



מיסודם של
משרד הבינוי

הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

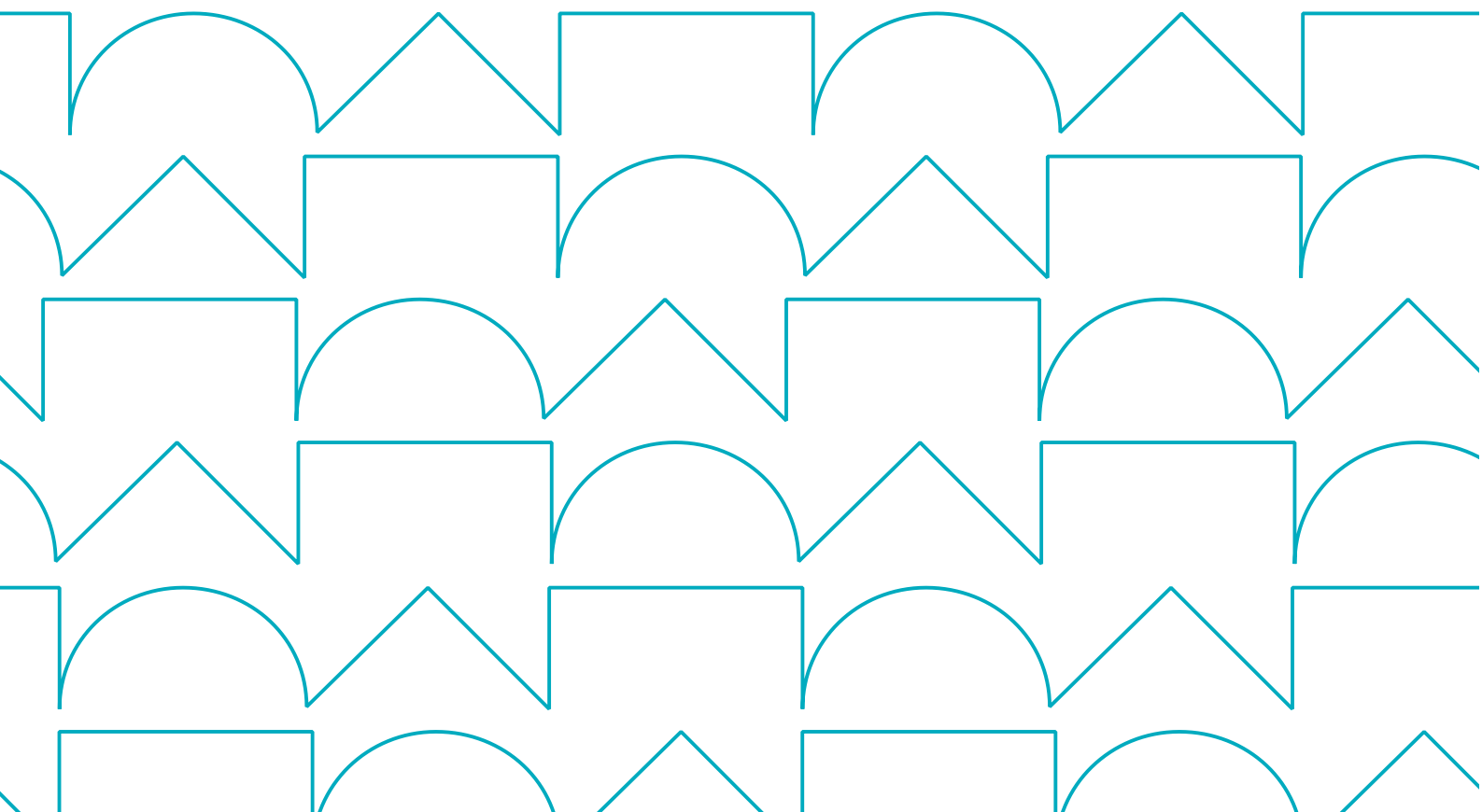
המכון הלאומי לחקר הבנייה

National Building Research Institute



בטון בעל תכונות מעולות (UHPC) - שילוב אגרגט גס וסוגי סיבים שונים והשפעתם על תכונות הבטון הקשוי והטרי

ד"ר גלית אגרנטי פרופ"ח אמנון כץ





Founded By
Ministry of Construction and Housing
Technion-Israel Institute of Technology
Faculty of Civil & Environmental Engineering

מיסודם של
משרד הבינוי והשיכון

הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

המכון הלאומי לחקר הבנייה
National Building Research Institute



2022398

בטון בעל תכונות מעולות (UHPC) - שילוב אגרגט גס וסוגי סיבים שונים והשפעתם על תכונות הבטון הקשוי והטרי

ד"ר גלית אגראנטי פרופ"ח אמנון כץ

מלווי מחקר : אינג' ליאו רובינס אינג' יוסי סיקולר אינג' אריה בלפרמן אינג' נחמיה מסורי

בהזמנת משרד הבינוי והשיכון
הזמנה מס' 4500938257

Copyright © 2018 by G. Agranati, A. Katz,
The Israel Ministry of Construction and Housing and the Technion Research and
Development Foundation Limited, Haifa

מרץ 2018

ח י פ ה

שבט תשע"ח

המכון הלאומי לחקר הבנייה, קריית הטכניון, חיפה 3200003, Israel | National Building Research Institute, Technion City, Haifa 3200003, Israel
e-mail: nbri@tx.technion.ac.il | טל. 972-4-8292242/3 | פקס. 972-4-8324534
<http://nbri.net.technion.ac.il>

"למען הסר ספק מודגש בזאת כי החוקר/ים, מוסד הטכניון למחקר ופיתוח בע"מ והטכניון – מכון טכנולוגי 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 ו/או לצד ג' כלשהו, עקב המחקר ו/או דו"ח זה או בהקשר אל מי מהם כמו גם בקשר ליישום האמור בו. מבלי לגרוע מן האמור לעיל, מובהר בזאת כי יישום תוצאות המחקר יהיה באחריותו הבלעדית של המיישם".

תקציר

מחקרים קודמים הראו פוטנציאל לייצור בטון בחוזק גבוה במיוחד גם עם אגרגט גדול יחסית (עדש – 14~מ"מ) תוך שמירה על יכולת ערבול טובה והשגת חוזק גבוה. בנוסף, נמצא באותם מחקרים כי ניתן להשתמש בכמות גדולה יחסית של סיבי פלדה קצרים אך גם בסיבים ארוכים, כאשר לכל אחד מהם תרומה בתחומים אחרים של התנהגות הבטון במתיחה בכפיפה.

המחקר הנוכחי התמקד לפיכך בשני פרמטרים חשובים אלה בבטון בעל חוזק גבוה במיוחד (120-150 מגפ"ס):

- השפעת שילוב סיבים בגדלים שונים
- השפעת גודל האגרגט הגדול בתערובת

שלושה סוגי סיבים נבדקו במחקר:

- סיבים קצרים בקוטר 0.4 מ"מ ואורך 12 מ"מ
- סיבים בקוטר 0.62 מ"מ ואורך 30 מ"מ עם עיגון בודד בקצה (3D)
- סיבים בקוטר 0.9 מ"מ ואורך 60 מ"מ עם עיגון כפול בקצה (5D)

תערובות הבטון הוכנו עם סוג אחד של סיבים (150 ק"ג/מ"ק לקצרים ו- 50 ק"ג/מ"ק לשני הארוכים) או שילוב סיבים קצרים (100 ק"ג/מ"ק) עם אחד מהסיבים הארוכים (50 ק"ג/מ"ק).

שלושה גדלים מכסימליים של אגרגטים נבדקו במחקר:

- עדש (14 מ"מ)
- שומשום (9.5 מ"מ)
- חול (0.6 מ"מ)

לצורך השוואה הוכנו גם תערובות זהות אך בחוזק בינוני של בטון (70~ מגפ"ס)

השפעת גודל האגרגט: בכל התערובות שהוכנו בחוזק גבוה נמצא כי אלה שהוכנו עם אגרגט חול בלבד התנהגו באופן הפחות טוב מכל האחרות, זאת בניגוד לסברה כי בטון טוב בחוזק גבוה ניתן להכין עם אגרגט קטן בלבד. תופעה זו נראתה בבדיקות חוזק לחיצה ואופן בולט יותר בבדיקות חוזק מתיחה בכפיפה. במהלך הכנת התערובות נראה היה כי לכידות התערובות אינה אופטימלית דבר שעלול היה להביא לכליאת אוויר מוגברת ופיזור לא אחיד של הסיבים. בכל מקרה, התוצאות הנמוכות יחסית התקבלו גם בתערובות שהיו בעלי לכידות טובה יותר כך שנראה שתופעה זו מאפיינת את התערובות הללו.

בבטון בחוזק בינוני, ההתנהגות בכפיפה של כל התערובות נראתה ללא עדיפות מיוחדת לסוג הסיבים או שילובים שונים שלהם פרט לתערובת עם הסיבים באורך 60 מ"מ (5D) בהם נראתה משיכות מוגברת לתערובת עם אגרגט עדש. בבטון בחוזק גבוה, לעומת זאת, נראתה ברוב המקרים עדיפות לתערובות עם אגרגט מרבי בגודל שומשום. התערובות עם אגרגט מרבי בגודל חול היו הנחותות ביותר יחסית לאלו עם האגרגטים הגדולים יותר.

השפעת סוג ושילוב הסיבים : בכל התערובות, ההתנהגות הטובה ביותר נראתה בשימוש בסיבים ארוכים עם עיגון כפול (60 מ"מ 5D) בשילוב סיבים קצרים. לעומת זאת, השימוש בסיבים קצרים בלבד או סיבים באורך בינוני (30 מ"מ 3D) בלבד הביא לתוצאות הנחותות ביותר עבור כל סוגי התערובות. התערובות שהכילו סיבים ארוכים (60 מ"מ 5D) הראו תכונות טובות בכפיפה, בעיקר כאשר הם שולבו עם הסיבים הקצרים. הוספת הסיבים הקצרים הקטינה את ירידת החוזק לאחר פתיחת הסדק הראשון וטרם העלייה בתסבולת בגלל יכולת הנשיאה של הסיבים הארוכים. בנוסף, תופעה זו גרמה גם לספיגת אנרגיה מרובה בתחום כפף זה. גם בתערובות עם הסיבים באורך 30 מ"מ (3D) נראה שיפור משמעותי ביכולת נשיאת עומסים בתחום שלאחר התפתחות הסדק הראשון, אם כי לא באותו שיעור כמו בסיבים הארוכים יותר.

נראה כי לעיגון הסיבים יש תרומה משמעותית ביכולת נשיאת העומסים בכפיפה לאחר התפתחות הסדק הראשון. הכיפוף הכפול בקצות הסיבים הארוכים מספק עיגון משמעותי לסיבים הארוכים כך שהם מצליחים ליצור מנגנון נשיאת עומס משמעותי כאשר הסדק נפתח. הסיבים הקצרים שמשולבים איתם מצליחים למתן את השינויים המשמעותיים הנוצרים כאשר סיב בודד ניתק ממקומו ובכך מסייעים בספיגת האנרגיה. בנוסף, ייתכן והאגרגטים יוצרים מנגנון דומה למנגנון שליפה על גבי סרן (pulley) המוסיף חיכוך לסיבים הנטויים ביחס למישור הסדק, היוצר בכך תוספת לכוחות העיגון. כאמור, זו השערה בלבד והיא זקוקה לתמיכה נוספת.

מחקר זה בוצע עם כמויות סיבים נתונות : 2% ~ מנפח הבטון (150 ק"ג/מ"ק) או 0.63% נפחי כשנעשה שימוש בסיבים ארוכים בלבד (50 ק"ג/מ"ק). יעילותן של המערכות המשולבות משני גדלי סיבים ברורה אך נראה כי יש מקום לאופטימיזציה אשר תפחית את הכמות הכוללת של הסיבים ותהפוך את המערכת ליעילה יותר בתכולות סיבים נמוכות יותר.

תוכן עניינים

Contents

1	מבוא	1
8	מטרות המחקר	2
9	עבודה ניסיונית	3
10	הרכב התערובות	3.1
12	חומרים	3.2
12	צמנט	3.2.1
13	מיקרו-סיליקה	3.2.2
13	מוספים מפחיתי מים	3.2.3
14	חול	3.2.4
14	אגרגט גס	3.2.5
14	דירוג של המרכיבים היבשים	3.2.6
16	סיבים	3.2.7
18	שיטות בדיקה וציוד	3.3
18	סדר ערבוב של התערובת	3.3.1
19	הכנת הדוגמאות ותהליך האשפחה לבדיקות חוזק	3.3.2
19	בדיקת חוזק כפיפה	3.3.3
21	חוזק מתיחה לא ישירה (בבקיעה)	3.3.4
22	בדיקת תכולת האוויר	3.3.5
23	בדיקה של שקיעה ושירוע הבטון	3.3.6
25	תוצאות	4
25	הרכב תערובות הבסיס ללא סיבים	4.1
26	הרכב תערובות הבסיס עבור תערובות עם חוזק בינוני	4.2
29	הרכב תערובות הבסיס עבור תערובות עם חוזק גבוה	4.3
29	תוצאות בדיקות תערובות בטון עם חוזק בינוני	4.4
32	תערובות עם חוזק בינוני : חוזק לחיצה	4.4.1
33	תערובות עם חוזק בינוני : חוזק בכפיפה ובקיעה	4.4.2

4.4.3	השקיעה כפונקציה של מאמץ הכפיפה	34
4.4.4	חוזק בינוני : תערובות רק עם סיבים קצרים (M1, M6, M11)	36
4.4.5	חוזק בינוני : תערובות עם סיבים ארוכים של 60 מ"מ 5D (M2, M7, M12)	39
4.4.6	חוזק בינוני : תערובות עם סיבים ארוכים של 30 מ"מ 3D (M3,M8,M13)	43
4.4.7	חוזק בינוני : תערובות עם סיבים ארוכים של 30 מ"מ וסיבים קצרים (M4,M9,M14) ...	47
4.4.8	חוזק בינוני : תערובות עם סיבים ארוכים של 60 מ"מ וסיבים קצרים (M5, M10, M15)	51
4.5	תוצאות עבור תערובות בטון עם חוזק גבוה	55
4.5.1	תערובות עם חוזק גבוה : חוזק לחיצה	58
4.5.2	תערובות עם חוזק גבוה : חוזק בכפיפה ובקיעה	60
4.5.3	השקיעה כפונקציה של מאמץ הכפיפה – תערובות עם חוזק גבוה	61
4.5.4	חוזק גבוה : תערובות רק עם סיבים קצרים (H1, H6, H11)	63
4.5.5	חוזק גבוה : תערובות עם סיבים ארוכים של 60 מ"מ (H2, H7, H12)	67
4.5.6	חוזק גבוה : תערובות עם סיבים ארוכים של 30 מ"מ (H3, H8, H13)	71
4.5.7	חוזק גבוה : תערובות עם סיבים ארוכים של 30 מ"מ וסיבים קצרים (H4, H9, H14)	75
4.5.8	חוזק גבוה : תערובות עם סיבים ארוכים של 60 מ"מ וסיבים קצרים (H5, H10, H15) ..	79
5	דיון	84
5.1	השפעת הסיבים השונים בתערובות עם חוזק בינוני (70~ מגפ"ס) וסוג אגרגט קבוע	84
5.2	השפעת הסיבים השונים בתערובות עם חוזק גבוה מאוד וסוג אגרגט קבוע	86
5.3	השפעת סוג האגרגט על תערובות סיבים נתונה בתערובות עם חוזק בינוני של 70~ מגפ"ס ..	89
5.4	השפעת סוג האגרגט על תערובות סיבים נתונה בתערובות עם חוזק גבוה מאוד	93
6	סיכום ומסקנות	97
7	רשימת ספרות :	99

הקדמה

מטרת המחקר הינה לזהות את ההבדלים, אם קיימים, ביחס להשפעת הסיבים והאגרגטים הגסים על בטון בחוזק בינוני ובטון עם חוזק גבוה.

מתודולוגית המחקר היא שילוב אגרגטים גסים ומספר סוגים של סיבי פלדה בתערובות של בטון תכונות מעולות (UHPC) ובדיקת תכונות הבטון הטרי הקשוי של התערובת השונות. לצורך השוואה, המחקר מתמקד בתערובות משתי דרגות חוזק של 150 ו-70 מגפ"ס כדי להשוות בטון מעולה עם אלו של בטון חזק רגיל המקובל כיום. תכונות הבטון הקשוי שנבדקו היו: חוזק לחיצה, חוזק מתיחה בבקיעה, חוזק מתיחה בכפיפה, ועקומת מאמץ כנגד שקיעה. אופיינה ההשפעה המשולבת של הסיבים והאגרגטים הגסים על תכונות הבטון.

ניתוח התוצאות מאפשר להגדיר את השפעת תכולת וגודל האגרגט הגס על תכונות הבטון הקשוי, והאם ההשפעה היא דומה בין בטון בחוזק של 70 מגפ"ס ובבטון בחוזק של 150 מגפ"ס. בדומה, השפעת הסיבים תלויה באופן ישיר באורך הסיב ולכן אפשר להעריך השפעה זאת בתערובת עם אגרגטים גסים וללא אגרגטים אלה, ואת ההשפעה של שילוב סיבים על המערכת.

1. מבוא

בטון בעל תכונות מעולות (UHPC) הוא חומר בעל חוזק גבוה שמאופיין במערכת גרנולרית צפופה במיוחד. בטון זה פותח בצרפת בשנות ה-90 (ומתבסס של פיתוח קודם בדנמרק), והוא מורכב מצמנט פורטלנד, מיקרו-סיליקה, חול סיליקטי, מפחיתי מים על פלסטיים, מים וסיבי פלדה או סיבים אורגניים. לחומר זה יש חוזק לחיצה העולה על 150 מגפ"ס ויכול להגיע עד 270 מגפ"ס וחוזק כפיפה עם ערכים עד 50 מגפ"ס. הוא בעל ביצועים מכאניים גבוהים מאוד ועמידות מעולה בהשוואה לבטון רגיל ולבטון בעל חוזק גבוה. בטון זה כמעט תמיד כולל סיבים ביישומים מבניים ושיטות האשפפה כוללות לעיתים טיפול בחום ואדים [FHWA,2011].

בהשוואה עם בטון רגיל השימוש בתכולה גבוהה במיוחד של סיבי פלדה ב-UHPC מקנה לחומר יותר משיכות ויכולת דפורמציה משופרת וגם סיבולת גבוהה יותר למתיחה וכפיפה. מאפייני הקיים המעולים נובעים מהמבנה הנקבובי הצפוף שגורם לחומר להיות כמעט בלתי חדיר. בטון זה עמיד מאוד לגזים, חדירה של כלורידים וסולפטים, והוא עמיד מאוד בפני התקפות חומצה. בנוסף, ל-UHPC יש הצטמקות וזחילה נמוכים מאוד ולכן הוא מתאים בבטון דרוך [אגרנטי&כץ 2013].

ההבדלים העיקריים בין בטון בעל תכונות מעולות לבין בטון חזק "רגיל" הם שחוזק הלחיצה שלו גבוה מ-150 מגפ"ס, נעשה בו שימוש שיטתי בסיבים, יחס מים/מקשרים מאוד נמוך, והוא לא מכיל אגרגטים גסים.

אפשר ליצר בטון בעל תכונות מעולות מתערובות מוכנות הכוללות את כול החומרים היבשים ומסופקת על ידי יצרנים מסחריים או ליצר אותו מרכיבים נפרדים, באותו אופן כמו תערובות של בטון חזק. כמה מוצרים מסחריים זמינים כוללים את המותג $\text{ductal}^{\circledR}$ אשר פותח על ידי Bouygues בשותפות עם Lafarge ו-Rhodia תחת השם הגנרי של powder reactive concrete. עוד מוצר מסחרי פותח על ידי CRC Technologies, ונקרא Compacted Reinforced Concrete. מוצר שלישי שפותח על ידי Sika ו-Eiffage Gr נקרא BSI $^{\circledR}$.

חסרונם של מוצרים אלה הוא עלותם הגבוהה, והעובדה שאי אפשר לשנות ולשפר את התערובות. אופציה השנייה היא לייצר את התערובת ממרכיבים נפרדים, כפי שיעשה במחקר זה. חלופה זו זולה יותר ומאפשרת התאמת התערובות למגוון רחב יותר של יישומים וחומרי גלם מקומיים זמינים.

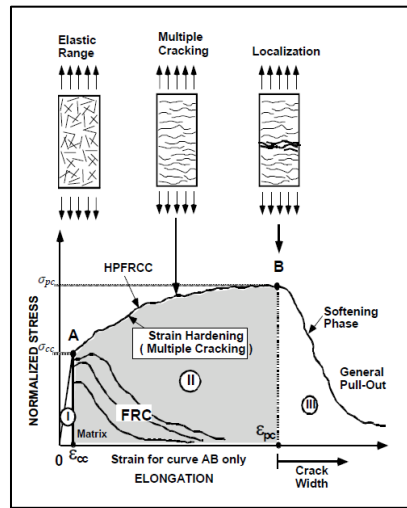
תכן התערובת של בטון בעל תכונות מעולות מבוסס על כמה עקרונות:

- אופטימיזציה של תערובת הגרגירים על מנת להשיג מטריצת הומוגנית וצפופה. לא משתמשים באגרגטים גסים. גודל החלקיקים המרבי הוא בדרך כלל קטן מ-600 מיקרון. החול הדק הוא החומר הגרנולרי הגדול ביותר, עם טווח גודל שבין 150 ל-600 מיקרון אחריו הצמנט עם גודל קוטר ממוצע של כ-15 מיקרון ואבקת קוורץ בקוטר ממוצע של 10 מיקרון. החלקיק הקטן ביותר הוא המיקרו-סיליקה (~0.1 מיקרון). מוסף מינרלי זה קטן מספיק כדי למלא את חללי הביניים בין הצמנט וחלקיקי קוורץ המרוסקים [Acker, 2004]. קיימות שיטות ומודלים שונים, כגון [De J numerical packing models, Larrard, 1994], המשמשים כדי להגדיל את צפיפות התערובת.
- שימוש בסיבי בפלדה או סיבים אורגניים. סיבים אלו מגדילים את חוזק המתיחה ואת צפיפות (toughness) החומר.
- טיפולים תרמיים מתאימים. מחקרים שונים הראו כי הפעלת לחץ כחלק מתהליך ציפוף הבטון וטיפולם בחום הם גורמים חשובים שתורמים להגדלת חוזק הבטון. אשפרה נפוצה של בטון מסוג זה היא טיפול ב-90 מעלות צלזיוס ו-95% לחות לתקופה של 2 ימים [Wille, 2011].
- יחס מים/מקשרים נמוך שיכול להגיע לערכים של 0.15 [Richard, 1994]

השימוש בסיבי פלדה בבטון, מאפשרים את העברת כוחות המתיחה דרך הסדקים שמתפתחים בבטון, אך בדרך כלל חוזק המתיחה קטן עם עלייה בדפורמציה.

התנהגות טיפוסית של בטון סיבים בעל תכונות מעולות מופיעה בצירור 1. אפשר לחלק את התנהגות הבטון לשלושה שלבים. השלב הראשון, מנקודה O לנקודה B זהו התחום האלסטי לפני היווצרות הסדק הראשון. השלב השני, מנקודה A לנקודה B, זהו השלב שבו נוצרים סדקים רבים בבטון ועדיין יש עלייה

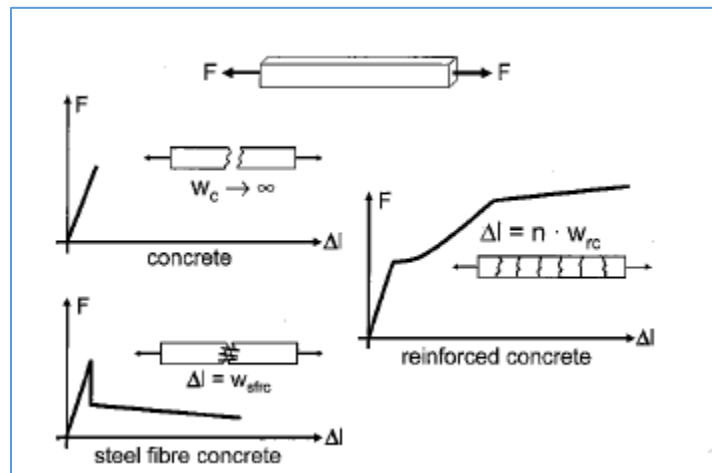
במאמץ. התחום הזה נקרא תחום strain hardening. השלב השלישי הוא מעבר לנקודה של המאמץ המקסימאלי B, שהוא גם המאמץ שבו הסיבים נשלפים מהבטון לאחר היווצרות תהליך הסדקה.



ציור 1: עקומה טיפוסית של מאמצים עיבורים עבור בטון סיבים רגיל ובטון בעל תכונות מעולות עם סיבים [Naaman, 1996]

ברוב המקרים השימוש בסיבים קצרים לא מאפשר לפתח את תופעת ה-strain hardening וזאת כנראה מכיוון שלסיבים הקצרים אין מספיק אורך עיגון כדי שיוכלו להגיע למאמץ הכניעה. סיבים אלה מתחילים להישלף מהבטון מיד לאחר המאמץ המקסימאלי.

בציור 2 מתוארים התכונות העיקריות של בטון עם סיבים פלדה, של בטון מזויין, ושל בטון ללא זיון.



ציור 2: עקומה טיפוסית של מאמצים עיבורים עבור בטון סיבים רגיל, בטון מזויין, ובטון לא מזויין (מתוך: "SFRC" DfStb Guidelines)

כדי להבין את תרומתם של הסיבים, יש להבדיל בין שתי מכניזם שונים:

שליפה של הסיבים

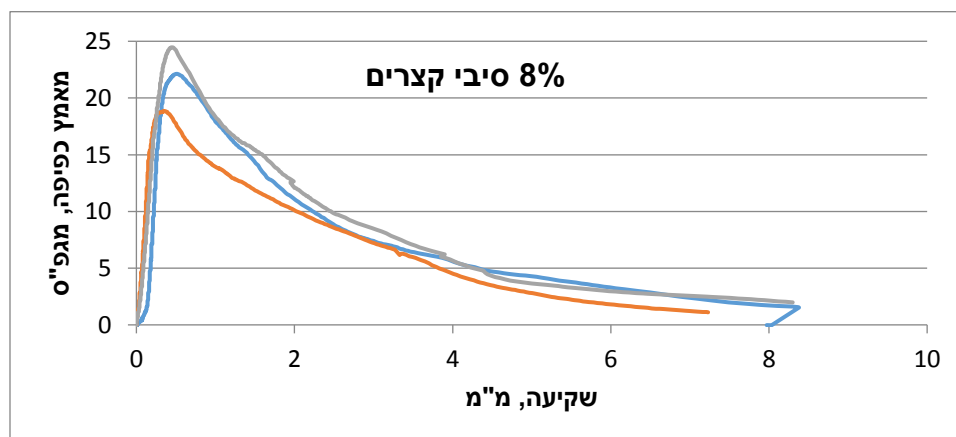
התארכות הסיבים

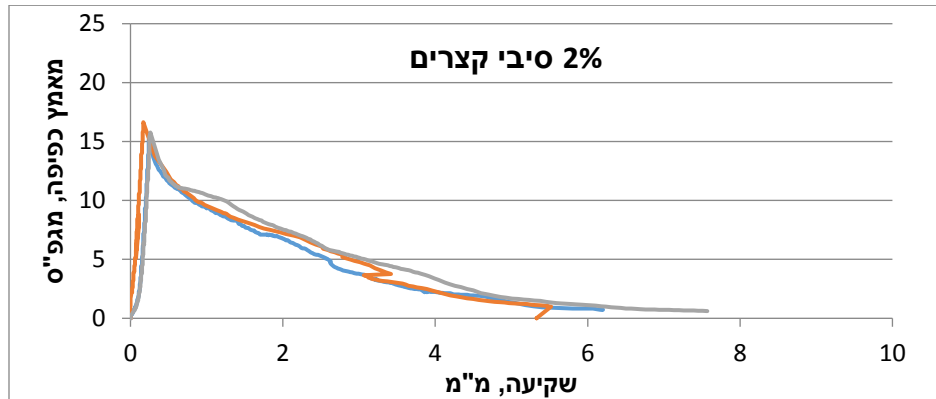
התכונות של הסיבים (יחס אורך/קוטר, חוזק המתיחה של הפלדה, ועיגון) נקבעים באופן שיבטיח שהסיבים ישלפו ממטריצת הבטון באופן הדרגתי, תוך התארכות הפלדה, כדי להבטיח את משיכות החומר. במערכת זאת, רצוי שהסיבים לא יקרעו באופן פריד.

לפי המחקר של Sukmin [Sukmin, 2008] השילוב של שני סוגי סיבי פלדה משפר משמעותית את משיכות וצפידות הבטון עקב התרומה השונה של כול סוג של סיב למערכת. הסיבים הקטנים מגשרים בין הסדקים הקטנים והסיבים הגדולים מגדילים את משיכות הבטון. השילוב של הסיבים הקטנים וגדולים משפרים את חוזק המתיחה והעיבורים המקסימליים של הבטון.

לפי ניסויים קודמים שנעשו במכון הלאומי לחקר הבנייה, (Agranati, Katz, 2015) לסיבי הפלדה הקצרים יש תרומה משמעותית לחוזק בבקיעה וכפיפה רק במינויים גבוהים של 6% ו-8% (ציור 3). בנוסף, העלייה במינון הסיבים הקצרים לא תורמת לשיפור המשיכות, ואין שיפור משמעותי בערכי השקיעה בין המינונים השונים.

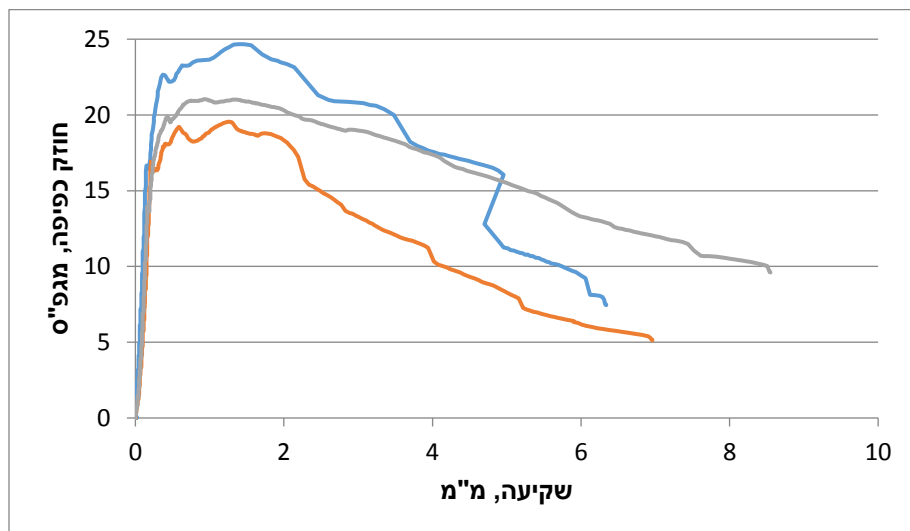
התנהגות העקומה שקיעה-מאמץ של המדגמים עם תכולות הסיבים השונות אינו משתנה עם עלייה במינון הסיבים. כדי שהסיבים ישפרו את משיכות הבטון, מאמצי המתיחה בסיבים צריך לעבור את גבול הכניעה והסיבים צריכים גם להיות מעוגים בבטון. מכיוון שאורך העיגון הנדרש של הסיבים הקצרים יותר ארוך מאורך הסיב עצמו, הסיבים לא יכולים להגיע למצב של כניעה ולכן נשלפים מהבטון כאשר מאמצי המתיחה עולים על מאמץ השליפה של הסיב. לכן, עלייה במינון הסיבים אינה תורמת לשיפור צפידות הבטון.





ציור 3: שקיעה כפונקציה של מאמץ כפיפה עבור תערובות עם 2% ו-8% סיבים קצרים של 12.5 מ"מ אורך (Agranati, Katz, 2015)

השילוב של סיבים קצרים וארוכים תרם לשיפור משמעותי של משיכות וצפידות הבטון. השילוב של סיבים קצרים וארוכים מאפשר לפתח את השלב של strain hardening שבו יש עלייה במאמצי הכפיפה מעבר לגבול האלסטי (ציור 4). במדגמים הכוללים רק סיבים קצרים, שלב זה לא יכול להתפתח עקב אורך עיגון לא מספיק בסיבים. שילוב זה של סיבים מגדיל באופן משמעותי את משיכות וצפידות הבטון. הסיבים מסוג Dramix 5D 65/60 נמצאו כטובים מבין הסיבים הארוכים לשיפור תכונות המתיחה של הבטון. מכיוון שסיבים אלו יותר ארוכים, הם מאפשרים עיגון יותר טוב בבטון מה שמאפשר לסיבים לתרום בצורה יותר משמעותית לשיפור חוזק המתיחה של הבטון.



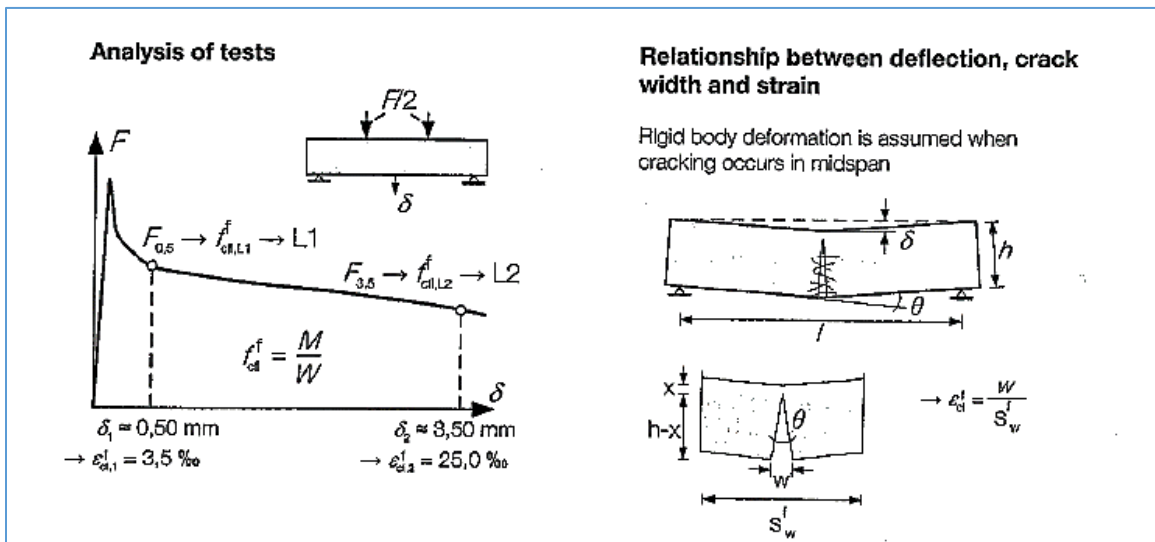
ציור 4: השקיעה כפונקציה של המאמץ בכפיפה של תערובת עם 2% של סיבים (100 ק"ג סיבי קצרים של 12.5 מ"מ ו-50 ק"ג של סיבי Dramix 5D 65/60) (Agranati, Katz, 2015)

התקן הגרמני עבור בטון עם סיבים, מאפיין את עקומת העיבור-מאמץ על ידי שני ערכים עיקריים:

L1 – מאמץ כפיפה עבור שקיעה של 0.5 מ"מ.

L2 – מאמץ כפיפה עבור שקיעה של 3.5 מ"מ

הערך של L1 נקבע לפי עיבור של 3.5% עבור מצב גבולי של שירות, ו- L2 לפי עיבור של 25% עבור מצב גבולי של הרס (ציור 5).



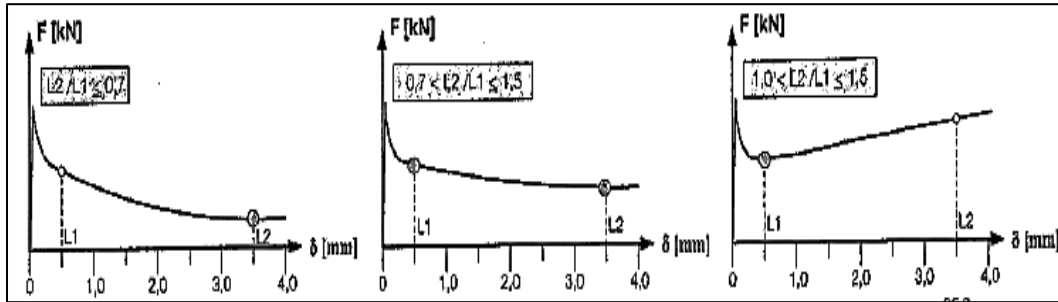
ציור 5: בדיקת חוזק כפיפה עבור בטון עם סיבים והקשר בין השקיעה, גודל הסדק ועיבורים (מתוך: (DAfStb Guidelines "SFRC")

הערכים של L1 ו- L2 מאפשרים להגדיר את עקומת עיבור-מאמץ לפי שלושת הקריטריונים הבאים (ציור 6):

$$L2/L1 < 0.7$$

$$0.7 < L2/L1 < 1.5$$

$$1.0 < L2/L1 < 1.5$$



ציור 6 : אפיון עקומת עיבור-מאמץ על ידי $L1$ ו- $L2$ (מתוך : "SFRC" Guidelines DAfStb)

יש לציין שהתקן הגרמני מתייחס לבדיקות כפיפה על מדגמים של $600 \times 150 \times 150$ מ"מ. במחקר הנוכחי השתמשנו במדגמים של $28 \times 70 \times 70$ מ"מ, ולכן יש להתאים את הערכים של $L1$ ו- $L2$ בהתאם :

$L1$ – חוזק בכפיפה עבור שקיעה של 0.25 מ"מ.

$L2$ – חוזק בכפיפה עבור שקיעה של 1.75 מ"מ.

2. מטרות המחקר

מטרת המחקר היא לשלב אגרגטים גסים וסיבי פלדה בתערובות של בטון תכונות מעולות (UHPC) ובדיקה של תכונות הבטון הטרי הקשוי של התערובת השונות. מחקר קודם מצא כי ניתן להשיג בטון מעולה גם תוך שימוש באגרגטים גדולים יחסית (16~מ"מ) אך הקשר בין גודל האגרגט לבין אורך הסיבים לא נבדק. לצורך השוואה, המחקר יתמקד בתערובות משתי דרגות חוזק של 150 ו-70 מגפ"ס כדי להשוות בטון מעולה עם אלו של בטון חזק רגיל המקובל כיום. תכונות הבטון הקשוי שיבדקו יהיו: חוזק לחיצה, חוזק מתיחה בבקיעה, חוזק מתיחה בכפיפה, ועקומת מאמץ כנגד שקיעה. תאופיין ההשפעה המשולבת של הסיבים והאגרגטים הגסים על תכונות הבטון.

ניתוח התוצאות יאפשר להגדיר את השפעת תכולת גודל האגרגט הגס על תכונות הבטון הקשוי, והאם ההשפעה היא דומה בין בטון בחוזק של 70 מגפ"ס ובבטון בחוזק של 150 מגפ"ס. בדומה, השפעת הסיבים תלויה באופן ישיר באורך הסיב ולכן אפשר יהיה להעריך השפעה זאת בתערובת עם אגרגטים גסים וללא אגרגטים אלה, ואת ההשפעה של שילוב סיבים על המערכת.

3. עבודה ניסיונית

המחקר כלל שתי קבוצות של תערובות, אחת עם חוזק בלחיצה של בערך 70 מגפ"ס והשנייה של בערך 150 מגפ"ס. הבטון של שתי הקבוצות הוא מסוג בטון מתפלס מעצמו (SCC). התערובות מבוססות על תערובות שנמצאו מתאימות ממחקרים קודמים, הן מבחינת תכונות חוזק הבטון הקשוי והן מבחינת עבירות הבטון הטרי. כול אחת מהקבוצות כוללת תערובת רק על בסיס חול, תערובת עם אגרגטים גסים מסוג שומשום, ותערובת עם אגרגטים גסים מסוג עדש. כול אחת מתערובות אילו גם כללה שלוש וריאציות: רק עם סיבים קצרים של 12 מ"מ, רק עם סיבים ארוכים של כ- 30 מ"מ, ושילוב של סיבים קצרים וארוכים. זאת אומרת, שכול קבוצת חוזק כוללת 15 תערובות, וסה"כ הוכנו 30 תערובות שונות.

טבלה 1 מרכזת את ההרכב של התערובות השונות לפי קבוצות.

טבלה 1: ריכוז של סה"כ התערובות שהוכנו.

תערובות 150 מגפ"ס			תערובות 70 מגפ"ס		
סיבים	אגרגטים	#	סיבים	אגרגטים	#
קצרים (150 ק"ג)	חול	16	קצרים (150 ק"ג)	חול	1
קצרים (150 ק"ג)	שומשום	17	קצרים (150 ק"ג)	שומשום	2
קצרים (150 ק"ג)	עדש	18	קצרים (150 ק"ג)	עדש	3
ארוכים 1 (50 ק"ג)	חול	19	ארוכים 1 (50 ק"ג)	חול	4
ארוכים 1 (50 ק"ג)	שומשום	20	ארוכים 1 (50 ק"ג)	שומשום	5
ארוכים 1 (50 ק"ג)	עדש	21	ארוכים 1 (50 ק"ג)	עדש	6
קצרים+ארוכים 1 (50+100 ק"ג)	חול	22	קצרים+ארוכים 1 (50+100 ק"ג)	חול	7
קצרים+ארוכים 1 (50+100 ק"ג)	שומשום	23	קצרים+ארוכים 1 (50+100 ק"ג)	שומשום	8
קצרים+ארוכים 1 (50+100 ק"ג)	עדש	24	קצרים+ארוכים 1 (50+100 ק"ג)	עדש	9
ארוכים 2 (50 ק"ג)	חול	25	ארוכים 2 (50 ק"ג)	חול	10
ארוכים 2 (50 ק"ג)	שומשום	26	ארוכים 2 (50 ק"ג)	שומשום	11
ארוכים 2 (50 ק"ג)	עדש	27	ארוכים 2 (50 ק"ג)	עדש	12
קצרים+ארוכים 2 (50+100 ק"ג)	חול	28	קצרים+ארוכים 2 (50+100 ק"ג)	חול	13
קצרים+ארוכים 2 (50+100 ק"ג)	שומשום	29	קצרים+ארוכים 2 (50+100 ק"ג)	שומשום	14
קצרים+ארוכים 2 (50+100 ק"ג)	עדש	30	קצרים+ארוכים 2 (50+100 ק"ג)	עדש	15

* **סיבים קצרים** – סיבים של 12 מ"מ

** **סיבים ארוכים 1** – סיבים מסוג Dramix 5D של 60 מ"מ אורך.

*** **סיבים ארוכים 2** – סיבים מסוג Dramix 3D של 30 מ"מ אורך.

3.1 הרכב התערובות

יש להדגיש שבחירת החומרים ויחס המינונים בין החומרים השונים הוא היבט חשוב שהיה צריך לבדוק בקפידה כדי להגיע לחוזק לחיצה גבוהה. שינויים קטנים בכמות של כל אחד מהמרכיבים משפיע בצורה משמעותית על התנהגות התערובת הטריה ועל חוזק הבטון. כול התערובות של המחקר מבוססות על תערובות שנמצאו מתאימות במחקרים קודמים, הן מבחינת תכונות חוזק הבטון הקשוי והן מבחינת

עבודות הבטון הטרי. בניסויים קודמים שנעשו לכדי להכיר את חומרי הגלם השונים בהם משתמשים בתערובות מסוג זה, נבדקו ההיבטים הבאים :

- סוג הצמנט
- סוג של מיקרו-סיליקה
- גודל ודרוג של החול
- סוג מוסף מפחית המים (SP).

בנוגע לכמויות המרכיבים השונים בתערובת, נבדקו המאפיינים הבאים :

- יחס מיקרו-סיליקה : צמנט.
- יחס חול : צמנט.
- יחס מפחית מים : צמנט
- יחס מים : צמנט
- יחס מים : מקשרים
- כמות הסיבים

כל אחד ממשתנים הללו נבדקו בנפרד על ידי תהליך אופטימיזציה שבו הוכנו כמה תערובות זהות ושונתה רק הכמות או הסוג של המשתנה הנבדק. בסוף התהליך, נבחרו 3 תערובות בסיס עבור בטון מסוג (UHPC) ו- 3 תערובות בסיס נוספות עבור בטון עם חוזק של כ- 70 מגפ"ס. זאת אומרת, תוכנו 6 התערובות בסיס הבאות :

עבור בטון מסוג (UHPC):

תערובת עם אגרגטים גסים הכוללים גם עדש
תערובת עם אגרגטים גסים הכוללים רק שומשום
תערובת ללא אגרגטים גסים הכוללת רק חול טבעי

עבור בטון עם חוזק של כ- 70 מגפ"ס

תערובת עם אגרגטים גסים הכוללים גם עדש
תערובת עם אגרגטים גסים הכוללים רק שומשום
תערובת ללא אגרגטים גסים הכוללת רק חול טבעי

3.2 חומרים

הסעיפים הבאים מתייחסים לכול אחד ממרכיבי התערובת.

3.2.1 צמנט

על פי הפרסומים בנושא בטון בעל תכונות מעולות, עדיף להשתמש בצמנט עם תכולה גבוהה של C_3S ו- C_2S ועם תכולה נמוכה ככול האפשר של C_3A . הסיבה לכך היא שה C_3A לא תורם לחוזק הבטון והשימוש בו נובע משיקולים הקשורים לתהליכי יצור הצמנט. מאידך, למרכיב זה השפעה משמעותית על פעילות מוספים מפחיתי מים בבטון. כתוצאה מכך, תערובות של בטון בעל תכונות מעולות נעשות פעמים רבות עם צמנט "עמיד סולפטים" שבו יש תכולת C_3A נמוכה (Wille, et al., 2011).

בניסויים קודמים השתמשנו בצמנט עם תכולת אלומינטים נמוכה שסופק על ידי חברת "נשר". השימוש בצמנט מסוג זה אכן הקטין את צריכת המים ותרם לשיפור בעבידות הבטון. אבל, השימוש באותו סוג צמנט, אך ממשלוח אחר, כבר לא נתן את אותו שיפור בעבידות הבטון.

כנראה שינויים קטנים בהרכב המינרלוגי של צמנט מסוג זה יכולים להשפיע באופן משמעותי על תכונות התערובת. לאור כך, החלטנו להשתמש בצמנט מסוג CEM-I-52.5 N שמיוצר באופן סדיר על ידי חברת "נשר".

ההרכב המינרלוגי של צמנט זה מפורט בטבלה 2. הצמנט הוא עם תכולת Al_2O_3 של כ 5.48% ותכולה מחושבת על פי משוואות בוג של C_3A של 8.28%.

טבלה 2: הרכב מינרלוגי של צמנט מסוג CEM-I-52.5 N

	% משקל
C_3S	59.4
C_2S , beta	16.9
C_4AF	5.9
C_3A (cubic)	2.5
Gypsum	3.2
Bassanite	2.9
Lime	0.7
Cacite	6.7

3.2.2 מיקרו-סיליקה

מיקרו-סיליקה הוא חומר סיליקטי אמורפי המשמש כמרכיב חשוב בבטון בעל תכונות מעולות עקב ריאקטיביות פוצלנית גבוהה, גודל גרגרים קטן, ותכולה גבוהה של סיליקה. בתהליך הפוצלני, מימת הסידן, Ca(OH)_2 , שנוצרת בתהליך ההידרציה של הצמנט, אבל אינה תורמת לחוזק הבטון, מגיבה כימית עם המיקרו-סיליקה כדי ליצור גל צמנטי נוסף, התורם לחוזק הבטון. בנוסף, גרגרי המיקרו-סיליקה הם קטנים ביחס לגרגרי הצמנט ($0.03\text{--}0.2\ \mu\text{m}$) ובעלי צורה כדורית כך שהם תורמים בצורה משמעותית לצפיפות המטריצה הצמנטית ולחיזוק ההידבקות בין העיסה והאגרגט. הגרגרים העגולים של המיקרו-סיליקה גם תורמים לשיפור עבירות הבטון הטרי במידה ומצליחים להגיע לפיזור טוב שלהם במערכת.

את המיקרו-סיליקה ניתן להשיג בצורות שונות. על פי הספרות המקצועית, בבטון בעל תכונות מעולות עדיף להשתמש במיקרו-סיליקה לא מצופפת (undensified microsilica) מאשר במיקרו-סיליקה מצופפת (densified microsilica). גם השימוש במיקרו-סיליקה נוזלית (slurry) לא מומלץ, מכיוון שכמות המים בו גבוהה מדי (Lee, 2005). הזיהומים הבעייתיים ביותר במיקרו-סיליקה הם הפחמן והאלקלים הבסיסים, ולכן התוצאות הטובות ביותר מתקבלות עם מיקרו-סיליקה לבנה. מיקרו-סיליקה זו מגיעה מתעשיית הסיליקון שבה משתמשים בזירקוניום לייצור סגסוגות שונות, והיא בעלת תכולה נמוכה של פחמן, Na_2O ו- K_2O (Wille, 2011). השימוש במיקרו-סיליקה לבנה מאפשר הפחתה משמעותית בכמות המים תוך שמירה על רמת עבירות גבוהה.

במחקר זה השתמשנו בחלק זה של המחקר השתמשו במקרוסיליקה מצופפת (Elkem Microsilica grade 920 D) עם תכולת סיליקה (SiO_2) מזערית של 85%.

3.2.3 מוספים מפחיתי מים

מפחיתי המים הם מרכיב עיקרי בבטון בעל תכונות מעולות. בבטון זה צריך מפחיתי מים עם יכולת הפחתה של המים בצורה מאוד משמעותית ולכן משתמשים רק במפחית מים מהדור השליש שהם על בסיס פוליקרבוקסילטים (polycarboxylic ethers). מפחיתי מים על בסיס נפתלינים (naphthalene-formaldehyde) ומלמינים (sulphonated-melamine) בדרך כלל לא מספיק יעילים לבטונים מהסוג הזה.

מפחית המים שבו השתמשנו עבור תערובת מסוג (UHPC) היה Glenium ACE 345 של BASF. זהו מפחית מים מהדור השלישי על בסיס פוליקרבוקסילטים עם יכולת הפחתת מים מאוד גבוהה (polycarboxylic ether hyperplasticizer).

בתערובות עבור בטון עם חוזק של 70 מג'ס לא היה צורך במוסף עם יכולת הפחתת מים חזקה כפי שנדרש בתערובות ה (UHPC), ולכן בתערובות אלו השתמשנו במוסף מסוג Glenium 27 של BASF.

זהו גם מפחית מים מהדור השלישי על בסיס פוליקרבוקסילטים , אך עם יכולת הפחתת מים יותר נמוכה מאשר ה Glenium ACE 345.

לפי המפרט הטכני של המוצר המיון המומלץ הוא בין 0.2 ל 0.8 ליטר של חומר ל 100 ק"ג צמנט (או מקשרים). אם לוקחים בחשבון משקל סגולי של 1.15 ק"ג לליטר, כמות זאת שווה לבין 0.23% ל- 0.92% של מפחית מים ביחס למשקל הצמנט.

במקרה של בטון בעל תכונות מעולות כמות תכולת מפחית המים גדולה יותר בצורה משמעותית. לפי המחקרים בנושא כמות מפחית המים יכולה להיות בין 1-8% ממשקל הצמנט. לפי (Wille, 2011) הכמות האופטימלית היא בין 1.5% ל- 2.5% ממשקל הצמנט.

3.2.4 חול

האגרגטים שבהם השתמשנו בחלק זה של המחקר הם אגרגטים רגילים שבהם משתמשים בתעשיית הבטון המקומית. השתמשנו חול טבעי ממישור רותם עם גודל גרגר מירבי של 0.6 מ"מ וספרת גרגרים של 1.96 .

בנושא החול ישנם שני היבטים חשובים הנוגעים למאפייני החול: גודל הגרגר המרבי ודרוג הגרגרים. מאפיינים אלה משפיעים על הקומפקטיות של המטריצה ולכן הם גורמים חשובים המשפיעים חוזק הבטון. לפי Wille (Wille, 2011) שילוב בין שני סוגים של חול יכול לשפר את צפיפות המטריצה ולתרום לחוזק הבטון. בנוסף, סוג החול העדיף הוא חול קוורץ, עקב החוזק הגבוה שלו. גרגירים מעוגלים עדיפים משיקולי עבירות וזרימת הבטון הטרי (De Larrard, 1994).

חשוב לציין שבבטון בעל תכונות מעולות בדרך כלל לא משתמשים באגרגט גס, ולכן הרכיב הגדול ביותר בתערובת הוא החול.

3.2.5 אגרגט גס

האגרגט הגס מסוג עדש ושומשום הוא מאבן דולומיט ממחצבת נחל רבה. ספרת הגרגרים של העדש היא 6.05 ושל השומשום 5.32. דירוג החומרים השונים מופיע בציר 7.

3.2.6 דירוג של המרכיבים היבשים

לפי Richard ו- Cheyrezy (Richard, 1994) כדי להשיג את המבנה הגרנולרי הצפוף ביותר צריך להשתמש בכמה קבוצות גרגרים שכול אחת מכסה תחום מוגדר בדרוג הכללי, בלי חפיה בדרוג בין החומרים השונים. הפרמטר החשוב ביותר כדי להעריך את איכות התערובת הגרנולרית נמצא על ידי

תצרוכת המים. התערובת האופטימלית היא התערובות שבה נדרשת כמות המים הקטנה ביותר כדי להגיע למצב של נזילות.

לפי Lee, הגודל של כל רכיב צריך להיות קטן בסדר גודל אחד מהקבוצה הקודמת (Lee, 2005).

המרכיבים הגרנולרים במחקר זה כוללים :

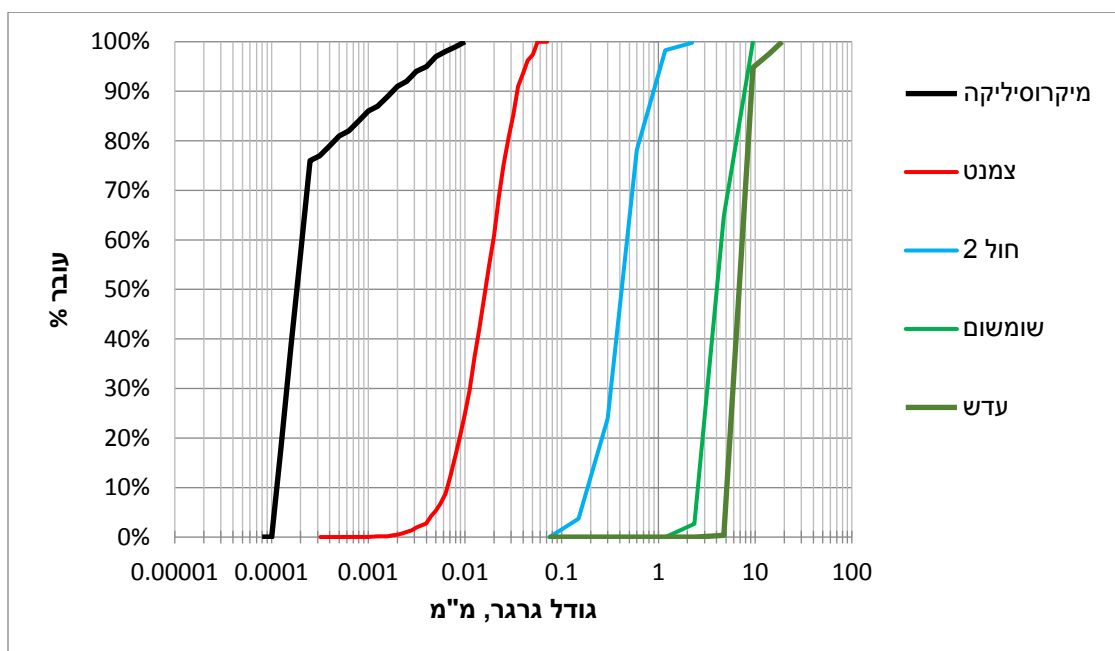
צמנט : גודל הגרגר הממוצע D_{50} של 20 מיקרון.

מיקרו-סיליקה. לא נעשתה בדיקה כדי להעריך את דירוג הגרגרים של המיקרו-סיליקה. לפי המפרט הטכני של Elkem Microsilica Grade 920 אחוז החומר המסתייר על נפה של 45 מיקרון הוא פחות מ 10%. לצורך קבלת סדרי גודל והכנת הדירוג הכללי השתמשנו בערכים טיפוסיים של מיקרו-סיליקה המפורסמים במחקר של De Larrard (1994).

חול טבעי עם ספרת גרגר של 1.96.

