



מיסודם של
משרד הבינוי והשיכון

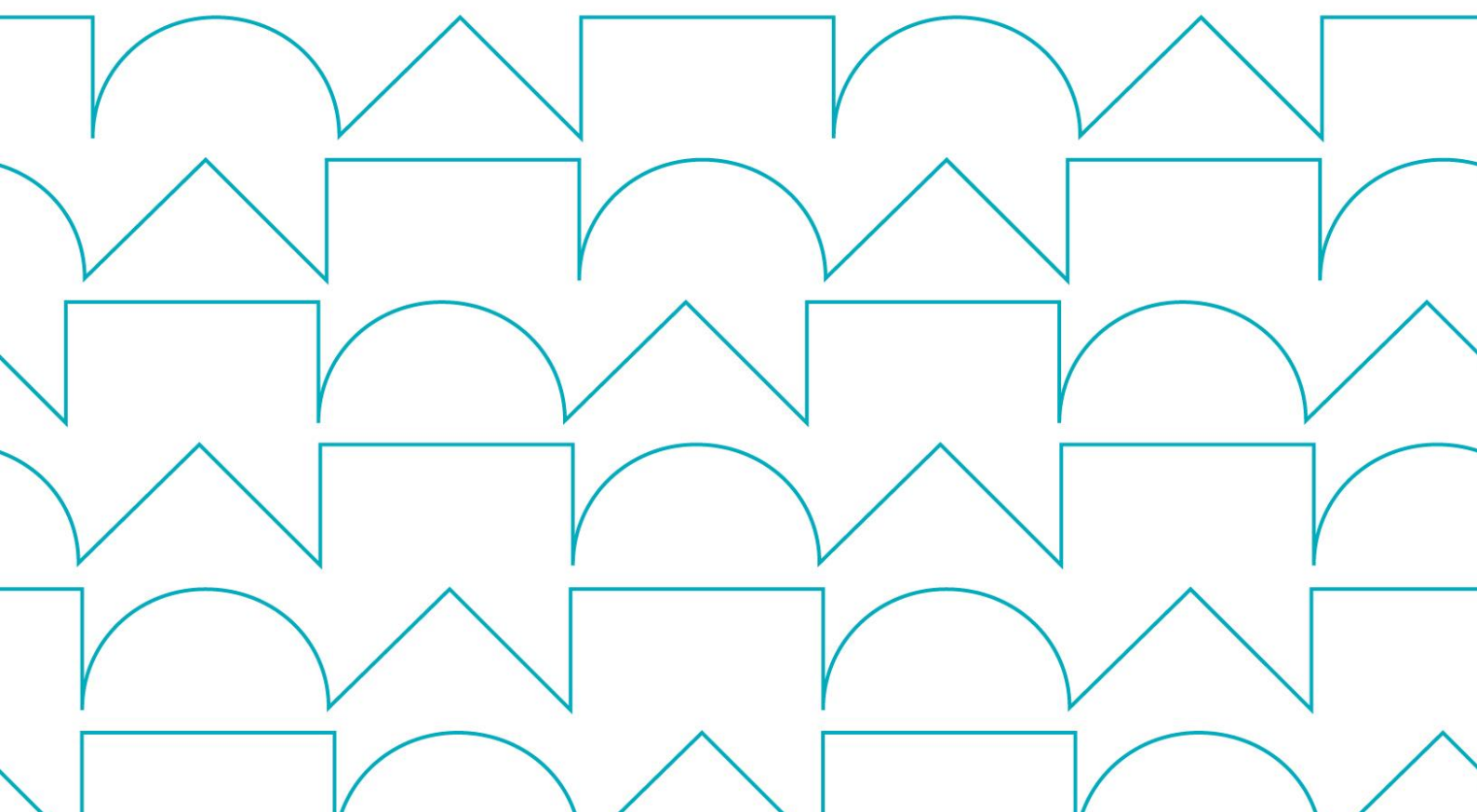
הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

המכון הלאומי לחקר הבנייה
National Building Research Institute



שימוש באגרגטים בעלי תכולת חרסית גבוהה לייצור בטון - לשלב א'

