישה לחוזק ההידבקות המינימלי, באשר החוזק הנבדק במערכות הללו היה קטן מ-0.3 מגפ"ס.

בנוסף לפגיעה בחוזק ההידבקות הממוצע ובחוזק ההידבקות המינימלי גרמו תנאי הסביבה החמים להגדלה דרסטית בפיזור התוצאות של חוזק ההידבקות במערכות החיפוי עם דבקים מס' 2 ו-3, כפי שניתן לראות בציור 16. בהשפעת התנאים החמים כמעט שלא חל שינוי בפיזור תוצאות החוזק במערכות החיפוי עם דבק מס' 1.

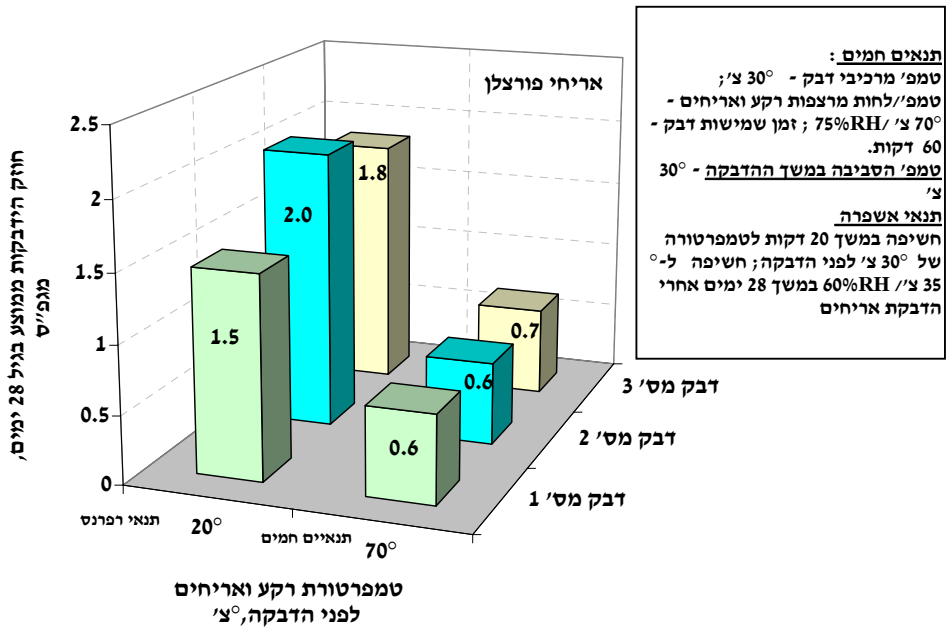
4.4.2. זמני שמישות בתנאים חמים

בציורים 17 – 19 ניתן לראות את תוצאות חוזק ההידבקות במערכות החיפוי בהשפעת השינויים בזמן שמישות הדבק בתנאים חמים. הגורם המשתנה בסדרת בדיקות זו היה זמן שמישות הדבק בתנאים חמים לפני תחילת מלאכת החיפוי.

לא נצפתה ירידה בחוזק הידבקות האריחים, הממוצע והמינימלי, עם העלייה במשך זמן השמישות בתנאים חמים. נראה שהירידה המשמעותית בערכי החוזק של מערכות החיפוי אשר הוכנו ואושפרו בתנאים חמים, בהשוואה לתנאי רפרנס, נובעת מההשפעה המזיקה של טמפרטורת הרקע, של האריחים (70° צ') וגורמי סביבה אחרים, ולאו דווקא ממשך זמן שמישות הדבק בתנאים חמים. יחד עם זאת, חובה להדגיש שככל שעלה זמן שמישות הדבק בתנאים חמים, כן עלה במידה מסוימת גם הפיזור בתוצאות חוזק ההידבקות, במיוחד במערכות חיפוי עם אריחי פורצלן ודבקים מס' 2 ו-3, כפי שניתן לראות בציור 19.

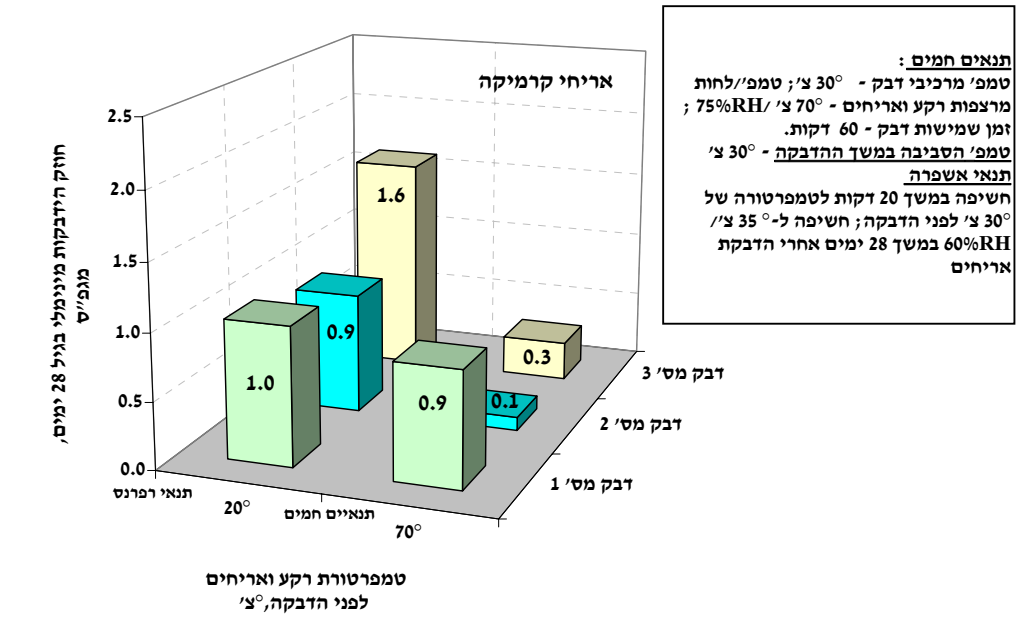


א'

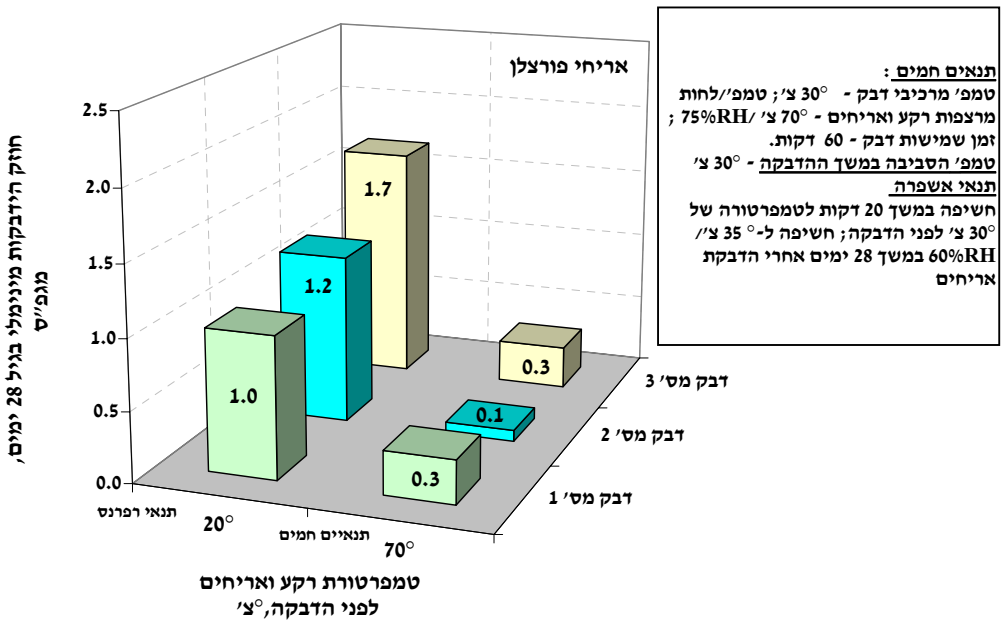


ב'

ציור 14. השפעת תנאים חמים על חוזק ההידבקות הממוצע במערכת חיפוי עם: א' – אריחי קרמיקה; ב' – אריחי פורצלן. זמן שמישות דבק - 60 דקות. זמן חופשי של דבק – 20 דקות

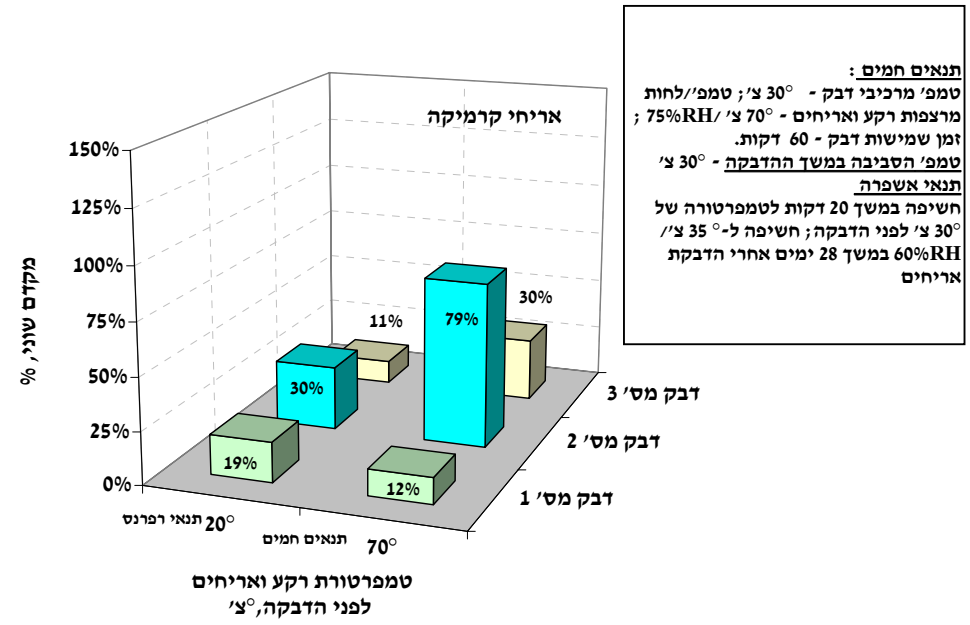


א'

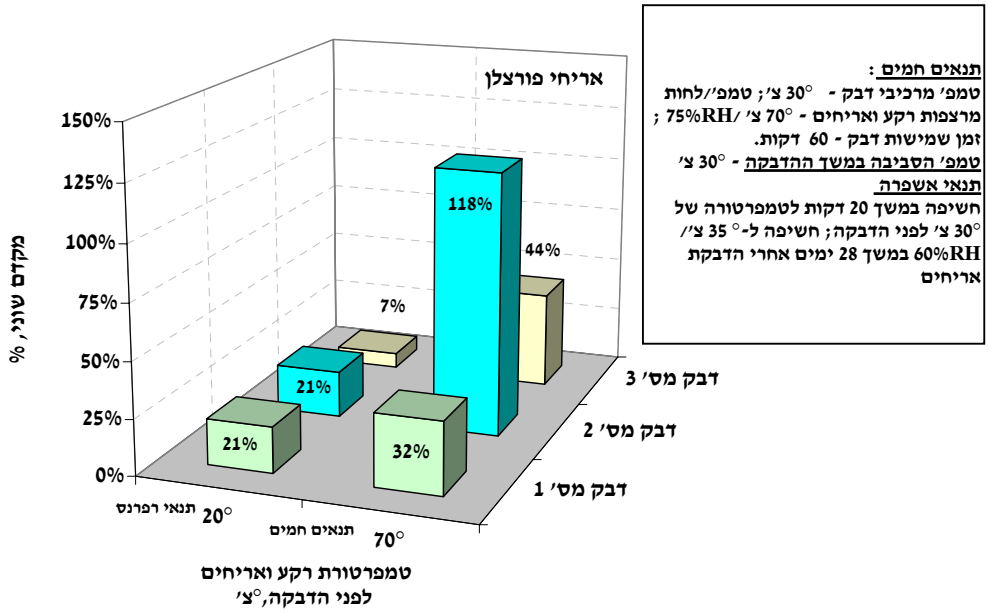


ב'

ציור 15. השפעת תנאים חמים על חוזק ההידבקות המינימלי במערכת החיפוי עם: א' – אריחי קרמיקה; ב' – אריחי פורצלן. זמן שמישות דבק - 60 דקות. זמן חופשי של הדבק – 20 דקות

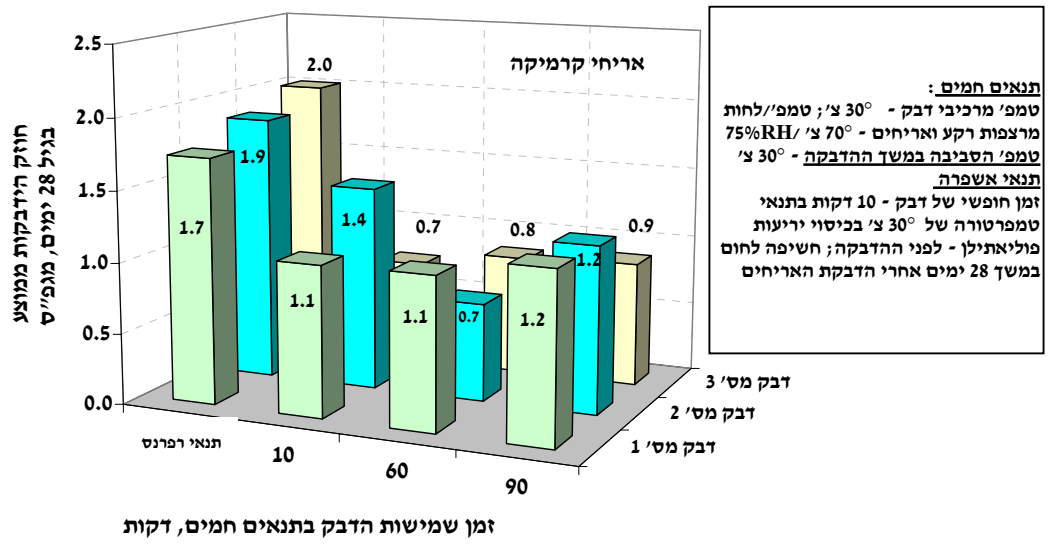


א'

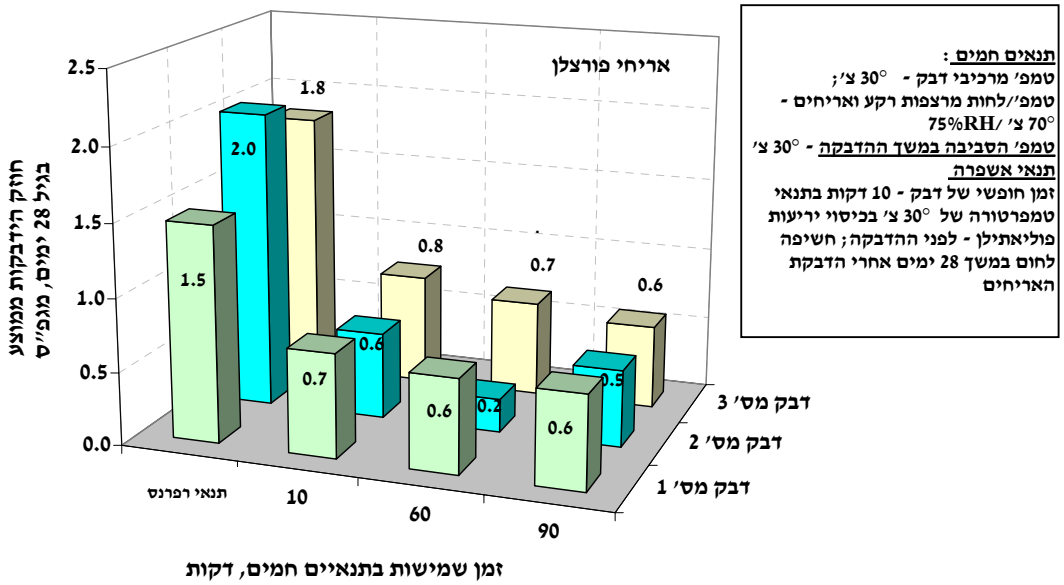


ב'

ציור 16. השפעת תנאים חמים על פיזור התוצאות של חוזק הידבקות במערכת החיפוי עם: א' – אריחי קרמיקה; ב' – אריחי פורצלן. זמן שמישות דבק - 60 דקות. זמן חופשי של דבק – 20 דקות

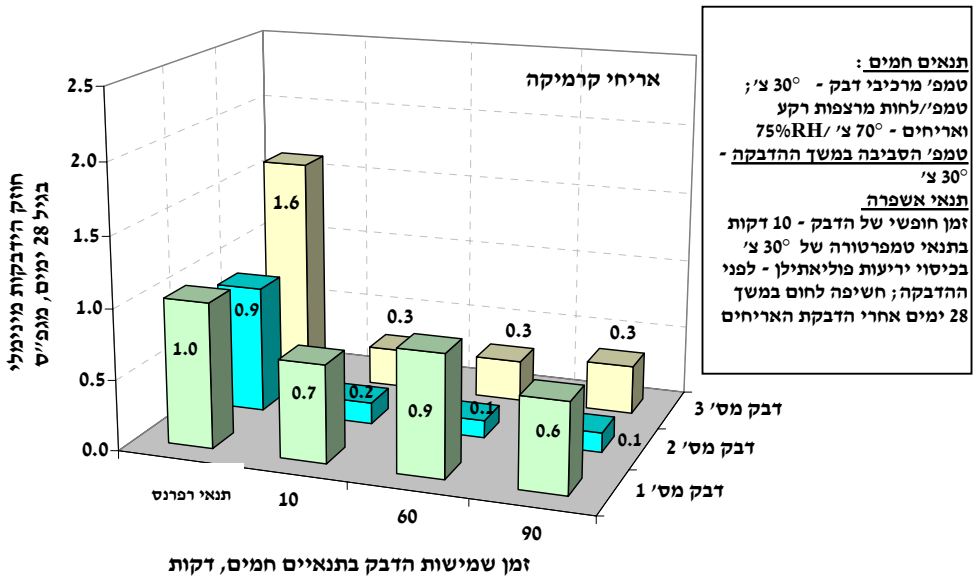


א'

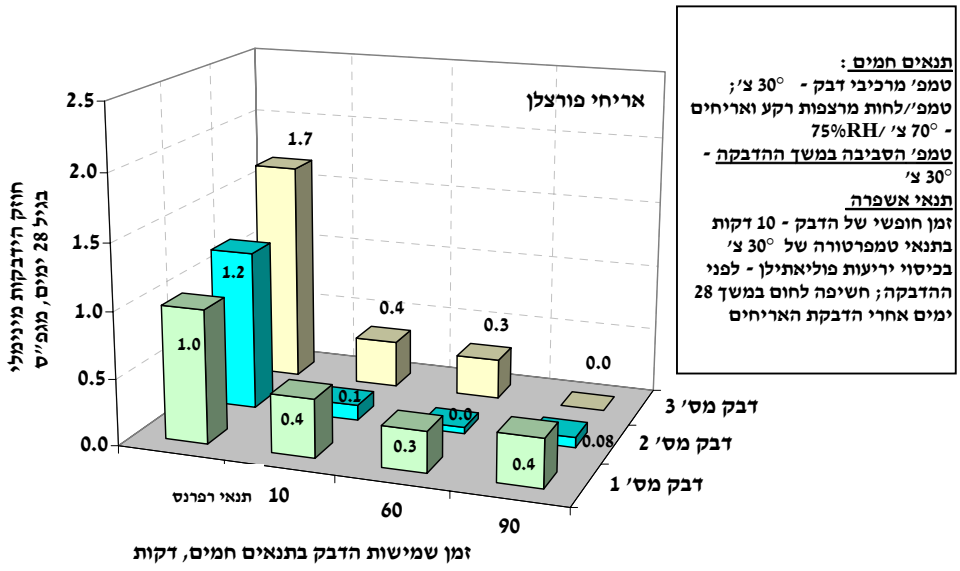


ב'

ציור 17. השפעת זמן שמישות הדבק בתנאים חמים על חוזק ההידבקות הממוצע במערכת החיפוי עם: א' – אריחי קרמיקה; ב' – אריחי פורצלן. זמן חופשי של הדבק – 10 דקות

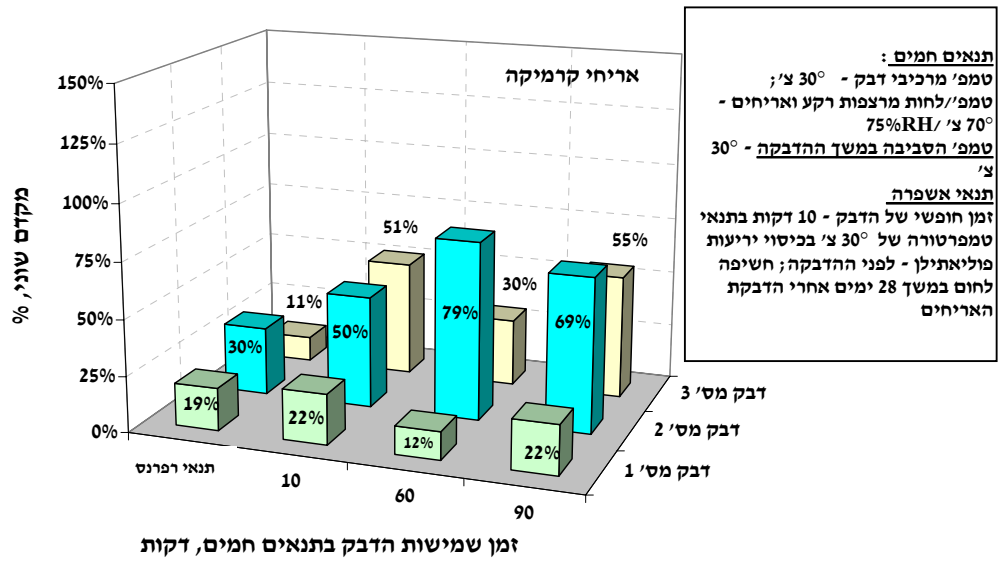


א'

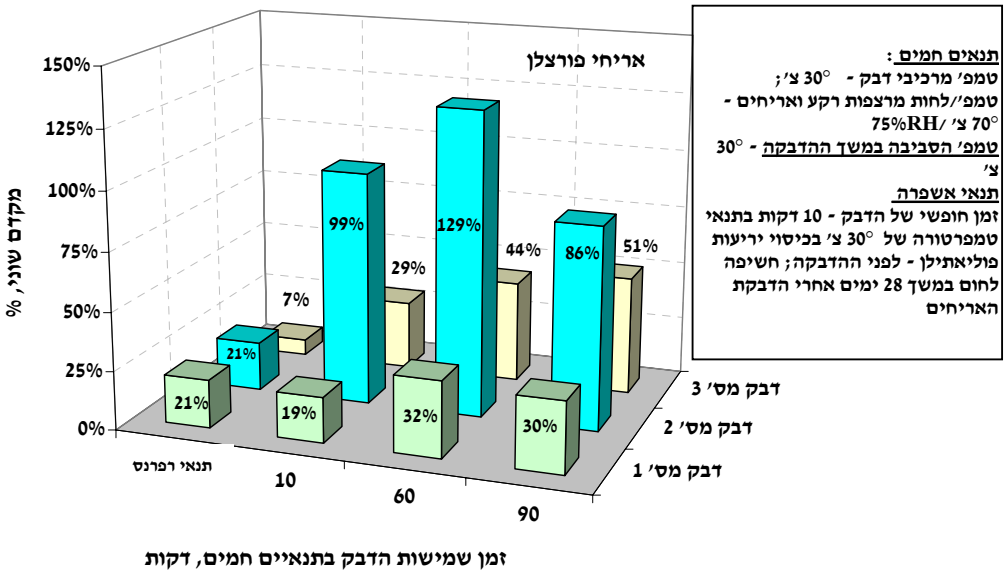


ב'

ציור 18. השפעת זמן שמישות הדבק בתנאים חמים על חוזק ההידבקות המינימלי במערכת החיפוי עם: א' – אריחי קרמיקה; ב' – אריחי פורצלן. זמן חופשי של הדבק – 10 דקות



א'



ב'

ציור 19. השפעת זמן שמישות הדבק בתנאים חמים על פיזור התוצאות של חוזק ההידבקות במערכת החיפוי עם: א' – אריחי קרמיקה; ב' – אריחי פורצלן. זמן חופשי של הדבק – 10 דקות

4.4.3. השפעת חשיפת הדבק לקרינת UV במשך זמן חופשי

בציורים 20 – 22 מוצגים השינויים בחוזקי ההידבקות, הממוצע והמינימלי, ופיזור התוצאות של חוזק ההידבקות במערכות החיפוי אשר בהן נחשף הדבק לקרינת UV במשך 20 דקות (זמן חופשי). לאחר הדבקת האריחים נחשפו מערכות אלה לתנאים חמים. הגורם המשתנה בסדרת בדיקות זו היה שילוב של השפעת קרינת UV בזמן החופשי של הדבק וחשיפת מערכת החיפוי לתנאים חמים בתום הדבקת האריחים.

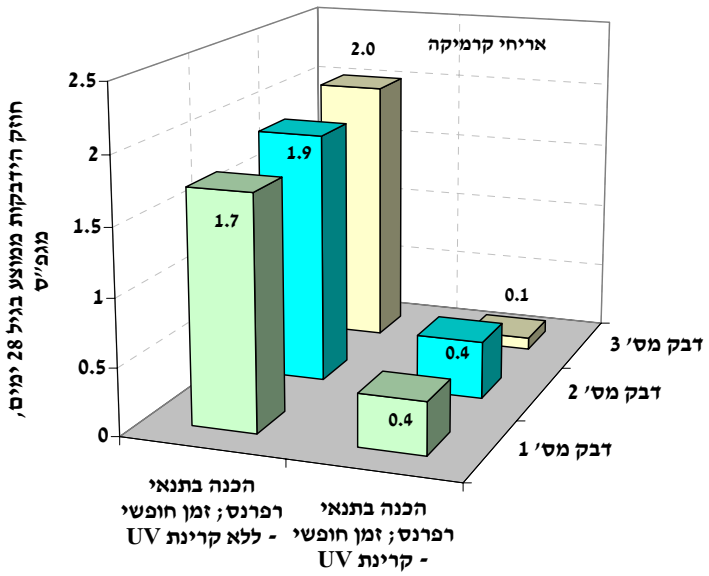
על סמך התוצאות המוצגות בציורים הללו ניתן לסכם: קרינת UV ברמות האופייניות לאלה של האקלים הישראלי גורמת לירידה דרסטית של חוזק ההידבקות במערכת. יתר על כן, מערכות החיפוי שנחשפו להשפעת קרינת UV, למעט המערכת עם אריחי פורצלן ודבק מס' 1, לא ענו לדרישות התקן לגבי חוזק ההידבקות הממוצע. מובן מאליו, שאף אחת מהמערכות הנ"ל לא עמדה בדרישה לחוזק ההידבקות המינימלי שבהצעה לרוויזית התקן. קרינת UV גרמה גם לעלייה ניכרת בפיזור התוצאות של חוזק ההידבקות בכל מערכות החיפוי שנבדקו.

4.4.4. השפעה משולבת של קרינת UV, טמפרטורת הרקע והאריחים, וחשיפה לתנאים חמים

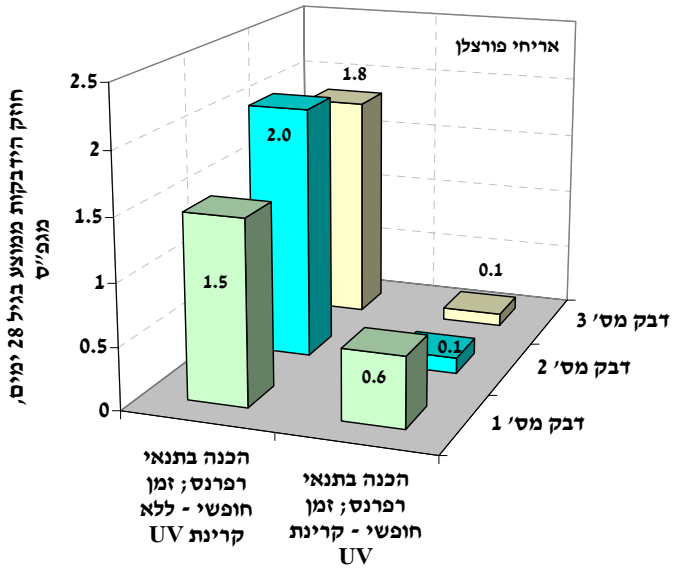
בציורים 23 – 25 מוצגות התוצאות של חוזק ההידבקות במערכות החיפוי אשר נחשפו להשפעת טמפרטורות שונות של הרקע והאריחים, קרינת UV בזמן חופשי של הדבק ותנאים חמים לאחר הדבקת הדבק. הגורם המשתנה בסדרת בדיקות זו היה טמפרטורת הרקע והאריחים במועד תחילת מלאכת הדבקת האריחים.

התוצאות המתוארות בציורים 23 – 24 מראות בבירור שקרינת UV היא הגורם המזיק ביותר אשר מביא לירידה מוחלטת של חוזק ההידבקות עד לערכים הזניחים ביותר. כאשר הדבק נחשף לקרינת UV , טמפרטורת הרקע והאריחים הינם הגורם המשני והשפעתו מזערית. יחד עם זאת, לטמפרטורת הרקע והאריחים הייתה השפעה מוחלטת על העלייה בפיזור תוצאות חוזק ההידבקות, במיוחד במערכות עם אריחי קרמיקה, כמתואר בציור 25.

בציורים 26 – 28 ניתן לראות את השינויים בחוזק ההידבקות של האריחים כפונקציה של משך חשיפת הדבק הטרי לקרינת UV. כפי שהודגש לעיל, קרינת UV מהווה את המכשול העיקרי הפוגם בחוזק ההידבקות במערכות החיפוי עם אריחי קרמיקה ופורצלן. כפי שניתן לראות בציורים 26 – 28 לקרינת UV הייתה השפעה מזיקה כבר ב-10 הדקות הראשונות של חשיפת הדבק הטרי לקרינה. חשיפה ממושכת יותר (עד 20 דקות) כמעט ולא תרמה השפעה שלילית נוספת לחוזק הידבקות האריחים, כפי שניתן לראות בציורים 26 – 27. לעומת זאת החשיפה הממושכת לקרינת UV גרמה לעלייה דרסטית בפיזור התוצאות של חוזק ההידבקות, כמתואר בציור 28.

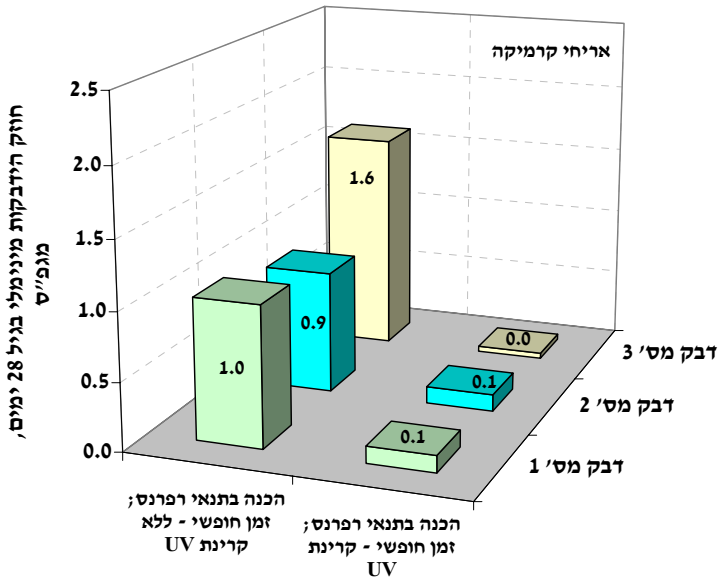


א'

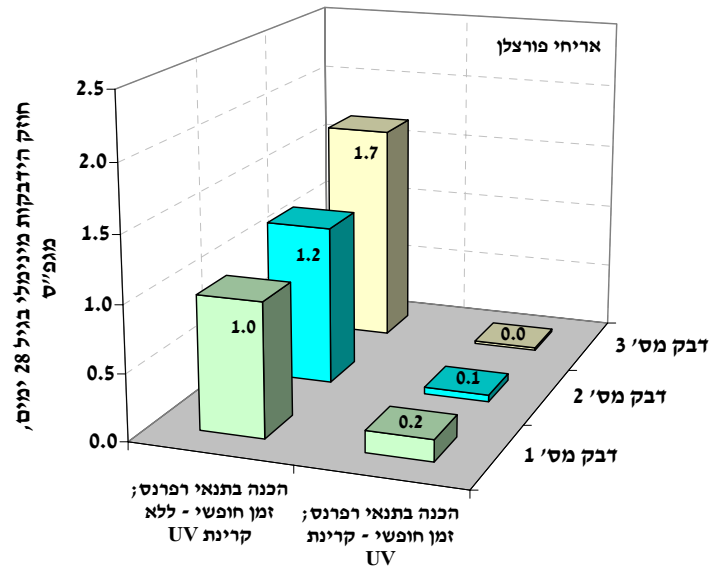


ב'

ציור 20. השפעת קרינת UV במשך זמן חופשי של דבק על חוזק ההידבקות הממוצע במערכת החיפוי עם: א' – אריחי קרמיקה; ב' – אריחי פורצלן. זמן שמישות דבק - 60 דקות. זמן חופשי של הדבק – 20 דקות

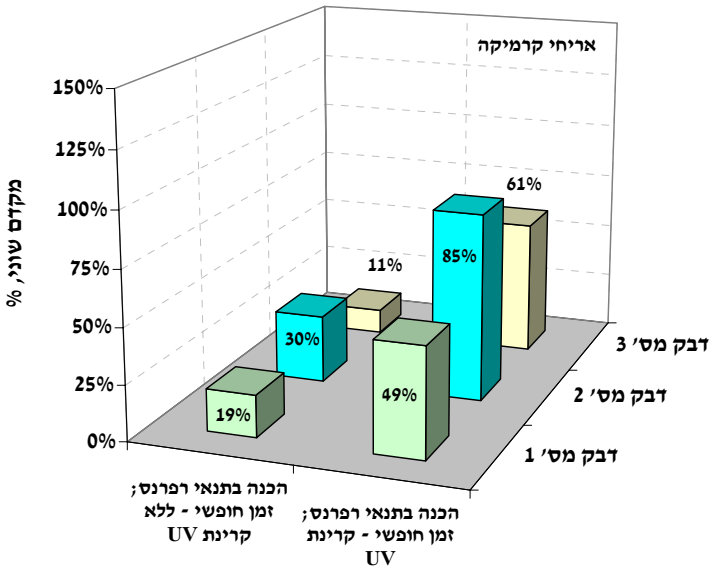


א'

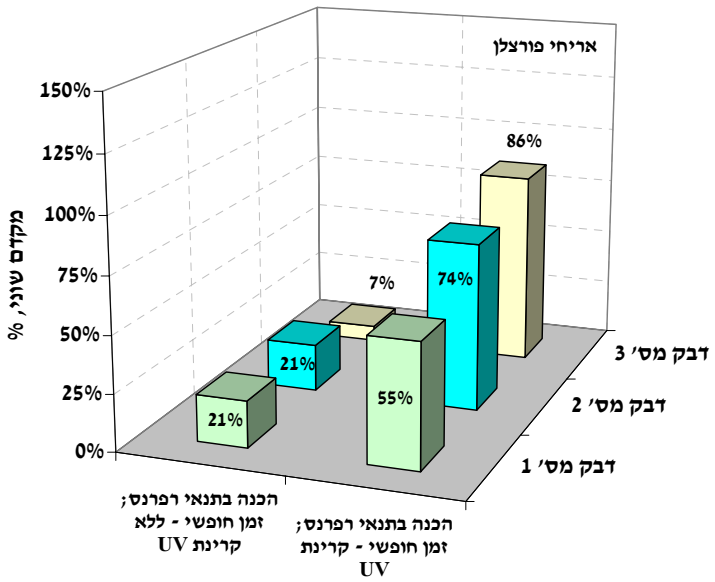


ב'

ציור 21. השפעת קרינת UV במשך זמן חופשי של דבק על חוזק הידבקות מינימלי במערכת חיפוי עם: א' – אריחי קרמיקה; ב' – אריחי פורצלן. זמן שמישות דבק - 60 דקות. זמן חופשי של דבק – 20 דקות

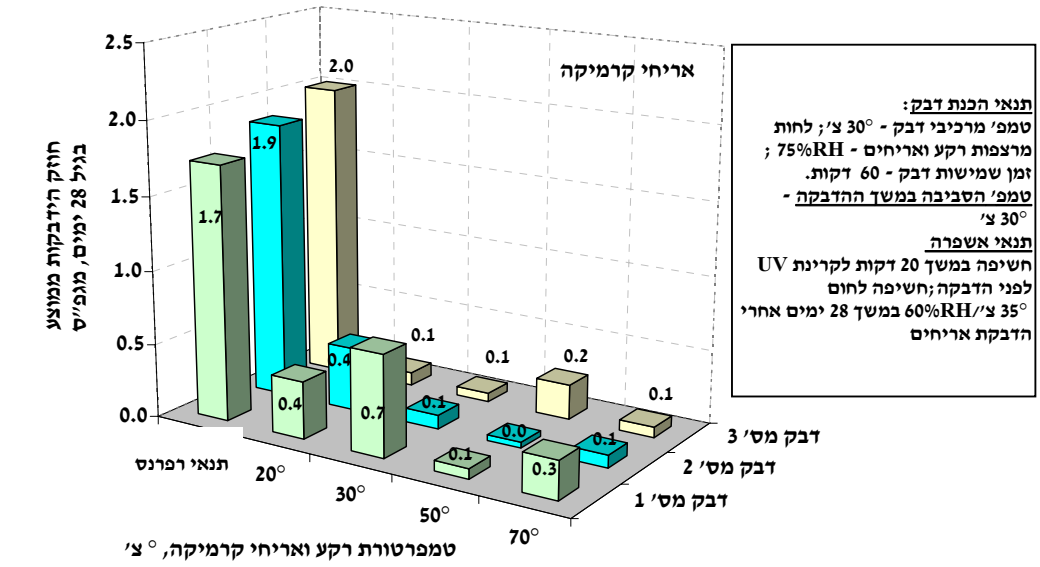


א'

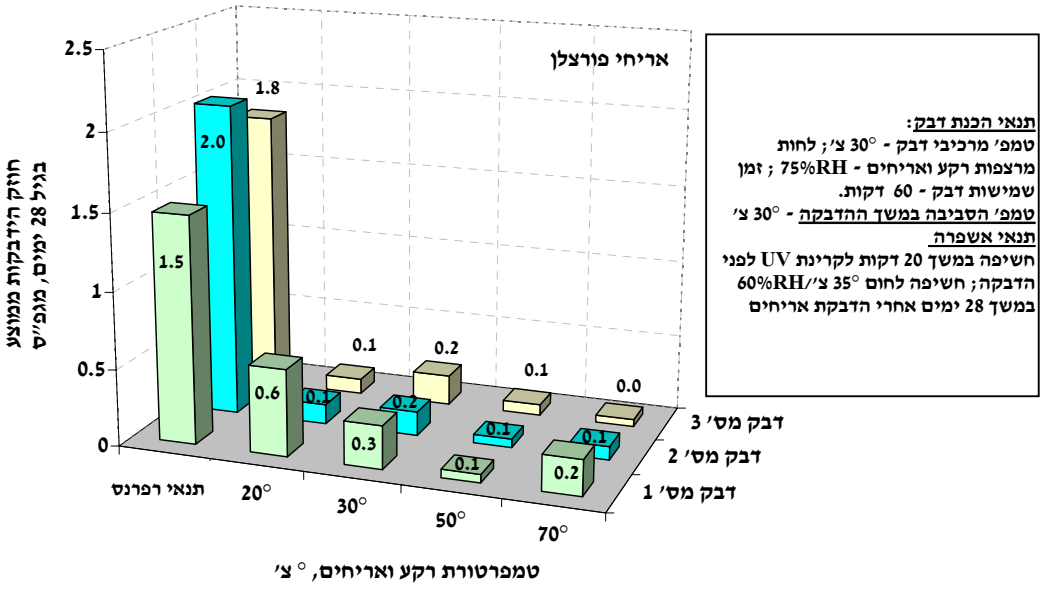


ב'

ציור 22. השפעת קרינת UV במשך זמן חופשי של דבק על פיזור התוצאות של חוזק ההידבקות במערכת החיפוי עם: א' – אריחי קרמיקה; ב' – אריחי פורצלן. זמן שמישות דבק - 60 דקות. זמן חופשי של דבק – 20 דקות