אגרגט גס מסוג שומשום.

אגרגט גס מסוג עדש.



ציור 7 : דירוג של המיקרוסיליקה, הצמנט, חול טבעי, שומשום והעדש שהשתמשנו במחקר זה.

מצויר 7 ניתן להבחין כי קיימת הפרדה ברורה בלי חפיפה בין הדירוג של כול אחד מהמרכיבים, חוץ מאשר השומשום והעדש.

3.2.7 סיבים

השימוש בסיבי פלדה הוא מרכיב הכרחי בבטון בעל תכונות מעולות. ברוב המחקרים, כמות הסיבים היא די גבוהה, בין 155 ק"ג למ"ק ועד 500 ק"ג למ"ק בטון והסיבים הם קצרים עם אורך של בערך 10 מ"מ ועובי של 0.1-0.2 מ"מ וללא עיגון מכני (Lee, 2005) (Richard, 1994).

לפי ניסויים קודמים (Agranati, Katz, 2015), השילוב של סיבים קצרים וארוכים תרם לשיפור משמעותי של משיכות וצפידות הבטון. מבחינת עבירות הבטון, קשה להוסיף מעבר ל- 50 ק"ג של סיבים ארוכים, ולכן זו הייתה תכולת הסיבים בתערובת שכללו רק סיבים ארוכים. נבדקו גם שני סוגים של סיבים ארוכים: סיבים של 30 מ"מ אורך וסיבים של 60 מ"מ אורך.

בתערובות שכללו שילוב של סיבים ארוכים וקצרים, המינון היה של 50 ק"ג סיבים ארוכים ו- 100 ק"ג סיבים קצרים, כדי לשמור על תכולת סיבים אחידה של 2% סיבים בנפח, תוך שמירה על עבירות טובה. במחקר זה נעשה שימוש בסיבים הבאים (טבלה 3):

סיבי פלדה קצרים: STRATEC F 12.5/4 עם חוזק כניעה 1250 מגפ"ס

סיבי פלדה ארוכים ומכופפים:

DRAMIX 3D 45/30 BG

DRAMIX 5D 65/60 BG

סיב מסוג 5D הוא סיב בעל שני כיפופים בקצהו בניגוד לכיפוף אחד בסיבי 3D. הטבלה הבאה מרכזת את תכונות הסיבים השונים

טבלה 3: ריכוז תכונות של הסיבים השונים

מספר סיבים בק"ג	f_y , N/mm ²	יחס אורך/קוטר (l/d)	קוטר, מ"מ	אורך, מ"מ	כינוי	סוג הסיב
סיבים קצרים						
81,000	1250	31	0.4	12.5	12/.4	STRATEC F 12.5/0.4
סיבים ארוכים						
13,311	1270	45	0.62	30	3D 45/30 BG	Dramix
3,183	2300	65	0.9	60	5D 65/60 BG	Dramix*

תמונות הסיבים השונים ששימשו במחקר זה מתוארות בצור 8:

STRATEC F 12.5/0.4**DRAMIX 5D 65/60 BG****Dramix 3D 45/30**

ציור 8: סיבי הפלדה ששימשו במחקר זה

תכולת הסיבים שבה השתמשנו ברוב התערובות הייתה של 150 ק"ג למ"ק בטון, כלומר, כ-2% מנפח הבטון. זאת הכמות שבה השתמשנו במחקרים קודמים, וגם המומלצת לפי מחקרים שונים (FHWA, 2013).

3.3 שיטות בדיקה וציוד

3.3.1 סדר ערבוב של התערובת

סדר ערבוב החומרים הוא חשוב במקרה של בטון בעל תכונות מעולות ומשפיע בצורה משמעותית על התוצאות הסופיות. על פי המחקרים נמצא שיש דעות שונות על סדר ערבוב והכנת התערובת. Wille (2011) ו-Lee (2005) Lee ערבבו קודם את כל המרכיבים היבשים ולאחר מכן את המים עם המוספים. המטרה הייתה ליצור סוג של "טחינה" של המיקרו-סיליקה על ידי החול לפני הוספת הנוזלים. במקרה שלנו, סדר זה פשוט לא עבד. מכיוון שכמות המים נמוכה במיוחד, התערובות פשוט לא מתערבבת והחומרים נשארים יבשים לגמרי. Sedran (Sedran, 1997) השתמש בצורת ערבוב שונה, שבה קודם מערבבים את המיקרו-סיליקה עם הנוזלים, ולזה מוסיפים את הצמנט ולאחר מכן את החול.

במקרה שלנו נבדקו בעבר כמה צורות ערבוב שונות, וסדר הערבוב הבא נמצא כיעיל ביותר:

1. מערבבים את המים והמוספים הכימיים (מפחית מים) ומוסיפים לערבול.
 2. מוסיפים את הצמנט. מערבבים במשך 5 דקות.
 3. מוסיפים את המיקרוסיליקה. מערבבים במשך 3 דקות.
 4. מוסיפים את האגרטים הגסים ומערבבים במשך 3 דקות.
 5. מוסיפים את החול ומערבבים במשך 3 דקות.
 6. מוסיפים את הסיבים ומערבבים במהירות נמוכה עד שהסיבים התערבבו בצורה אחידה. את הסיבים צריך לערבול כמה שפחות כדי למנוע את ההיווצרות של "כדורי סיבים".
- לצורך ערבול התערובת השתמשנו בערבול בחש ריצפתי עם קיבולת של עד 50 ליטר (ציור 9).



ציור 9 : ערבול בחש רצפתי עם קיבולת של עד 50 ליטר

3.3.2 הכנת הדוגמאות ותהליך האשפורה לבדיקות חוזק

לאחר שתערובת הבטון הוכנה לפי הסדר המפורט למעלה, ממלאים את התבנית בשתי שכבות ומשתמשים בשולחן ריטוט לצורך ציפוף הבטון. עבור בדיקות חוזק השתמשו במדגמים של 100 מ"מ. בכול תערובת נעשו 3 קוביות לחוזק של 7 ו- 28.

לאחר 24 שעות, התבניות פורקו וקוביות הבטון אוחסנו באמבטיית מים ב- 21 מעלות צלזיוס עד למועד בדיקת החוזק, כמקובל בתקנים האירופאים. יש להדגיש שהמדגמים לא אוחסנו באוויר לאחר 7 ימים, כנהוג לפי דרישת התקן הישראלי.

חשוב לציין גם כי כמות האוויר בתערובות הוא יחסית גבוהה (~5%). בזמן ציפוף הבטון אפשר היה לראות בברור איך בועות האוויר עולות לאט ומתפוצצות. כנראה בגלל השפעת האוויר התקבל פיזור גבוה של תוצאות.

בדיקת חוזק הלחיצה נעשתה במכשיר מסוג Toni Technic בעל עומס מירבי של 200 טון. קצב העמיסה היה 0.6 מגפ"ס לשנייה, לפי ת"י 26 חלק 4.1.

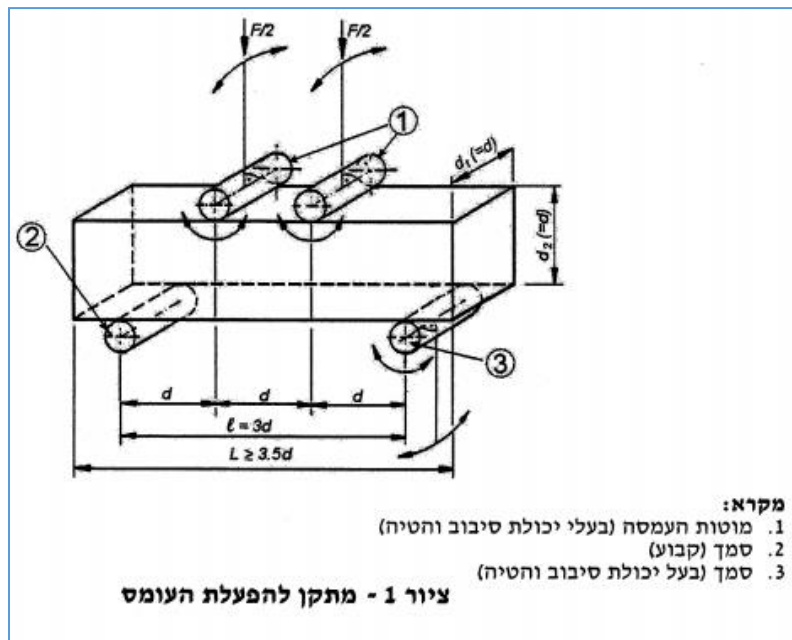
3.3.3 בדיקת חוזק כפיפה

הבדיקה לחוזק כפיפה וחוזק מתיחה לא ישירה (בקיעה) נעשו לפי ההנחיות של ת"י 26 חלק 4.2 ו- 4.3.

השתמשנו לבדיקה בשלוש במנסרות של $280 \times 70 \times 70$ מ"מ. פירוק התבניות נעשה לאחר 24 שעות, והמדגמים היו באמבטיית מים בטמפרטורה של 21°C עד מועד הבדיקה שנעשתה בגיל 28 יום. תחילה נעשתה הבדיקה לחוזק כפיפה שבה גם נמדדה השקיעה, ועם השבר של המנסרה השתמשנו לבדיקת חוזקה מתיחה לא ישירה. ציור 10 ו- ציור 11 מתארים את המתקן לבדיקת חוזק כפיפה עם אחת מהמנסרות ואת דרישת התקן, בהתאמה.



ציור 10 : המתקן לבדיקת חוזק כפיפה עם אחד מהמדגמים



ציור 11 : המתקן להפעלת העומס לפי דרישת ת"י 26 חלק 4.2

הנוסחה לחישוב החוזק בכפיפה :

$$f_{ct,fl} = \frac{F \times L}{d_1 \times d_2^2} = \frac{F \times 210}{70^3}$$

$f_{ct,fl}$ – חוזק המתיחה הלא ישירה , מגפ"ס

F – עומס השבר , N

L – המרווח בין הסמכים התחתונים, מ"מ

d_1 – גובה חתך דוגמת הבדיקה, מ"מ.

d_2 – גובה דוגמת הבדיקה , מ"מ

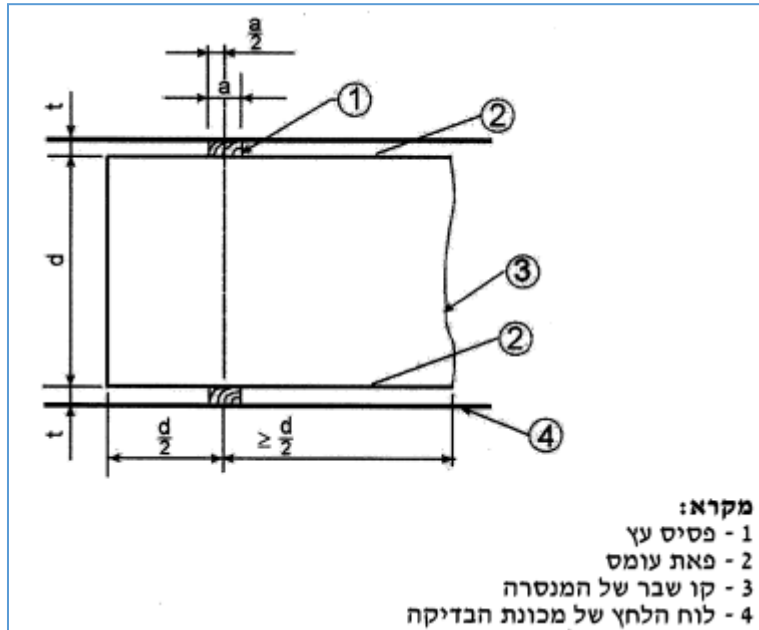
בנוסף לחוזק בכפיפה, נעשית גם מדידה של השקיעה כפונקציה של מאמץ הכפיפה. הבדיקה נעשתה לפי התקן אמריקאי ASTM C1609.

במקרים מסויימים עלול להיווצר קשר בין גודל סיבי הפלדה ואופן פיזור הסיבים במדגמים. ככול שהסיבים יותר ארוכים עלולה להיות להם נטייה להתמקם בכיוון הארוך של המדגם ובכך להשפיע על חוזק הבטון בכפיפה. מכיוון שבמחקר נעשה שימוש גם בסיבים באורך של 60 מ"מ, בנוסף לשלוש מנסרות של 70*70*280 מ"מ, נבדקה גם מנסרה אחת של 500*100*100 מ"מ עבור כול תערובת.

הסיבה שלא נבדקו שלוש מדגמים בגודל זה קשורה לכך שזה היה מורכב לוגיסטית להכין 3 מדגמים שכאלה עבור כול תערובות (כמות החומר הנדרש, גודל הערבול, משקל המדגמים, אחסון ושינוע).

3.3.4 חוזק מתיחה לא ישירה (בבקיעה)

לבדיקה של חוזק מתיחה לא ישירה השתמשנו בשברי מנסרות ששימשו לבדיקת חוזק הכפיפה. בציור הבא רואים את מיקום כפיסי העץ בבדיקת שברי מנסרות לפי ת"י 26 חלק 4.3 (ציור 12).



ציור 12: מיקום כפיסי העץ בבדיקת שברי מנסרות לפי ת"י 26 חלק 4.3

הנוסחה לחישוב חוזק המתיחה הלא ישירה:

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi \times L \times d} = \frac{0.637 F}{70 \times 70}$$

$f_{ct,sp}$ – חוזק המתיחה הלא ישירה, מגפ"ס

F – עומס השבר, N

L – אורך קו ההעמסה, מ"מ

d – גובה חתך דוגמת הבדיקה, מ"מ.

בנוסף לשלוש מנסרות של 280*70*70 מ"מ, נעשתה גם מנסרה בגודל של 500*100*100 מ"מ.

3.3.5 בדיקת תכולת האוויר

בחלק מהתערובות נבדקה כמות האוויר על ידי שימוש במכשיר לבדיקת אוויר (ת"י 26 חלק 2.6). בשיטה זו ממלאים את הכלי בשלוש שכבות של בטון. מהדקים כול שיכבה על ידי 25 מכות עם מוט. נפח כלי הבטון הוא של ליטר אחד. בשלב זה גם אפשר לשקול את ולחשב את המשקל המרחבי של הבטון הטרי.

סוגרים את מכסה המכשיר וממלאים עם מים את שכבת האוויר בין הבטון והמכסה. מעלים את הלחץ עם המשאבה הידנית עד איפוס ואז משחררים את הלחץ מלמעלה. השעון של המכשיר מראה את כמות האוויר בבטון באחוזים.



ציור 11 - מכשיר לבדיקת תכולת אוויר

3.3.6 בדיקה של שקיעה ושירוע הבטון

עבודות הבטון נבדקה לפי בדיקת שירוע או שקיעה, לפי סוג הבטון. תערובות הבטון ללא הסיבים, תוכננו להיות מסוג בטון המתהדק בעצמו (SCC). בטון מסוג זה הוא יותר נוזלי, ולכן הסומך נבדק בשולחן זרימה. הסיבים משפיעים באופן משמעותי על עבירות הבטון, ולכן חלק מתערובות הבטון עם הסיבים, שהיו נוזליות יותר נבדקו בבדיקת שירוע, לעומת התערובות שהיו יותר יבשות, וכבר לא זורמות, שנבדקו בבדיקת שקיעה. בדיקת השירוע נעשתה לפי תקן ת"י 26 חלק 2.6 "בדיקות בטון: בטון טרי- בטון המתהדק בעצמו", ובדיקת השקיעה לפי ת"י 26 חלק 2.1 : "בדיקות בטון: בטון טרי-סומך-בדיקת שקיעה". ציור 13 מתאר תמונות מייצגות של תערובת בטון שנבדקה בשולחן זרימה, לעומת תערובת בטון שכוללת סיבים, ולכן נבדקה בבדיקת שקיעה.



ציור 13 : שירוע הבטון בבדיקת שירוע לפי ת"י 26 חלק 2.6 ושקיעה בבדיקה על פי ת"י 26 חלק 2.1

4. תוצאות

להלן פירוט התוצאות של העבודה הניסויית של סדרות התערובות השונות שבוצעו.

4.1 הרכב תערובות הבסיס ללא סיבים

לפני הכנת התערובות עם הסיבים, נעשו מספר רב של ניסויים מוקדמים כדי לקבוע את תערובות הבסיס עבור שתי הקבוצות: בטון עם חוזק בינוני (בערך 70 מגפ"ס) ובטון עם חוזק גבוה (בין 120-150 מגפ"ס).

כול אחת מהקבוצות מורכבות משלושה סוגי תערובות שונות:

- תערובת רק על בסיס חול
- תערובת עם אגרגטים גסים מסוג שומשום
- תערובת עם אגרגטים גסים מסוג שומשום ועדש.

כלומר, הוגדרו 6 תערובות בסיס, 3 עבור כול קבוצת חוזק. בשלב השני של המחקר, כול אחת מתערובות הבסיס הוכנה בחמש וריאציות שונות:

- עם סיבים קצרים של 12 מ"מ
- עם סיבים ארוכים של כ- 30 מ"מ
- עם סיבים ארוכים של כ- 60 מ"מ
- שילוב של ארוכים של כ- 30 מ"מ וסיבים קצרים.
- שילוב של ארוכים של כ- 60 מ"מ וסיבים קצרים.

תכולת הסיבים הקצרים נקבע ל- 150 ק"ג/מ"מ³, או 2% מנפח הבטון. בתערובות עם הסיבים הארוכים של 30 ו- 60 מ"מ, המינון היה של 50 ק"ג/מ"מ³. מבחינת עבירות הבטון, זהו בדרך כלל המינון המקסימאלי. קשה לשלב סיבים ארוכים במינונים יותר גבוהים, ולקבל תערובות עבירות.

בתערובות עם תערובת של סיבים ארוכים וקצרים, מינון הסיבים היה של 50 ק"ג/מ"מ³ סיבים ארוכים ו- 100 ק"ג/מ"מ³ של סיבים קצרים, כדי שתכולת הסיבים הייתה זהה לתערובות עם רק סיבים קצרים. לא הייתה בעיה להגיע לעבירות טובה בתערובות אלו.

4.2 הרכב תערובות הבסיס עבור תערובות עם חוזק בינוני

הפרמטר העיקרי שמשפיע על חוזק הבטון זהו היחס מים/צמנט, ולכן היה חשוב שיחס זה יהיה זהה עבור כול שלושת התערובות של אותה קבוצת תערובות. היחס מים/צמנט של שלושת התערובות היה 0.4.

בתערובות עם אגרגטים מסוג עדש ושומשום אפשר היה גם לשמור על אותה תכולת צמנט, אבל בתערובות על בסיס חול היה צורך להגדיל את תכולת המים (והצמנט) כדי להגיע לתערובות עם עבירות טובה.

בתערובות עם אגרגטים גסים, תכולת הצמנט הייתה 400 ק"ג. ביחס לאגרגט הגס, התערובות עם עדש, תכולת העדש הייתה 600 ק"ג, ובתערובות עם שומשום תכולת השומשום הייתה 600 ק"ג. כול שאר הרכיבים היו זהים בין התערובות.

בתערובת הבסיס שמבוססת רק על חול, תכולת החול הייתה 1418 ק"ג ותכולת הצמנט 626 ק"ג. בתערובת זאת ניסינו להגיע לתכולת צמנט מינימאלית שתאפשר לקבל עבירות טובה, תוך שמירה על היחס מים/צמנט שנקבע. הכמויות לכל תערובת מפורטות בטבלה 4.

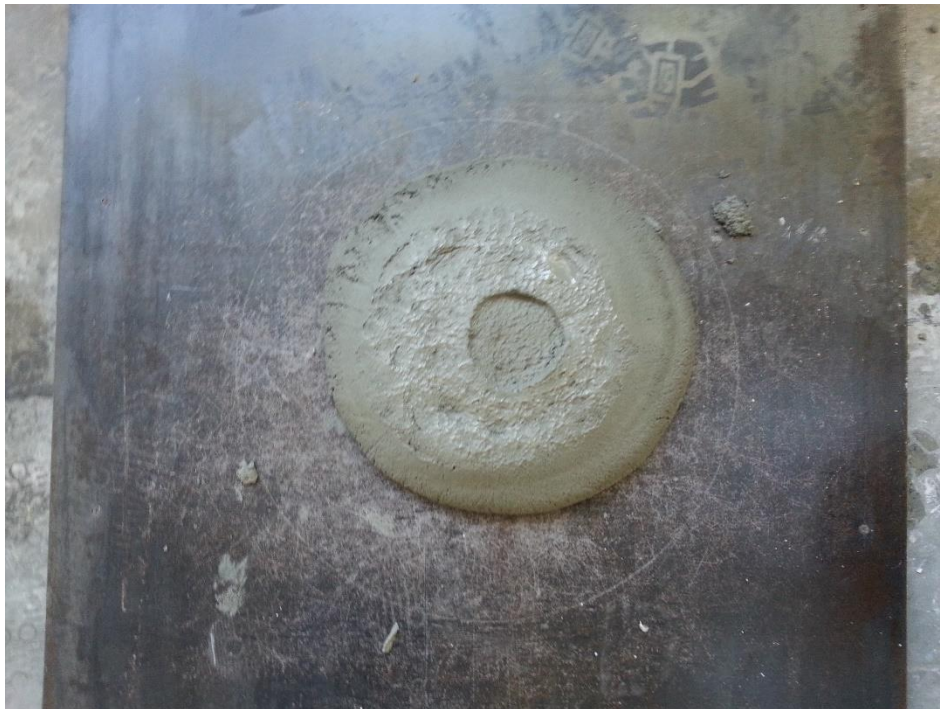
טבלה 4: הרכב תערובות בסיס עבור בטון עם חוזק בינוני

תערובות עם רק עם חול	תערובות עם שומשום ומודרג	תערובות עם עדש ומודרג	
626	400	400	צמנט, ק"ג
246	160	160	מים, ק"ג
0	0	0	מיקרוסיליקה, ק"ג
1418	600	600	חול טבעי, ק"ג
0	600	0	שומשום, ק"ג
0	0	600	עדש, ק"ג
0	540	540	מודרג, ק"ג
2.2% Glenium 345	2% Glenium 27	2% Glenium 27	תכולת מוסף
0.39	0.40	0.40	יחס מים/צמנט

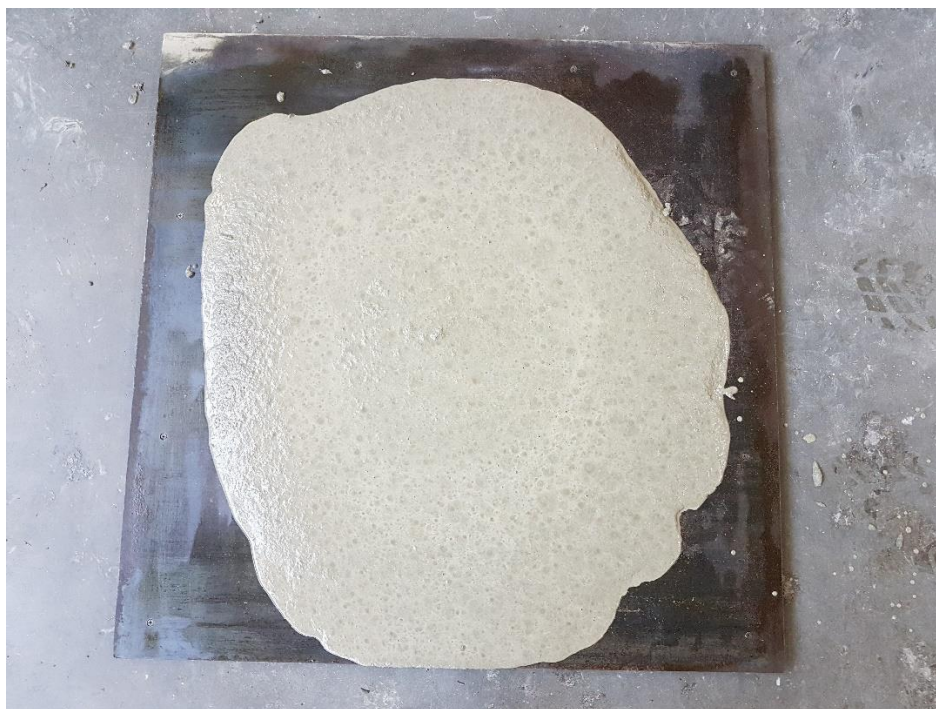
בנוסף ליחס מים/צמנט זהה, היה גם חשוב שסומך הבטון יהיה דומה בין התערובות השונות. בתערובות עם עדש ושומשום, אפשר היה להגיע לבטון עם תכונות של SCC תוך שימוש במוסף מסוג

Glenium 27 , במינון של 2% מתכולת הצמנט. בתערובת שמבוססת רק על חול, כאשר השתמשנו במוסף Glenium 27, השירוע הגיע רק ל 360 מ"מ, והתערובת הייתה צמיגית למדי. לאור כך, הוחלט שלהשתמש בתערובת זאת במוסף מפחית מים חזק יותר, Glenium 345, שבו השתמשנו עבור תערובות הבטונים עם חוזק של מעל 100 מגפ"ס. השימוש במוסף זה אפשר לקבל תערובת בטון עם זרימה יותר טובה והרבה פחות צמיגה. יש להדגיש שמכיוון שהסיבים פוגעים משמעותית בזרימה הבטון, חשוב שתערובות הבסיס יהיו נוזליות ועם שירוע גבוהה.

ציור 14 וציור 15 מתארים את השפעת המוסף על עבירות הבטון בתערובות שמבוססות רק על חול.



ציור 14: שירוע של תערובת עם חוזק של 70 מגפ"ס מבוססת רק על חול עם מוסף מפחית מים מסוג Glenium 27.



ציור 15: שירוע של תערובת עם חוזק של 70 מגפ"ס מבוססת רק על חול עם מוסף מפחית מים מסוג Glenium 345

4.3 הרכב תערובות הבסיס עבור תערובות עם חוזק גבוה

הגדרת תערובות הבסיס עבור הבטון עם חוזק גבוה היה תהליך מורכב שכלל מספר רב של ניסויים מוקדמים. היה צריך לבדוק מספר סוגי צמנט, ולבצע אופטימיזציה של בין חומרי הגלם השונים: צמנט, אגרגטים גסים, אגרגט דק, מיקרוסיליקה, ומוסף מפחית מים. להלן הרכב שלושת תערובות הבסיס עבור בטון עם חוזק גבוה (טבלה 5):

טבלה 5: תערובות בסיס עבור בטון עם חוזק גבוה

תערובות עם רק עם חול	תערובות עם שומשום	תערובות עם עדש	
960	710	710	צמנט, ק"ג I CEM
170	125	125	מים, ק"ג
48	38	38	מיקרוסיליקה, ק"ג
1139	350	350	חול טבעי, ק"ג
0	1150	550	שומשום, ק"ג
0	0	600	עדש, ק"ג
2.5%	2.5%	2.5%	מוסף מפחית מים Glenium 345
0.19	0.19	0.19	יחס מים/צמנט
0.18	0.18	0.18	יחס מים/(צמנט+מיקרוסיליקה)

4.4 תוצאות בדיקות תערובות בטון עם חוזק בינוני

כול אחת משלושת תערובות הבסיס הוכנה בחמש וריאציות שונות תוך שילוב של סיבים באופן הבא:

- 150 ק"ג של סיבים קצרים של 12 מ"מ
- עם סיבים ארוכים של כ- 30 מ"מ
- עם סיבים ארוכים של כ- 60 מ"מ
- שילוב של ארוכים של כ- 30 מ"מ וסיבים קצרים.

- שילוב של ארוכים של כ- 60 מ"מ וסיבים קצרים.

בטבלאות הבאות (טבלה 6, טבלה 7 וטבלה 8) מרוכזות התוצאות של הבדיקות השונות: בדיקת סומך של הבטון הטרי (שקיעה/שירוע), חוזק הבטון בלחיצה בגיל 7 ו- 28, חוזק הבטון בבקיעה וכפיפה ב- 28 יום, וחוזק הבטון בכפיפה עבור שקיעה של 0.25 מ"מ ו- 1.75 מ"מ (L1 ו- L2), והיחס בין L1/L2.

טבלה 6: תוצאות בדיקות בטון חוזק בינוני: התערובות עם אגרגט גס מסוג עדש

חוזק בינוני: תערובות עם עדש					
מס	M1	M2	M3	M4	M5
הגדרה	150 kg short	50 Kg 5D	50 Kg 3D 45/30	50 Kg 3D 45/30 100 kg strateg	50Kg 5D 100 kg strateg
שקיעה, מ"מ	128	177	198	68	111
חוזק לחיצה f_{c7d} , מגפ"ס	70	69	67	71	71
חוזק לחיצה f_{c28d} , מגפ"ס	82	80	81	82	85
יחס חוזק 28/7	0.85	0.86	0.83	0.86	0.84
חוזק בבקיעה, מגפ"ס	5.1	7.4	7.6	9.1	6.8
חוזק בכפיפה, מגפ"ס	8.7	13.6	8.7	9.6	13.0
חוזק ב- 0.25 מ"מ שקיעה, מגפ"ס (L1)	8.4	8.5	8.7	9.0	8.2
חוזק ב- 1.75 מ"מ שקיעה, מגפ"ס (L2)	4.1	12.7	4.3	5.2	12.5

טבלה 7 : תוצאות בדיקות בטון חוזק בינוני : התערובות עם אגרגט גס מסוג שומשום

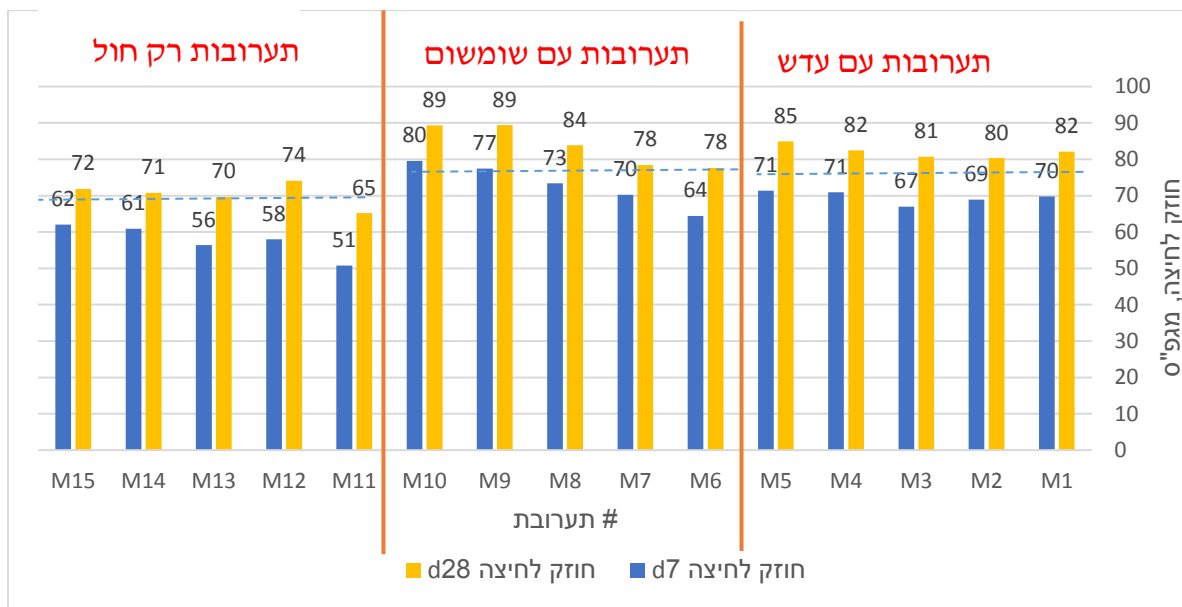
חוזק בינוני : תערובות עם שומשום					
M10	M9	M8	M7	M6	מס
50Kg 5D 100 kg strateg	50 Kg 3D 45/30 100 kg strateg	50 Kg 3D 45/30	50 Kg 5D	150 kg short	הגדרה
35	27	102	124	55	שקיעה, מ"מ
80	77	73	70	64	חוזק לחיצה, 7 ימים, מגפ"ס fc7d
89	89	84	78	78	חוזק לחיצה, 28 ימים, מגפ"ס fc 28d
0.89	0.87	0.88	0.90	0.83	יחס חוזק 28/7
12.2	10.4	6.8	6.6	7.5	חוזק בבקיעה, מגפ"ס
14.3	10.7	8.9	8.2	8.4	חוזק בכפיפה, מגפ"ס
11.1	10.3	8.9	8.2	7.9	חוזק ב- 0.25 מ"מ שקיעה, מגפ"ס (L1)
11.8	7.1	5.0	5.8	3.2	חוזק ב- 1.75 מ"מ שקיעה, מגפ"ס (L2)

טבלה 8 : תוצאות בדיקת בטון בחוזק בינוני : התערובות עם רק עם חול

חוזק בינוני- תערובות רק עם חול					
M15	M14	M13	M12	M11	מס
50Kg 5D 100 kg strateg	50 Kg 3D 45/30 100 kg strateg	50 Kg 3D 45/30	50 Kg 5D	150 kg short	הגדרה
770	800	760	780	740	שירוע, מ"מ
62	61	56	58	51	חוזק לחיצה, 7 ימים, מגפ"ס fc7d
72	71	70	74	65	חוזק לחיצה, 28 ימים, מגפ"ס fc 28d
0.86	0.86	0.81	0.78	0.78	יחס חוזק 28/7
6.4	7.5	5.9	6.1	8.5	חוזק בבקיעה, מגפ"ס
11.96	9.8	9.7	8.5	7.3	חוזק בכפיפה, מגפ"ס
6.5	8.2	2	5.9	6.4	חוזק ב- 0.25 מ"מ שקיעה, מגפ"ס (L1)
11.5	5.0	3	4.4	4.0	חוזק ב- 1.75 מ"מ שקיעה, מגפ"ס (L2)

4.4.1 תערובות עם חוזק בינוני : חוזק לחיצה

בציור 16 אפשר לראות את ריכוז תוצאות חוזק הלחיצה עבור כול התערובות בקבוצה זאת.



ציור 16 : תערובות חוזק בינוני : חוזק לחיצה 7 ו- 28 יום (במקווקו – תערובת ללא סיבים).

חוזק הבטון של התערובות עם האגרגטים הגסים (M10-M1) היה גבוה מזה של התערובות רק עם חול. יש לציין שהיחס מים צמנט של כול התערובות הוא זהה, 0.40, אך תכולת הצמנט של התערובות עם אגרגטים גסים הייתה 400 ק"ג, לעומת 626 ק"ג בתערובות שכללו רק חול. נתונים אלו מעידים שהאגרגטים הגסים, לא רק שאינם פוגעים בחוזק הלחיצה של הבטון, נוכחותם חשובה לשיפור חוזק הבטון בלחיצה.

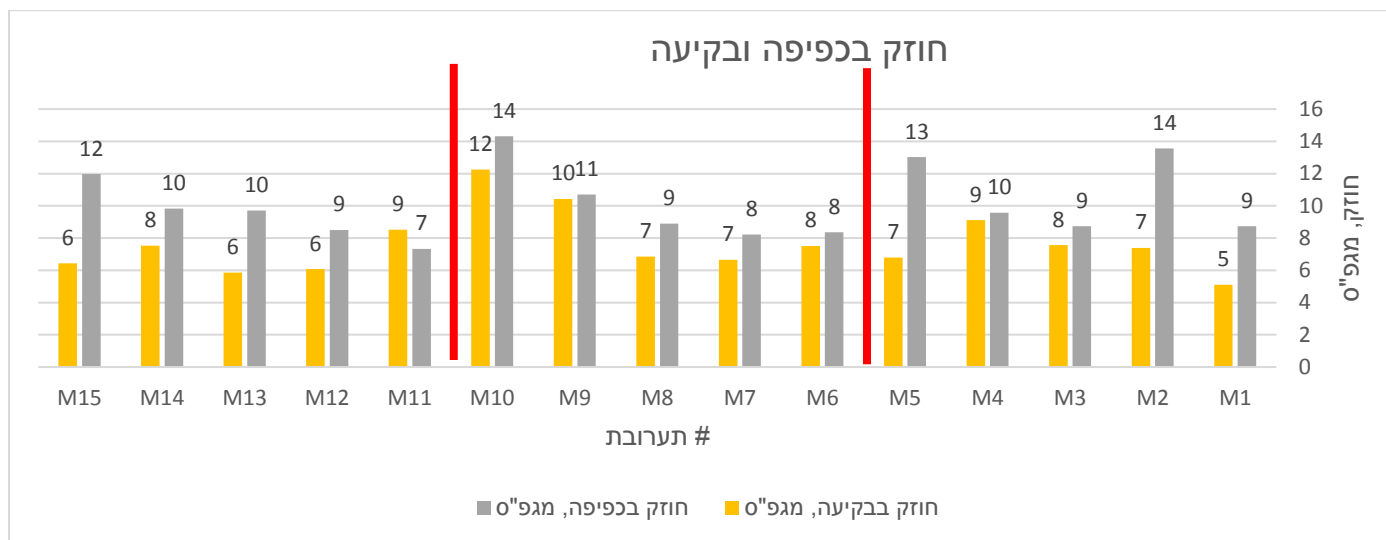
בנוסף להבדלים בחוזק הלחיצה עקב סוגי האגרגטים, לסיבים יש גם השפעה על חוזק הלחיצה של הבטון. חוזק הלחיצה בגיל 28 יום של התערובות השונות ללא סיבים היה: 77 מגפ"ס עבור תערובות עם אגרגטים מסוג עדש, 78 מגפ"ס עבור תערובות עם אגרגטים מסוג שומשום, ו- 70 מגפ"ס עבור תערובות רק עם חול (מסומן בקו מקווקו בציור).

חוזק הלחיצה הממוצע עבור התערובות עם עדש היה 82 מגפ"ס, 84 מגפ"ס עבור התערובות עם השומשום ו- 70.6 מגפ"ס עבור התערובות עם החול בלבד. זאת אומר שבממוצע, הסיבים תרמו 5-6 מגפ"ס בתערובות עם אגרגטים גסים. בתערובות עם חול, לעומת זאת, לא התקבלה תוספת חוזק.

היחס בין החוזק הלחיצה ב- 7 ימים ו- 28 יום היה בין 0.83 ו- 0.9.

4.4.2 תערובות עם חוזק בינוני : חוזק בכפיפה ובקיעה

בציור 17 מופיע החוזק בכפיפה ובקיעה עבור כול התערובות בקבוצה זאת.



ציור 17: תערובות חוזק בינוני: חוזק בבקיעה ובכפיפה

החוזק בבקיעה הוא בין 5.1 ו- 12.2 מגפ"ס והחוזק בכפיפה בין 7.3 ו- 14.4 מגפ"ס. קיים פיזור די גבוה ולא מגמתי בין התוצאות השונות. כפי שמצופה, החוזק בכפיפה הוא גבוה מהחוזק בבקיעה עבור רוב התערובות. רק עבור תערובות 11, החוזק בבקיעה גבוה מהחוזק בכפיפה.

4.4.3 השקיעה כפונקציה של מאמץ הכפיפה

שילוב של סיבים שונים במינונים משתנים משפיע על תכונות המשיכות והצפידות של החומר. עקומת השקיעה מאמץ זהו הכלי מתאים במיוחד כדי ללמוד מהי ההשפעה של כול אחד מהגורמים הללו על תכונות המערכת.

תכונות הסיבים (אורך, עיגון, מינון, חוזק) משפיעות על משיכות הבטון עקב התרומה השונה של כול סוג של סיב למערכת. הסיבים הקטנים מגשרים בין הסדקים הקטנים והסיבים הגדולים מגדילים את משיכות הבטון. במחקר זה נעשה השילוב של שני סוגי סיבי פלדה כדי לשפר את באופן מקסימאלי את משיכות וצפידות הבטון. שילוב זה מאפשר להגדיל גם את חוזק המתיחה וגם את העיבורים המקסימאליים של הבטון.

בנספח א' מופיעות עקומות השקיעה/מאמץ כפיפה עבור כול התערובות השונות. עבור כול תערובות (M1-M15) מופיעים הנתונים הבאים:

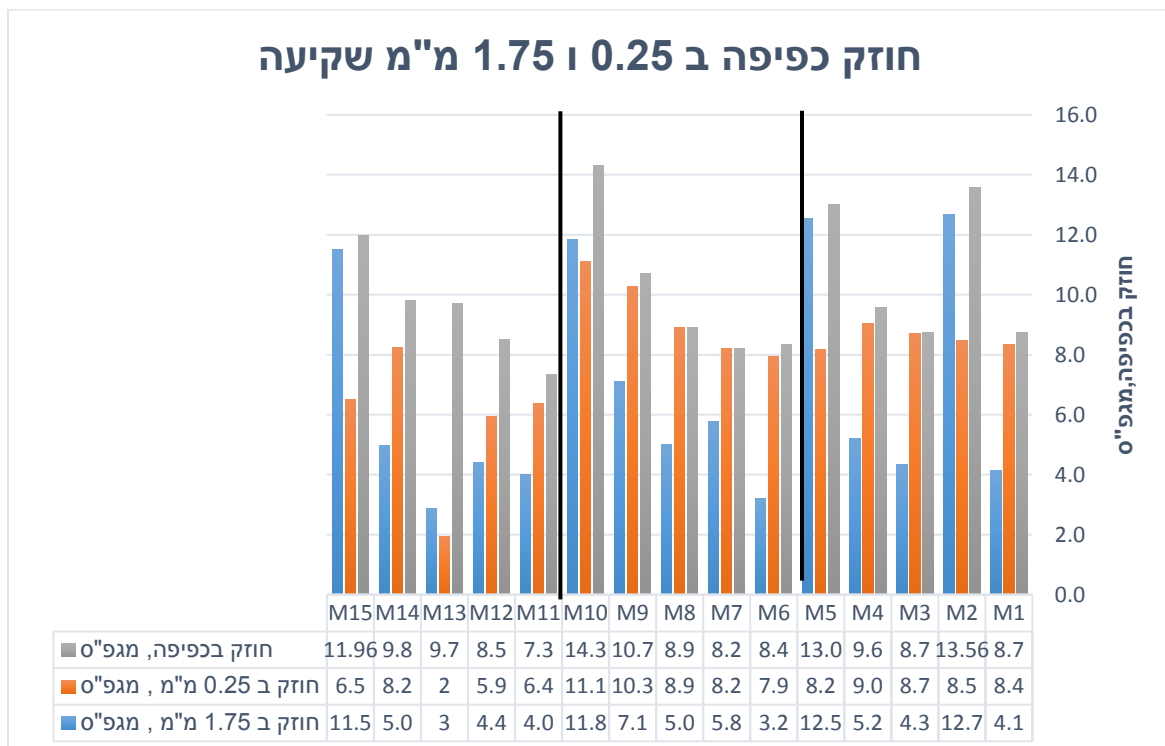
- עקומות שקיעה/מאמץ עבור שלושת המדגמים של 280*70*70 מ"מ
- עקומת שקיעה/מאמץ עבור המדגם בגודל 500*100*100 מ"מ (הדגמים מסומנים באות LL)
- מאמץ כפיפה מקסימאלי

- חוזק כפיפה עבור שקיעה של 0.25 מ"מ (L1)
- חוזק כפיפה עבור שקיעה של 1.75 מ"מ (L2)

הערך של L1 נקבע לפי עיבור של 3.5% עבור מצב גבולי של שירות, ו-L2 לפי עיבור של 25% עבור מצב גבולי של הרס.

עבור כול תערובות יש שני ציורים, כאשר בכול ציור מופיעה העקומה עד ערך מוגדר של שקיעה מקסימאלי. בציור הראשון מופיעות העקומות השונות עד שקיעה מקסימאלית של 7 מ"מ, כדי לשקף את כול נתוני הבדיקה ואת ההתנהגות הכוללת של המדגם במהלך כול הניסוי. הציור השני מתמקד בהתנהגות הפוסט אלסטית של המערכת, ולכן מתייחס לתחום הדפורמציה של עד 2 מ"מ.

סיכום של כל התוצאות בשקיעות השונות מופיע בציור 18 עבור כל התערובות, ובהמשך מופיע דיון בכל קבוצות חומרים בנפרד.

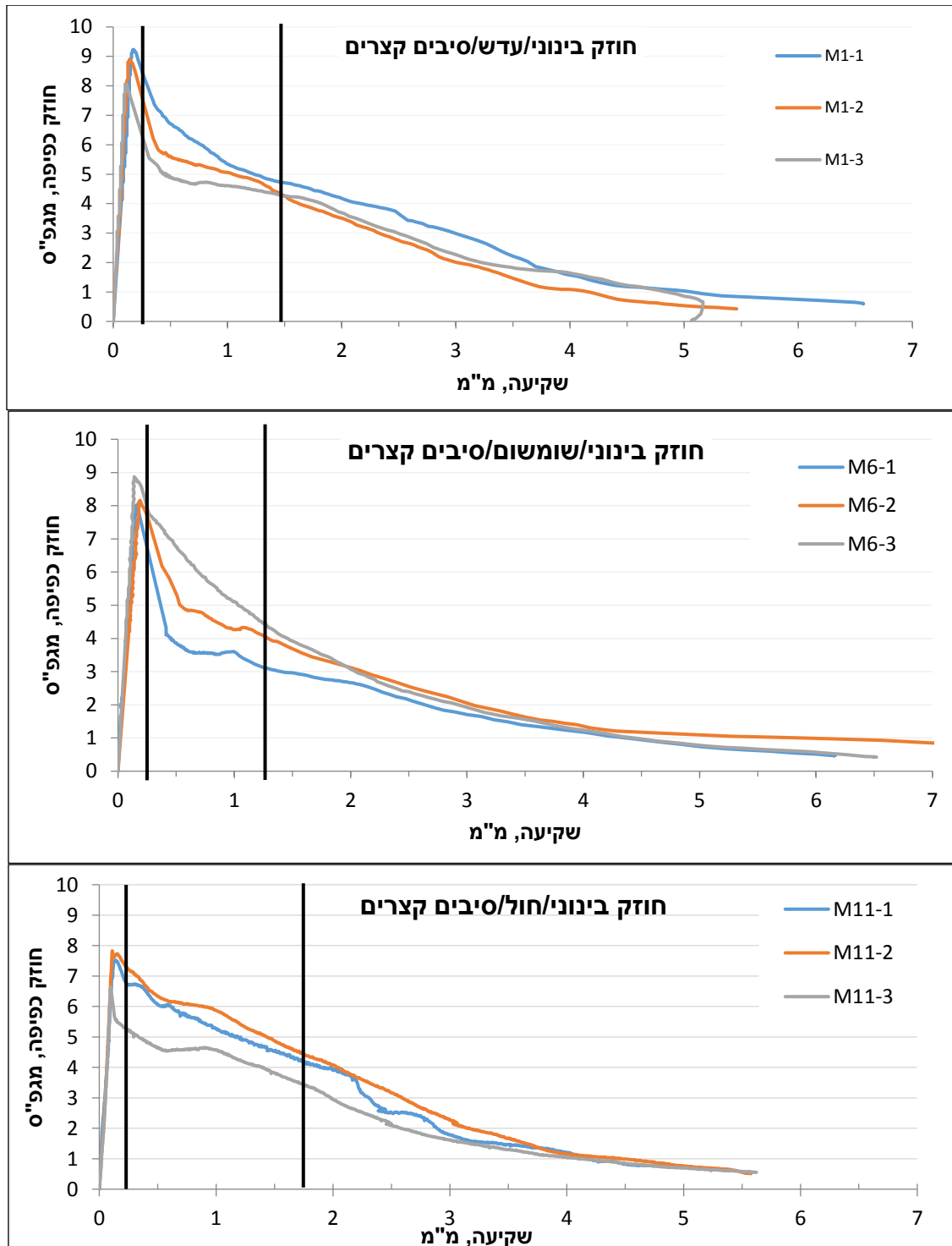


ציור 18 : חוזק הכפיפה המקסימאלי, בשקיעה של 0.25 מ"מ ובשקיעה של 1.75 מ"מ עבור כל התערובות (תערובות חוזק בינוני).

הסעיפים הבאים מתייחסים להתנהגות של סוגי התערובות השונות לפי סוגי הסיבים.

4.4.4 חוזק בינוני: תערובות רק עם סיבים קצרים (M1, M6, M11)

להלן עקומי מאמץ-שקיעה של שלושת התערובות עם חוזק בינוני הכוללות רק סיבים קצרים, כאשר כול תערובות מבוססת על הרכב אגרגטים שונה (ציור 19):



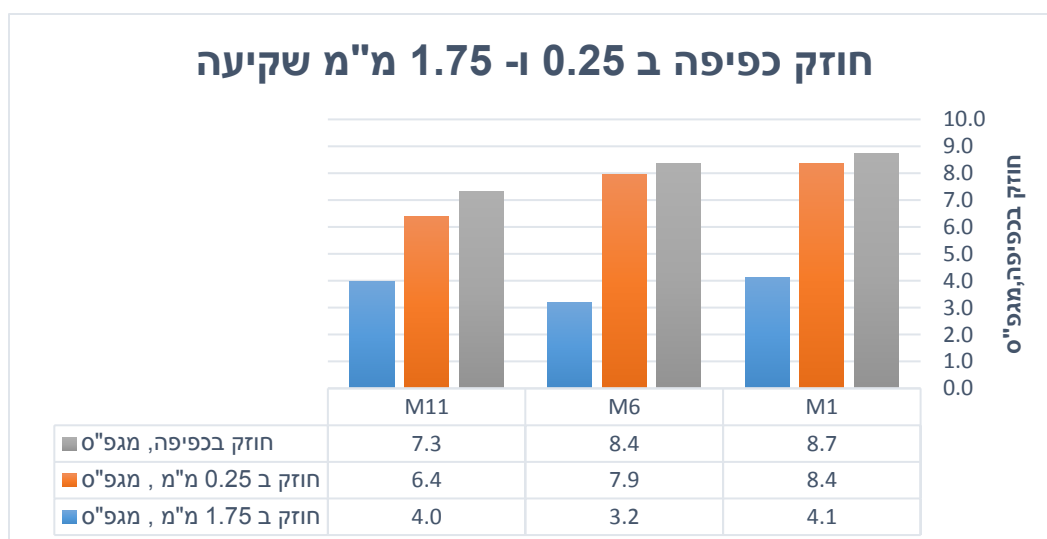
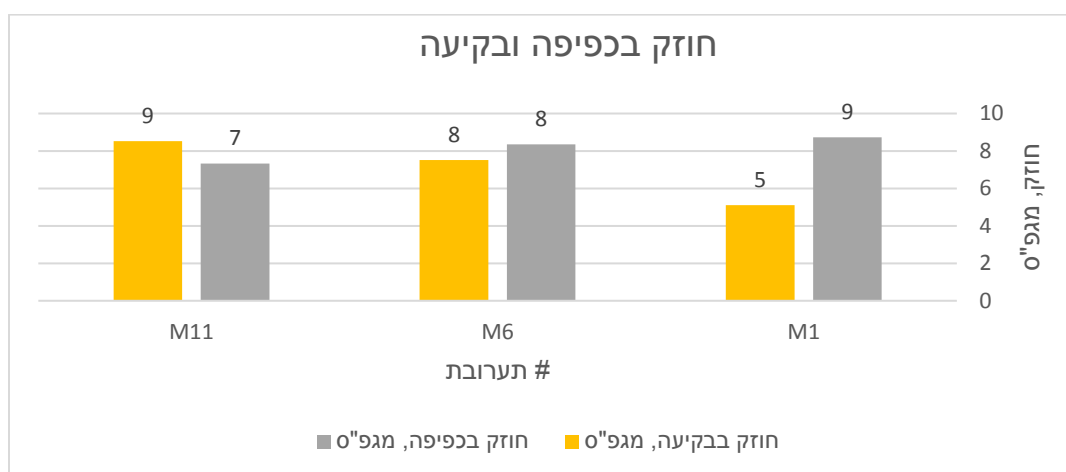
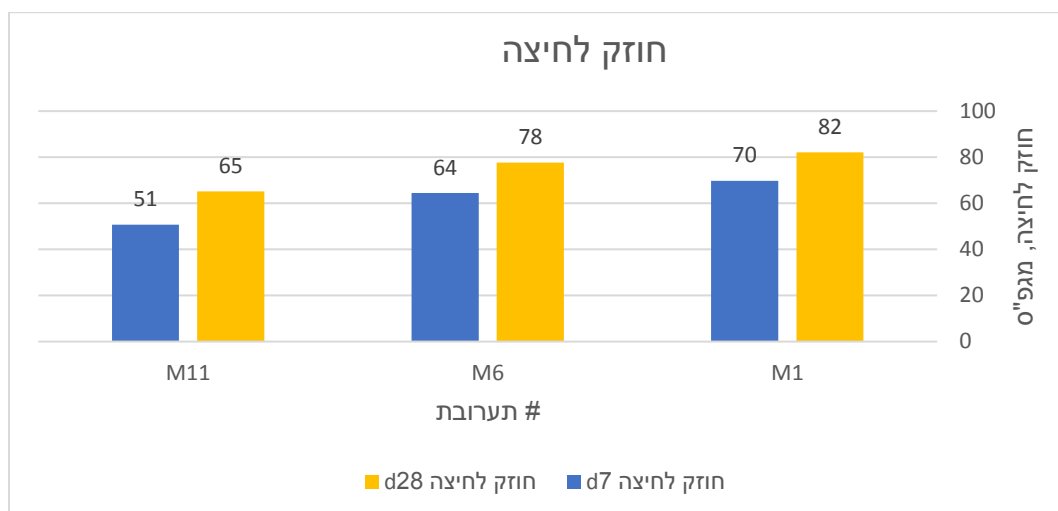
ציור 19 : עקומי שקיעה - מאמץ עבור תערובות עם חוזק בינוני וסיבים קצרים

להלן סיכום של התוצאות עבור שלושת התערובות הללו (טבלה 9):

טבלה 9: סיכום תוצאות בדיקות בתערובות עם סיבים קצרים בלבד.

תערובת רק עם חול	תערובות עם שומשום	תערובות עם עדש	
M11	M6	M1	מס
	55	128	בטון טרי - שקיעה, מ"מ
740			בטון טרי - שירוע, מ"מ
51	64	70	חוזק לחיצה d7, מגפ"ס
65	78	82	חוזק לחיצה d28, מגפ"ס
0.78	0.83	0.85	יחס חוזק 28/7
8.5	7.5	5.1	חוזק בבקיעה, מגפ"ס
7.3	8.4	8.7	חוזק בכפיפה, מגפ"ס
6.4	7.9	8.4	חוזק כפיפה ב- 0.25 מ"מ, מגפ"ס
4.0	3.2	4.1	חוזק כפיפה ב- 1.75 מ"מ, מגפ"ס
0.6	0.4	0.5	יחס L1/L2

להלן השוואה גרפית של התוצאות (ציור 20):



ציור 20 : סיכום תוצאות בדיקות חוזק שונות לתערובות המכילות סיבים קצרים בלבד

ניתן לסכם את התוצאות ביחס לתערובות עם סיבים קצרים כדלקמן :

חוזק לחיצה : חוזק הלחיצה של התערובת על בסיס חול היה יותר נמוך משמעותית מהתערובות עם אגרגטים גסים. חוזק הלחיצה הגבוה ביותר היה של התערובות עם האגרגט הגס הגדול ביותר.

יש לקחת בחשבון שהיחס מים צמנט של שלושת התערובות היה זהה, 0.40, אך תכולת הצמנט של התערובות עם האגרגטים הגסים הייתה 400 ק"ג, לעומת 626 ק"ג בתערובות רק עם חול.

חוזק בכפיפה : החוזק בכפיפה של התערובות עם האגרגטים הגסים (עדש ושומשום) היה גבוהה משל התערובות על בסיס חול.

חוזק בבקיעה : נראה שיש בעיה עם תוצאות הבקיעה. לא ברור עם זה עקב תהליך הבדיקה או עם המדגמים. החוזק בבקיעה של תערובת M1 הוא נמוך משמעותי משאר התערובות, אף על פי שהחוזק בכפיפה של המדגם הוא הגבוה ביותר. בתערובת M11, החוזק בבקיעה גבוה מהחוזק בכפיפה. גם זה לא סביר. האופי המיוחד של בדיקת הכפיפה מכתוב מאמצי לחיצה בכיוון אנכי הגורם להתפתחות מאמצי מתיחה ברוב החתך בציר האופקי. מצב מאמצים זה מתאים לבדיקות של חומר פריך כמו בטון ללא סיבים והופך לבעייתי בבדיקה של בטון סיבי. יתכן ותופעה זו מסבירה את התוצאות הבעייתיות שתוארו לעיל.