**פבל לריאנובסקי M.Sc. פרופ' ארנון בנטור ד"ר גלית אגרנטי
מר אברהם ליבר**





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



2022400

שימוש באגרגטים בעלי תכולת חרסית גבוהה לייצור בטון - לשלב א'

פבל לריאנובסקי M.Sc. פרופ' ארנון בנטור ד"ר גלית אגרנטי

מר אברהם ליבר

מלווי מחקר: מר ליאו רובינס מר יוסי סיקולר מר משה בן הרוש

מר אריה בלפרמן מר נחמיה מסורי

בהזמנת משרד הבינוי והשיכון

הזמנה מס' 4500938257

Copyright © 2017 by P.Larianovsky, A.Bentur, G.Agranati, A.Lieber
The Israeli Ministry of Construction and Housing and the Technion Research and
Development Foundation Limited, Haifa

ינואר 2017

ח י פ ה

טבת תשע"ז

"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".

הכרת תודה

במסגרת העבודה זכינו לשיתוף פעולה מצוין מהתעשייה באיסוף של דוגמאות מייצגות ובדיקות מעבדה מיוחדות. על כך תודות מיוחדות לחברת אבן וסיד וחברת רדימיקס על מדגמים ממחצבה, לחברת הנסון על מדגמים ממחצבה ובדיקות פילוג גודל חלקיקים ולחברת נשר על בדיקות דיפרקציה בקרני X ופילוג גודל החלקיקים.

תודה גם לחברי ועדת הליווי, אריה בלפרמן, משה בן הרוש, נחמיה מסורי, יוסי סיקולר וליאו רובינס על הדיונים המצוינים שסייעו לגיבוש תוכנית המחקר וקידומו.

תקציר

המטרה העיקרית של המחקר הייתה יצירת תשתית לפיתוח דרכים להרחבת השימוש בחול מתועש בבטון, כתחליף לחול הטבעי, אשר תאפשר פתיחות וזמינות לאמוץ טכנולוגיות ליישום של מרבצים באיכות נמוכה, המכילים תכולה ניכרת של חרסית, תוך הקטנת הצורך בטיפול אינטנסיבי להוצאת החרסית, וכל זאת מבלי לפגוע בתכונות הבטון.

שיטת המחקר התבססה על הכנה מבוקרת במעבדה של מדגמי אגרגטים בעלי תכולות ידועות של חרסית מסוגים שונים ("חולות מהונדסים"), המייצגים את הנפוץ בארץ. חולות אלה הורכבו מחול קוורצי באיכות טובה אשר חלקים ממנו הוחלפו בחומר דק שהתקבל מעדשות במחצבות שהן המקור העיקרי לחרסית באגרגטים. חומר דק זה נשטף בדרך כלל בתהליך הייצור של האגרגטים וכאן הוא הוכנס באופן מבוקר לחול המהונדס.

החומר הדק שהתקבל מהעדשות נבדק לאפיון החרסית ותכולתה באמצעות בדיקת מתילן בלו המאפיינת את כושר הספיחה של החומר הדק, אנליזה דיפרקציה של קרני X לקביעה כמותית של ההרכב המינרלוגי ופילוג החלקיקים על ידי דיפרקציה של קרני ליזר.

השפעת ההרכב של החול ותכולת ואופי החרסית שבו על מערכות צמנטיות נבחנה באמצעות הכנת תערובות מלט ואפיון התנהגותן במצב טרי בבדיקת עבידות רגילה ובבדיקה ריאולוגית, ובמצב קשוי על ידי קביעת התפתחות החוזק. בנוסף נבחנה ההשפעה של מוספים שונים במטרה לבחון את יעילותם להקטנת ההשפעות השליליות של החרסית.

החולות המהונדסים שנבדקו בעבודה היו בכל הטווח הרלוונטי, החל מערכים נמוכים של מתילן בלו עד לערכים גבוהים של כ- 7.0.