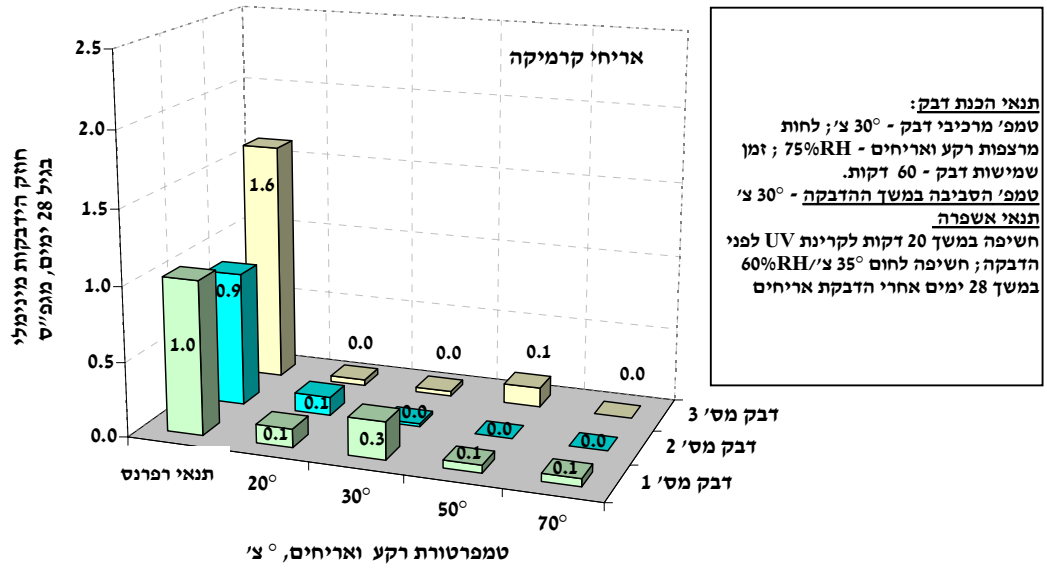


א'

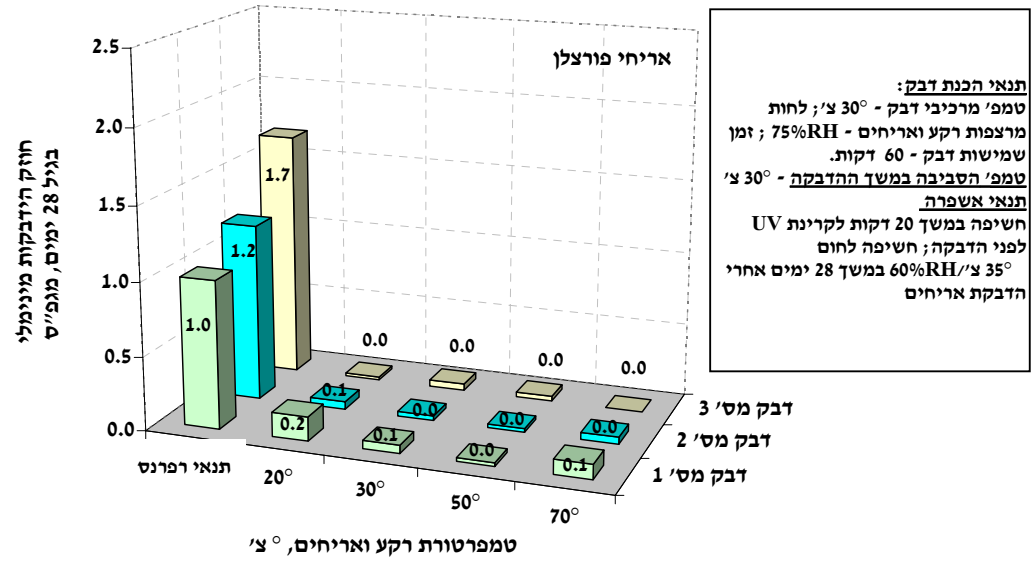


ב'

ציור 23. השפעת טמפרטורת הרקע והאריחים על חוזק ההידבקות הממוצע במערכת החיפוי עם: א' – אריחי קרמיקה; ב' – אריחי פורצלן. זמן שמישות דבק - 60 דקות בתנאים חמים. זמן חופשי של הדבק – 20 דקות בהשפעת קרינת UV

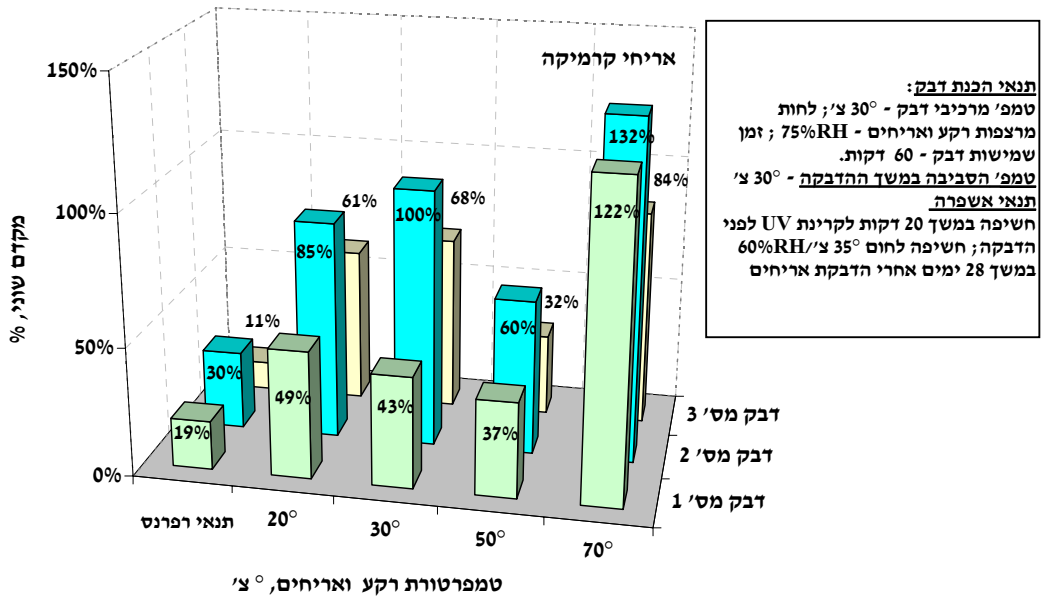


א'

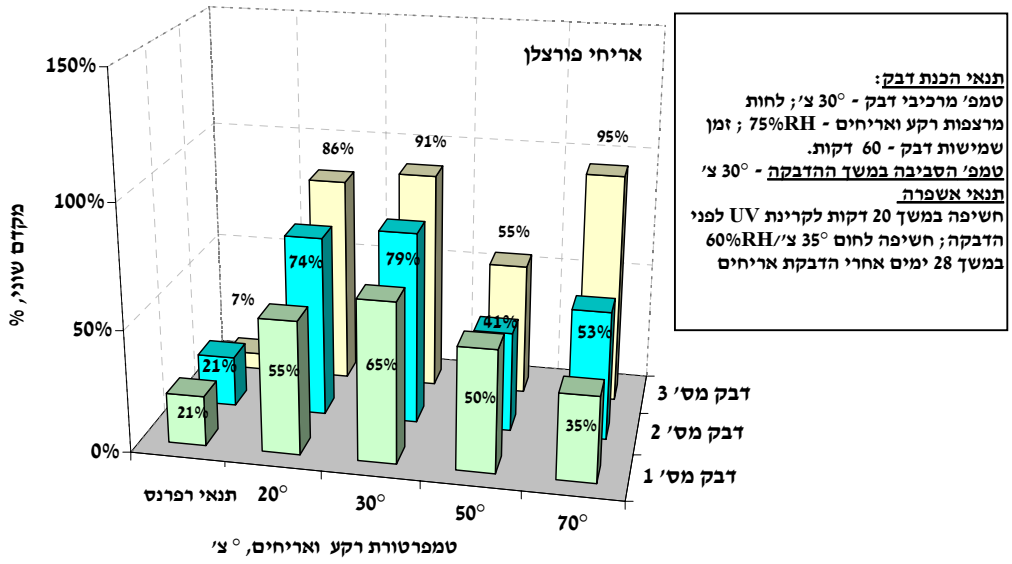


ב'

ציור 24. השפעת טמפרטורת הרקע והאריחים על חוזק ההידבקות המינימלי במערכת החיפוי עם: א' – אריחי קרמיקה; ב' – אריחי פורצלן. זמן שמישות דבק - 60 דקות בתנאים חמים. זמן חופשי של הדבק – 20 דקות בהשפעת קרינת UV

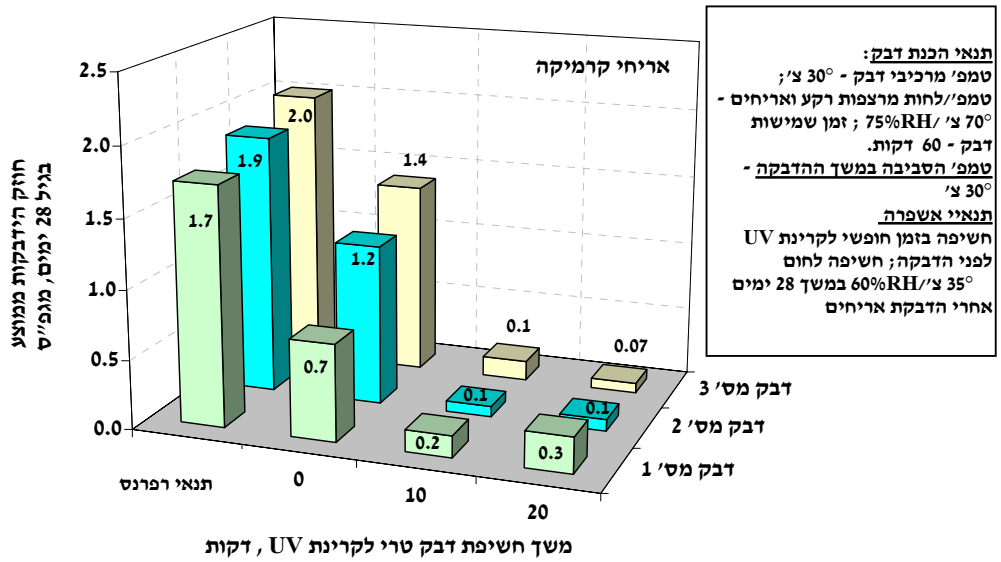


א'

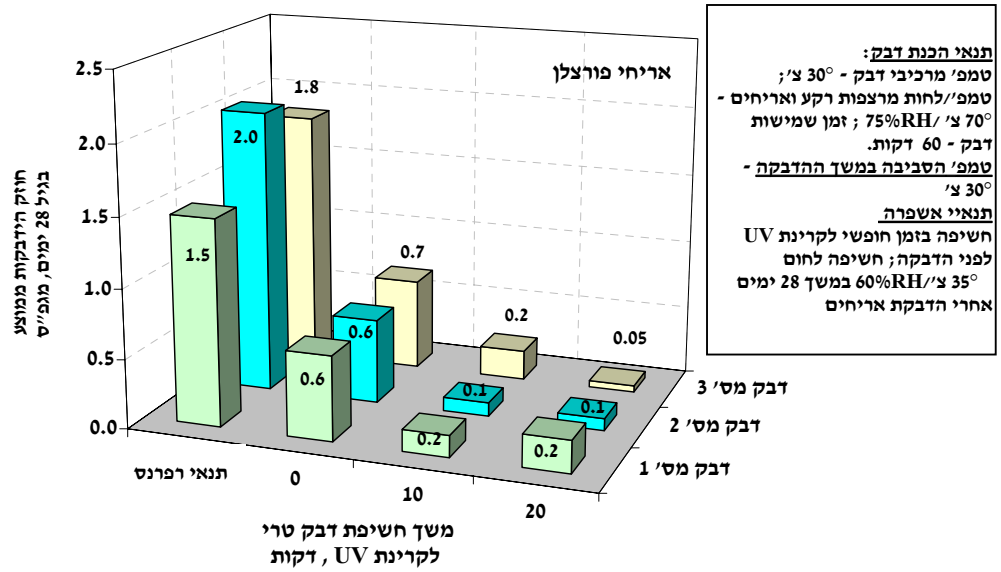


ב'

ציור 25. השפעת טמפרטורת הרקע והאריחים על פיזור התוצאות של חוזק ההידבקות במערכת החיפוי עם: א' – אריחי קרמיקה; ב' – אריחי פורצלן. זמן שמישות דבק - 60 דקות בתנאים חמים. זמן פתוח – 20 דקות בהשפעת קרינת UV

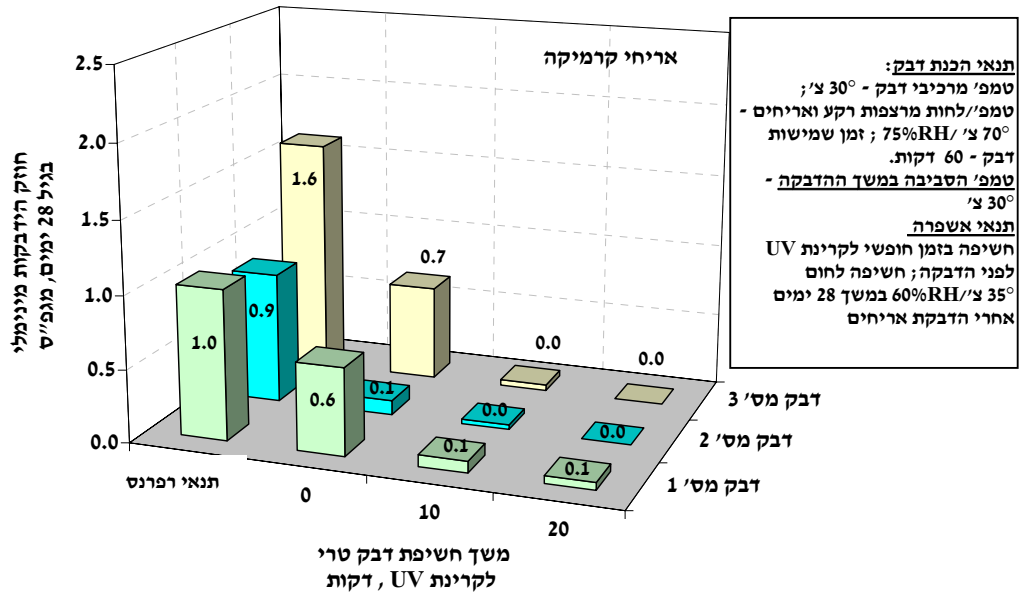


א'

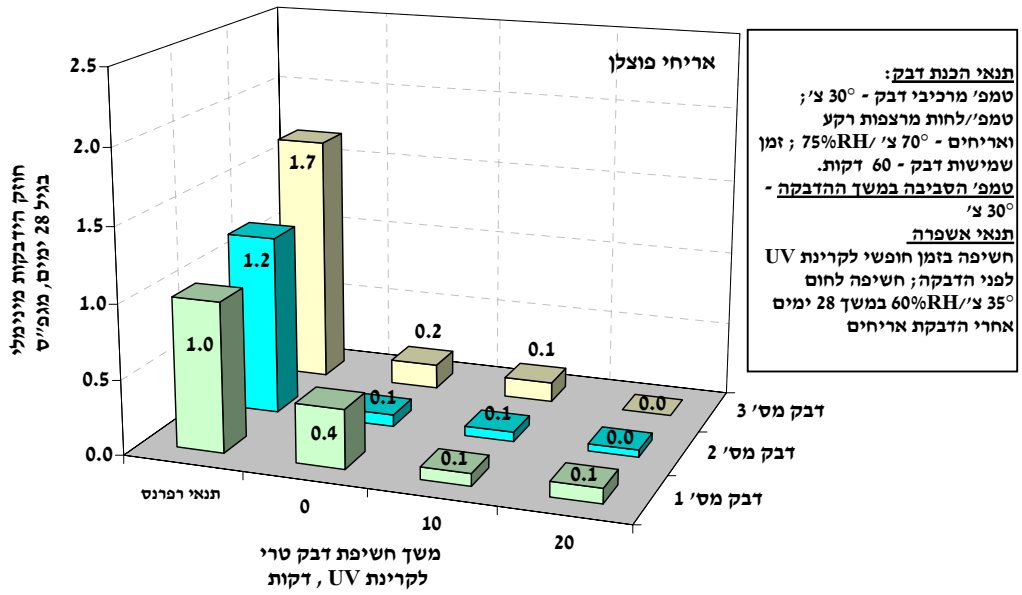


ב'

ציור 26. השפעה של משך חשיפת הדבק הטרי לקרינת UV על חוזק ההידבקות הממוצע במערכת החיפוי עם: א' – אריחי קרמיקה; ב' – אריחי פורצלן. זמן שמישות דבק - 60 דקות בתנאים חמים

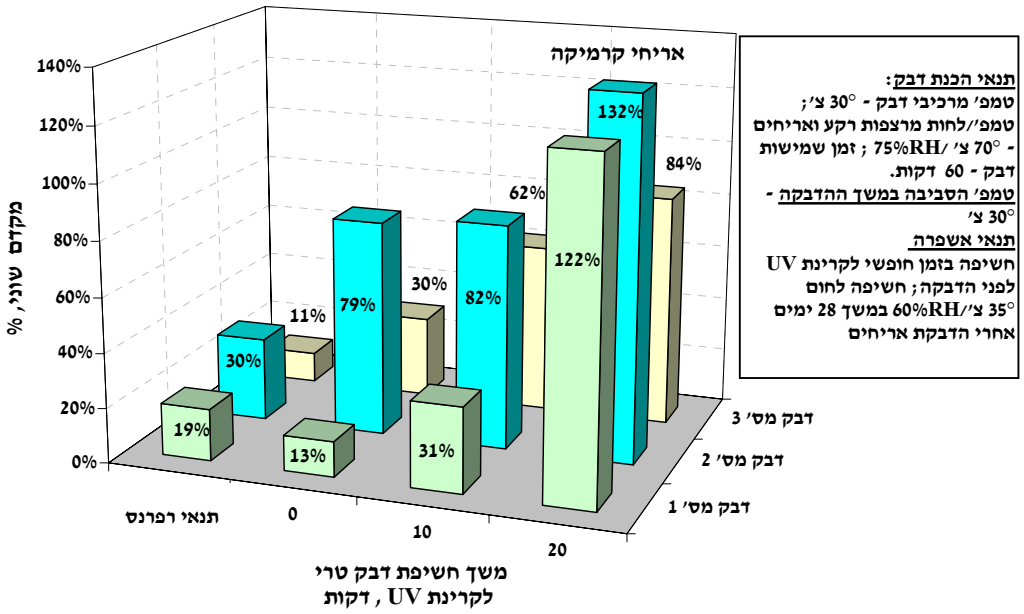


א'

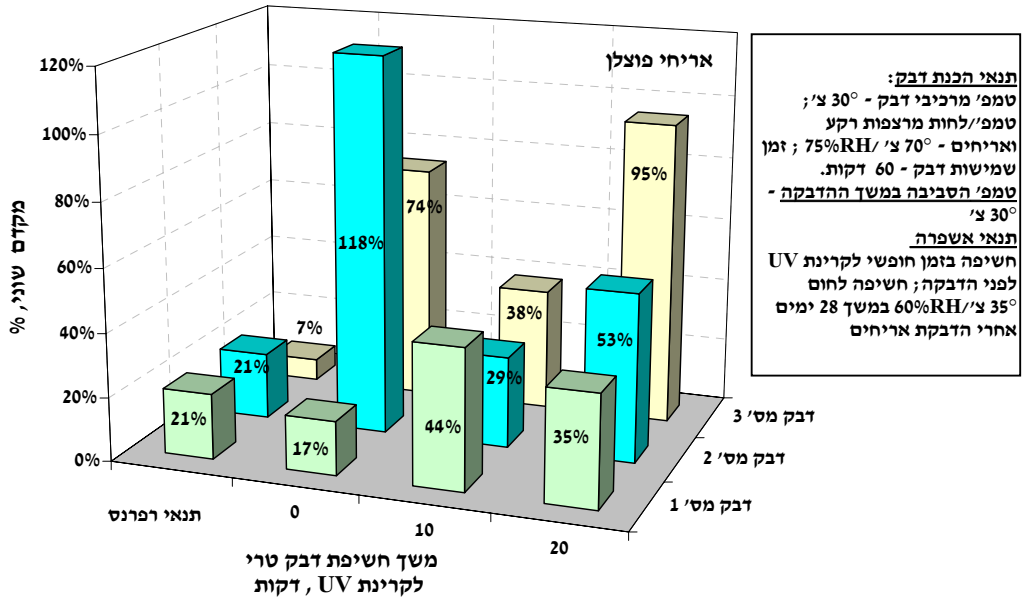


ב'

ציור 27 . השפעה של משך חשיפת הדבק הטרי לקרינת UV על חוזק ההידבקות המינימלי במערכת החיפוי עם: א' – אריחי קרמיקה; ב' – אריחי פורצלן. זמן שמישות דבק - 60 דקות בתנאים חמים



א'



ב'

ציור 28. השפעה של משך חשיפת הדבק הטרי לקרינת UV על פיזור התוצאות של חוזק ההידבקות במערכת החיפוי עם: א' – אריחי קרמיקה; ב' – אריחי פורצלן. זמן שמישות דבק - 60 דקות בתנאים חמים

4.4.5. השפעה של לחות הרקע והאריחים

בציורים 29 – 31 ניתן לראות את השינויים בחוזק הידבקות האריחים כפונקציה של לחות הרקע והאריחים. לא התגלתה ההשפעה הברורה של לחות הרקע והאריחים על חוזק ההידבקות במערכות החיפוי עם כל הדבקים. קיימת נטייה מסוימת של העלייה בפיזור התוצאות של חוזק ההידבקות במערכות החיפוי עם דבקים מס׳ 2 ו-3. לעומת זאת, במערכות החיפוי עם דבק מס׳ 1 לא גרמה העלייה בלחות הרקע והאריחים לעלייה בפיזור תוצאות החוזק.

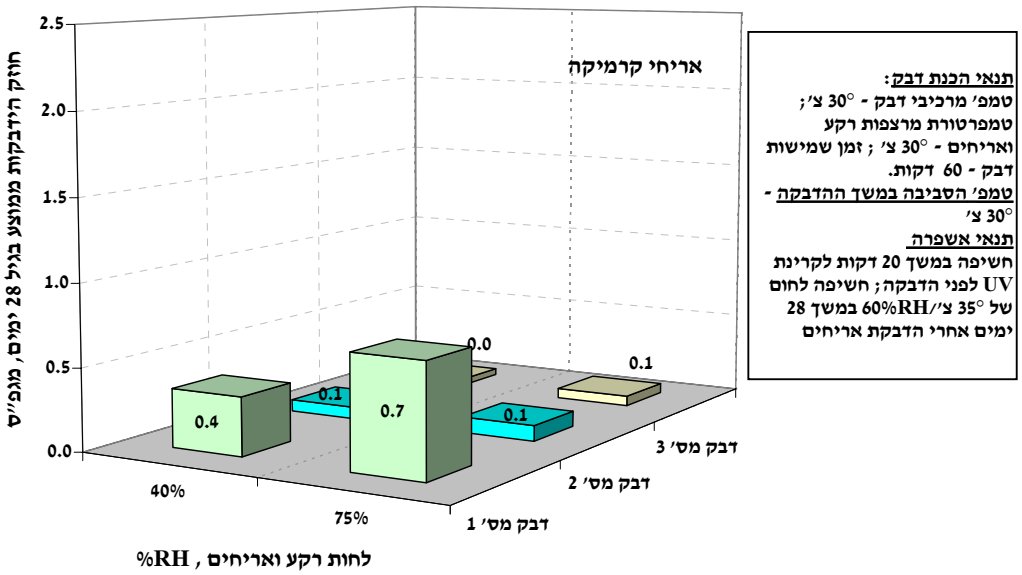
4.4.6. בלייה לטווח ארוך בתנאים חמים של מערכות החיפוי אשר בהם נחשף הדבק הטרי להשפעת קרינת UV

א. איקלום מרכיבי המערכת ועירבוב הדבק בתנאי רפרנס ; ביצוע מלאכת החיפוי בתנאים חמים

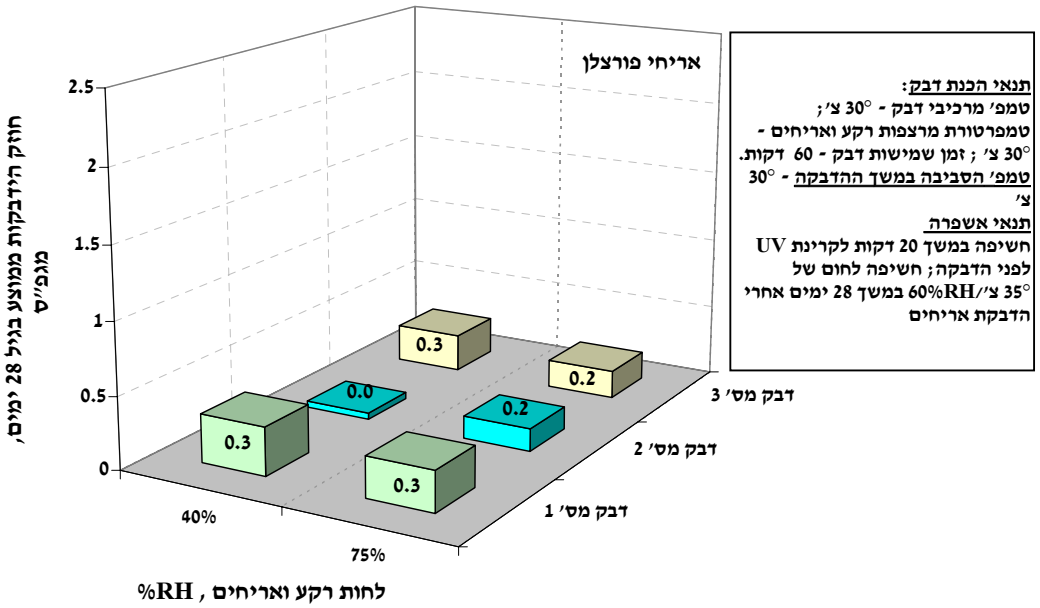
בציורים 32 - 34 מוצגים השינויים בחוזק ההידבקות במערכות החיפוי אשר נחשפו לבלייה בתנאים חמים במשך 90 ימים לעומת אותן המערכות בגיל 28 ימים. הדבק במערכות חיפוי אלה נחשף להשפעת קרינת UV. אי לכך, חוזק ההידבקות של האריחים היה נמוך כבר בגיל 28 ימים. לא נצפו שינויים משמעותיים בחוזקי ההידבקות הממוצע והמינימלי במערכות החיפוי אשר נחשפו לבלייה הממושכת בתנאים חמים, פרט למערכת החיפוי עם אריחי קרמיקה ודבק מס׳ 1 שבה חלה עלייה בחוזק ההידבקות הממוצע בגיל 90 ימים. ברוב מערכות החיפוי שבסדרה זו התקבלו הערכים הנמוכים של חוזקי ההידבקות הממוצע והמינימלי. אי לכך, הדיון בנושא פיזור התוצאות של חוזק ההידבקות אינו מעשי.

ב. איקלום מרכיבי המערכת, הכנת חומר הדבקה וביצוע מלאכת החיפוי בתנאים חמים

בציורים 35 - 37 מוצגים השינויים בחוזק ההידבקות במערכות החיפוי אשר כל הזמן היו תחת ההשפעה של תנאים חמים. כמעט ולא חלו השינויים בחוזק ההידבקות במערכות החיפוי בסדרה זאת. רק המערכת אשר הוכנה עם דבק מס׳ 1 ואריחי קרמיקה עמדה בדרישות התקן לגבי חוזק ההידבקות הממוצע, הן בגיל 28 ימים והן בגיל 90 ימים. לעומת זאת חוזק ההידבקות המינימלי במערכת זאת ירד פי 3 במשך תהליך הבלייה. נצפתה נטייה להגדלת הפיזור של תוצאות החוזק ברוב מערכות החיפוי בסדרה זו, אך הדיון בנושא זה אינו רלוונטי לאור תוצאות החוזק הנמוכות שהתקבלו.

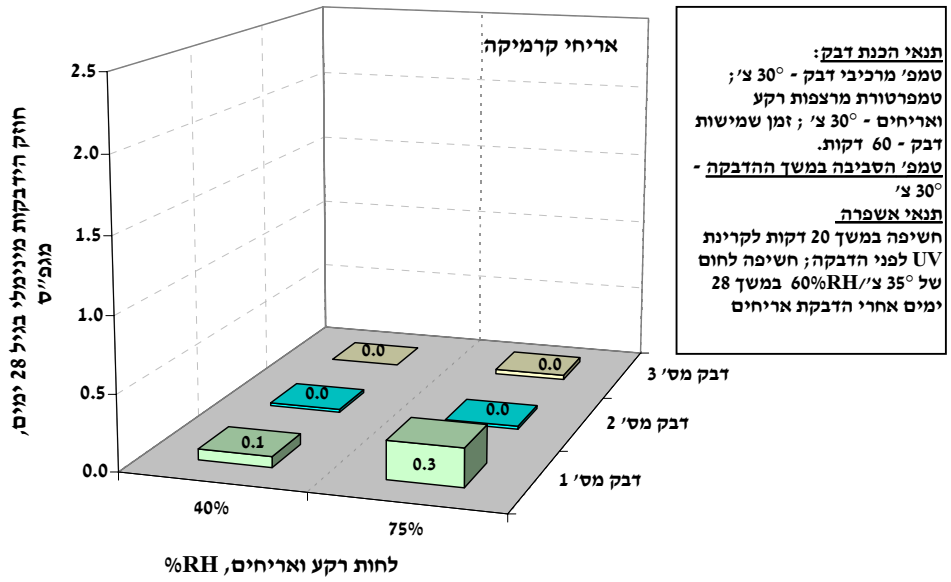


א'

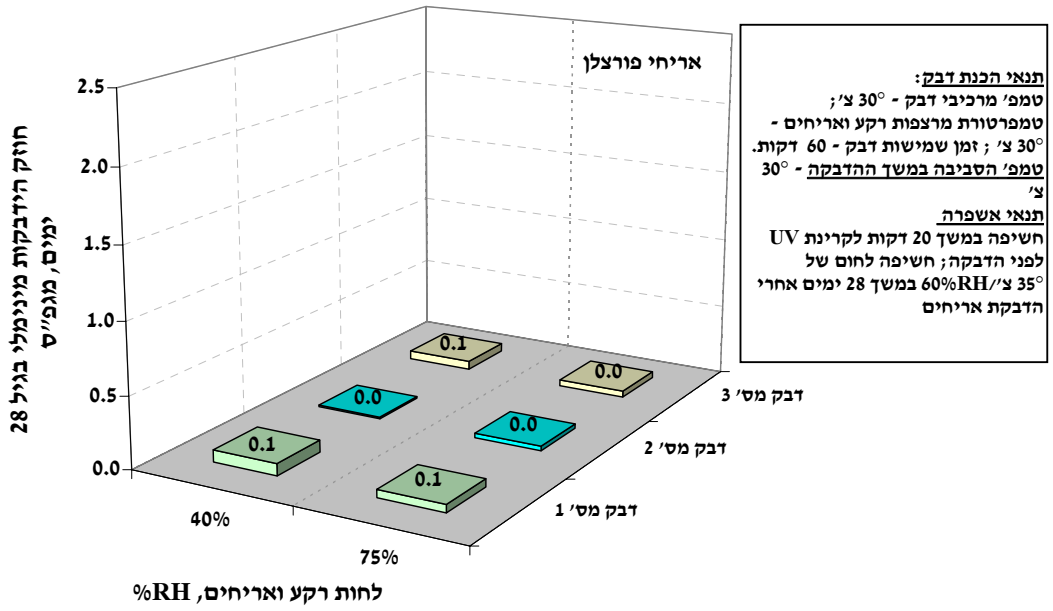


ב'

ציור 29 . השפעת לחות הרקע והאריחים על חוזק ההידבקות הממוצע במערכת החיפוי עם: א' – אריחי קרמיקה; ב' – אריחי פורצלן. זמן שמישות דבק - 60 דקות בתנאים חמים

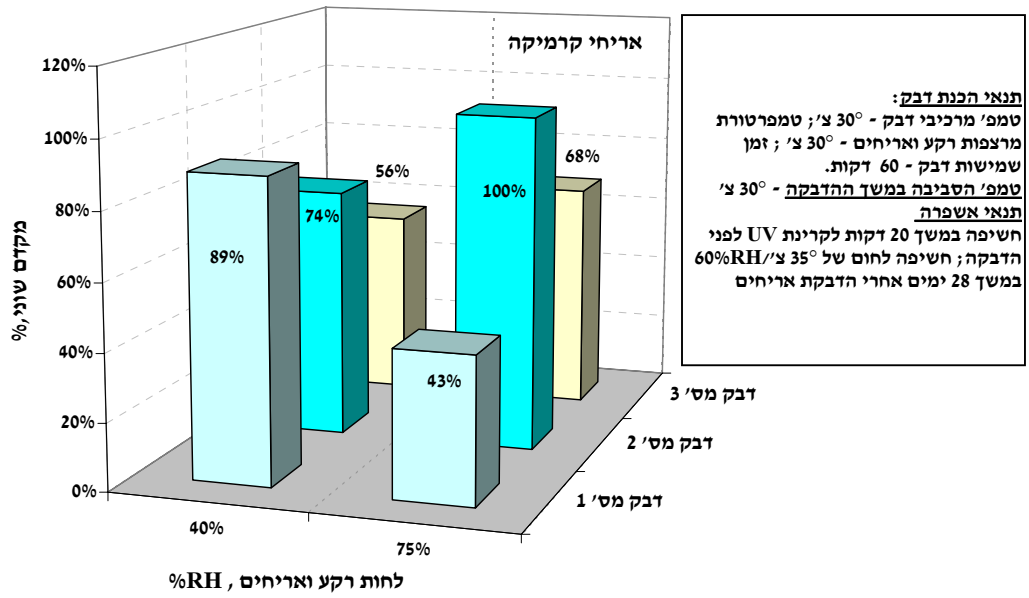


א'

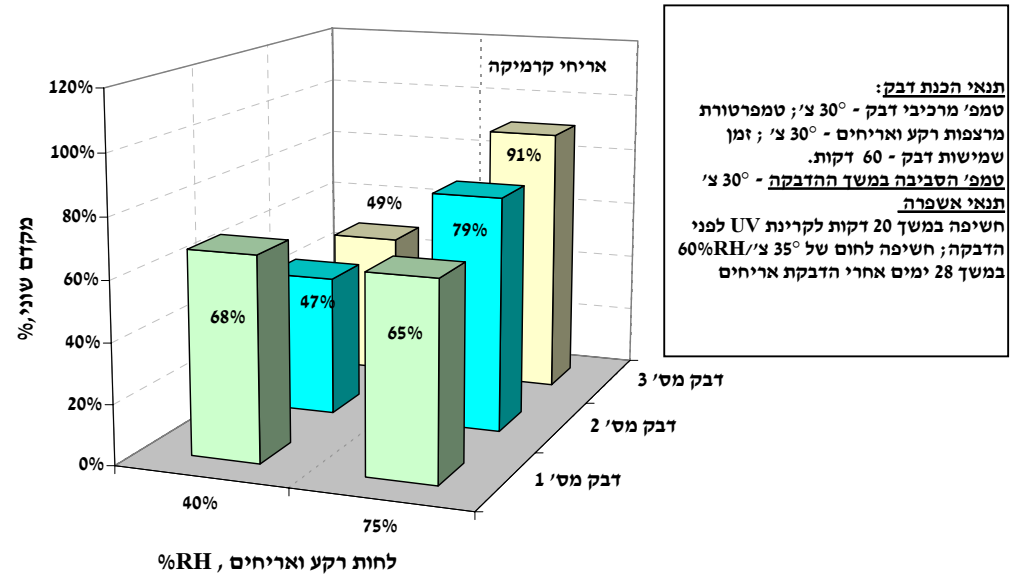


ב'

ציור 30. השפעת לחות הרקע והאריחים על חוזק ההידבקות המינימלי במערכת החיפוי עם: א' – אריחי קרמיקה; ב' – אריחי פורצלן. זמן שמישות דבק - 60 דקות בתנאים חמים

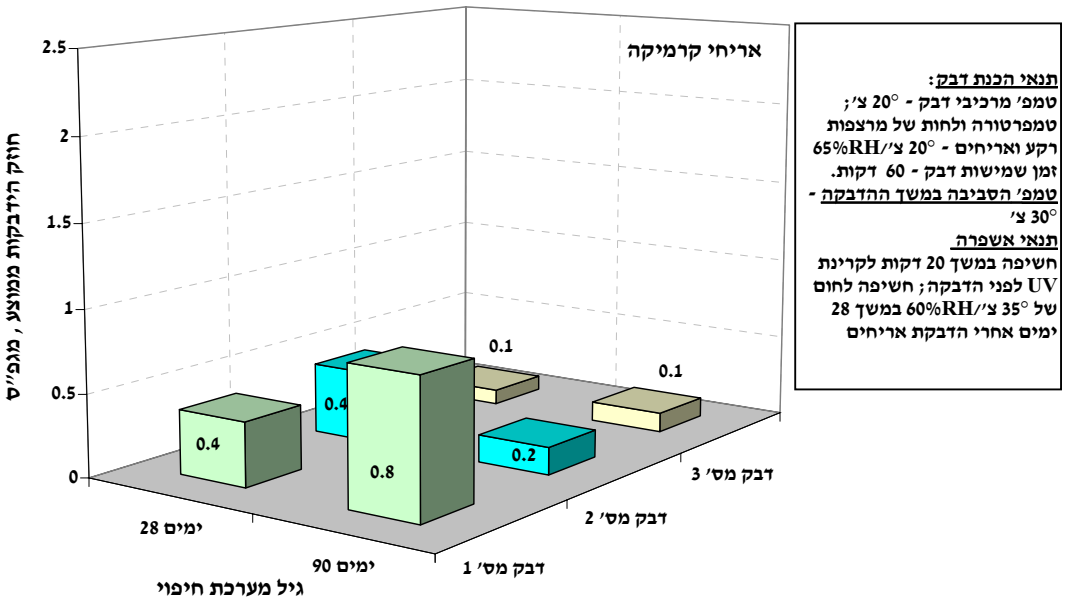


א'

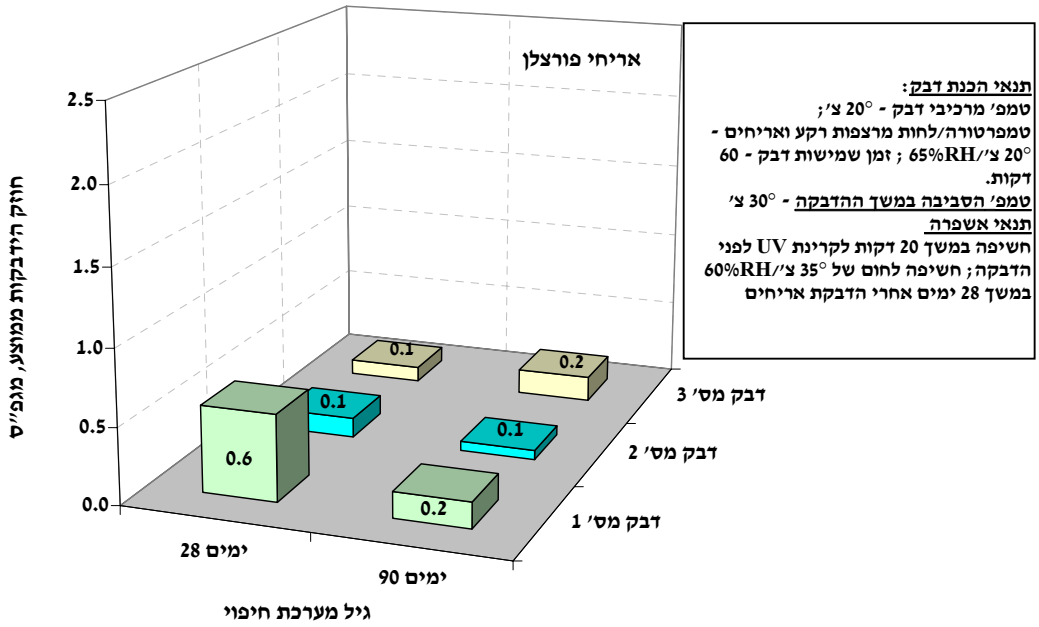


ב'

ציור 31. השפעת לחות הרקע והאריחים על פיזור התוצאות של חוזק ההידבקות במערכת החיפוי עם: א' – אריחי קרמיקה; ב' – אריחי פורצלן. זמן שמישות דבק - 60 דקות בתנאים חמים