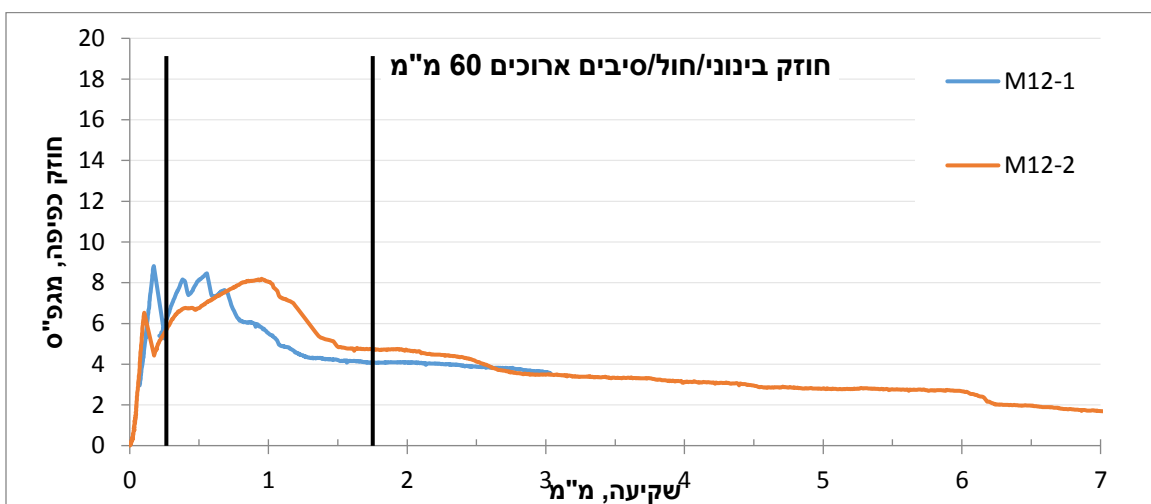
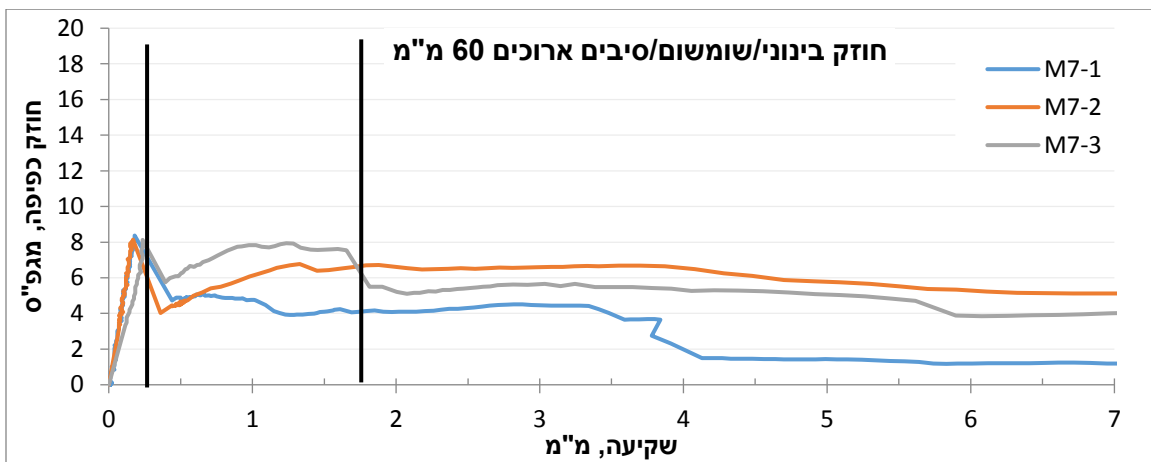
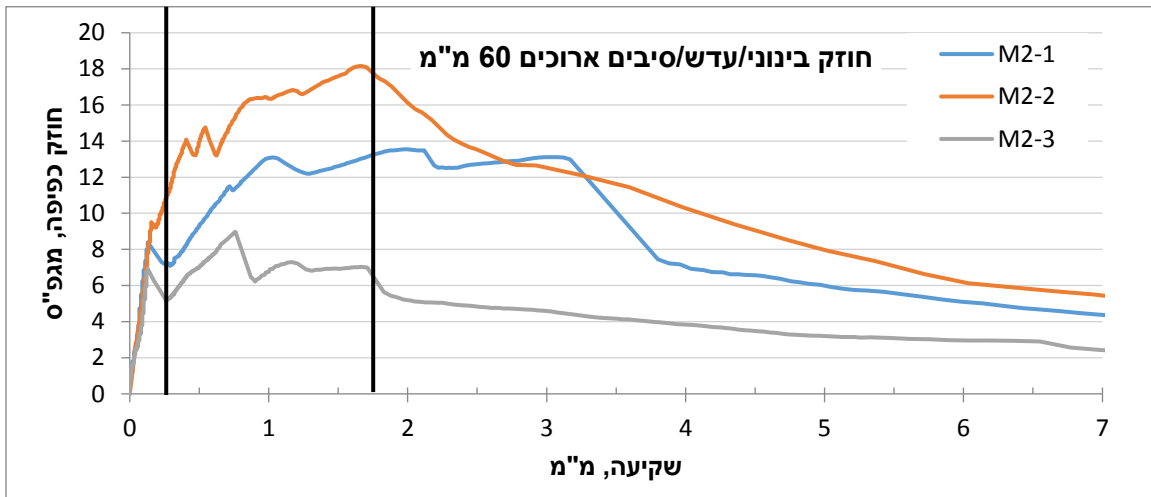
היחס בין L1/L2 הוא נמוך, עם ערכים נמוכים מ 0.7 עבור שלושת התערובות. השימוש בסיבים קצרים במינון של 150 ק"ג למ"ק (2% מנפח התערובות), שיפר משמעותית את החוזק בכפיפה של הבטון, אך השיפור במשיכות הוא נמוך בהשוואה למתקבל בתערובות עם סיבים הארוכים.

בכל התערובות ההתנהגות אחר היווצרות הסדק הראשון הייתה נחותה. בכל התערובות נמצאה ירידה בחוזק הכפיפה לאחר היווצרות הסדק הראשון ולאחריה ירידה מהירה יחסית בחוזק הכפיפה כשהכפף גדל. הירידה הראשונה אחרי היווצרות הסדק הראשון הייתה קטנה יותר בתערובות עם חול בלבד.

4.4.5 חוזק בינוני : תערובות עם סיבים ארוכים של 60 מ"מ 5D (M2, M7, M12)

להלן סיכום עקומי חוזק כפיפה - שקיעה של שלושת התערובות עם חוזק בינוני הכוללות רק סיבים ארוכים של 60 מ"מ מסוג 5D, כאשר כול תערובות מבוססת על הרכב אגרגטים שונה :

- M2 – תערובות האגרגטים כוללת אגרגט מסוג עדש
- M7 - תערובות האגרגטים כוללת אגרגט מסוג שומשום
- M12 – תערובות האגרגטים כוללת רק חול טבעי



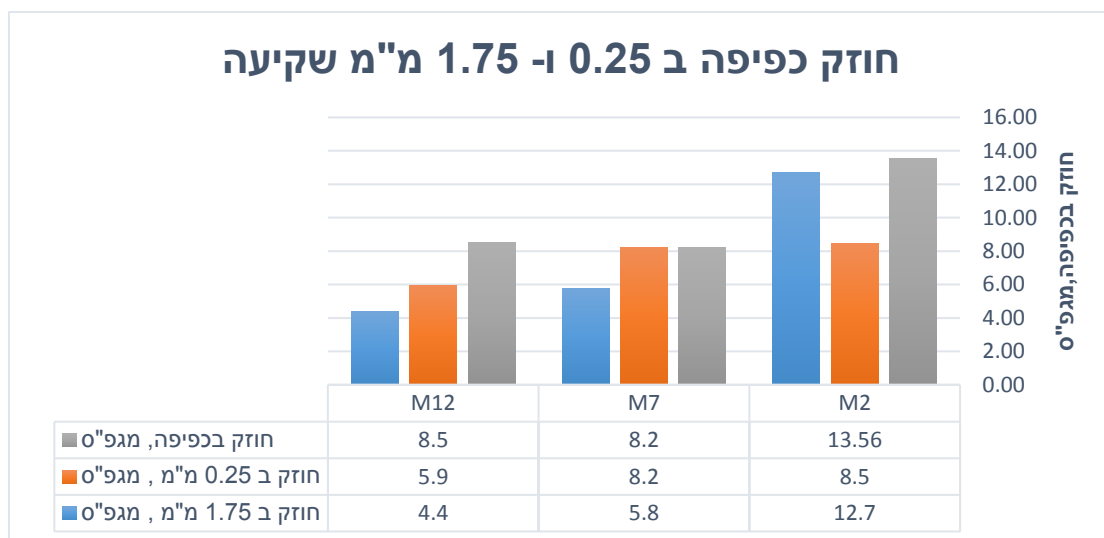
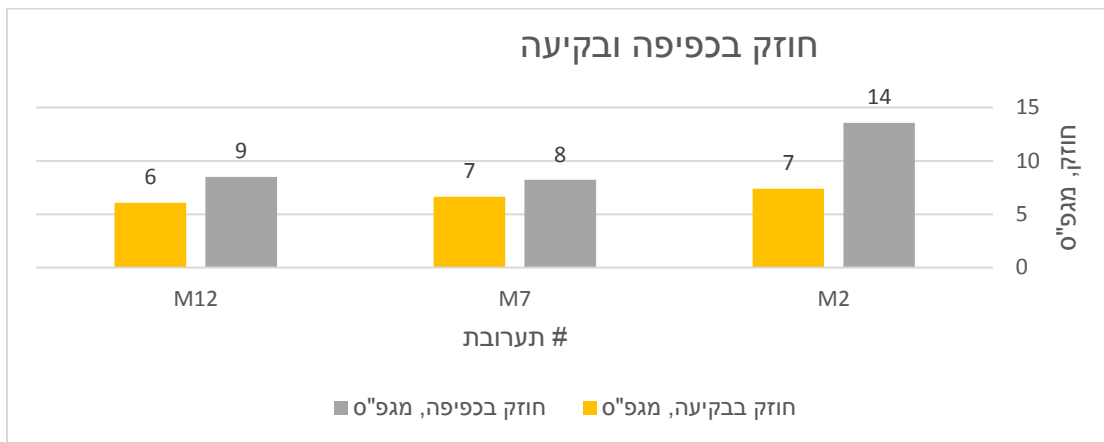
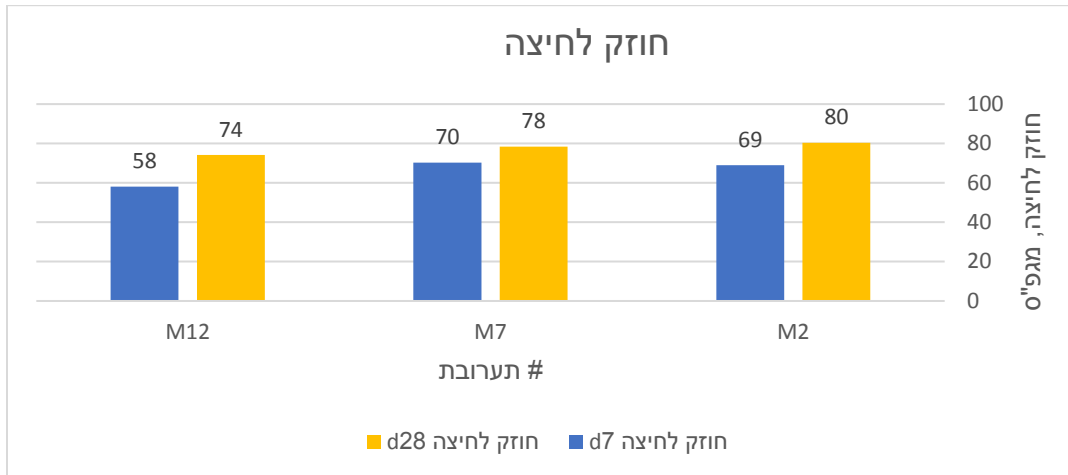
ציור 21 - עקומי שקיעה - מאמץ עבור תערובות עם חוזק בינוני וסיבים ארוכים של 60 מ"מ

להלן סיכום של התוצאות עבור שלושת התערובות הללו (טבלה 10):

טבלה 10: סיכום תוצאות בדיקות בתערובות עם סיבים 60 מ"מ 5D בלבד.

תערובת רק עם חול	תערובות עם שומשום	תערובות עם עדש	
M12	M7	M2	מס
	124	177	בטון טרי - שקיעה, מ"מ
780			בטון טרי - שירוע, מ"מ
58	70	69	חוזק לחיצה d7, מגפ"ס
74	78	80	חוזק לחיצה d28, מגפ"ס
0.78	0.90	0.86	יחס חוזק 28/7
6.1	6.6	7.4	חוזק בבקיעה, מגפ"ס
8.5	8.2	13.5	חוזק בכפיפה, מגפ"ס
5.9	8.2	8.5	חוזק ב- 0.25 מ"מ, מגפ"ס
4.4	5.8	12.7	חוזק ב- 1.75 מ"מ, מגפ"ס
0.7	0.7	1.5	יחס L1/L2

להלן השוואה גרפית של התוצאות (ציור 21):



ציור 21: סיכום תוצאות בדיקות חוזק שונות לתערובות המכילות סיבים 60 מ"מ 5D בלבד.

ניתן לסכם את התוצאות ביחס לתערובות עם סיבים ארוכים של 60 מ"מ 5D כדלקמן :

חוזק לחיצה – אין הבדלים משמעותיים בין שתי התערובות עם האגרגטים הגסים. חוזק הלחיצה של התערובות עם החול היה נמוך במקצת ביחס לשתי התערובות האחרות.

החוזק בכפיפה של התערובות עם האגרגט מסוג עדש היה משמעותית יותר גבוהה מזה של התערובות עם השומשום והחול.

יש עלייה משמעותי במשיכות של התערובות עם אגרגטים מסוג עדש. היחס בין הוא 1.5.

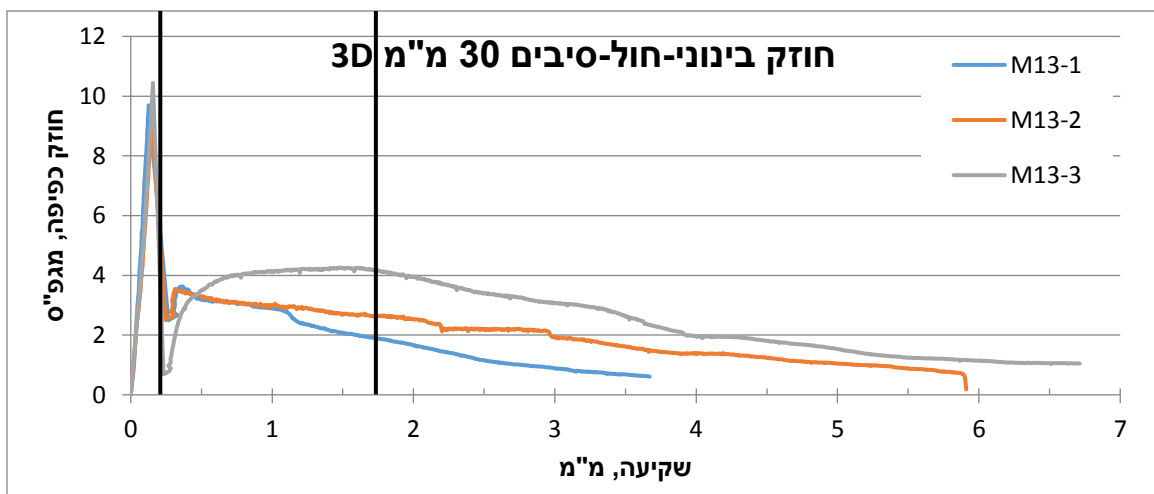
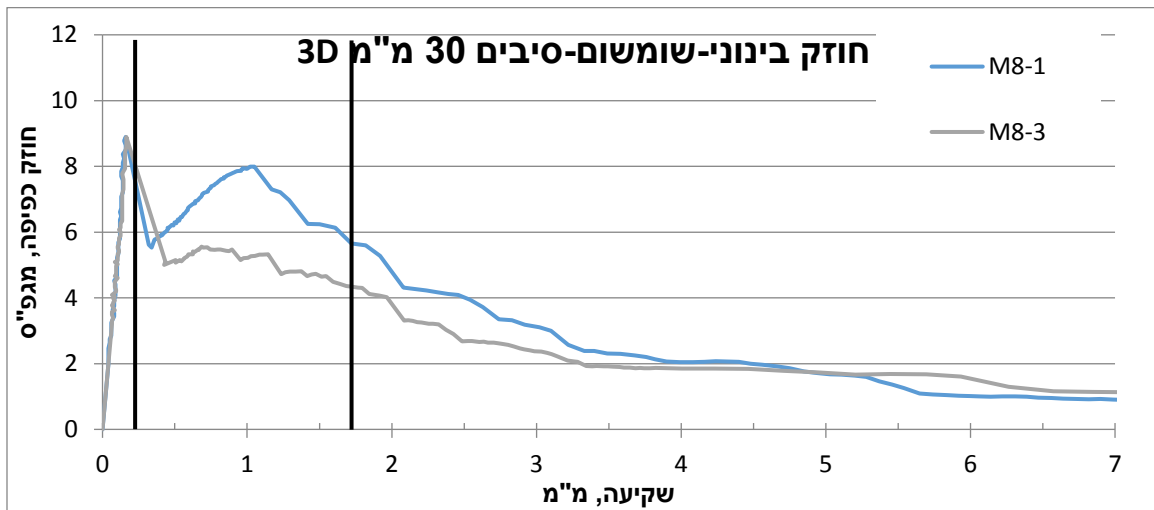
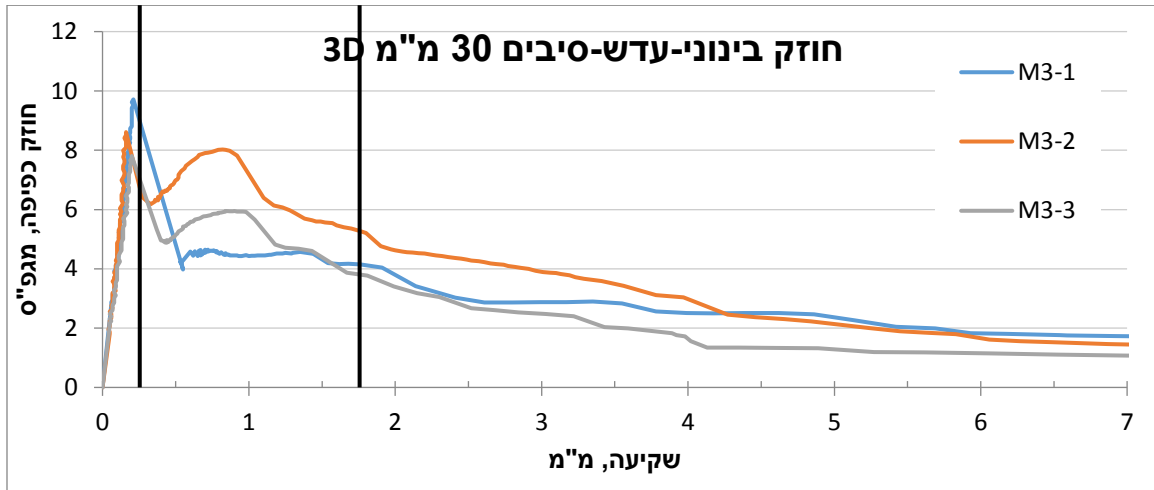
השילוב של סיבים ארוכים של 60 מ"מ ביחד עם אגרגטים גסים מסוג עדש שיפר באופן משמעותי את חוזק המתיחה ואת משיכות הבטון.

בכל התערובות ההתנהגות אחר היווצרות הסדק הראשון הייתה משופרת. בתערובות עם אגרגט עדש נמצאה עליה משמעותית בחוזק הכפיפה אחרי הסדק הראשון דבר שהוליך ליחס L2/L1 גדול מ- 1. בתערובות האחרות נשמר חוזק הכפיפה בערך באותה רמה כמו זו של הסדק הראשון.

4.4.6 חוזק בינוני: תערובות עם סיבים ארוכים של 30 מ"מ 3D (M3,M8,M13)

להלן עקומי שקיעה/מאמץ של שלושת התערובות עם חוזק בינוני הכוללות רק סיבים ארוכים של 30 מ"מ (ציור 22). כול תערובת מבוססת על הרכב אגרגטים שונה :

- M3 – תערובות האגרגטים כוללת אגרגט מסוג עדש
- M8 - תערובות האגרגטים כוללת אגרגט מסוג שומשום
- M13 – תערובות האגרגטים כוללת רק חול טבעי



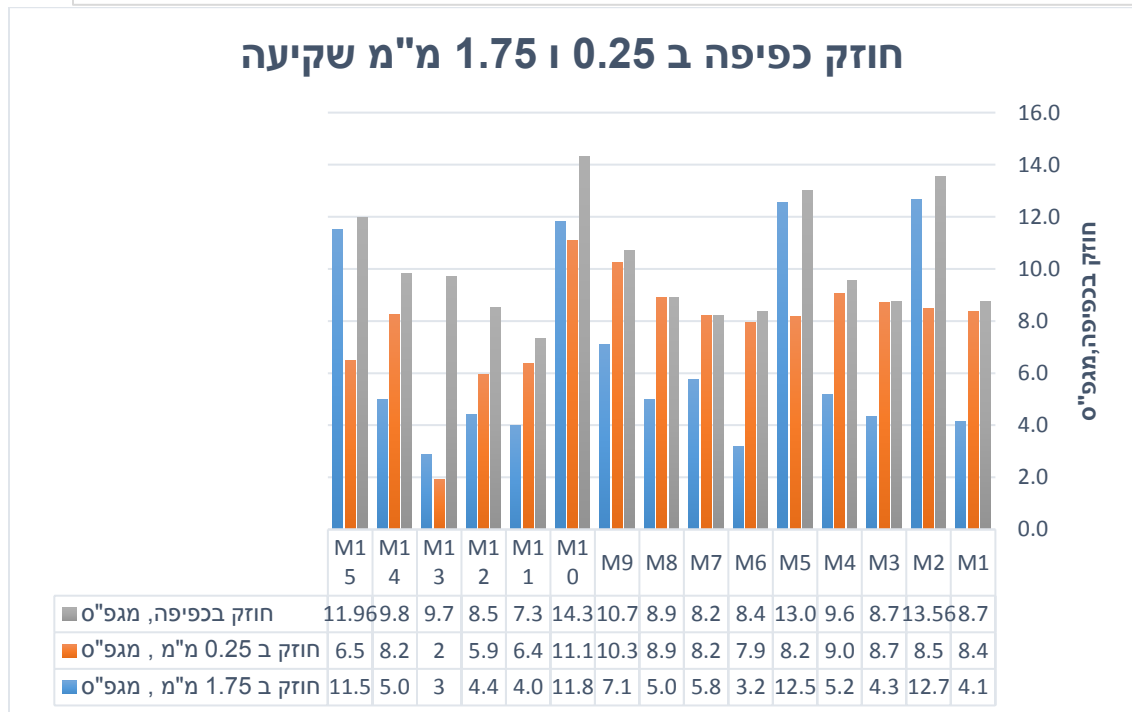
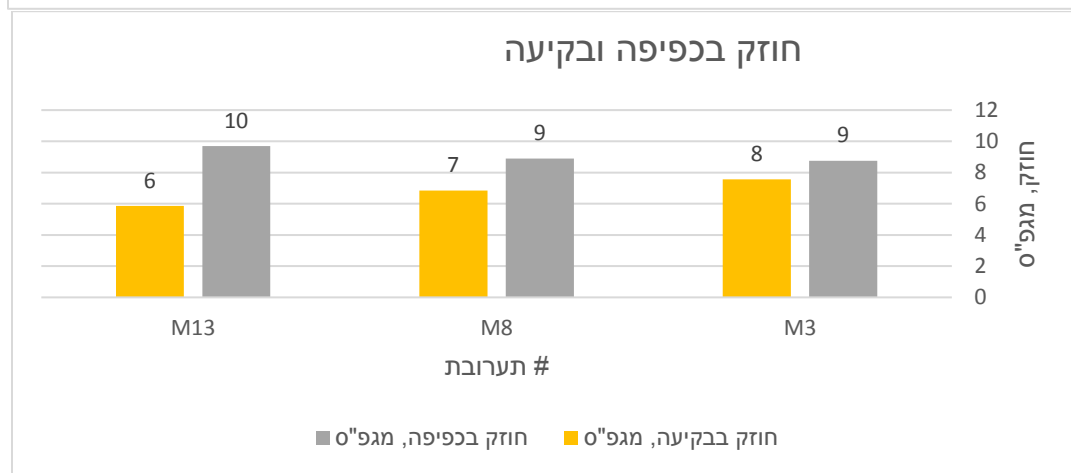
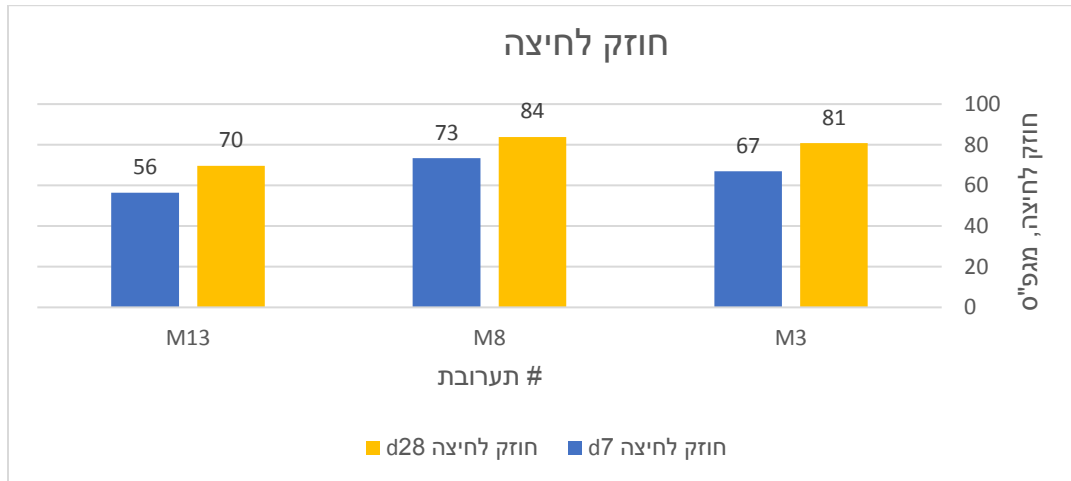
ציור 22: עקומי שקיעה - מאמץ עבור תערובות עם חוזק בינוני וסיבים ארוכים של 30 מ"מ 3D

להלן סיכום של התוצאות עבור שלושת התערובות הללו (טבלה 11) :

טבלה 11 : סיכום תוצאות בדיקות בתערובות עם סיבים 30 מ"מ 3D בלבד

תערובת רק עם חול	תערובות עם שומשום	תערובות עם עדש	
M13	M8	M3	מס'
	102	198	בטון טרי - שקיעה, מ"מ
760		320	בטון טרי - שירוע, מ"מ
56	73	67	חוזק לחיצה d7, מגפ"ס
70	84	81	חוזק לחיצה d28, מגפ"ס
0.81	0.88	0.83	יחס חוזק 28/7
5.9	6.8	7.6	חוזק בבקיעה, מגפ"ס
9.7	8.9	8.7	חוזק בכפיפה, מגפ"ס
2.0	8.9	8.7	חוזק ב- 0.25 מ"מ , מגפ"ס
3.0	5.0	4.3	חוזק ב- 1.75 מ"מ , מגפ"ס
1.5	0.6	0.5	יחס L1/L2

להלן השוואה גרפית של התוצאות (ציור 23) :



ציור 23 : סיכום תוצאות בדיקות חוזק שונות לתערובות המכילות סיבים 30 מ"מ 3D בלבד

ניתן לסכם את התוצאות ביחס לתערובות עם סיבים ארוכים של 30 מ"מ :

חוזק לחיצה - אין הבדלים משמעותיים בין שתי התערובות עם האגרגטים הגסים. חוזק הלחיצה של התערובות עם החול היה נמוך ביחס לשתי התערובות האחרות בכ- 15%.

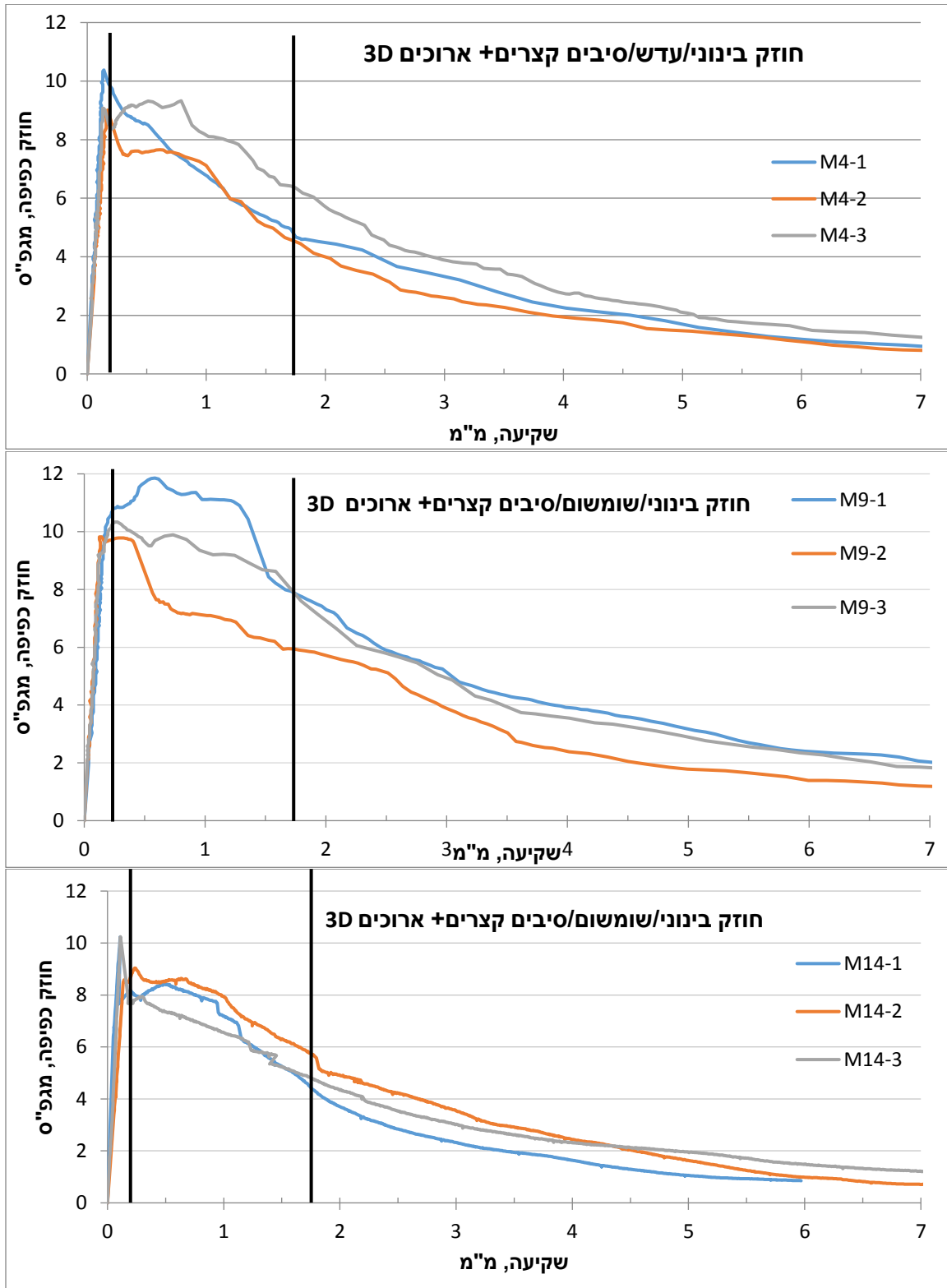
החוזק בכפיפה של התערובות עם החול היה קצת יותר גבוה ביחס לתערובות עם האגרגטים הגסים, אך החוזק ב- 0.25 מ"מ שקיעה, היה נמוך משמעותית בתערובות זאת בהשוואה לשתי התערובות האחרות.

הסיבים הארוכים משפרים את משיכות הבטון רק בתערובות עם אגרגטים גסים. חוזק הכפיפה ירד בכ- 40% אחרי היווצרות סדק ראשון בשתי התערובות עם האגרגטים הגסים, לאחר מכן עלה מעט וירד במתינות. לעומת זאת, בתערובת עם החול בלבד הירידה הייתה של כ- 70% עם עלייה קלה לאחר מכן ושמירה על חוזק נמוך זה בהמשך.

4.4.7 חוזק בינוני: תערובות עם סיבים ארוכים של 30 מ"מ וסיבים קצרים (M4,M9,M14)

להלן עקומי שקיעה/מאמץ של שלושת התערובות עם חוזק בינוני הכוללות 50 ק"ג סיבים ארוכים של 30 מ"מ ו- 100 ק"ג סיבים קצרים (ציור 24). כול תערובת מבוססת על הרכב אגרגטים שונה :

- M4 – תערובות האגרגטים כוללת אגרגט מסוג עדש
- M9 - תערובות האגרגטים כוללת אגרגט מסוג שומשום
- M14 – תערובות האגרגטים כוללת רק חול טבעי



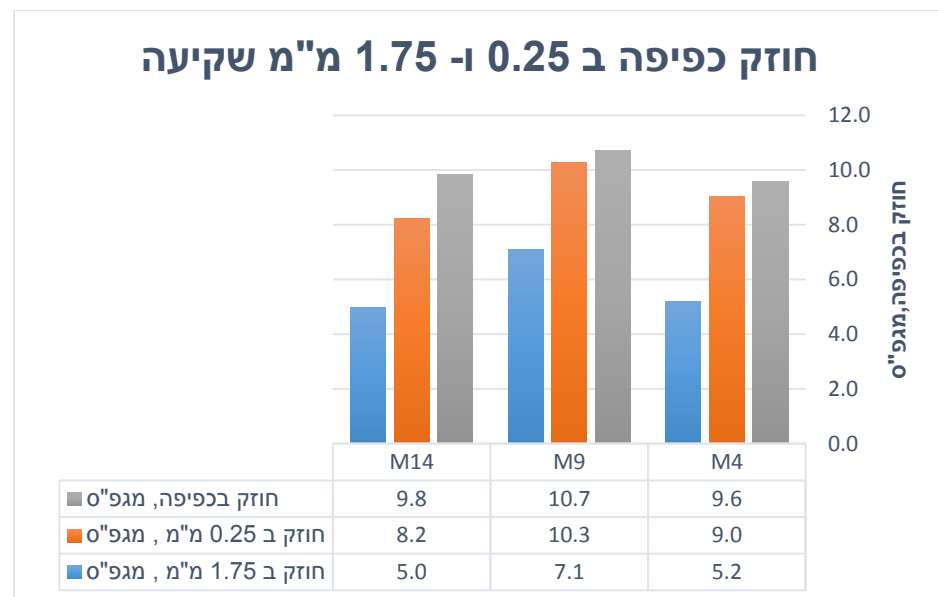
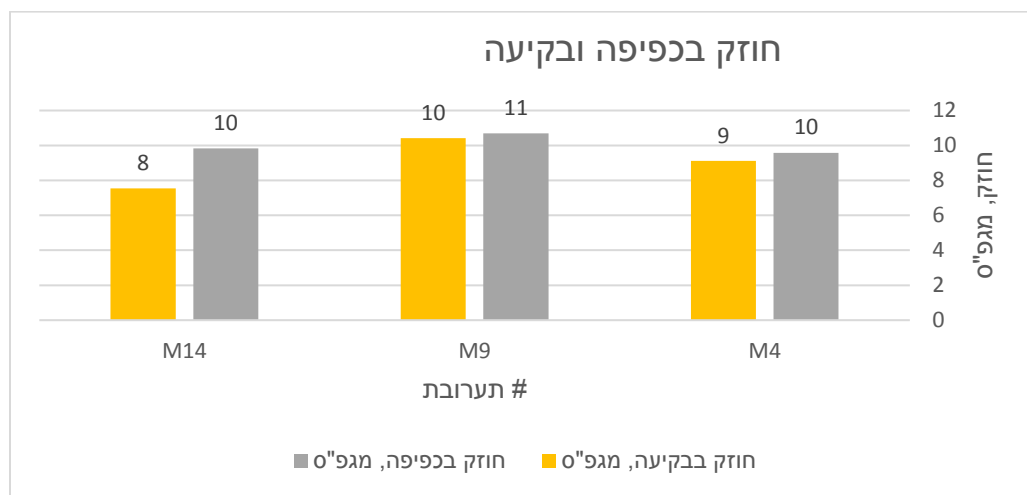
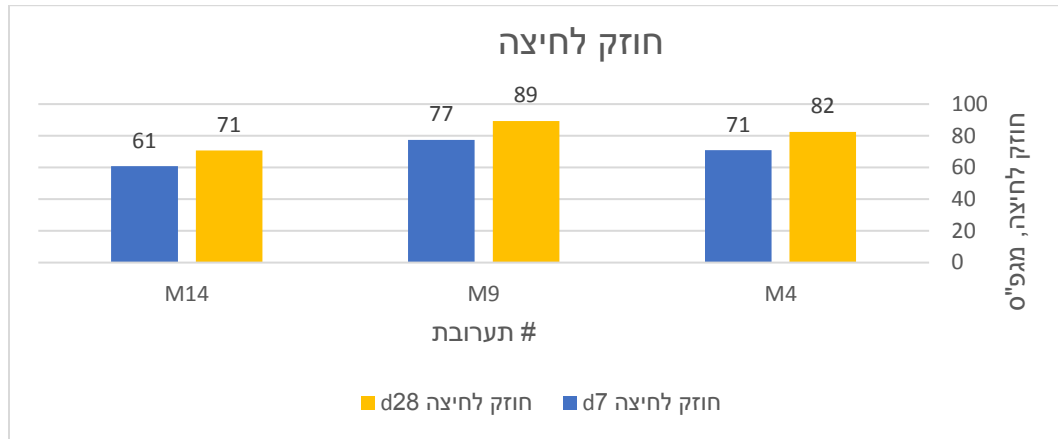
ציור 24: עקומי שקיעה - מאמץ עבור תערובות עם חוזק בינוני ותערובות סיבים ארוכים של 30 מ"מ 3D וסיבים קצרים.

להלן סיכום של התוצאות עבור שלושת התערובות הללו :

טבלה 12 : סיכום תוצאות בדיקות בתערובות עם סיבים 30 מ"מ 3D בלבד

תערובת רק עם חול	תערובות עם שומשום	תערובות עם עדש	
M14	M9	M4	מס
	27	68	שקיעה, מ"מ
800			שירוע, מ"מ
61	77	71	חוזק לחיצה d7, מגפ"ס
71	89	82	חוזק לחיצה d28, מגפ"ס
0.86	0.87	0.86	יחס חוזק 28/7
7.5	10.4	9.1	חוזק בבקיעה, מגפ"ס
9.8	10.7	9.6	חוזק בכפיפה, מגפ"ס
8.2	10.3	9.0	חוזק ב- 0.25 מ"מ , מגפ"ס
5.0	7.1	5.2	חוזק ב- 1.75 מ"מ , מגפ"ס
0.6	0.7	0.6	יחס L1/L2

להלן התוצאות בצורה גרפית (ציור 25) :



ציור 25: סיכום תוצאות בדיקות חוזק שונות לתערובות המכילות תערובת סיבים 30 מ"מ 3D עם סיבים קצרים.

ניתן לסכם את התוצאות ביחס לתערובות עם סיבים ארוכים של 30 מ"מ וסיבים קצרים:

חוזק לחיצה - אין הבדלים משמעותיים בין שתי התערובות עם האגרגטים הגסים. חוזק הלחיצה של התערובות עם החול היה נמוך ביחס לשתי התערובות האחרות.

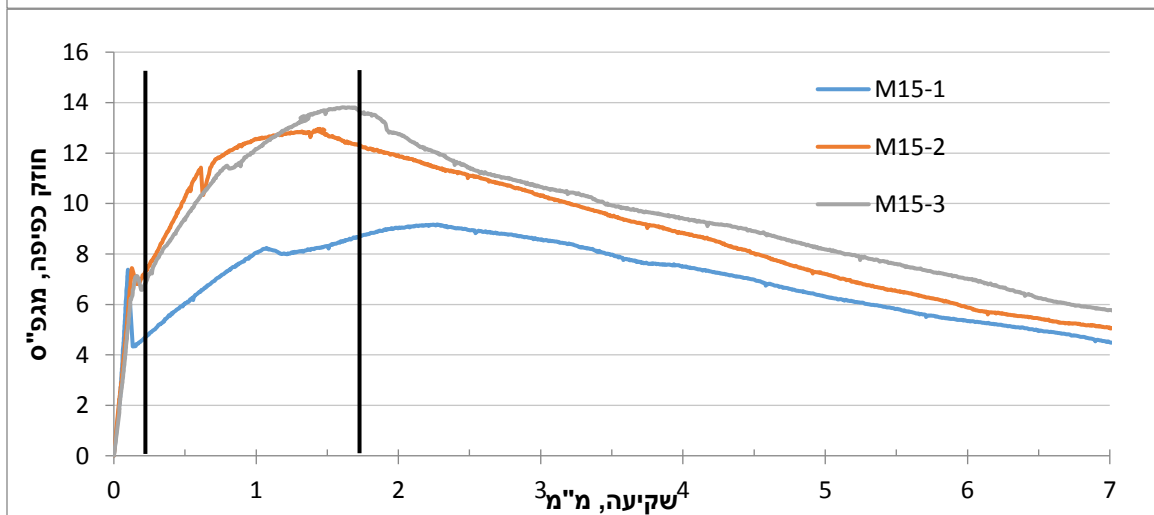
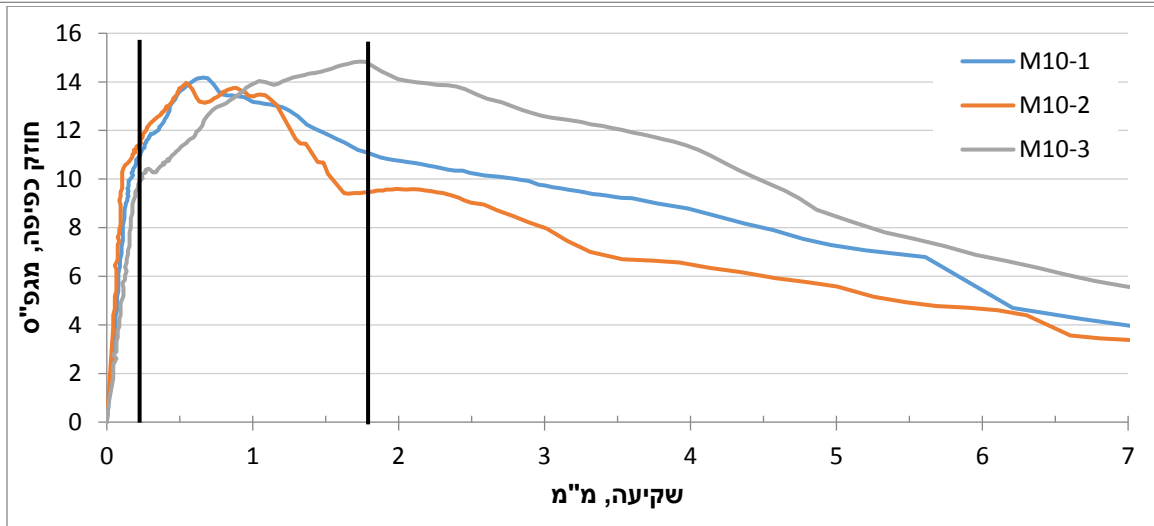
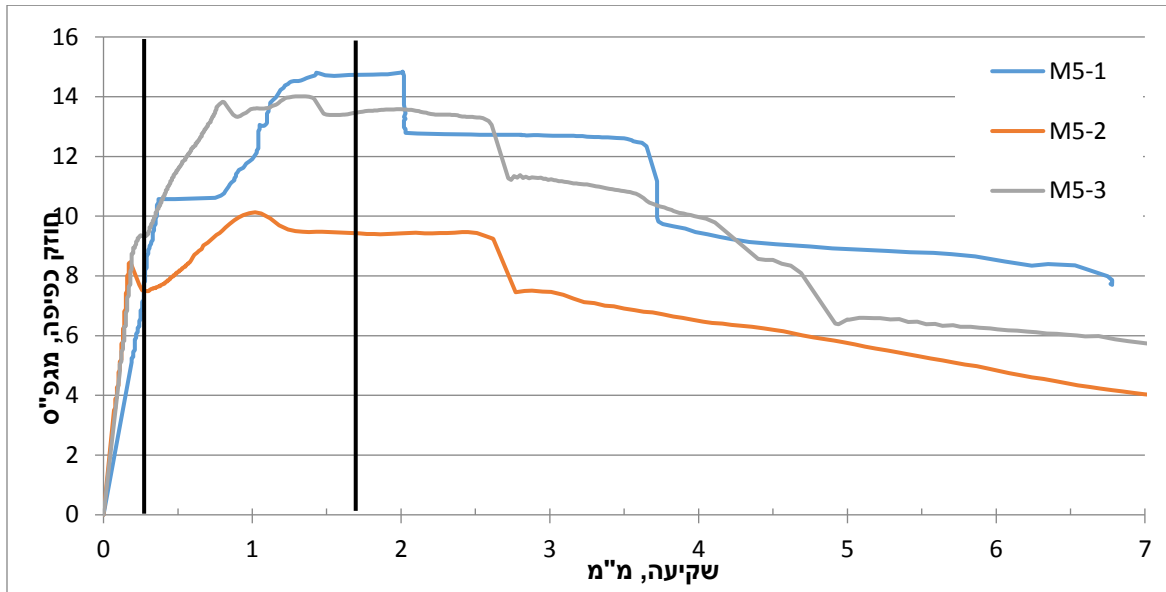
החוזק בכפיפה של שלושת התערובות דומה, עם ערכים בין 9.6 ו- 10.7 מגפ"ס.

שילוב של סיבים ארוכים וקצרים - הסיבים הארוכים משפרים באופן משמעותי את משיכות הבטון של שלושת התערובות, כולל התערובות רק עם חול (M14), לאחר היווצרות הסדק הראשון וירידה קלה התערובות המשיכו לשמור על החוזק תוך ירידה הדרגתית בחוזק הכפיפה עם העלייה בשקיעה.

4.4.8 חוזק בינוני: תערובות עם סיבים ארוכים של 60 מ"מ וסיבים קצרים (M5, M10, M15)

להלן העקומות שקיעה/מאמץ של שלושת התערובות עם חוזק בינוני הכוללות 50 ק"ג סיבים ארוכים של 60 מ"מ ו- 100 ק"ג סיבים קצרים (ציור 26). כול תערובת מבוססת על הרכב אגרגטים שונה:

- M5 – תערובות האגרגטים כוללת אגרגט מסוג עדש
- M10 - תערובות האגרגטים כוללת אגרגט מסוג שומשום
- M15 – תערובות האגרגטים כוללת רק חול טבעי



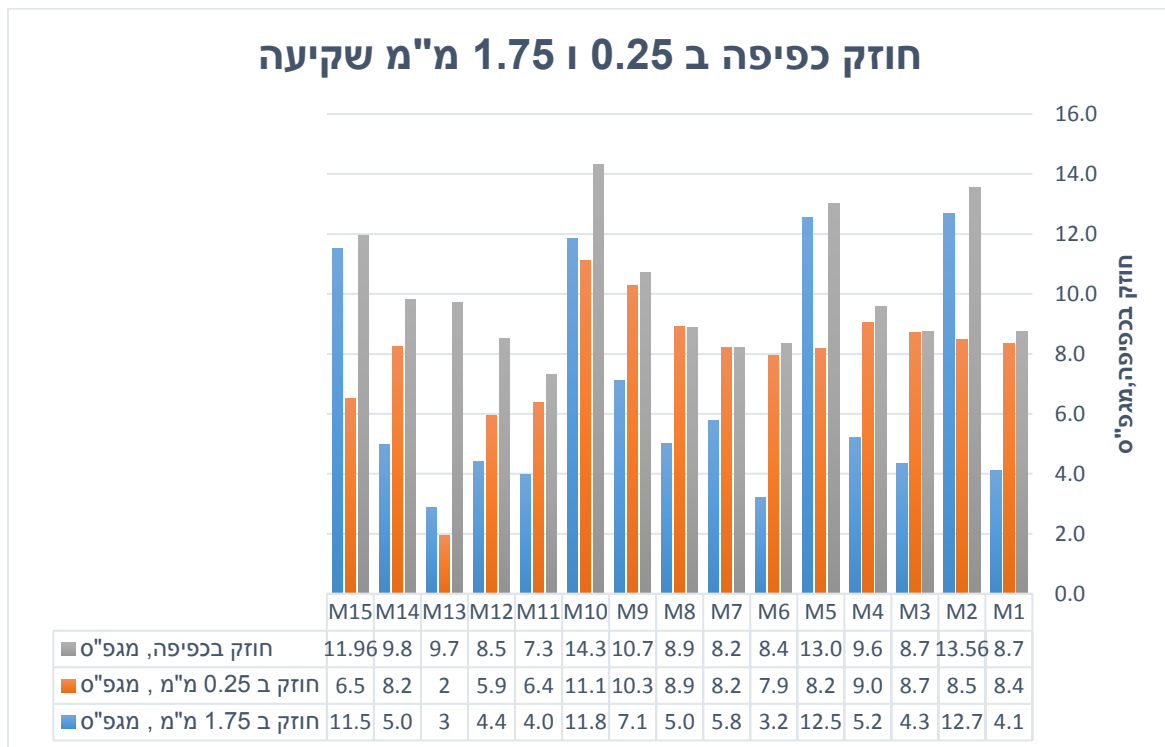
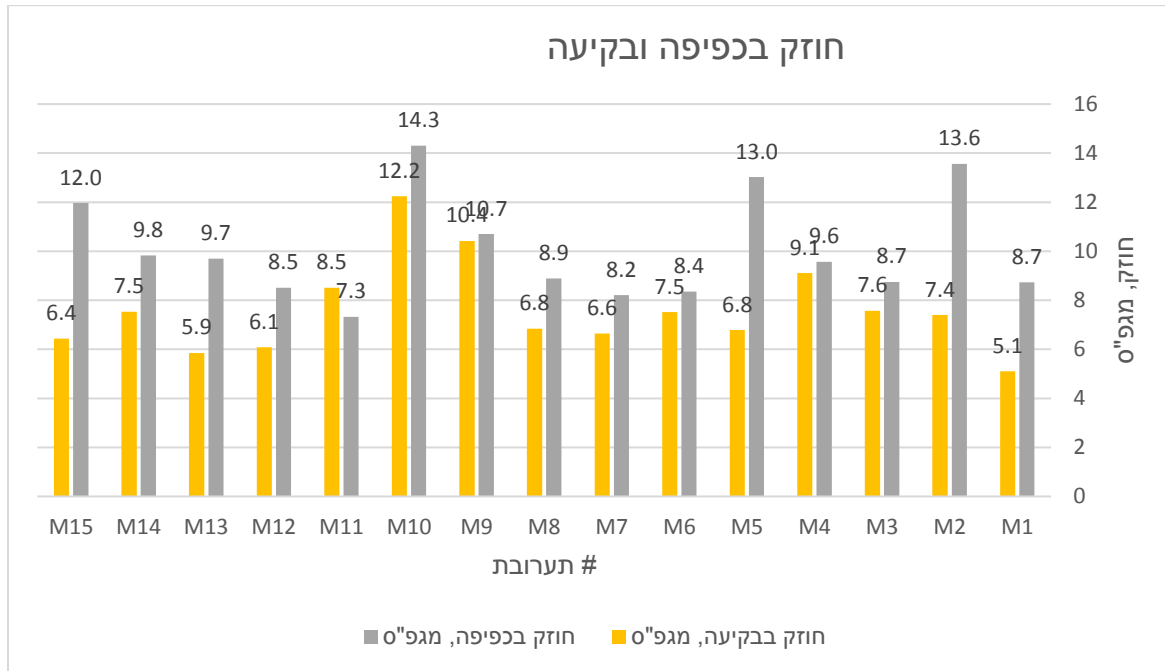
ציור 26 : עקומי שקיעה - מאמץ עבור תערובות עם חוזק בינוני ותערובות סיבים ארוכים של 60 מ"מ 3D וסיבים קצרים.

להלן סיכום של התוצאות עבור שלושת התערובות הללו (טבלה 13):

טבלה 13: סיכום תוצאות בדיקות בתערובות עם סיבים 60 מ"מ 3D בלבד

תערובות עם שומשום	תערובות עם עדש	תערובת רק עם חול	
M10	M5	M15	מס'
35	111		בטון טרי - שקיעה, מ"מ
		770	בטון טרי - שירוע, מ"מ
80	71	62	חוזק לחיצה d7, מגפ"ס
89	85	72	חוזק לחיצה d28, מגפ"ס
0.89	0.84	0.86	יחס חוזק 28/7
12.2	6.8	6.4	חוזק בבקיעה, מגפ"ס
14.3	13.0	11.9	חוזק בכפיפה, מגפ"ס
11.1	8.2	6.5	חוזק ב- 0.25 מ"מ, מגפ"ס
11.8	12.5	11.5	חוזק ב- 1.75 מ"מ, מגפ"ס
1.1	1.5	1.8	יחס L1/L2

להלן התוצאות בצורה גרפית (ציור 27):



ציור 27 : סיכום תוצאות בדיקות חוזק שונות לתערובות המכילות תערובת סיבים 60 מ"מ 3D עם סיבים קצרים.

ניתן לסכם את התוצאות ביחס לתערובות עם סיבים ארוכים של 60 מ"מ וסיבים קצרים כדלקמן :

חוזק לחיצה - אין הבדלים משמעותיים בין שתי התערובות עם האגרגטים הגסים. חוזק הלחיצה של התערובות עם החול היה נמוך ביחס לשתי התערובות האחרות.

החוזק בכפיפה של שלושת התערובות דומה, עם ערכים בין 12 ו- 14.5 מגפ"ס כאשר כל התערובות הראו שיפור בחוזק אחרי התפתחות הסדק הראשון.

שילוב של סיבים ארוכים וקצרים הסיבים הארוכים משפרים באופן משמעותי את משיכות הבטון של שלושת התערובות, כולל התערובות רק עם חול (M15).

עבור שלושת התערובות, החוזק בכפיפה ב- 1.75 מ"מ גדול מהחוזק בכפיפה ב- 0.25 מ"מ, עקב התפתחות strain hardening.

4.5 תוצאות עבור תערובות בטון עם חוזק גבוה

חלק זה של הדוח כולל את התוצאות עבור התערובות עם חוזק גבוה. גם עבור הבטון עם חוזק גבוה נעשו 15 תערובות, שכללו חמש וריאציות שונות תוך שילוב של הסיבים השונים.

התוצאות של הבדיקות השונות מרוכזות בטבלה 14, טבלה 15 וטבלה 16 עבור תערובות הכוללות עדש, שומשום או חול בלבד, בהתאמה, וכוללות : חוזק הבטון בלחיצה בגיל 7 ו- 28 סטיית תקן עבור חוזק לחיצה ב- 28 יום, חוזק הבטון בבקיעה וכפיפה ב- 28 יום, סטיית תקן עבור חוזק הבקיעה והכפיפה, חוזק הבטון בכפיפה עבור שקיעה של 0.25 מ"מ ו- 1.75 מ"מ (L1 ו- L2), והיחס בין L1/L2.