המסקנות העיקריות:

אפיון השפעת החרסית בחומר הדק על איכות האגרגט-

- בדיקת המתילן בלו מאפשרת אפיון טוב של החומר הדק המכיל חרסית ונמצאו קשרי גומלין ברורים בין הערך של המתילן בלו ובין תכולת החרסית וההרכב שלה (קאולינית שאיננו סופח מים ומונטמורילוניט הסופחת מים)
- נמצאו קשרים לינאריים בין אפיון העבידות בבדיקה הריאולוגית (ערך הכניעה) ובבדיקה התקנית בשולחן זרימה. הבדיקה הריאולוגית אמינה יותר בהיותה תלויה פחות ביד המפעיל ועל כן הוא יעילה במיוחד לאפיון השפעת הרכב החול על עבידות המערכת הצמנטית
- ניתן לאפיין את השפעת החומר הדק על העבידות של חול במערכת צמנטית באמצעות הערך של המתילן בלו: עד לערך של מתילן בלו של כ- 3 ערך הכניעה המתקבל בבדיקה הריאולוגית (מאפיין אמין של עבידות המערכת) קצת יותר גדול מתערובת בקרה של חול ללא דקים חרסיתיים (דהיינו הפסד עבידות קטן יחסית) והחל מערך מתילן בלו של 3 יש גידול מונוטוני ומשמעותי במאמץ הכניעה (דהיינו הפסד עבידות ניכר) עם הגידול בערך של מתילן בלו

- בהתבסס על הקשר שבין הערך של מתילן בלו וההרכב המינרלוגי ניתן להסביר את התלות שבין ערכי המתילן בלו והעבירות של מערכת צמנטית עם חולות המכילים תכולות והרכבים שונים של חרסיות: עד לערך של מתילן בלו של 3 השפעה היא בעיקר תוצאה של הגודל של חלקיקי החרסית ובערכים גבוהים יותר מתווספת השפעה של הרכב שמקורה בגידול בתכולת המונטמורילוניט הגורמת לפגיעה ניכרת בעבירות עקב ספיחת מים גבוהה
- על בסיס ממצאים אלה התקבלה המסקנה שניתן להגדיר את איכות החול בכל הקשור להשפעת החומר החרסיתי אשר נמצא בדקים על העבירות באמצעות הערך של מתילן בלו, אשר אותו ניתן לקבוע בבדיקה פשוטה יחסית ומהירה באמצעות מכשור קולורימטרי

נטרול השפעת החרסית על העבירות באמצעות מוספים-

- ניתן לנטרל את השפעת החרסית על הקטנת העבירות על ידי מוספים פוליקרבוקסילטים וליגנוסולפונטים המקטינים את תצרוכת מים (משפרי עבירות)
- תכולת המוסף הנדרשת לנטרול השפעה זו הנה קטנה יחסית עבור חול עם ערכי מתילן בלו נמוכים, והיא הולכת וגדלה עם הגידול בערך המתילן בלו של החול. ההסבר האפשרי לכך הוא ספיחה של המוסף אל המונטמורילוניט (שנוכחותו מאופיינת על ידי הערך של מתילן בלו) ובכך ניטרולו כמוסף המשפר עבירות
- כדי להקטין את תכולת המוסף הפוליקרבוקסילטי הנדרשת לנטרול השפעת החרסית על הקטנת העבירות ניתן לשלב אותו עם מוסף מנטרל חרסית, כאשר לשילוב ביניהם יש כנראה אפקט סינרגטי
- הערך של מתילן בלו של החול יכול לשמש כקו מנחה לאסטרטגיה של מיתון השפעת החרסית באמצעות מוספים

השפעות על החוזק-

- הנוכחות של חרסית בדקים מובילה להקטנה בחוזק גם כאשר מנת המים נשארת קבועה והירידה הזו גדולה יותר ככל שתכולת החרסית גבוהה יותר. הירידה איננה תלויה בהרכב המינרלוגי של החרסית אלא בתכולת החרסית בחול וזאת בשונה מהשפעת החרסית על החול אשר תלויה בתכולת החרסית ובהרכבה (קאוליניט לעומת מונטמורילוניט)