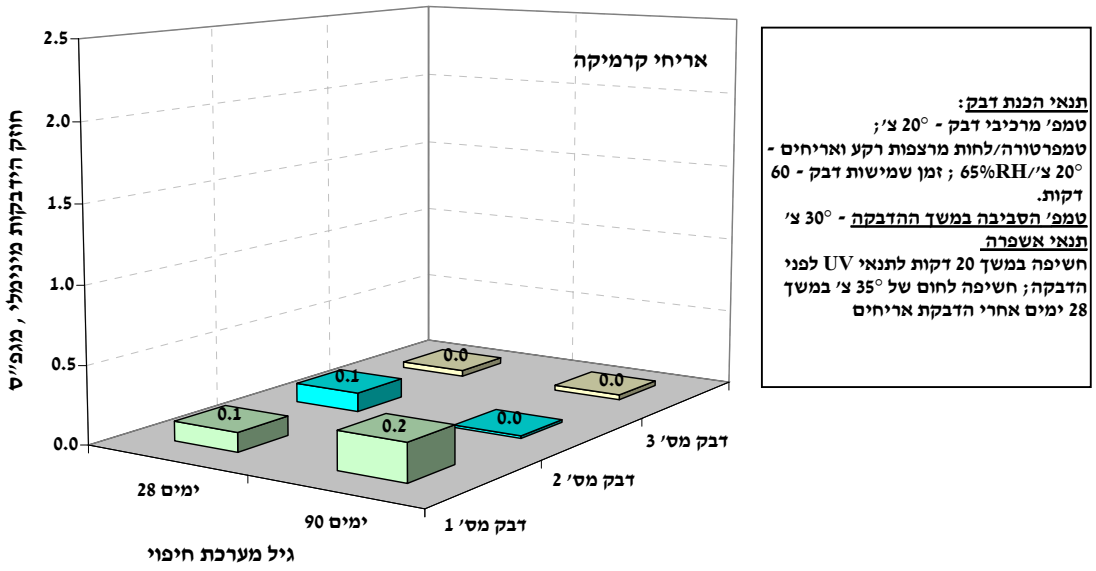


א'

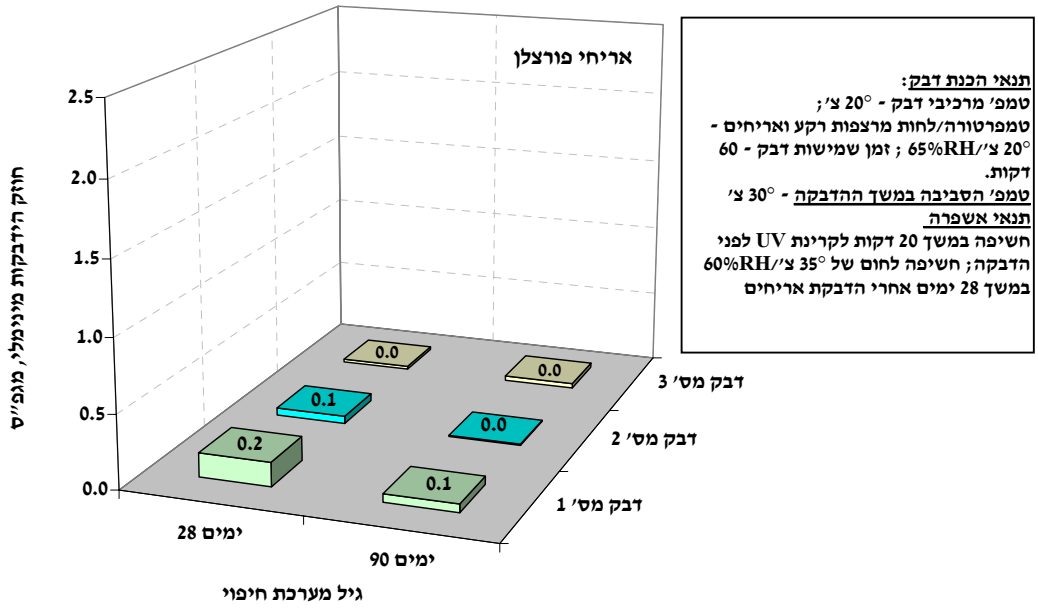


ב'

ציור 32. השפעת משך הבלייה בתנאים חמים על חוזק ההידבקות הממוצע במערכת החיפוי שבה הכנת המרכיבים נעשתה בתנאי רפרנס ומלאכת החיפוי בוצעה בתנאים חמים. זמן שמישות דבק - 60 דקות בתנאי רפרנס. זמן חופשי של דבק – 20 דקות בתנאי קרינת UV. א' – אריחי קרמיקה; ב' – אריחי פורצלן

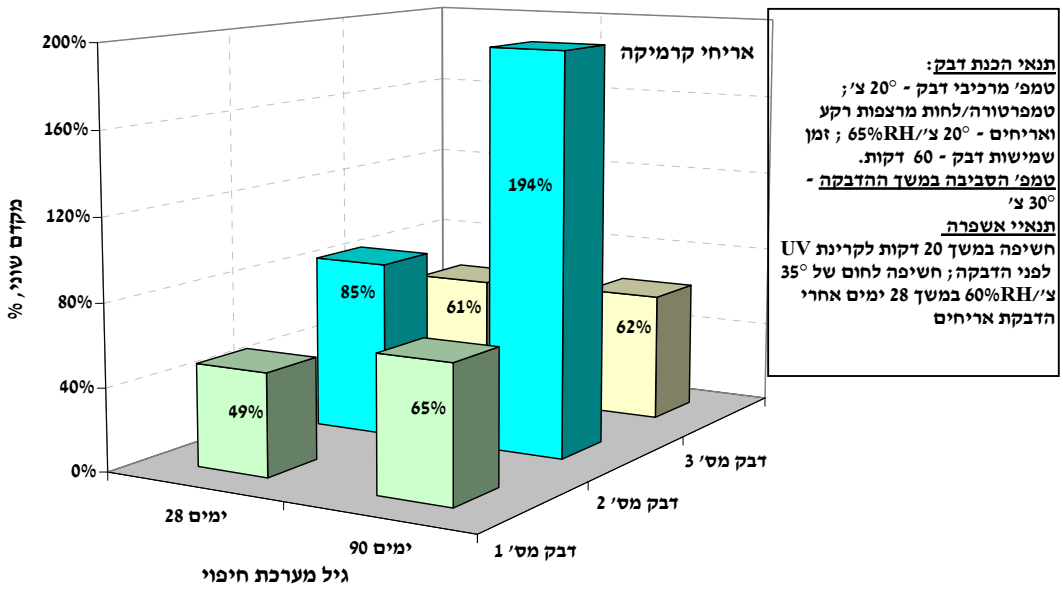


א'

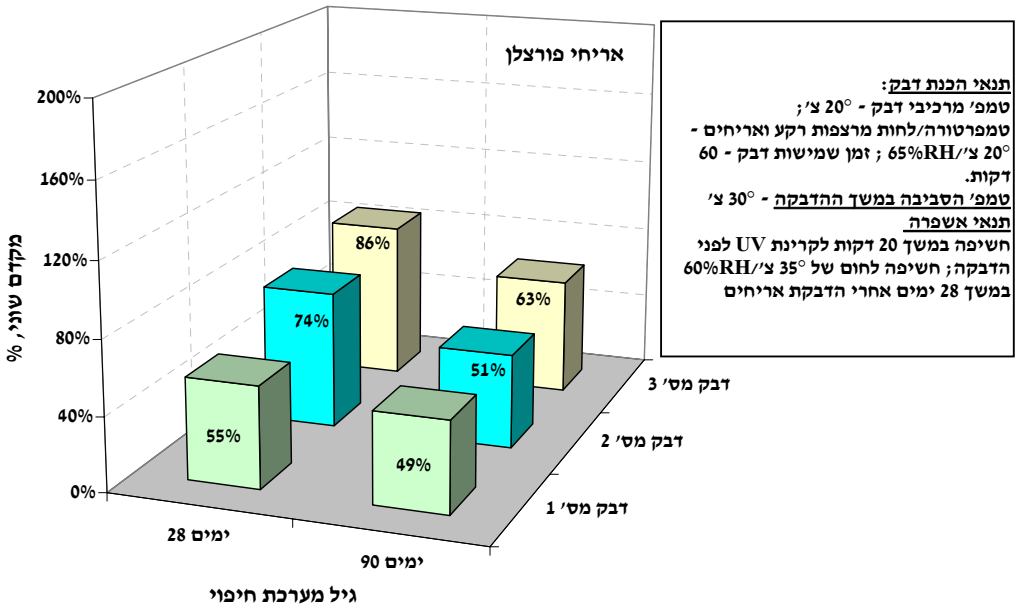


ב'

ציור 33. השפעת משך הבלייה בתנאים חמים על חוזק ההידבקות המינימלי במערכת החיפוי שבה הכנת המרכיבים נעשתה בתנאי רפרנס ומלאכת החיפוי בוצעה בתנאים חמים. זמן שמישות דבק - 60 דקות בתנאי רפרנס. זמן חופשי של דבק – 20 דקות בתנאי קרינת UV. א' – אריחי קרמיקה; ב' – אריחי פורצלן

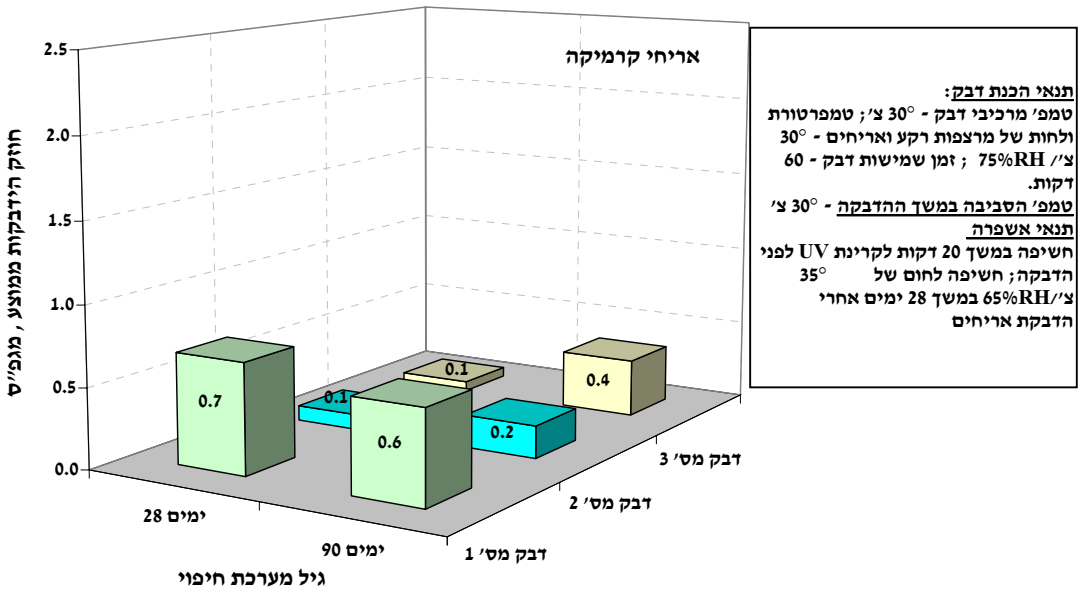


א'

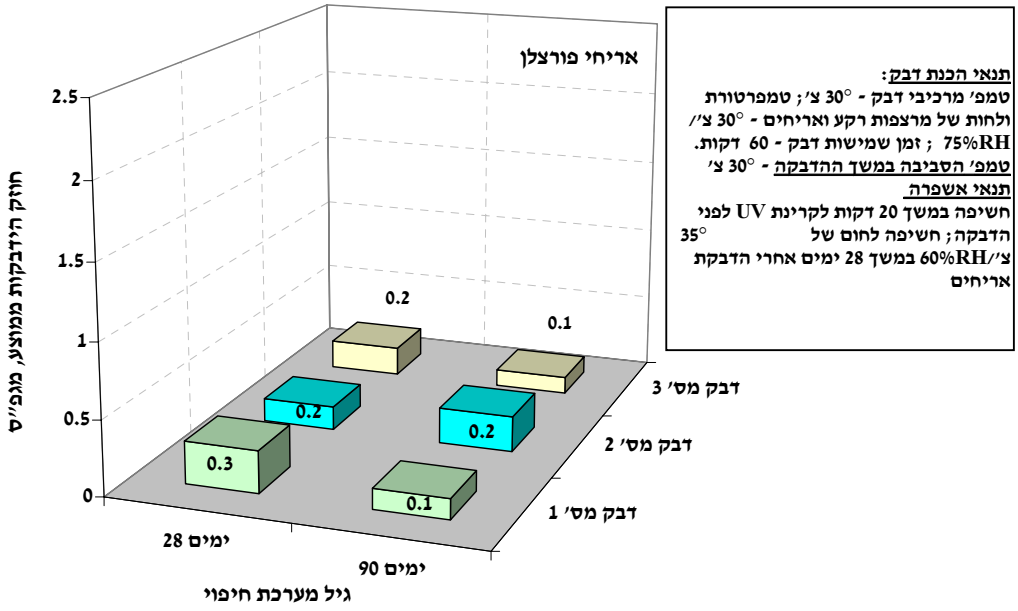


ב'

ציור 34. השפעת משך הבלייה בתנאים חמים על פיזור התוצאות של חוזק ההידבקות במערכת החיפוי שבה הכנת המרכיבים נעשתה בתנאי חדר רפרנס ומלאכת החיפוי בוצעה בתנאים חמים. זמן שמישות דבק - 60 דקות בתנאי רפרנס. זמן חופשי של דבק – 20 דקות בתנאי קרינת UV.
א' – אריחי קרמיקה ; ב' – אריחי פורצלן



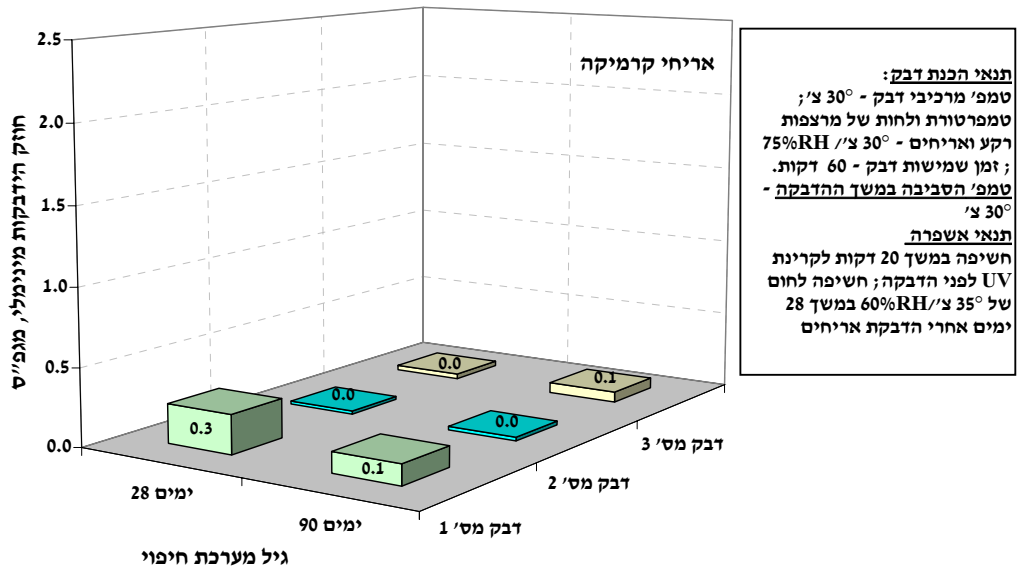
א'



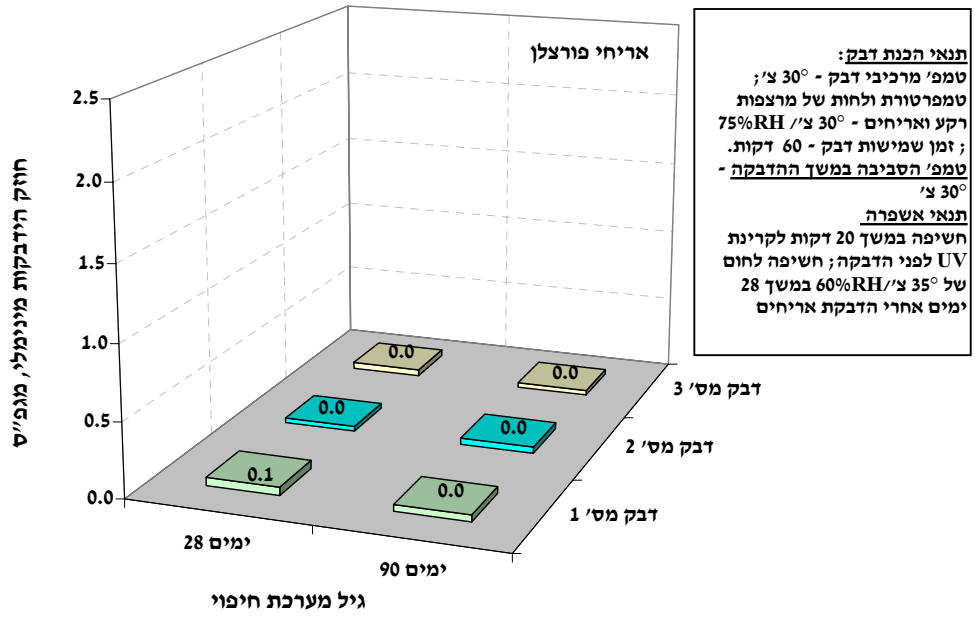
ב'

ציור 35 . השפעת משך הבלייה בתנאים חמים על חוזק ההידבקות הממוצע במערכת החיפוי שבה הכנת המרכיבים ומלאכת החיפוי נעשו בתנאים חמים. זמן שמישות דבק - 60 דקות בתנאי חדר אילת תחת הכיסוי מיריעות פוליאתילן. זמן חופשי של דבק – 20 דקות בתנאי קרינת UV.

א' – אריחי קרמיקה ; ב' – אריחי פורצלן.

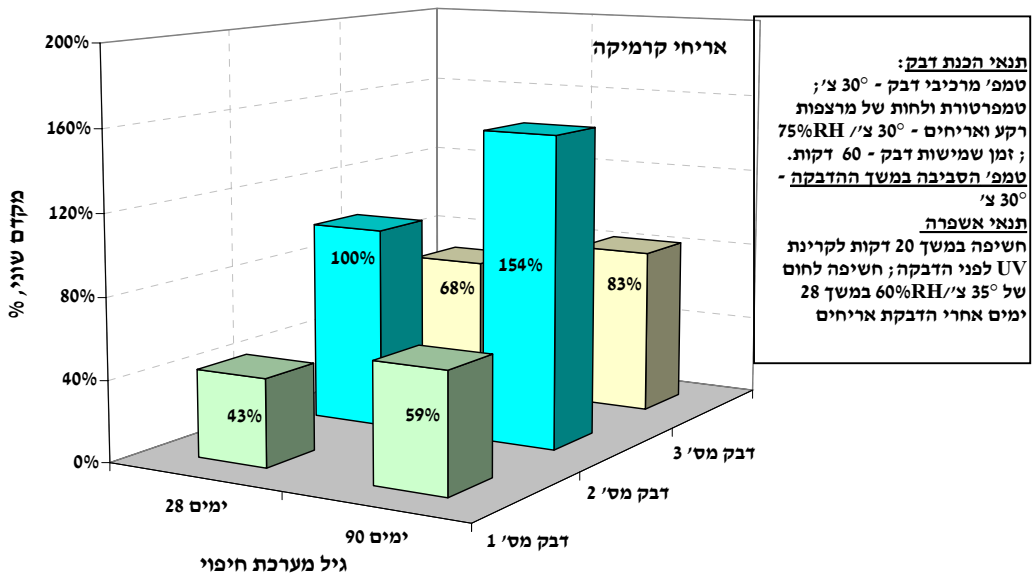


א'

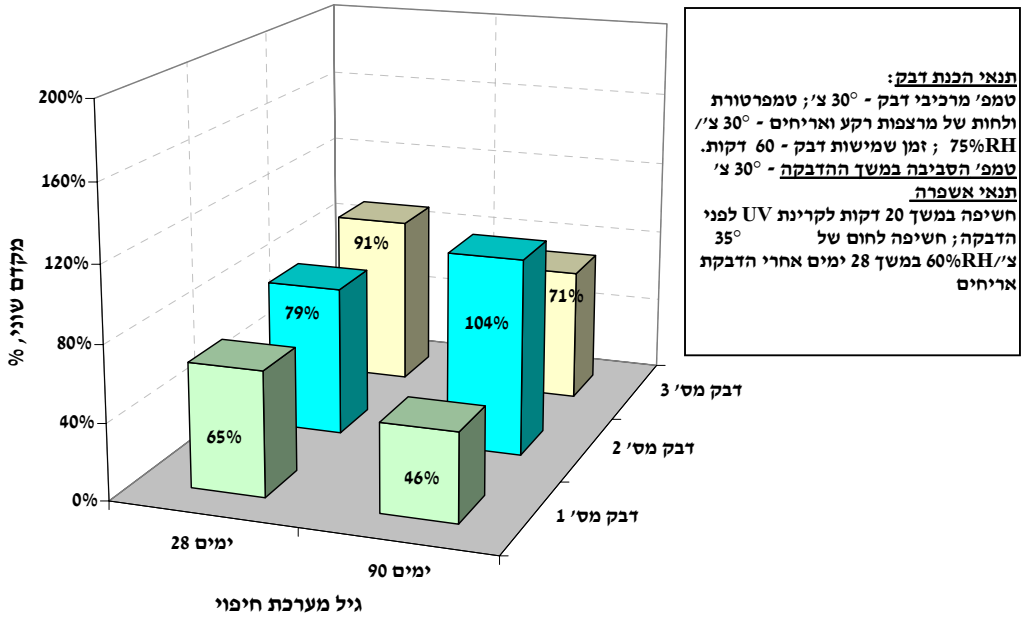


ב'

ציור 36. השפעת משך הבלייה בתנאים חמים על חוזק ההידבקות המינימלי במערכת החיפוי שבה הכנת המרכיבים ומלאכת החיפוי נעשו בתנאים חמים. זמן שמישות דבק - 60 דקות בתנאי חדר אילת תחת הכיסוי מיריעות פוליאתילן. זמן חופשי של דבק – 20 דקות בתנאי קרינת UV.
א' – אריחי קרמיקה ; ב' – אריחי פורצלן.



א'



ב'

ציור 37. השפעת משך הבלייה בתנאים חמים על פיזור התוצאות של חוזק ההידבקות במערכת החיפוי שבה הכנת המרכיבים ומלאכת החיפוי נעשו בתנאים חמים. זמן שמישות דבק - 60 דקות בתנאי חדר אילת תחת הכיסוי מיריעות פוליאתילן. זמן חופשי של דבק – 20 דקות בתנאי קרינת UV.

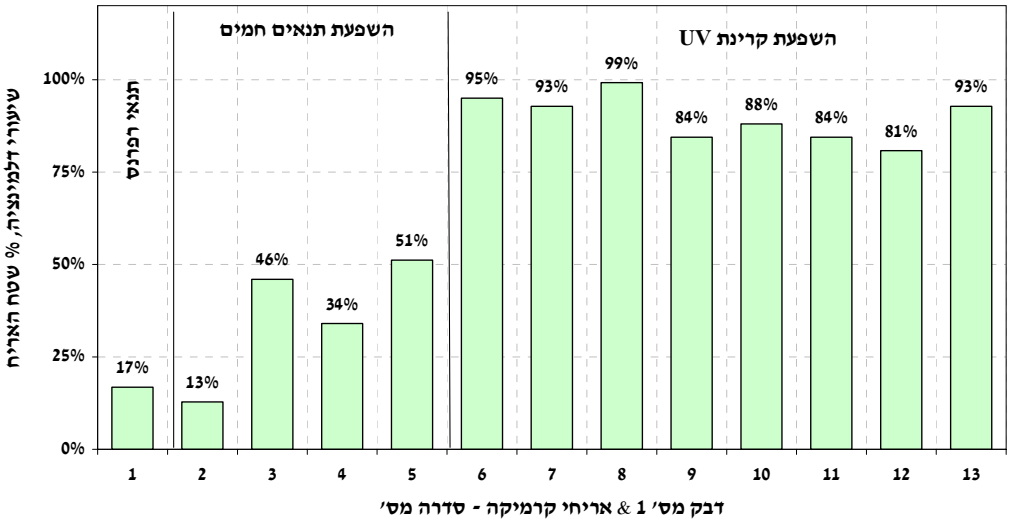
א' – אריחי קרמיקה ; ב' – אריחי פורצלן.

4.5. שיעורי דלמינציה

בציורים 38 – 40 מוצגים שיעורי דלמינציה במערכות חיפוי אשר נבדקו במסגרת המחקר הנוכחי. כפי שהוסבר לעיל, שיעור הדלמינציה חושב כממוצע של היחסים בין שטח האריח שנשאר ריק מהדבק בתום בדיקת pull-off לבין כל שטח האריח. כפי שניתן לראות בציורים הנ"ל, מערכות החיפוי עם דבק מס' 1 ואריחי קרמיקה אופיינו בשיעורי דלמינציה שהיו נמוכים מאלה של שאר מערכות החיפוי. בתנאי רפרנס, במערכות החיפוי עם אריחי פורצלן ודבקים מס' 1 ו-3 התפתחו שיעורי דלמינציה יותר גבוהים מאשר במערכות החיפוי עם אותם הדבקים ואריחי קרמיקה. במערכות החיפוי אשר נחשפו להשפעת התנאים החמים נצפתה עלייה מתונה של שיעורי דלמינציה בהשוואה למערכות רפרנס. לעומת זאת, חשיפת הדבקים בזמן חופשי לקרינת UV גרמה לעלייה דרסטית בשיעורי הדלמינציה עד לכ-100%!.

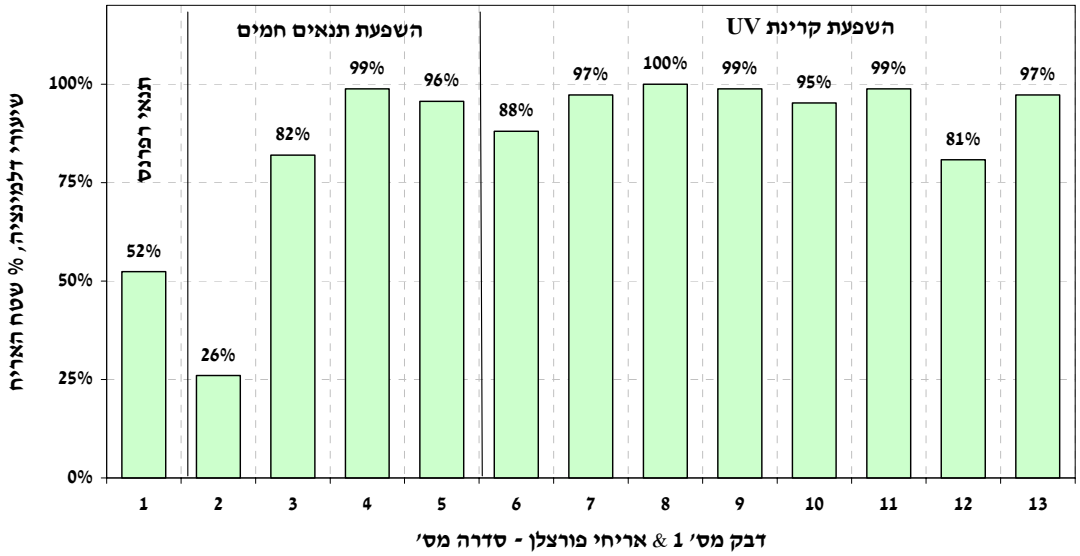
4.6. תצפיות המיקרומבנה באמצעות SEM

בציורים 41 – 43 מוצגות תצפיות על המיקרומבנה של הדבקים במערכות חיפוי עם אריחי פורצלן ושל דבקים שונים לאחר השפעת תנאי סביבה שונים. כפי שניתן לראות, גרמו השינויים בתנאי הסביבה לשינויים דרסטיים במיקרומבנה של הדבקים שנחקרו. בדבק מס' 1 נגרם השינוי הדרסטי במיקרומבנה ע"י החשיפה לקרינת UV. בדבקים מס' 2 ו-3 התפתחו השינויים במיקרומבנה הן לאחר חשיפת מערכות החיפוי לתנאים חמים, והן כתוצאה מהשפעת קרינת UV. באופן כללי ניתן לראות שהחשיפה לתנאים חמים גרמה להתלכדות הגבישים בדבקים והקטנת "זויתיות" מבנה הגבישים , בעוד שכתוצאה מהשפעת קרינת UV נוצר מבנה מפורר ובלתי אחיד.



ציור 38. שיעורי דלמינציה במערכות החיפוי עם דבק מס' 1 ו-:

א' – אריחי קרמיקה



ציור 38. שיעורי דלמינציה במערכות החיפוי עם <u>דבק מס' 1</u> ו- :

ב' – אריחי פורצלן.

מקרא הסדרות:

1 – תנאי רפרנס – 20°C/65%RH ;

2 – תנאים חמים, ר' ציור 14 ;

3 – שינויים בזמן שמישות הדבק בתנאים חמים – 10 דקות, ר' ציור 17 ;

4 - שינויים בזמן שמישות הדבק בתנאים חמים – 60 דקות, ר' ציור 17 ;

5 - שינויים בזמן שמישות הדבק בתנאים חמים – 90 דקות, ר' ציור 17 ;

6 – השפעת קרינת UV, שינוי טמפרטורת רקע ואריחים - 20° צ' ; ציור 20, 27 ;

7 - השפעת קרינת UV, שינוי טמפרטורת רקע ואריחים - 30° צ' ; ציור 27 ;

8 - השפעת קרינת UV, שינוי טמפרטורת רקע ואריחים - 50° צ' ; ציור 27 ;

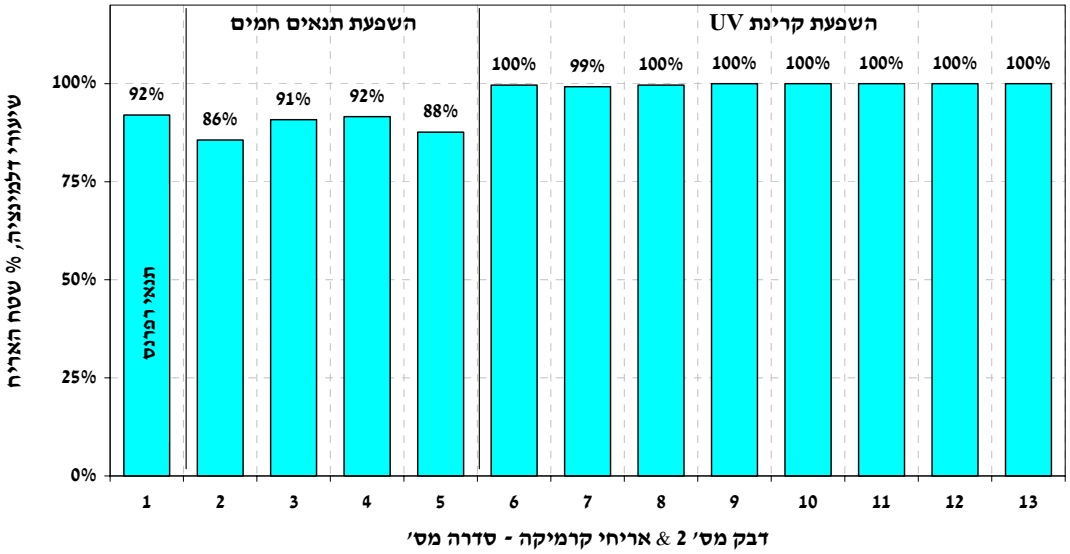
9 - השפעת קרינת UV, שינוי טמפרטורת רקע ואריחים - 70° צ' ; ציור 27 ;

10 – השפעת קרינת UV, שינוי זמן חופשי - 10 דקות - ציור 26 ;

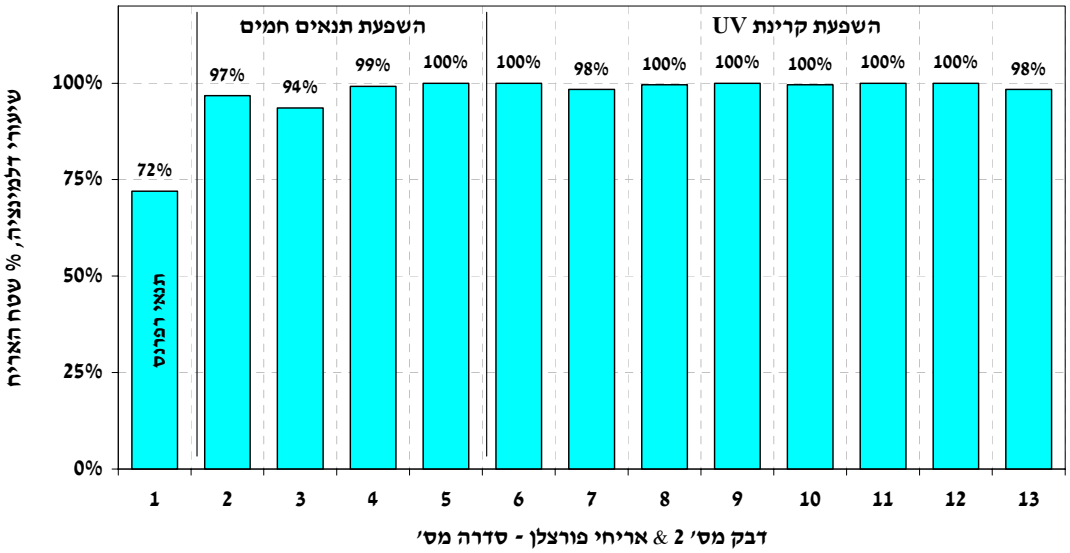
11 - השפעת קרינת UV, שינוי זמן חופשי - 20 דקות - ציור 26 ;

12 - השפעת קרינת UV, שינוי לחות הרקע ו האריחים - 40% - ציור 29 ;

13 - השפעת קרינת UV, שינוי לחות הרקע ו האריחים - 75% - ציור 29 ;



א'

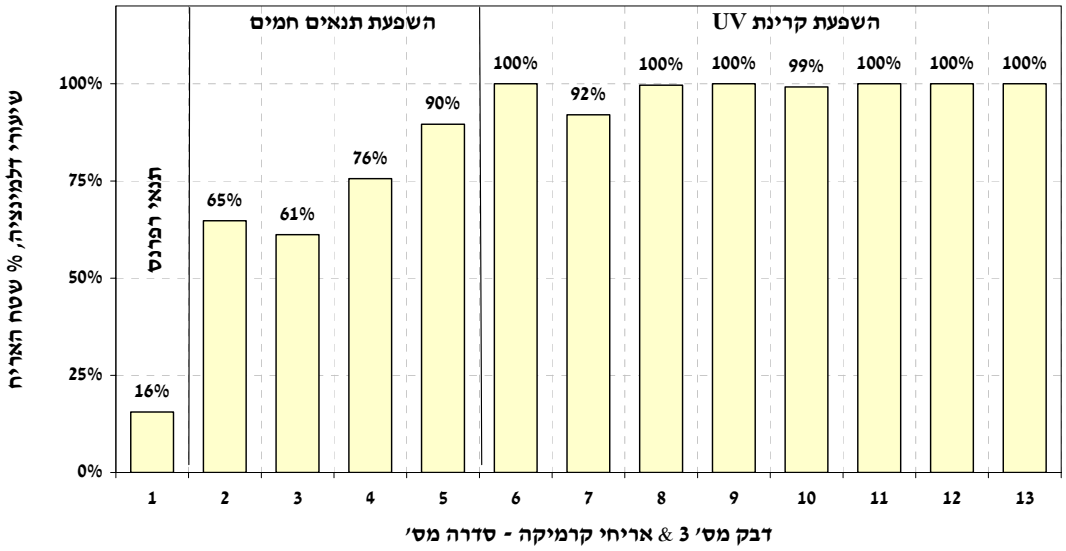


ב'

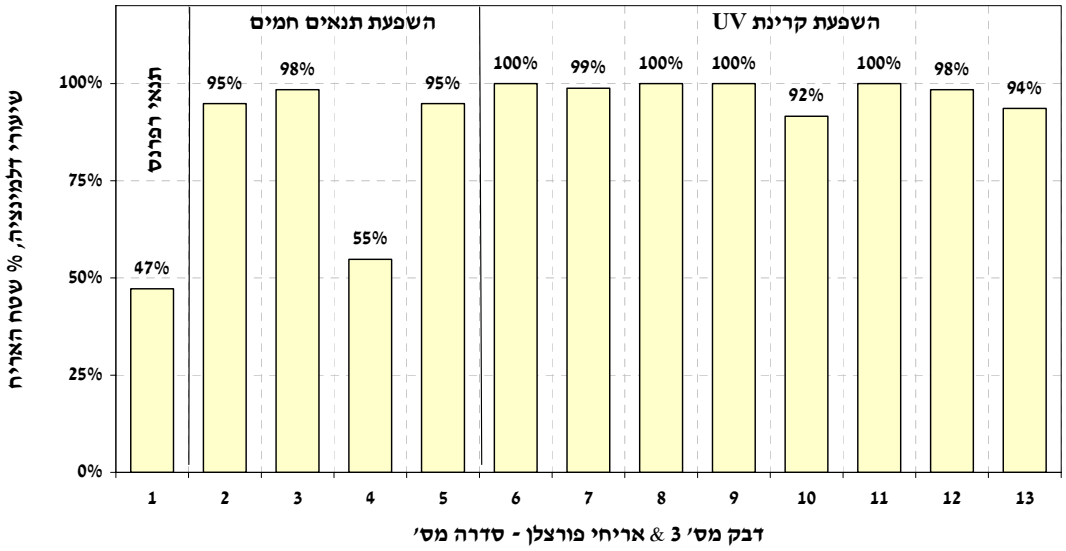
ציור 39. שיעורי דלמינציה במערכות החיפוי עם דבק מס' 2 ו-:

א' – אריחי קרמיקה ; ב' – אריחי פורצלן.

הערה: ראה מקרא הסדרות בציור 4.31.



א'

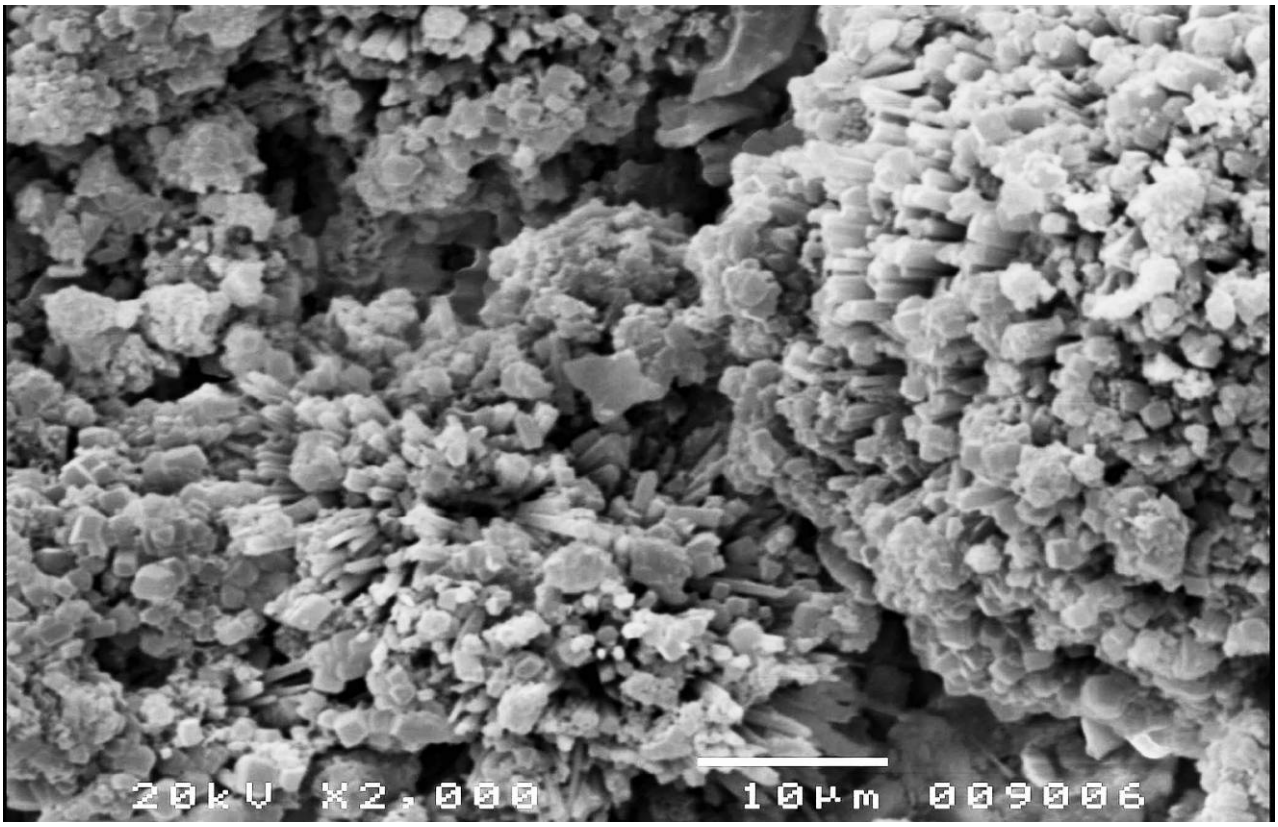


ב'

ציור 40. שיעורי דלמינציה במערכות החיפוי עם דבק מס' 3 ו-:

א' – אריחי קרמיקה; ב' – אריחי פורצלן.