טבלה 14 : בטון בחוזק גבוה : ריכוז תוצאות בדיקות של התערובות שכללו אגרגט גס מסוג עדש

בטון חוזק גבוה תערובת עם עדש					
H5	H4	H3	H2	H1	מס
124.2	124.2	111.3	111.3	123.5	חוזק לחיצה fc7d מגפ"ס
146.3	135.8	125.0	118.3	151.1	חוזק לחיצה fc28d מגפ"ס
3.8	2.8	5.4	4.8	4.0	חוזק לחיצה fc28d סטיית תקן, מגפ"ס
0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	יחס חוזק 28/7
12.4	14.2	11.0	8.4	11.7	חוזק בבקיעה, מגפ"ס
0.4	3.3	1.0	1.7	0.5	חוזק בקיעה סטיית תקן, מגפ"ס
23.6	18.4	16.4	19.8	16.6	חוזק בכפיפה, מגפ"ס
3.2	2.0	0.5	1.2	1.1	חוזק כפיפה סטיית תקן, מגפ"ס
15.7	16.4	13.3	9.7	13.3	חוזק ב- 0.25 מ"מ , מגפ"ס
20.3	9.8	5.8	16.7	5.9	חוזק ב- 1.75 מ"מ , מגפ"ס
1.3	0.6	0.4	1.7	0.4	יחס L1/L2

טבלה 15 : בטון בחוזק גבוה : ריכוז תוצאות בדיקות של התערובות שכללו אגרגט גס מסוג שומשום

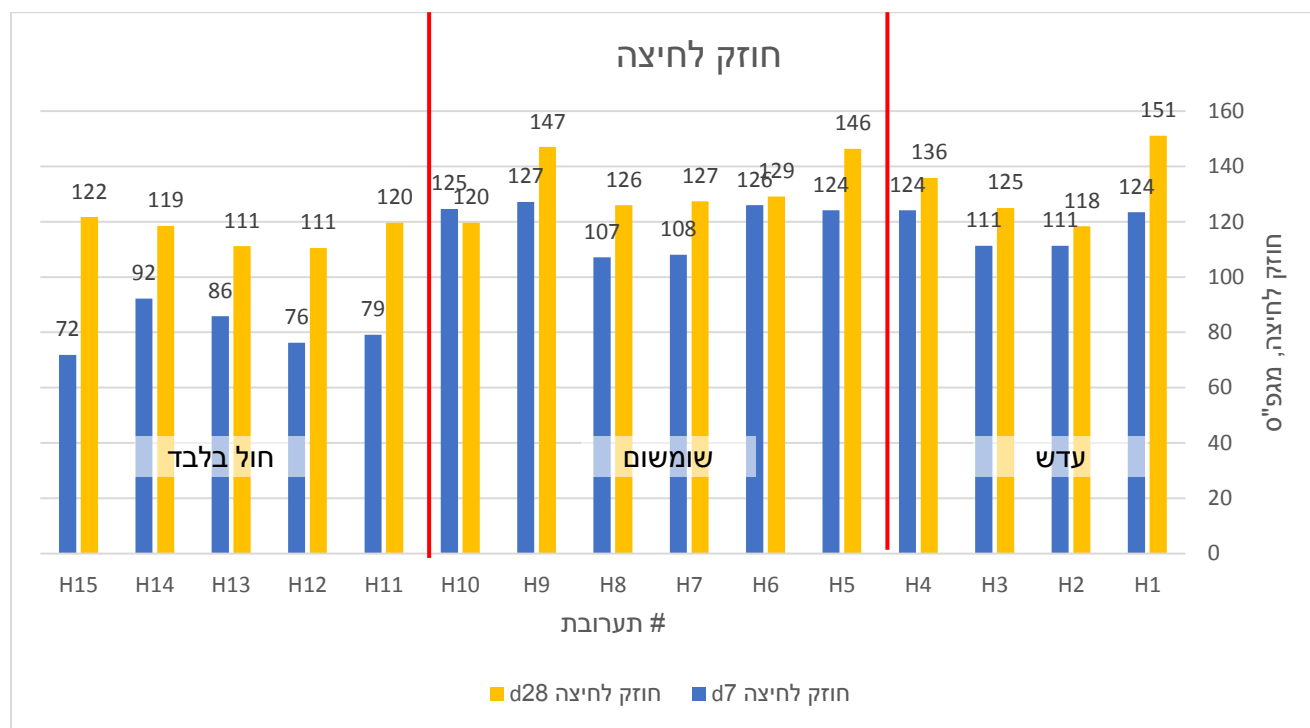
בטון חוזק גבוה תערובת עם שומשום					
H10	H9	H8	H7	H6	מס
124.7	127.1	107.2	108.0	126.0	חוזק לחיצה fc7d מגפ"ס
119.7	147.0	126.0	127.3	129.2	חוזק לחיצה fc28d מגפ"ס
1.8	6.7	1.3	3.8	2.8	חוזק לחיצה fc28d סטיית תקן, מגפ"ס
1.0	0.9	0.9	0.8	1.0	יחס חוזק 28/7
17.8	14.4	10.0	13.0	10.4	חוזק בבקיעה, מגפ"ס
2.1	3.0	0.8	1.0	0.3	חוזק בקיעה סטיית תקן, מגפ"ס
27.6	16.7	15.2	25.8	16.1	חוזק בכפיפה, מגפ"ס
1.2	1.6	0.9	6.1	0.9	חוזק כפיפה סטיית תקן, מגפ"ס
19.2	13.9	8.6	17.1	15.8	חוזק ב- 0.25 מ"מ, מגפ"ס
25.8	11.7	5.4	20.2	10.0	חוזק ב- 1.75 מ"מ, מגפ"ס
1.3	0.8	0.6	1.2	0.6	יחס L1/L2

טבלה 16 : בטון חוזק גבוה : ריכוז תוצאות בדיקות של התערובות שכללו רק חול

בטון חוזק גבוה תערובת עם חול					
H15	H14	H13	H12	H11	מס
72	92	86	76	79.2	חוזק לחיצה fc7d מגפ"ס
122	139	111	111	119.7	חוזק לחיצה fc28d מגפ"ס
2.8	35.7	0.8	0.8	2.2	חוזק לחיצה fc28d סטיית תקן, מגפ"ס
0.59	0.66	0.77	0.69	0.7	יחס חוזק 28/7
14	12	12	15	10.5	חוזק בבקיעה, מגפ"ס
0	1	1	1	1.9	חוזק בקיעה סטיית תקן, מגפ"ס
13	13	13	14	14.8	חוזק בכפיפה, מגפ"ס
0.90	2.53	1.32	1.2	1.2	חוזק כפיפה סטיית תקן, מגפ"ס
8.9	8.1	4	7.3	9.0	חוזק ב- 0.25 מ"מ, מגפ"ס
7.4	3.2	2	4.5	5.4	חוזק ב- 1.75 מ"מ, מגפ"ס
0.8	0.4	0.5	0.6	0.6	יחס L1/L2

4.5.1 תערובות עם חוזק גבוה : חוזק לחיצה

בציור 28 אפשר לראות את תוצאות חוזק הלחיצה עבור 15 התערובות עם חוזק גבוה בגיל 7 ימים ובגיל 28 יום.



ציור 28: סיכום חוזק לחיצה בגילים 7 ו-28 יום בתערובות בעלות חוזק גבוה

באופן כללי, חוזק הבטון של התערובות עם האגרגטים הגסים (H10-H1) היה גבוה מזה של התערובות רק עם חול. להלן חוזק לחיצה הממוצע עבור הקבוצות השונות:

תערובות עם עדש: 135 מגפ"ס

תערובות עם שומשום: 130 מגפ"ס

תערובות עם חול: 116 מגפ"ס

היחס מים צמנט עבור כול התערובות בקבוצה זאת היה זהה, 0.19, אך תכולת הצמנט של התערובות עם אגרגטים גסים הייתה 710 ק"ג, לעומת 960 ק"ג בתערובות שכללו רק חול.

גורם נוסף שכנראה השפיע על חוזק הלחיצה הנמוך של התערובות עם החול קשור לכך שאת המדגמים של תערובות הללו אי אפשר היה לרטט.

התערובות עם האגרגטים הגסים היו פחות "עדינות", הסיבים היו "תפוסים" יותר טוב בין האגרגטים, ולכן אפשר היה לרטט את מדגמי הבטון באופן יחסית אינטנסיבי. יש להדגיש שתערובות הבטון עם חוזק גבוה הן יותר צמיגות, עקב שימוש במוספים מפחיתי מים חזקים, תכולת צמנט גבוה, והיחס מים צמנט הנמוך, ולכן יש צורך בריטוט יותר אינטנסיבי כדי להבטיח לאפשר יציאה של בועות אוויר מהבטון.

את מדגמי הבטון מתערובות שמבוססות רק על חול אי אפשר היה לרטט, כי הריטוט גרם לסיבים לשקוע. בסדרת היציקות הראשונה, נעשה ריטוט של כול מדגמי הבטון, בתהליך בדיקת הכפיפה, גילינו שכול הסיבים שקעו. היה צריך לחזור על כול התערובות שוב, וללא ריטוט של המדגמים כדי למנוע שקיעה של

הסיבים. יש לציין שבתערובות רק עם החול אפשר היה ממש לראות את תכולת האוויר הגבוהה יחסית, ביחס לתערובות עם האגרגטים הגסים, ולכן כנראה חוסר הריטוט של המדגמים מנע את שחרור האוויר והוא אחד הגורמים העיקריים לקבלת חוזק לחיצה יותר נמוך.

להלן תמונה של מדגמים של תערובות בטון עם חוזק גבוה שמבוססת רק על חול. אפשר לראות באופן ברור את בועות האוויר הרבות שיש בבטון (ציור 29).



ציור 29 : בועות אוויר בתערובת בטון בחוזק גבוה שהוכנו רק עם חול

4.5.2 תערובות עם חוזק גבוה : חוזק בכפיפה ובקיעה

החוזק בבקיעה הוא בין 8.4 ו- 17.8 מגפ"ס והחוזק בכפיפה בין 13 ו- 27.6 מגפ"ס. קיים פיזור די גבוה ולא מגמתי בין התוצאות השונות. הממוצע עבור כול אחת מהקבוצות הוא :

חוזק בבקיעה :

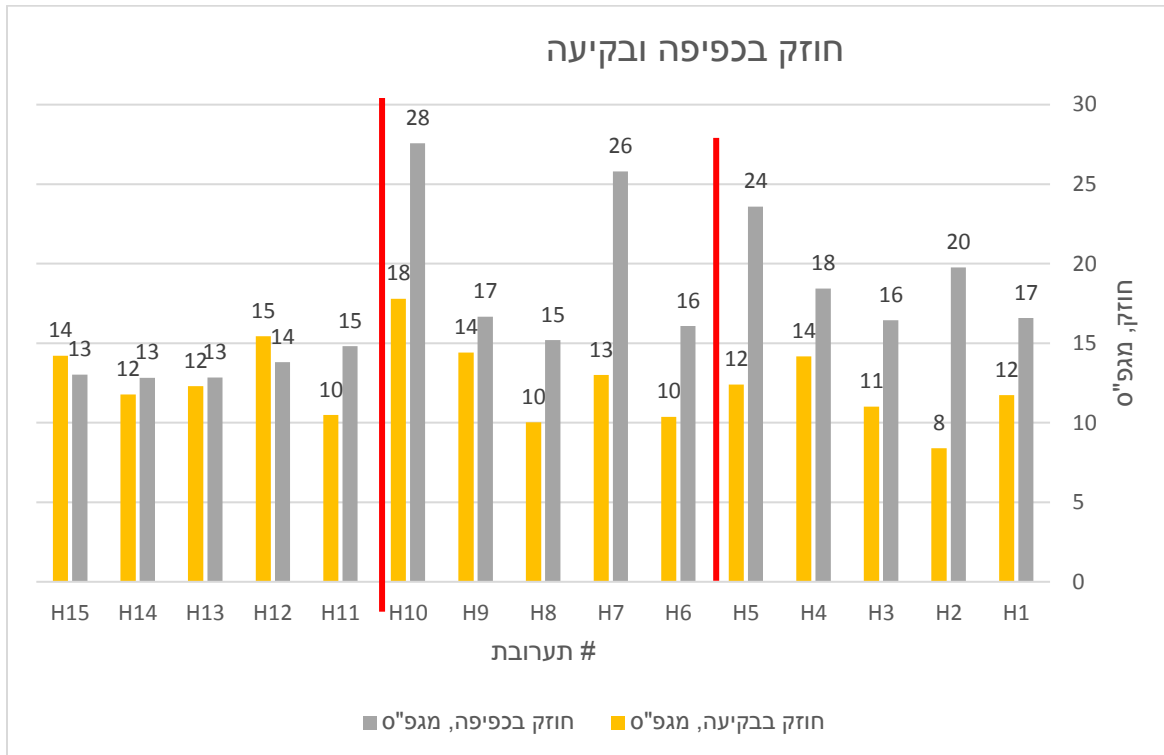
- תערובות עם עדש : 11.5 מגפ"ס
- תערובות עם שומשום : 13.1 מגפ"ס
- תערובות עם חול : 12.8 מגפ"ס

חוזק בכפיפה :

- תערובות עם עדש : 18.6 מגפ"ס

- תערובות עם שומשום : 20.3 מגפ"ס
- תערובות עם חול : 13.5 מגפ"ס

ציור 30 מציג את החוזק בכפיפה ובקיעה עבור התערובות השונות.



ציור 30: תערובות חוזק גבוה: חוזק בבקיעה ובכפיפה

4.5.3 השקיעה כפונקציה של מאמץ הכפיפה – תערובות עם חוזק גבוה

שילוב של סיבים שונים במינונים משתנים משפיע על תכונות המשיכות והצפידות של החומר. עקום שקיעה-מאמץ הוא הכלי מתאים במיוחד כדי ללמוד את ההשפעה של כול אחד מהגורמים הללו על תכונות הבטון.

בנספח ב' מופיעים עקומי שקיעה/מאמץ-כפיפה עבור כול התערובות השונות. עבור כול תערובת (H1-H15) מופיעים הנתונים הבאים:

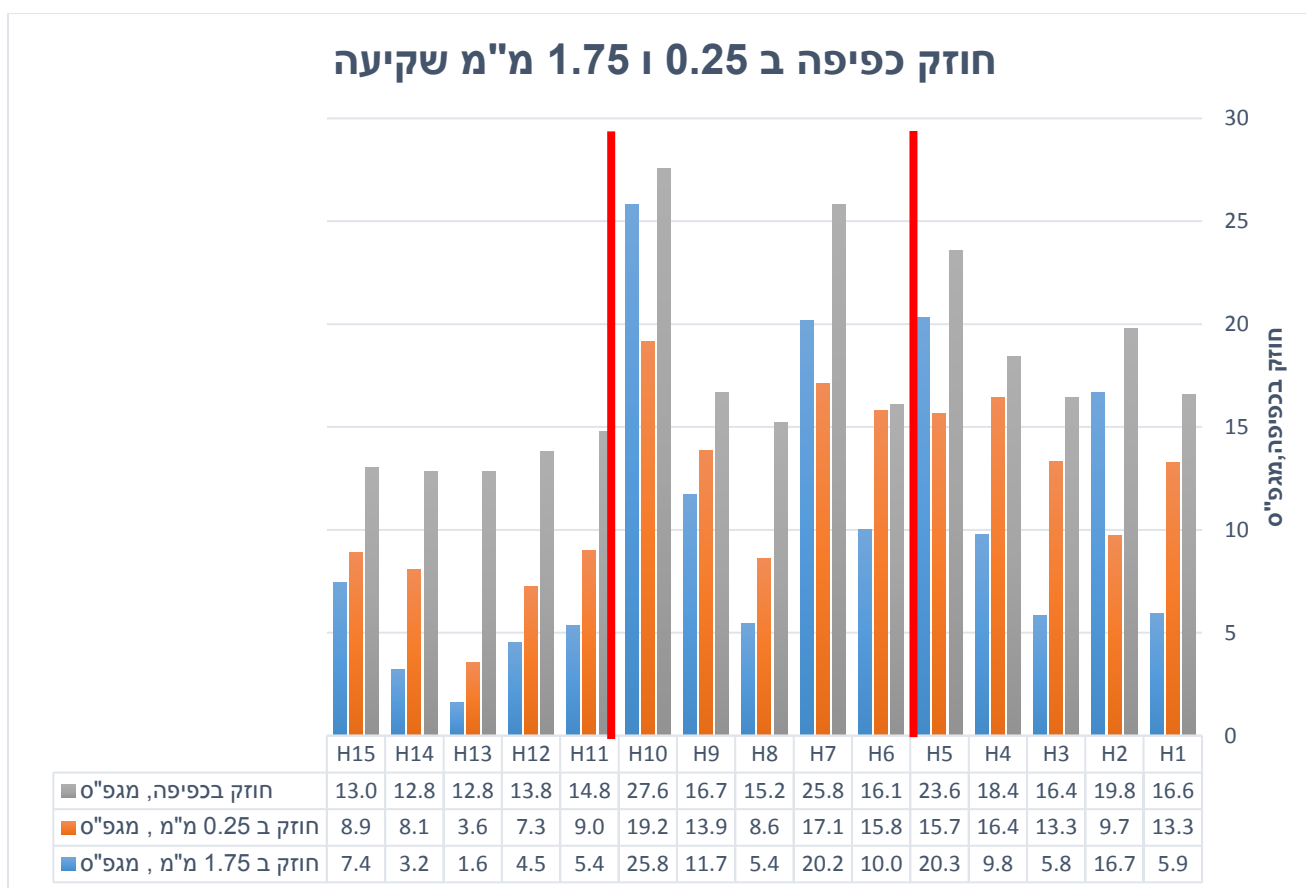
- עקומי שקיעה/מאמץ עבור שלושת המדגמים במידות של 280*70*70 מ"מ
- עקום שקיעה/מאמץ עבור המדגם בגודל 100*50*50 מ"מ
- מאמץ כפיפה מקסימאלי
- חוזק כפיפה עבור שקיעה של 0.25 מ"מ (L1)

• חוזק כפיפה עבור שקיעה של 1.75 מ"מ (L2)

הערך של L1 נקבע לפי עיבור של 3.5% עבור מצב גבולי של שירות, ו-L2 לפי עיבור של 25% עבור מצב גבולי של הרס.

עבור כול תערובות יש שתי ציורים, כאשר בכול ציור מופיעה העקומה עד ערך מוגדר של שקיעה מקסימאלי. בציור הראשון מופיעות העקומות עד שקיעה מקסימאלית של 7 מ"מ, כדי לשקף את כול נתוני הבדיקה ואת ההתנהגות הכוללת של המדגם במהלך כול הניסוי. הציור השני מתמקד בהתנהגות הפוסט אלסטית של המערכת, ולכן מתייחס לתחום שקיעה של עד 2 ס"מ.

בנוסף, בציור 31 מופיע ריכוז של התוצאות עבור L1, L2 והיחס L2/L1. הערכים של L1 ו-L2 מתייחסים לחוזק השיורי בכפיפה, מעבר לתחום האלסטי, ומשקפים את ההתנהגות הלא ליניארית של הבטון ומשיכותו.



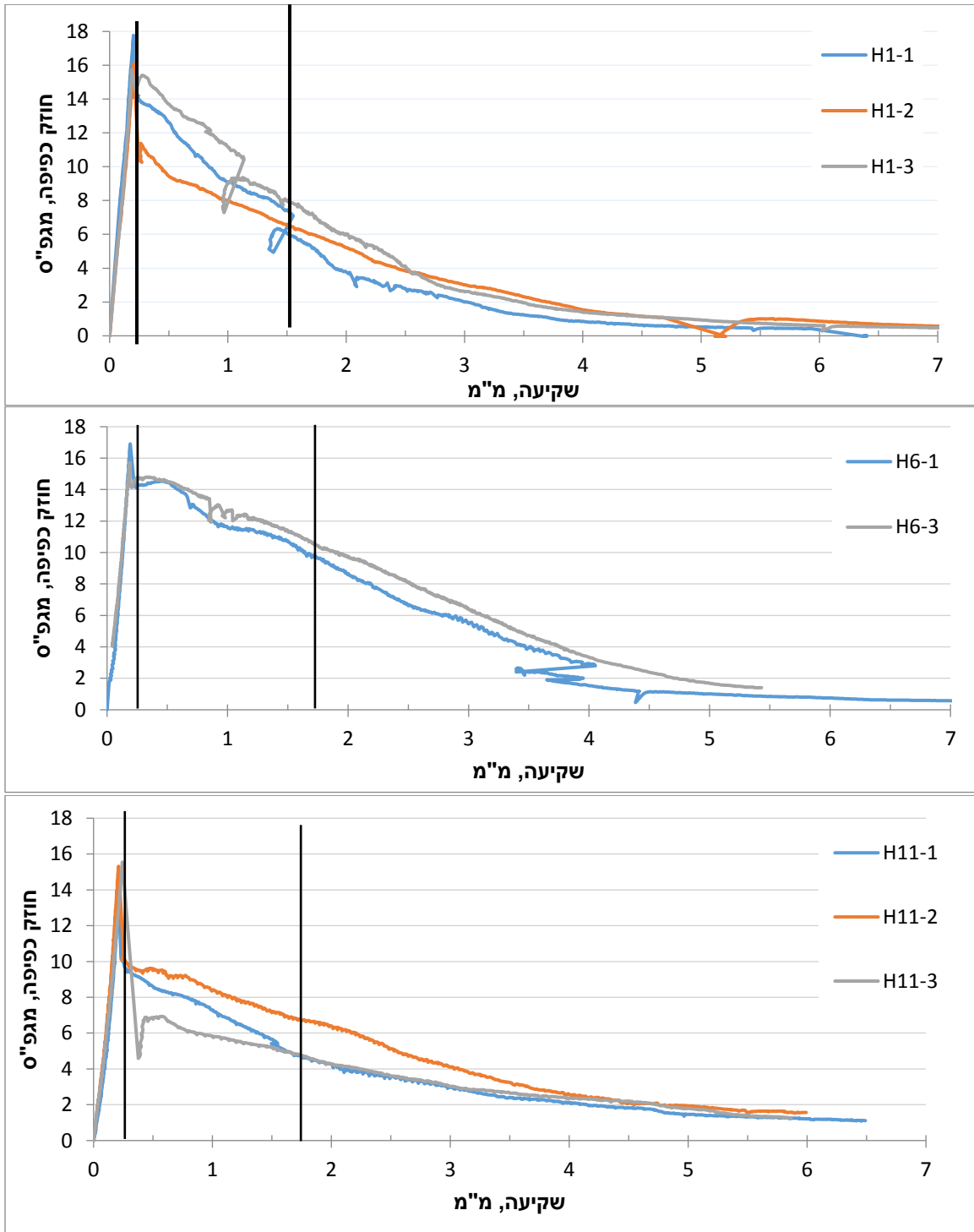
ציור 31 : ריכוז תוצאות בדיקות כפיפה בשקיעה של 0.25 מ"מ ו- 1.75 מ"מ.

הסעיפים הבאים מתייחסים להתנהגות של סוגי התערובות השונות לפי סוגי הסיבים.

4.5.4 חוזק גבוה: תערובות רק עם סיבים קצרים (H1, H6, H11)

להלן עקומי מאמץ-שקיעה של שלושת התערובות עם חוזק גבוה הכוללות רק סיבים קצרים, כאשר כול תערובות מבוססת על הרכב אגרגטים שונה:

- H1 – תערובות האגרגטים כוללת אגרגט מסוג עדש
- H6 – תערובות האגרגטים כוללת אגרגט מסוג שומשום
- H11 – תערובת האגרגטים כוללת רק חול טבעי



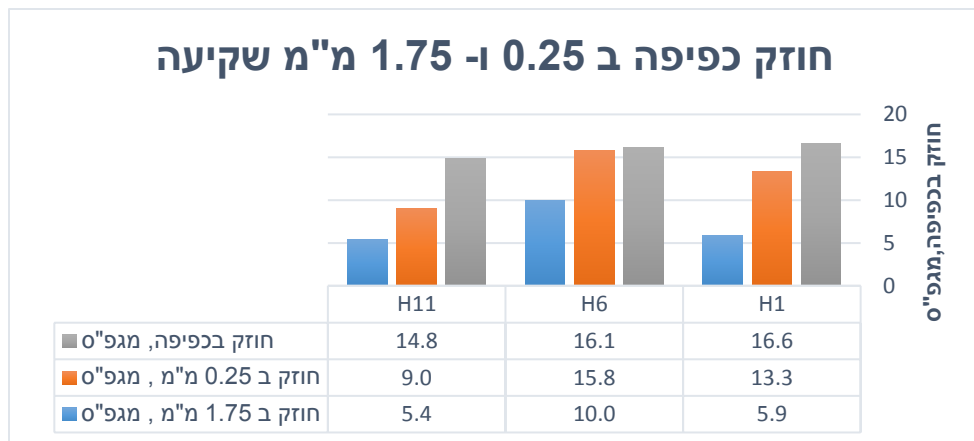
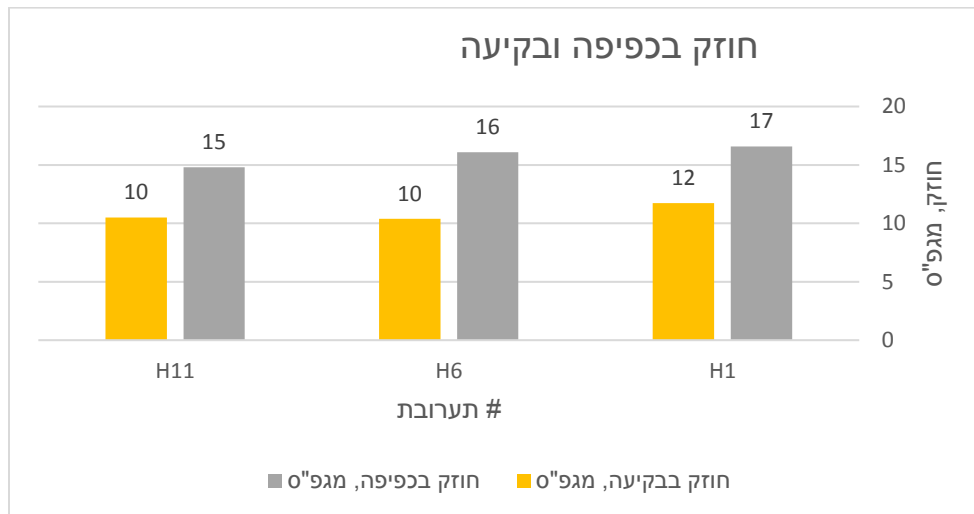
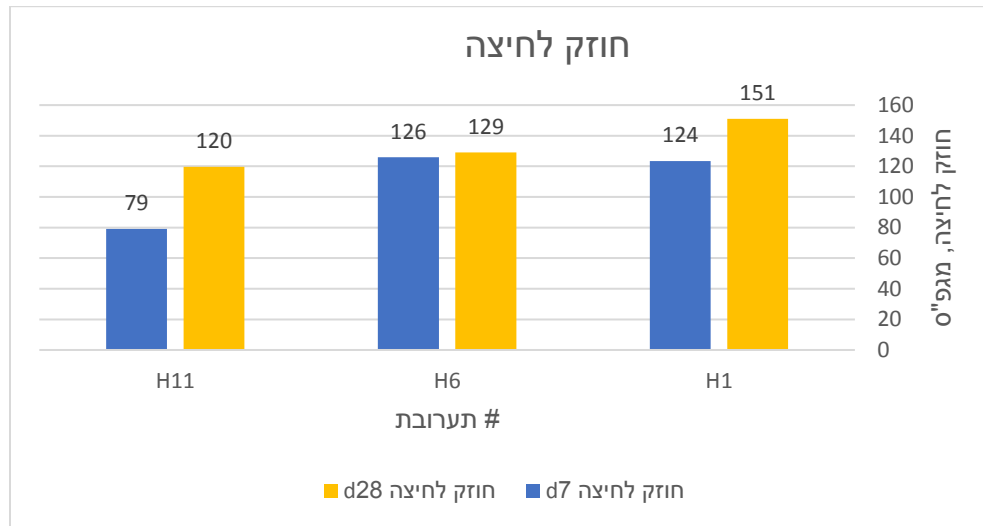
ציור 32 : עקומי מאמץ-שקיעה עבור תערובות עם חוזק גבוה וסיבים קצרים

להלן סיכום של התוצאות עבור שלושת התערובות הללו (טבלה 17):

טבלה 17: סיכום תוצאות בדיקות בתערובות עם סיבים קצרים בלבד

תערובת רק עם חול	תערובות עם שומשום	תערובות עם עדש	
H11	H6	H1	מס'
79.2	126.0	123.5	חוזק לחיצה d7, מגפ"ס
119.7	129.2	151.1	חוזק לחיצה d28, מגפ"ס
0.7	1.0	0.8	יחס חוזק 28/7
10.5	10.4	11.7	חוזק בבקיעה, מגפ"ס
14.8	16.1	16.6	חוזק בכפיפה, מגפ"ס
9.0	15.8	13.3	חוזק ב- 0.25 מ"מ, מגפ"ס
5.4	10.0	5.9	חוזק ב- 1.75 מ"מ, מגפ"ס
0.6	0.6	0.4	יחס L1/L2

להלן השוואה גרפית של התוצאות (ציור 33):



ציור 33 : סיכום תוצאות בדיקות חוזק שונות לתערובות המכילות סיבים קצרים בלבד.

ניתן לסכם את התוצאות ביחס לתערובות עם סיבים קצרים כדלקמן :

חוזק לחיצה : חוזק הלחיצה של התערובת עם עדש היה הגבוה ביותר ביחס לשתי התערובות האחרות. חוזק התערובות עם החול היה הנמוך משלושת התערובות. גודל האגרנט משפיעה על חוזק הבטון, הפוך מהמצופה, ככול שהאגרנט יותר גדול, חוזק הבטון יותר גבוה, בדומה לתוצאות שהתקבלו בבטון החלש יותר.

יש לקחת בחשבון שהיחס מים צמנט של שלושת התערובות היה זהה, 0.40, אך תכולת הצמנט של התערובות עם האגרנטים הגסים הייתה 400 ק"ג, לעומת 626 ק"ג בתערובות רק עם חול.

חוזק בכפיפה : לא היו הבדלים משמעותיים בחוזק הכפיפה בין המדגמים השונים. החוזק בכפיפה של התערובות עם האגרנטים העדש היה הגבוה ביותר, ועם החול הנמוכה. החוזק בכפיפה של התערובות עם חוזק גבוה הוא גבוה פי שניים מהחוזק בכפיפה שנמצא בתערובות עם חוזק בינוני, בדומה ליחס של חוזק הלחיצה.

חוזק בבקיעה : לא היו הבדלים משמעותיים בחוזק בבקיעה בין התערובות השונות. החוזק בבקיעה היה בין 10-12 מגפ"ס.

עקום מאמץ-שקיעה הראה ירידה של 10-25% בחוזק הכפיפה לאחר התפתחות סדק ראשון (25% בתערובות עם חול בלבד). לאחר התפתחות הסדק נראתה ירידה מתונה ולינארית בתסבולת הדגמים עם העלייה בשקיעה.

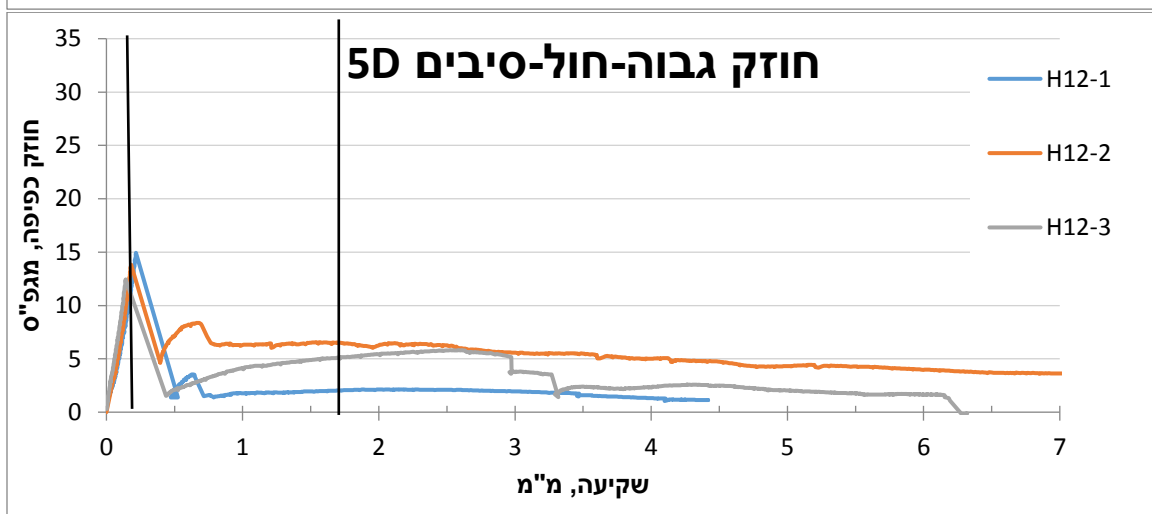
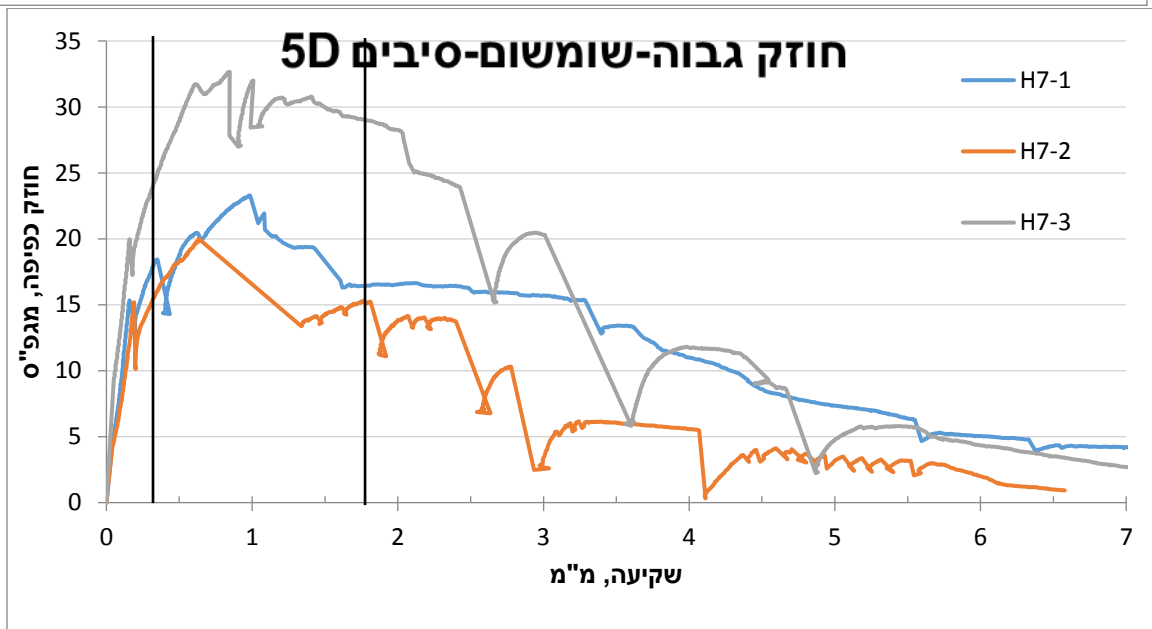
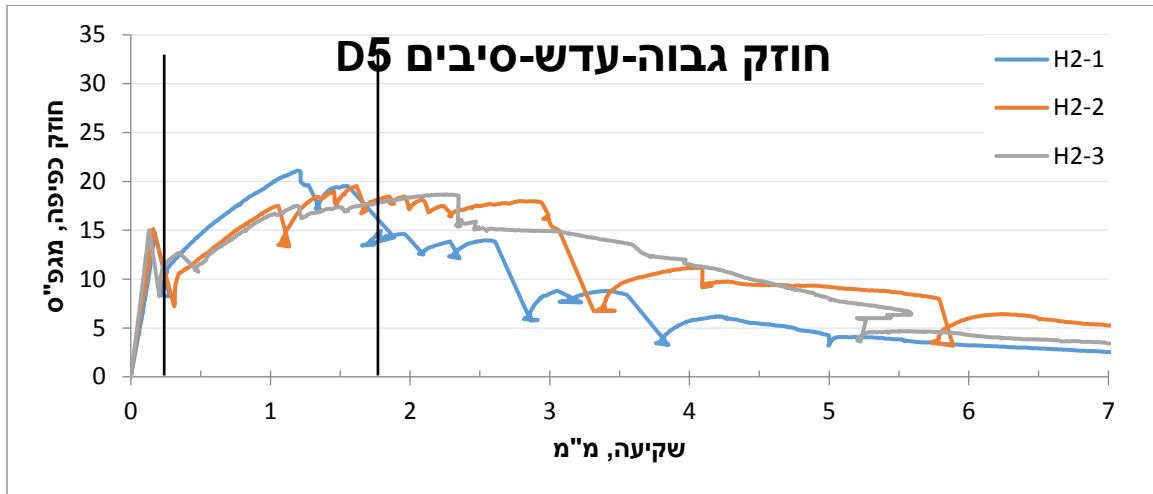
היחס בין L1/L2 הוא נמוך, עם ערכים נמוכים מ-0.7 עבור שלושת התערובות. השימוש בסיבים קצרים במינון של 150 ק"ג למ"ב (2% מנפח התערובות), שיפר משמעותית את החוזק בכפיפה של הבטון, אך השיפור במשיכות הוא נמוך בהשוואה למתקבל בתערובות עם סיבים הארוכים. ערך זה גבוה משמעותית מזה שהתקבל בבטון בחוזק בינוני (0.5~).

כמו בתערובות עם חוזק בינוני, הסיבים הקצרים משפרים את החוזק המקסימאלי בכפיפה, אך תרומתם למשיכות הבטון פחות יעילה, בהשוואה לתערובות עם סיבים ארוכים.

4.5.5 חוזק גבוה : תערובות עם סיבים ארוכים של 60 מ"מ (H2, H7, H12)

להלן עקומי מאמץ-שקיעה של שלושת התערובות עם חוזק גבוה הכוללות רק סיבים ארוכים של 60 מ"מ (ציור 34), כאשר כול תערובות מבוססת על הרכב אגרנטים שונה :

- H2 – תערובות האגרנטים כוללת אגרנט מסוג עדש
- H7 – תערובות האגרנטים כוללת אגרנט מסוג שומשום
- H12 – תערובות האגרנטים כוללת רק חול טבעי



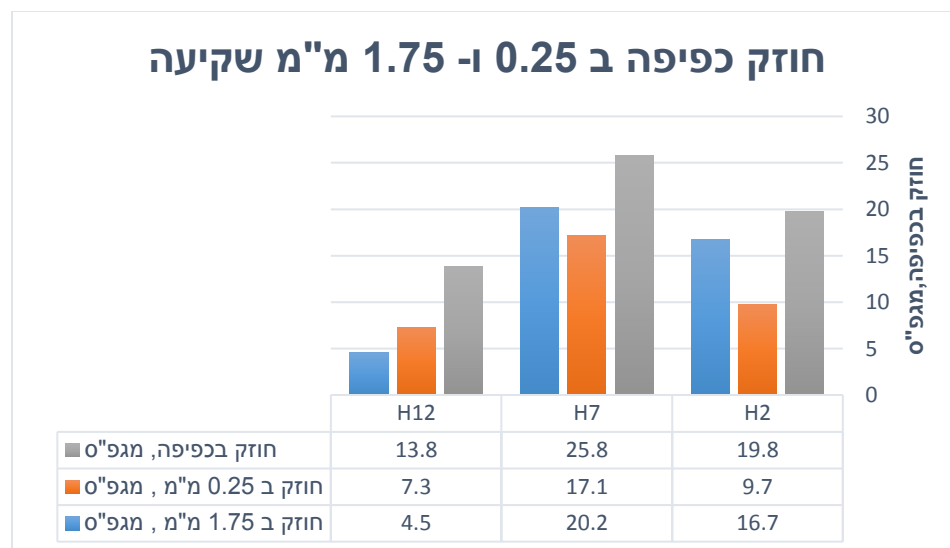
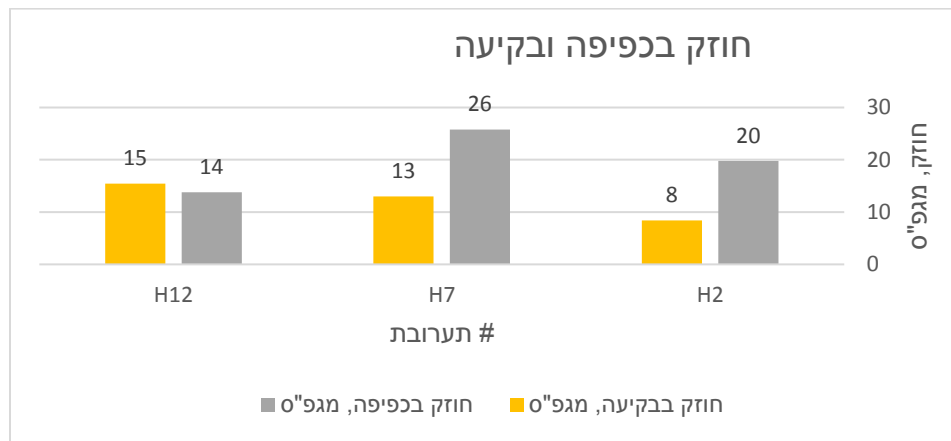
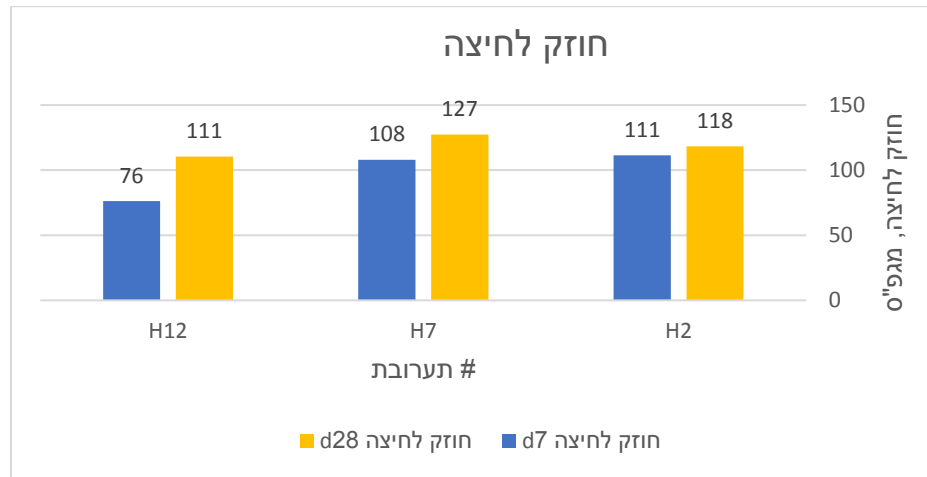
ציור 34 : עקומי מאמץ-שקיעה עבור תערובות עם חוזק גבוה וסיבים ארוכים של 60 מ"מ מסוג 5D

להלן סיכום של התוצאות עבור שלושת התערובות הללו (טבלה 18) :

טבלה 18 : סיכום תוצאות בדיקות בתערובות עם סיבים ארוכים של 60 מ"מ בלבד

תערובות עם חול	תערובות עם שומשום	תערובות עם עדש	
H12	H7	H2	מס'
76	108.0	111.3	חוזק לחיצה d7, מגפ"ס
111	127.3	118.3	חוזק לחיצה d28, מגפ"ס
0.69	0.8	0.9	יחס חוזק 28/7
15.4	13.0	8.4	חוזק בבקיעה, מגפ"ס
13.8	25.8	19.8	חוזק בכפיפה, מגפ"ס
7.3	17.1	9.7	חוזק ב- 0.25 מ"מ, מגפ"ס
4.5	20.2	16.7	חוזק ב- 1.75 מ"מ, מגפ"ס
0.6	1.2	1.7	יחס L1/L2

להלן התוצאות בצורה גרפית (ציור 35):



ציור 35 : סיכום תוצאות בדיקות חוזק שונות לתערובות המכילות סיבים ארוכים של 60 מ"מ בלבד

ניתן לסכם את התוצאות ביחס לתערובות עם סיבים ארוכים של 60 מ"מ כדלקמן :

חוזק לחיצה - החוזק הגבוה ביותר התקבל עבור התערובות עם השומשום, והנמוך ביותר עבור התערובות עם החול.

החוזק בכפיפה - החוזק בכפיפה הגבוה ביותר התקבל עבור התערובות עם השומשום, והנמוך ביותר עבור התערובות עם החול

בתערובות עם אגרגטים גסים, יש שיפור משמעותי בחוזק הכפיפה ביחס לתערובות עם סיבים קצרים. לעומת זאת, בתערובות עם החול, חוזק הכפיפה לא השתנה.

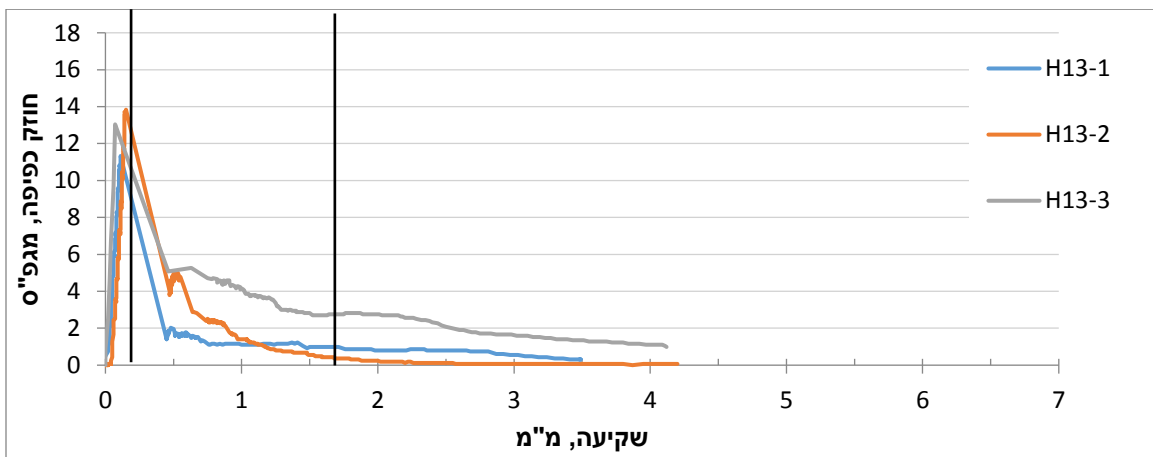
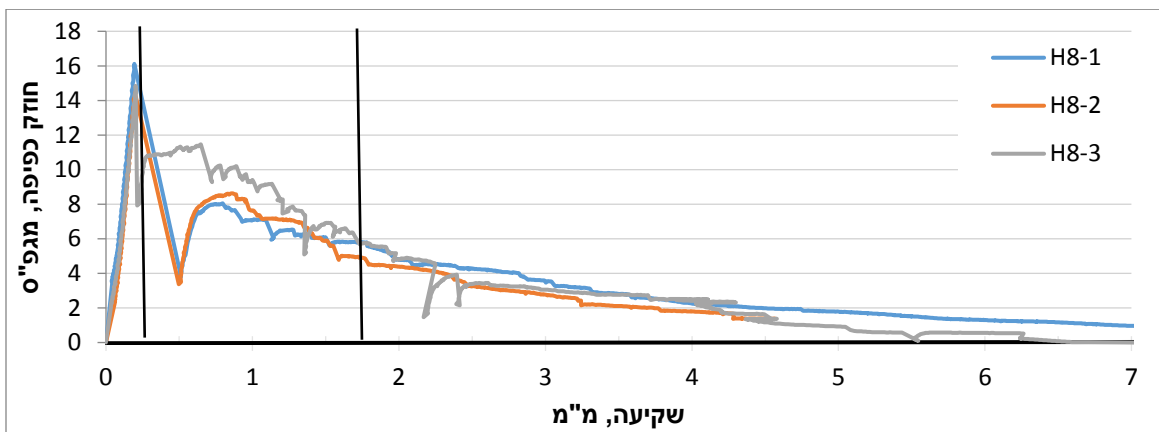
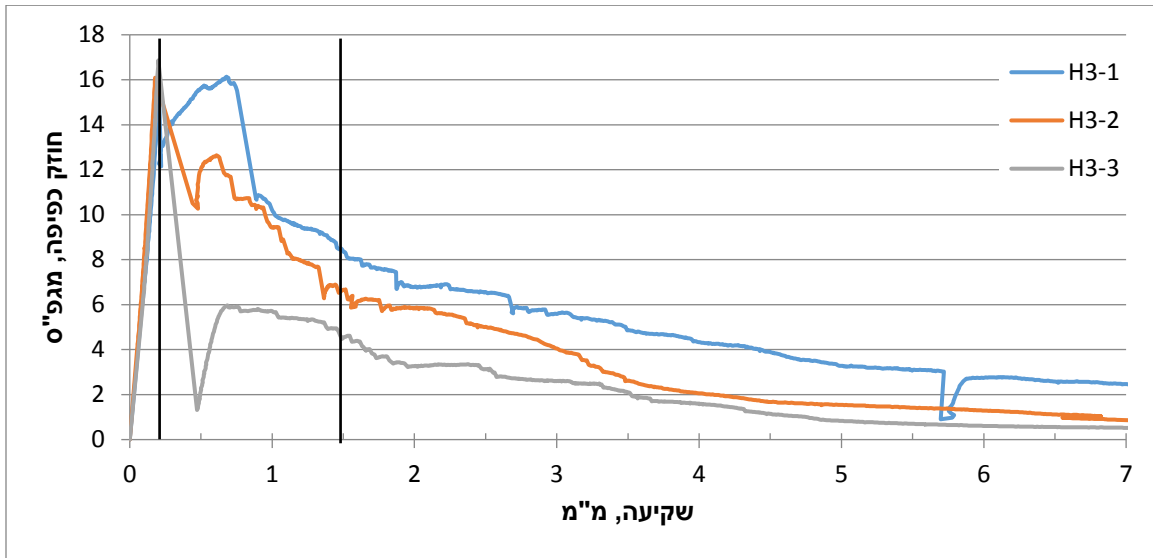
יש עלייה משמעותי במשיכות של התערובות עם אגרגטים גסים. בתערובות עם העדש או השומשום נראתה ירידה מסויימת בתסבולת לאחר היווצרות סדק ראשון אך לאחר מכן החוזק עלה לאותה רמה ואף מעבר לה. בתערובות עם חול בלבד לא נצפתה עלייה כזו. היחס בין $L2/L1$ הוא 1.7 ו- 1.2 בתערובות עם עדש או שומשום, בהתאמה. לעומת זאת, בתערובות רק עם חול, אין שיפור משמעותי במשיכות, והיחס הוא רק 0.6.

השימוש בסיבים ארוכים של 60 מ"מ ביחד עם אגרגטים גסים שיפר באופן משמעותי את חוזק המתיחה ואת משיכות הבטון.

4.5.6 חוזק גבוה : תערובות עם סיבים ארוכים של 30 מ"מ (H3, H8, H13)

להלן העקומות שקיעה/מאמץ של שלושת התערובות עם חוזק בינוני הכוללות רק סיבים ארוכים של 30 מ"מ. כול תערובות מבוססת על הרכב אגרגטים שונה (ציור 36) :

- H3 – תערובות האגרגטים כוללת אגרגט מסוג עדש
- H8 - תערובות האגרגטים כוללת אגרגט מסוג שומשום
- H13 – תערובת האגרגטים כוללת רק חול טבעי



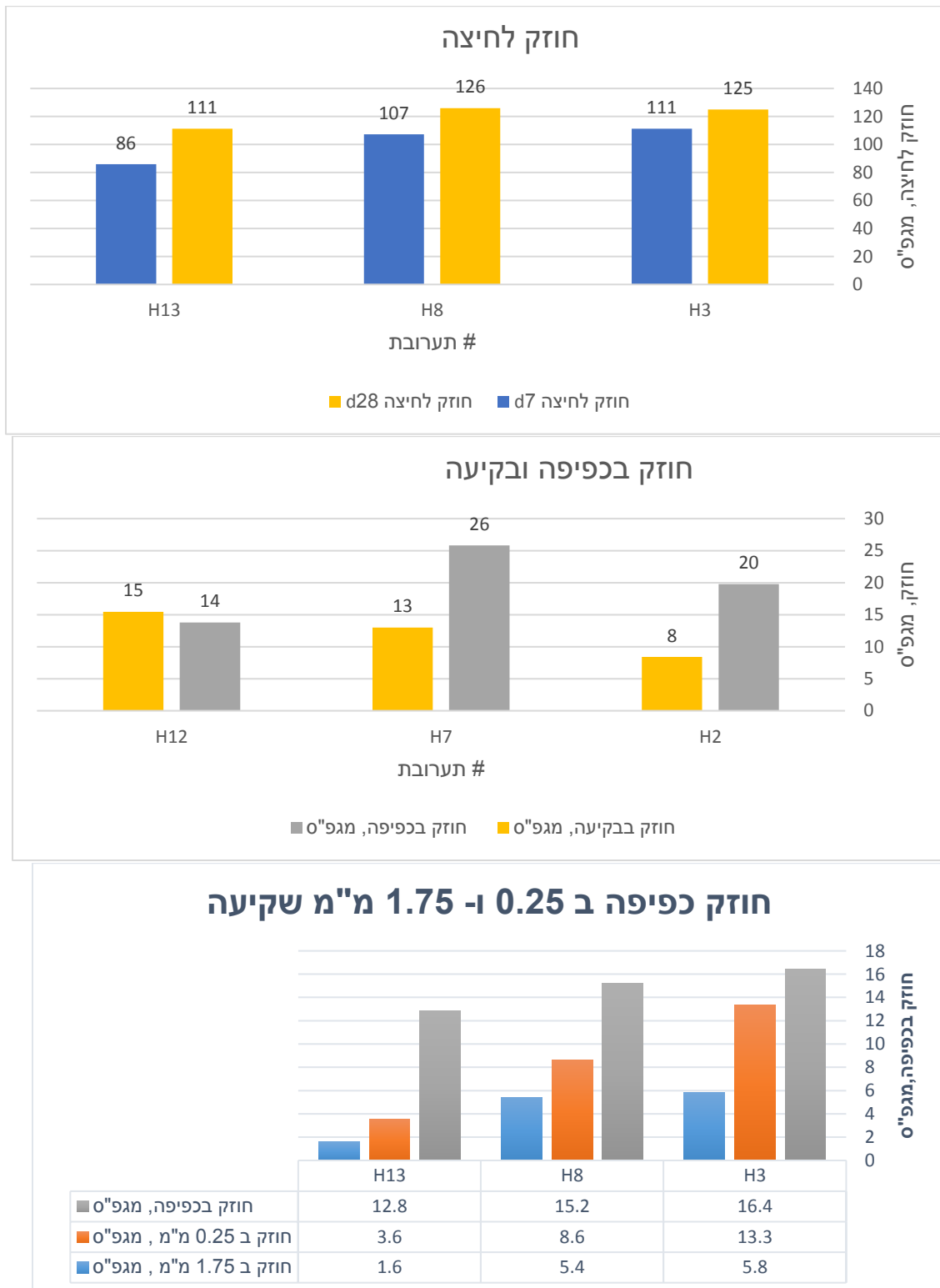
ציור 36 : עקומי מאמץ-שקיעה עבור תערובות עם חוזק גבוה וסיבים ארוכים של 30 מ"מ

להלן סיכום של התוצאות עבור שלושת התערובות הללו (טבלה 19):

טבלה 19: סיכום תוצאות בדיקות בתערובות עם סיבים ארוכים של 30 מ"מ בלבד

תערובת רק עם חול	תערובות עם שומשום	תערובות עם עדש	
H 13	H 8	H 3	מס'
85.8	107.2	111.3	חוזק לחיצה d7, מגפ"ס
111.2	126.0	125.0	חוזק לחיצה d28, מגפ"ס
0.77	0.9	0.9	יחס חוזק 28/7
12.3	10.0	11.0	חוזק בבקיעה, מגפ"ס
12.8	15.2	16.4	חוזק בכפיפה, מגפ"ס
3.6	8.6	13.3	חוזק ב- 0.25 מ"מ, מגפ"ס
1.6	5.4	5.8	חוזק ב- 1.75 מ"מ, מגפ"ס
0.5	0.6	0.4	יחס L1/L2

להלן התוצאות בצורה גרפית (ציור 37):



ציור 37 : סיכום תוצאות בדיקות חוזק שונות לתערובות המכילות סיבים ארוכים של 30 מ"מ בלבד

ניתן לסכם את התוצאות ביחס לתערובות עם סיבים ארוכים של 30 מ"מ כדלקמן :

חוזק לחיצה - אין הבדלים משמעותיים בין שתי התערובות עם האגרגטים הגסים. חוזק הלחיצה של התערובות עם החול היה נמוך ביחס לשתי התערובות האחרות.

חוזק בכפיפה - אין הבדלים משמעותיים בין החוזק לכפיפה של שלושת התערובות. החוזק לכפיפה של התערובות עם העדש הייתה הגבוה ביותר (26 מגפ"ס) והתערובות עם חול הנמוכה ביותר (13 מגפ"ס).