תוכן העניינים

.....	הכרת תודה
2	תקציר
5	חלק א: רקע ומתודולוגיית המחקר
5	1. מבוא
6	2. תיאור הניסויים
6	2.1 הרכב החומרים
7	2.2 הכנת החומר הדק
8	2.3 אפיון הדקים
9	2.4 אפיון התפקוד של תערובות צמנטיות והרכבן
12	2.5 אפיון השפעת מוספים
13	חלק ב: אפיון החרסיות והשפעותיהן על המערכות הצמנטיות
13	3. תכונות ריאולוגיות של מדגמי בקרה
17	4. תכונות ריאולוגיות של מדגמים עם חומר דק
23	5. בדיקת מתילן בלו
23	5.1 אפיון רגישות ומשמעות המדידה באמצעות מתילן בלו
27	5.2 ערכי מתילן בלו של החומרים הדקים
30	6. הרכב מינרלוגי של החומר הדק וקשר עם ערכי מתילן בלו
30	6.1 רקע
31	6.2 חישובי ההרכב המינרלוגי מבדיקות XRD
34	6.3 קשרים בין המינרלוגיה וערכי מתילן בלו
36	6.4 מאפיינים של ההרכבים המינרלוגיים
38	7. גבול הנזילות והפלסטיות
40	8. פילוג גודל החלקיקים
48	9. חוזקי לחיצה
10	10. דיון: קשרי גומלין בין תכונות והרכב של החומר הדק והמערכות הצמנטיות שבהן הוא משולב
51	
62	חלק ג: ניטרול השפעת החרסיות באמצעות מוספים
62	11. משתנים באפיון השפעת המוספים
63	12. השפעת מוסף פוליקרבוקסילטי חזק על הפרמטרים הריאולוגיים
72	13. השוואה בין יעילות מוספים פוליקרבוקסילטיים שונים
79	14. השוואת ההשפעה של מוספים פוליקרבוקסילטים חלשים וליגנוסולפונטים
79	15. שילוב של פוליקרבוקסילטים עם מוספים מנטרלי חרסית
83	חלק ד: סיכום ומסקנות
83	16. סיכום ומסקנות
90	רשימת ספרות
91	נספח א': הנחיות לביצוע בדיקות ערך מתילן בלו (MBV) לפי ASTM C 1777
95	נספח ב': ריכוז תוצאות בדיקות מינרלוגיות בדיפרקציה בקרני X

חלק א: רקע ומתודולוגיית המחקר

1. מבוא

באופן מסורתי המקורות אשר שמשו לאגרגטים לבטון היו אמורים לעמוד בדרישות מחמירות מבחינת הניקיון שלהם, כאשר הגורמים העיקריים הם המינרלוגיה של האגרגט להבטיח שאין בו גורמים מזיקים דוגמת אלה היכולים להביא לתפיחה עקב ראקציית אגרגט-אלקלי, נוכחות של חומרים אורגניים היכולים להביא לידי עיכוב הידרצית הצמנט וחומרים דקים המתקבלים באופן טבעי או בשעת הגריסה של האגרגטים. האגרגטים בארץ הנם בדרך כלל בעלי הרכב מינרלוגי טוב, אבן גיר או דולומיט, ועל כן המגבלות הן בדרך כלל תוצאה של נוכחות של חומרים דקים אשר יכולים להיות משני סוגים: חומר דק הדומה בהרכבו לחומר האם של האגרגט, דהיינו הרכב מינרלוגי דומה, או חומר דק שמקורו בחרסיות. ההשפעות של החומרים הדקים הן בעיקר על הגדלת צריכת המים עקב גודלם הקטן^{1,7,8,9,11} כאשר במקרה של החרסית מתווסף מנגנון נוסף של החלשה שמקורו בספיגת המים אל תוך החרסית עצמה, במיוחד בחרסיות המתאפיינות במבנה שהוא תופח^{1,5,10}. לכן במקרה של נוכחות של חרסיות, ההשפעה היא לא רק תוצאה של הגודל והיא תלויה לא רק בתכולת החרסית כי אם גם בהרכב שלה¹:

- מינרלי סמקטייט, המיוצגים בעיקר על ידי מונטמורילוניט מיצגים חרסיות תופחות, אשר בהן המבנה השכבתי יכול בקלות לספוח מים בתהליך של חילוף קטיונים בין שכבות האלומינוסיליקטים.
- קאוליניט ואיליט הן חרסיות שאינן תופחות וזאת משום שיכולת חילופי קטיונים בין שכבות האלומינוסיליקטים נמוכות.