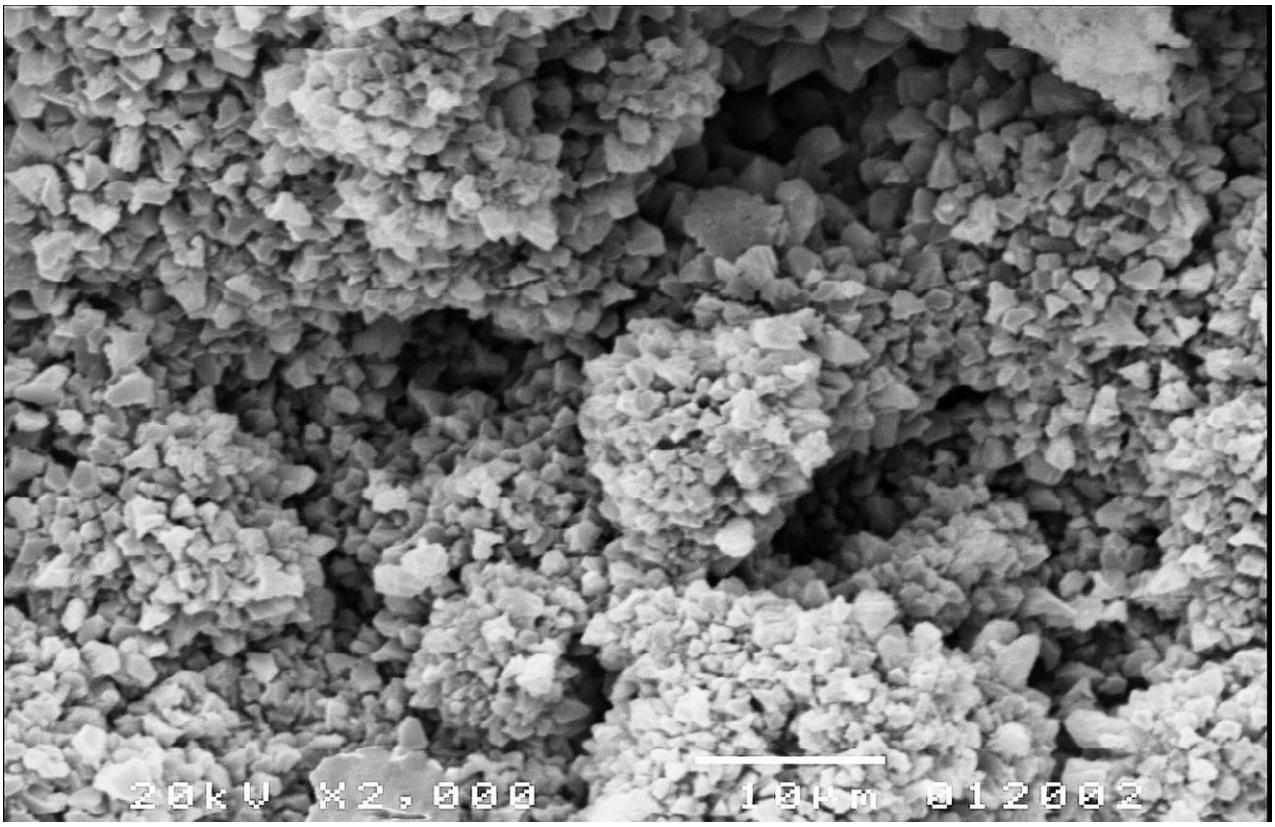
הערה: ראה מקרא הסדרות בציור 4.31.



א'

ציור 41. תצפית SEM (הגדלה x 2,000) של מערכות חיפוי עם אריחי פורצלן ודבק מס' 1:

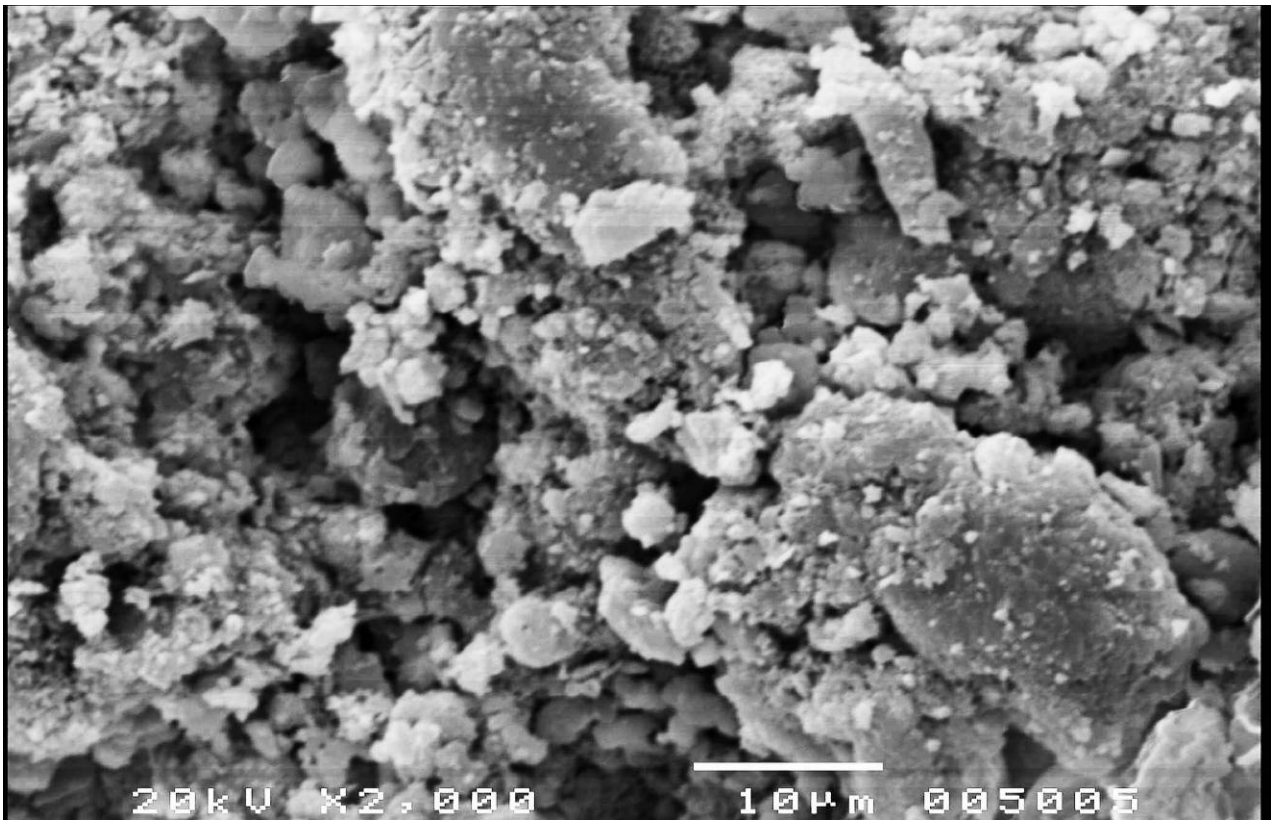
א' – תנאי רפרנס;



ב'

המשך ציור 41.

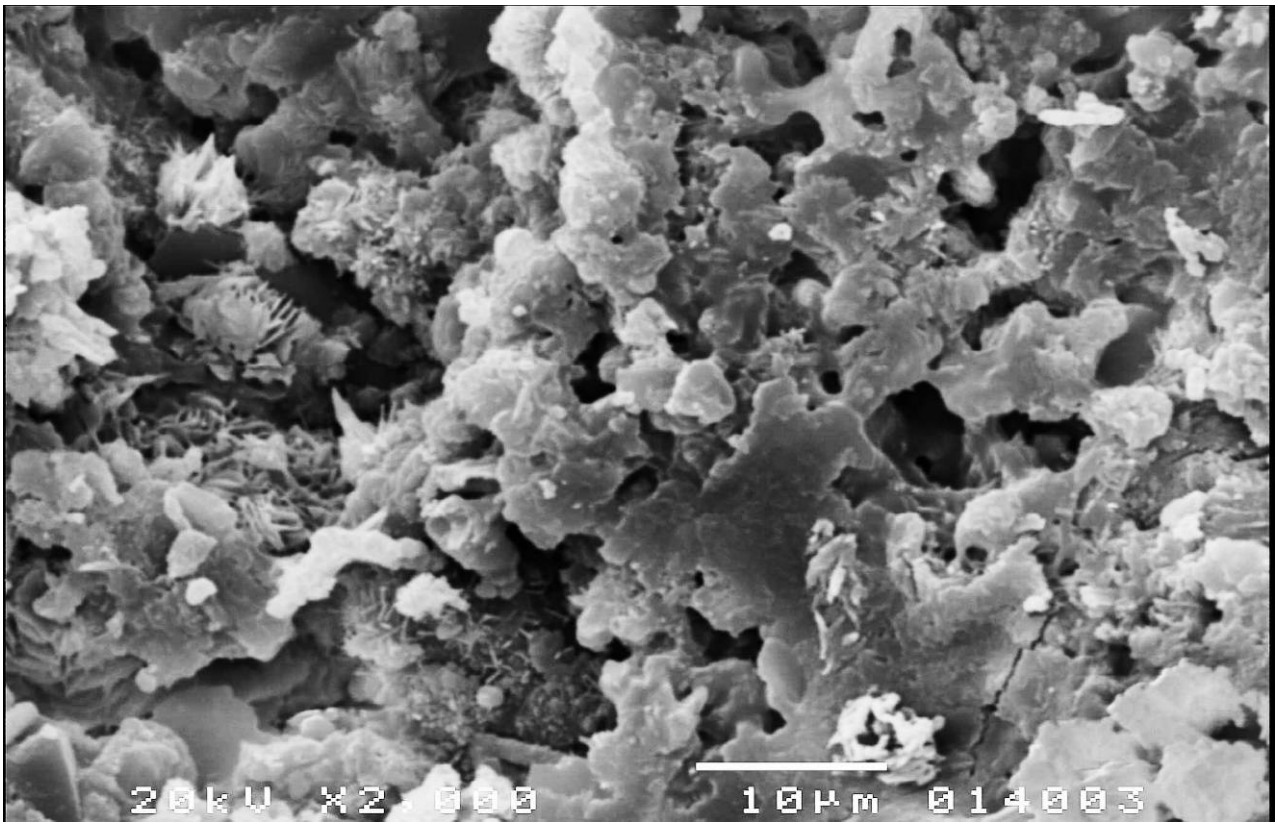
ב' – חשיפת דבק טרי מס' 1 במשך 20 דקות לתנאים חמים + חשיפת מערכת החיפוי לתנאים חמים עד גיל 28 ימים , ראה ציור 16 ב';



ג'

המשך ציור 41.

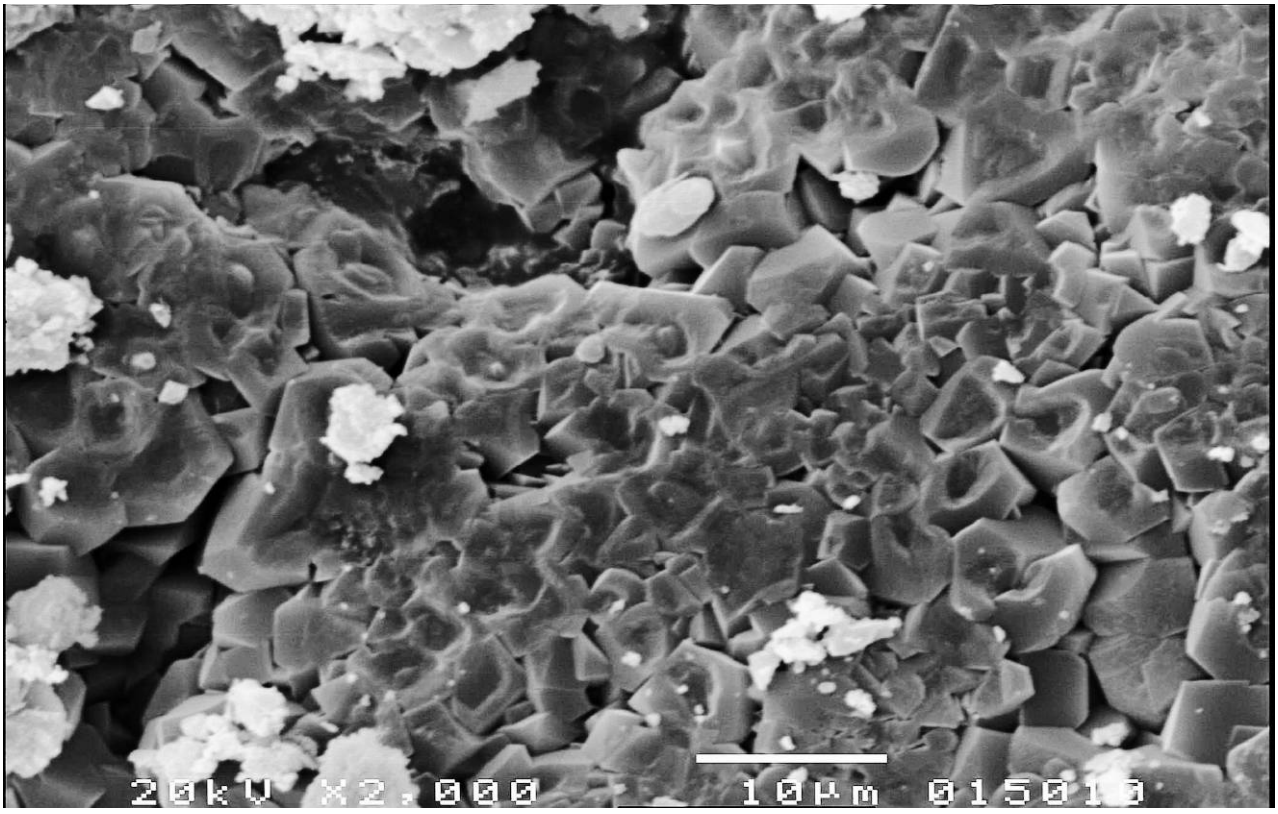
ג' – חשיפת דבק טרי מס' 1 במשך 20 דקות לקרינת UV + חשיפת מערכת החיפוי לתנאים חמים עד גיל 28 ימים, ראה ציור 27 ב'



א'

ציור 42. תצפית SEM (הגדלה x 2,000) של מערכות חיפוי עם אריחי פורצלן ודבק מס' 2:

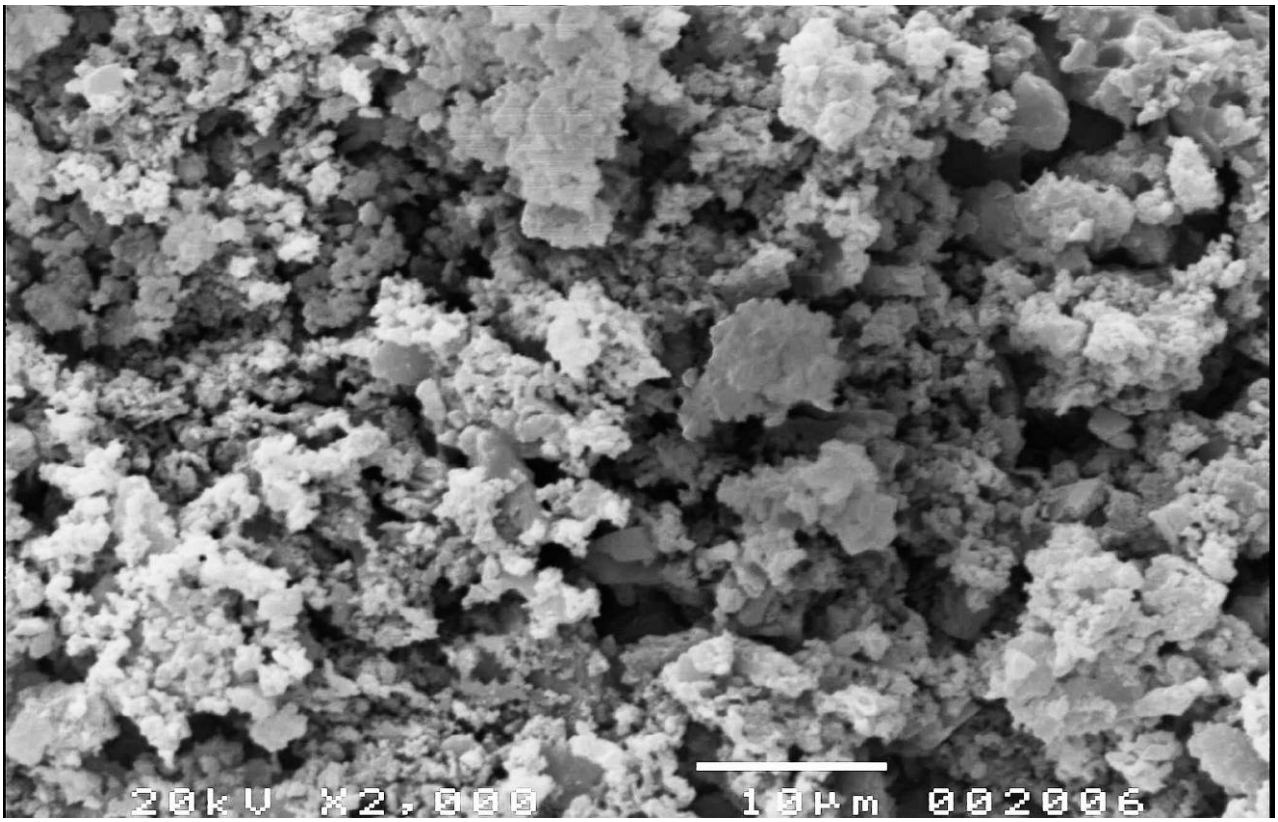
א' – תנאי רפרנס;



ב'

המשך ציור 42

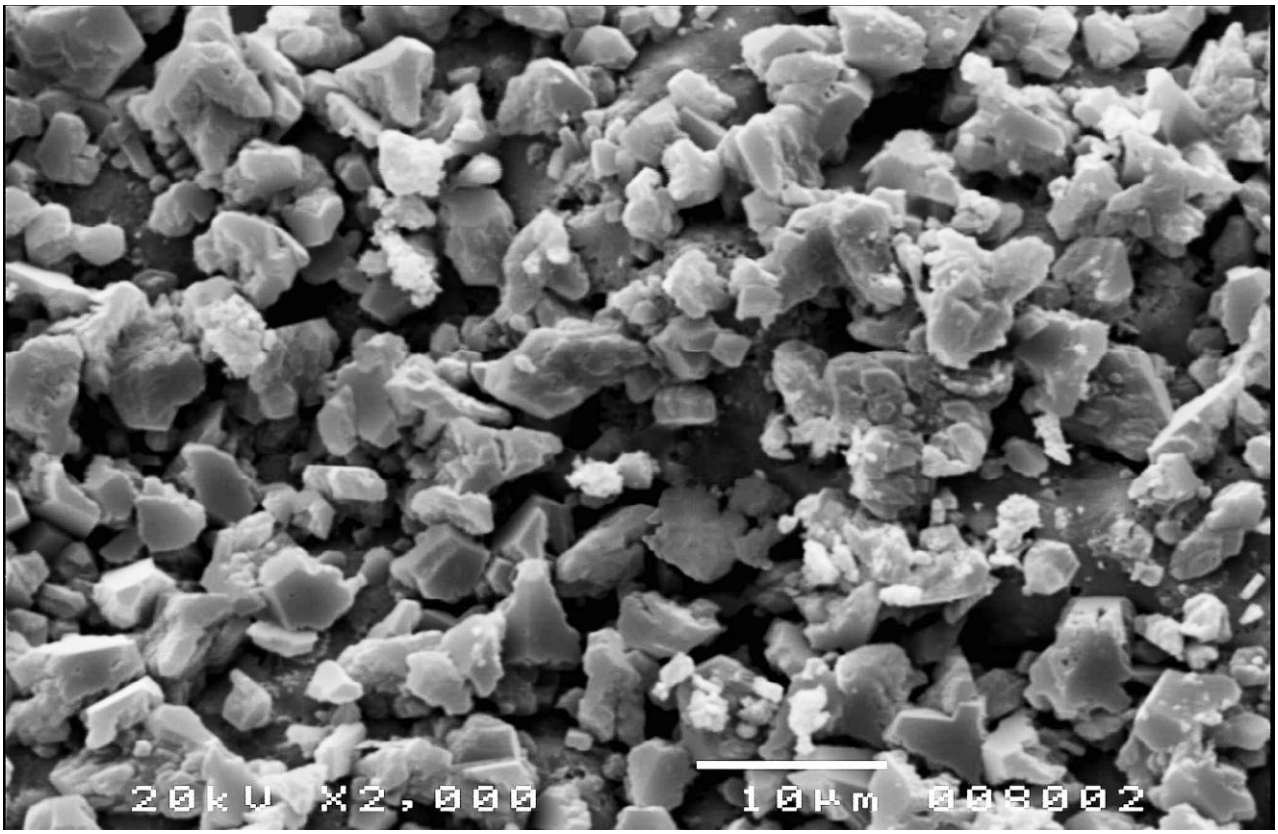
ב' – חשיפת דבק טרי מס' 2 במשך 20 דקות לתנאים חמים + חשיפת מערכת החיפוי לתנאים חמים עד גיל 28 ימים , ראה ציור 16 ב';



ג'

המשך ציור 42

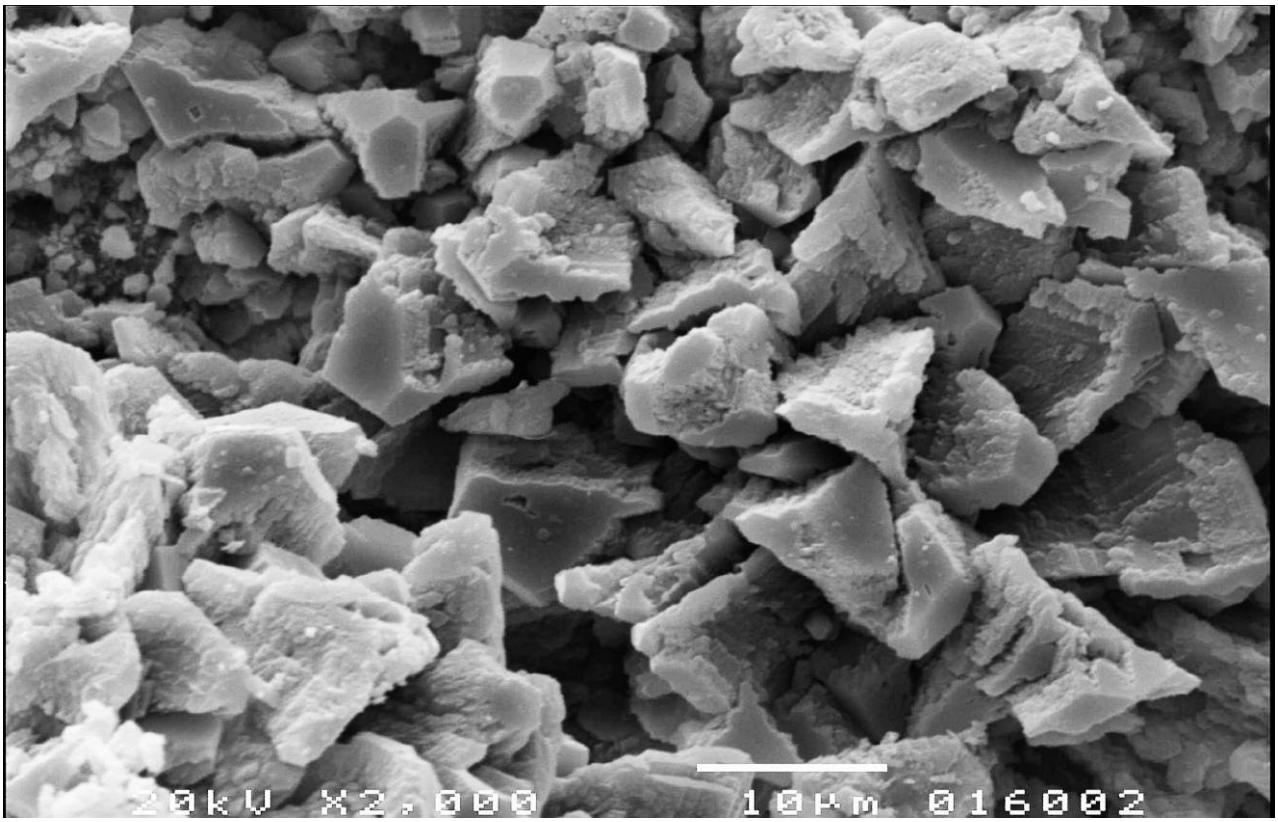
ג' – חשיפת דבק טרי מס' 2 במשך 20 דקות לקרינת UV + חשיפת מערכת החיפוי לתנאים חמים עד גיל 28 ימים, ראה ציור 27 ב'.



א'

ציור 43. תצפית SEM (הגדלה x 2,000) של מערכות חיפוי עם אריחי פורצלן ודבק מס' 3 :

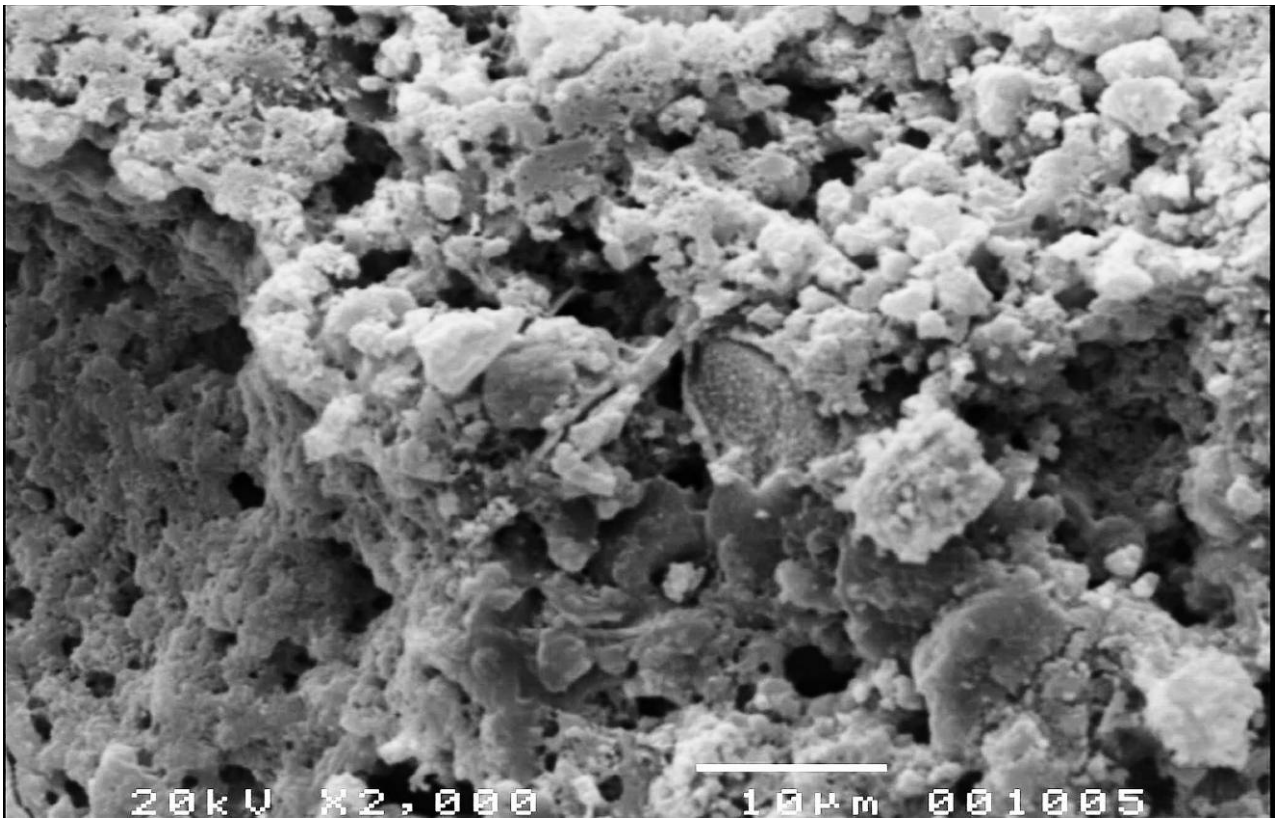
א' – תנאי רפרנס ;



ב'

המשך ציור 43

ב' – חשיפת דבק טרי במשך 20 דקות לתנאים חמים + חשיפת מערכת החיפוי לתנאים חמים עד גיל 28 ימים , ראה ציור 16 ב'



ג'

המשך ציור 43

ג' – חשיפת דבק טרי במשך 20 דקות לקרינת UV + חשיפת מערכת החיפוי לתנאים חמים עד גיל 28 ימים, ראה ציור 27 ב'

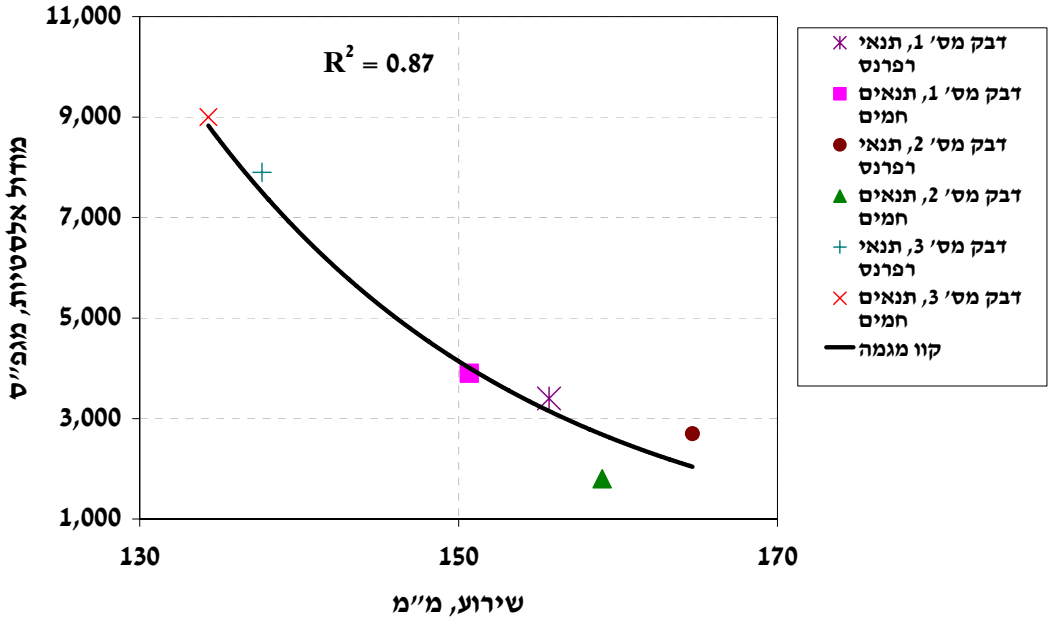
5. דיון.

5.1. הקשר בין תכונות הדבק הטרי והדבק הקשוי

כידוע, שירוע התערובת הצמנטית עם מוספים כימיים הוא פונקציה של הימצאות המוספים הפולימרים אשר משפרים באופן דרסטי את עבידות התערובת. הוספת מוספים פולימריים לדבק צמנטי מאפשרת להשיג שיפור תכונות הבאות של הדבק:

- עבידות;
- כושר ההדבקה;
- גמישות.

גמישות מקסימלית של הדבק באה לידי ביטוי במודול האלסטיות הנמוך של החומר הקשוי. כפי שהוסבר לעיל, הנטייה הרווחת בפרקטיקה המקצועית של עבודות החיפוי היא להשתמש בדבקים בעלי מודול אלסטיות נמוך. מודול אלסטיות נמוך של מערכת צמנטית-פולימרית הינו פונקציה של סוגי הפולימרים המשמשים בדבק ותכולתם בתערובת. גם שירוע הדבק הוא פונקציה של אותם הגורמים. אי לכך, ניתן לקבוע קשר בין שירוע הדבקים הטריים לבין מודול האלסטיות של דבקים קשויים בגיל 28 ימים, כפי שניתן לראות בציור 44.



ציור 44. קשר בין שירוע הדבקים הטריים ומודול אלסטיות של הדבקים הקשויים בגיל 28 ימים

התוצאות המוצגות בציור 36 מראות בבירור כי: **ככל שהשירוע של הדבק הטרי גדול יותר, כך מודול אלסטיות של הדבק הקשוי קטן יותר, ולהיפך.** הסבר קשר זה בין התכונות הנ"ל הינו די ברור כאשר מנתחים את המיקרומבנה של הדבקים באמצעות התמונות הדיגיטליות (digital image analysis). לצורך ניתוח זה שימשו תמונות SEM שבציורים 41 – 43, א' ו-ב'.

הניתוח התבסס על הכללים לניתוח טקסטורה ומורפולוגיה של החומרים המתוארים ב-[28]. לצורך הניתוח השתמשנו בתוכנה ImageJ 1.39[4]. הניתוח כלל את השלבים הבאים:

i. הגהת השגיאות (error correction) ע"י פילוס שטח (surface leveling) באמצעות מסנן (filter) SurfCharJ. מסנן זה מבצע נורמליזציה אוטומטית של כל נתון התמונה הדיגיטלית לפני המשך העיבוד;

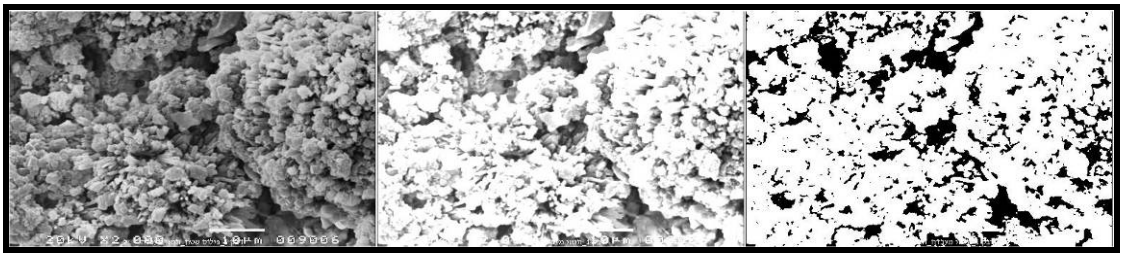
ii. הגברת איכות התמונה המפולסת (image enhancement) לצורך הדגשת הנקבים בתמונה;

iii. וויסות אוטומטי (adjustment) של רמת הניגודיות (contrast) ו-threshold בתמונה המוגברת לקבלת binary image;

iv. ניתוח של binary image וקביעת גודל ממוצע של הנקבים (שדות שחורים ב- binary image) ע"י הפעלת פונקציה Analyze particles .

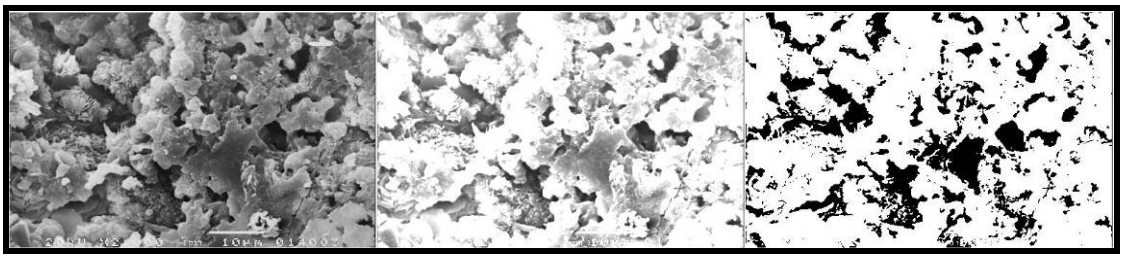
בציור 45 – 46 מוצגות תמונות 41 – 43, א' ו-ב' בשלבי העיבוד הנ"ל.

[4] - http://rsb.info.nih.gov/ij/index.html



.3 .2 .1

א'



.3 .2 .1

ב'



.3 .2 .1

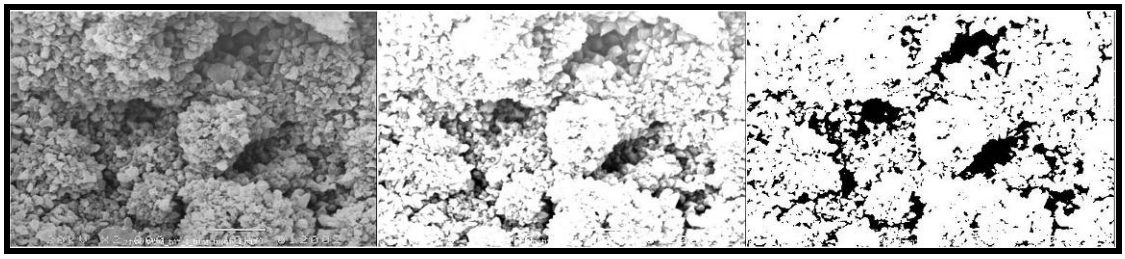
ג'

ציור 45. עיבוד תמונות SEM דיגיטליות (ציורים 41 – 43 א') של הדבקים הקשויים אשר הוכנו ונחשפו לתנאי רפרנס: א' – דבק מס' 1; ב' – דבק מס' 2; ג' – דבק מס' 3.

1 – תמונה אחרי הגהת שגיאות (שלב i);

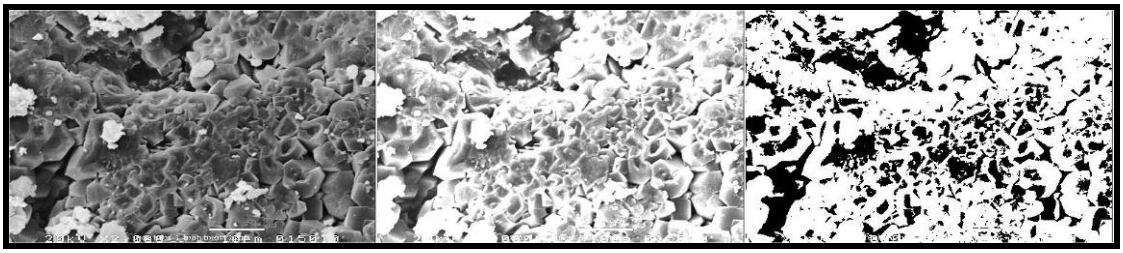
2 - תמונה אחרי הגברת האיכות (שלב ii);

3 – binary image (שלב iii)



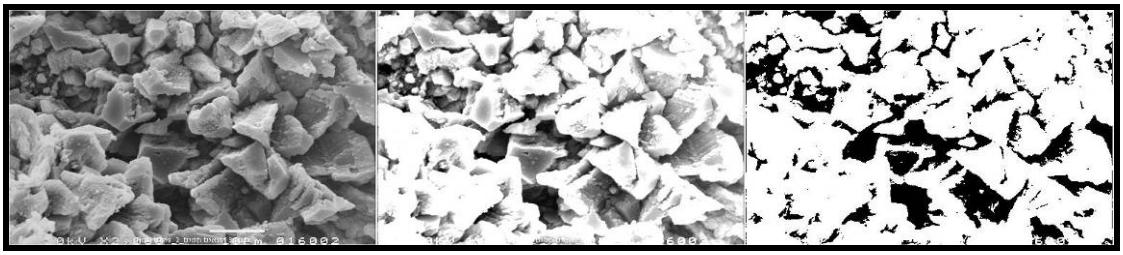
.3 .2 .1

א'



.3 .2 .1

ב'



.3 .2 .1

ג'

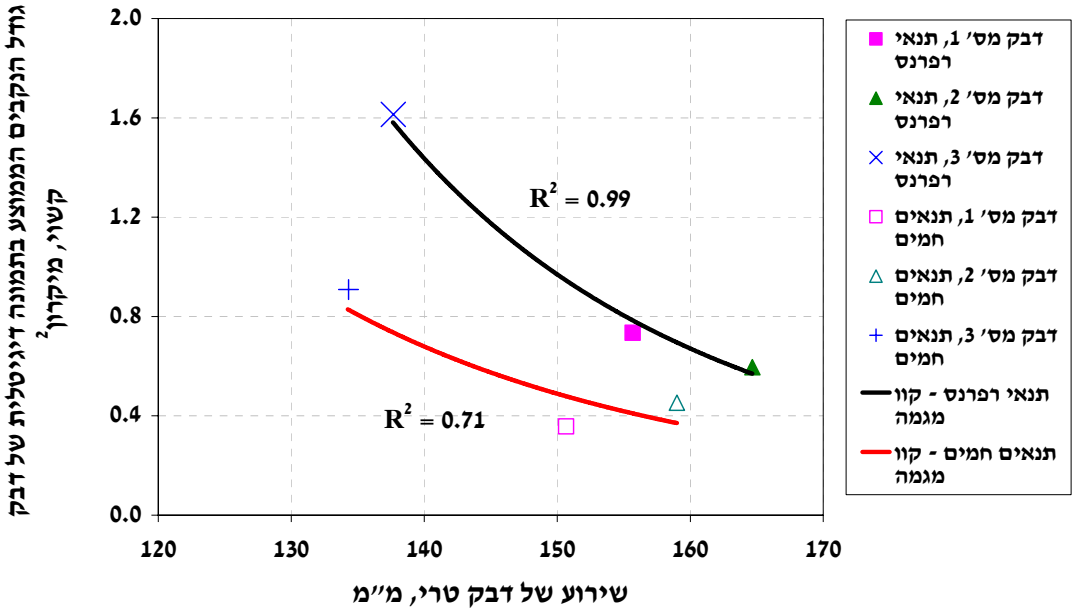
ציור 46. עיבוד תמונות SEM דיגיטליות (ציורים 4.34 – 4.36 ב') של הדבקים הקשויים אשר הוכנו ונחשפו לתנאים חמים: א' – דבק מס' 1; ב' – דבק מס' 2; ג' – דבק מס' 3.