ביחס לתערובות עם חוזק בינוני,

- M3 – 8.7 מפג"ס
- M8 – 8.9 מפג"ס
- M13 – 9.7 מגפ"ס

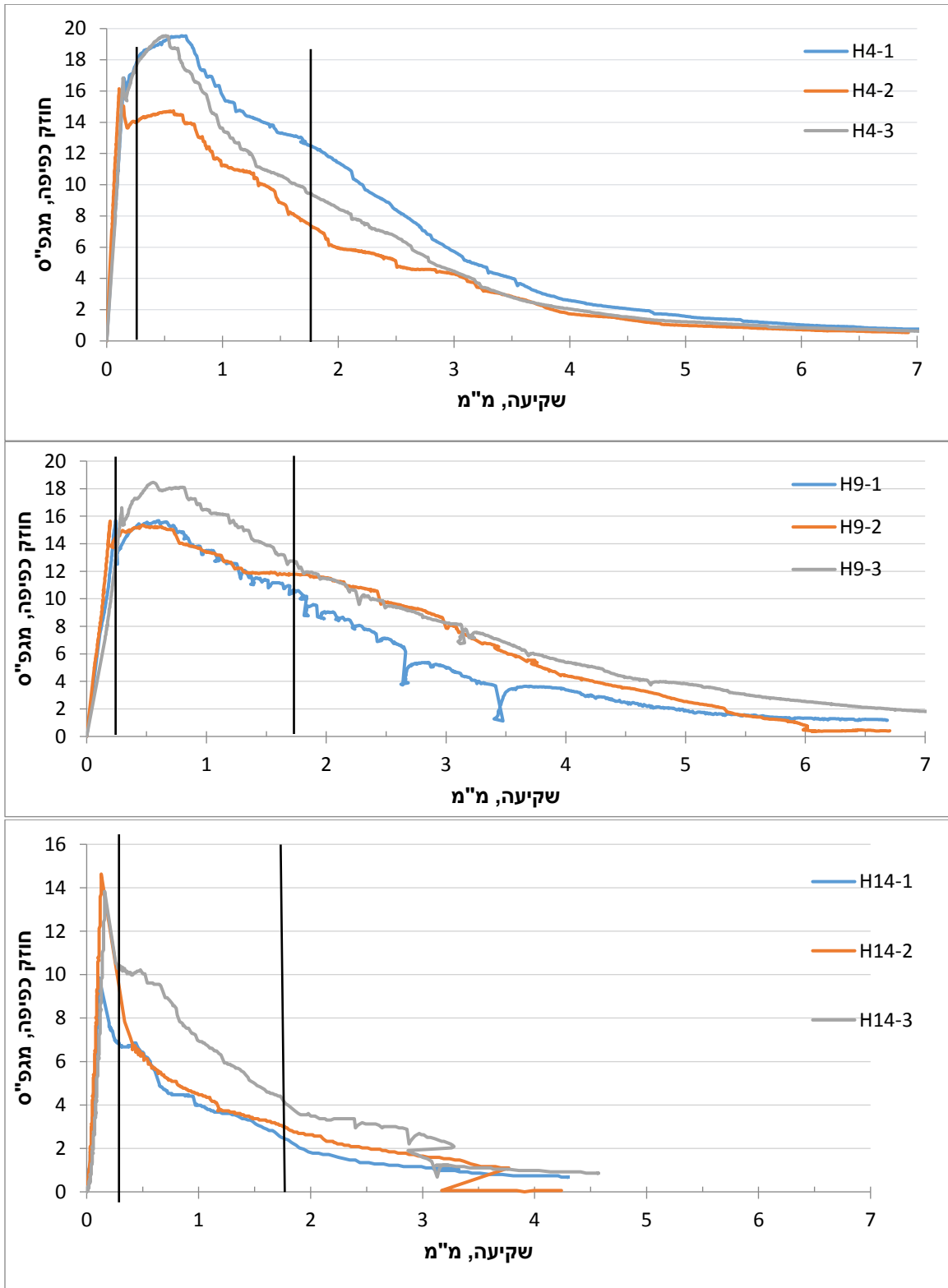
יש עלייה של בערך פי שניים בחוזק לכפיפה.

עקומי מאמץ-שקיעה : כל התערובות הציגו ירידה בתסבולת לאחר התפתחות הסדק הראשון עם עלייה מסויימת בתסבולת עם התקדמות השקיעה, אך זו לא חזרה לרמה שהייתה בעת היווצרות הסדק הראשון, בניגוד לתערובות עם סיבים באורך 60 מ"מ. בתערובות עם חול בלבד הירידה בתסבולת לאחר הסדק הראשון הייתה משמעותית ביותר ולא נצפתה כמעט עלייה נוספת בחוזק כפי שנמצא בתערובות עם עדש ושומשום.

4.5.7 חוזק גבוה: תערובות עם סיבים ארוכים של 30 מ"מ וסיבים קצרים (H4, H9, H14)

להלן העקומות שקיעה/מאמץ של שלושת התערובות עם חוזק גבוה הכוללות 50 ק"ג סיבים ארוכים של 30 מ"מ ו- 100 ק"ג סיבים קצרים (ציור 38). כול תערובות מבוססת על הרכב אגרגטים שונה כדלקמן :

- H4 – תערובות האגרגטים כוללת אגרגט מסוג עדש
- H9 - תערובות האגרגטים כוללת אגרגט מסוג שומשום
- H14 – תערובות האגרגטים כוללת רק חול טבעי



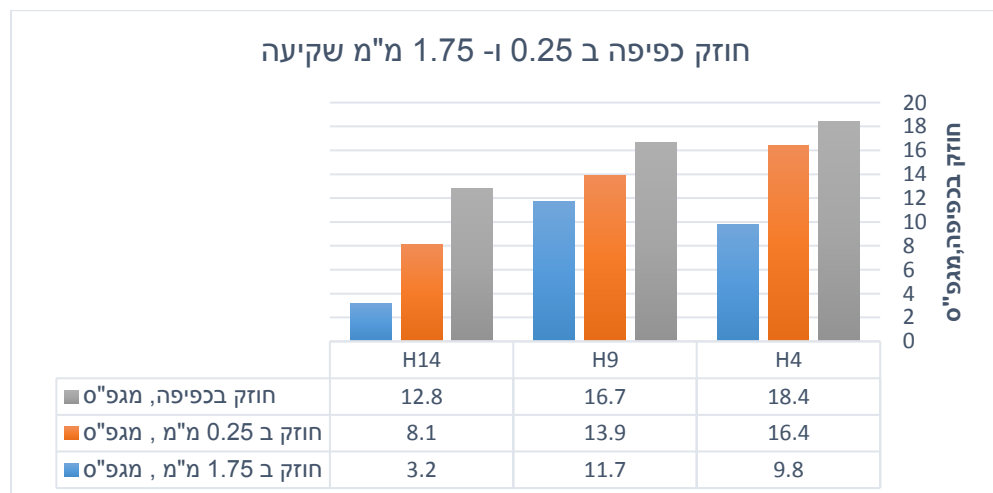
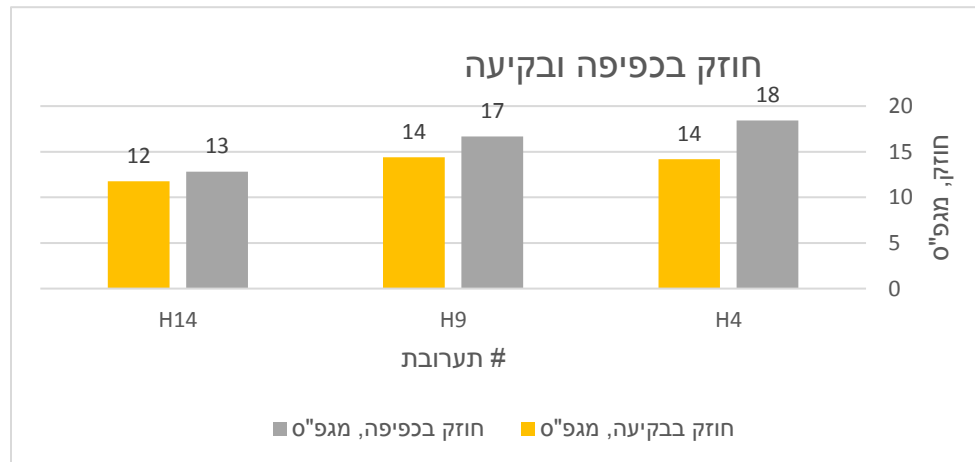
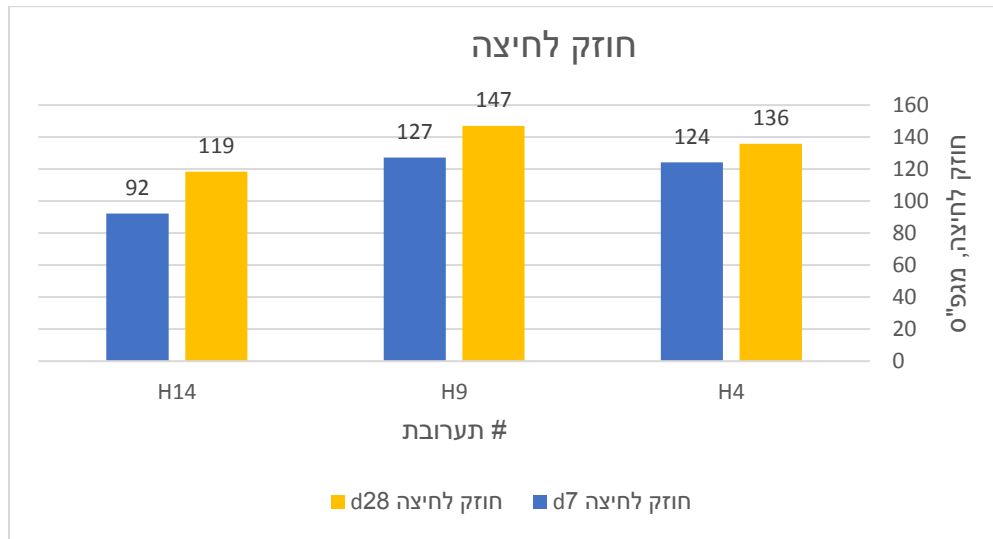
ציור 38: עקומי מאמץ-שקיעה עבור תערובות עם חוזק גבוה ושילוב סיבים ארוכים של 30 מ"מ עם סיבים קצרים.

להלן סיכום של התוצאות עבור שלושת התערובות הללו (טבלה 20) :

טבלה 20 : סיכום תוצאות בדיקות בתערובות עם שילוב סיבים ארוכים של 30 מ"מ וסיבים קצרים

תערובות עם חול	תערובות עם שומשום	תערובות עם עדש	
H14	H9	H4	מס'
92	127.1	124.2	חוזק לחיצה d7, מגפ"ס
119	147.0	135.8	חוזק לחיצה d28, מגפ"ס
0.78	0.9	0.9	יחס חוזק 28/7
11.8	14.4	14.2	חוזק בבקיעה, מגפ"ס
12.8	16.7	18.4	חוזק בכפיפה, מגפ"ס
8.1	13.9	16.4	חוזק ב- 0.25 מ"מ, מגפ"ס
3.2	11.7	9.8	חוזק ב- 1.75 מ"מ, מגפ"ס
0.4	0.8	0.6	יחס L1/L2

להלן התוצאות בצורה גרפית (ציור 39):



ציור 39: סיכום תוצאות בדיקות חוזק שונות לתערובות המכילות תערובת סיבים ארוכים של 30 מ"מ וסיבים קצרים.

ניתן לסכם את התוצאות ביחס לתערובות עם שילוב סיבים ארוכים של 30 מ"מ וסיבים קצרים :

חוזק לחיצה - חוזק הלחיצה של התערובות עם השומשום היה גבוה במעט מזה של התערובות עם עדש, הנמוך ביותר התקבל בתערובת עם חול בלבד.

החוזק בכפיפה של התערובות עם האגרגטים הגסים היה גבוה יותר ביחס לתערובות עם החול (18 ו- 17 מגפ"ס לעומת 13 מגפ"ס).

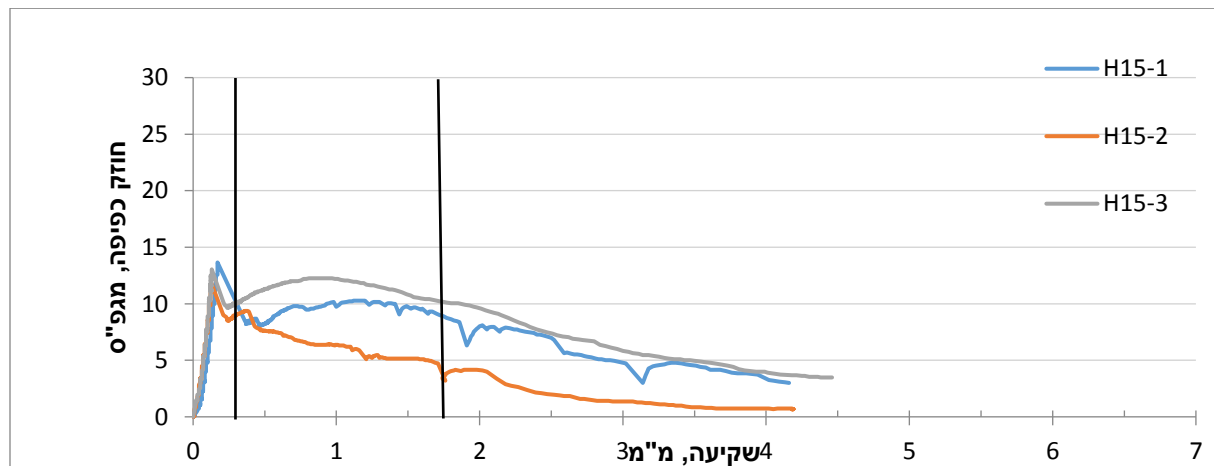
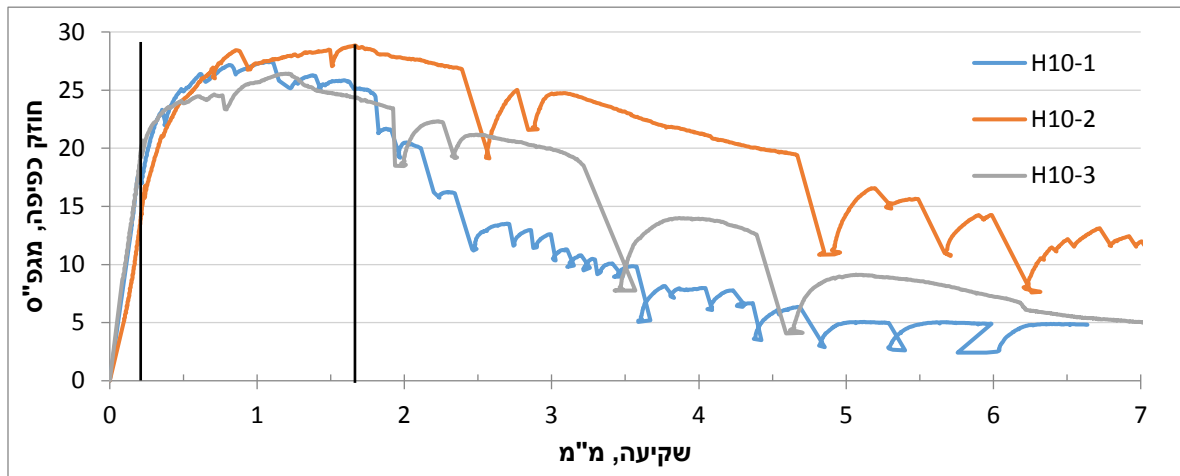
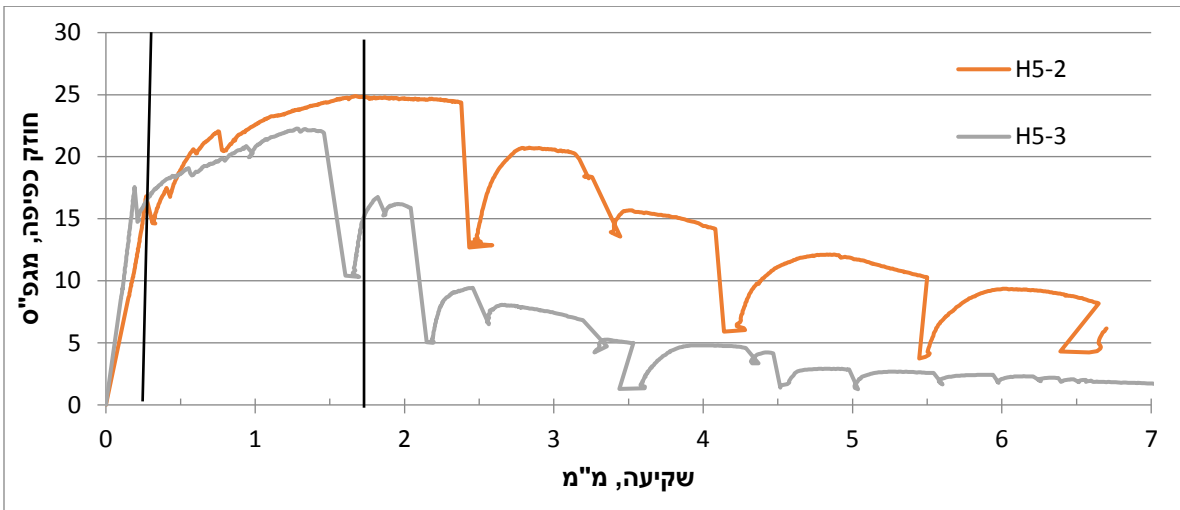
שילוב של סיבים ארוכים וקצרים הסיבים הארוכים שיפר באופן משמעותי את משיכות הבטון בתערובות עם האגרגטים הגסים. לאחר התפתחות הסדק הראשון, הייתה עליה בתסבולת עם ירידה הדרגתית עם התפתחות הכפף. בתערובת שהכילו רק חול, נצפתה ירידה תלולה בתסבולת מרגע התפתחות סדק ראשון אך הירידה הייתה מתונה ביחס לתערובת שלא הכילה סיבים ארוכים כלשהם.

לשם השוואה, גם בבטון עם חוזק בינוני, גם בתערובת עם החול היה שיפור משמעותי במשיכות הבטון עקב השילוב של הסיבים הקצרים.

4.5.8 חוזק גבוה: תערובות עם סיבים ארוכים של 60 מ"מ וסיבים קצרים (H5, H10, H15)

להלן העקומות שקיעה/מאמץ של שלושת התערובות עם חוזק גבוה הכוללות 50 ק"ג סיבים ארוכים של 60 מ"מ ו- 100 ק"ג סיבים קצרים (ציור 40). כול תערובות מבוססת על הרכב אגרגטים שונה כדלקמן :

- H5 – תערובות האגרגטים כוללת אגרגט מסוג עדש
- H10 - תערובות האגרגטים כוללת אגרגט מסוג שומשום
- H15 – תערובת האגרגטים כוללת רק חול טבעי



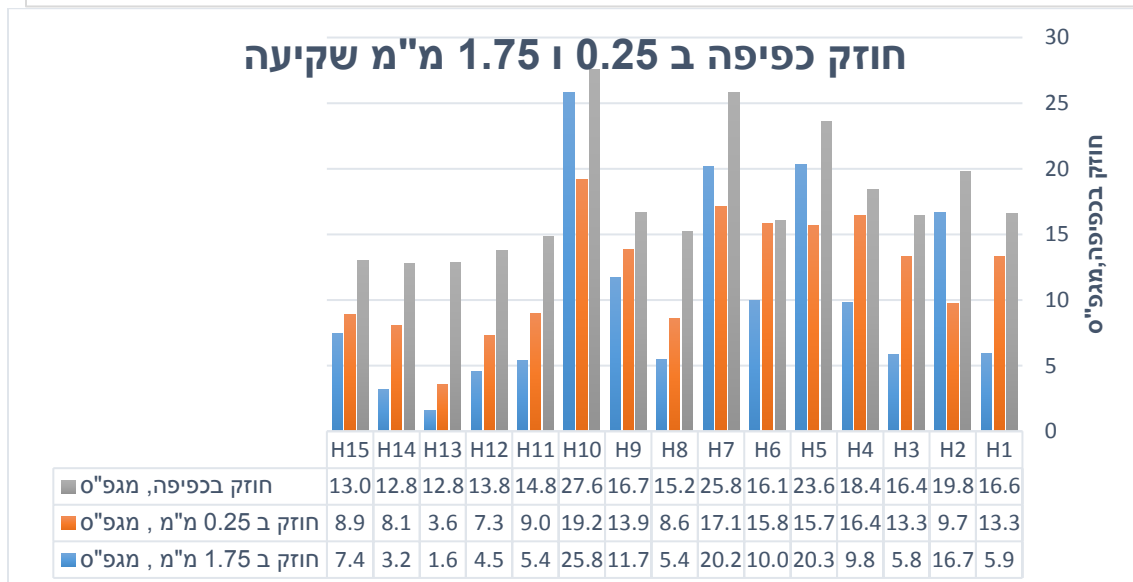
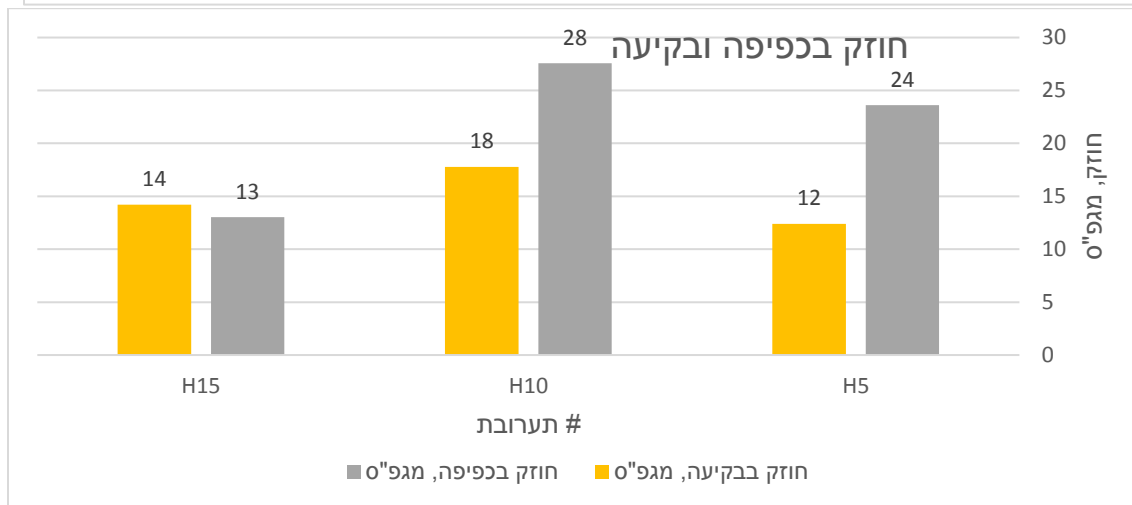
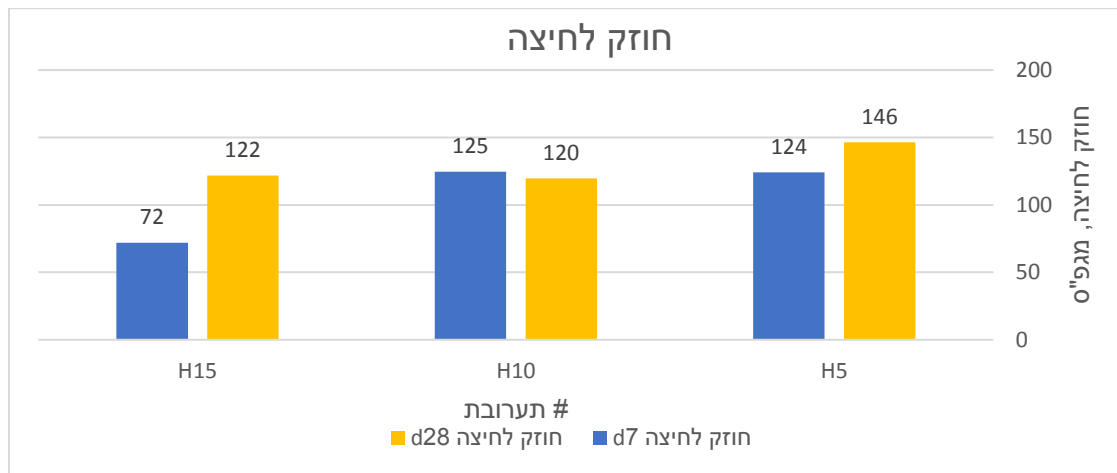
ציור 40: עקומי מאמץ-שקיעה עבור תערובות עם חוזק גבוה ושילוב סיבים ארוכים של 60 מ"מ עם סיבים קצרים

להלן סיכום של התוצאות עבור שלושת התערובות הללו (טבלה 21):

טבלה 21: סיכום תוצאות בדיקות בתערובות עם שילוב סיבים ארוכים של 60 מ"מ וסיבים קצרים

תערובת רק עם חול	תערובות עם שומשום	תערובות עם עדש	
H15	H10	H5	מס'
71.9	124.7	124.2	חוזק לחיצה d7, מגפ"ס
121.7	119.7	146.3	חוזק לחיצה d28, מגפ"ס
0.6	1.0	0.8	יחס חוזק 28/7
14.2	17.8	12.4	חוזק בבקיעה, מגפ"ס
13.0	27.6	23.6	חוזק בכפיפה, מגפ"ס
8.9	19.2	15.7	חוזק ב- 0.25 מ"מ, מגפ"ס
7.4	25.8	20.3	חוזק ב- 1.75 מ"מ, מגפ"ס
0.8	1.3	1.3	יחס L1/L2

להלן התוצאות בצורה גרפית (ציור 41):



ציור 41: סיכום תוצאות בדיקות חוזק שונות לתערובות המכילות תערובת סיבים ארוכים של 60 מ"מ וסיבים קצרים

ניתן לסכם את התוצאות ביחס לתערובות עם סיבים ארוכים של 60 מ"מ וסיבים קצרים :

חוזק לחיצה - חוזק הלחיצה של התערובות עם אגרגט עדש היה הגבוה ביותר, עם חוזק של 146 מגפ"ס. לא היה הבדל משמעותי בחוזק בין התערובות עם השומשום והחול, 120 ו- 122 מגפ"ס.

החוזק בכפיפה של התערובות עם העדש והשומשום היה גבוה משמעותית ביחס לתערובות עם החול (22, 28 ו- 13 מגפ"ס).

השילוב של סיבים של 60 מ"מ עם סיבים קצרים שיפר באופן משמעותי ביותר את החוזק בכפיפה ואת משיכות הבטון, במיוחד בתערובות עם השומשום, אך גם בתערובות עם העדש. חוזק הכפיפה עלה לאחר התפתחות סדק ראשון עם ירידה מתונה בהמשך.

התנהגות התערובות עם החול הייתה משמעותית פחות טובה מאשר שתי התערובות האחרות.

השילוב של סיבים ארוכים וקצרים יעיל במיוחד בתערובות עם אגרגטים גסים. במקרה הזה, השיפור בתערובות עם השומשום יותר משמעותי מאשר עם העדש.

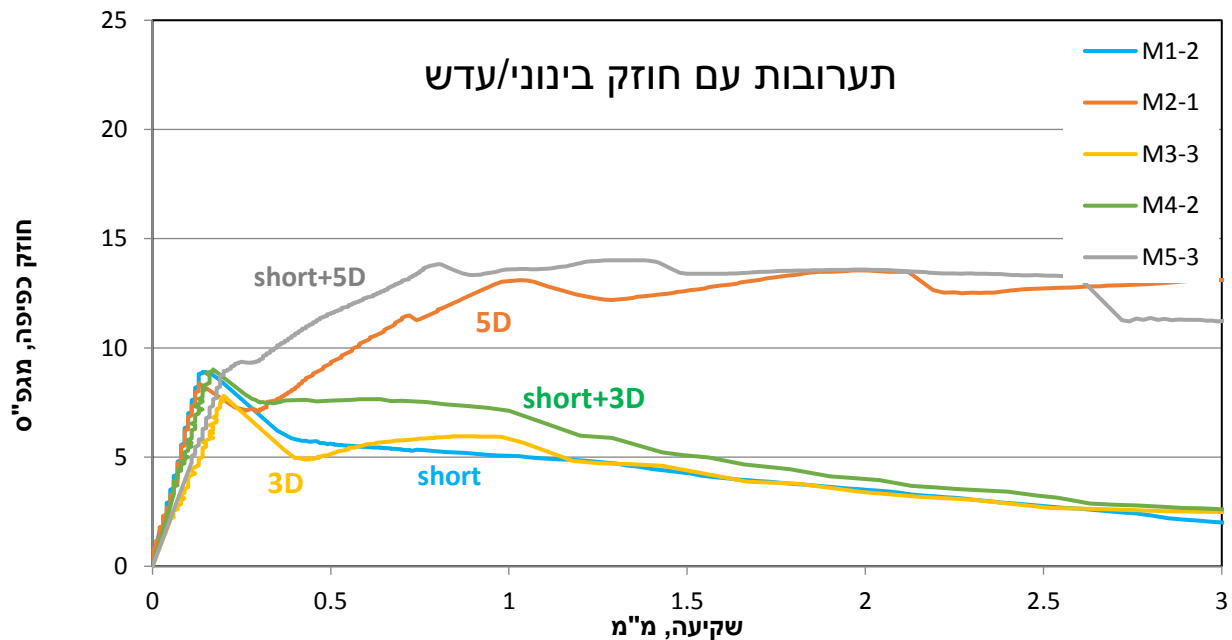
5. דיון

עבודה זאת כללה שתי קבוצות של תערובות, אחת עם חוזק בלחיצה של בערך 70 מגפ"ס והשנייה של בערך 150 מגפ"ס. כול אחת מהקבוצות כללה 15 תערובות: 5 תערובות רק על בסיס חול, 5 תערובות עם אגרגטים גסים מסוג שומשום, ו-5 תערובות עם אגרגטים גסים מסוג עדש. שילובי הסיבים של כול תת קבוצה כללו: סיבים קצרים של 12 מ"מ, סיבים ארוכים של 60 מ"מ עם עיגון כפול בקצה (5D), סיבים ארוכים של 30 מ"מ עם עיגון יחיד בקצה (3D), שילוב של סיבים קצרים וסיבים ארוכים של 30 מ"מ, ושילוב של סיבים קצרים וסיבים ארוכים של 60 מ"מ. סה"כ הוכנו 30 תערובות שונות.

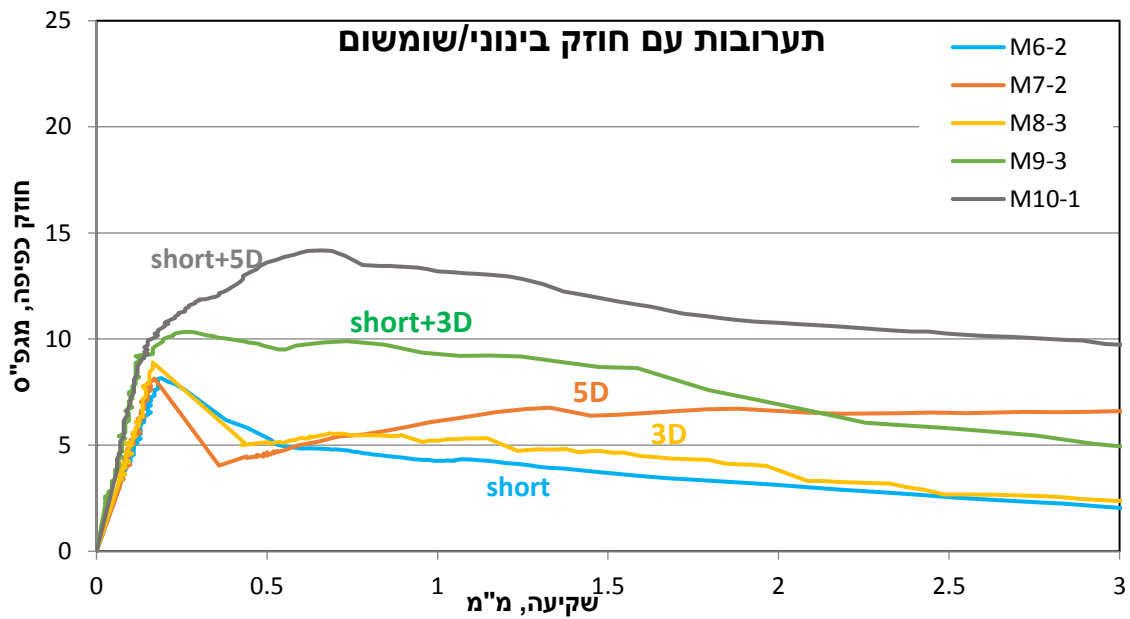
את תוצאות המחקר אפשר לסכם בנקודות הבאות:

5.1 השפעת הסיבים השונים בתערובות עם חוזק בינוני (70~ מגפ"ס) וסוג אגרגט קבוע

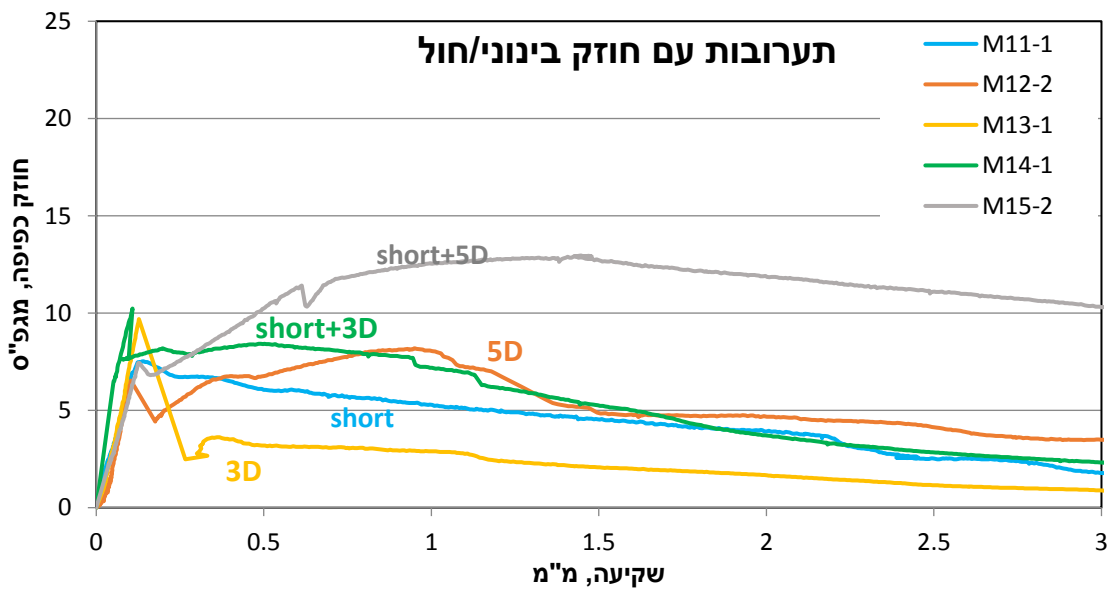
לצורך השוואה של השפעת גודל האגרגט על עקומת המאמץ/שקיעה של התערובות הבאות, נבחר מדגם מייצג אחד עבור כול תערובת, כדי שאפשר יהיה לשלב בצירור אחד את העקומות של מספר תערובות. בשלושת האיורים הבאים מופיעות התוצאות עבור תערובות הבטון עם חוזק של 70 מגפ"ס מסווגות לפי סוגי האגרגט השונים. ציור 42 כולל את חמשת שילובי הסיבים השונים עבור התערובת עם עדש, ציור 43 את חמשת שילובי הסיבים השונים עבור התערובת עם שומשום, וציור 44 עבור התערובות עם חול.



ציור 42: עקומות שקיעה/חוזק כפיפה עבור תערובות עם חוזק בינוני ועדש



ציור 43: עקומות שקיעה/חוזק כפיפה עבור תערובות עם חוזק בינוני ושומשום



ציור 44: עקומות שקיעה/חוזק כפיפה עבור תערובות עם חוזק בינוני וחול

ציור 42 מתאר את התנהגות בטון בחוזק בינוני המכיל עדש, אפשר לראות באופן ברור את התרומה המשמעותית של הסיבים מסוג 5D לחוזק בכפיפה של הבטון וגם למשיכות וצפידות. הסיבים הארוכים

מאפשרים לפתח את השלב של ה strain hardening ולכן יש עלייה במאמצי הכפיפה גם מעבר לגבול האלסטי. התרומה של הסיבים הקצרים באה לידי ביטוי בקבלת מאמצים מייד לאחר סדיקת הבטון בעוד שללא סיבים קצרים נצפתה ירידה בחוזק הכפיפה עם סדיקת הבטון ורק לאחר המשך הכפף חוזק הכפיפה עלה, ולכן מייד מתחיל להתפתח שלב ה- strain-hardening.

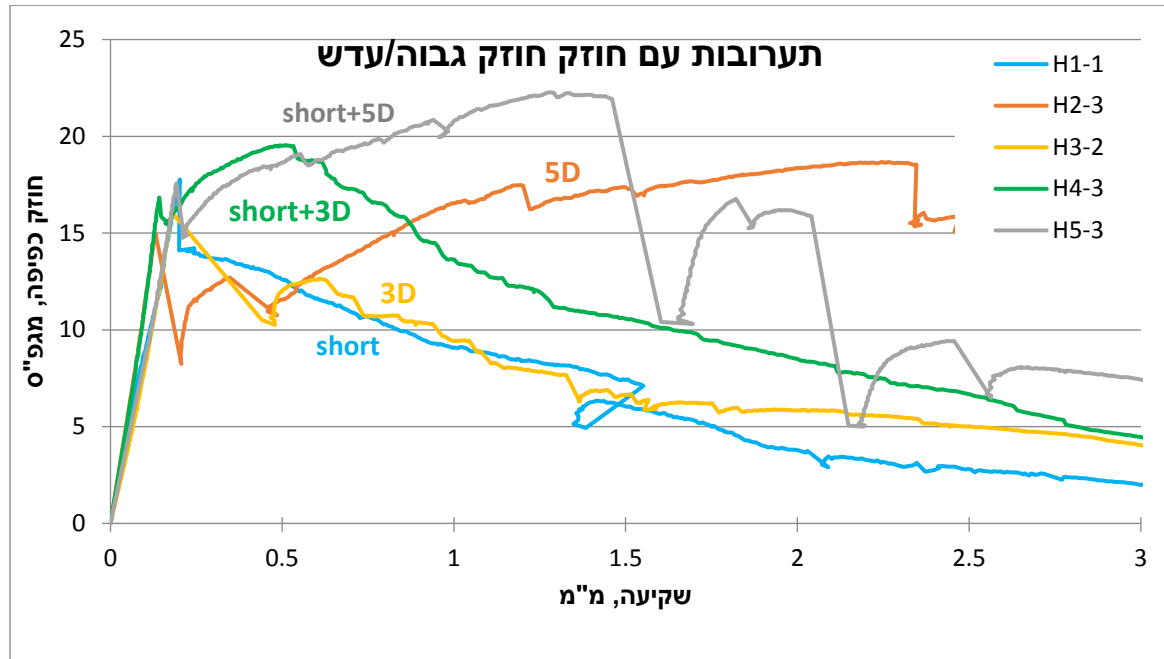
העקומות עבור התערובות עם הסיבים הקצרים והתערובות עם הסיבים מסוג 3D מתנהגות באופן דומה, כאשר חוזק הכפיפה של התערובות עם הסיבים הקצרים גבוה במקצת מזה של התערובות עם סיבי ה 3D. הסיבים הקצרים תרמו מעט לצפידות של תערובת שהוכנה עם סיבים 3D בלבד אך באופן חסר משמעות. בתערובות עם הסיבים הקצרים וסיבים מסוג 3D, יש שיפור בצפידות הבטון בהשוואה לבטון ללא סיבים הנסדק מייד, אך התרומה היא קטנה ביחס לשילוב של סיבי 5D עם הסיבים הקצרים, כפי הנראה בגלל עיגון טוב יותר של הסיבים הארוכים (5D).

בציור 43 מופיעות העקומות עבור התערובות שמבוססות על אגרגט מסוג **שומשום**. תרומת הסיבים השונים שונה בהשוואה לקבוצת התערובות המבוססות על אגרגט מסוג עדש. במקרה הזה, החוזק בכפיפה והצפידות של התערובות הכוללת סיבים קצרים ומסוג 5D היא עדיין הגבוהה ביותר ובתערובות זאת התרומה של הסיבים הקצרים בשלב ה- strain-hardening היא בולטת במיוחד. בתערובות עם סיבים 3D בשילוב סיבים קצרים חוזק הכפיפה נשמר אחרי סדיקת הבטון אך בתערובות עם סיבי 5D נמצאה עליה משמעותית בחוזק הכפיפה לאחר סדיקת הבטון. בתערובות עם שני סוגי הסיבים הארוכים אך ללא סיבים קצרים או סיבים קצרים בלבד לא נשמר חוזק הכפיפה ונצפתה ירידה של כ- 40% בחוזק הכפיפה לאחר סדיקת הבטון. יחד עם זאת תערובת סיבי 5D ללא סיבים קצרים נמצאה יחסית כבעלת צפידות גדולה יותר מהשתיים האחרות (3D ללא סיבים קצרים או קצרים בלבד) בערכי כפף גדולים.

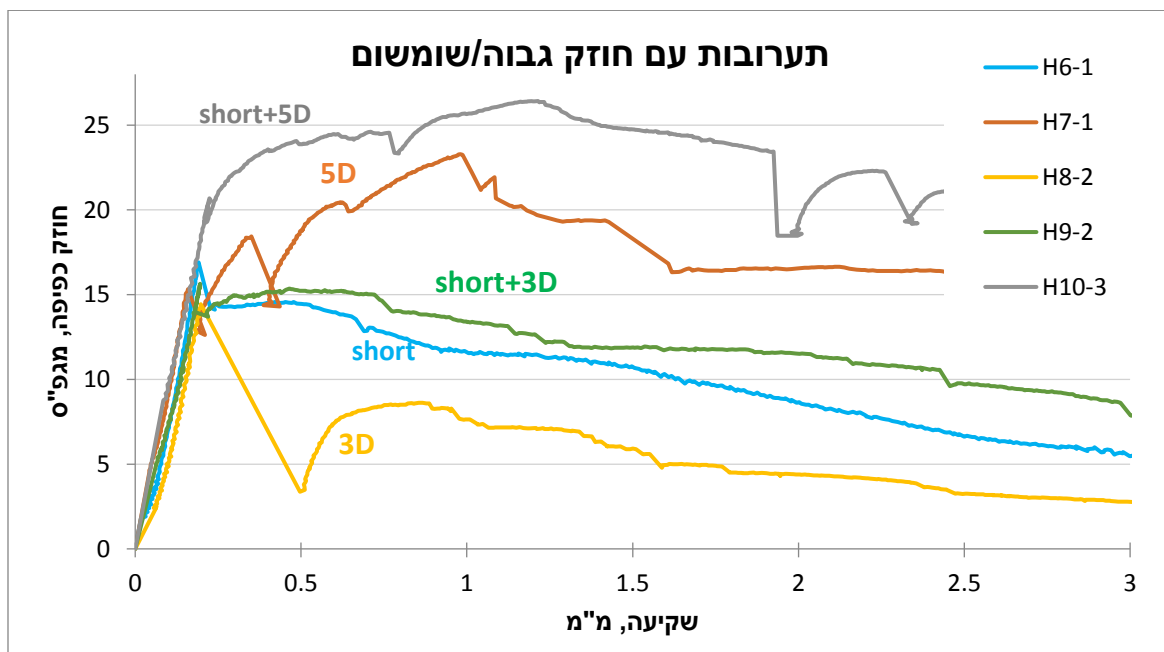
בציור 44 מופיעות העקומות עבור התערובות שמבוססות רק על **חול**. ההתנהגות דומה לזו של התערובות עם שומשום. גם במקרה הזה, החוזק בכפיפה והצפידות של התערובות הכוללת סיבים קצרים ומסוג 5D היא עדיין הגבוה ביותר, אך החוזק בכפיפה יותר נמוך מאשר באשר בתערובות שמבוססות על שומשום ועדש. התערובות עם סיבים 3D בלבד הייתה בעלת הצפידות הנמוכה ביותר, פחות יחסית גם לתערובות עם אגרגט שומשום.

5.2 השפעת הסיבים השונים בתערובות עם חוזק גבוה מאוד וסוג אגרגט קבוע

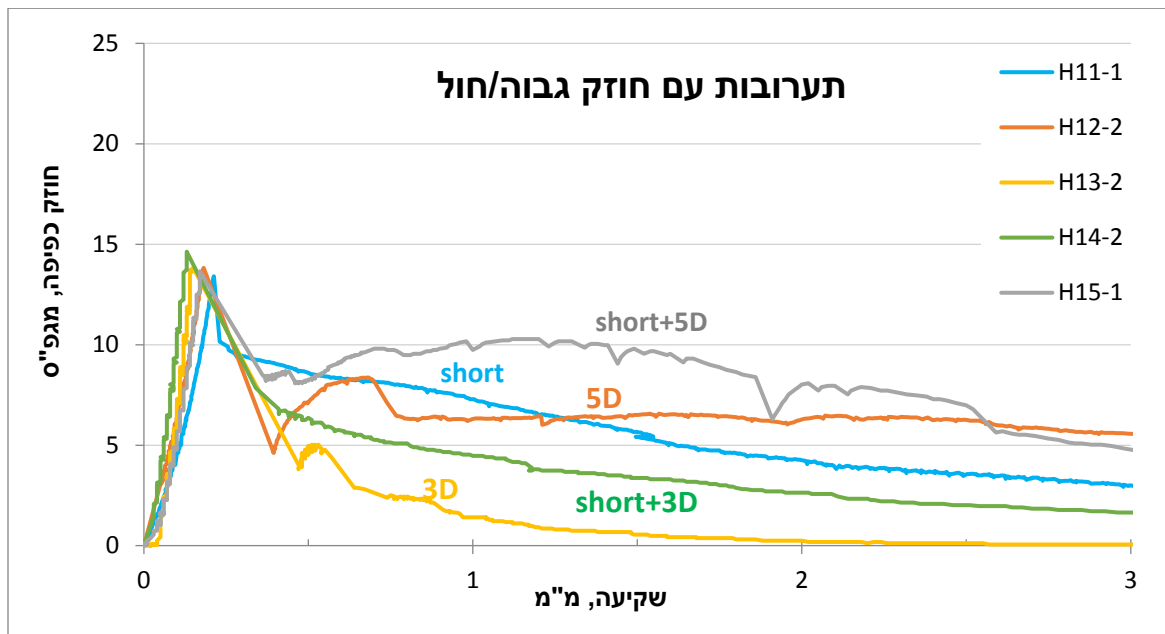
בשלושת האיורים הבאים מופיעות התוצאות עבור תערובות הבטון עם חוזק גבוה מסווגות לפי סוגי האגרגט השונים. ציור 45 כולל את חמשת שילובי הסיבים השונים עבור התערובות עם עדש, ציור 46 את חמשת שילובי הסיבים השונים עבור התערובות עם שומשום, וציור 47 עבור התערובות עם חול.



ציור 45: עקומות שקיעה/חוזק כפיפה עבור תערובות עם חוזק גבוה מאוד ועדש



ציור 46: עקומות שקיעה/חוזק כפיפה עבור תערובות עם חוזק גבוה מאוד ושומשום



ציור 47: עקומות שקיעה/חוזק כפיפה עבור תערובות עם חוזק גבוה מאוד וחול

בתערובות עם **חוזק גבוה** מאוד ומבוססות על **עדש**, ציור 45, תופעת ה strain-hardening מתפתחת רק בשתי התערובות הכוללות שילוב של סיבים ארוכים וקצרים, כאשר הצפיפות יותר גבוהה בתערובות עם הסיבים מסוג 5D. בתערובת הכוללת רק סיבי 5D, יש ירידה משמעותית בחוזק הכפיפה עם ההגעה אל גבול האלסטיות (סדיקת הבטון) משמעותית, ורק לאחר מכן יש התפתחות הדרגתית של תופעת ה-strain-hardening. התערובות רק עם הסיבים הקצרים והתערובות רק עם סיבים מסוג 3D מתנהגות באופן דומה, כאשר בנקודת הגבול האלסטי מתחילה ירידה בחוזק הכפיפה.

ביחס לתערובות עם הסיבים הקצרים, אף על פי שאין את ה-strain-hardening, יש שיפור בצפיפות הבטון בהשוואה לאותה התערובות עם חוזק של 70 מגפ"ס.

ציור 46 כולל את התערובות שמבוססות על אגרגטים מסוג **שומשום**. חוזק הכפיפה הגבוה ביותר מתקבל בקבוצת תערובות זאת, בשונה מהתערובות בחוזק בינוני (שם החוזק הגבוה ביותר התקבל בתערובות עם אגרגט עדש). ביחס לתערובות עם סיבים קצרים וסיבים מסוג 5D, אפשר לראות באופן ברור את התרומה המשמעותית של הסיבים מסוג 5D לחוזק בכפיפה של הבטון וגם למשיכות וצפיפות. גם במקרה

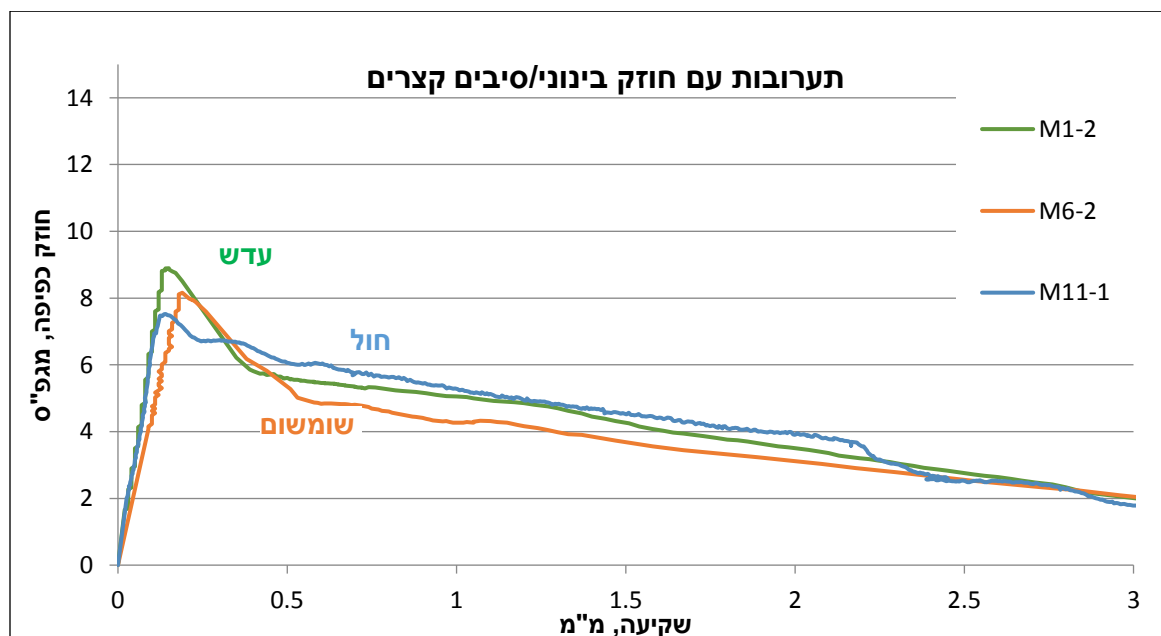
הזה, התרומה של הסיבים הקצרים באה לידי ביטוי בכך שבגבול האלסטי אין ירידה בחוזק הכפיפה, כפי שקורה בתערובות רק עם הסיבים מסוג 5D, ולכן מייד מתחיל להתפתח שלב ה-strain-hardening.

בתערובות עם הסיבים הקצרים וסיבים מסוג 3D ובתערובות רק עם הסיבים הקצרים, לא מתפתחת תופעת ה-strain-hardening, יחד עם זאת, לאחר גבול הכניעה, אין ירידה משמעותית בחוזק הכפיפה, כפי שקורה בתערובות הכוללות סיבים מסוג 3D בלבד.

בתערובות רק עם חול, ציור 47, לאחר גבול הכניעה יש ירידה משמעותית בחוזק לכפיפה בכול התערובות. בערכי כפף גבוהים (כ- 1.5 מ"מ) ניכרת עדיפות לתערובת עם הסיבים הארוכים מסוג 5D.

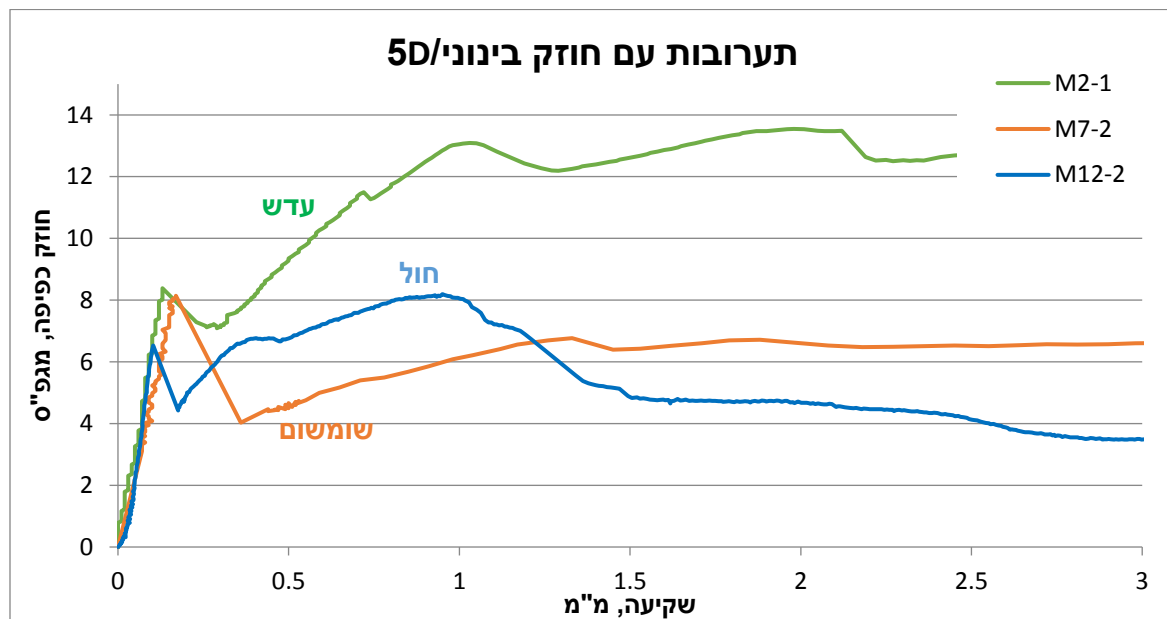
5.3 השפעת סוג האגרגט על תערובות סיבים נתונה בתערובות עם חוזק בינוני של 70~ מגפ"ס

לצורך השוואה של השפעת סוג האגרגט על עקומת המאמץ/שקיעה של תערובות המכילות סוג נתון של סיבים, הציורים הבאים כוללים שילוב של העקומות השונות עבור כול קבוצת סיבים. בחמשת הציורים הבאים מופיעות התוצאות עבור תערובות הבטון עם חוזק של 70 מגפ"ס מסווגות לפי סוגי הסיבים השונים.



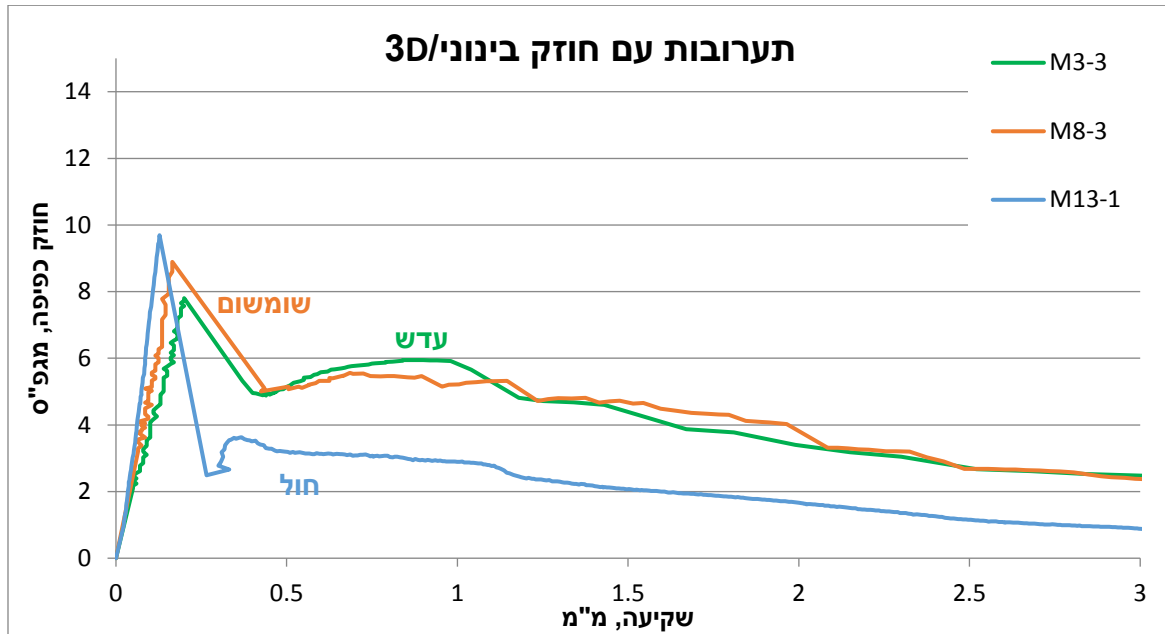
ציור 48: עקומות שקיעה/חוזק כפיפה עבור תערובות עם חוזק של 70 מגפ"ס עם סיבים קצרים

השימוש בסיבים קצרים בלבד לא תורם להתפתחות תופעת strain hardening ללא תלות בסוג האגרגט. לאחר גבול הכניעה, יש ירידה משמעותית (15-25%) בחוזק הכפיפה, ובהמשך – ירידה מתונה עם המשך הכפף.