לאור הסיכונים הללו, הגישה המסורתית היא לאתר מקורות של אגרגט שאינם מכילים דקים בכלל או חרסיות במיוחד, או לחלופין לטפל באגרגט, בין אם גרוס או טבעי כדי להוציא מתוכו את הדקים. התהליך המקובל מבוסס על שטיפה במים. לכל אלה יש כמובן משמעות כלכלית וסביבתיות. המגבלות עקב כך מחמירות בשנים האחרונות כתוצאה מדרישות סביבתיות המקשות על מציאת מרבצים חדשים לאגרגטים באיכות טובה ומגבילות את שימוש בטיפול אשר להם עצמם השפעות סביבתיות.

בשנים האחרונות התפתחו מגוון של טכנולוגיות אשר יש פוטנציאל ליישם אותן כדי להתגבר על חלק או כל הבעיות שנסקרו כאן. ליישום של טכנולוגיות אלה יש את הפוטנציאל לאפשר שימוש באגרגטים ממקורות פחות איכותיים, אשר אינם עומדים בדרישות התקנים הנוכחיים, או לחסוך בטיפולים באגרגט, וכל זאת כדי לאפשר שימוש באגרגט באיכות ירודה מבלי לפגוע באיכויות הבטון. טכנולוגיות אלה כוללות שימוש בדור החדש של מוספים פעילי שטח, הפוליקרבוקסילטים, כדי להתגבר על המגבלות הקשורות בגודל החלקיקים הקטן, וזאת על ידי פיזור טוב שלהם^{7,8}. פיזור כזה יכול לנטרל חלק ניכר מההשפעה השלילית על העבירות ואף למנף את הדקים הללו לפעולה של מלאנים שיכולה לשפר את העבירות ולהקנות חיזוק. עקרונות אלה עומדים ביסודם של הבטונים המעולים מסוג HSC ו- SCC וניתן להפעילם גם בבטונים רגילים כדי לאפשר שימוש בחומרים אלה מבלי לפגוע בתכונות ואף לאפשר שיפור דוגמת הקטנת תכולת הצמנט.

בנוסף מתפתח דור חדש של מוספים ייעודיים לחסום את ספיגת המים של חרסיות המבוססים גם על טכנולוגיות שמשמשות בקידוחי נפט⁴, ⁶. את אלה יש להפעיל על חרסיות תופחות בשעה שבחרסיות שאינן תופחות ניתן להסתפק במוספים משפרי עבירות.

קטגוריה נוספת של טכנולוגיות מאפשרות קידום של שיטות בדיקה מהירות לקביעת תכולת החרסית והשפעתה על ספיגות מים (כדוגמת מתילן בלו)⁹.

מערך משולב של כל אלה, אפיון השפעת החרסיות עם אפשרויות לשילוב בבטון של מוספים המאפשרים את נטרול השפעתן יכול לאפשר הרחבת השימוש באגרגטים אשר איכותם ירודה יותר ובכך לקדם פיתוח של מקורות נוספים לאגרגטים והקלה בתהליכי הטיפול בהם.

מעבר לכיווני פעולה אלה, יש לתת את הדעת גם על מחקרים חדשים המצביעים על כך שחרסיות בצורה של ננו-חרסיות יכולות להוות תוסף בעל יעילות גדולה בשיפור תכונות הבטון. הטכנולוגיות שנסקרו לעיל יכולות לכן לשמש גם למטרות שמעבר להרחבת השימוש באגרגטים בעלי איכות נמוכה^{2,3}.