1 – תמונה אחרי הגהת שגיאות (שלב i);

2 - תמונה אחרי הגברת האיכות (שלב ii);

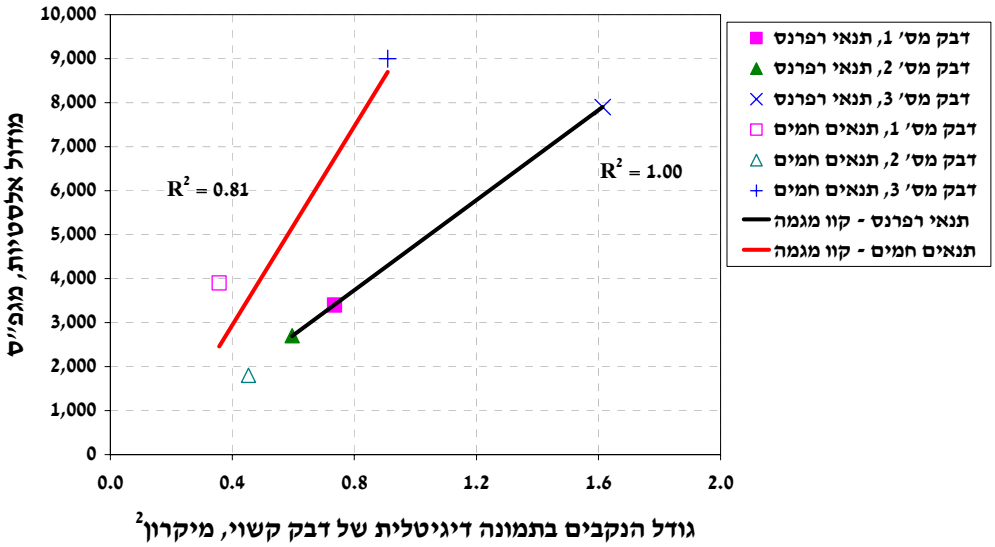
3 – binary image (שלב iii)

נמצאה הקורלציה בין השירוע של הדבקים הטריים לבין גודל הנקבים הממוצע (שדות שחורים) ב-binary image (ציורים 45 – 46 (3)), כמתואר בציור 47. כפי שהוסבר לעיל, השירוע של הדבק הטרי נקבע ע״י התכולה וסוג הפולימרים שבדבק אשר משפיעים גם על תכולת האוויר בתערובת. תכולת האוויר בתערובת קובעת את נקבוביות הדבק הקשוי. את הנקבוביות של הדבק הקשוי ניתן לתאר באמצעות גודל הנקבים הממוצע. אי לכך, ניתן לקשור את שירוע הדבק הטרי עם גודל הנקבים בדבק הקשוי. כפי שניתן לראות בציור 47, ככל ששירוע הדבק היה יותר גדול, אזי הנקבים בחומר היו יותר דקים.



ציור 47. קשר בין שירוע הדבק הטרי וגודל הנקבים בתמונה הדיגיטלית

קיים קשר בין גודל הנקבים הממוצע של הדבקים הקשויים ומודול אלסטיות של הדבקים, כמתואר בציור 48. ככל שהנקבים בדבק הקשוי היו יותר דקים, כך היה מודול האלסטיות של הדבק יותר גדול. אי לכך, ניתן לסכם ששירוע גדול של דבק טרי היה מלווה במודול אלסטיות הנמוך שלו. קשר גומלין זה הינו די חשוב מבחינה מעשית, מאחר שהוא עשוי לאפשר את השימוש בבדיקת השירוע להערכה השוואתית של מודול האלסטיות החזוי של דבקים שונים. יחד עם זאת, נדרש מחקר נוסף לקביעת שיטתיות הקשר הנ״ל בין השירוע לבין מודול האלסטיות. כמו כן, חשוב להמשיך ולפתח שיטת ניתוח תמונות SEM הדיגיטליות כשיטת בדיקה הלא הרסנית לתיאור התנהגות הדבקים.



ציור 48. קשר בין גודל הנקבים בתמונה הדיגיטלית של דבקים קשויים ומודול אלסטיות שלהם.

5.2. השפעת סוג האריח על חוזק החיבור במערכת החיפוי

התגלתה ההשפעה המובהקת של סוג האריח על חוזק החיבור במערכות החיפוי שנבדקו. ההבדל בין האריחים אשר שימשו במחקר הנוכחי נבע מההבדלים המובהקים בספיגת המים, הכוללת והנימית. במערכות עם אריחי פורצלן המאופיינות בספיגת מים זניחה, התרחש הכשל מסוג CF-A (כשל בתוך שכבת הדבק) רק ב-7.4% ממערכות החיפוי שנבדקו. לעומת זאת היקף כשל זה במערכות עם אריחי קרמיקה (טבלות 4 – 5) היה 16.7% .

ברוב מערכות החיפוי עם אריחי פורצלן נצפו שיעורים יותר גבוהים של דלמינצית הדבק מהאריח בהשוואה למערכות החיפוי עם אריחי הקרמיקה (ראה ציורים 38 – 40). בתנאי הרפרנס ובתנאים החמים נצפו במערכות החיפוי עם אריחי קרמיקה ערכים יותר גבוהים של חוזק ההידבקות במשיכה צירית, בהשוואה לערכים שנמדדו במערכות החיפוי עם אריחי פורצלן (ציורים 14 - 19). באופן כללי אופיינו המערכות עם אריחי פורצלן באי-אחידות יותר גבוהה מבחינת התוצאות של חוזק ההידבקות. במערכות אשר נחשפו להשפעת UV לא נצפה הבדל בין מערכות החיפוי עם שני סוגי האריחים, ובכל המערכות היה חוזק החיבור הזניח ביותר. השפעת UV על אופי החיבור במערכות החיפוי מאריחי קרמיקה תידון בהמשך.

על סמך האמור לעיל ניתן לסכם כדלקמן:

- **לספיגות האריח קיימת השפעה מובהקת על אופי חיבור החיפוי ועל חוזק הידבקות האריחים;**
- **ספיגת מים יותר גבוהה של אריחי קרמיקה מאפשרת להקטין את שיעורי דלמינצית הדבק מהאריח. זה כתוצאה מהיווצרות פן ביניים יותר חזק במערכת עם אריחי קרמיקה מאשר במערכת עם אריחי פורצלן. בנוסף לכך מתרחש השריון של נקבי האריח במוצרי הידרציית הדבק. תהליכים אלה הינם דומים לתהליכים המתרחשים בפן הביניים של**

בטונים עם אגרגטים קלים מחרסית ואפר פחם [29]. אי לכך, ככל שפן הביניים בין האריח לדבק הינו צפוף יותר, הולך וקטן שיעור דלמינציית הדבק מהאריח.

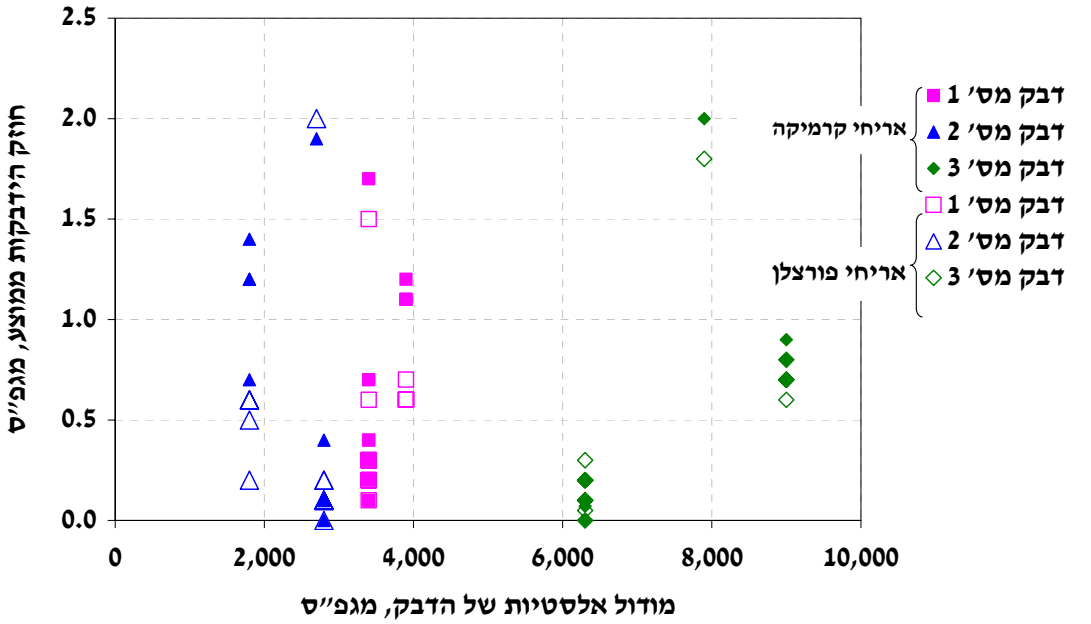
- **ספיגת מים קפילרית יותר גבוהה של אריחי קרמיקה תרמה להיווצרות חיבור יותר צפוף ויותר חזק במערכת החיפוי עם אריחים אלה.**

5.3. השפעת תכונות הדבק

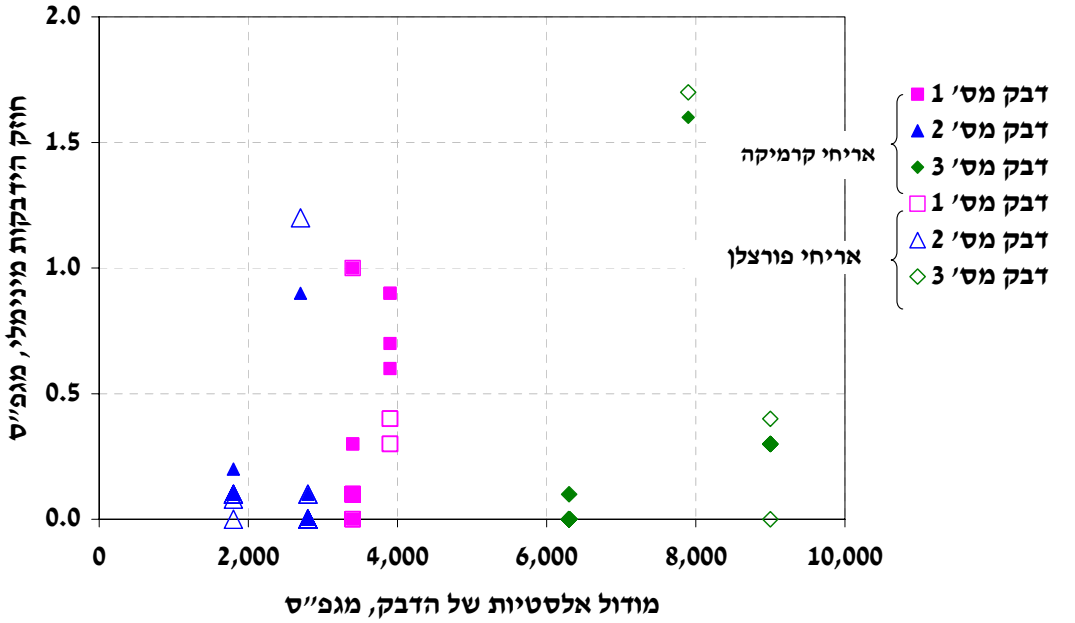
התוצאות המוצגות בטבלות 4 – 5 מראות בבירור שבכל מערכות החיפוי עם דבק מס׳ 2 התרחש הכשל מסוג AF-T, כלומר בין האריח לבין הדבק. גם במערכות החיפוי עם דבק מס׳ 3 נצפה השיעור הגבוה, של כ-83%, של הכשל מסוג AF-T. לעומת זאת, במערכות החיפוי עם דבק מס׳ 1 ואריחי קרמיקה ואריחי פורצלן נצפה הכשל מסוג AF-T רק ב-77% מהמקרים. שלושת הדבקים הנ״ל מאופיינים במודול אלסטיות שונה במידה הניכרת ביותר, כמפורט בטבלה 2. במערכות החיפוי אשר הוכנו עם דבק מס׳ 2 ונחשפו לתנאי רפרנס או לתנאים חמים נצפו שיעורי דלמינציה הגבוהים ביותר (ציור 39).

נעשה המאמץ לקבוע האם קיימת קורלציה בין מודול אלסטיות של הדבקים לבין מאפייני החיבור במערכות החיפוי שנבדקו, כגון: חוזק ההידבקות, הממוצע והמינימלי, מקדם שוני של חוזק ההידבקות וסוג הכשל המתרחש בו, כמתואר בציור 49, א׳ – ד׳. כפי שניתן לראות בציורים אלה לא קיימת קורלציה בין מודול אלסטיות של הדבק לבין מאפייני החיבור הנ״ל. הדבר הינו ברור, מאחר שידוע שלא קיים קשר ישיר בין מודול אלסטיות של החומר לבין חוזק ההידבקות במשיכה צירית בין חומר זה לחומר אחר. יתרה מזאת, דוגמאות הבדיקות ששימשו בניסויים לקביעת מודול האלסטיות הושפעו ע״י הגורמים הסביבתיים רק באופן חלקי בהשוואה לדוגמאות ששימשו בבדיקת חוזק ההידבקות במשיכה צירית. בבדיקות מודול אלסטיות של הדבקים לא היה ניתן לדמות את ההשפעה הנוספת של חום הרקע והאריחים כפי שהתקיים בהכנות הדגמים לבדיקות חוזק ההידבקות.

בציור 50 א׳ – ג׳ מוצג קשר בין שיעורי הדלמינציה של הדבק מהאריח לבין מאפייני חוזק החיבור של האריח במערכת החיפוי. כפי שצויין לעיל, שיעור דלמינצית הדבק מתאר את סוג הכשל במערכת החיפוי, דהיינו: הערכים הנמוכים של שיעור הדלמינציה מתארים את המצב כאשר רוב הכשל התרחש בתוך הדבק (סוג כשל CF-A). בעוד שהערכים הגבוהים של שיעור הדלמינציה התקבלו כאשר הכשל התרחש בין האריח לבין הדבק (סוג כשל AF-T). באופן כללי, לא ניתן לקבוע קשר בין סוג הכשל וחוזק ההידבקות הממוצע במערכות החיפוי. במערכות עם הדבקים מס׳ 1 ומס׳ 3 נצפתה ירידה הדרגתית של חוזק ההידבקות הממוצע עם העלייה בשיעור הדלמינציה של הדבק מהאריח, כפי שניתן לראות בציור 50 א׳. לעומת זאת, במערכות החיפוי עם דבק מס׳ 2, שברובן התרחש הכשל מסוג AF-T, לא נצפה הקשר בין שיעור הדלמינציה של הדבק מהאריח לבין חוזק ההידבקות הממוצע במערכת החיפוי. חשוב לציין שדבק מס׳ 2 מאופיין בשירוע הגבוה ביותר ובמודול האלסטיות הנמוך ביותר, כמתואר בציור 44. כמו כן, המיקרומיבנה שלו הינו שונה באופן מהותי מזה של דבקים מס׳ 1 ו-3. אי לכך, לסוג הדבק יש השפעה על מיקום הכשל במערכת החיפוי, האם יתקיים בפן הביניים בין אריח לדבק או בדבק עצמו. לעומת זאת, מיקום הכשל (סוג הכשל) לא גורע מחוזק ההידבקות.

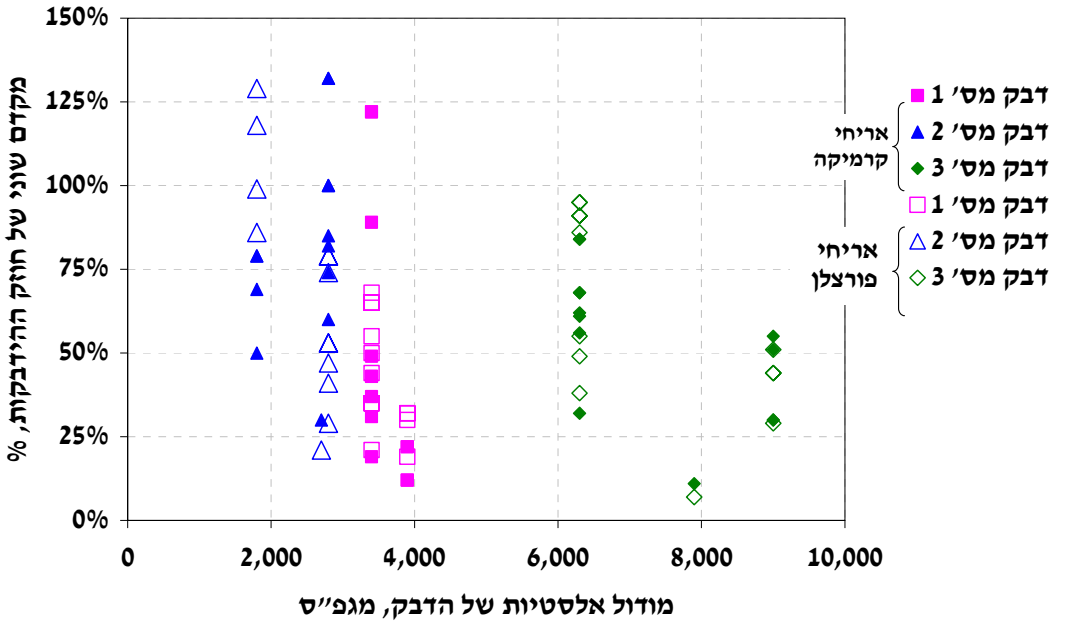


א'

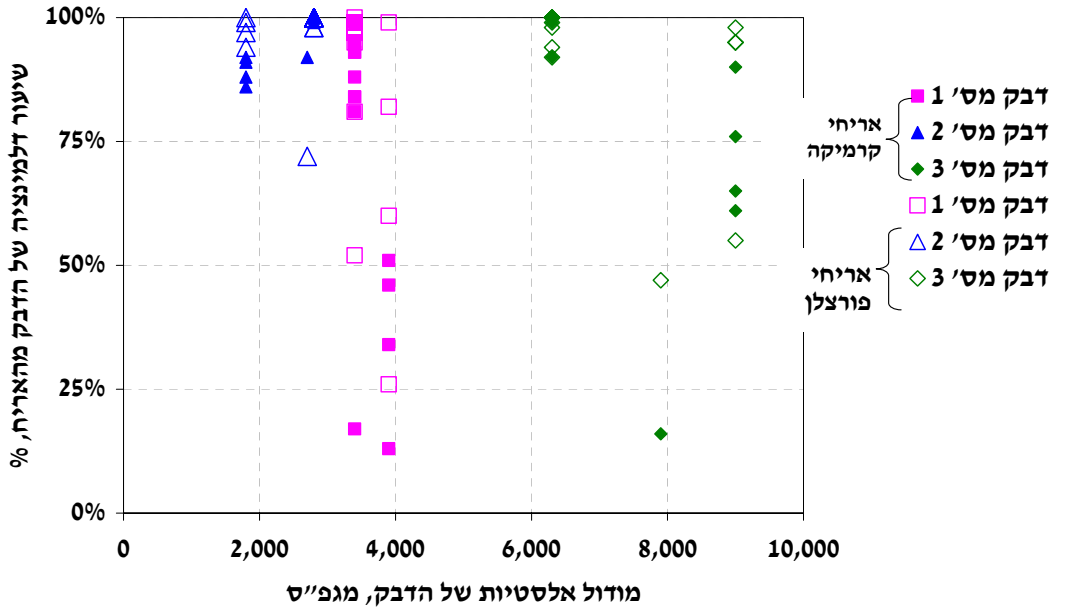


ב'

ציור a- 49. העדר הקשר בין מודול אלסטיות של הדבק ומאפייני חיבור האריח במערכת החיפוי:
א' – חוזק הידבקות ממוצע; ב' – חוזק הידבקות מינימלי;

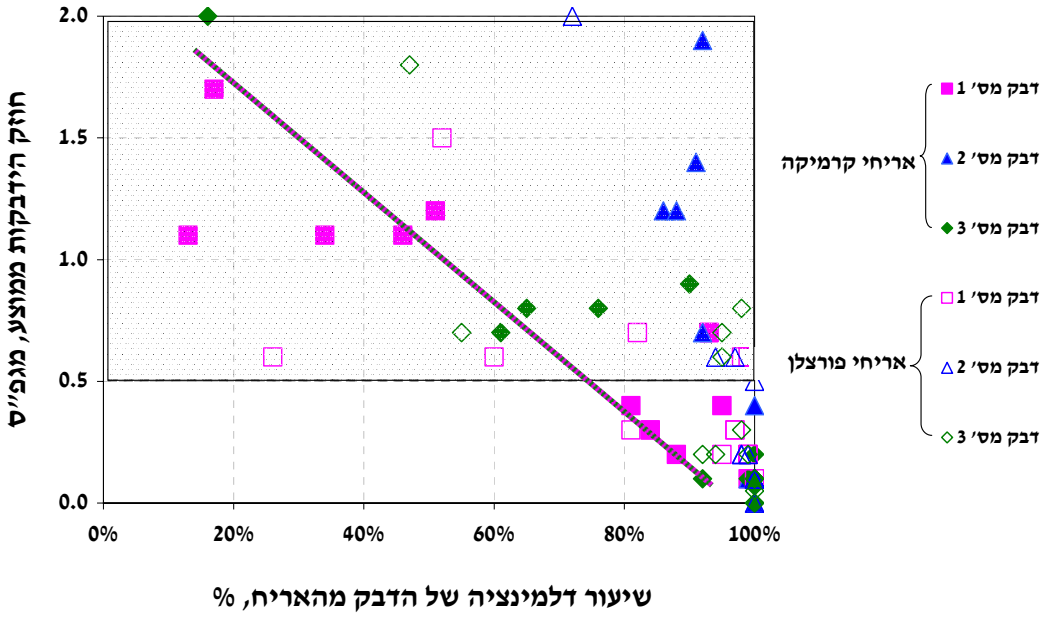


ג'

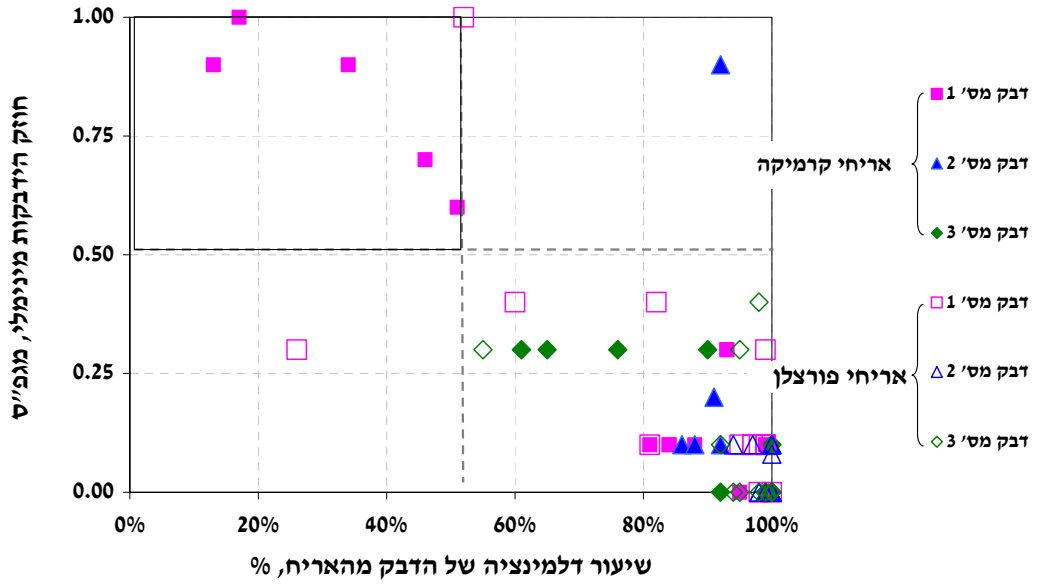


ד'

ציור b- 49. העדר הקשר בין מודול אלסטיות של הדבק ומאפייני חיבור האריח במערכת החיפוי:
ג' – מקדם שוני של חוזק ההידבקות; שיעור דלמינציה של הדבק מהאריח

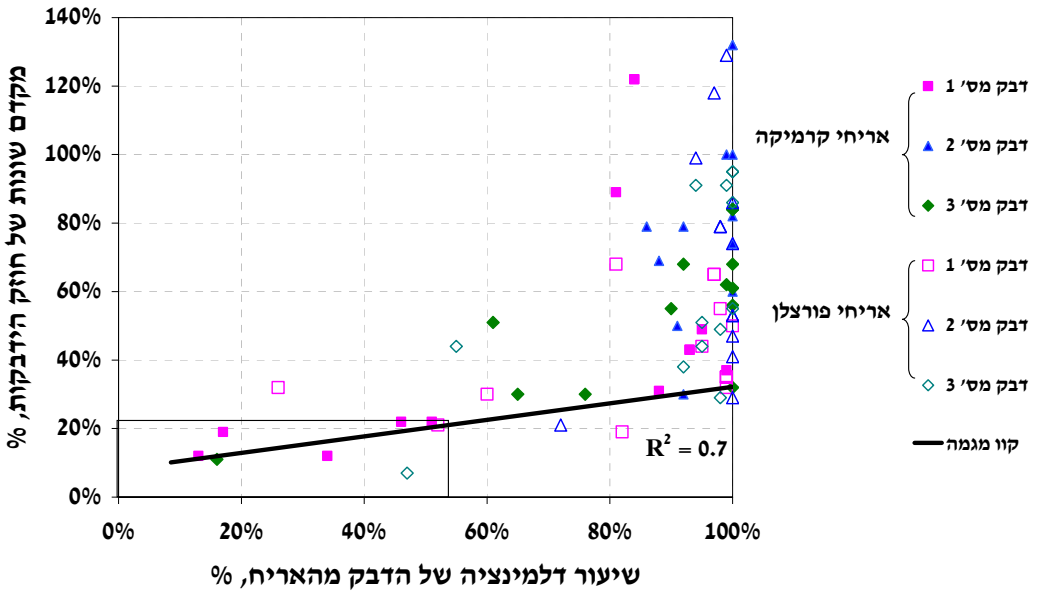


א'



ב'

ציור 50. קשר בין שיעור דלמינציה של הדבק מהאריח לבין מאפייני חוזק החיבור של האריח במערכת החיפוי: א' – חוזק הידבקות ממוצעת; ב' – חוזק הידבקות מינימלי



ג'

ציור 50 (המשך). קשר בין שיעור דלמינציה של הדבק מהאריח לבין מאפייני חוזק החיבור של האריח במערכת החיפוי: ג' – מקדם שונות של חוזק הידבקות.

כאשר שיעור הדלמינציה הינו קטן מ-50%, ניתן לצפות לחוזק ההידבקות המינימלי מעל 0.5 מגפ"ס ומקדם שונות עד 35%, כמתואר בציור 5.8 ב' ו-ג'. גם חוזק ההידבקות הממוצע יהיה מעל 0.5 מגפ"ס. משמעות הדבר היא שלצורך **אבטחת איכות החיבור במערכת החיפוי מאריחי קרמיקה/פורצלן חשוב להשתמש בדבקים אשר מאפשרים לקבל את פן הביניים החזק בין האריח לדבק. במילים אחרות חשוב להימנע מהשימוש בדבקים אשר אינם "נדבקים" לאריח וגורמים לכך שהכשל העיקרי במערכת החיפוי מתפתח בין הדבק לבין האריח (AF-T). נושא חיזוק פן הביניים במערכת החיפוי הינו נושא מורכב ונדרשת עבודת מחקר מעמיקה ושיטתית אשר תאפשר להציע את הדרכים המעשיות לשיפור ההדבקה בין האריח לדבק.**

5.4. <u>השפעת תנאי בלייה על חוזק חיבור האריח במערכת חיפוי</u>

<u>5.4.1. השפעת טמפרטורות גבוהות</u>

טמפרטורה גבוהה של הרקע והאריחים גורמת לירידה משמעותית של חוזקי ההידבקות, הממוצע והמינימלי, ועלייה במקדם השוני של חוזק ההידבקות, ציורים 14 – 16. כמו כן, שיעורי דלמינציית הדבק מהאריח עלה באופן משמעותי ביותר, כמתואר בציור 38 – 40. במילים אחרות, העלייה בטמפרטורה של מרכיבי מערכת החיפוי גורמת להיווצרות פן הביניים החלש בין האריח לבין הדבק, כאשר ההשפעה הגורעת של הטמפרטורה הינה יותר משמעותית במערכות עם אריחי פורצלן בעלי ספיגת המים הנמוכה. כך העלייה של טמפרטורת הרקע והאריחים ב-50°C גרמה לירידה של 35% עד 60% בחוזק ההידבקות הממוצע של המערכות עם אריחי קרמיקה ולירידה של 60% עד 100% בחוזק ההידבקות הממוצע של המערכות עם אריחי פורצלן. הסיבה של ירידת החוזק נובעת, כנראה, מהחלשת פן הביניים בין האריח לבין הדבק עקב ירידת כושר ההרטבה של

הדבק בהשפעת הטמפרטורות הגבוהות. כפי שהוסבר בסקר הספרות של דו״ח המחקר הנוכחי כושר ההרטבה מהווה את הגורם החשוב אשר אחראי על היווצרות פן הביניים החזק בין האריח לבין הדבק על בסיס צמנט. הרטבת פני האריח מבוססת על תהליך אלקטרוכימי המתרחש בפן הביניים. תהליך זה נובע מהיווצרות כוחות Van-der-Waals בין גב האריח לבין חומר ההדבקה. העדר ההדבקה נובע הן מהסמכת הדבק בהשפעת הטמפרטורה הגבוהה של הרקע והאריחים, והן מהיווצרות הקרום הפולימרי על גבי השכבה העליונה של הדבק בהשפעת אנרגית החום, כפי שזה הוסבר ב-[10].

ירידת כושר ההרטבה באה לידי ביטוי בהחלשת פן הביניים, בעוד שהיווצרות הקרום הפולימרי מונעת לחלוטין את ההדבקה עקב העדר כושר האדהזיה. העדר כושר האדהזיה נובע ממטען (zeta potential) חשמלי שלילי של כ-(22-) עד כ-(40-) מיליוולט על פני פולימרים בנוכחות מימות חזקות [30]. גם על פני מולקולות סיליקה של אריחי קרמיקה/פורצלן נמצא מטען שלילי (zeta potential) של כ-(30-) עד (40-) מיליוולט [31]. אי לכך, מתרחשת ההפרדה בין שני מרכיבי המערכת, דהיינו: בין האריח לבין הדבק. כתוצאה מכך, נוצר חלל בפן הביניים הזה וחוזק ההידבקות יורד במידה ניכרת.

תהליך אלקטרוכימי דומה מתרחש גם בפן הביניים בין הרקע והדבק. במחקר הנוכחי שימש אריח בטון כרקע. המטען שעל פני המטריצה הצמנטית שבאריח בטון הינו חיובי בשיעור של כ-20 עד 40 מיליוולט [32]. אי לכך, נוכחות של פולימר בדבק גורמת למשיכה אלקטרוכימית בין פני הבטון לבין שכבת הדבק ובכך תורמת להדבקה טובה בין שני החומרים.

כל התהליכים האלקטרוכימיים הללו מואצים במידה ניכרת ע״י טמפרטורה גבוהה. אי לכך, במקרה של עלייה של טמפרטורת האריח והרקע מהווה פן הביניים בין האריח והדבק את החוליה החלשה במערכת החיפוי, והכשל מתרחש בעיקר בפן הביניים בין האריח והדבק (סוג כשל AF-T).

העלייה במשך זמן השמישות של הדבק כמעט שלא השפיעה על חוזק ההידבקות הממוצע במערכות החיפוי שנבדקו, כמתואר בציורים 17 – 19. זה לעומת השינויים המשמעותיים אשר התרחשו בשירוע של הדבקים הטריים, כפי שדווח לעיל. במילים אחרות, המלצות היצרן לגבי זמן שמישות הדבק היו תקפים במקרה של חוזק החיבור, אך לא במקרה של נוחות ביצוע עבודות החיפוי.

ניתן לסכם שהגורם העיקרי אשר השפיע על חוזק ההידבקות של המערכות אשר נחשפו לתנאי חום היה הטמפרטורה של הרקע והאריחים.

על סמך עובדה זאת אפשר לסכם שכדי למנוע את הפגיעה המשמעותית בחוזק ההידבקות במערכת החיפוי מאריחי קרמיקה/פורצלן חובה להימנע מביצוע עבודות החיפוי על גבי רקע חם ולא להשתמש באריחים חמים. ניתן להשיג זאת ע״י ביצוע עבודות החיפוי בתקופות יותר קרירות, אך לא גשומות מדי, כגון: מאפריל עד יוני ומאמצע ספטמבר עד סוף נובמבר. כמו כן, מומלץ לבצע הצללה של החזיתות לפני ביצוע עבודות החיפוי. מומלץ לאחסן את האריחים לפני הדבקתם במקומות מוצללים וקרירים.

פרקטיקת עטיפת הבניין בכיסוי בד די נפוצה בעבודות הבנייה במדינות אירופה ומשמשת למניעת זיהום הסביבה באבק הבנייה. פרקטיקה זו עשויה לתרום רבות לשיפור איכות החיפויים הקשיחים מאריחי קרמיקה בישראל מאחר שהיא תשפר את הגנת החזית מהשפעת חימום החזית ע"י קרני השמש.

קיימת חשיבות רבה של פיתוח דבקים עם פולימרים שלא עוברים פולימריזציה בטווח הטמפרטורות האופייניות לחזיתות הבניינים באקלים ישראלי. כמו כן, נראה סביר לבדוק את אפשרות השימוש בפריימרים שייושמו על גבי אריחי קרמיקה/פורצלן. ייעוד הפריימרים הללו הוא שיפור הידבקות האריח אל הדבק. פרקטיקת השימוש בפריימרים משפרי הידבקות נפוצה מאוד בעבודות הטיח ובעבודות שיקום הבטונים. אך דרושה עבודת מחקר תעשייתי לפיתוח פריימרים המתאימים למערכת "אריח קרמיקה-דבק".

5.4.2. השפעת קרינת UV

בכל המערכות שנחשפו להשפעת UV נצפתה הירידה המשמעותית ביותר של חוזק החיבור, כמתואר בציורים 20 – 28. חוזק ההידבקות ירד בלמעלה מ- 85% והיה אפסי ברוב המערכות. אי לכך, ניתן לסכם שקרינת UV ברמות האופייניות למזג האוויר הישראלי מהווה את גורם הכשל העיקרי של הדבקים המתועשים בעת ביצוע עבודות החיפוי. הסיבה לכך נעוצה בשינויים במיקרומבנה של הדבקים בהשפעת הקרינה. קרינת UV גורמת לרה-פולימריזציה של הפולימרים שבדבקים [10]. בהשפעת קרינת UV נוצר על פני הדבק קרום פולימרי אשר חוצץ בין הדבק לבין האריח. אי לכך, נמנעה ההידבקות בין האריח לבין הדבק ושיעור הדלמינציה במערכות החיפוי שהושפעו ע"י UV היה מ-81% עד 100%. גם במערכות החיפוי אשר בהן טמפרטורת הרקע והאריחים לפני ההדבקה הייתה 20° צ' היוותה קרינת UV את הגורם לכישלון החיפוי, כמתואר בציורים 20 – 22. לטמפרטורת הרקע והאריחים כמעט שלא הייתה השפעה על חוזק ההידבקות במערכות החיפוי שהדבק בהם נחשף לקרינת UV, כמתואר בציורים 23 – 25. גם למשך הקרינה כמעט שלא הייתה השפעה על חוזק ההידבקות וירידת החוזק הניכרת התרחשה כבר בלב מוקדם אחרי חשיפת הדבקים לקרינה למשך 10 דקות בלבד, כמתואר בציורים 26 – 28. גם לפרמטרים האחרים, כגון: לחות הרקע והאריחים ומשך בליית מערכת החיפוי בתנאי חום כמעט שלא הייתה השפעה על חוזק החיבור מאחר שהוא ירד כמעט עד לאפס עקב ההשפעה המידית של קרינת ה- UV. במילים אחרות, מהווה קרינת UV את הגורם הראשוני והמכריע, הגורע במידה ניכרת מטיב החיבור של האריחים במערכת החיפוי, בעוד שמאפיינים פיזיקליים של הרקע והאריחים (ספיגות, טמפרטורה, לחות) והמאפיינים הטכנולוגיים של הדבק (זמן שמישות וזמן פתוח) מהווים את הגורמים המשניים שהשפעתם מורגשת רק בהעדר קרינת UV בעת הדבקת האריחים.

ברור שבעיית אי העמידות בקרינת UV של דבקים צמנטיים-פולימריים המשמשים לחיפוי חוץ מחייבת הימנעות מביצוע עבודות החיפוי בתנאי קרינת שמש ישירה. ניתן למנוע את השפעת הקרינה ע"י הצללה על החזית המחופה וביצוע עבודות הדבקה בשעות היממה בהן החזית הנדונה אינה נתונה לקרינת השמש הישירה. כפי שהוסבר לעיל יישום אמצעים אלה להגנה על עבודת החיפוי, תתרום בו זמנית להורדת הטמפרטורה של פני החזית והאריחים.

5.5. השפעת הימצאותם של סדקים וליקויים אחרים בשכבת הדבק על הערכים של חוזק ההידבקות הממוצע במשיכה צירית והפיזור שלו

ידוע שעבור חומרים בעלי מבנה פנימי קטן יחסית למידות הדגם הנבדק או עבור ליקויים באותו סדר גודל, חוזק החומר תלוי במידות של הדגם. זה בתנאי שמידות הדגם עולות על מידת המבנה הפנימי לא פחות מאשר בעשר פעמים. לחומרים כאלה מתייחסים כאל חומרים בעלי מבנה בלתי אחיד, למשל בטון. בהגדלת מידות הדגם, קטן חוזקו בלחיצה או במתיחה. ידוע גם שמקדם השונות של חוזק הבטון בלחיצה, המתקבל בבדיקות דגמים בעלי אותן מידות, לא עולה על 0.25 בדרך כלל. אבל הפיזור של תוצאות הניסויים במתיחה צירית של חיבור האריח הקטן (במידות 200*200 מ״מ או פחות) ע״י הדבק הינו גדול יותר משמעותית, ומקדם השונות מגיע ל-0.8-1.0, כאשר ההדבקה מבוצעת בתנאים קשים (תחת פעילות של קרינת UV וטמפרטורת רקע גבוהה). חוץ משינוי תכונות החומר של החיבור, יש סיבה נוספת להקטנת חוזק המתיחה הממוצע ולהגדלת פיזור החוזק שמתקבל בניסויים אלה.