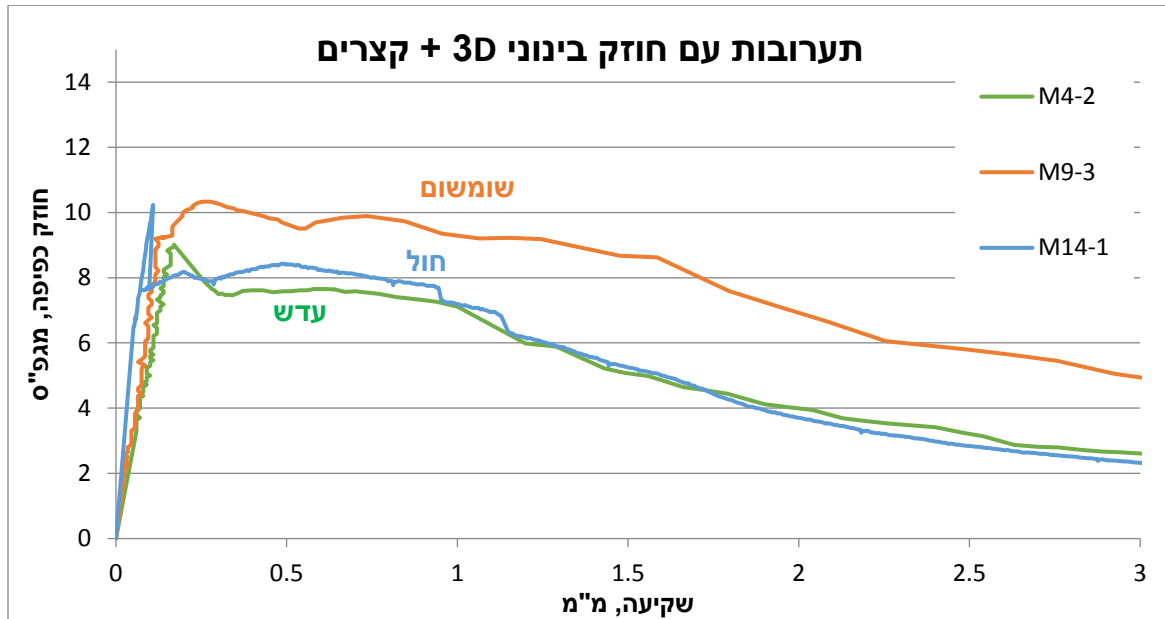
ציור 49: עקומות שקיעה/חוזק כפיפה עבור תערובות עם חוזק של 70 מגפ"ס עם סיבים מסוג 5D

בתערובת עם חוזק ביוני, השימוש בסיבים ארוכים מסוג 5D, גם ללא סיבים קצרים, מאפשר קבלת חוזק כפיפה גבוה יחד עם התפתחות משמעותית של תופעת ה-strain-hardening כאשר האגרגט הוא עדש (ציור 49). לעומת זאת, בתערובות עם שומשום או חול, יש ירידה בחוזק לאחר סדיקת הבטון (סדק ראשון), ולאחר מכן עליה הדרגתית בחוזק.



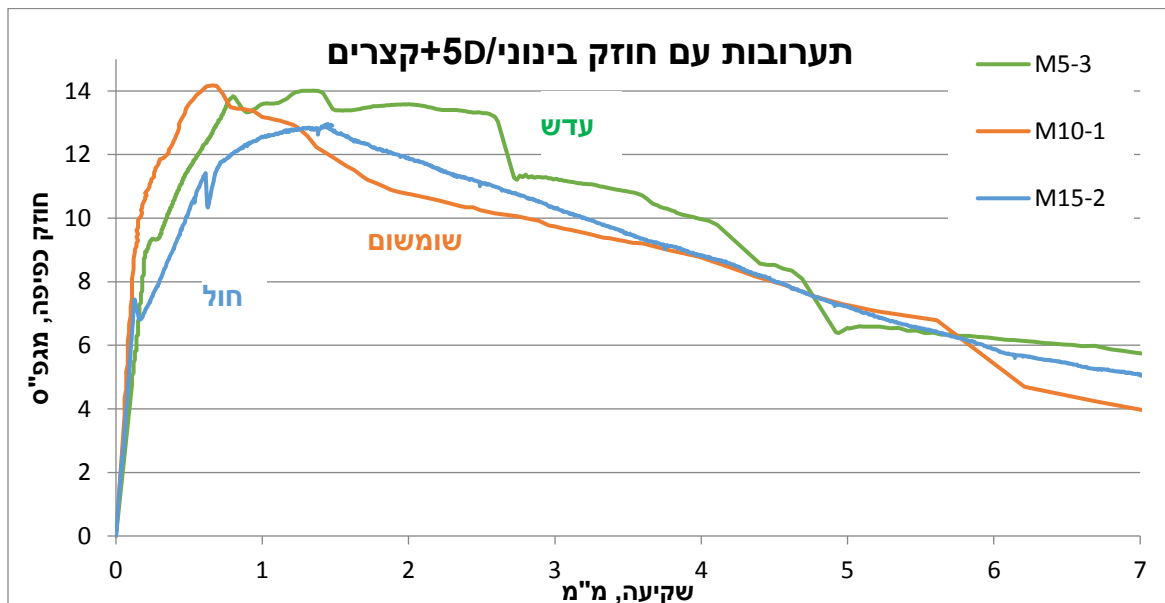
ציור 50 : עקומות שקיעה/חוזק כפיפה עבור תערובות עם חוזק של 70 מגפ"ס עם סיבים מסוג 3D

השימוש בסיבים מסוג 3D בלבד לא מאפשר את התפתחות ה strain hardening באף אחת מהתערובות (ציור 50). ירידה בחוזק המתיחה בשיעור של כ- 30% נצפתה מייד לאחר התפתחות סדק ראשון בתערובות עם עדש או שומשום, תוך שמירה על אותה רמת חוזק בהמשך הכפף. התרומה של הסיבים היא הכי פחות משמעותית בתערובות עם החול (ירידה של כ- 50%).



ציור 51 : עקומות שקיעה/חוזק כפיפה עבור תערובות עם חוזק של 70 מגפ"ס עם סיבים מסוג D3 וסיבים קצרים

השילוב של סיבים קצרים עם סיבים מסוג 3D מאפשר את התפתחות תופעת ה strain-hardening בתערובת עם השומשום (ציור 51). בתערובות עם העדש או החול, יש ירידה קלה בחוזק הכפיפה לאחר התפתחות סדק ראשון, אך החוזק יציב עד שקיעה של בערך 1 מ"מ. לאחר מכן יש ירידה הדרגתית בחוזק לכפיפה.

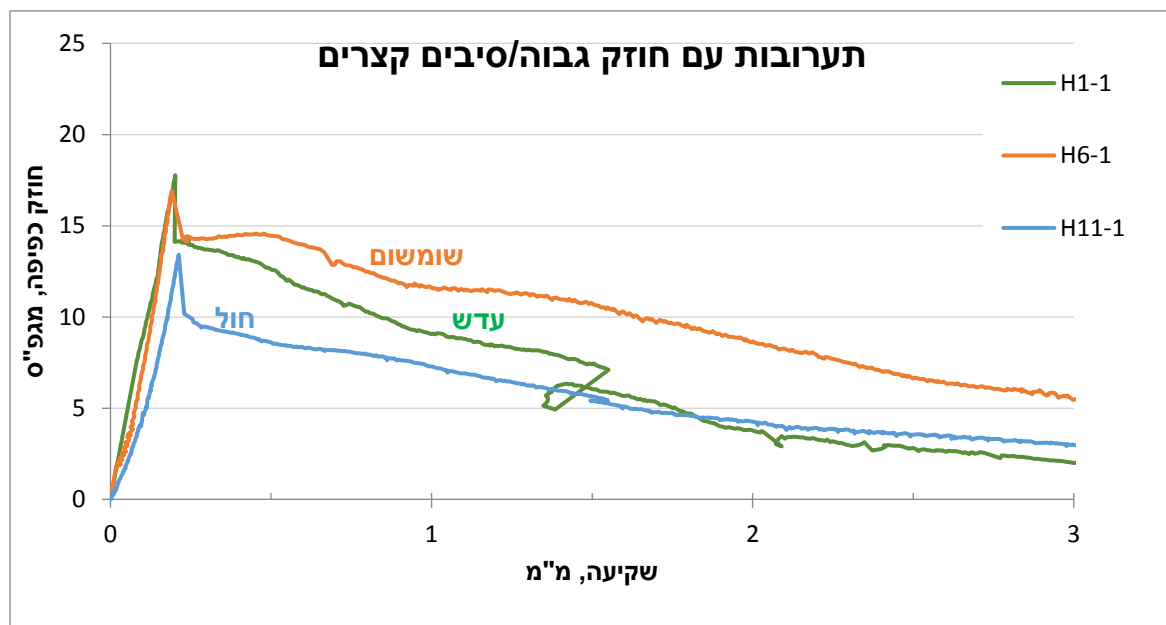


ציור 52 : עקומות שקיעה/חוזק כפיפה עבור תערובות עם חוזק של 70 מגפ"ס עם סיבים מסוג 5D וסיבים קצרים

התערובות שהכילו שילוב סיבים ארוכים מסוג 5D יחד עם סיבים קצרים היו בעלות החוזק בכפיפה הוא הגבוה ביותר מכל התערובות של בטון בחוזק בינוני ללא תלות בסוג האגרגט. בנוסף, גם תופעת ה strain hardening מתפתחת באופן משמעותי בתערובות אלה, גם כן ללא תלות בסוג האגרגט. לאחר גבול הכניעה, אין ירידה בחוזק בכפיפה (אפשר לזהות ירידה קטנה רק בתערובת עם החול), אלא עליה מתמדת בחוזק, עד החוזק המקסימאלי. שילוב זה של סיבים משפר באופן משמעותי את צפיפות ומשיכות הבטון.

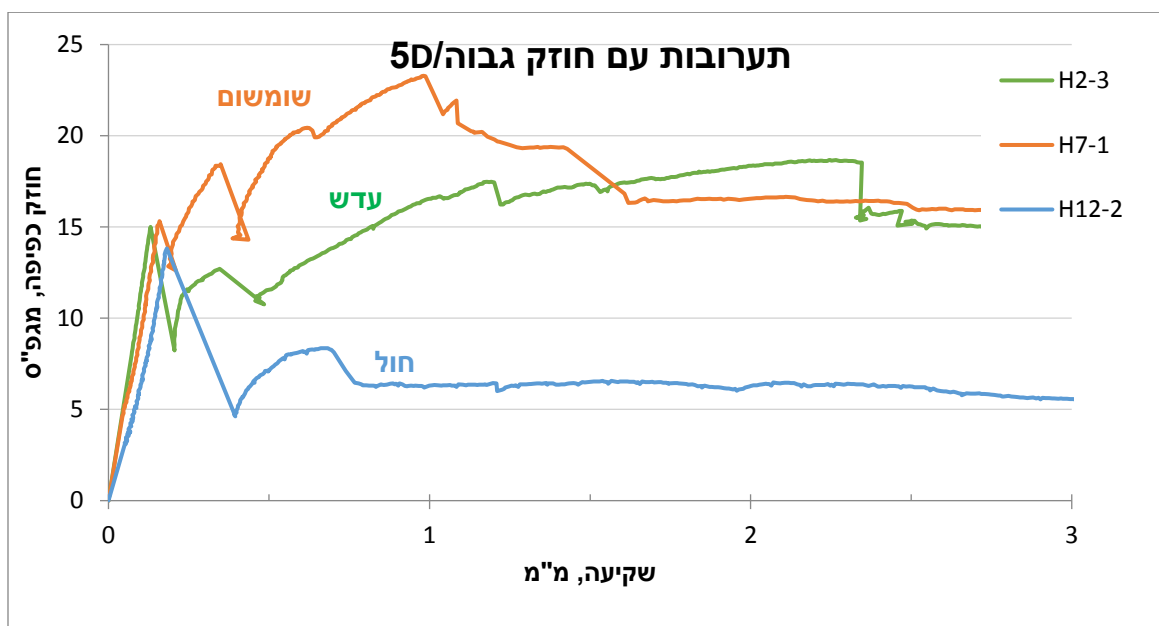
5.4 השפעת סוג האגרגט על תערובת סיבים נתונה בתערובות עם חוזק גבוהה מאוד

בחמשת הציורים הבאים מופיעות התוצאות עבור תערובות הבטון עם חוזק גבוהה מאוד (בין 120-150 מגפ"ס) מסווגות לפי סוגי הסיבים השונים, כאשר רואים בהם את השפעת סוג האגרגט על תכונות הבטון. ככלל, חוזק הכפיפה שהתקבל היה גבוה בהרבה מזה שהתקבל בבטון בחוזק בינוני (70~ מגפ"ס), יש לשים לב לסקלת החוזק השונה בציורים הבאים ביחס לאלה שהוצגו עבור החוזק הבינוני.

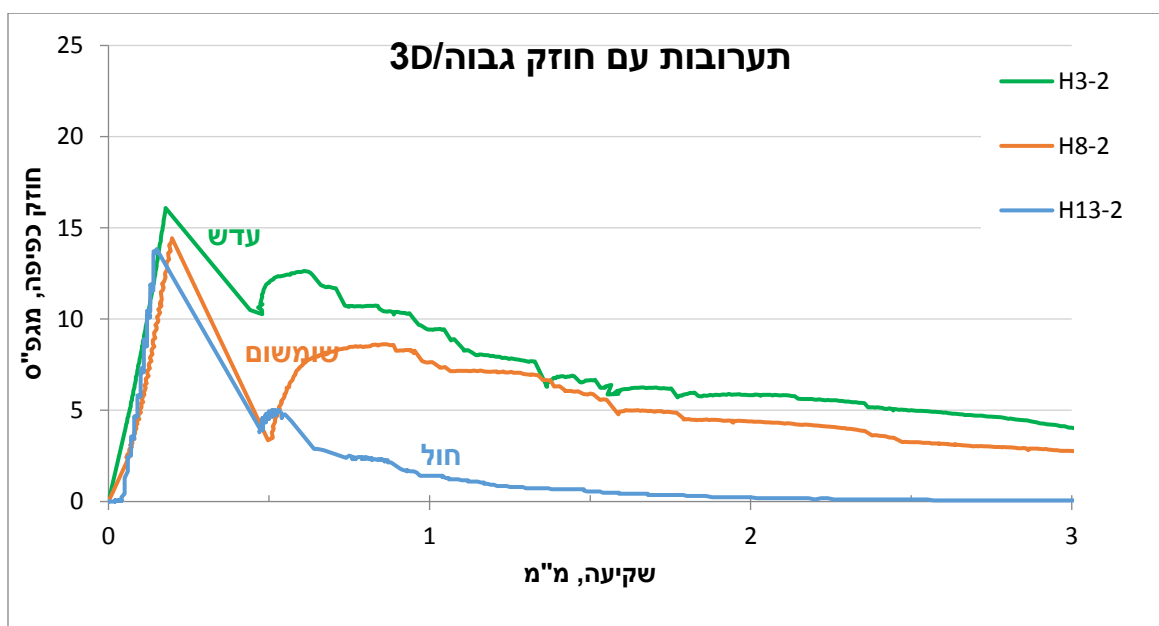


ציור 53: עקומות שקיעה/חוזק כפיפה עבור תערובות עם חוזק גבוה מאוד עם סיבים קצרים

השימוש בסיבים קצרים בלבד לא תורם להתפתחות תופעת strain-hardening. לאחר גבול הכניעה, יש ירידה של כ- 15% בחוזק הכפיפה (ציור 53). בתערובת עם שומשום קצב ירידת החוזק הוא נמוך ביותר, לעומת התערובת רק עם חול שבה הקצב ירידה בחוזק הוא הגבוה ביותר.



ציור 54 : עקומות שקיעה/חוזק כפיפה עבור תערובות עם חוזק גבוה מאוד עם סיבים מסוג 5D

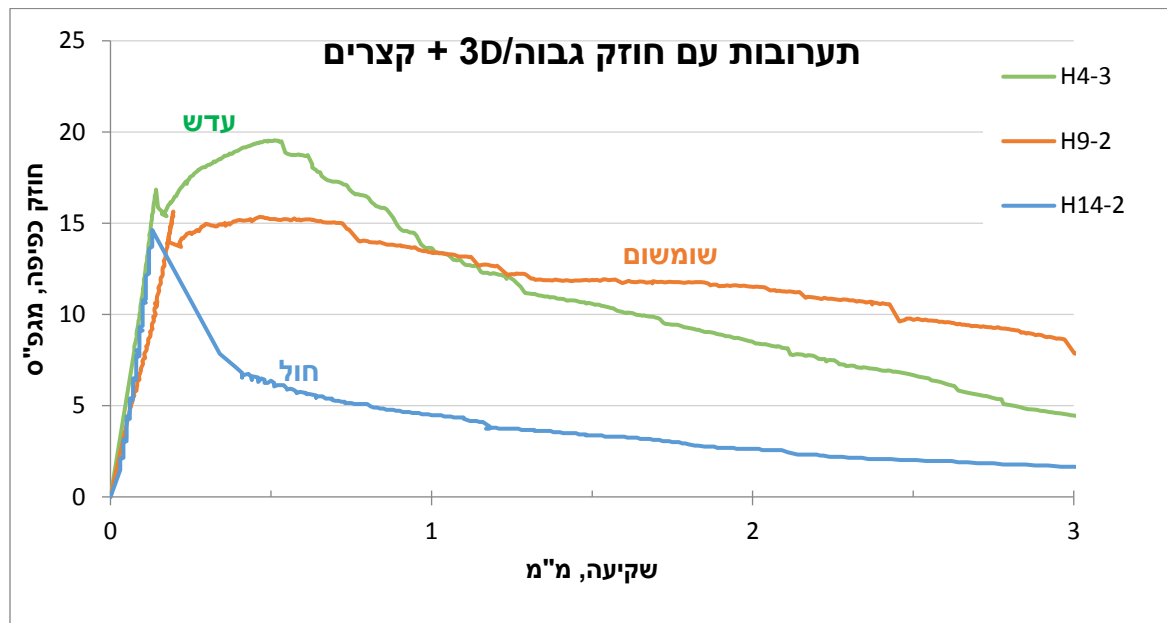


ציור 55 : עקומות שקיעה/חוזק כפיפה עבור תערובות עם חוזק גבוה מאוד עם סיבים מסוג 3D

בתערובות עם חוזק גבוה, השימוש בסיבים ארוכים מסוג 5D, גם ללא סיבים קצרים, מאפשר התפתחות משמעותית של תופעת ה-strain-hardening בתערובות המבוססת על שומשום ועדש (ציור 54). התרומה של הסיבים משמעותית ביותר בתערובות של השומשום. בתערובות עם חול תופעה זאת לא מתפתחת, ויש ירידה משמעותית בחוזק לכפיפה לאחר התפתחות סדק ראשון. בנוסף, ניתן להבחין בקפיצות

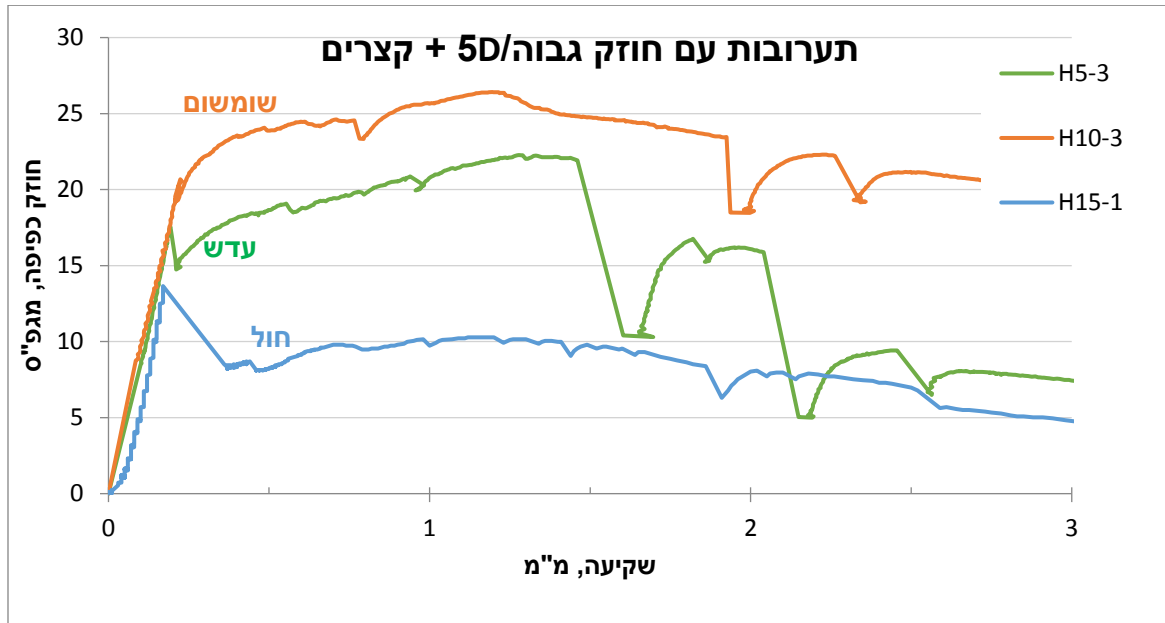
משמעותיות בעומס במהלך הניסוי הנובעות כפי הנראה משליפה (או קריעה) מקומית של אחד מהסיבים הנושאים בעומס תוך כדי פתיחת הסדק.

השימוש בסיבים מסוג 3D בלבד לא מאפשר את התפתחות ה strain hardening באף אחת מהתערובות (ציור 55). התרומה של הסיבים היא הנמוכה ביותר בתערובות עם החול, והגבוהה ביותר – בתערובות עם השומשום.



ציור 56: עקומות שקיעה/חוזק כפיפה עבור תערובות עם חוזק גבוה מאוד עם סיבים מסוג 3D וסיבים קצרים

השילוב של סיבים קצרים עם סיבים מסוג 3D מאפשר את התפתחות תופעת ה- strain-hardening בתערובת עם עדש ושומשום, כאשר בתערובת עם עדש הושג חוזק גבוה יותר (ציור 56). תופעה זו של strain hardening לא נראתה כאשר בתערובת לא היו סיבים קצרים (ציור 55). בתערובות החול, יש ירידה בחוזק הכפיפה לאחר גבול הכניעה.



ציור 57: עקומות שקיעה/חוזק כפיפה עבור תערובות עם חוזק גבוה מאוד עם סיבים מסוג 5D וסיבים קצרים

החוזק בכפיפה שהתקבל בשילוב סיבים מסוג 5D עם סיבים קצרים הוא הגבוה ביותר בכל אחד משלושת התערובות הכוללות אגרגטים בגדלים שונים (עדש, שומשום או חול). תופעת ה-strain-hardening מתפתחת באופן משמעותי ביותר בתערובת עם השומשום המגיעה גם לחוזק הכפיפה הגבוה ביותר. התרומה של הסיבים היא הנמוכה ביותר בתערובות רק עם החול אך גם כאן החוזק השיורי נמוך במעט מחוזק הכפיפה שהתפתח בסדק הראשון, והוא נשמר גם עם התפתחות הכפף.

6. סיכום ומסקנות

מחקרים קודמים הראו פוטנציאל לייצור בטון בחוזק גבוה במיוחד גם עם אגרגט גדול יחסית (עדש – 14~מ"מ) תוך שמירה על יכולת ערבול טובה והשגת חוזק גבוה. בנוסף, נמצא באותם מחקרים כי ניתן להשתמש בכמות גדולה יחסית של סיבי פלדה קצרים אך גם בסיבים ארוכים, כאשר לכל אחד מהם תרומה בתחומים אחרים של התנהגות הבטון במתיחה בכפיפה.

המחקר הנוכחי התמקד לפיכך בשני פרמטרים חשובים אלה בבטון בעל חוזק גבוה במיוחד (120-150 מגפ"ס):

- השפעת שילוב סיבים בגדלים שונים
- השפעת גודל האגרגט הגדול בתערובת

שלושה סוגי סיבים נבדקו במחקר:

- סיבים קצרים בקוטר 0.4 מ"מ ואורך 12 מ"מ
- סיבים בקוטר 0.62 מ"מ ואורך 30 מ"מ עם עיגון בודד בקצה (3D)
- סיבים בקוטר 0.9 מ"מ ואורך 60 מ"מ עם עיגון כפול בקצה (5D)

תערובות הבטון הוכנו עם סוג אחד של סיבים (150 ק"ג/מ"ק לקצרים ו- 50 ק"ג/מ"ק לשני הארוכים) או שילוב סיבים קצרים (100 ק"ג/מ"ק) עם אחד מהסיבים הארוכים (50 ק"ג/מ"ק).

שלושה גדלים מכסימליים של אגרגטים נבדקו במחקר:

- עדש (14 מ"מ)
- שומשום (9.5 מ"מ)
- חול (0.6 מ"מ)

לצורך השוואה הוכנו גם תערובות זהות אך בחוזק בינוני של בטון (70~ מגפ"ס)

השפעת גודל האגרגט: בכל התערובות שהוכנו בחוזק גבוה נמצא כי אלה שהוכנו עם אגרגט חול בלבד התנהגו באופן הפחות טוב מכל האחרות, זאת בניגוד לסברה כי בטון טוב בחוזק גבוה ניתן להכין עם אגרגט קטן בלבד. תופעה זו נראתה בבדיקות חוזק לחיצה ואופן בולט יותר בבדיקות חוזק מתיחה בכפיפה. במהלך הכנת התערובות נראה היה כי לכידות התערובות אינה אופטימלית דבר שעלול היה להביא לכליאת אוויר מוגברת ופיזור לא אחיד של הסיבים. בכל מקרה, התוצאות הנמוכות יחסית התקבלו גם בתערובות שהיו בעלי לכידות טובה יותר כך שנראה שתופעה זו מאפיינת את התערובות הללו.

בבטון בחוזק בינוני, ההתנהגות בכפיפה של כל התערובות נראתה ללא עדיפות מיוחדת לסוג הסיבים או שילובים שונים שלהם פרט לתערובת עם הסיבים באורך 60 מ"מ (5D) בהם נראתה משיכות מוגברת לתערובת עם אגרגט עדש. בבטון בחוזק גבוה, לעומת זאת, נראתה ברוב המקרים עדיפות לתערובות עם אגרגט מרבי בגודל שומשום. התערובות עם אגרגט מרבי בגודל חול היו הנחותות ביותר יחסית לאלו עם האגרגטים הגדולים יותר.

השפעת סוג ושילוב הסיבים : בכל התערובות, ההתנהגות הטובה ביותר נראתה בשימוש בסיבים ארוכים עם עיגון כפול (60 מ"מ 5D) בשילוב סיבים קצרים. לעומת זאת, השימוש בסיבים קצרים בלבד או סיבים באורך בינוני (30 מ"מ 3D) בלבד הביא לתוצאות הנחותות ביותר עבור כל סוגי התערובות. התערובות שהכילו סיבים ארוכים (60 מ"מ 5D) הראו תכונות טובות בכפיפה, בעיקר כאשר הם שולבו עם הסיבים הקצרים. הוספת הסיבים הקצרים הקטינה את ירידת החוזק לאחר פתיחת הסדק הראשון וטרם העלייה בתסבולת בגלל יכולת הנשיאה של הסיבים הארוכים. בנוסף, תופעה זו גרמה גם לספיגת אנרגיה מרובה בתחום כפף זה. גם בתערובות עם הסיבים באורך 30 מ"מ (3D) נראה שיפור משמעותי ביכולת נשיאת עומסים בתחום שלאחר התפתחות הסדק הראשון, אם כי לא באותו שיעור כמו בסיבים הארוכים יותר.

נראה כי לעיגון הסיבים יש תרומה משמעותית ביכולת נשיאת העומסים בכפיפה לאחר התפתחות הסדק הראשון. הכיפוף הכפול בקצות הסיבים הארוכים מספק עיגון משמעותי לסיבים הארוכים כך שהם מצליחים ליצור מנגנון נשיאת עומס משמעותי כאשר הסדק נפתח. הסיבים הקצרים שמשולבים איתם מצליחים למתן את השינויים המשמעותיים הנוצרים כאשר סיב בודד ניתק ממקומו ובכך מסייעים בספיגת האנרגיה. בנוסף, ייתכן והאגרגטים יוצרים מנגנון דומה למנגנון שליפה על גבי סרן (pulley) המוסיף חיכוך לסיבים הנטויים ביחס למישור הסדק, היוצר בכך תוספת לכוחות העיגון. כאמור, זו השערה בלבד והיא זקוקה לתמיכה נוספת.

מחקר זה בוצע עם כמויות סיבים נתונות : 2% ~ מנפח הבטון (150 ק"ג/מ"ק) או 0.63% נפחי כשנעשה שימוש בסיבים ארוכים בלבד (50 ק"ג/מ"ק). יעילותן של המערכות המשולבות משני גדלי סיבים ברורה אך נראה כי יש מקום לאופטימיזציה אשר תפחית את הכמות הכוללת של הסיבים ותהפוך את המערכת ליעילה יותר בתכולות סיבים נמוכות יותר.

7. רשימת ספרות:

Acker, P., "Why does Ultra high performance concrete (UHPC) exhibits such low shrinkage and such low creep?" Autogenous Deformations of Concrete ACI SP 220-10, 2004, pp 141-154.

DAfStb, "Commentary on the DAfStb Guideline "Steel Fibre Reinforced Concrete", 2015

De Lerrard, F., Sedran, T., "Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model", Cement and Concrete Research, Vol. 24, No. 6, pp.997-1007, 1994

Federal Highway Administration, "Ultra-High Performance Concrete", Publication no. FHWA-HRT-11-038, 2011.

Federal Highway Administration FHWA-HRT-13-060, Ultra-High-Performance Concrete: A state-of-the Art Report for the Bridge Community, June 2013.

Graybeal, B.A., "Compressive Behavior of Ultra High Performance Fiber reinforced Concrete", ACI Materials Journal, March-April 2007, pp. 146-152.

Lee N.P., Chisholm, D.H., "Reactive Powder Concrete", Study Report SR 146, BRANTZ Ltd., New Zealand, 2005.

Naaman, A.E., Reinhardt, H.W., "Characterization of high Performance Fiber Reinforced cement Composites-HPFRCC", High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2 (HPFRCC-2), Proceedings of the second International RILEM Workshop, RILEM Publications, 1996, pp. 1-24.

Park, J.J ; Kang, S.T., Koh, K.T., and Kim, S.W. 2008, "Influence of the ingredients on the compressive strength of (UHPC) as a fundamental study to optimize the mixing proportions", Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel, Germany, pp. 105-112.

Richard, P. Cheyrezy, M.H., "Reactive powder concretes with high ductility and 200-800MPa compressive strength." ACI SP-144 Concrete Technology: Past, Present and Future, American Concrete Institute, Detroit, 1994, pp. 507-518.

Sukmin, K., Nishiwaki, T., Kikuta, T., Mihashi, H., Development of Ultra-High-Performance Hybrid Fiber-Reinforced Cement-Based Composites, ACI Materials Journal, May-June, 2014. PP. 309-318.

Vic, P., Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete, Construct2009, Indianapolis, June 16-19, 2009.

Walraven, J., On the way to international design recommendations for ultra-high performance fiber reinforced concrete, 3rd International Symposium on (((UHPC))) and Nanotechnology for High Performance Construction Material, Kassel, Germany, March 7-9 2012, pp.51 – 58

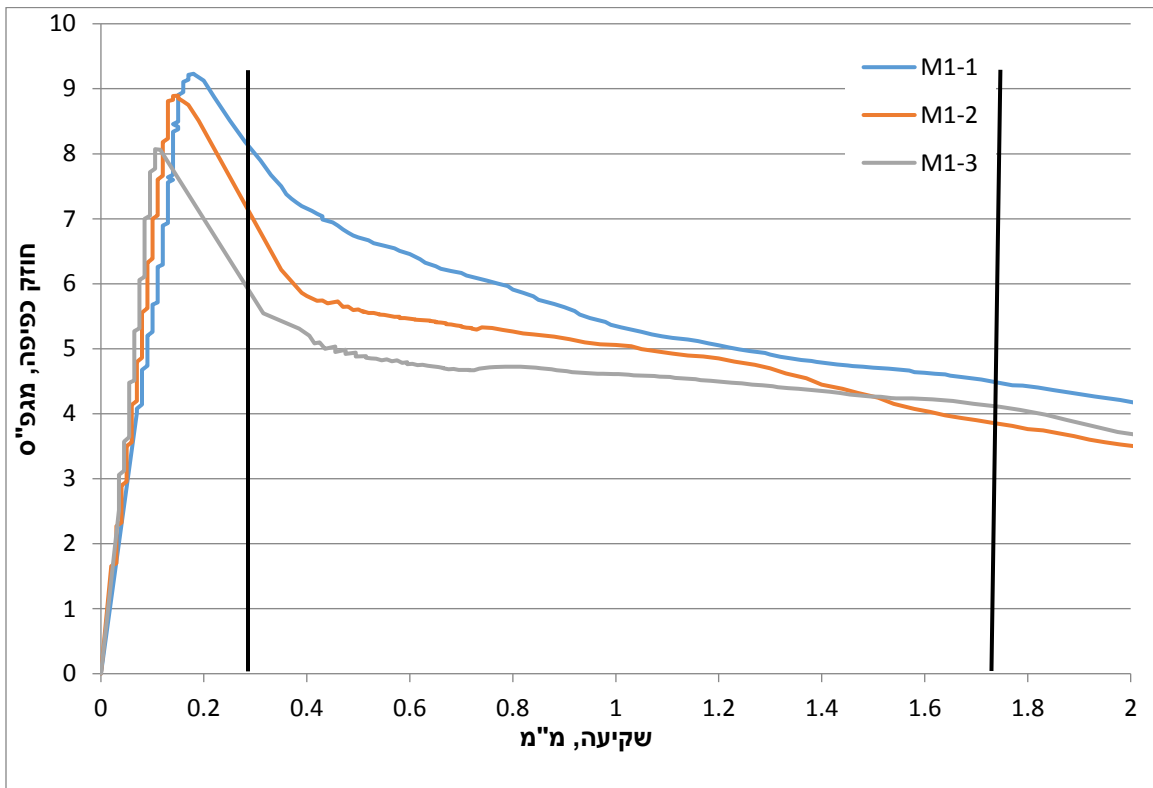
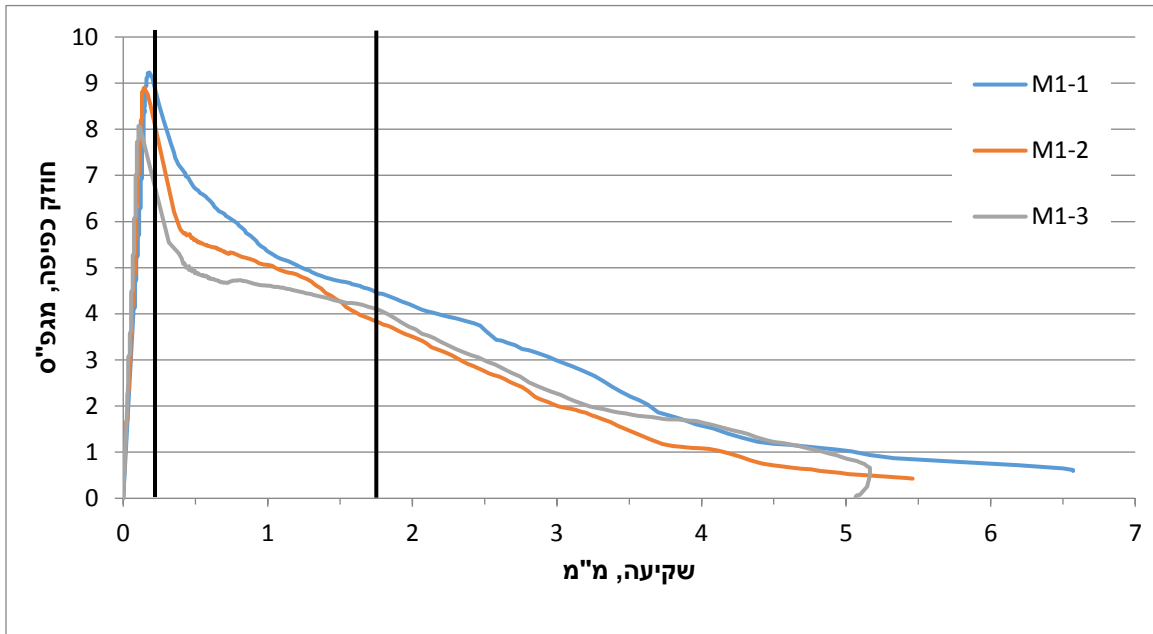
Wille, K., Naaman, A.E., Parra-Montesinos, G.J., Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way, ACI Material Journal, January-February 2011, pp.46-54.

גלית אגרנטי, אמנון כץ, ארנון בנטור, "פיתוח של בטון בעל תכונות מעולות (UHPC) באמצעות חומרים מקומיים", דוח מחקר, המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון-מכון טכנולוגי לישראל, 2013.

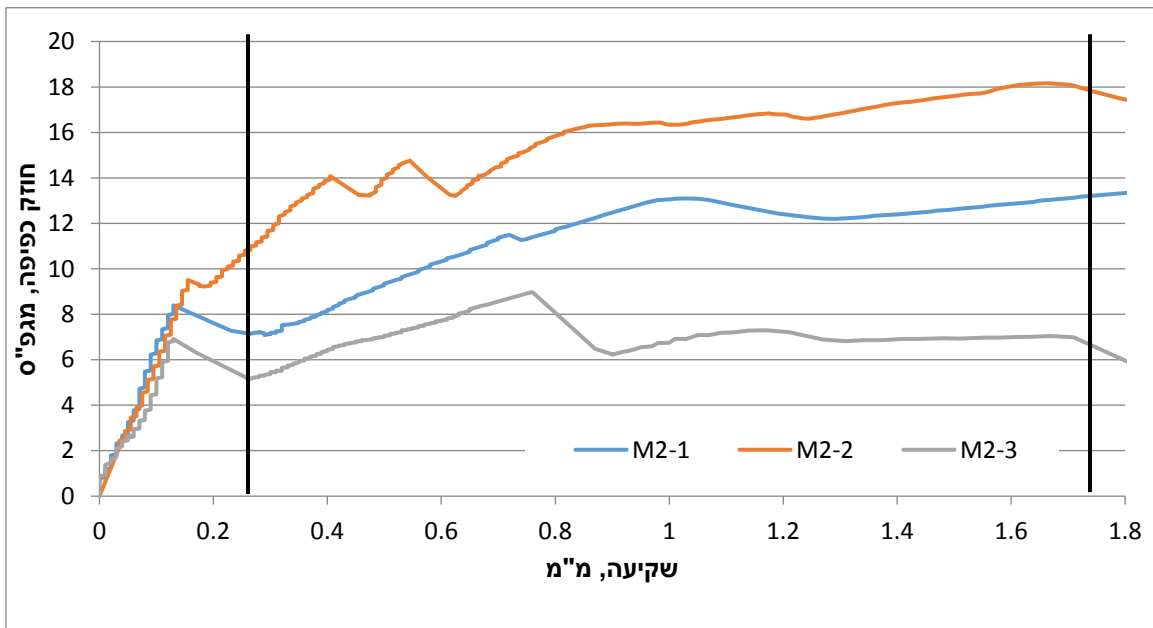
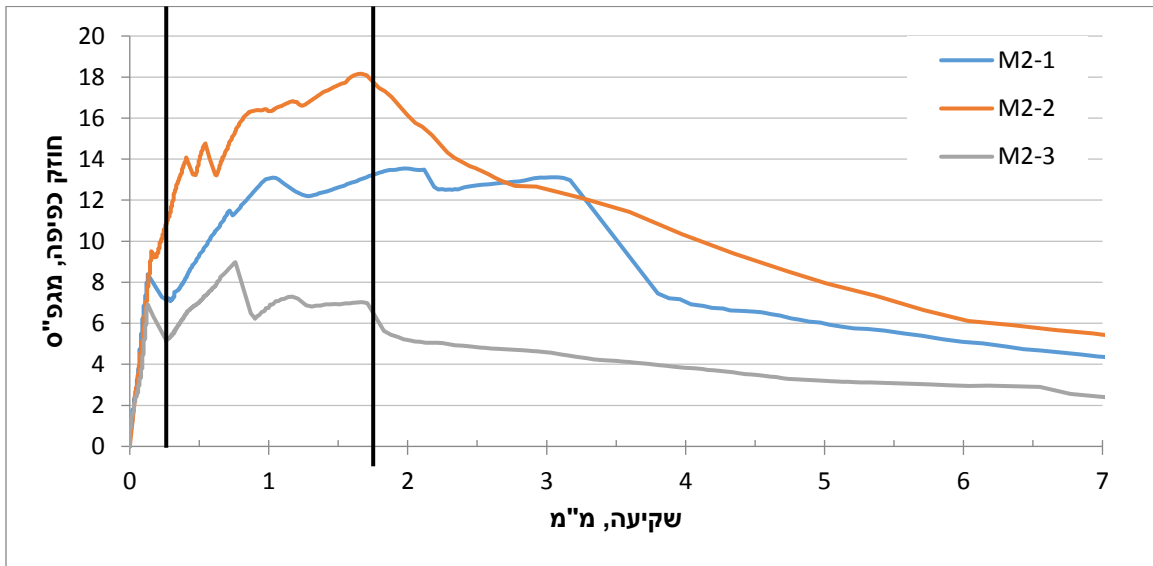
גלית אגרנטי, אמנון כץ "חקירת התנאים והגורמים המשפיעים על ייצור בטון בעל חוזק גבוה במיוחד", דוח מחקר, המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון-מכון טכנולוגי לישראל, 2014.

נספח א – בטון עם חוזק בינוני (בערך 70 מגפ"ס). עקומות שקיעה כנגד חוזק הכפיפה עבור תערובות
הבטון השונות

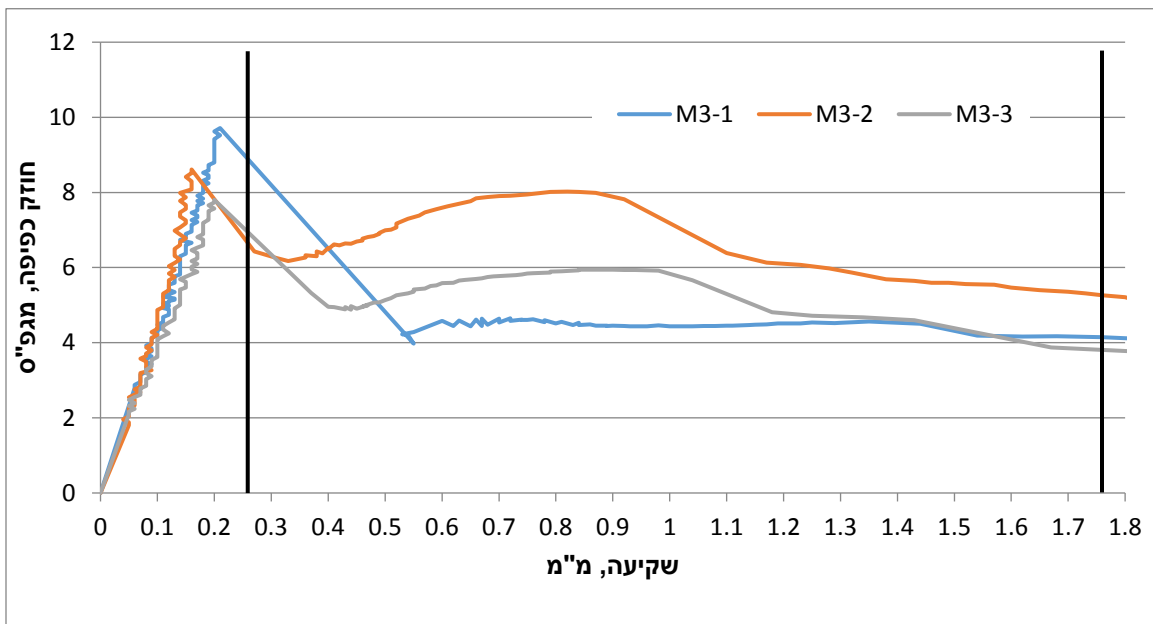
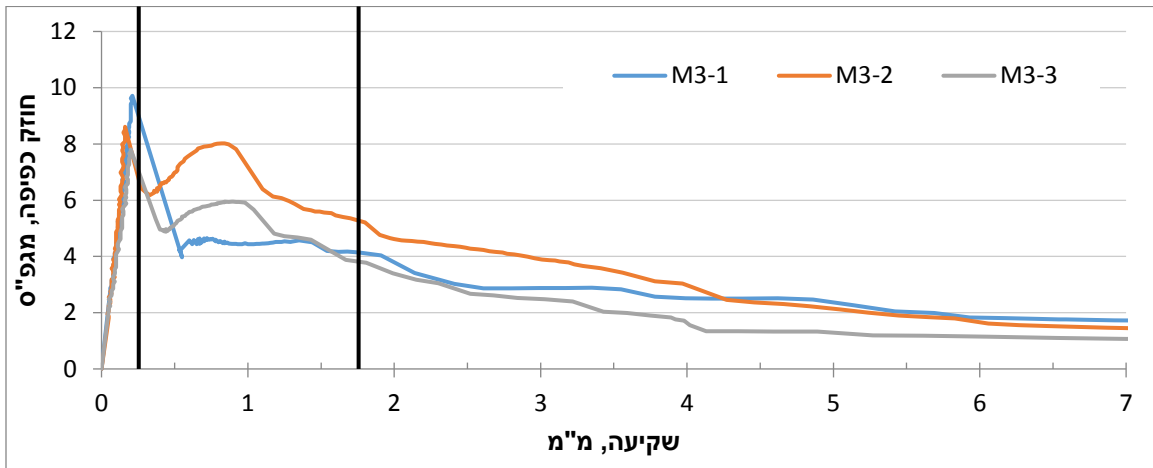
תערובות M1 – חוזק בינוני/עדש/סיבים קצרים



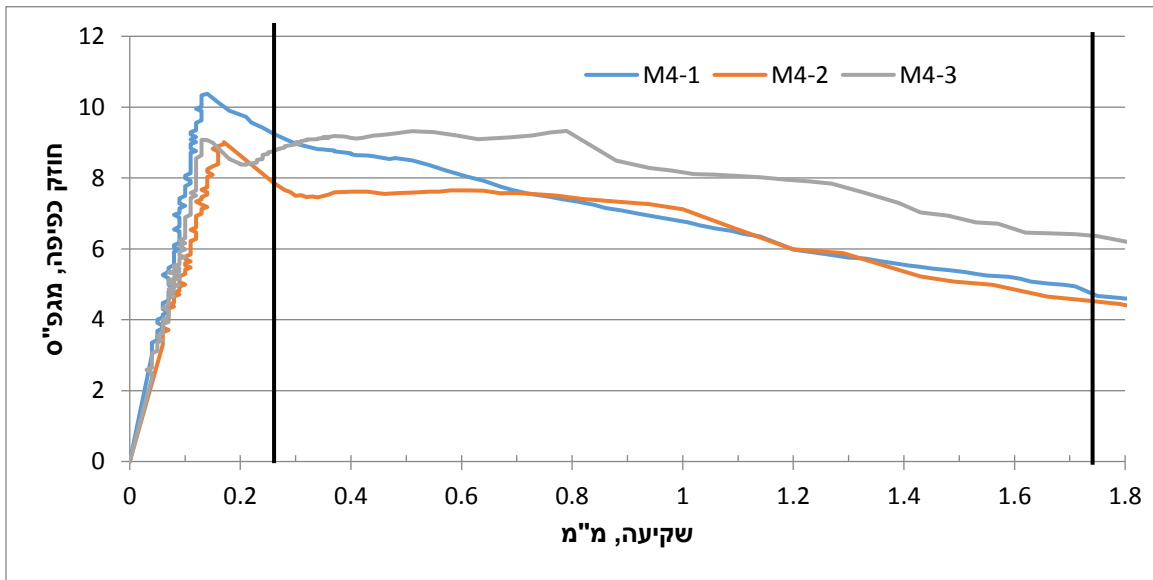
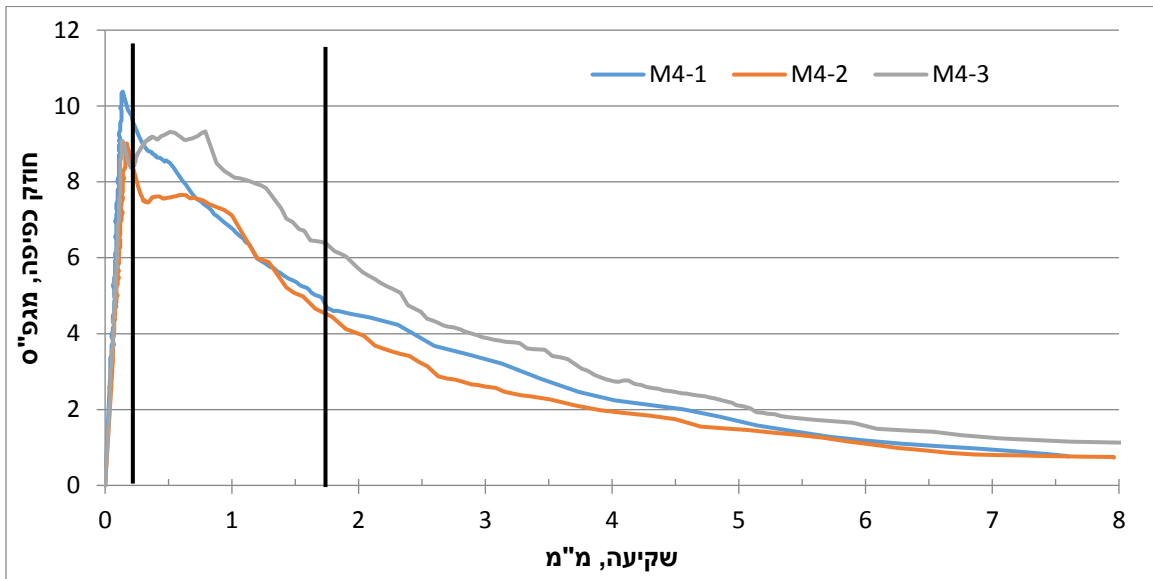
תערובות M2 – חוזק בינוני/עדש/סיבים ארוכים 3D



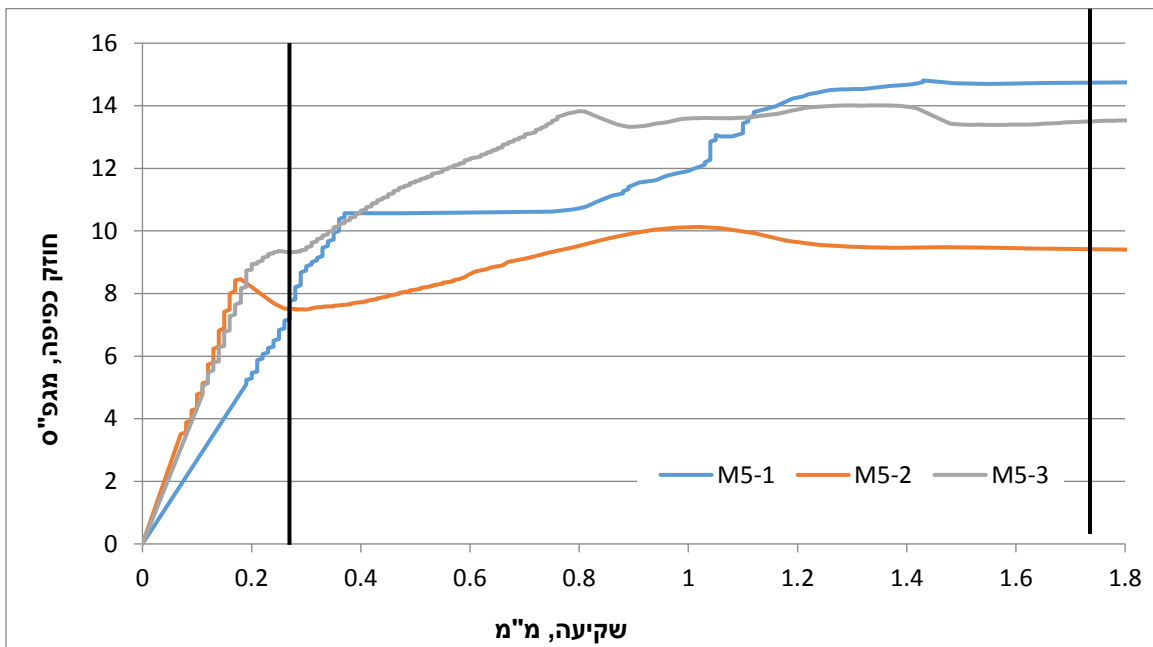
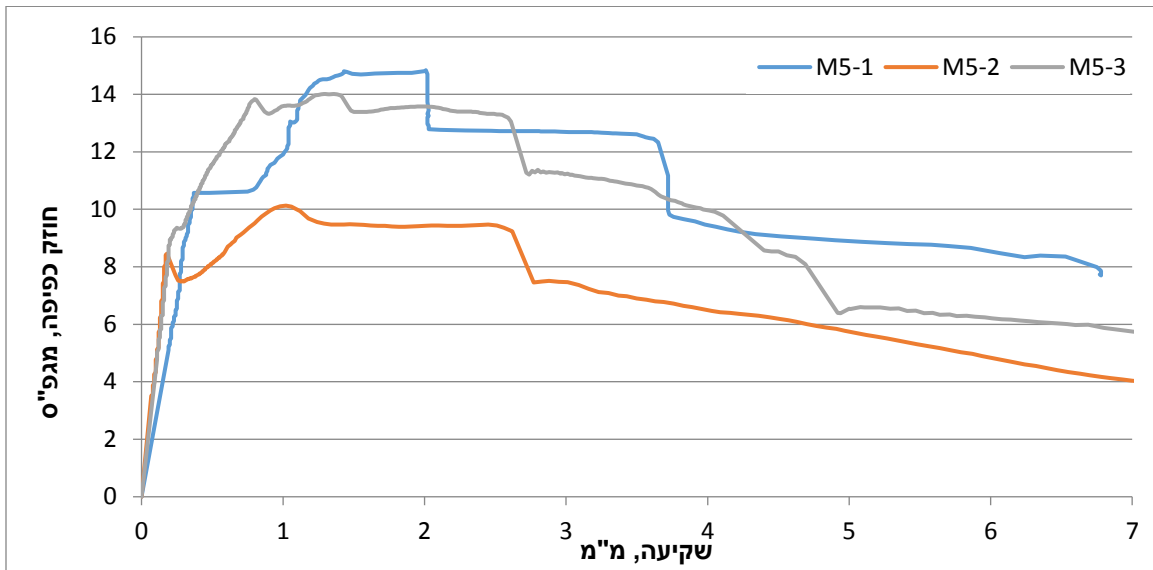
תערובות M3 – חוזק בינוני/עדש/סיבים ארוכים 5D