המטרה העיקרית של המחקר היא יצירת תשתית לפיתוח דרכים להרחבת השימוש בחול מתועש בבטון, כתחליף לחול הטבעי, אשר תאפשר פתיחות וזמינות לאמוץ טכנולוגיות המאפשרות יישום של מרבצים באיכות נמוכה, המכילים תכולה ניכרת של חרסית, תוך הקטנת הצורך בטיפול אינטנסיבי להוצאת החרסית וכל זאת מבלי לפגוע בתכונות הבטון. התשתית שתפותח במחקר זה תוכל לסייע גם במגוון של שימושים, במיוחד למוצרי לוואי תעשייתיים דקים, אשר יש בהם כיום עניין רב¹²⁻¹⁶.

שיטת המחקר מתבססת על הכנה מבוקרת במעבדה של מדגמי אגרגטים בעלי תכולות ידועות של חרסית מסוגים שונים, המייצגים את הנפוץ בארץ. מדגמים אלה יבדקו בשיטות מסורתיות וחדשות לאפיון החרסית ותכולתה לבחינה של אמינות השיטות.

במקביל יוכנו מדגמי בטון מאגרגטים אלה לבחינת השפעת החרסית על איכות הבטון ויפותח פרוטוקול לאפיון תפקודי של איכות הבטון או מלט המייצג את הבטון, מבחינת תכונות הבטון הטרי והקשוי.

על בסיס השיטות שיקודמו במחקר המעבדתי תערך בחינה של אגרגטים שיתקבלו מהשטח אחרי רמות שונות של טיפולים כדי לאמת ולבסס את המסקנות של החלק המעבדתי.

הדו"ח הנוכחי כולל דיווח על השלב הראשון של העבודה.

2. תיאור הניסויים

2.1 הרכב החומרים

מדגמי החרסית שנבחנו היו למעשה חומרים דקים שהתקבלו ממספר מחצבות של חברות הנסון ואבן וסיד. נלקחו מדגמים מעדשות של חרסית במחצבות ומתוכן הופרדה במעבדה הפרקציה

העוברת נפה 200 (75 מיקרון). ההפרדה בוצעה על ידי ניפוי ברטוב כאשר לאחר מכן החומר העובר את הנפה יובש בחדר אקלים בתנאים של 40 מ"צ ולחות של 25%.

לצורך השוואה ובקרה נעשה שימוש גם בחומרים דקים שהם חרסיות טכניות נקיות, ובחומר דק שאיננו מכיל חרסית כלל. המדגמים של חרסיות "נקיות" היו בנטויט שהפזה החרסיתית שבו הייתה מונטמורילוניט (אנליזה כמותית בדיפרקצית קרני X- הראתה שהמינרל החרסיתי היחיד בו היה מונטמורילוניט בשיעור 94.5%) וקאוליניט (אנליזה חצי כמותית בדיפרקצית קרני X- הראתה שהמינרל החרסיתי היחיד בו היה קאוליניט בשיעור 94.4%); המונטמורילוניט שייכת למשפחת החרסיות התופחות. החומר הדק שאיננו מכיל חרסית היו מלאן של אבן גיר, AVGIL 205, המיוצר בכפר גלעדי, בעל גודל חלקיקים קטן, כ- 5 מיקרון, דומה לגודל חלקיקי החרסית.

לצורך השוואה נבחנו גם תערובת בקרה אשר בהן מנות המים היו 0.70, 0.77, 0.85 ו- 0.92. החלק המוצק של התערובות הורכב מ- 460 ג"מ צמנט ו- 1380 ג"מ חול. כמות המים שהוספה הייתה זו הנדרשת לקבלת מנות המים שנקבעו.