ניתן להניח שבתהליך הדבקת אריחים קטנים יחסית (במידות 200*200 מ״מ או פחות) בתנאים קשים, אשר נתונים לתנאי קרינה UV ולטמפרטורת רקע גבוהה, בנוסף לנתונים הקשורים במבנה החומר הפנימי ובליקויים קטנים יחסית, מופיעים גם ליקויים גדולים בצורת סדקים או מקומות חולשה אחרים המקבילים למישור האריח. זה קשור כנראה גם להקטנה חלקית של כושר התנועה של הדבק בזמן הדבקת האריחים, כאשר הזמן החופשי מספיק גדול וערכו כ-10-20 דקות. מניחים גם שמידות הסדקים הן גדולות יותר במידה משמעותית ממידות מבנה החומר הפנימי. לכן הסדקים משפיעים באופן ניכר על חוזק המתיחה של כל דגם בהשוואה להשפעה של ליקויים אחרים בעלי מידות בסדר גודל של מבנה החומר הפנימי. בהימצאות סדקים בשכבת הדבק בדגמי הניסויים בעלי מידות 50*50 מ״מ, מאופיינת ההתנגדות של חומר החיבור בחוזק המתיחה, f_{at}. אבל לא במקדם הקריטי של עצימות המאמצים K_{IC} (חוזק מתיחה זה מתקבל בניסויי דגמים בלי סדקים). כלומר דגמים קטנים כאלה נהרסים באופן פסבדופלסטי. מאמצי המתיחה בחיבור תלויים באפיון f_{at} של החומר ובמיקום ובגיאומטרייה של הסדקים.

על בסיס תוצאות של חישוב מקורב ניתן לאשר, שבניסויים המבוצעים, כאשר מידות הדגמים היו שוות ל-0.05*0.05 מ׳, התפתח הרס פסבדופלסטי, ולכן נדרשת הערכת החוזק f_{at}. אבל להערכת חוזק המתיחה צריך לדעת את מידותיהם ומיקומם של הסדקים ההתחלתיים שמופיעים בתהליך הדבקת האריחים הנבדקים במידות 200*200 מ״מ ופחות. ברור שחוזק החיבור קטן משמעותית עם הגדלת אורך הסדק. במקרה של הופעות סדקים בעלי אורך שונה בדגמים שונים מקבלים בניסויים את הפיזור הגדול של חוזק החיבור ואת ערך החוזק הממוצע הקטן.

5.6. הסתברות הרס החיבור של אריחים

לפי תוצאות הניסויים שלעיל יוצא שהפעולות של קרינת UV וטמפרטורה גבוהה צריכות להביא לנפילת אריחים קטנים יחסית (במידות 200*200 מ״מ או פחות) כעבור זמן מסוים לאחר ההדבקה מפני שעקב שיטת ההדבקה המקובלת של האריחים מתפתחת ירידה חזקה של חוזק החיבור. ערך חוזק זה הינו בסדר גודל של מאמצי הגזירה הפועלים בשטח החיבור הקטן יחסית, עקב

התפתחותם האפשרית של סדקים בחיבור ליד קצות האריח בתהליך הדבקת האריח ואחר כך תחת פעולה של שינוי טמפרטורה ועקב סיבות אפשריות אחרות. המאמצים הפועלים בחיבור כוללים הינם עקב משקל עצמי של האריח עם שכבת הדבק, עקב שינוי טמפרטורה ועקב גורמים אחרים. בין גורמים אלה יש לציין, למשל, עיבורים מאולצים ברקע בגלל התכווצות וזחילה של הבטון בקיר הרקע, שמשפיעות במידה רבה בעיקר כאשר המישקים בין האריחים ממולאים בדבק בעל גמישות בלתי מספקת. לכן הציפוי מתנגד כאלמנט נושא במקום להיות אלמנט תלוי, וכוח נוסף עובר מהרקע לאריח דרך החיבור ועקב כך גדלים בו המאמצים.

אין בידינו מידע על הכיוון של חזיתות מבנים ביחס לרוחות השמים, בהן נפילת אריחים הינה מקסימאלית. ברור שההקרנה והחימום הינם מקסימאליים בשתי חזיתות: מזרחית ומערבית, מפני שקרנות מגיעות אליהן בזווית נטייה של 90^0 למישור הקיר או קרוב לכך. הקרנה של החזיתות המזרחית והמערבית בזמן הדבקת האריחים, ביחד עם פעולת גורמים אחרים, מביאה לתנאי הדבקה נחותים שגוררת נפילת אריחים.

הערכת חוזק המתיחה האמתי באתר הינה כנראה גדולה יותר בהשוואה.להערכת החוזק,לפי תוצאות הניסויים עקב סיבות הבאות:

- זמן הקרינה שמקובל באתר הוא כנראה קטן יותר משמעותית מאשר הזמן החופשי הגבולי שנקבע בהמלצות יצרני הדבקים;
- בניסויים הדגמים במידות 50*50 מ״מ מקובלת מתודיקת הדבקה לפי התקן 1555 עבור אריחים קטנים (לא יותר מ- 200 מ״מ), אבל באתר לרוב מיקרים כנראה מקובלת מתודיקת הדבקה אחרת לפי התקן 1555 עבור אריחים גדולים (יותר מ- 200 מ״מ) שמומלצת בתקן לשם ״שיפור היצמדות של אריחים״.

למעשה במתודיקת ההדבקה עבור אריחים גדולים, בסוף הזמן החופשי מורחים על גב האריח שכבת דבק דקה. עקב כך בכל שכבת הדבק ניתן לציין שני חתכים חלשים יחסית בהם יש רק אחד מנזקים אפשריים הבאים: בחתך אחד יש נזקים עקב הקרינה שפעלה על הדבק במשך הזמן החופשי; בחתך שני יש נזקים עקב המגע בין האריח והדבק. במתודיקת ההדבקה עבור אריחים קטנים, כל הנזקים מרוכזים בחתך אחד - במגע בין האריח והדבק. זה מביא להקטנת חוזק המתיחה של החיבור באופן משמעותי בהשוואה למקרה של ההדבקת אריחים גדולים לפי מתודיקת התקן .

השפעת חימום הרקע על חוזק ההידבקות במתיחה הינה דומה.

הערכת חוזק החיבור במתיחה, שהתקבלה בניסויים, הינה מדויקת עבור אריחים קטנים במידות שאינן עולות על 200*200 מ״מ. עבור אריחים גדולים יותר ההערכה המתקבלת הינה קונסרבטיבית, וסביר שיתקבלו ערכים נמוכים אף יותר אולם לשם אישוש הנחה זאת נדרשים ניסויים נוספים.

חלק ב׳. קביעת עבודת הרס של חיבור אריח וקיר

6. סוגי עומסים ועיבורים מאולצים

חיבור אריח המשמש כרכיב בציפוי קיר מוטרח בפעולות כוחות (א,ב) ועיבורים מאולצים (ג-ה) הבאים:

א. משקל עצמי של האריח והדבק (לפחות חלקית);

ב. רוח (יניקה).

ג. שינוי טמפרטורה של אריח ביחס לטמפרטורה של קיר;

ד. שינוי רטיבות של הרקע;

ה. התכווצות וזחילה של בטון הקיר;

בנוסף לכך עלולות להיות הטרחות/השפעות נוספות, כמו סדיקת הרקע, אשר משפיעות על מצבו של האריח וחיבורו אל הרקע, אולם הן אינן כלולות במסגרת הדיון הנוכחי.

7. חוזק החיבור ועבודת ההרס

בחיבור אריח אל קיר תחת פעולת גורמים שמפורט לעיל (כנראה במיוחד תחת שינוי טמפרטורה של האריח בהשוואה לטמפרטורה של הרקע) מופיעים סדקים התחלתיים בשכבת הדבק או במגע שבין האריח לבין הדבק בקצות האריח. הם מופיעים לאורך מישור הציפוי (כמתואר בציור 51). הסדקים גדלים באופן יציב, כלומר תחת הגדלת עומסים או עיבורים מאולצים נמצא גידול של אורך הסדק והוא קטן ביחס לאורך האריח ולכן אינו גורם לניתוק ולנשירה פתאומיים של האריח. ניתן להניח שלאריחים שיפלו בעתיד תמיד יש סדקים התחלתיים בקצות האריח שמופיעים תחת פעולות הגורמים המפורטים לעיל (ובהיעדר הסדקים ההתחלתיים אין סכנה של נפילת האריח). כאשר הסדק התפתח במידה משמעותית עקב עיבורים מאולצים וגורמים אחרים, פעולות המשקל עצמי והרוח מצטרפות לגורמי הסיכון. נפילת האריח היא תוצאה של כשל החיבור והתפתחות הסדק בכל שטח האריח.

התנהגות סדקים בגופים שונים ובתנאי עמיסה שונים, כולל במקרה הנדון במחקר זה, מטופלת ע״י מכניקת השבר. על פי מכניקת השבר, ההתנגדות להתפתחותו של סדק מתבטאת במאפיין של ״עבודת הרס״. על מנת להגדיל מידתו של סדק צריך להשקיע אנרגיה הגדולה יותר ממידת עבודת ההרס.

ערך עבודת ההרס הינו קבוע (בתנאים מסוימים) לכל חומר ונקבע בניסויים מיוחדים כתכונת החומר. ערך זה הינו תלוי לא רק בתכונות החומר בו מתקדם הסדק, אלא גם בסוג המאמצים הפועלים בגוף ליד קצה הסדק. לכן מגדירים מקרים יסודיים, בהם ליד קצה הסדק מתקיימים רק מאמצי המתיחה, או מאמצי הגזירה, או שילוב שלהם. לכל המקרים היסודיים הללו יש ערכי עבודת הרס שונים, המסומנים כ- G_{IC}, G_{IIC} ו-G_{C} בהתאמה. מניסויים ידוע שברוב החומרים ערכו של G_{IIC} גדול יותר מערכו של G_{IC} פי 2 בערך. ערכו של G_{C} נמצא בין הערכים של G_{IC} ו-G_{IIC}. לכן אם בקצה הסדק מאמצי המתיחה יהיו לפחות לא קטנים ממאמצי הגזירה, אז בקצה הסדק יהיה הרס בעיקר כתוצאה ממתיחה, והגדלת הסדק תהיה תלוייה בעיקר בערך של G_{IC} .

הכוחות (חוץ מרוח) והעיבורים, הפועלים על חיבור האריח אל הקיר, מכוונים בעיקר בכיוון מקביל למישור הקיר. אבל יש שתי סיבות הגורמות להופעת מאמצי המתיחה הפועלים בכיוון הניצב לקיר:

א - בקצה הסדק מתפתחים תמיד מאמצי מתיחה, הפועלים בניצב למישור הקיר, עבור כל כיוון של פעולת הכוחות והעיבורים הנדונים, כפי שמתקבל מניתוח תיאורטי של הבעיה;

ב - אחרי הופעת הסדק ההתחלתי בקצה האריח, מופיעים כוחות דחף - כוחות פנימיים של לחיצה הפועלים באזור סדיקת החיבור בין שפות הסדק ובניצב למישור האריח, כמתואר בציור 51. הופעת כוחות הדחף נקשרת להשפעה הדדית של פנים מחוספסים בשפות הסדק, אשר עקב תזוזות אורכיות יחסיות של שפות הסדק לאורכו מתפתחות גם תזוזות (וכוחות הדחף בהתאם) בניצב למישור האריח, ובכך מתקיימת "השפעת טריז". כידוע, השפעה כזאת מתקיימת בבטון סדוק כאשר יש תזוזות אורכיות יחסיות של שפות הסדק לאורכו.

ברור שכוחות הדחף בין שפות הסדק מביאים להגדלת המתיחה בשכבת הדבק ליד קצה הסדק. בניסויי גזירה של האריח המודבק לקיר הבטון (ראה ציור 52 לפי [33]) התקבל שהתזוזה היחסית אינה גדלה במידה רבה אחרי סדיקת החיבור (ציור 53). אבל תזוזה יחסית בניצב למישור האריח מתפתחת במידה ניכרת ובקצב גבוה יחסית. אחרי שרוחב הסדק מגיע לכ- 0.06 מ"מ בערך, התזוזה היחסית הרוחבית מתחילה לעלות על ערכה של התזוזה היחסית האורכית.

8. עבודת ההרס במתיחה

לשם קביעת הערך של עבודת ההרס במתיחה השתמשנו בשתי סכמות ניסוי שונות: סכמה ראשונה של קורות רגילות וסכמה שנייה של דגם בעל שני זיזים.

8.1. סכמה ראשונה של ניסויים

סכמת ניסוי זאת הינה פשוטה יותר ובה משמשים בדרך כלל. הדגם של הקורה הוא במידות 25*25*285 מ"מ. הדגמים עשויים מדבקים לחיבור האריחים לקיר (השתמשנו ב-3 דבקים שונים המסומנים: מס' 1, מס' 2 ומס' 3). לגבי כל דבק נבחנו שלושה תנאי הכנה שונים: א'- תנאים נורמאליים המקובלים בתנאי המעבדה (זהו ניסויי יחוס לצורך השוואה לניסויים בתנאים קשים יותר); ב'- תנאים בהם רכיבי דבק חוממו, האשפרה ניתנה בתנאי חדר אילת (טמפרטורה 30^{o} צ' ולחות יחסית 40%). אחרי היציקה הדגמים נחשפו לקרינת UV ל-20 דקות; ג'- כל התנאים של מקרה ב' למעט קרינת UV אחרי היציקה.

הדגמים נבדקו בגיל 28 ימים. הניסויים בוצעו במכבש MTS לפי סכמת כפיפה כאשר המיפתח הוא 220 מ"מ והמרחק בין העומסים הוא 32 מ"מ. בניסויים התקבלו עקומות ההתנגדות של הקורות (עומס כפונקציה של הכפף באמצע הקורה) עם ענף ירידת העומס (בניסויים מסוימים לא התקבל ענף זה בהתחשב במיגבלות ציוד הבדיקה).

על בסיס תוצאות הניסויים חושבו המאפיינים הבאים של הדבקים: מודול אלסטיות E_a, חוזק בלחיצה f_a (קוביות במידת צלע 25 מ"מ), חוזק מתיחה בכפיפה f_{at}, הערכה של עבודת ההרס במתיחה G_{IC}, הערכה קריטית של מקדם עוצמת המאמצים K_{IC}, הערכה של אורך החלק הקדמי של הסדק או של מידת אזור ההרס המוכר כ- fracture process zone (FPZ) שמעבר לקצה הסדק ומסומן d (ציור 51). הערך של f_{at} נקבע מהנחה שעבודת הדבקים הינה אלסטית, עובדה שאוששה על פי הקטע הראשון של עקומת ההתנגדות במרבית הניסויים (כמעט עד לרמת העומס המקסימאלי). הערכים G_{IC}, K_{IC} ו-d מחושבים באמצעות הנוסחאות הידועות הבאות:

$$G_{IC} = A/(bh), \quad K_{IC} = \sqrt{G_{IC}E_a}, \quad d = \pi/8\left(K_{IC}/f_{at}\right)^2 \qquad (1)$$

כאשר h, b - רוחב ועובי של חתך הקורה הרוחבי, A – השטח מתחת לעקומת ההתנגדות השלמה שהתקבלה בניסוי. הערכים d הם אינם מדויקים מפני שהם חושבו בעזרת ערכים מקורבים וחוץ מזה חושבו ע"י העלאה לחזקה 2.

תוצאות הניסויים מוצגות בטבלה 6.

טבלה 6: תוצאות ניסויים של הקורות מהדבק

d m	f_{at} MPa	f_a MPa	K_{IC} MPa $m^{-0.5}$	E_a MPa	G_{IC} MN m^{-1}	סוג הדבק
-	2.7	9.7	-	3351	-	N1
0.006	1.9	6.2	0.24	3376	0.000017	
0.009	2.1	7.0	0.31	3887	0.000025	
0.015	3.0	9.7	0.59	2718	0.000128	N2
0.033	1.5	4.9	0.43	2781	0.000068	
0.035	1.4	5.3	0.42	1755	0.0001	
-	3.8	19.7	-	7859	-	N3
0.013	2.6	19.6	0.47	6265	0.000036	
0.011	3.4	17.5	0.56	9047	0.000035	

הערות:

1. בטבלה עבור כל דבקים מקובלים:

בשורה ראשונה – reference בלי חימום רכיבי החומר לפני יציקה ובלי קרינת UV;

בשורה שנייה – חימום רכיבי החומר לפני יציקה, זמן שימושי מינימאלי לפי המלצות היצרן, פעולה קרינת UV במשך 20 דקות;

בשורה שלישית – אותו דבר כמו בשורה שנייה, אבל בלי השפעת קרינת UV בכלל.

2. סימן "–" מסמן שבניסוי הקורות, בעקומת ההתנגדות לא נכלל הענף שיורד.
3. בניסוים של הדבקים N1 ו-N2 לא התקבל ענף שיורד בעקומת התנגדות ולכן אין הערכים של G_{IC}

מטבלה 6 נובע שלדבק 2 יש הערך המקסימאלי של G_{IC}. מסקנה כזאת ניתן לקבל גם מניתוח ויזואלי, למשל של ציור 54 , כי השטח הכלוא מתחת לעקומת ההתנגדות הינו גדול בהשוואה לשטח דומה עבור הדבקים האחרים שנבדקו. יש לקחת בחשבון שהרס הקורות היה בחתך רוחבי.

בחתך זה לא הייתה פעולת קרינה UV. חוץ מזה, הקורות היו מסיביות יחסית (בהשוואה לשכבת דבק בחיבור) וגם לכן אין השפעת הקרינה המכירה על הערך של G_{IC} המתקבל בניסויים אלה. אין נתונים לגבי השפעת הטמפרטורה על הערך של G_{IC}. רק עבור דבק מס׳ 2, שנוצר בתנאי השפעת טמפרטורה וקרינת UV, הערך של G_{IC} קטן פי 2 בערך בהשוואה לערך של G_{IC} עבור תנאים נורמאליים (טמפרטורה 30^{o} צ׳).

8.2. סכמה שנייה של ניסויים

סכמת הניסוי של דגם בעל שני זיזים פותחה קודם [33]. הסכמה מוצגת בציור 55. הדגם כולל שתי קורות מורכבות שמחוברים ע״י דבק מיוחד להדבקת אריחים לקיר חוץ (כמו כן השתמשנו ב- 3 דבקים: מס׳ 1, מס׳ 2 ומס׳ 3). קורות מורכבות כוללות את האריח (קרמיקה או פורצלן) ורצועת פלדה בעובי 6 מ״מ וברוחב 60 מ״מ השווה לרוחב האריח, כמתואר בציורים 55 – 56. הרצועה נדרשת עבור חיזוק הזיז למניעת הרס מוקדם של האריח בניסוי. רצועת הפלדה נדבקת לאריח ע״י דבק אפוקסי. הדגם הועמס בכוחות מתיחה הפועלים בקצה הדגם בניצב למישור האריחים. באותו קצה, לפני תחילת ניסוי ההעמסה, בוצע חתך בשכבת הדבק שבין הזיזים, במקביל למישור האריחים, לשם יצירת חריצה התחלתית בדבק ופיתוח יציב של סדק מהחריצה במשך העמיסה . למעשה הדגם כולל שני זיזים מורכבים אשר מופרדים ע״י הסדק ומועמסים ע״י כוחות מרוכזים בקצה הזיזים. אורך הזיז שווה למרחק בין קצה הסדק לבין קוו פעולה של כוחות המתיחה החיצוניים.

ניסויים בוצעו על דגמים בגיל 14 יום במכבש MTS. קצב ההעמסה היה קבוע בשיעור של 0.2 מ״מ לשנייה. במשך ההעמסה, אחרי עלית הכוח לערך מסויים (אחרי הקטע הליניארי) הופיע סדק התחלתי בעל אורך קטן. לאחר מכן התפתח קטע לא ליניארי של עקומה: הכוח – רוחב הסדק. בקטע זה הכוח יורד עם הגדלת רוחב הסדק כתוצאה מהגדלת אורך הסדק. לקביעת אורך הסדק במשך הניסוי היו מספר שלבים של פריקת העומס ולאחריו העמסה מחדש כדי לקבל את ערכי קשיחות הזיזים, אשר תלויה במפתח הזיזים, כלומר תלויה באורך הסדק. לשם השגת רמת ודאות מספקת לצורך עיבוד תוצאות הניסוי, נבדק גם אורך הסדק ע״י מדידתו הישירה, שניתן לאבחנו באופן ויזואלי על פנים הצידיים של שכבת הדבק. יש לציין שמדידות אלה אינן מדויקות עקב מספר סיבות. בהמשך תוצג השוואה של שתי מתודיקות אלה.

בניסויים נוספים בכפיפה של קורות מורכבות התקבלו ערכי קשיחות בכפיפה EJ הבאים: עבור אריח הקרמיקה - $1049500\ \mathrm{kNmm^2}$, עבור אריח הפורצלן – $1530700\ \mathrm{kNmm^2}$. כאן E , J - מודול האלסטיות של החומר ומומנט האינרציה של חתך הקורות המורכבות בהתאם. מודול האלסטיות של האריחים שנקבע גם בניסויי כפיפה עבור אריח הקרמיקה וערכו שווה ל-46100 MPa ועבור אריח הפורצלן ערכו שווה ל- 52600 MPa. הקשיחות בכפיפה EJ של אריחים אלה בלי חיזוק ע״י לוח פלדה שווה ל- $118000\ \mathrm{kNmm^2}$ ול-$193000\ \mathrm{kNmm^2}$ בהתאמה. סכמת הניסויים הנוספים מוצגת בציור 56.

גיל 14 יום לבדיקת הדגמים נקבע בהתחשב בתוצאות ניסויי המתיחה של הדבקים הנבחנים במחקר זה בגילאים שונים של 1, 7, 14, 28 ימים. הכנת ואשפרת הדגמים נעשו בתנאים

נורמאליים. בציור 57 מתוארים תוצאות הניסויים. רואים שבדרך כלל חוזק ההדבקה במתיחה בגיל 14 ימים לא נבדל משמעותית מהחוזק המתקבל בגיל 28 ימים.

ציורים 58, 59 מתארים מבט כללי על הדגמים בתהליך הניסויים ועל התפתחות הסדק בחיבור הזיזים.

בציורים 60 - 65 מוצגות עקומות "כוח – רוחב הסדק" עבור דגמים אשר נבדקים בהעמסה המלווה במספר שלבים של פריקה של הכוח במהלך הניסוי והעמסתו מחדש .

אורך הסדק l (אורך הזיז) הוא:

$$l = \sqrt[3]{\frac{3aEJ}{2P}} \qquad (2)$$

כאשר a – רוחב הסדק בחתך הזיז הרוחבי בו פועלים כוחות מתיחה P של המכבש; EJ – הקשיחות בכפיפה של הזיז האחד של הדגם. לקבלת הערך l עבור כל המקרים של פריקה והעמסה מחדש של העומס צריך לדעת את הערך P/a , כלומר צריך לדעת מהו השיפוע הממוצע של עקומות הפריקה וההעמסה מחדש ביחס לציר אופקי (המתאר את רוחב הסדק). הערך P/a נקבע בקירוב כערך ממוצע עבור חלקי העקומות המרכזים הליניאריים (ציור 66). יש לציין ששגיאות בערכי P/a לא משפיעות משמעותית על תוצאות חישוב של הערך l, אשר מתקבל מ-(2).

בהתחשב בשיטה ידועה של מכניקת השבר, ניתן לרשום את תוספת האנרגיה השלמה של שני זיזים, כאשר יש תוספת של חצי רוחב הסדק u ($u = a/2$) עקב תוספת אורך הסדק l

$$2Pdu = 2\frac{Pdu}{2} + 2G_{IC}{}^{1}tdl \qquad (3)$$

כאשר t- רוחב הזיזים, $G_{IC}{}^{1}$ - עבודת ההרס במתיחה (העבודה הנדרשת עבור יצירה של שפה אחת של הסדק), $G_{IC} = 2G_{IC}{}^{1}$. במשוואה (3) האיבר הראשון באגף ימין מתאים לשינוי האנרגיה הפוטנציאלית עקב המשך/הגדלת אורך הסדק בשיעור dl, האיבר השני מתאים לאנרגיה הנדרשת להמשך הסדק בחיבור באורך dl. לכן מקבלים

$$\frac{du}{dl} = 2\frac{G_{IC}{}^{1}t}{P} \qquad (4)$$

עבור זיז

$$u = \frac{Pl^3}{3EJ} \qquad (5)$$

כתוצאה מכך מקבלים

$$G_{IC} = \frac{P^2l^2}{t\,EJ} \qquad (6)$$

לצורך ביצוע החישובים לפי (6) נדרשים ערכי P ו-l. עבור מתודיקת הקביעה של אורך הסדק ע"י שימוש בפריקת העומס והעמסתו מחדש, הערך של P מתקבל כערך ממוצע בין הערך מתחילת הפריקה והערך לאחר עליית העומס. קביעה של אורך הסדק מתוארת לעיל. עבור מתודיקת

הקביעה של אורך הסדק ע״י מדידות האורך הישירות באופן ויזואלי, הערך של P נלקח ממדידות המכבש.

בציורים 69 - 67 מתוארים הערכים של G_{IC} בתלות באורך הסדק בחיבור עבור כל דבקים נבדקים. כידוע עבור בטון, הערכים הינם קבועים יחסית כאשר אורך הסדק אינו קטן מערך מסוים שתלוי במידות האגרגטים של הבטון ובמצב המאמצים בגוף עם סדק [33]. במקרה הנדון, כפי שנובע מציורים 69 - 67, הערכים של G_{IC} הם קבועים, אם אורך הסדק אינו קטן מ-150-100 מ״מ. כלומר עבור סדקים קצרים מכניקת השבר הליניארית אינה מתאימה בתנאי העמסה של הניסוי כאשר הסדק התפתח באופן בלתי יציב. בהעמסה אחרת (למשל בפעולת עיבורים מאולצים), כאשר הסדק התפתח באופן יציב, גבול השימוש במכניקת השבר הליניארית קטן. חוץ ממצב המאמצים המיוחד באזור הסדק, שינוי בערך של G_{IC}, כאשר אורך הסדק הינו קטן יחסית, קשור גם לגורמים אחרים שעדיין לא ברורים עד הסוף אפילו עבור בטון וחומרים הקרובים לו למרות שהתפתחות סדקים בחומרים אלה נלמדת כבר במשך 40 שנה בערך.

בטבלה 7 מובאים נתונים לגבי הצורה והמיקום של ההרס של חיבור האריח עבור הניסויים לפי שתי הסכמות: מתיחה צירית וכפיפת הזיזים. רואים שהרס בתוך שכבת הדבק התקבל בכל האריחים הנבדקים רק בשימוש בדבק מס׳ 1 ובדבק מס׳ 2 - עבור אריחי קרמיקה בניסויים לפי סכמה שנייה. בכל הניסויים האחרים החיבור נהרס במגע בין האריח והדבק כאשר על פני האריח נשארו עקבות הדבק (בעיקר במקרה שימוש באריחי הקרמיקה).

טבלה 7: צורת ומיקום הרס של חיבור האריח בניסוים

דבק	סוג האריח	צורת ומיקום ההרס בניסויים	
		מתיחה צירית	כפיפת הזיזים
N1	קרמיקה	בשכבת הדבק	בשכבת הדבק
	פורצלן	בשכבת הדבק ליד פני האריחים***	בשכבת הדבק ליד פני האריחים
N2	קרמיקה	במגע*	בשכבת הדבק
	פורצלן	במגע	במגע**
N3	קרמיקה	במגע	במגע*
	פורצלן	במגע	במגע*

* - אחר׳ הרס היו חלקים קטנים של הדבק על פני האריחים;
** - אחר׳ הרס היו הרבה מקומות בהם נשאר הדבק על פני האריחים;
*** - אחר׳ הרס היה שטח האריח בלי דבק השווה ל- 20% בערך משטח כללי.

בטבלה 8 מובאים הערכים הממוצעים של G_{IC} (בקטע השינוי באורך הסדק כאשר הערכים של G_{IC} לא תלויים באורך הסדק) עבור דבקים נבדקים. חוץ מזה לפי נוסחאות (1) חושבו הערכים של K_{IC} ו-d.

בציור 68 רואים שמדידות אורך הסדק על פני הדגם וחישובים של אורך הסדק נותנים תוצאות קרובות יחסית של G_{IC}. זה מצביע על הדברים הבאים: א' – שאין שגיאות גסות במתודיקת החישוב של האורך l; ב' – ששגיאות אפשריות במדידות הערך l על הפנים הצידיים של הדגם לא מביאות לסטייה משמעותית בתוצאות מפני שהפונקציה P בתלות ב- l לא משתנה באופן דרסטי כאשר $l > 100$ mm, כפי שניתן לראות בציורים 60 – 65.

יש לציין שהערכים של K_{IC} עבור הדבקים הללו הם קטנים יותר מהערכים עבור בטון עם אגרגאטים קטנים במידות שאינן עולות על 5 מ"מ (בדבקים הנבדקים האגרגטים הינם קטנים עוד יותר). עבור בטון, הערכים של K_{IC} מחושבים לפי הנוסחה $K_{IC} = 0.224\, f_c^{\,0.4}$ [34 - 35]. ההבדל הוא 19-27% עבור דבק מס' 1, 70-124% עבור דבק מס' 2, 10-64% עבור דבק מס' 3.

טבלה 8: תוצאות ניסויים של הזיזים

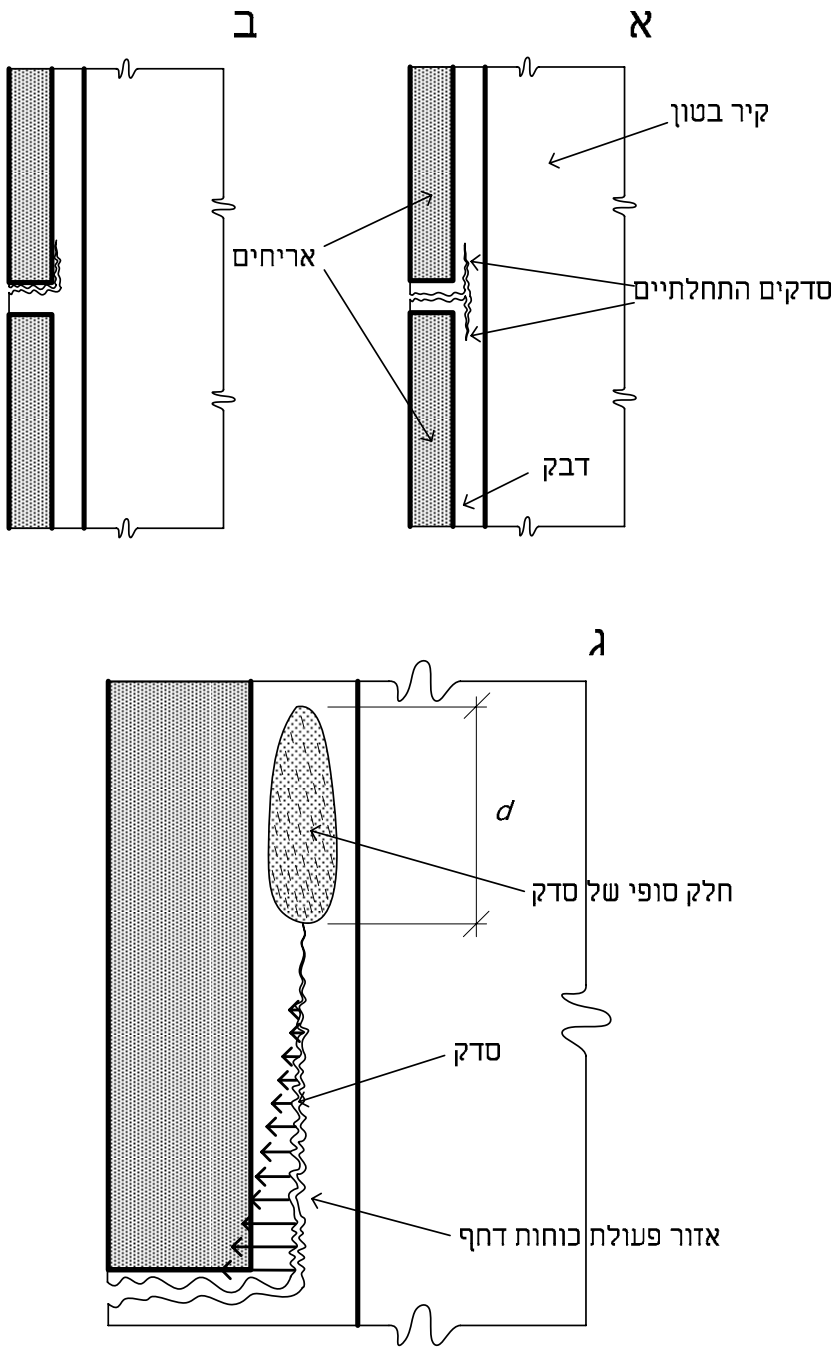
סוג הדבק	סוג האריח	G_{IC} MN m^{-1}	K_{IC} MPa m$^{-0.5}$	f_{at} MPa	d, m
N1	קרמיקה	0.000058	0.44	1.41	0.038
		0.000063	0.46		0.041
	פורצלן	0.00006	0.45	1.47	0.037
		0.000066	0.47		0.041
N2	קרמיקה	0.000042	0.34	2.19	0.0087
		0.000039	0.32		0.0083
	פורצלן	0.000033	0.3	1.75	0.0109
		0.000023	0.25		0.0078
N3	קרמיקה	0.000033	0.51	1.46	0.048
		0.000057	0.67		0.083
	פורצלן	0.000029	0.48	1.23	0.059
		0.000026	0.45		0.054

1. בטבלה f_{at} - חוזק הדבקות ממתיחה של הדבקים המתקבל בניסוי מתיחה של חלקי האריח במידות 50*50 מ"מ שמודבקים לבטון;
2. לחישוב K_{IC} נלקחו בקירוב הערכים של E_a מטבלה מס' 1 שנקבעו בניסויי קורות הדבק בגיל 28 ימים.

בעקבות תוצאות הניסויים שהתקבלו בניסויי מתיחה עבור אריחים במידות שאינן עולות על 200 מ״מ, בתנאי פעולת טמפרטורה וקרינה UV, לא נערכו ניסויים בסכמה שנייה עקב חוזק נמוך מאוד שהתקבל בגלל גורמים שונים לרבות הופעת סדקים וליקויים אחרים בחיבור בתהליך הדבקת אריחים. בניסויים אלה הסדקים בחיבור בקצות הדגמים הינם אפשריים כמו בניסויי המתיחה. לכן בעיבוד תוצאות הניסויים רוחב הזיזים נשאר בלתי ידוע, כמו במקרה של ניסויי מתיחה צירית כאשר מידות השטח, שלא נהרס בהדבקה, אינן ידועות. לכן בניסויים בסכמה השנייה, בתנאי הדבקה קשים, יש לצפות לערכים קטנים מאוד של G_{IC}, אבל מראש ברור שבמקרה של ביצוע ניסויים אלה תרומת הגורמים הנזכרים לעיל להחלשת החיבור אינה ידועה.

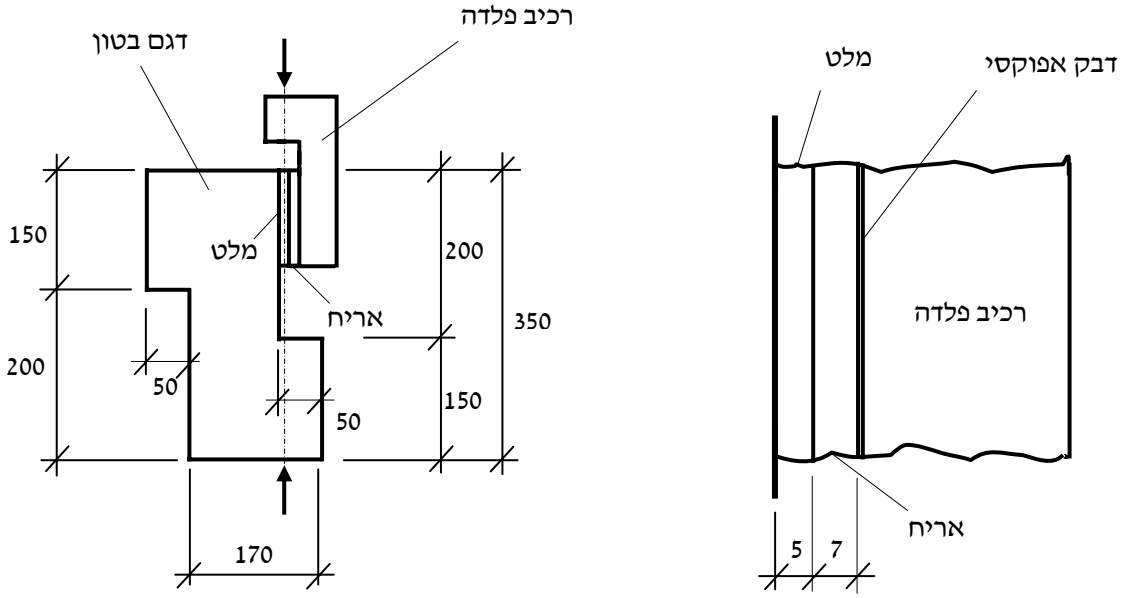
במקרה של בדיקות של אריחים גדולים יותר יש לצפות להגדלה של ערכי חוזק המתיחה הצירית. מניחים בקירוב שערכו של d לא משתנה בהשוואה לערכו של d לפי ניסויים בתנאים רגילים. מכאן נובע שערכו של K_{IC} הינו פרופורציונאלי לערכו של f_{at} וערכו של G_{IC} הינו פרופורציונאלי לערך $f_{at}^{\,2}$.

בציורים 69 - 73 מובאים צילומם של פני החיבור במצב הרס אחרי הניסויים. ניתן לראות את מיקום פני ההרס ומבנה החומרים המתגלים אחרי ההרס.

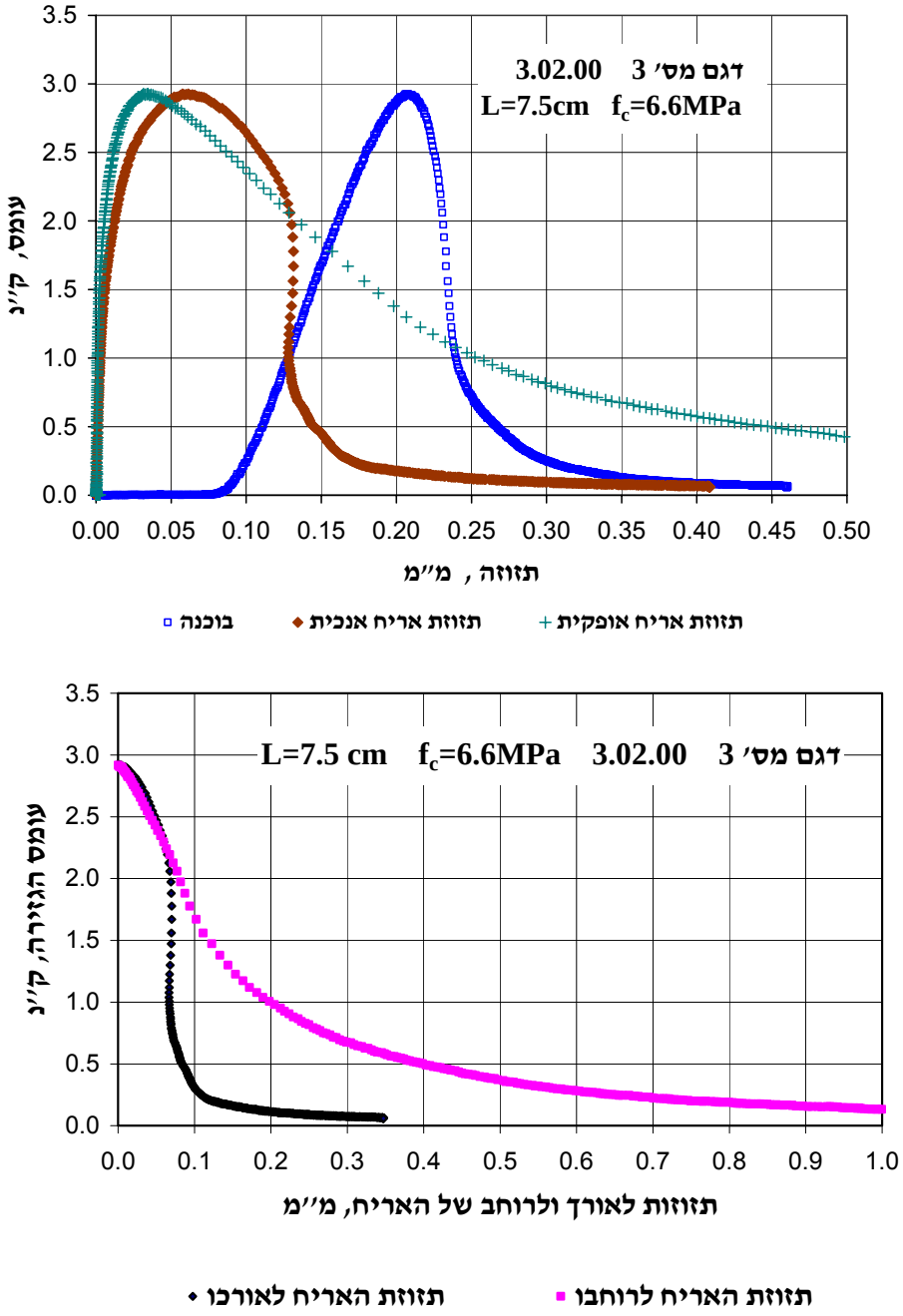


ציור 51. סדקים בחיבור אריחים.