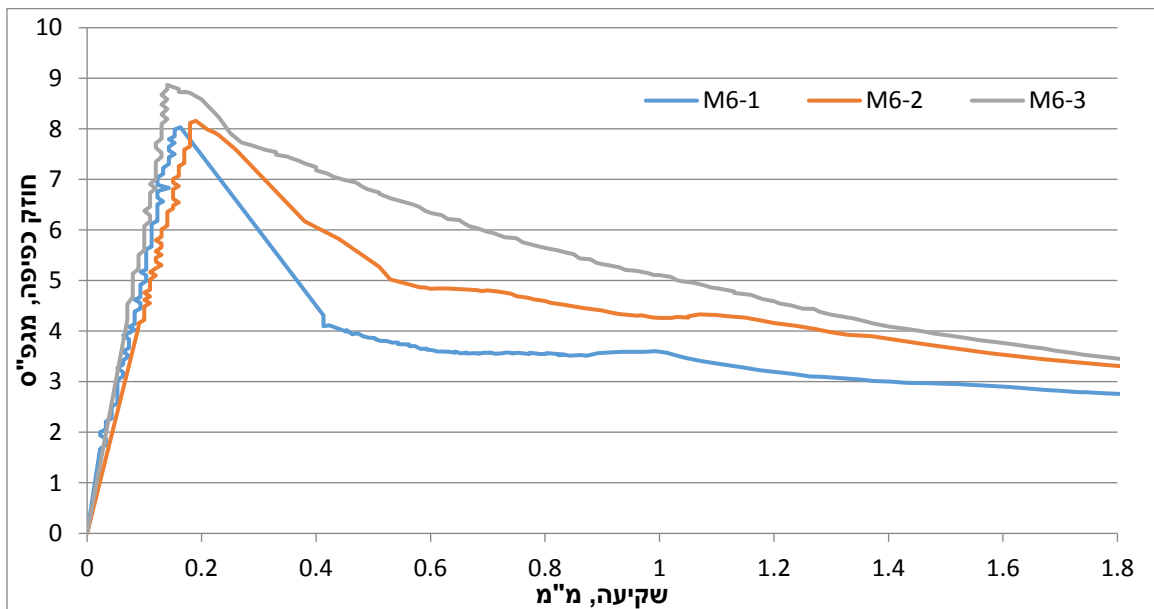
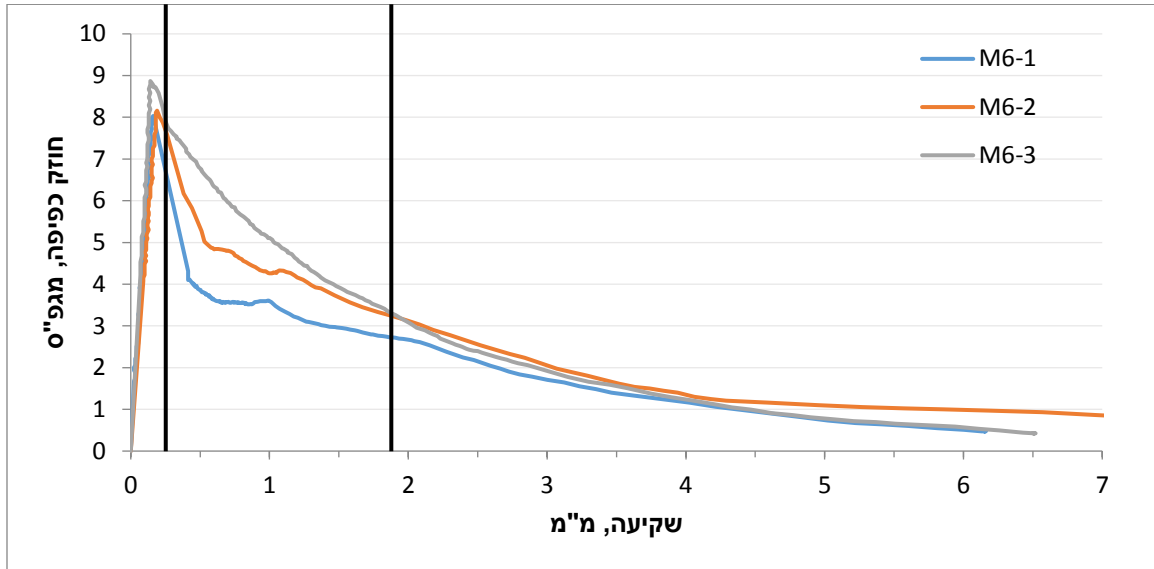
תערובות M4 – חוזק בינוני/עדש/סיבים קצרים + ארוכים 3D



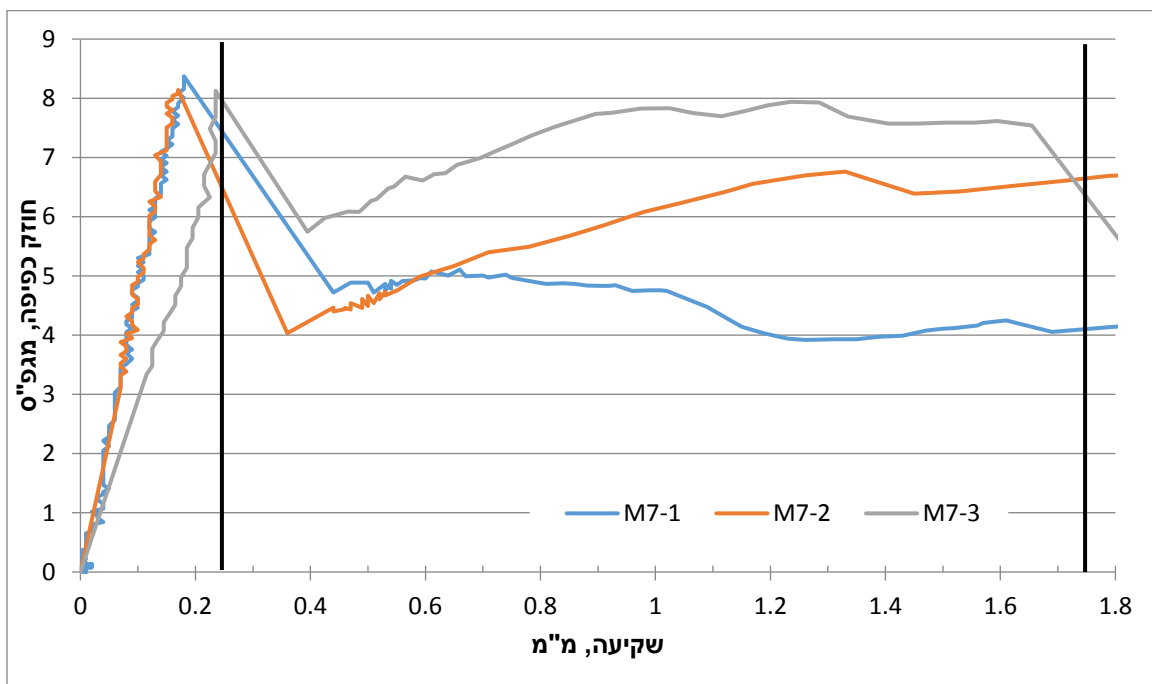
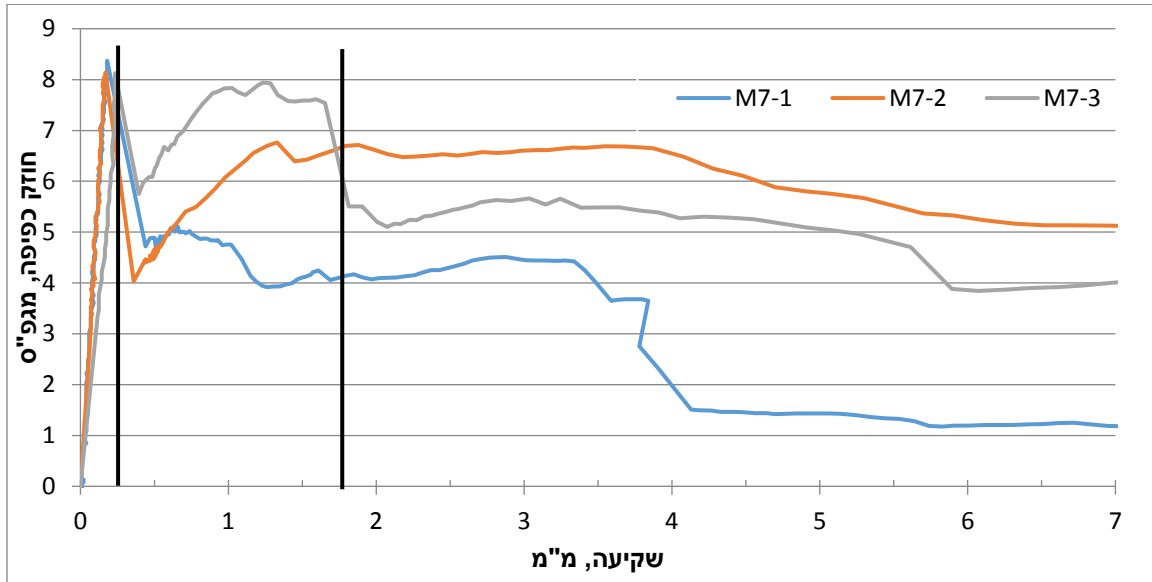
תערובות M5 – חוזק בינוני/עדש/סיבים קצרים + ארוכים 5D



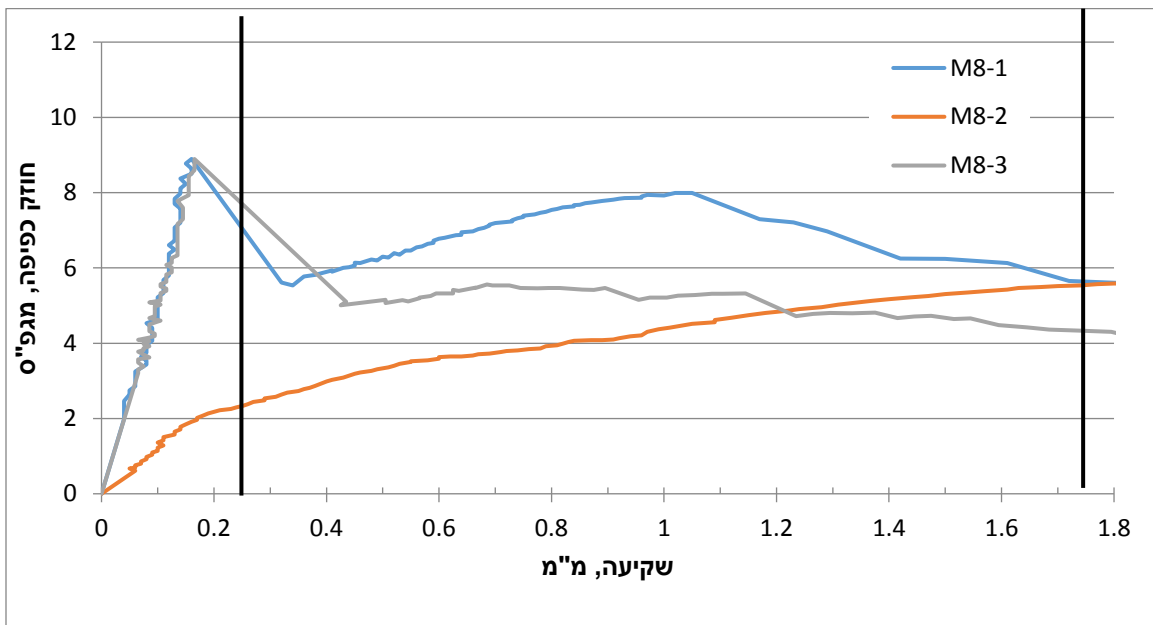
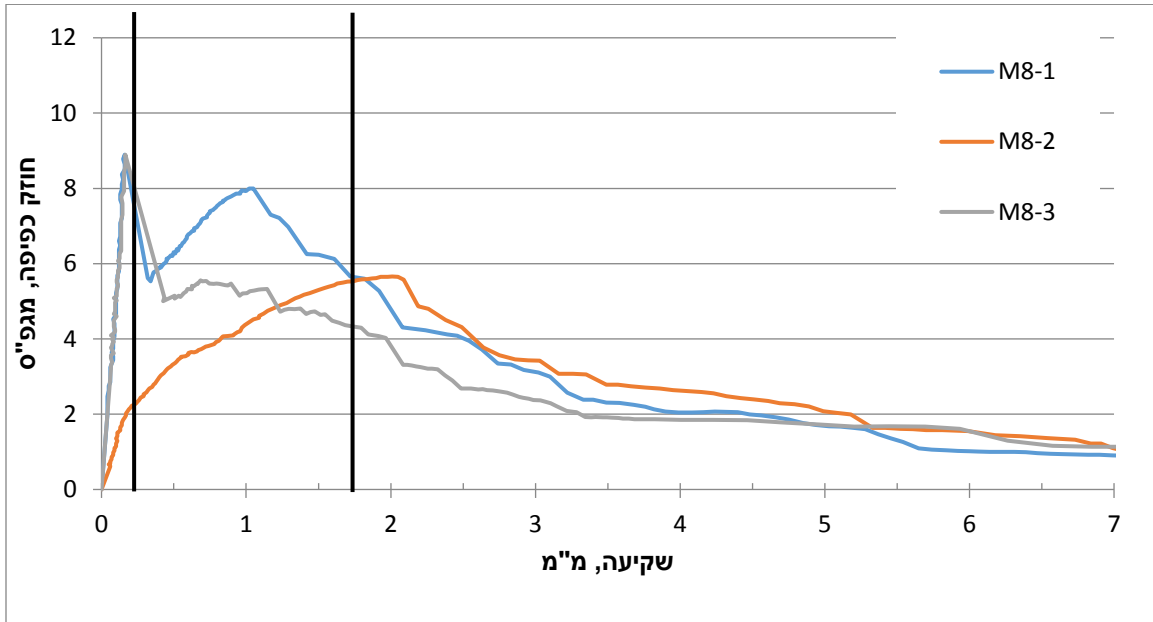
תערובות M6 – חוזק בינוני/סומסום/סיבים קצרים



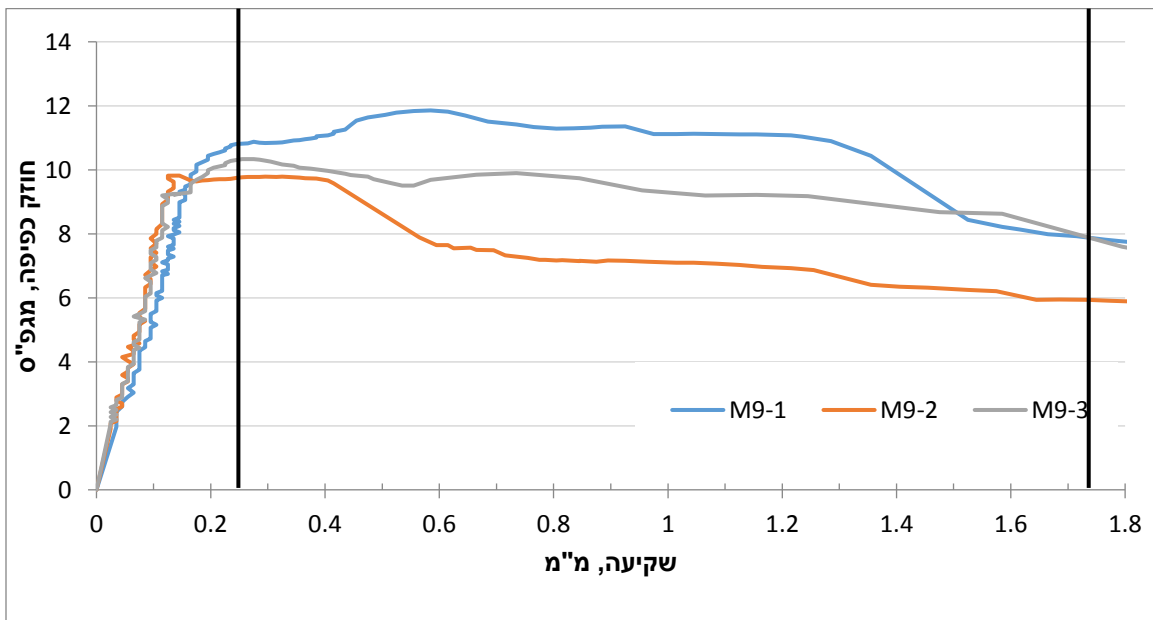
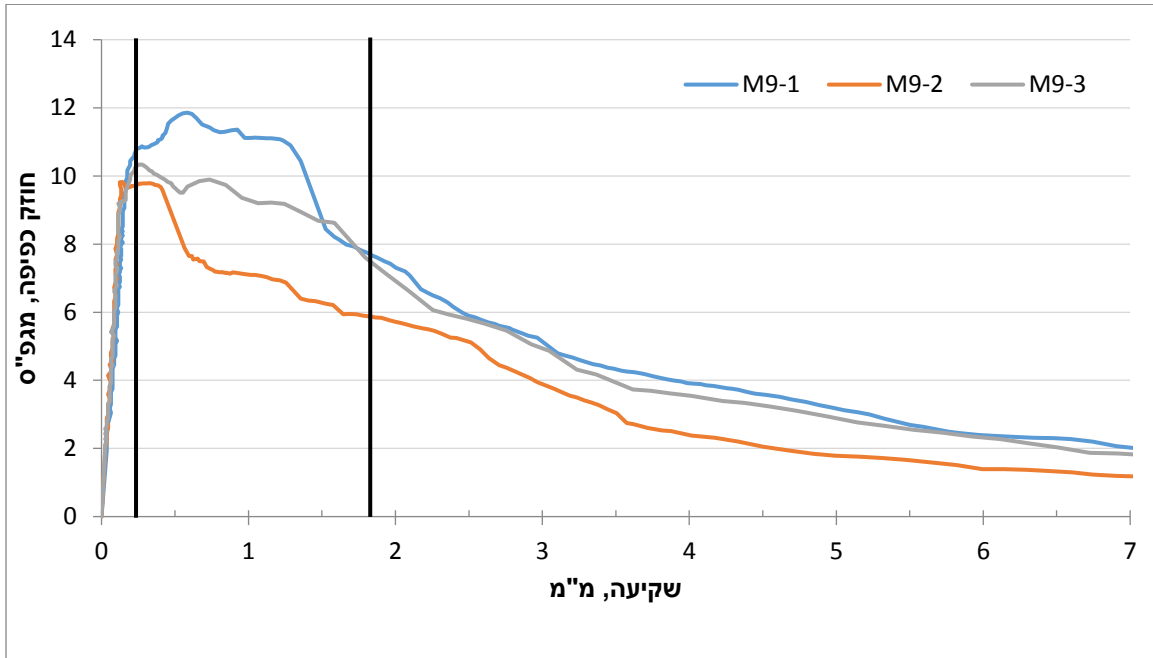
תערובות M7 – חוזק בינוני/סומסום/סיבים ארוכים 3D



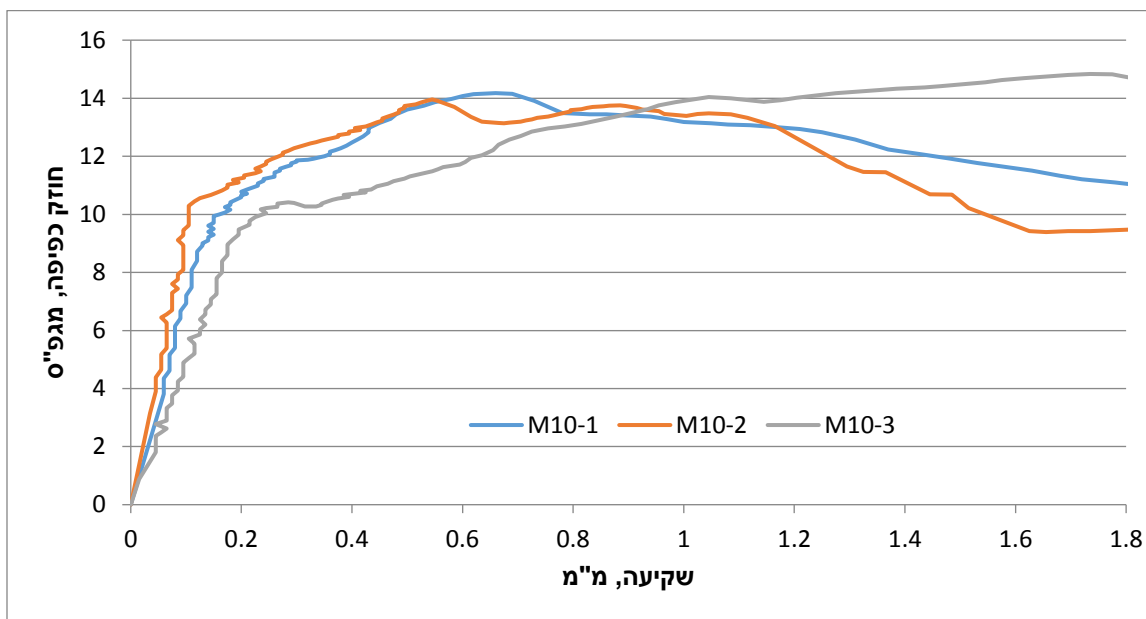
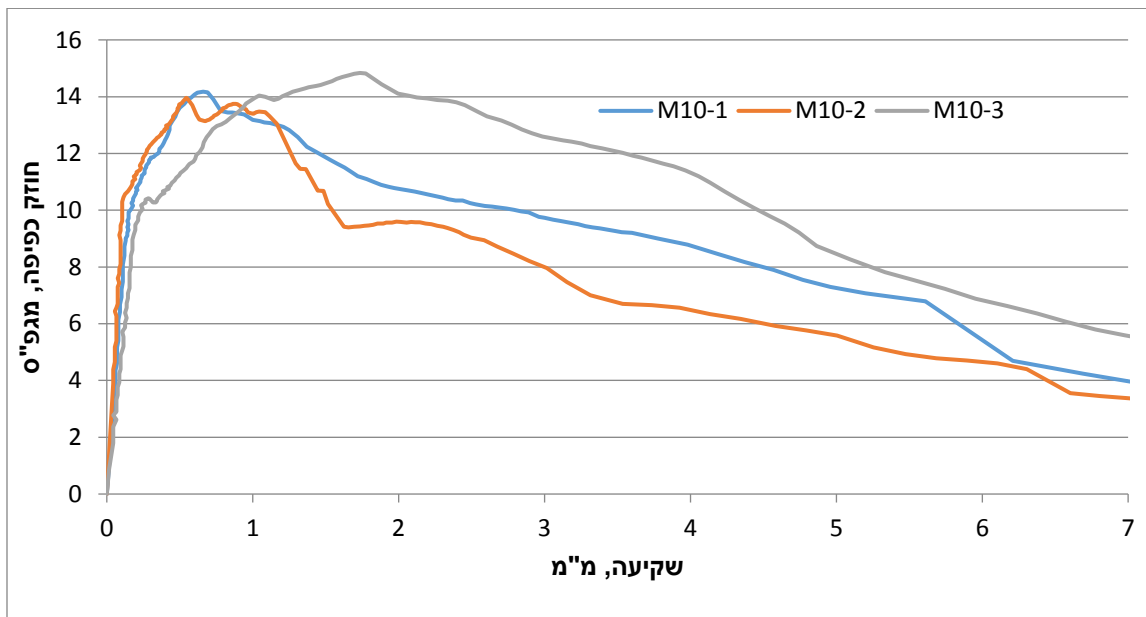
תערובות M8 – חוזק בינוני/סומסום/סיבים קצרים + ארוכים 3D



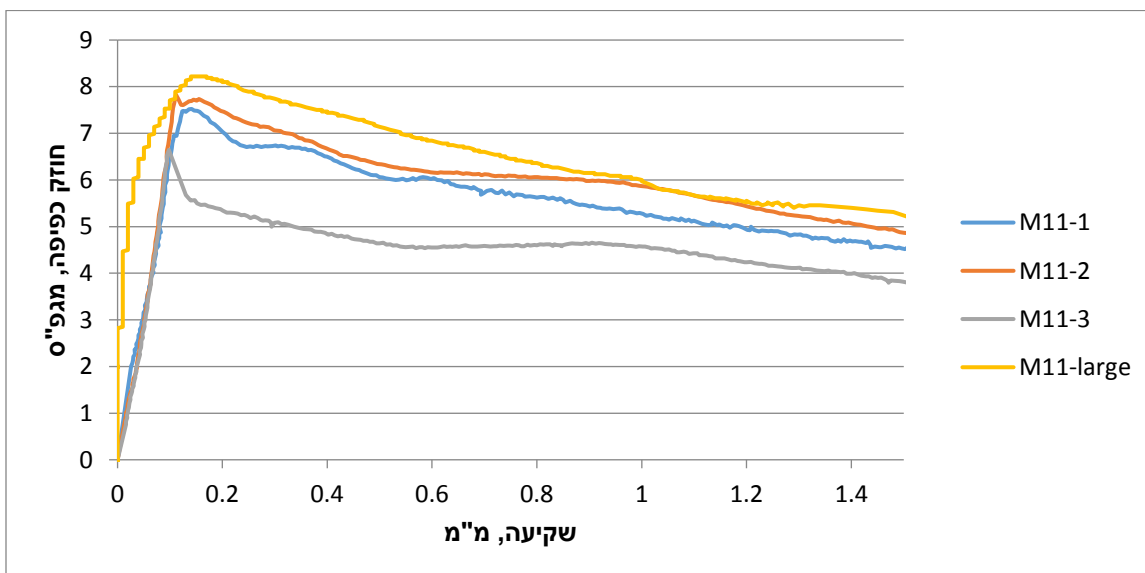
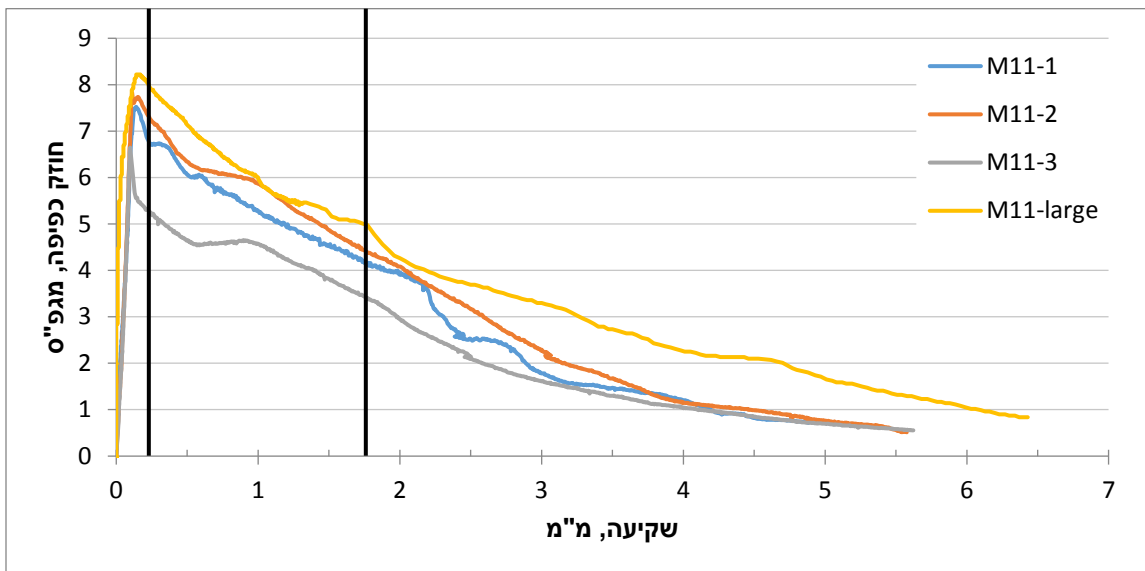
תערובות M9 – חוזק בינוני/סומסום/סיבים קצרים + ארוכים 3D



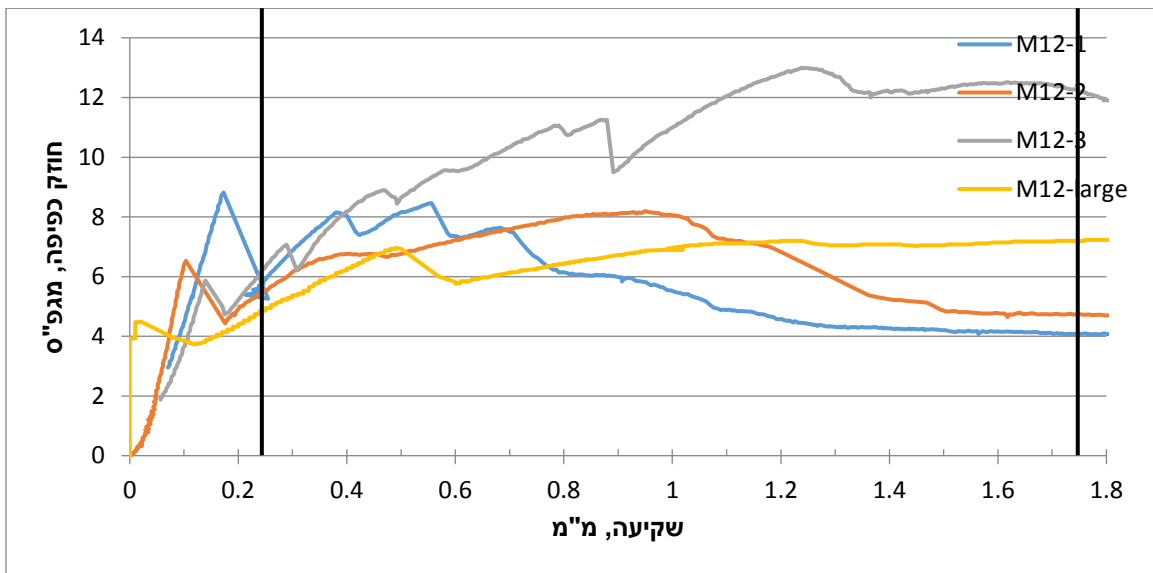
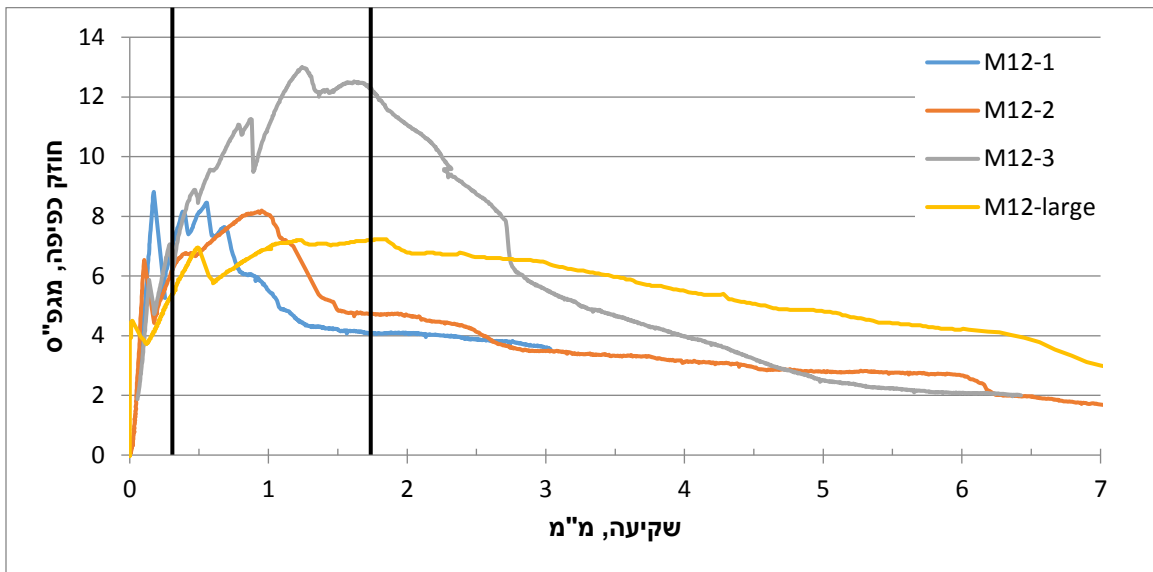
תערובות M10 – חוזק בינוני/סומסום/סיבים ארוכים +5D סיבים קצרים



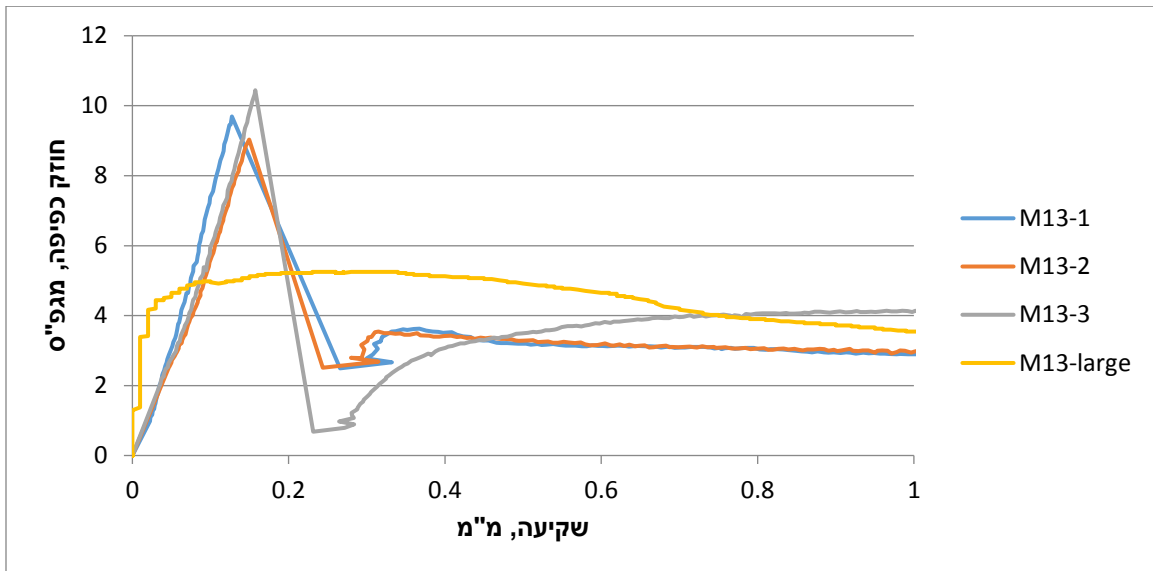
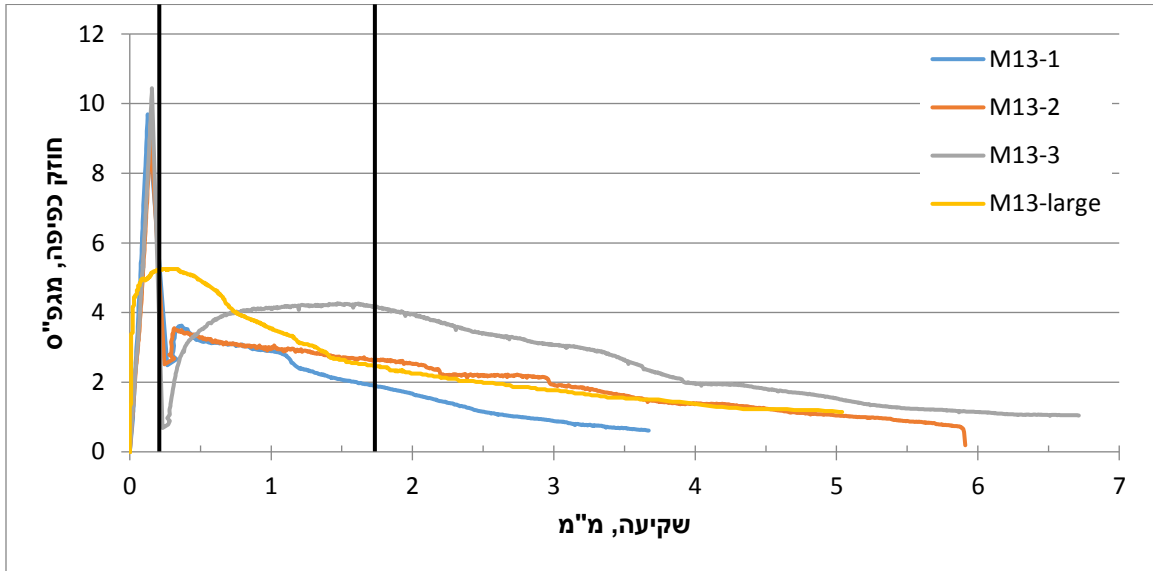
תערובות M11 – חוזק בינוני/רק חול/סיבים קצרים



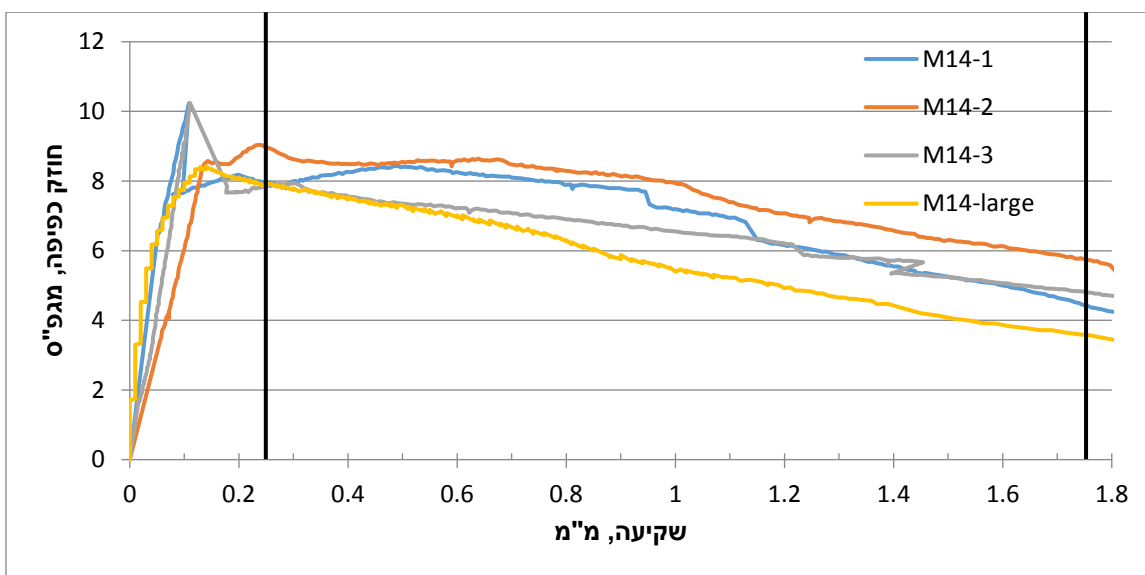
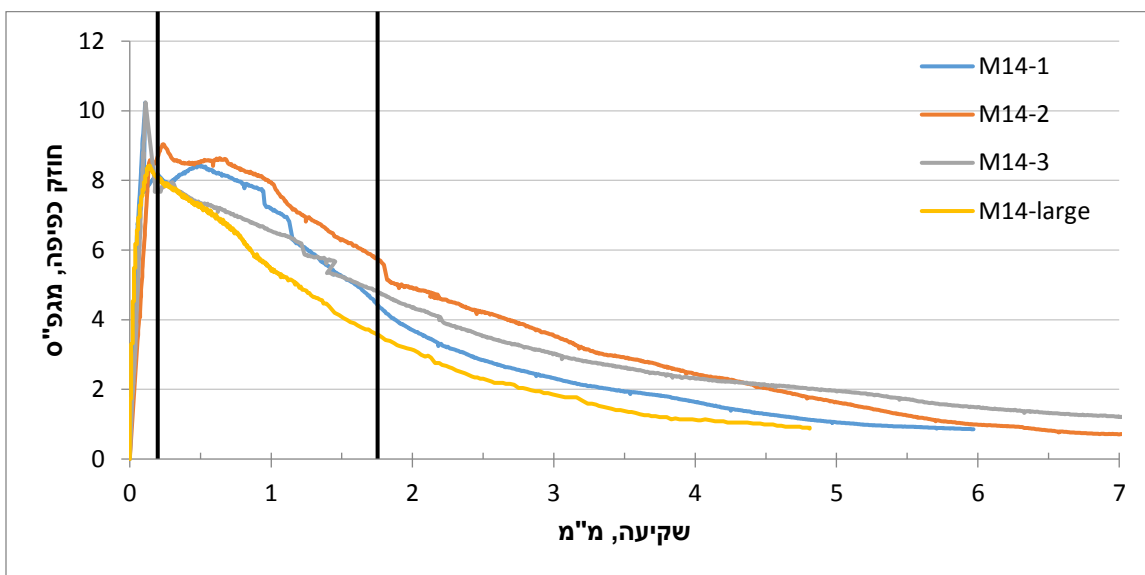
תערובות M12 – חוזק בינוני/רק חול/ ארוכים 3D



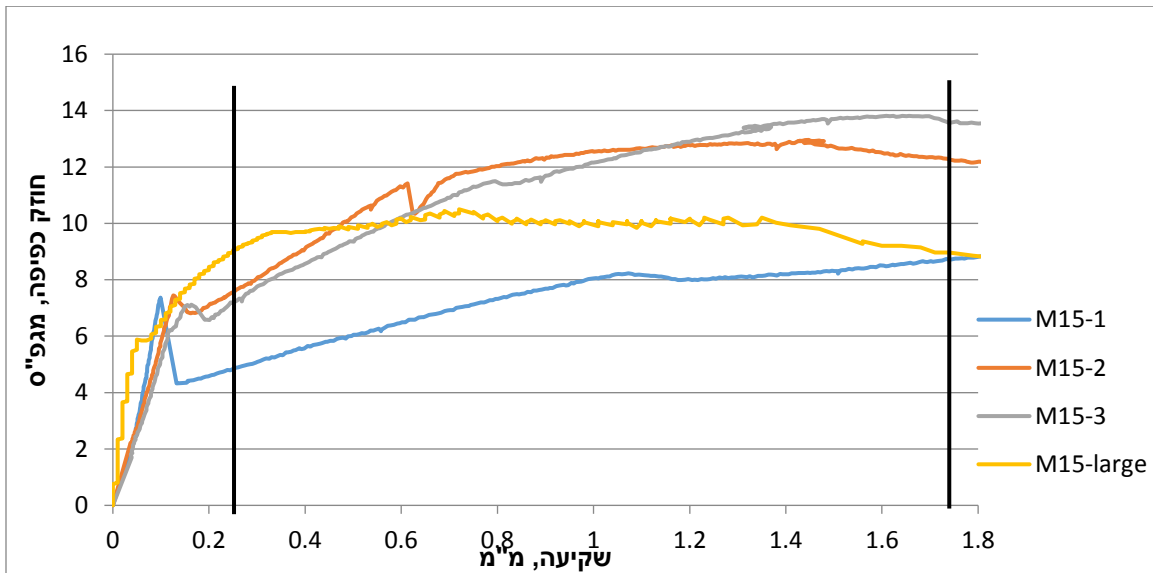
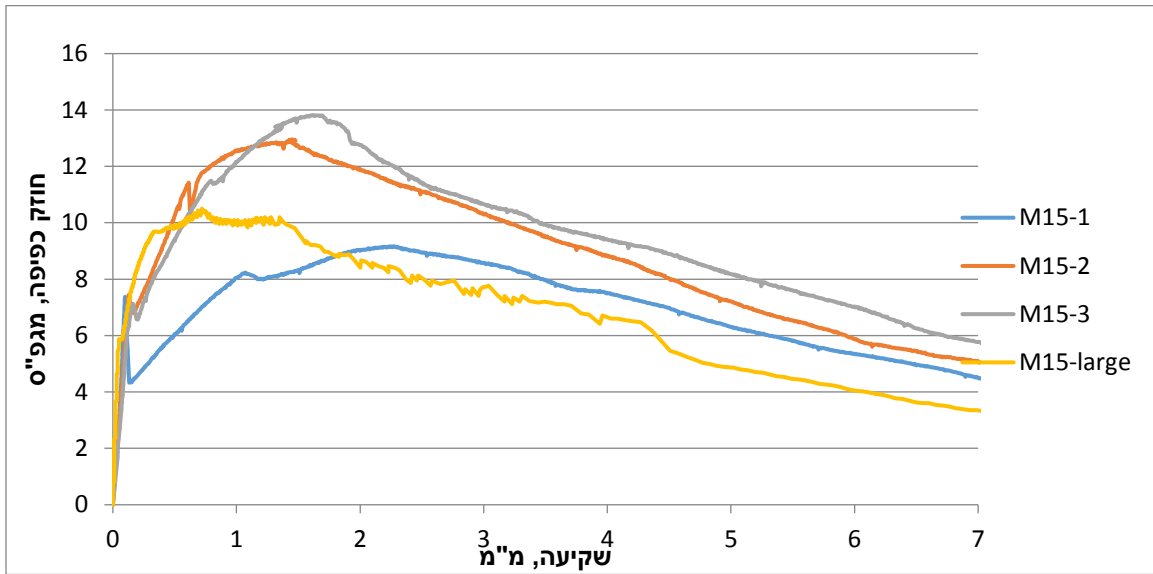
תערובות M13 – חוזק בינוני/רק חול/ + ארוכים 5D



תערובות M14 – חוזק בינוני/רק חול/סיבים קצרים+ארוכים 3D

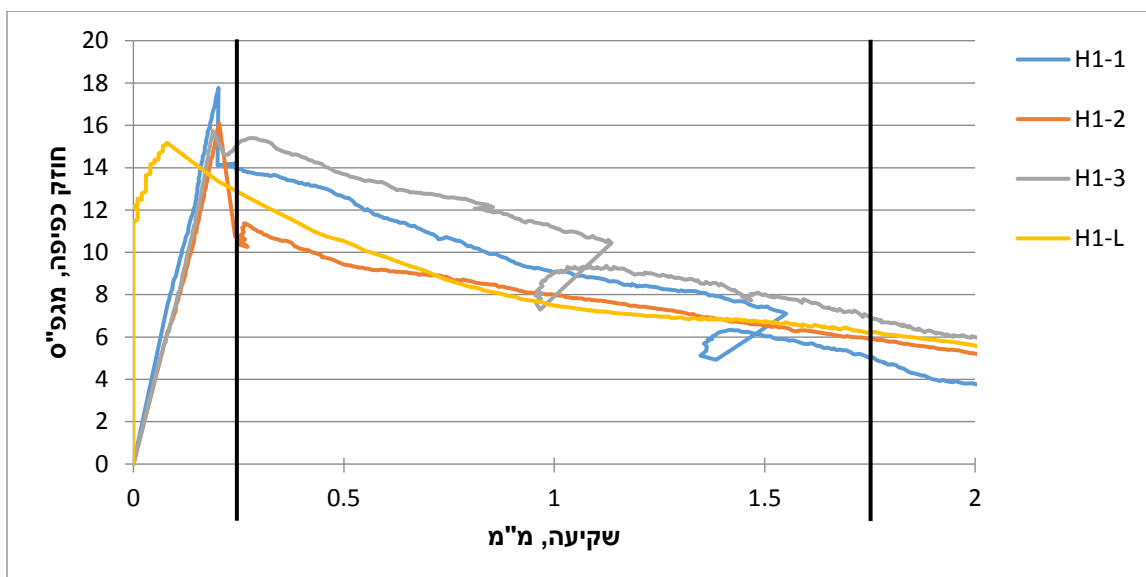
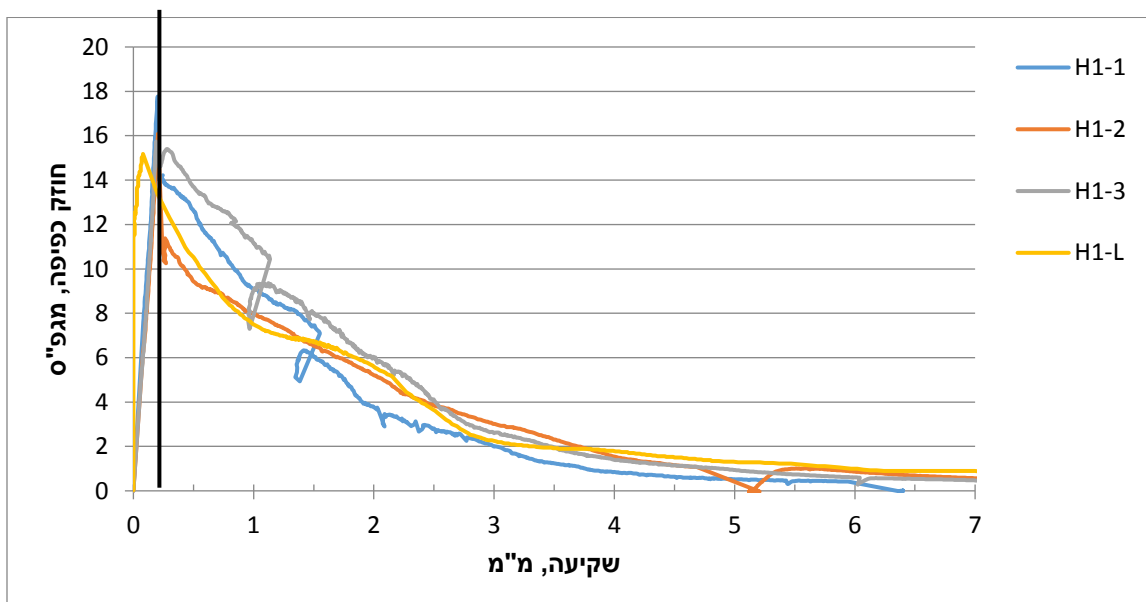


תערובות M15 – חוזק בינוני/רק חול/סיבים קצרים+ארוכים 3D

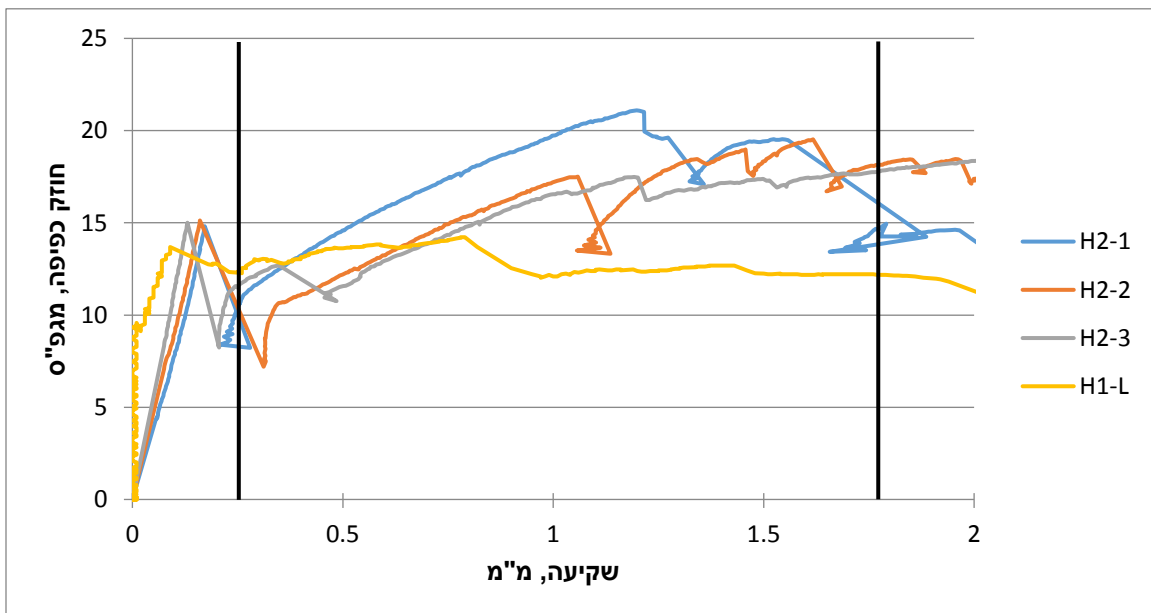
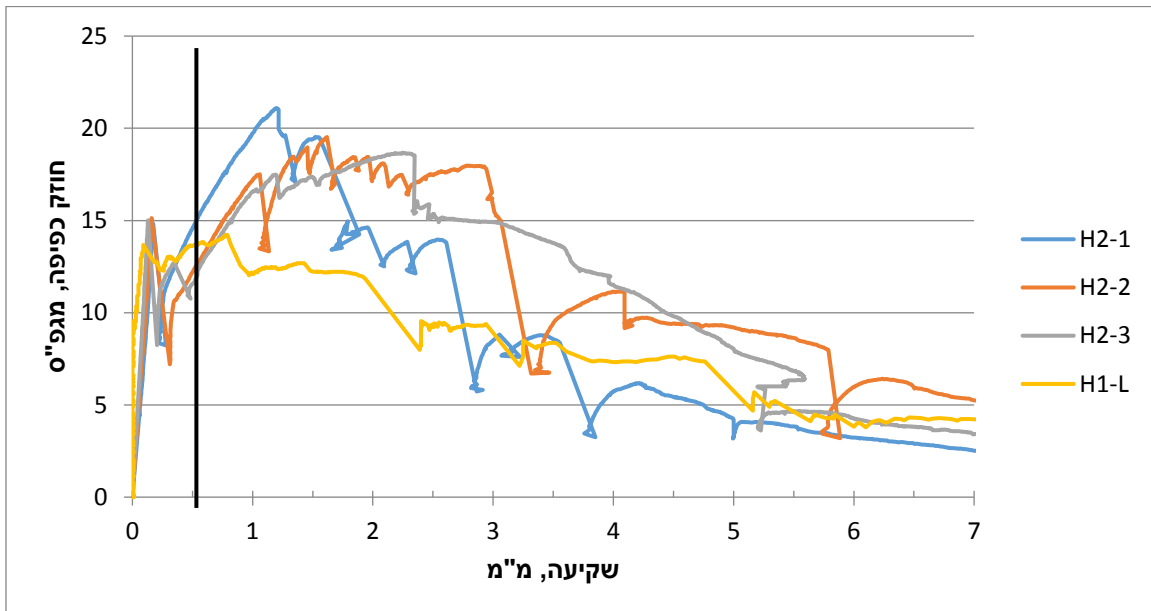


נספח ב – בטון עם חוזק גבוה (120-150 מגפ"ס). עקומות שקיעה כנגד חוזק הכפיפה עבור תערובות הבטון השונות

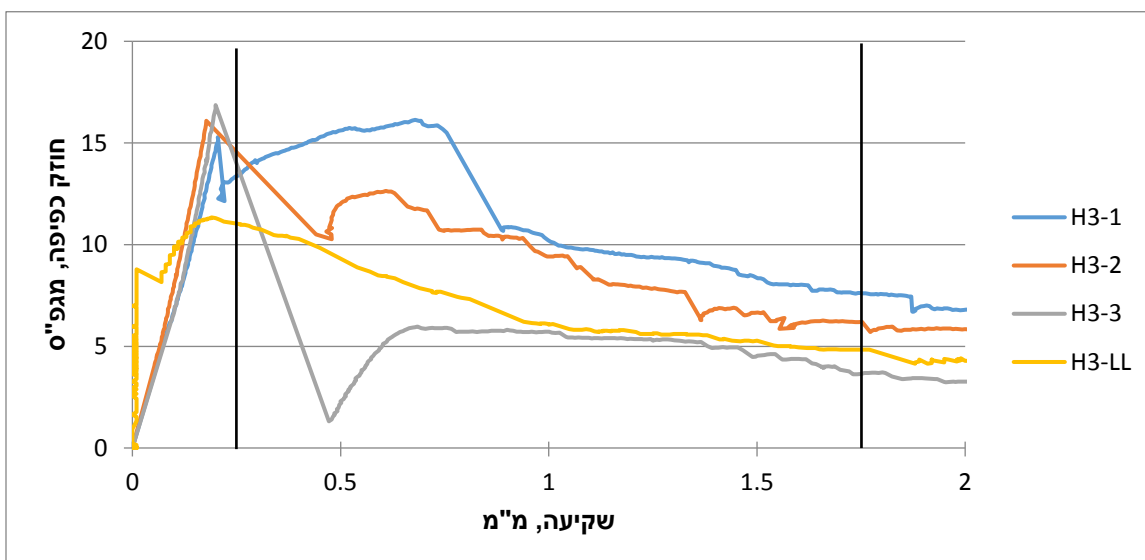
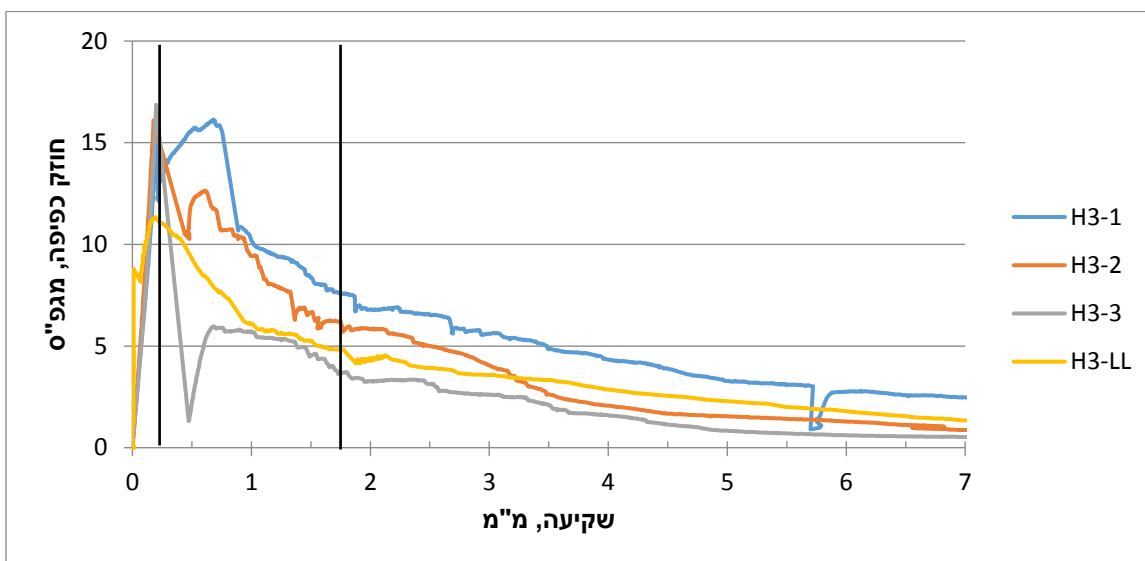
תערובות H1 – חוזק בינוני/עדש/סיבים קצרים