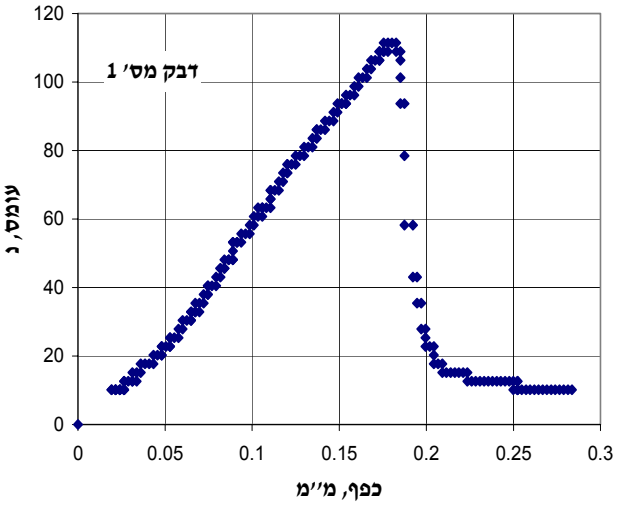
א – הסדקים ההתחלתיים באמצע שכבת הדבק; ב - הסדק ההתחלתי במגע של האריח והדבק; ג - הסדק המפותח בו על שפות שלו פועלים כוחות דחף בניצב למישור האריח (*d* – אורך חלק סופי של קצה הסדק בו מופיעים מיקרוסדקים וליקויים אחרים בחומר תחת פעולת המאמצים הגבוהים)

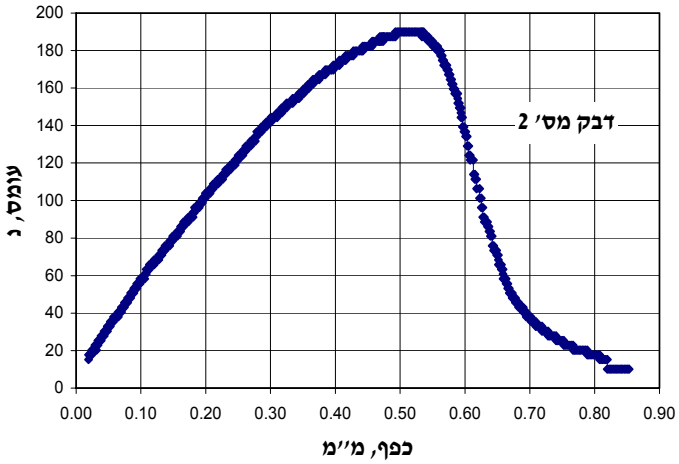


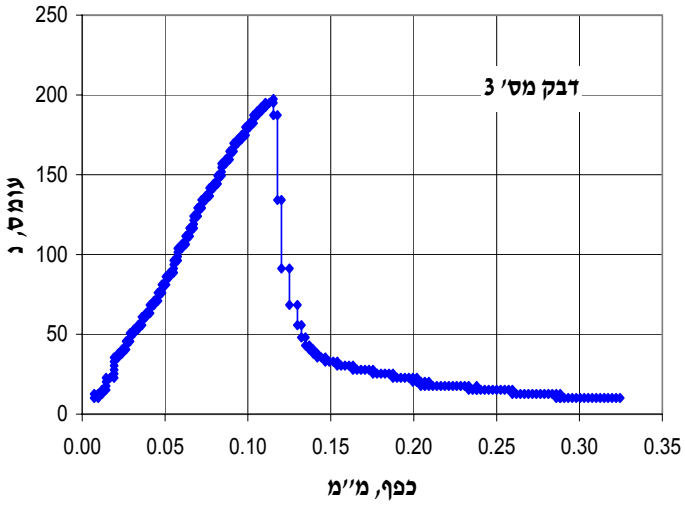
ציור 52. סכימת ניסוי בגזירה לפי [33]



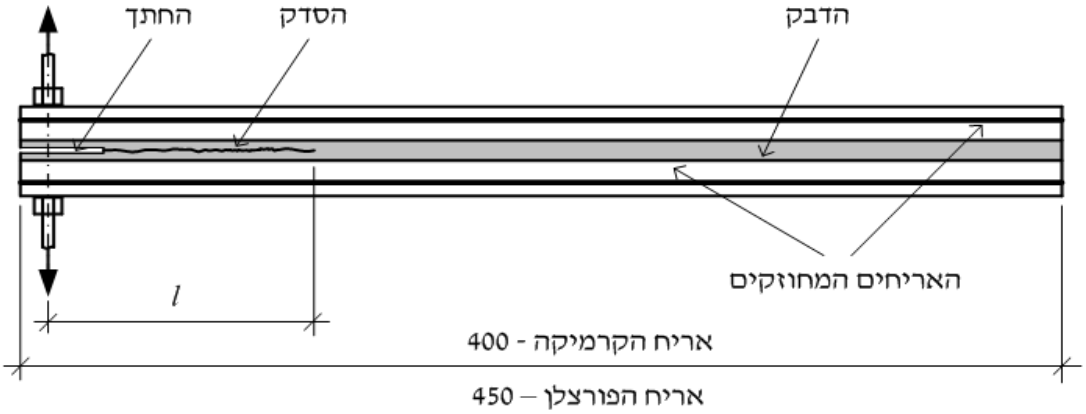
ציור 53. תוצאות הניסוי בגזירה לפי [33]. תזוזות האריח לאורך ולרוחב למשור האריח בפעולת עומס הגזירה (למעלה), ערכי התזוזות לאורך ולרוחב למשור האריח אחרי הופעה של סדק הגזירה בשכבת הדבק בירידת עומס הגזירה (למטה)



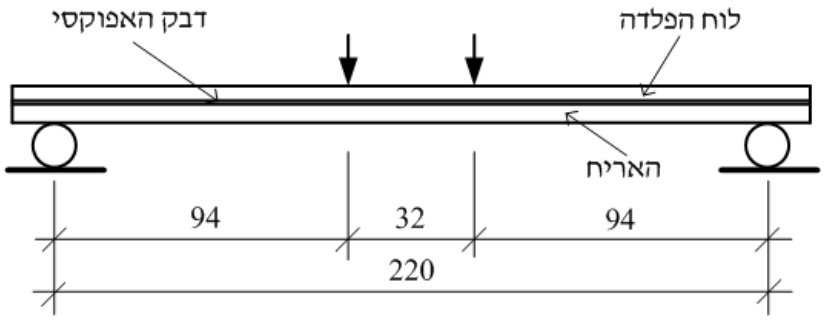




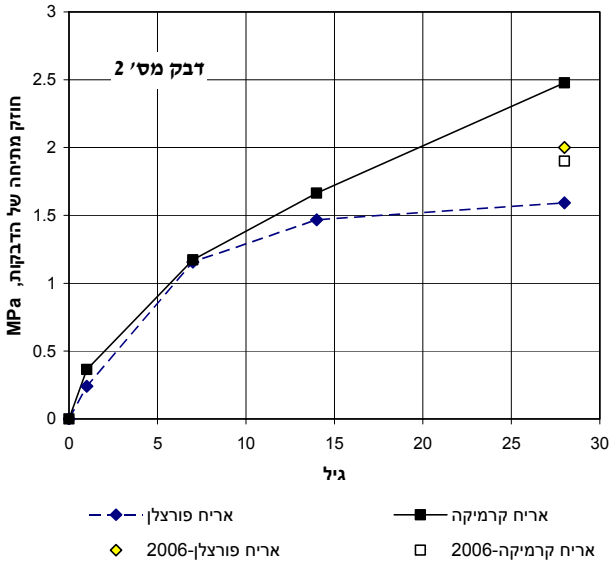
ציור 54 . עקומות ההתנגדות עבור קורות מדבקים שונים

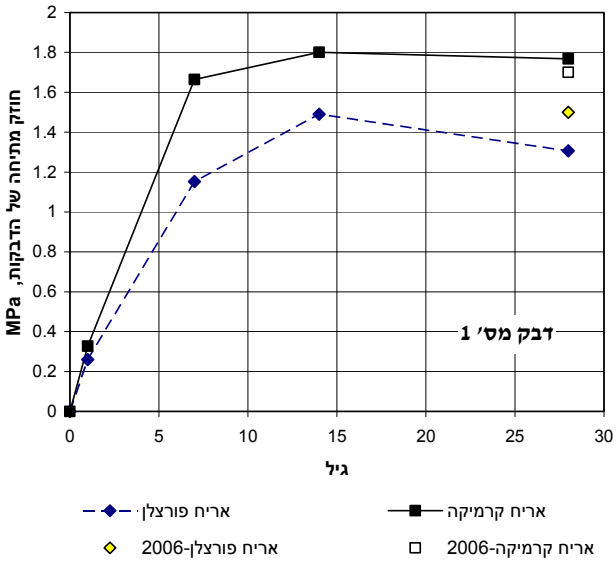


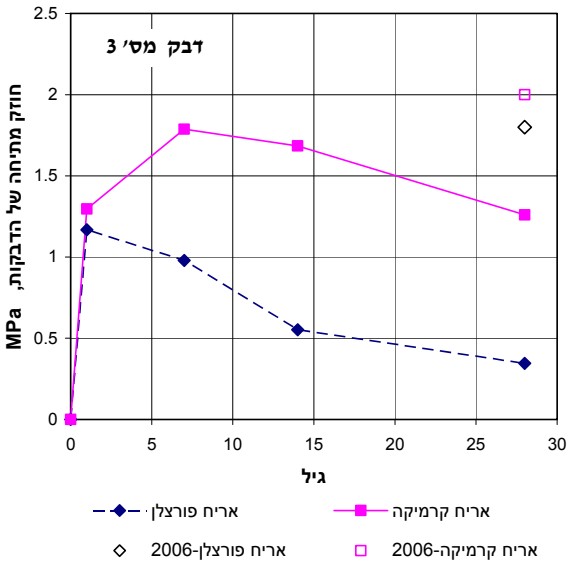
ציור 55. סכימת הניסוי בכפיפה של שני זיזים מחוזקים



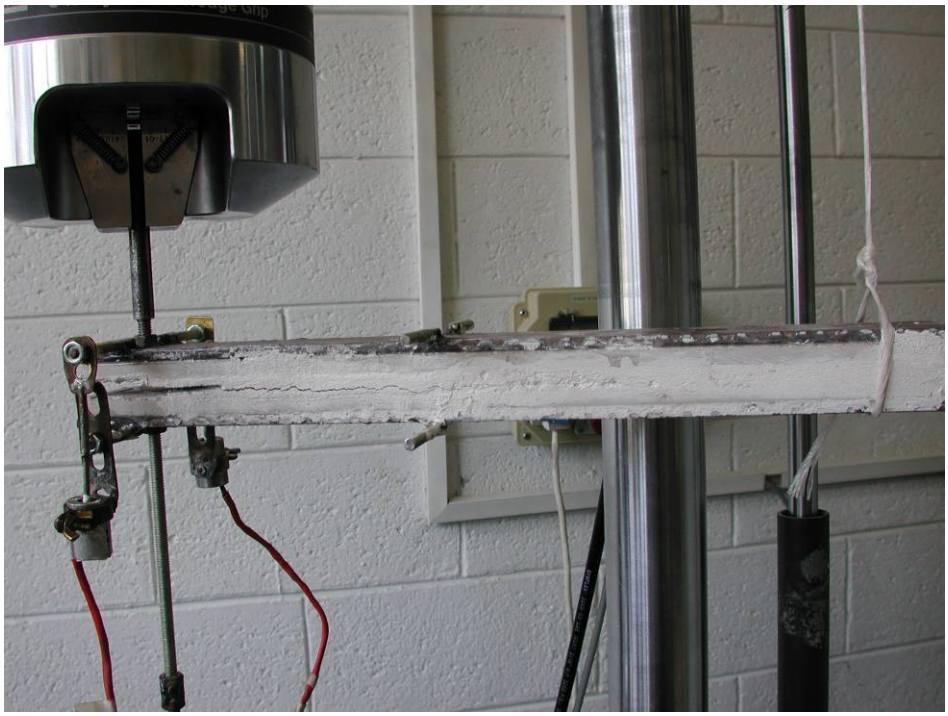
ציור 56. סכימת הניסוי המסייע בכפיפת האריח המחוזק ע״י לוח הפלדה



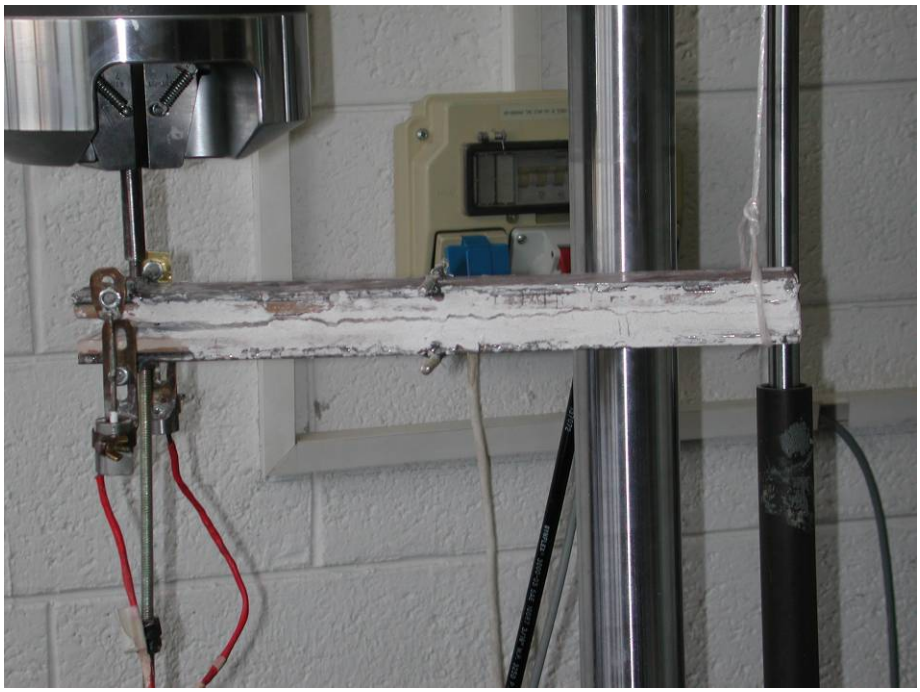




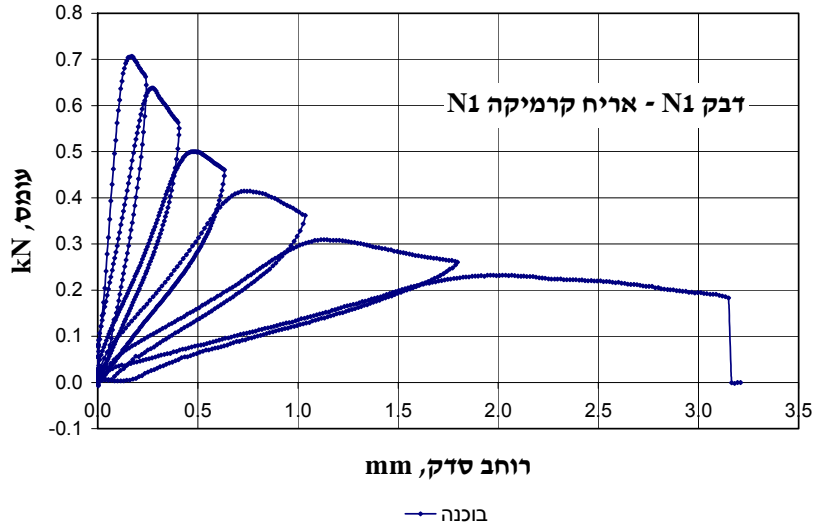
ציור 57. השפעת גיל הדבק על חוזק הדבקות במתיחה

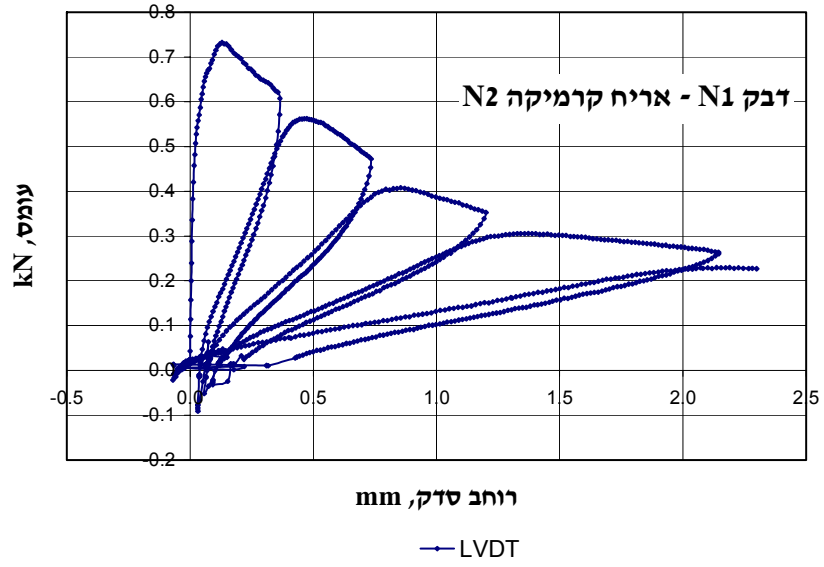


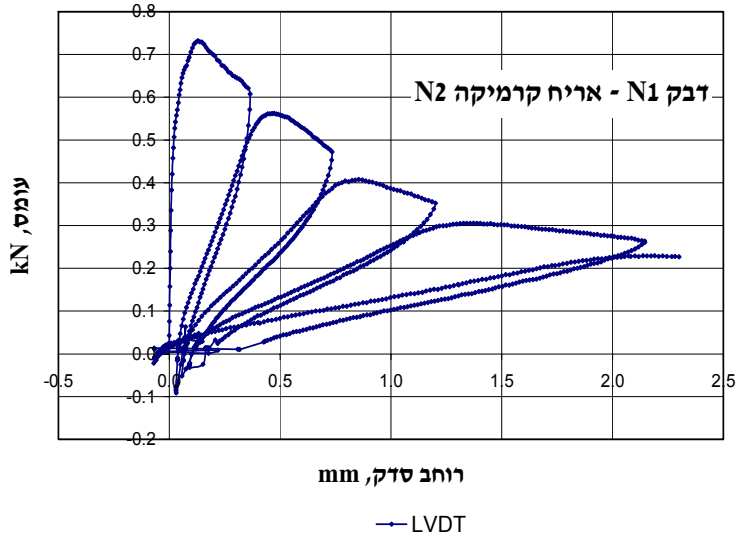
צויר 58 . מבט כללי על דגם הניסוי במכבש בתהליך התפתחות הסדק



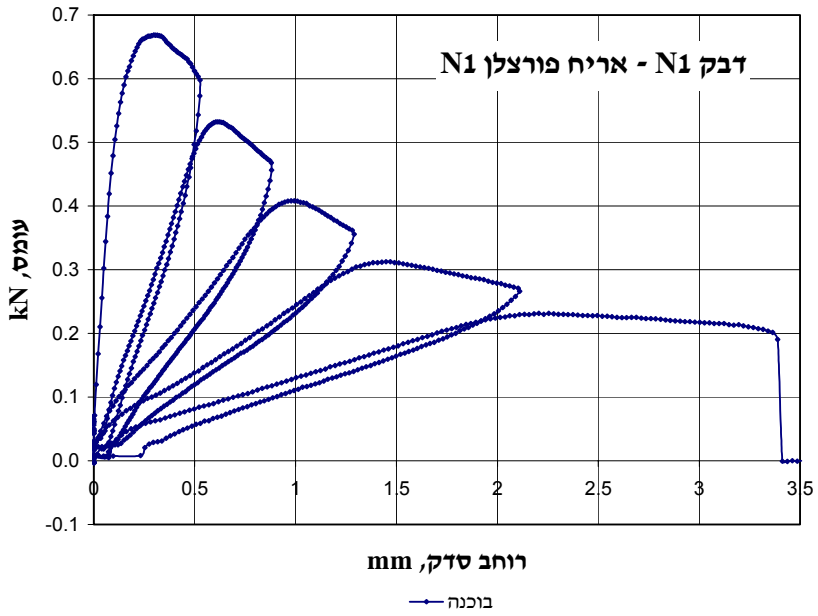
ציור 59 . מבט כללי על הדגם אחרי ניסוי במכבש

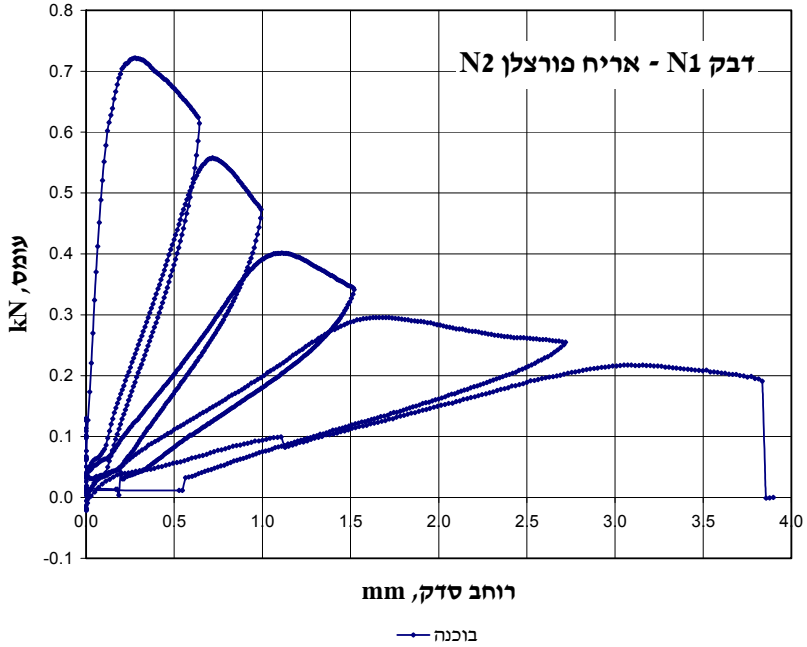




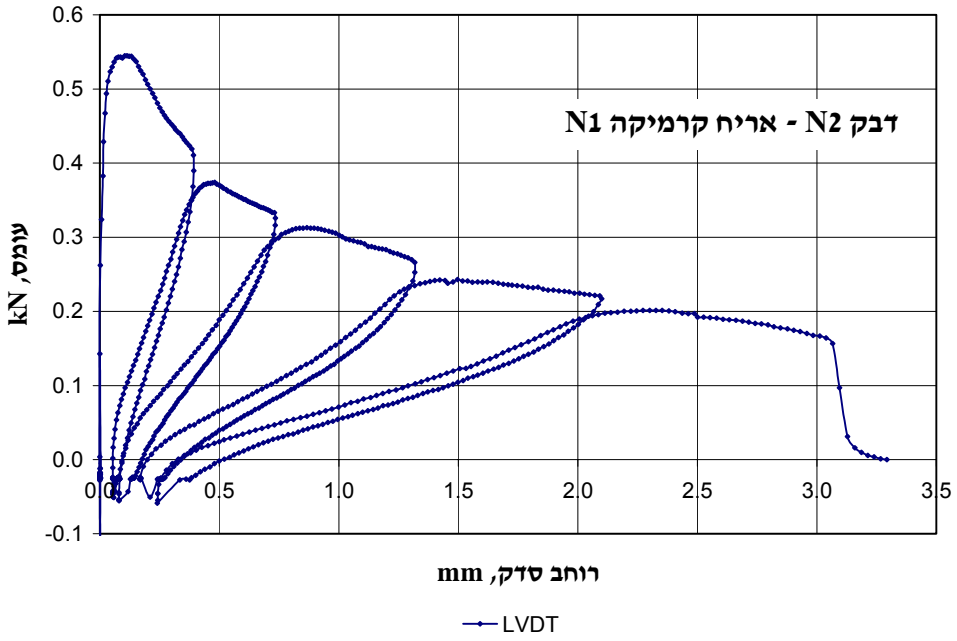


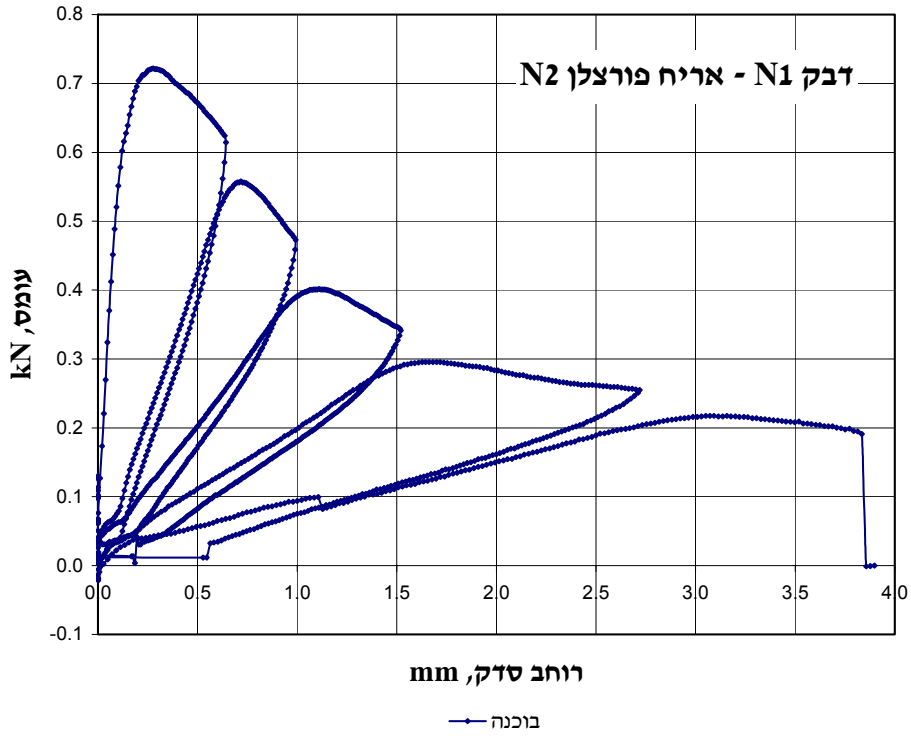
ציור 60. עקומת ההתנגדות של חיבור אריחי הקרמיקה ע״י דבק מס׳ 1





ציור 61 . עקומות ההתנגדות של חיבור אריחי הפורצלן ע"י דבק מס' 1



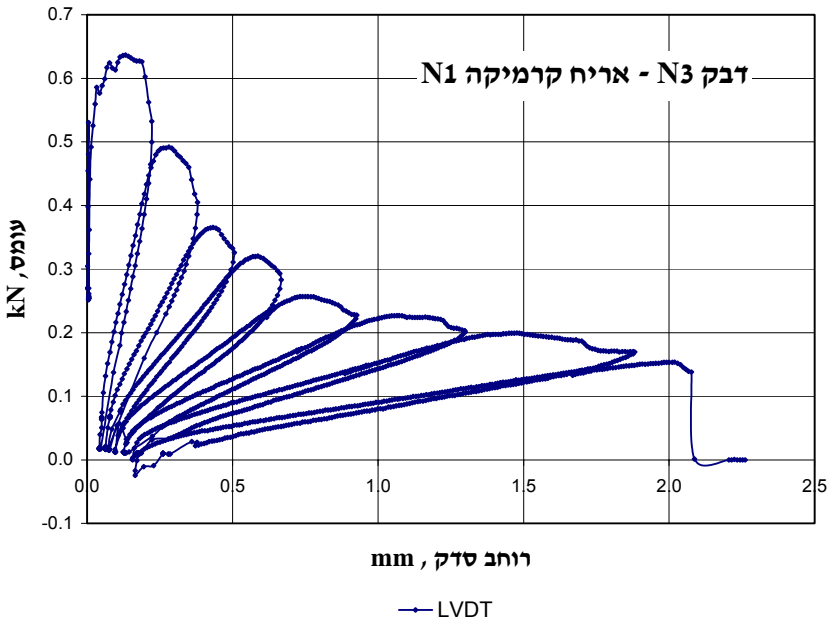


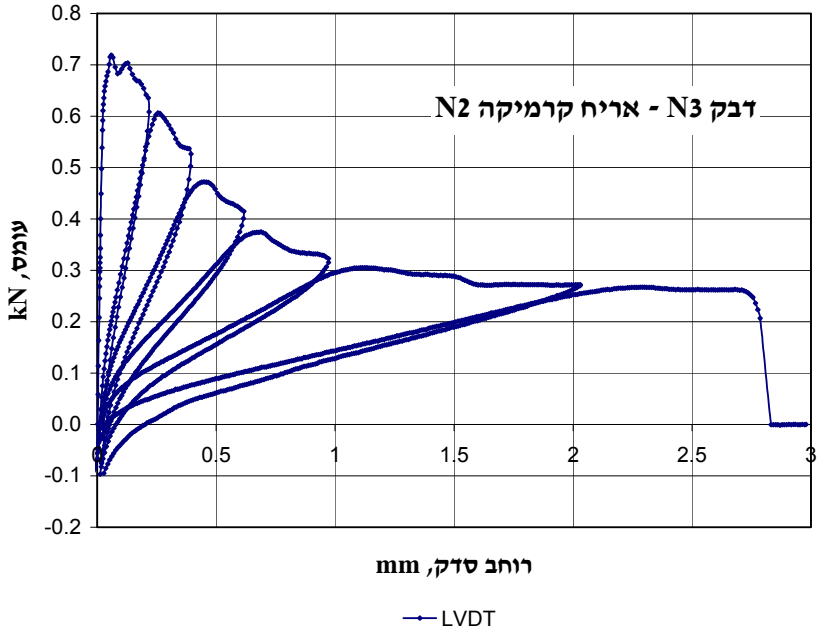
ציור 62. עקומת ההתנגדות של חיבור אריח הקרמיקה ע"י דבק מס' 2



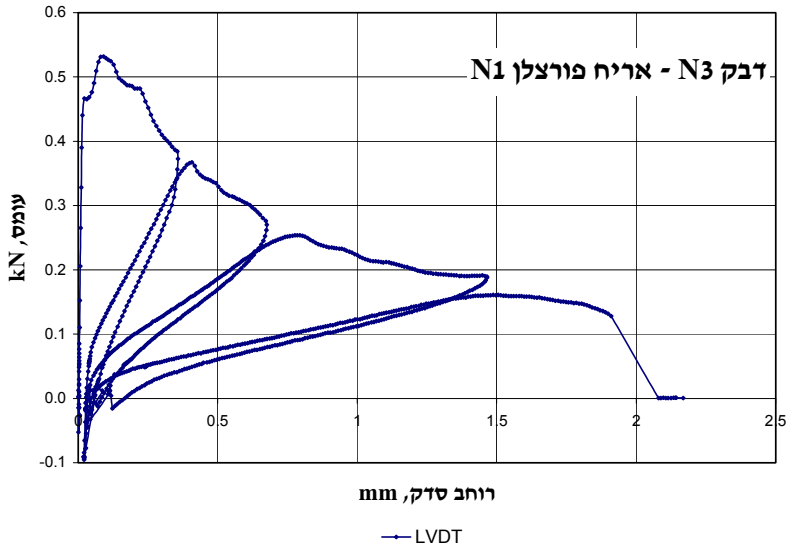


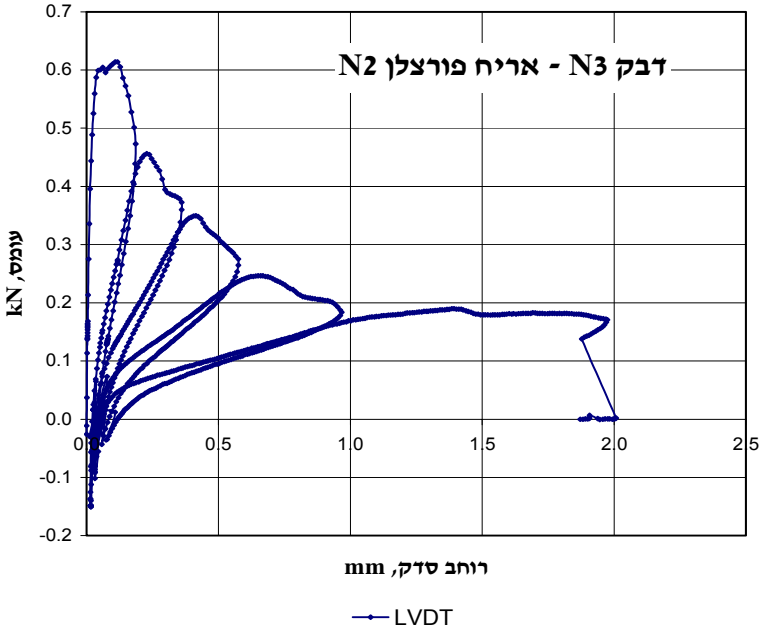
ציור 63. עקומות ההתנגדות של חיבור אריח הפורצלן ע"י דבק מס' 2



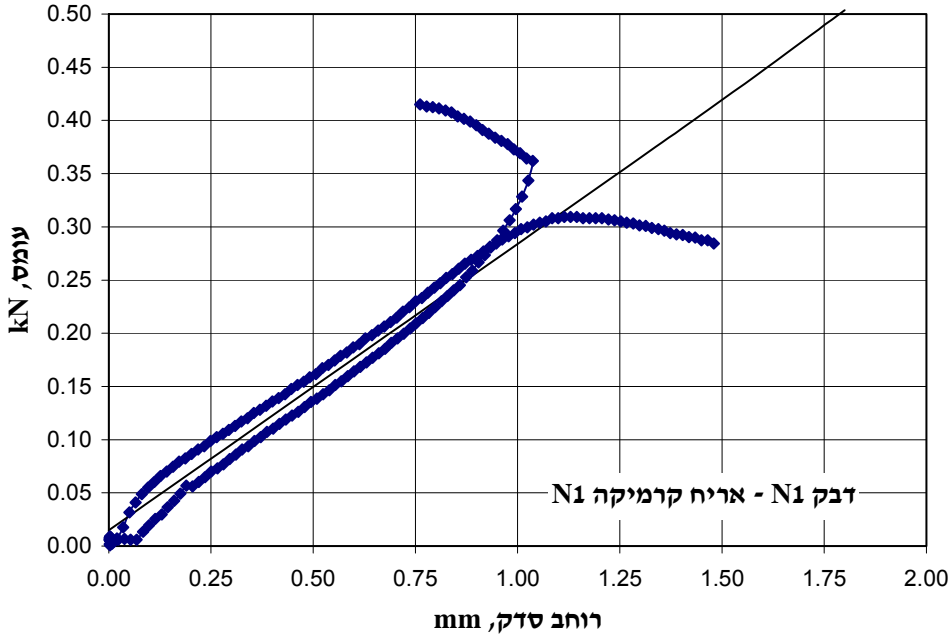


ציור 64. עקומות ההתנגדות של חיבור אריח הקרמיקה ע"י דבק מס' 3

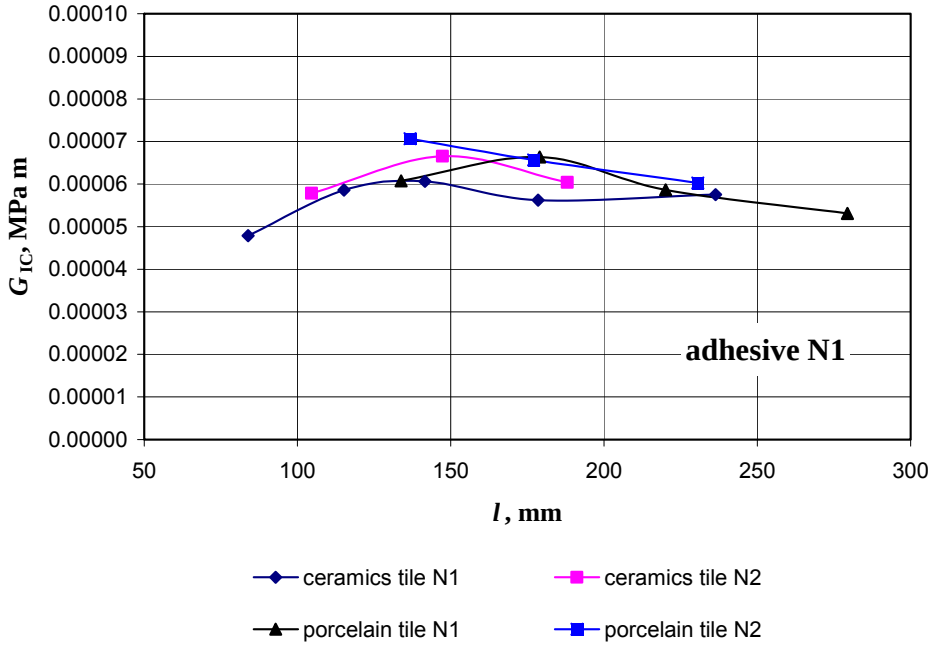




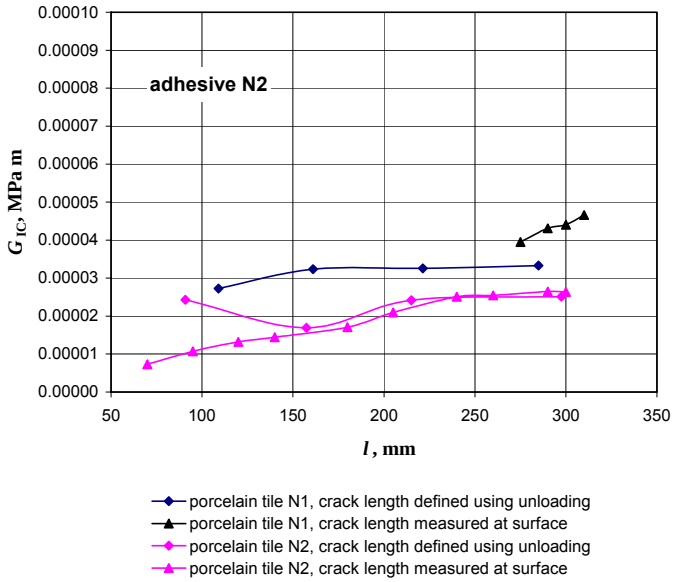
ציור 65. עקומות ההתנגדות של חיבור אריח הפורצלן ע"י דבק מס' 3