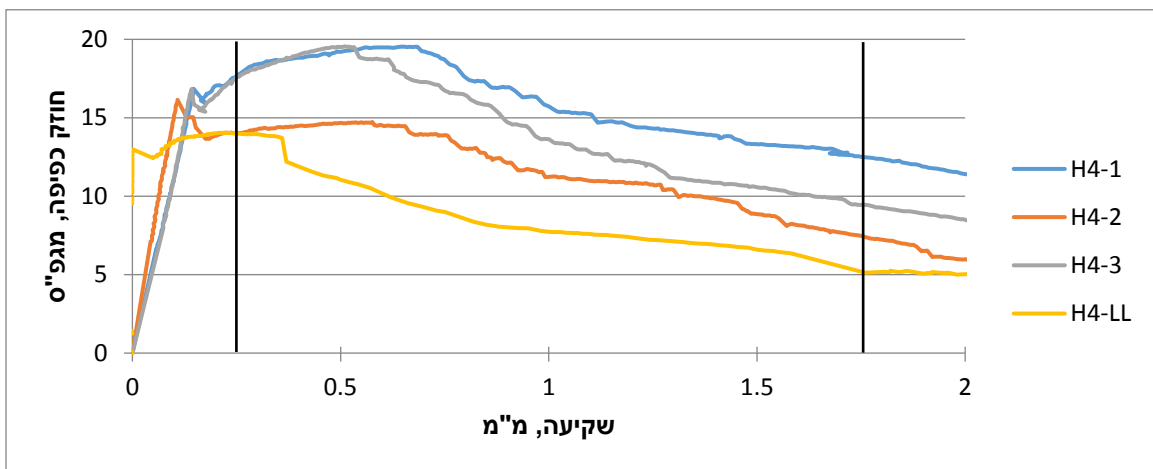
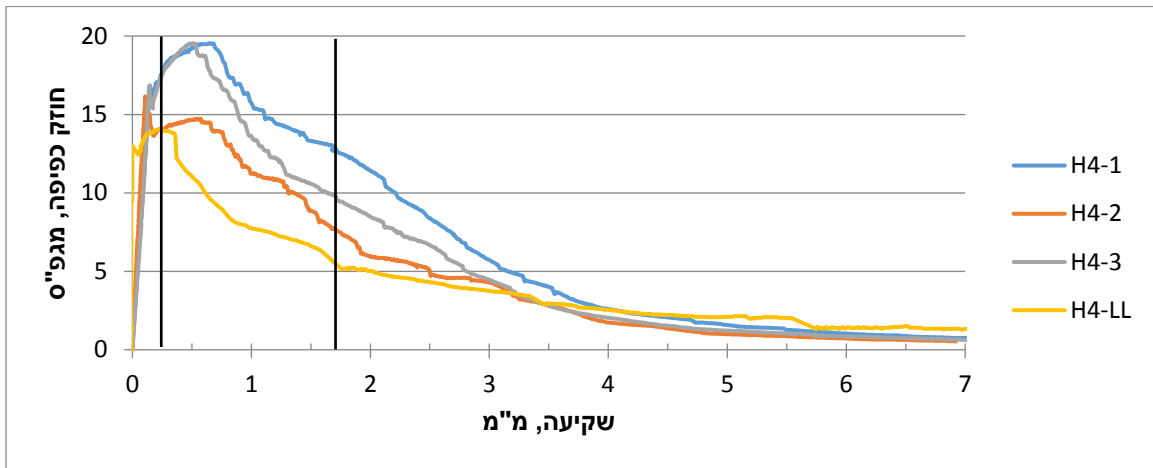
תערובות H2 – חוזק בינוני/עדש/סיבים ארוכים 3D



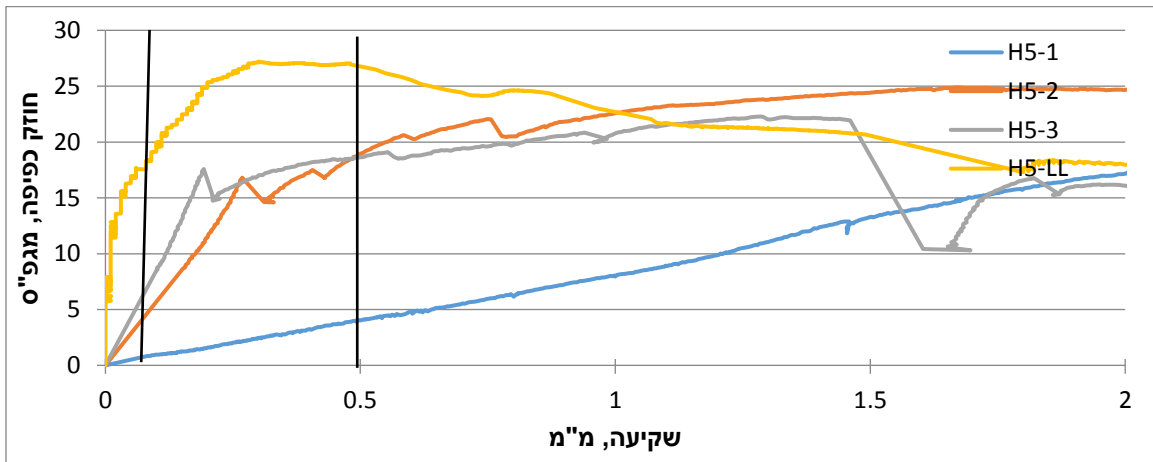
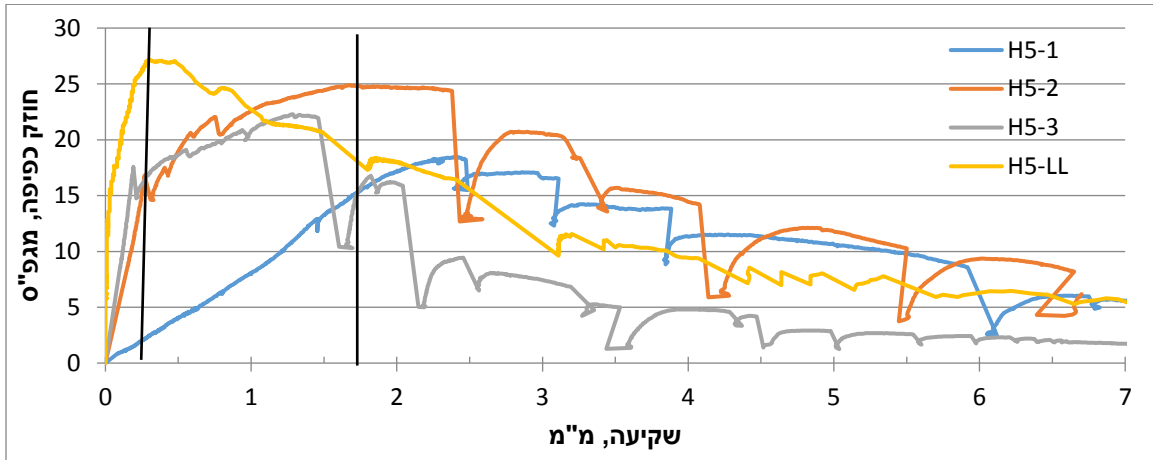
תערובות H3 – חוזק בינוני/עדש/סיבים ארוכים 5D



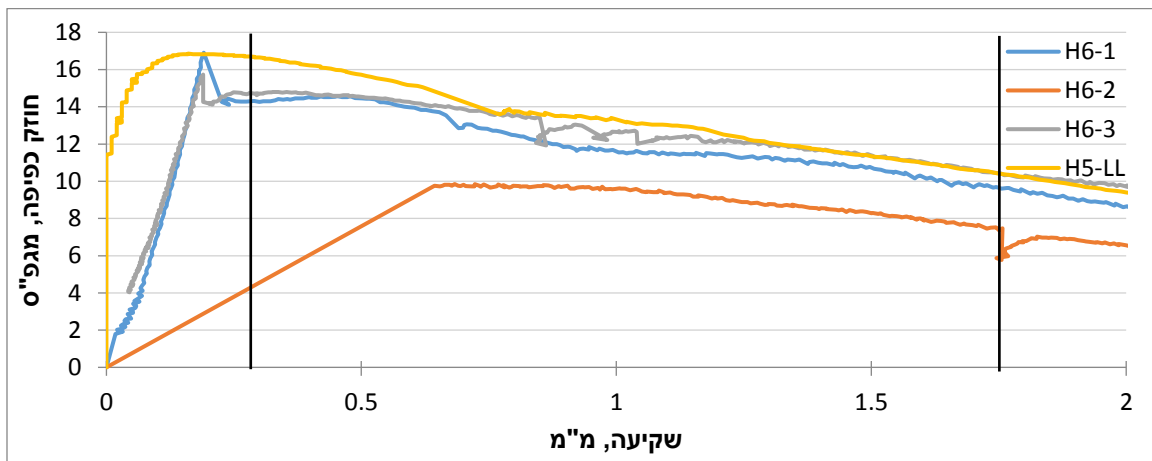
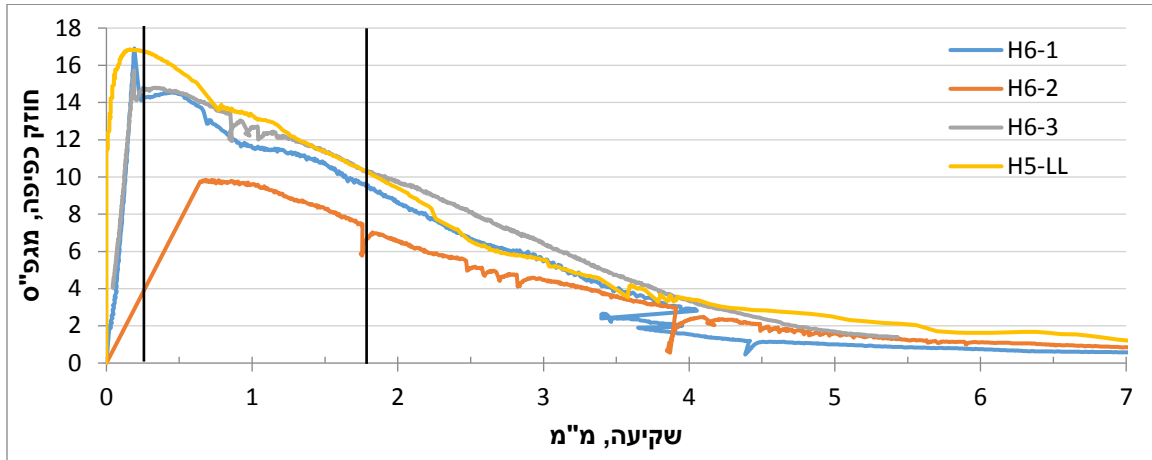
תערובות H4 – חוזק בינוני/עדש/סיבים קצרים + ארוכים 3D



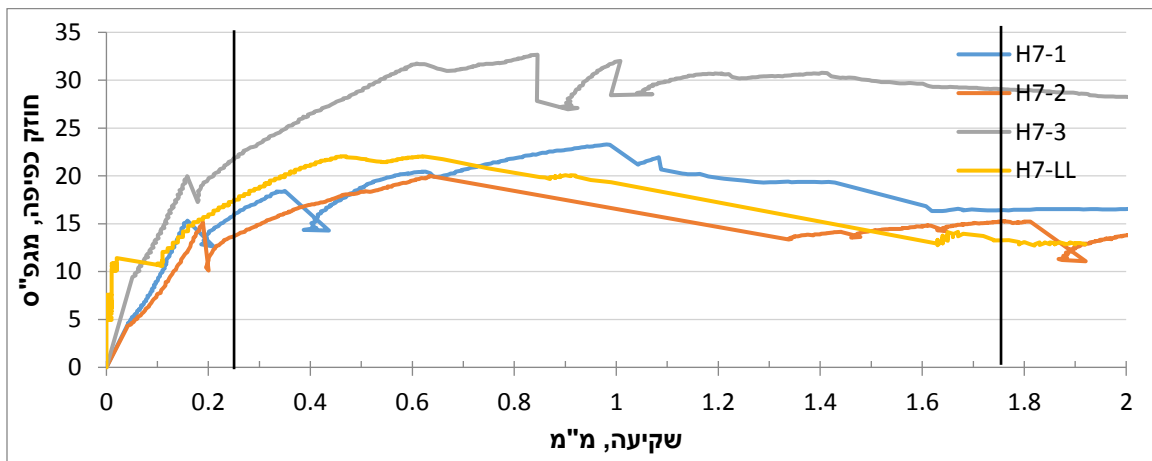
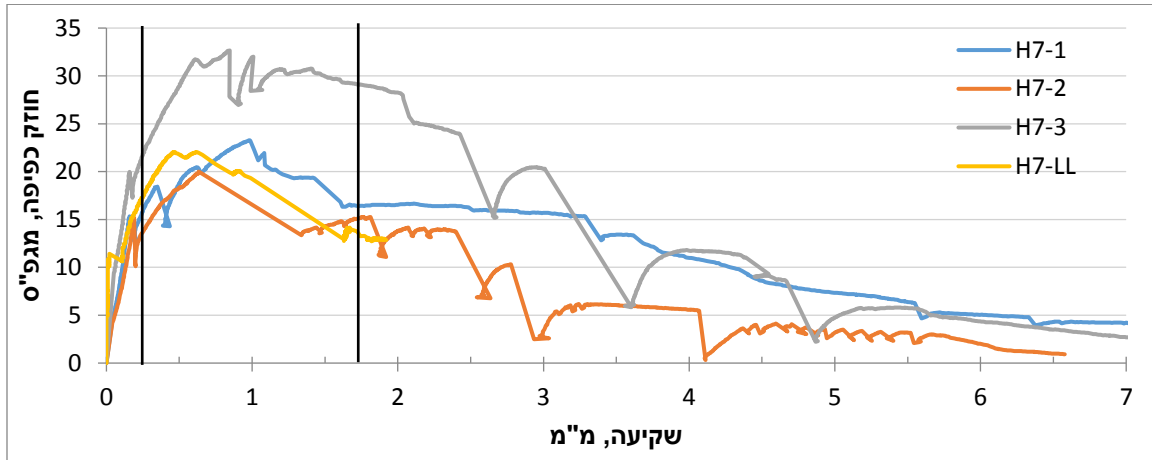
תערובות H5 – חוזק בינוני/עדש/סיבים קצרים + ארוכים 5D



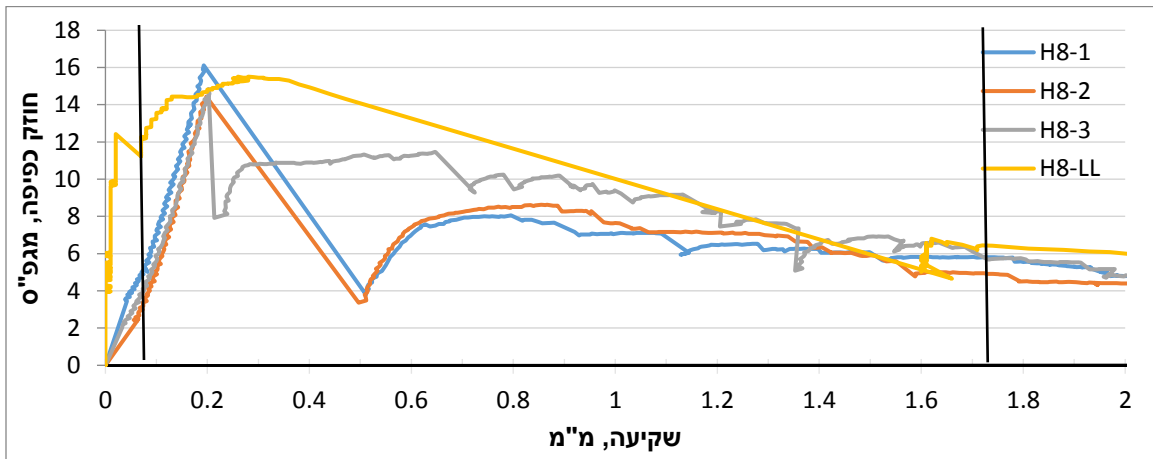
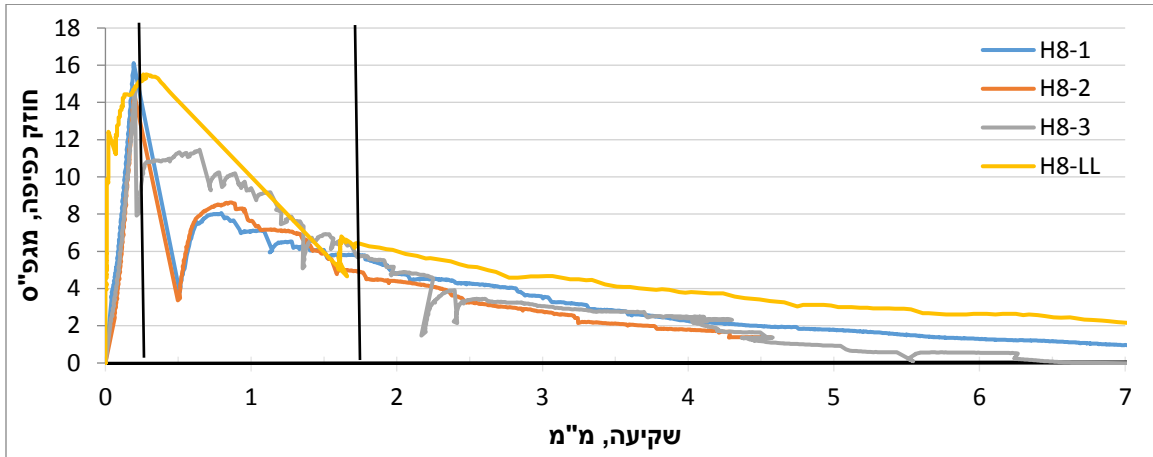
תערובות H6 – חוזק בינוני/סומסום/סיבים קצרים



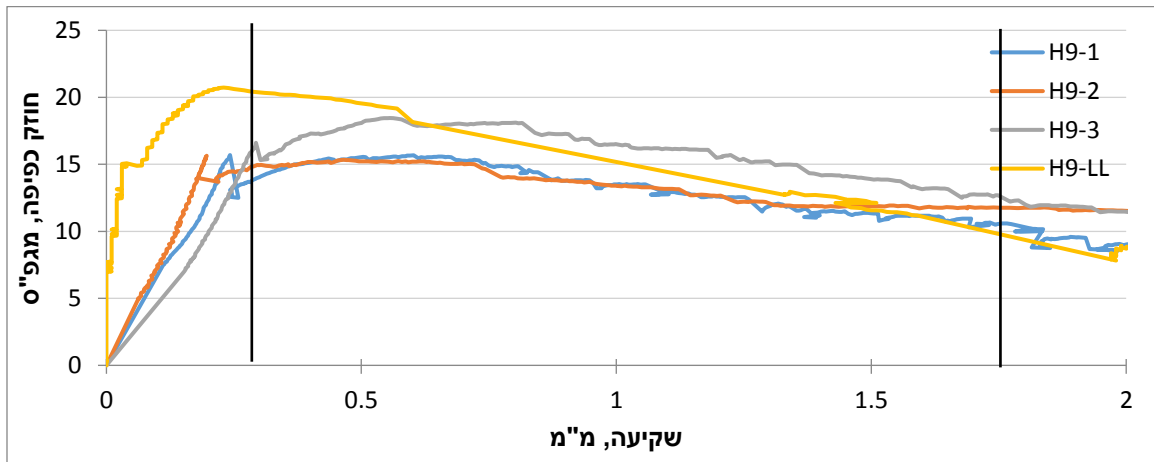
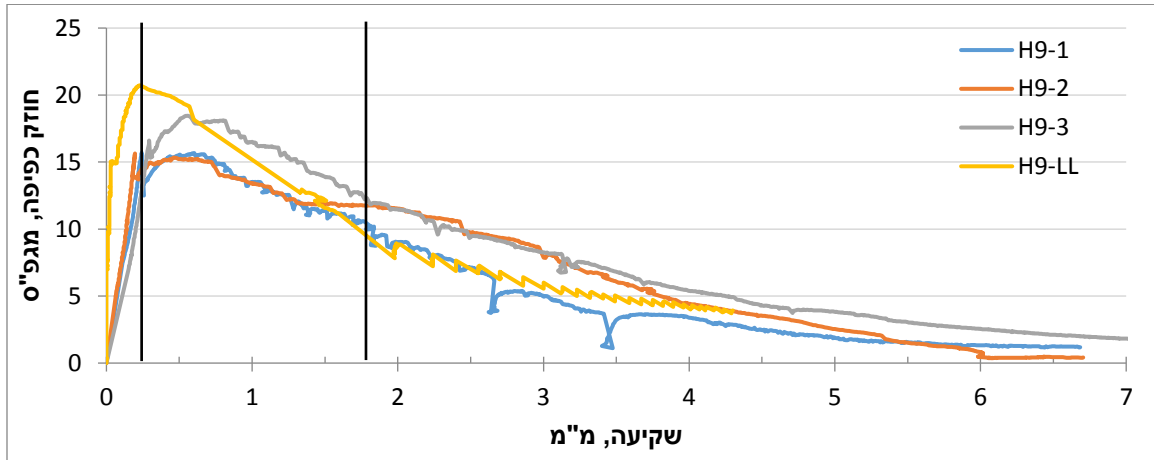
תערובות H7 – חוזק בינוני/סומסום/סיבים ארוכים 3D



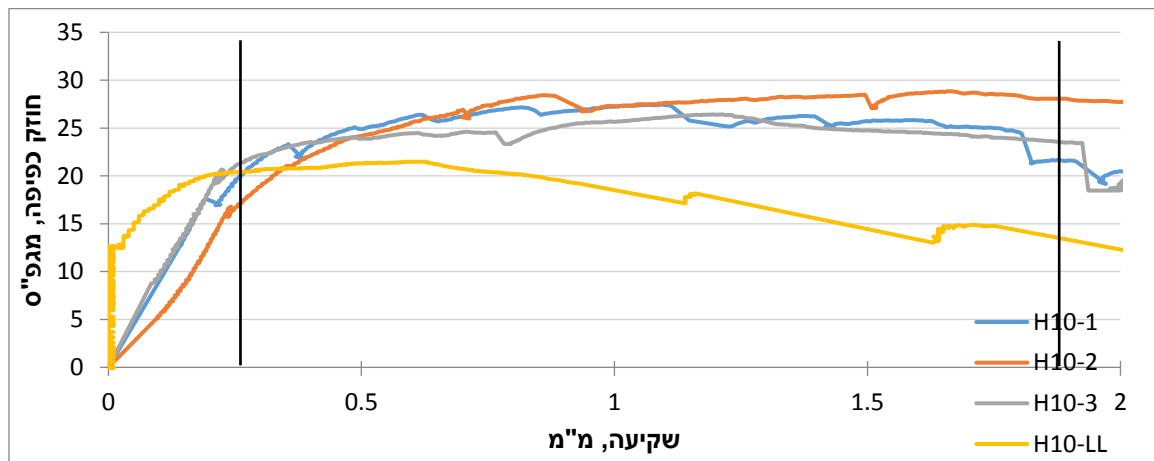
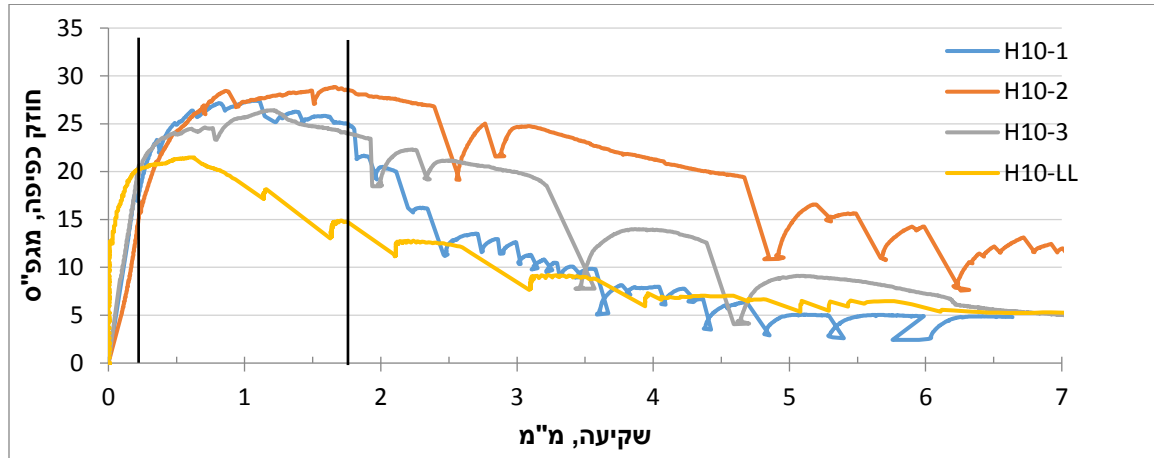
תערובות H8 – חוזק בינוני/סומסום/סיבים קצרים + ארוכים 3D



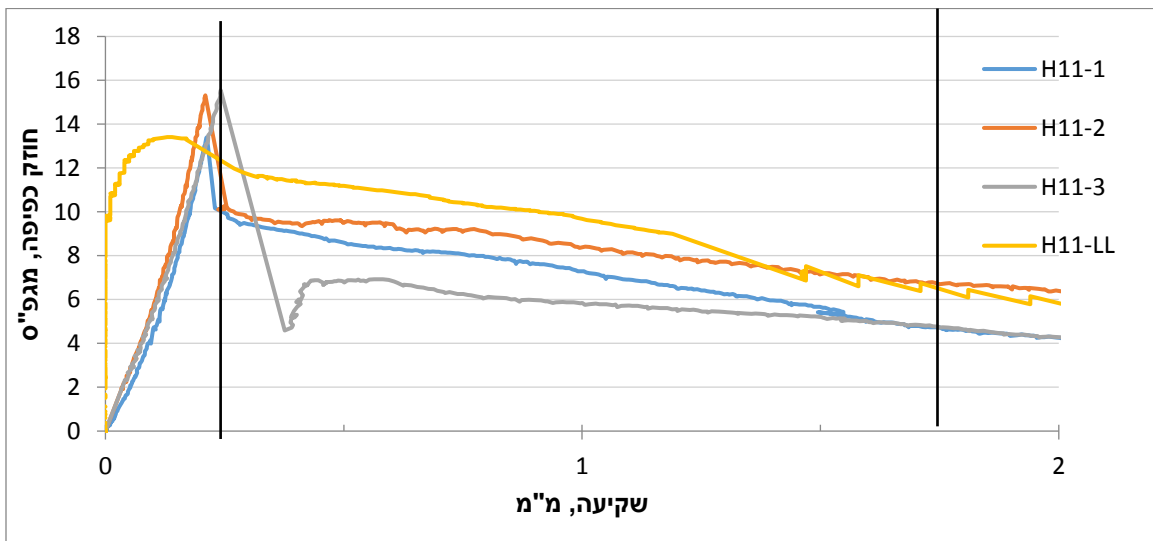
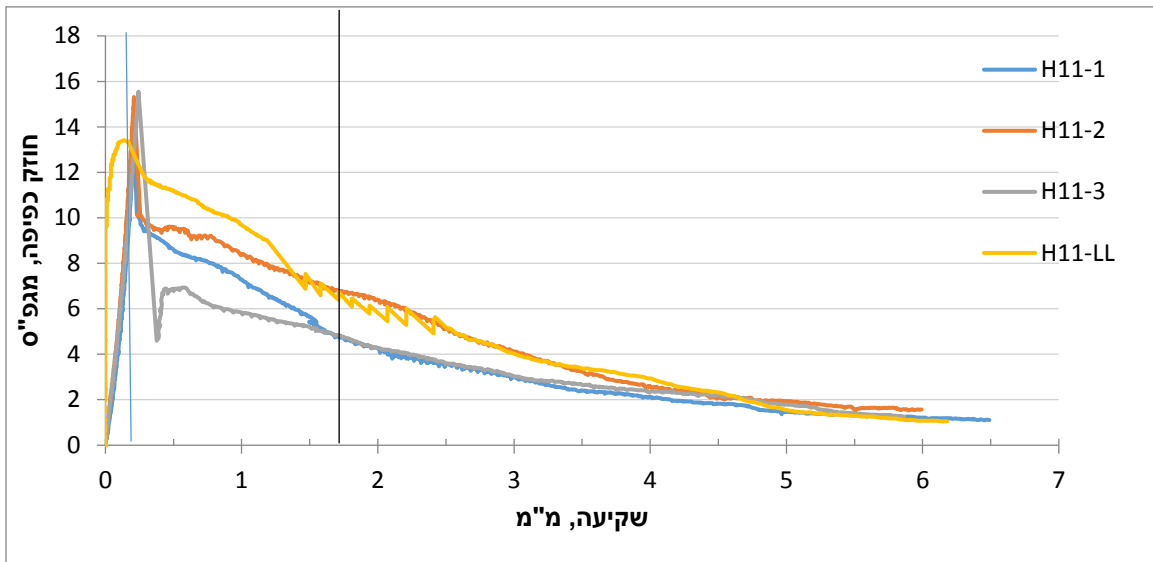
תערובות H9 – חוזק בינוני/סומסום/סיבים קצרים + ארוכים 3D



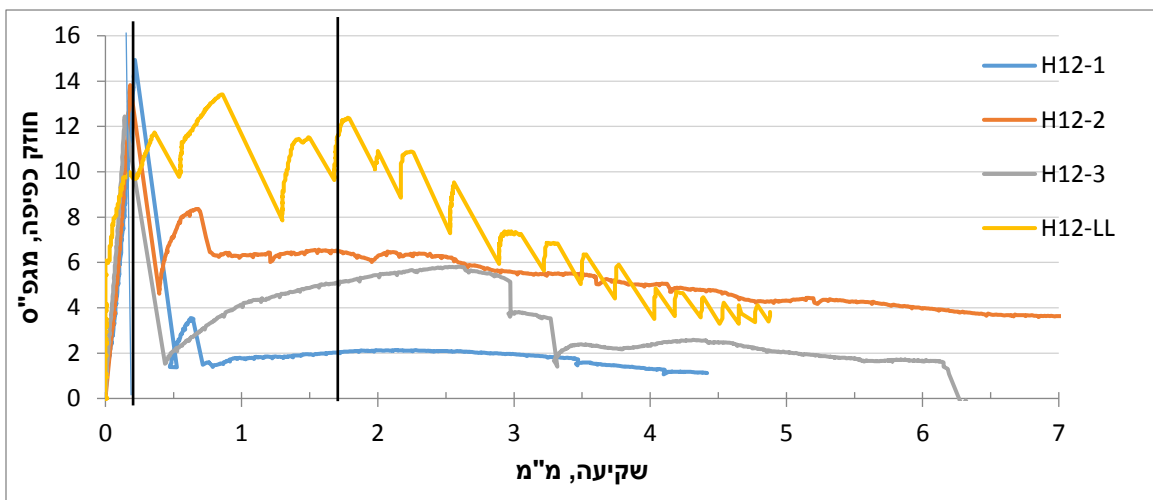
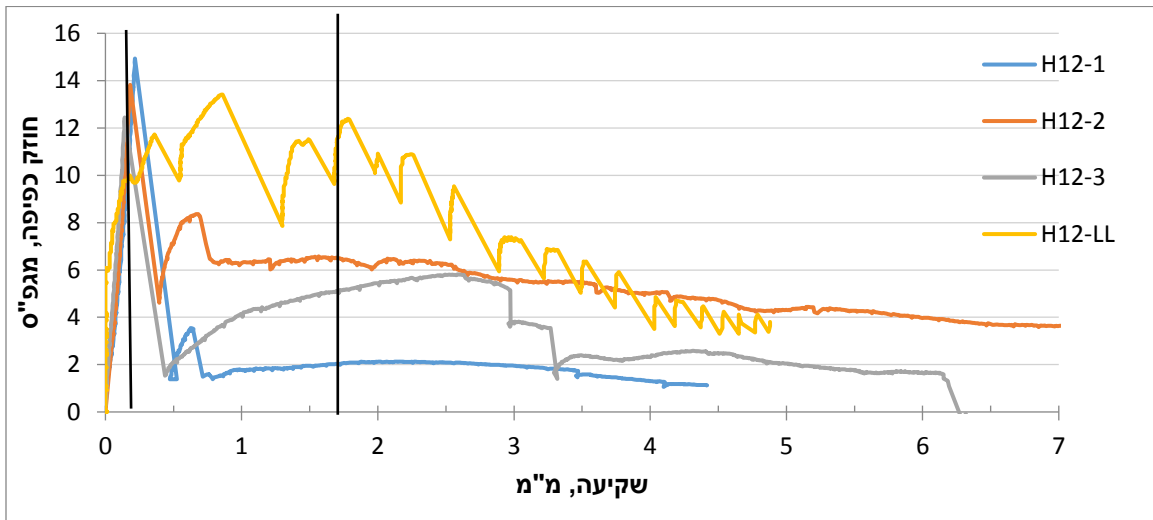
תערובות H10 – חוזק בינוני/סומסום/סיבים ארוכים +5D סיבים קצרים



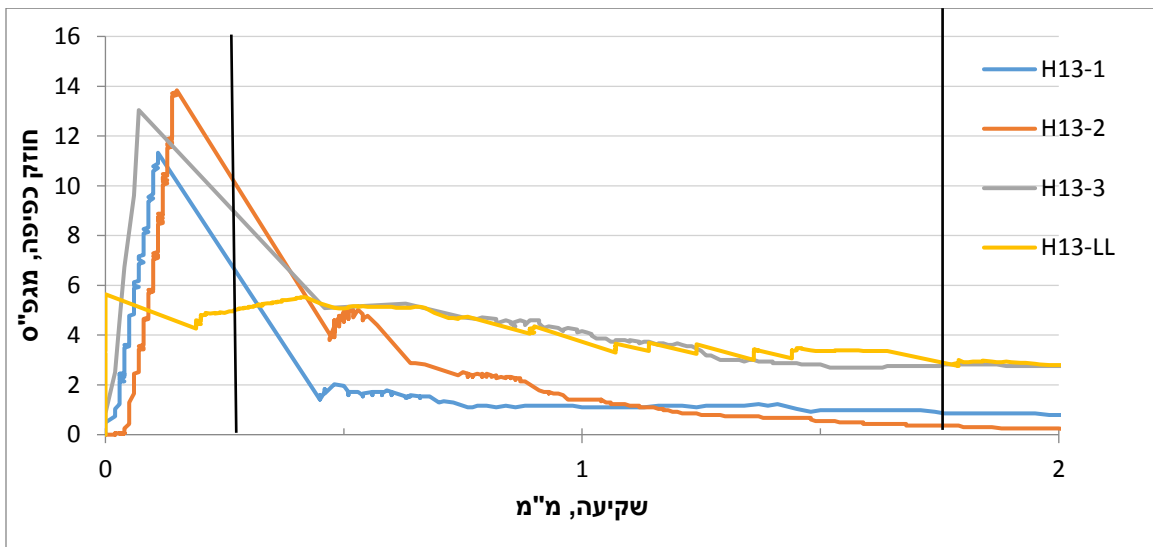
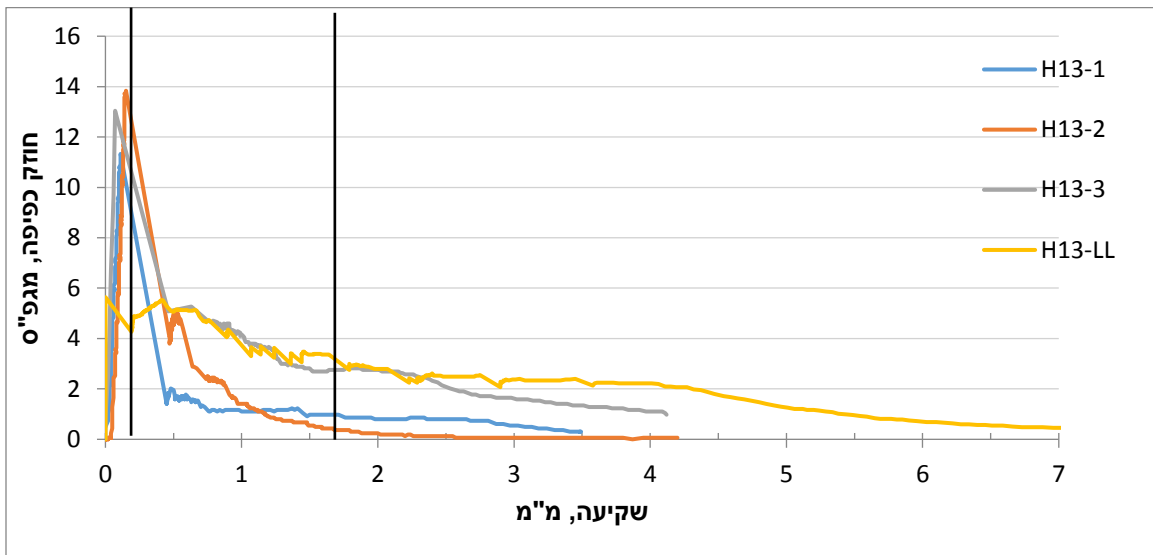
תערובות H11 – חוזק בינוני/רק חול/סיבים קצרים



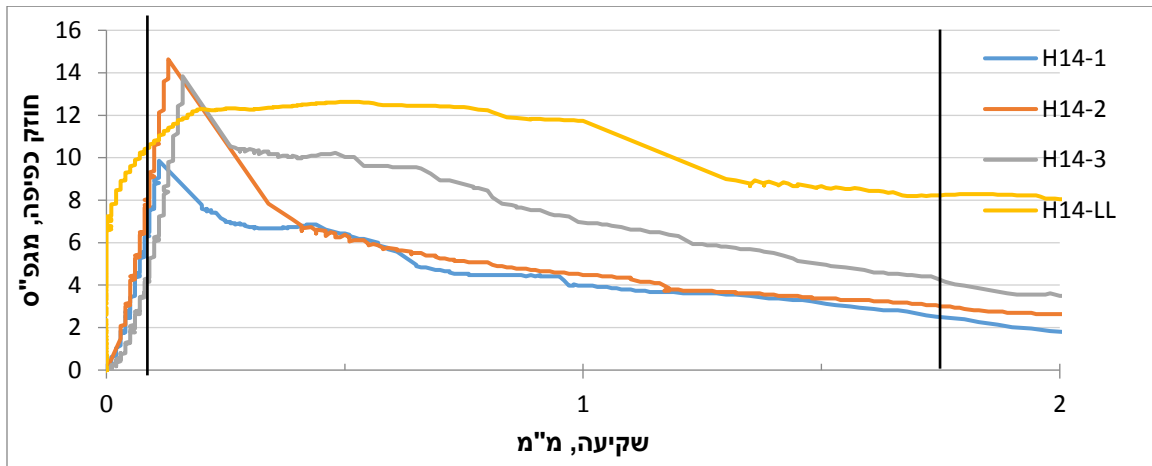
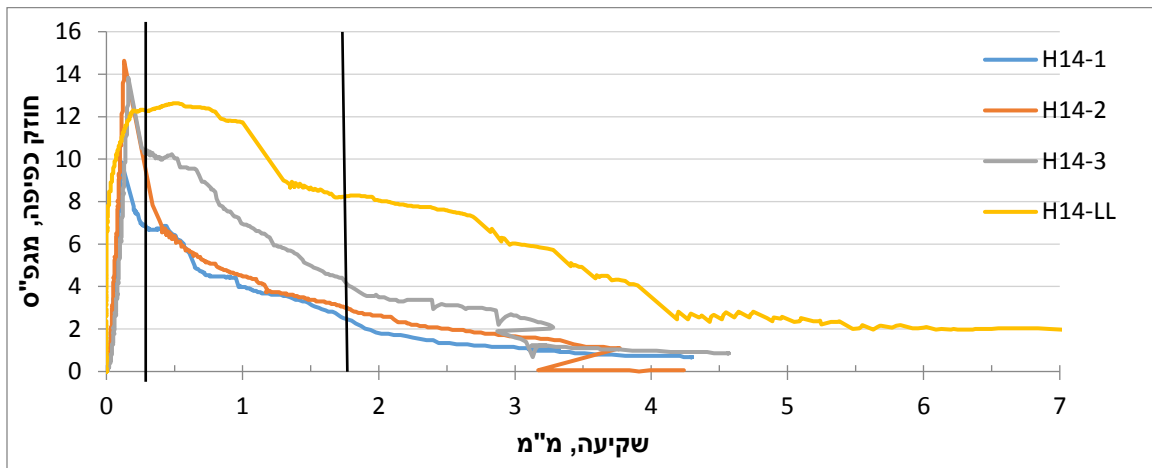
תערובות H 12 – חוזק בינוני/רק חול/ ארוכים 3D



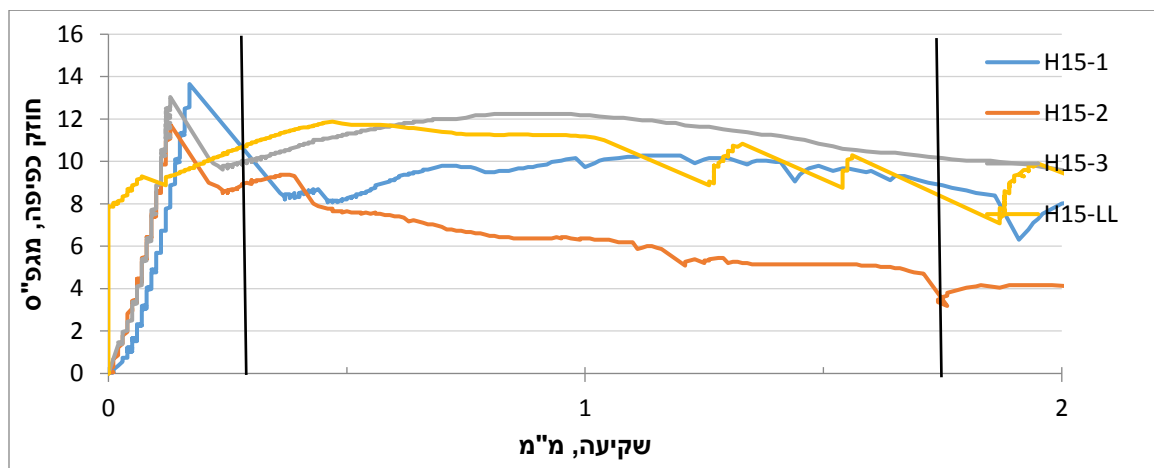
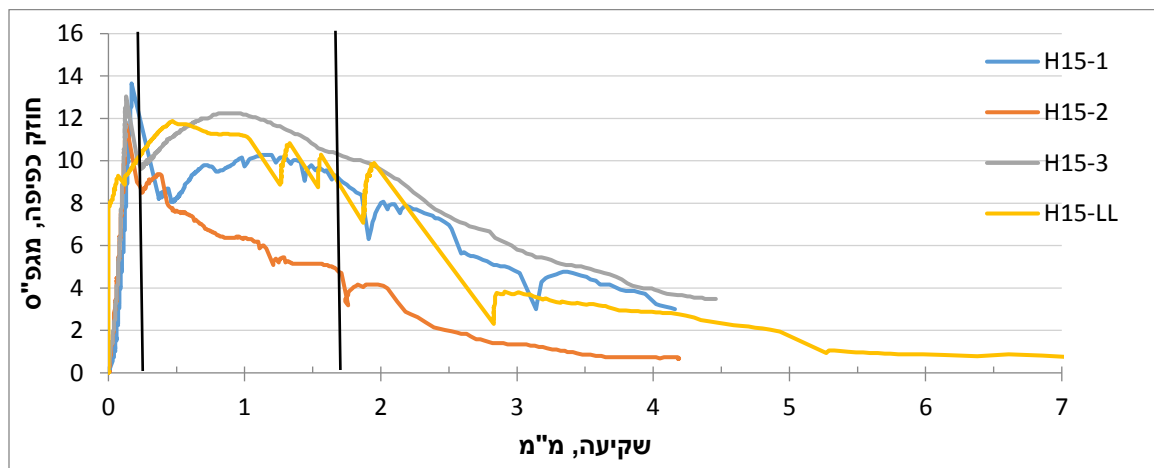
תערובות H13 – חוזק בינוני/רק חול/ + ארוכים 5D



תערובות H14 – חוזק בינוני/רק חול/סיבים קצרים+ארוכים 3D

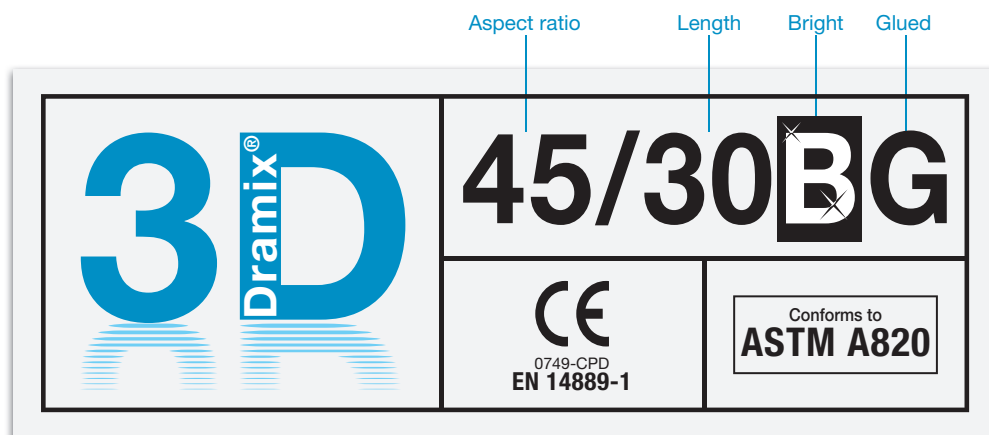


תערובות H15 – חוזק בינוני/רק חול/סיבים קצרים+ארוכים 3D



נספח ג': דפי מידע טכני על הסיבים ששימשו במחקר

Data Sheet



DRAMIX® 3D



Dramix® 3D is the reference in steel fibre reinforcement. Combining high performance, durability and ease-of-use, 3D provides you with a time-saving and cost-efficient solution for most common applications.

- > original anchorage
- > standard tensile strength

Dramix® 3D is a cost efficient solution for

- > flooring
- > tunnel applications
- > precast
- > residential applications

Bekaert supplies all of the support you need for your project. We help you determine the most suitable fibre types, calculate optimal dosages, select the right concrete quality. Contact your local support.

Go to www.bekaert.com/dosingdramix for our recommendations on handling, dosing and mixing.

Modifications reserved.
All details describe our products in general form only.
For detailed information, product specifications available on request.

PERFORMANCE

Material properties

Tensile strength: $R_{m,nom}$: 1.270 N/mm²
Tolerances: $\pm 7,5\%$ Avg
Young's Modulus: ± 210.000 N/mm²

Geometry

Fibre family

3D



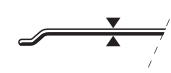
Length (l)

30 mm



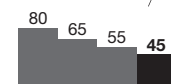
Diameter (d)

0,62 mm



Aspect ratio (l/d)

45



Fibre network

12,7 km per m³ (for 30 kg/m³)
13.311 fibres/kg

Dramix® range

5D 4D 3D

Tensile strength	
Wire ductility	
Anchorage strength	

PRODUCT CERTIFICATES



Conforms to
ASTM A820

Dramix® is certified for structural use according to EN 14889-1 (system '1'). Detailed information is available on request.

SYSTEM CERTIFICATES



All Dramix® plants are ISO 9001 and ISO 14001 certified.

PACKAGING



BAGS 20 kg



BIG BAG 1100 kg

STORAGE



WEIDACON

Steel wire fibre
of patented carbon wire,
wet, bright drawn



Technical Data

Fibre type: Weidacon FG 12,5/0,4

Fibre properties:

Material: Steel wire material number according to DIN EN 100016-2

Colour: metallic bright

Shape: cross section: round / length: straight

Dimensions: d= 0,40mm, l= 12,5mm or alternatively

Tolerances: Length: +/- 1,25mm from individual value and
(accord. DIN EN 14889-1) +/- 1,5mm from mean value
Diameter: +/- 0,04mm from individual value and
+/- 0,02mm from mean value

Density: 7,85 kg/dm³

Tensile strength: 1250 N/mm² in the medium

E-module: 200.000MPa

Chemical analysis[Mass%]:

	min.	max.
C	0,05	0,95
Mn	-	0,80
Si	-	0,30
P	-	0,035
S	-	0,035
Cr	0,15	0,20
Ni	0,20	0,25
Cu	0,25	0,35
Mo	0,05	0,08



Graphical presentation



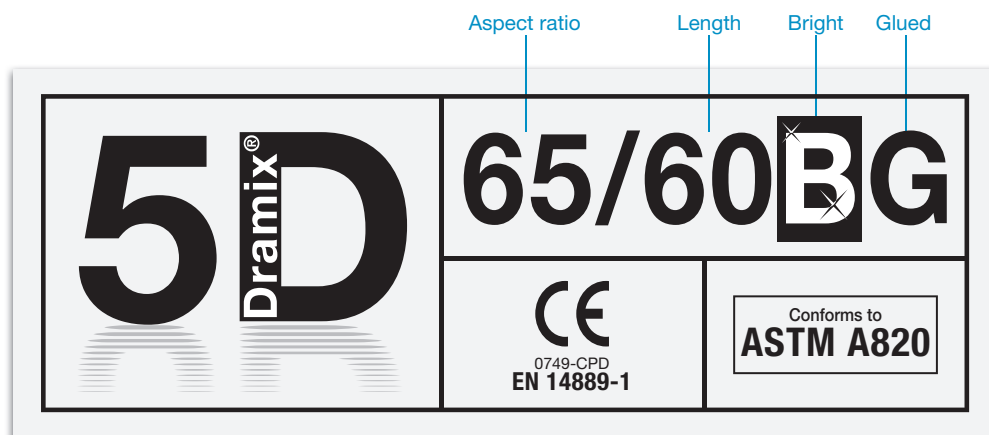
Figure 1: Fibre type Weidacon FG

Concrete properties: These steel wire fibres are certified and monitored to the applicable DIN EN 14889-1 System 3.

Package properties:

Batch size: Paper bags/cardboard boxes of each 20 or 25kg on oneway pallet of 1.000 kg, welded in shrink foil, protected against splash.

Data Sheet



DRAMIX® 5D



The Dramix® 5D series provides you with the ultimate in performance, thanks to a unique combination of a perfectly shaped hook, a high ductility wire, and extreme tensile strength.

- > ultimate anchorage
- > high L/D ratio, glued fibre
- > ultra high tensile strength
- > high ductility wire

Dramix® 5D is a cost efficient solution for high end ULS structural applications

- > foundation slabs structural rafts
- > rafts
- > suspended structures
- > structural precast elements
- > structural floors (e.g. floors on piles)

Bekaert supplies all of the support you need for your project. We help you determine the most suitable fibre types, calculate optimal dosages, select the right concrete quality. Contact your local support. Go to www.bekaert.com/dosingdramix for our recommendations on handling, dosing and mixing.

Modifications reserved.
All details describe our products in general form only.
For detailed information, product specifications available on request.

PERFORMANCE

Material properties

Tensile strength: $R_{m, nom}$: 2.300 N/mm²
Tolerances: $\pm 7,5\%$ Avg
Young's Modulus: ± 210.000 N/mm²
Wire ductility: Ag+e = 6%

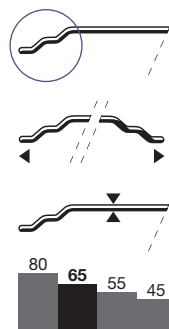
Geometry

Fibre family 5D

Length (l) 60 mm

Diameter (d) 0,90 mm

Aspect ratio (l/d) 65



Fibre network

9,0 km per m³ (for 15 kg/m³)
3.183 fibres/kg
Minimum dosage:
15 kg per m³ (according to CE)

Dramix® range

5D 4D 3D

Tensile strength			
Wire ductility			
Anchorage strength			

PRODUCT CERTIFICATES



Conforms to
ASTM A820

Dramix® is certified for structural use according to EN 14889-1 (system '1'). Detailed information is available on request.

SYSTEM CERTIFICATES



All Dramix® plants are ISO 9001 and ISO 14001 certified.

PACKAGING



BAGS 20 kg



BIG BAG 1100 kg

STORAGE



Abstract

Previous studies showed the feasibility for producing ultra-high performance concrete (UHPC) using a relatively large coarse aggregate (~14 mm) while maintaining good workability and high strength. In addition, it was found that it is possible to use large quantities of short and long steel fibers where each one affects differently at different ranges of concrete behavior under flexural tests.

The current study focused on the following parameters in UHSC (120-150 MPa):

- Effect of using fibers of different sizes.
- Effect of aggregate size.

Three types of steel fibers were tested:

- 12 mm long fibers, 0.4 mm in diameter
- 30 mm long fibers, 0.62 mm in diameter having hook ends 3(D)
- 60 mm long fibers, 0.9 mm in diameter having double hook ends (5D)

Concrete mixes prepare with either one type of fibers (150 kg/m³ for the short fibers alone and 50 kg/m³ for each of the long fibers) or combination of the short fibers (100 kg/m³) with one of the long fibers (50 kg/m³).

Three maximum sizes of aggregates were tested:

- Large: 14 mm
- Medium: 9.5 mm
- Fine: 0.6 mm

For comparison, same mixes were prepared but having regular high strength, HSC, ~70 MPa.

Effect of aggregate size

All the UHPC mixes containing fine aggregate performed the lesser among the other mixes, contradicting the assumption that UHPC can be made using only fine aggregate. This phenomenon was seen for compressive strength and more pronounced in flexural strengths. During the preparation of these mixes (fine aggregate), their cohesiveness was found low which can lead to increased air entrapment and mal distribution of the

fibers. However, poor results were found also in mixes having somewhat better cohesiveness thus it seems the lower values characterize these mixes.

In HSC, the flexural behavior of all mixes was quite similar with not preference to a specific type of fibers or their combination, except for the mix with 50 mm fibers (5D) that exhibited more ductility when the larger aggregate was used. At UHPC, mixes with medium size aggregates performed the best in most of the mixes. Mixes prepared with fine aggregate alone performed the worst.

Effect of fiber type and their combinations

The best properties were found in mixes containing the long fibers (60 mm, 5D) when combined with short fibers. A significant strength drop was found in the mixes with the long fibers alone, after the development of first crack. However, flexural strength increased with further flexure with significant drop each time a fiber broke or pulled out. The short fibers reduced the drop after the development of first crack thus leading to significant energy absorption in this range.

Using the short fibers alone or the 30 mm fibers alone yielded the worse results for all mixes. However, hybrid mixes that contained also short fibers exhibited much better, though not as pronounced as with the long fibers.

It seems that anchoring mechanism of the fibers has a significant role in load carrying in flexure after the development of first crack. The double hooked ends of the long fibers provides with a significant anchoring mechanism that becomes active when the crack opens. The short fibers combined with the long ones moderate the pronounced changes seen when a single fiber detaches from the matrix thus enabling more energy absorption. In addition, it is possible that the aggregates provide a mechanism of pullout over a pulley that adds more friction the fibers that are inclined to the crack, contributing to the frictional forces of pullout. This assumption needs, however, more support.

This study was done with a certain amounts of fibers: ~2%vol. (150 kg/m³) or 0.63%vol. (50 kg/m³) when using the long fibers alone. The efficiency of the hybrid systems containing the two sized of fibers is clear but more optimization is needed to reduce the total amount of fibers, making concretes that are more efficient.



Founded By
Ministry of Construction and Housing
Technion-Israel Institute of Technology
Faculty of Civil & Environmental Engineering

מסודם של
משרד הבינוי והשיכון
הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

המכון הלאומי לחקר הבנייה
National Building Research Institute



2022398

(UHPC) - The use of coarse aggregate and different types of steel fibers and their effect on the fresh and hardened characteristics of the concrete

Dr. Galit Agranati Assoc. Prof. Amnon Katz

Copyright © 2018 by G. Agranati, A. Katz,
The Israel Ministry of Construction and Housing and the Technion Research and
Development Foundation Limited, Haifa

Haifa

March 2018

National Building Research Institute, Technion City, Haifa 3200003, Israel | המכון הלאומי לחקר הבנייה, קריית הטכניון, חיפה 3200003

Fax: 972-4-8324534 | פקס: 972-4-8292242/3 | טל. e-mail: nbri@tx.technion.ac.il

<http://nbri.net.technion.ac.il>