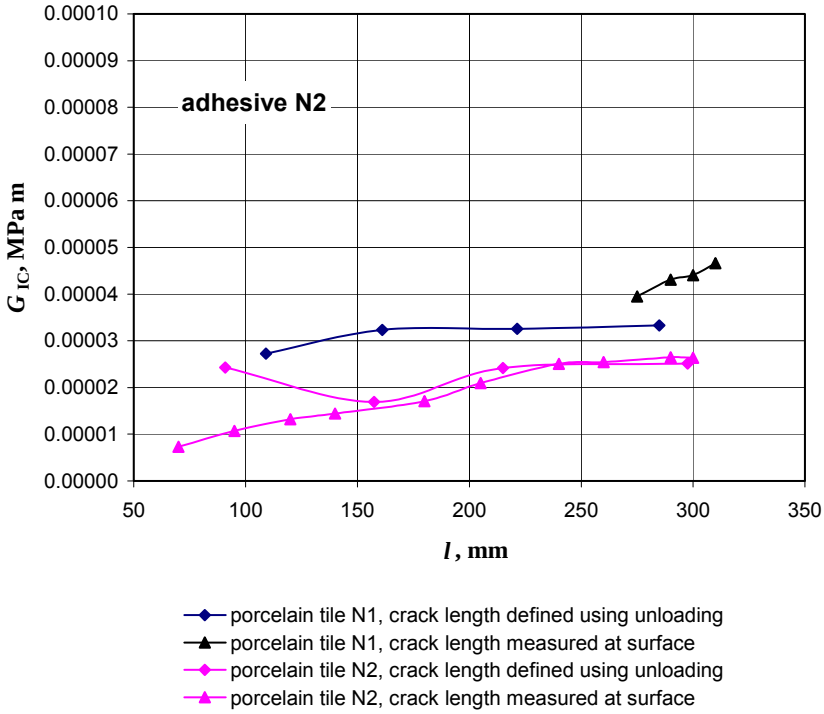


ציור 66. קביעת ערך של *P/a*

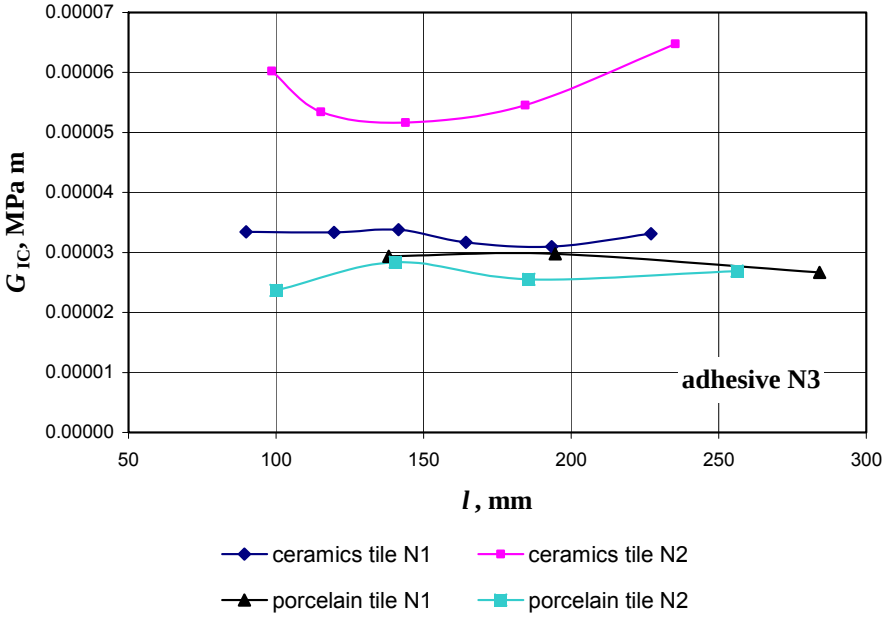


ציור 67 . ערכים של G_{IC} בתלות באורך הסדק עבור דבק מס׳ 1

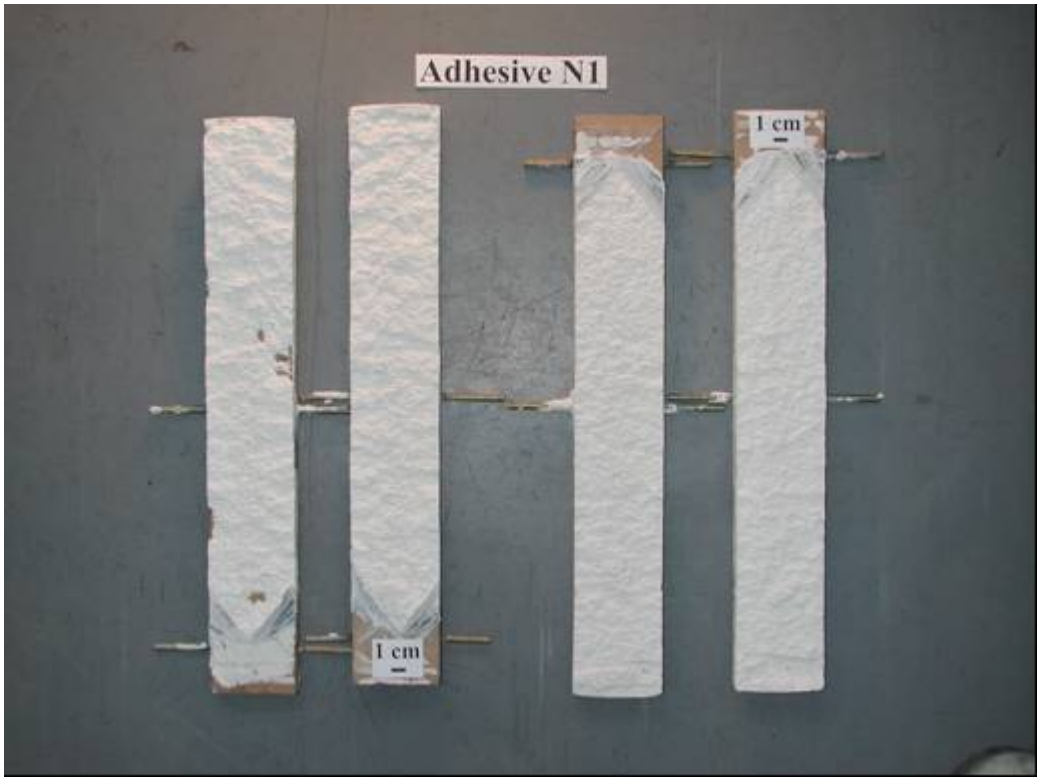


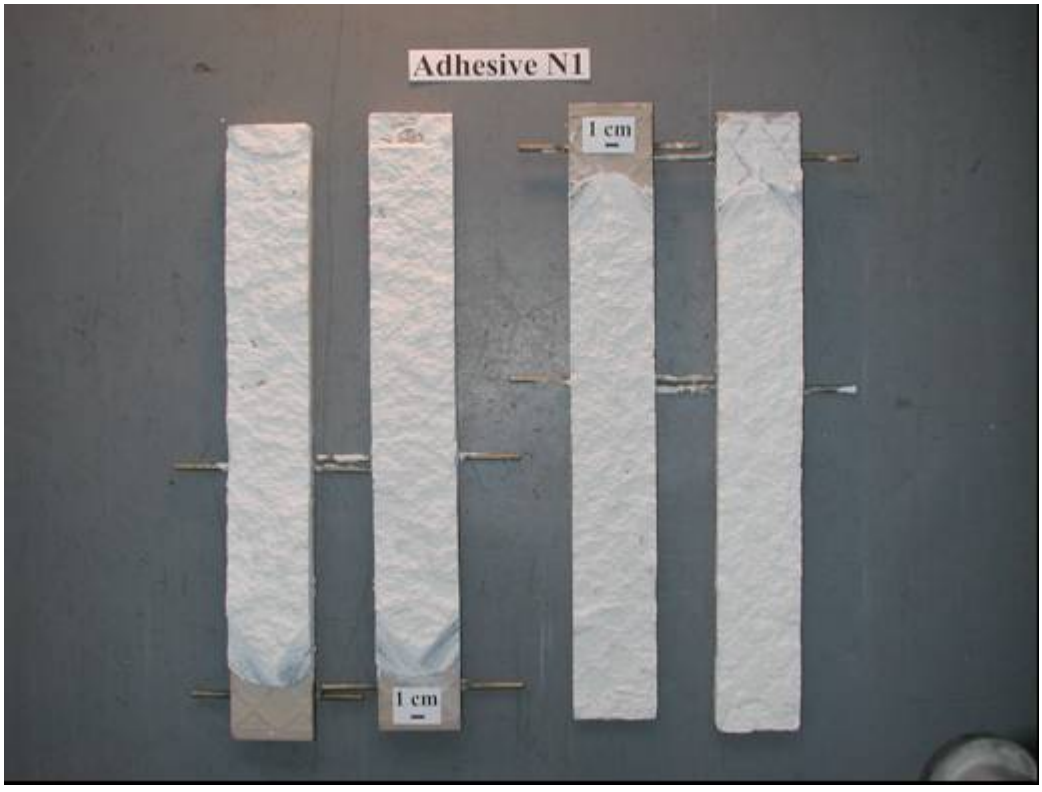


ציור 68. ערכים של G_{IC} בתלות באורך הסדק עבור דבק מס׳ 2 (אריח הקרמיקה למעלה ואריח הפורצלן למטה)

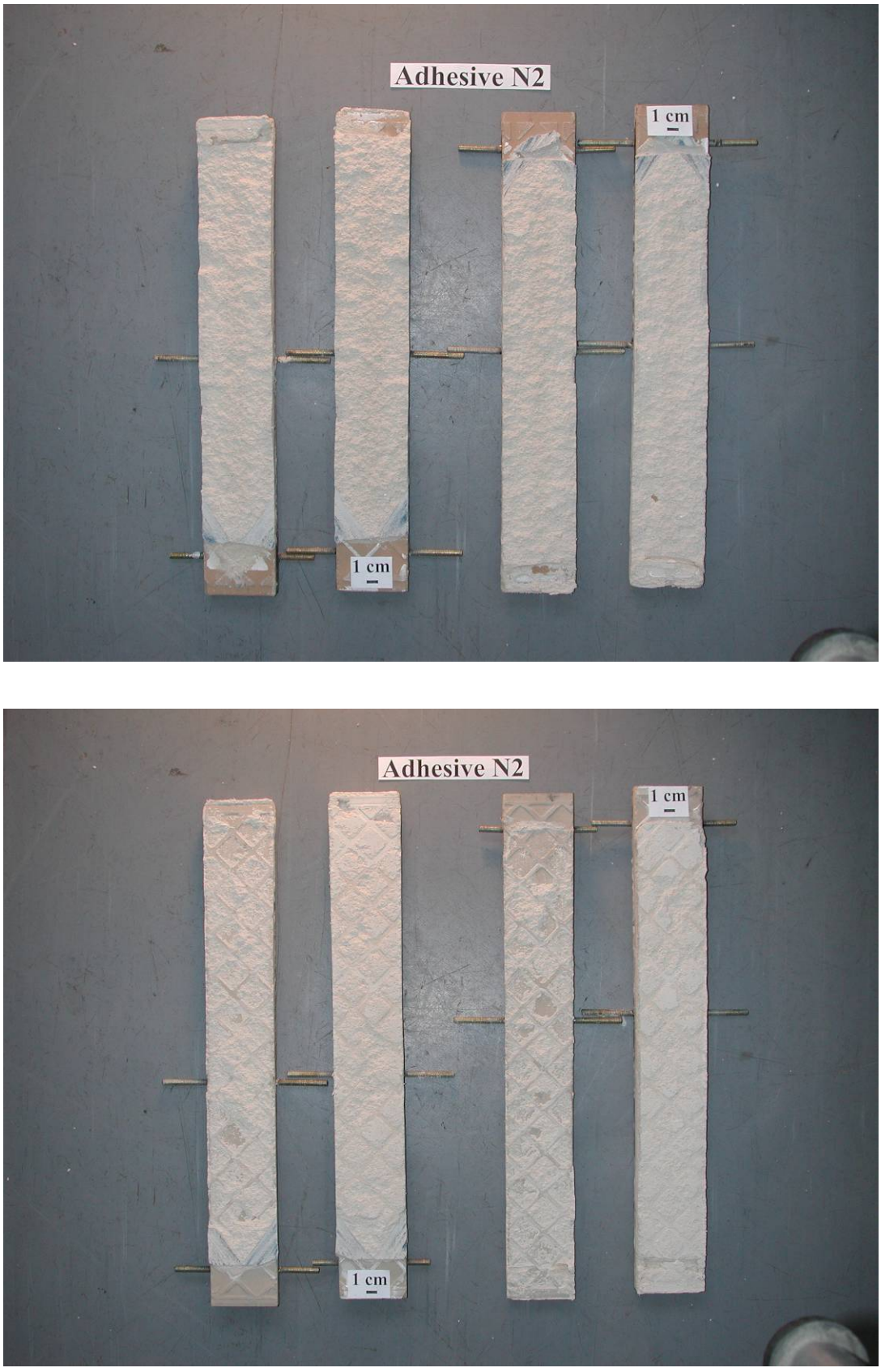


ציור 69. ערכים של G_{IC} בתלות באורך הסדק עבור דבק מס' 3





ציור 70. פנים של הרס החיבור ע״י דבק מס׳1 של אריחים מקרמיקה (למעלה) ומפורצלן (למטה)



ציור 71. פנים של הרס החיבור ע״י דבק מס׳ 2 של אריחים מקרמיקה (למעלה) ומפורצלן (למטה)





ציור72. פנים של הרס החיבור ע״י דבק מס׳ 3 של אריחים מקרמיקה (למעלה) ומפורצלן (למטה)



ציור 73. פרטי מבנה פנים של הרס החיבור של אריחים מקרמיקה

חלק ג'. סיכום ומסקנות

א. למרות שקיימים תקנים ישראלים ובין-לאומיים בנושא חיפוי חוץ מיושמים בהדבקה, אין הם מתייחסים לנושאים חשובים שנידונו בדו"ח זה ואנשי המקצוע מוטרדים מהיעדר מידע יסודי בנוגע להשפעת גורמים טכנולוגיים וסביבתיים שונים על איכות חיבור האריח על מערכות החיפוי הללו.

ב. המחקרים בדבר קביעת סיבות הכשל במערכות חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה החלו באמצע המאה הקודמת. בשנות ה-90 של המאה ה-20 בוצעו המחקרים בעיקר במדינות עם אקלים חם ולח הדומה לאקלים ישראלי [3-11]. גם במדינות אירופה החלו מחקרים בתחום זה [10]. מכאן ניתן להסיק שבעיית הכשלים במערכות חיפוי חוץ המיושמים בהדבקה הינה בעיית כלל עולמית.

ג. ניתן לסווג את כל גורמי הכשל ל-2 קבוצות עיקריות:

- <u>גורמים חיצוניים</u>:
  - גורמי סביבה;
  - השפעת רקע וגורמים מבניים.
- <u>גורמי אנוש פנימיים</u>:
  - תכן תערובות הדבקה וחומרי החיפוי;
  - מלאכת החיפוי;

כדי להבטיח את קיים מערכת החיפוי לטווח ארוך חשוב למזער במידה מירבית את ההשפעה השלילית של הגורמים החיצוניים. כמו כן, חשוב שגורמי אנוש פנימיים יאזנו או אפילו יקזזו את ההשפעה השלילית של הגורמים החיצוניים.

ד. תקן ישראלי ת"י 1555 חלק 1, הכולל קובץ כללי מלאכת החיפוי, קובע את הדרישות לביצוע עבודות חיפוי חוץ בארץ. התקן מפרט את הדרישות לרקע וגורמים מבניים ואל מלאכת החיפוי על מנת למזער את השפעתם השלילית על איכות מערכת החיפוי. בדרישות לאיכות חומרי ההדבקה מסתמך ת"י 1555 על דרישות תקן ישראלי 4004 ועל הצהרות יצרני הדבק. שני התקנים הללו כמעט ולא דנים בהשפעת גורמי הסביבה האופייניים לאקלים ישראלי על טיב של מערכת חיפוי חוץ.

תקן ישראלי ת"י 1555 חלק 1 קובע את כללי ביצוע עבודות חיפוי חוץ לפי גודל אריחי קרמיקה, דהיינו: לאריחים בגודל עד 20*20 ס"מ משמשת הדבקה בשכבת דבק אחת הנמרחת רק על התשתית, בעוד שאריחים יותר גדולים מודבקים בשתי שכבות דבק, המיושמות הן על התשתית והן על האריח.

ה. סקר ספרות בנושא הכשלים בתחום חיפוי חוץ והניסיון המעשי הנצבר בתחום זה בארץ מראים שלגורמי האנוש הפנימיים קיימת השפעה ממדרגה ראשונה על חוזק ההידבקות במערכת חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה. כך, למשל, נקבע שמלאכת החיפוי הלא נכונה תורמת להיווצרות הקרום הפולימרי על פני הדבק צמנטי פולימרי ובכך נפגם החיבור בין האריח לבין הדבק [10]. ב-[5] דווח שהמיומנות הלקויה של ביצוע עבודת החיפוי באמצעות הדבק המתועש במקום מלט צמנטי רגיל עיכבה את משך שלב ההדבקה, וכתוצאה זה גרם לפיזור של כ-50% בתוצאות חוזק ההידבקות, בעוד שבמקרה של שימוש במלט צמנטי רגיל הפיזור היה עד כ-20%.

למרות זאת לא ניתן להסביר כל מקרה כשל רק ע״י השפעת גורמים אלה. תוצאות המחקרים שבוצעו בעבר ודווחו בסקר הספרות של המחקר הנוכחי מראות שחוזק החיבור במערכת החיפוי הוא פונקציה של גיל מערכת החיפוי, הגיאומטריה ושטח החזית, כיוון החזית ותנאי ההצללה. למשל, גיל מערכת החיפוי מעל 20 שנים מעלה את הסתברות של כשל דלמינציה בשיעור של כ-12% בכל 5 שנים. בבניינים עם גיאומטרית קומות יותר פשוטה (4 ו-6 דירות בקומה עם פחות פינות בהיקף) הייתה הסתברות של כשל דלמינציה ב-4% עד 11% יותר קטנה מאשר בבניינים עם גיאומטריה מורכבת (8 דירות בקומה, פינות רבות בהיקף הקומה). ההסתברות של כשל דלמינציה בחזיתות דרום-מערביות היא יותר גדולה מאשר בחזיתות הצפון-מזרחיות. החשיפה המלאה לקרינת שמש בחזית המערבית גורמת לעליית הסתברות כשל הדלמינציה. אביזרי הצללה כמו גגונים מעל מתלי כביסה עשויים להקטין את הסתברות לכשל הדלמינציה ב-10% בהשוואה לחזיתות ללא גגונים [12].

התקנים בנושא חיפויי חוץ מאריחי קרמיקה מגבילים את ביצוע עבודות החיפוי רק במקרים של תנאים קיצוניים של טמפרטורה ולחות יחסית. ידוע, שטמפרטורות הרקע עלולה להגיע ל-66° - 88° צ׳ אפילו בימים בהם הטמפרטורה ולחות האוויר אינן קיצוניות [19]. ההשפעה של ״חום״ הרקע בעת ביצוע מלאכת החיפוי על שינוי תכונות הדבקים ועל חוזק הידבקות האריחים לא נלקחו בחשבון כלל בעבר. טרם הוערכה כלל ההשפעה של קרינת השמש אשר פועלת על הדבק במשך הזמן החופשי שלו על חוזק החיבור במערכת החיפוי מאריחי קרמיקה.

ו. מטרת המחקר הנוכחי הייתה לקבוע את ההשפעה של גורמי הסביבה האופייניים לאקלים ישראלי, סוג האריחים ומאפייני חומרי ההדבקה המתועשים כפי שמוצהרים ע״י היצרן, על חוזק החיבור במערכת חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה המיושמת על גבי רקע הבטון. הגורמים שנבדקו היו, כדלקמן:

- <u>סוג הדבק</u> – נבדקו 3 דבקים מתועשים המיוצרים ע״י יצרנים שונים והנסחרים בארץ;
- <u>סוג אריח</u> – אריחי קרמיקה (ספיגות של 3% (% משקל)) ואריחי פורצלן (ספיגות של כ-0.5%);
- <u>גורמי סביבה</u> – טמפרטורה ולחות של הרקע והאריחים בעת ביצוע מלאכת החיפוי; קרינת UV הישירה על הדבק במשך הזמן החופשי שלו; זמן שמישות הדבק בתנאי סביבה שונים; זמן חופשי של הדבק.

ז. תכונות פיסיקליות ומכאניות של כל שלושת הדבקים שנבדקו השתנו חזק בהשפעת תנאי אקלים חמים וקרינת UV. אי לכך, הצהרות היצרן לגבי תכונות הדבקים, כגון: זמן שמישות לעבודה, זמן חופשי וערך מודול אלסטיות הינם תקפים רק בתנאי מעבדה, ולא משקפים את התנהגות הדבק אשר נמצא תחת השפעת גורמי הסביבה האופייניים לאקלים ישראלי.

ח. נמצאה השפעה שלילית של טמפרטורת סביבה של 30° צ׳ על עבידות דבקים מס׳ 1 ו-2 במשך זמן שמישות הדבק המוצהר ע״י היצרן. שירוע של דבקים מס׳ 1 ו-2 הלך וקטן בעשרות אחוזים כבר אחרי 120 דקות מתום ערבוב הדבק. זאת לעומת הצהרות יצרני הדבק לפיהן הדבקים ניתנים לשימוש עד 3 – 4 שעות מתום ערבוב הדבק בטמפרטורת הסביבה עד 35° צ׳. עבידות של דבק מס׳ 3, בעל שירוע נמוך גם בתנאי הרפרנס כמעט שלא הושפעה במשך כל הבדיקה.

ט. התנהגות מכנית של הדבקים בהשפעת טמפרטורה וקרינת UV לא הייתה אחידה. שני הדבקים, מס׳ 1 ומס׳-3 הראו עלייה של מודול האלסטיות בהשפעת טמפרטורת הסביבה של 30° צ׳, בעוד שמודול אלסטיות של דבק מס׳ 2 ירד בהשפעת הטמפרטורה הנ״ל. לעומת זאת, קרינת UV גרמה לשינוי מודול אלסטיות של דבק מס׳ 3, בלבד.

י. נמצאה קורלציה בעלת מובהקות גבוהה בין שירוע הדבק לבין מודול אלסטיות שלו: ככל ששירוע הדבק הצמנטי הינו יותר גבוה, מודול אלסטיות שלו הינו יותר נמוך, ולהיפך. בדיקת שירוע הדבקים הינה בדיקה פשוטה ומהירה. אי לכך, נראה כי ניתן להיעזר בה לקבלת האינדיקציות המקורבת של טווחי מודול אלסטיות הדבקים.

יא. ידוע שמודול האלסטיות הנמוך של הדבק מבטיח את הקטנת המאמצים הפועלים בחיבור בין האריח לקיר. אבל טרם ידוע כיצד משפיעה הקטנת מודול אלסטיות של הדבק על חוזק החיבור בין האריח לבין הקיר. במחקר הנוכחי נעשה המאמץ לקבוע האם קיימת קורלציה בין מודול אלסטיות של הדבקים לבין מאפייני החיבור במערכות החיפוי שנבדקו, כגון: חוזק ההידבקות, הממוצע והמינימלי, מקדם שוני וסוג הכשל המתרחש בו. נמצא, שלא קיימת קורלציה כזו. הדבר נובע מכך שדוגמאות הבדיקה אשר שימשו בניסויים לקביעת מודול אלסטיות הושפעו רק חלקית ע״י הגורמים הסביבתיים בהשוואה לדוגמאות ששימשו בבדיקת חוזק ההידבקות במשיכה צירית. לא היה ניתן לדמות בבדיקות מודול אלסטיות של הדבקים את ההשפעה הנוספת של חום הרקע והאריחים כפי שהתקיימה בהכנות הדגמים לבדיקות חוזק ההידבקות.

יב. לפי תוצאות הניסויים נקבע שלספיגות האריח קיימת השפעה מובהקת על אופי כשל החיבור ועל חוזק הידבקות האריחים:

- ספיגת מים יותר גבוהה של האריח מאפשרת להקטין את שיעורי דלמינצית הדבק מהאריח. זה כתוצאה מהיווצרות פן הביניים יותר חזק במערכת עם אריחי קרמיקה מאשר במערכת עם אריחי פורצלן. אי לכך, ככל שפן הביניים בין האריח לדבק הינו צפוף יותר, הולך וקטן שיעור דלמינצית הדבק מהאריח.
- ספיגת מים קפילירית יותר גבוהה של אריחי קרמיקה תרמה להיווצרות חיבור יותר צפוף וכתוצאה, יותר חזק במערכת החיפוי עם אריחים אלה.

יג. נמצא שלסוג הדבק קיימת השפעה על מיקום הכשל במערכת החיפוי, דהיינו: בפן הביניים בין אריח לדבק, AF-T, או בדבק עצמו, CF-A. לעומת זאת, מיקום הכשל (סוג הכשל) לא קובע האם חוזק ההידבקות במערכת החיפוי יהיה בטווח המותר ע״י התקנים.

יד. במערכות החיפוי עם שיעור דלמינצית הדבק מהאריח אשר קטן מ-50%, יתקבל חוזק ההידבקות, הממוצע והמינימלי, מעל 0.5 מגפ״ס ומקדם שונות עד 35%. אי לכך, לאבטחת איכות החיבור במערכת החיפוי מאריחים חשוב להשתמש בדבקים אשר מאפשרים לקבל את פן הביניים החזק בין האריח לדבק.

טו. יש מקום לבחון האם להתיר שימוש בדבקים אשר אינם ״נדבקים״ לאריח וגורמים לכך שסוג הכשל העיקרי במערכת החיפוי הוא AF-T (בין הדבק לבין האריח). נושא חיזוק פן הביניים במערכת החיפוי הינו נושא מורכב ומחייב עבודת מחקר מעמיקה ושיטתית אשר תאפשר להציע את הדרכים המעשיות לשיפור ההדבקה בין האריח לדבק.

טז. כדי למנוע את הפגיעה המשמעותית בחוזק ההידבקות במערכת החיפוי מאריחי קרמיקה/פורצלן יש מקום לבחון האם להתיר ביצוע עבודות החיפוי על גבי רקע חם ועם אריחים חמים. ניתן להשיג זה ע״י ביצוע עבודות חיפוי בתקופות יותר קרירות ולא גשומות. כמו כן, מומלץ לבצע הצללת החזיתות לפני ביצוע עבודות החיפוי. יש לאחסן את האריחים לפני ההדבקה במקומות מוצללים. פרקטיקה זו עשויה לתרום רבות לשיפור איכות החיפויים הקשיחים מאריחי קרמיקה בישראל.

יז. יש מקום להמליץ ליצרני הדבקים לבדוק את התאמת חומרי ההדבקה לתנאי סביבה האופייניים לאקלים ישראלי ולהצהיר מהן תכונות חומריהם בתנאי האתר הריאליים ומהו נוהל השימוש בחומרים אלה בתנאים הללו.

יח. קיימת חשיבות רבה של פיתוח דבקים עם פולימרים שלא עוברים פולימריזציה בטווח הטמפרטורות האופייניות לחזיתות הבניינים באקלים ישראלי. כמו כן, נראה סביר לבדוק אפשרות השימוש בפריימרים על גבי אריחי קרמיקה/פורצלן אשר ייעודם הוא שיפור הידבקות האריח אל הדבק. פרקטיקת השימוש בפריימרים משפרי הידבקות נפוצה מאוד בעבודות טיח ובעבודות שיקום בטונים. אך דרושה עבודת מחקר תעשייתי לפיתוח פריימרים המתאימים למערכת אריח קרמיקה-דבק.

יט. במחקר הנוכחי נחשפה לראשונה בעיית האי עמידות בקרינת UV בזמן ביצוע עבודות החיפוי של דבקים צמנטיים פולימריים המשמשים להדבקת חיפוי חוץ בארץ. אי לכך, נראה כי יש מקום לבחון האם להתיר ביצוע עבודות החיפוי בתנאי קרינת שמש ישירה במקרים של השימוש בדבקים הלא עמידים בקרינת UV. נראה שניתן למנוע את השפעת הקרינה על החזית המחופה ועל חומרי החיפוי ע״י ביצוע הצללה מלאכותית במקומות הדבקת האריחים, או לחלופין לבצע את עבודות החיפוי בשעות היממה בהן לא חשופה החזית לקרינת השמש הישירה . כפי שהוסבר לעיל חשוב גם כן שטמפרטורת פני החזית והאריחים תהיה כמה שיותר נמוכה.

כ. יש לציין שצורת הדגמים ששימשו בשלב זה של המחקר הייתה בהתאם לדרישות תקן ישראלי ת״י 1555 המסתמך בנושא איכות הדבק על דרישות תקן ישראלי 4004. הדגמים כללו מרצפת טרצו כחומר רקע שעל גבה יושמה שכבת הדבק בעובי המומלץ ע״י היצרן ונדבקו 5 קטעי אריח קרמיקה/פורצלן בגודל 5x5 ס״מ. להערכת מחברי דו״ח זה צורת הדגמים הנ״ל אינה משקפת את כל המצבים הריאליים בקירות חוץ, דהיינו:

- תנאי הרקע עשויים להיות שונים מאלה המתקבלים במרצפת טרצו. השינוי מתבטא בחומר (בטון יצוק או בלוקים למיניהם ולאו, דווקא, בטון יבש דחוס שבמרצפת טרצו), בעובי (20 ס״מ ולא 3 ס״מ שבמרצפת טרצו), וכתוצאה מכך שונה משטר הטמפרטורות בפועל בקיר בעת ביצוע עבודות החיפוי בהשוואה למדגמים שנבדקו במסגרת המחקר הנוכחי. מרצפות טרצו אשר שימשו במחקר הנוכחי איפשרו להשיג חלוקת טמפרטורות אחידה לעובי ובפני השטח;
- חומר הרקע עשוי להשפיע באופן ניכר על טמפרטורת פני השטח המיועדים להדבקה. לכן חוזק הידבקות האריחים בקיר עשוי להיות שונה בתלות בסוג חומר רקע ותכונותיו. מהניסיון המצטבר של הכשלים בחיפוי חוץ ידוע שבקירות העשויים מחומרי רקע שונים קיימים שיעורים שונים של כשלים בחיפוי מאריחי קרמיקה;

כא. המלצות להמשך המחקר (בנוסף לסוגיות שהובאו לעיל): בשלב א' של המחקר נבדקו הדגמים בניסויים מיוחדים לשם קביעת הערך של עבודת ההרס במתיחה שמצביעים על התנגדות הדבק להתפתחות הסדק בו. ערך עבודת ההרס משמש בחישובי התפתחות הסדקים בחיבור האריח תחת פעולות משקל עצמי של אריח, רוח, שינוי טמפרטורת האריח ועוד. תוצאות חישובים הללו מאפשרים להעריך את חוזק החיבור של האריח לרקע. האינדיקציות שהתקבלו בשלב א' של המחקר לגבי השינויים הניכרים בחוזק החיבור בתלות בתנאים טכנולוגיים ותנאי הסביבה הנ"ל, גרמו לכך שהניסויים לקביעת עבודת ההרס נערכו בתנאי מעבדה בלבד. שיטת ההדבקה בשתי שכבות הדבק וחומרי הרקע האחרים מחייבים התמקדות בזיהוי ההשפעות של גורמים טכנולוגיים ותנאי סביבה על חוזק החיבור ועבודת ההרס במערכת חיפוי חוץ מאריחי קרמיקה.

בשלב א' של המחקר נבדקו המדגמים אשר התקבלו בשיטת ההדבקה בשכבה אחת אשר משמשת בעבודות החיפוי עם האריחים בגודל עד 20*20 ס"מ. נמצא ששיטת ההדבקה בשכבה אחת של הדבקים המסחריים המקובלים בארץ, מתאימה לביצוע חיפוי חוץ בתנאי האקלים הישראלי רק בתנאי של התקנת אמצעי ההצללה במקומות ביצוע מלאכת החיפוי. בהמשך המחקר חשוב לבדוק האם ההדבקה בשתי שכבות מאפשרת לקבל את חיפוי החוץ החזק והבטיחותי בתנאי האקלים הישראלי.

<u>חשוב להדגיש שזהו השלב הראשון של המחקר בכוון זה, אשר נועד לקבל אינדיקציות לגבי הגורמים הטכנולוגיים שמשפיעים על חוזק החיבור של אריחי קרמיקה במערכת חיפוי חוץ ולהתוות כוונים להמשך בדיקות ומחקר. אין לראות בממצאים ראשוניים שהתקבלו במסגרת שלב המחקר הנוכחי אלא תוספת לידע הקיים ובסיס למיקוד תשומת הלב להמשך חקירה לפני יישום כלשהו.</u>

מראי מקום

1. תקן ישראלי ת"י 1555 חלק 1 (1998): מערכת פסיפס ואריחי קרמיקה לריצוף ולחיפוי חוץ בבניינים: חיפוי חוץ. מכון התקנים, דצמבר 1998 (תקן ברוויזיה)
2. תקו ישראלי ת"י 4004 חלק 1 (2002): דבקים לאריחים: הגדרות ודרישות. מכון התקנים, יוני 2002
3. Guan, W.L., Alum, J., Liu, Z.J., Yang, T. "Performance of external tiled-wall systems under tropical weathering", *J. Perf. Constr. Fac.,* ASCE, 11(1), February 1997, pp. 24-34
4. Lomas, D. "External wall tiling defects in Hong Kong buildings: three defects diagnosis options examined", *Structural Survey*, V. 15, No. 1, 1997, pp. 39-41
5. Guan, W.L., Alum, J., Zhao, Z.Y., Zhang, W.L., Liu, Z.J. "Impact of workmanship on performance of tiled-wall systems", *J. Perf. Constr. Fac.,* ASCE, V. 11, No. 2, May 1997, pp. 82-89
6. Davies, H. "Repair methods for tile-clad buildings in Hong Kong", *Structural Survey*, V. 16, No. 1, 1998, pp. 34-38
7. Chew, M.Y.L. "Adhesion of tiles for external cladding", *Structural Survey*, V. 17, No. 1, 1999, pp. 12-17
8. Chew, M.Y.L. "Factors affecting ceramic tile adhesion for external cladding", *Construction and Building Materials*, V. 13, 1999, pp. 293 – 296
9. Ho, D.C.W., Lo, S.M., Yiu, C.Y. "The causes of external wal tiling defects in Hong Kong", *Structural Survey*, V. 23, No. 5, 2005, pp. 386 – 402
10. Jenni, A., Holzer, L., Zubriggen, R., Herwegh, M. "Influence of polymers on microstructure and adhesive strength of cementitious tile adhesive mortars", *Cement and Concrete Research*, V. 35, 2005, pp. 35-50
11. Vaz Sá, A., de Freitas, VP. "Influence of Hydrothermal Action on the Durability of Cementitious Adhesives", Proceedings of the 7th symposium on Building Physics in the Nordic Countries, June 13-15th, 2005, Reykjavhk. *Availabvle on-line:* www.byv.kth.se/avd/byte/reykjavik/ . *Accessed 24/7/2007*
12. Yiu, C.Y., Lo, S.M. "Failure probability of external wall tiling systems. An empirical study of weathering impacts", *Structural Survey*, V. 24, No. 5, 2006, pp. 397 – 404
13. Yiu, C.Y., Ho, D.C.W., Lo, S.M. "Weathering effects on external wall tiling systems", *Construction and Building Materials*, V. 21, 2007, pp. 594 – 600
14. American National Standard Institute (ANSI). "Installation of ceramic tile with dry-set portland cement mortar or latex-portland cement mortar", *ANSI A108.5 – 1999*. Tile Council of America Inc., Princeton, N.J.

15. American National Standard Institute (ANSI). "American national standard specifications for latex-portland cement mortar", *ANSI A-118.4* - 1999. Tile Council of America Inc., Princeton, N.J.

16. *Global Solar UV Index: A Practical Guide. A joint recommendation of the World Health Organization, World Meteorological Organization, United Nations Environment Programme and the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.* World Health Organization 2002, Available at http://www.who.int/uv/

17. ASTM Standards: "Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials", *ASTM G 154* – June 2006, ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700.

18. ר. ווסרמן, א. בנטור, "קיים בטונים יצוקים ביבש", הטכניון, יוני 2005

19. Stephenson, D.G. Extreme temperatures at the outer surfaces of buildings. National Research Council, CBD-47, Canada, Originally published November 1963. *Available on-line http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/cbd/cbd047-print_e.html . Accessed 19/12/2007*

20. ו.יאגוסט, ד. ינקלבסקי. "חוזק החיבור של ציפוי קיר – שלב א'". דו"ח מחקר. הטכניון. חיפה. 1998.

21. תקן ישראלי ת"י 6 – "אריחי רצפה מטרצו". אפריל 1999.

22. DIN 50008 Teil 1 "Konstantklimate über waßrigen Lösungen. Gesätige Salzlösungen – Glycerinlösungen", 1981

23. תקן ישראלי ת"י 314 – "אריחי קרמיקה לחיפוי קירות ולריצוף". יוני 2004.

24. EN 772-11, Methods of test for masonry units - Part 11: Determination of water absorption of aggregate concrete, autoclaved aerated concrete, manufactured stone and natural stone masonry units due to capillary action and the initial rate of water absorption of clay masonry units (includes amendment A1:2004), 2004

25. תקן ישראלי 1920 חלק 1 – "טיח: דרישות כלליות ושיטות בדיקה במעבדה של מלט לטיח". יולי 1997

26. DIN 52615 "Wärmeschutztechnische Prüfungen; Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen"

27. BS 6319-3 "Testing of resin and polymer/cement compositions for use in construction. Methods for measurement of modulus of elasticity in flexure and flexural strength", 1990

28. Russ, J. C., The Image Processing Handbook, Fourth Edition, © 2002 by CRC Press LLC

29. Wasserman, I., Bentur, A., "Interfacial Interactions in Lightweight Aggregate Concretes and their Influence on the Concrete Strength", *Cement and Concrete Research*, Vol.18, pp. 67 – 75, 1996

30. Weidenhammer, P., Jacobasch, H.-J., Investigation of Adhesion Properties of Polymer Materials by Atomic Force Microscopy and Zeta Potential Measurements, *Journal of Colloid and Interface Science*, V. 180, No. 1, 1996, pp. 232-236

31. Jesionowski, T., Influence of aminosilane surface modification and dyes adsorption on zeta potential of spherical silica particles formed in emulsion system, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, V. 222, No. 1-3, 2003, pp. 87-94

32. Kong, H. J., Bike, S. G., Li, V.C., Electrosteric stabilization of concentrated cement suspensions imparted by a strong anionic polyelectrolyte and a non-ionic polymer, *Cement and Concrete Research*, V. 36, No 5, 2006, pp. 842-850

33. ו.יאגוסט, ד. ינקלבסקי. "חוזק החיבור של ציפוי קיר – שלב ב'". דו"ח מחקר. הטכניון. חיפה. 2001.

34. Yagust V.I., Resistance to development of crack in concrete structures taking into account the influence of material macrostructure, D. Sc. Thesis, NIIZhB, Moscow, 1982 (*in Russian*).

35. Yagust, V.I., Yankelevsky, D.Z., Strength design guidelines for fastenings in concrete – Revisited, *Materials and Structures*, Vol. 37, November 2004, pp.570-574.

Abstract

Ceramic tiles fixed by adhesives are a most popular cladding system in Israel. SI 1555 (1) regulates the structures of ceramic tiles cladding system. It is a triple layered structure consisted of a tile layer (an external layer), an adhesive layer which might be a leveling layer, too, and a substrate.

Regulating of cladding process and a quality of cladding systems are very descriptive in Israel, however, the cases of faults are numerous. Perhaps, the main reason is an insufficient attitude of the relevant standards to the technological and environmental impacts, e.g.: the effect of the substrate's and tiles' temperature; the direct solar radiation; adhesive in-situ using time; etc. Therefore, studying the effect of those factors on bond strength between the tile and the substrate is important for revealing the main factors affecting the bond performance.

An objective of the current research was: investigating the effects of the typical environmental factors in Israel; the type of ceramic tiles and the characteristics of commercial adhesives warranted by manufacturers, on the bond strength in the external cladding made of ceramic tiles adhered to the concrete substrate.

The investigated factors were, as following:

- type of adhesive – three commercial adhesives produced by Israel manufacturers;
- type of ceramic tiles – the ceramic tiles with water absorption of ~ 3% (% of weight) and the porcelain tiles with negligible water absorption up to 0.5%;
- environmental factors – temperature and moisture of substrate and tiles during carrying out cladding works; effect of UV radiation on the adhesive within its open time; the useful time of adhesives in the different climatic conditions; the open time of adhesives.

The results of the current research have obviously revealed that:

- There are commercial adhesives which have a poor adhesion to the tiles. Therefore, a main failure type in cladding carried out with these adhesives is in the contact zone between the adhesive and the tile. Strengthening the contact zone between the adhesive and the tile is a complex task. Therefore, the comprehensive and systematic research is essential to propose the ways for strengthening the bond between the tiles and the adhesive;

- Implementing the hot ceramic & porcelain tiles on the hot substrate should be thoroughly examined in order to prevent the substantial damage of the bond strength in the external cladding;
- The instability of cement-polymer adhesives upon the exposure to the UV radiation during the open time has been revealed for the first time. Therefore, the cladding craft in the conditions of the direct solar radiation should be prevented if the adhesive used for cladding is unstable to exposure to the UV radiation.

Founded by מיסודם של

MINISTRY OF CONSTRUCTION AND HOUSING משרד הבינוי והשיכון

TECHNION ISRAEL INSTITUTE OF TECHNOLOGY הטכניון –מכון טכנולוגי לישראל

Faculty of Civil & Environmental Engineering הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

NATIONAL BUILDING RESEARCH INSTITUTE

המכון הלאומי לחקר הבנייה

7900202

The technological factors affecting the bond strength of the hard external cladding in view of fracture mechanics
Phase I: The bond strength of cladding made of the ceramic tiles adhered to the concrete wall

Dr. Irina Wasserman **Dr. Yagust Vladimir**

Copyright © 2007 by R. Wasserman V. Yagust and, the Ministry of Construction and Housing and the Technion Research and Development Foundation, Ltd, Haifa

Haifa July 2008

המכון לאומי לחקר הבנייה
קרית הטכניון, חיפה 3200003
טל. 04-8292242/3
nbri@tx.technion.ac.il