בשלב זה של המחקר נבחנה השפעת החומר הדק רק בתערובות עם מנת מים של 0.92, כאשר 5% מהחול מוחלף בחומר הדק (69 ג"מ מתוך 1380 ג"מ). החול ששמש למטרה זו היה חול קוורצי באיכות גבוהה ו- 5% ממנו הוחלפו בחומרים הדקים השונים (חרסיות נקיות, מלאן אבן גיר בגודל של 5 מיקרון, וחומר דק שהתקבל מעדשות במחצבות וטופל כמתואר בסעיף 2.2. החול הזה שהורכב לצורך הניסויים כונה כאן "חול מהונדס", כאשר ההבדלים בין החולות המהונדסים הם רק בפרקציה הדקה של 5%.

2.2 הכנת החומר הדק

הכנת החומר הדק התבססה על ניפוי והפרדה לקבלת הפרקציה הקנה מ- 75 מיקרון. הניפוי ראשון של החומר נועד להפרדה מגרגרים גסים. לאחר מכן שטיפה ברטוב בשני שלבים, דרך נפה 30 # (600 מיקרון) ולאחר מכן דרך נפה 200 # (75 מיקרון). החומר הרטוב שוקע במכל במשך 24 שעות ולאחר מכן הופרדו ממנו המים (ציור 1). השארית לאחר הפרדת המים יובשה בחדר אקלים ב- 40 מ"צ ולחות יחסית של 25%.



ציור 1: הפרדת המים מחומר דק שטוף דרך נפה 200 # (75 מיקרון)

2.3 אפיון הדקים

בשלב זה של המחקר אפיון החומר הדק התבסס על בדיקה מינרלוגית בדיפרקציה של קרני X, פילוג גודל החלקיקים וקביעה של ערך המתילן בלו.

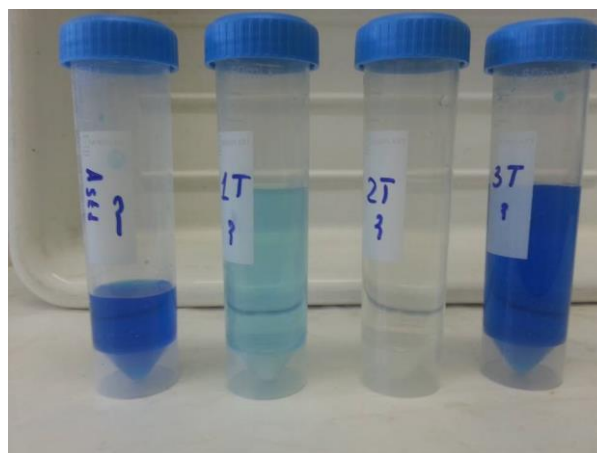
דיפרקציה קרני X בוצעה במעבדת מכון ננו של האוניברסיטה העברית וכן במעבדת "נשר" והיא נועדה בעיקר לאפיון איכותי של המינרלוגיה של המדגמים ובמקביל הערכה כמותית של הפזות השונות, שהתבססה על שיטת ריטולד.

כדי לבחון האם חלק מההשפעות של החרסיות מקורן בנוכחות של חומרים אורגניים נבדקו הרכבים מייצגים של החומרים הדקים, עם תכולות נמוכות וגבוהות של חרסית לנוכחות של חומר אורגני. הבדיקה בוצעה במכון הגיאולוגי לקביעת תכולה של פחמן אורגני באנליזת TOC. הקביעה בוצעה על מדגם בעל משקל נתון שאליו הוסף פוטסיום דיכרומט וחומצה סולפורית מרוכזת, וניתן להם זמן של 18 עד 24 שעות לתגובה. לאחר מכן המדגם עבר טיטרציה בפרוס אמוניום סולפט באמצעות Metrohm Titrino plus model 848. התוצאות הן ביחידות של % של פחמן אורגני.

בדיקה לפילוג גודל החלקיקים באמצעות דיפרקציה בקרני ליזר בוצעה ב- 3 מעבדות, המכון הגיאולוגי ושתי מעבדות תעשייתיות, האחת של חברת "נשר" והשנייה של מעבדה הקשורה לחברת הנסון..

אפיון נוסף של הדקים היה על ידי בדיקות של גבול הנזילות והפלסטיות אשר מהם חושב גם אינדקס הפלסטיות.

קביעת ערך המתילן בלו בוצעה על פי התקן האמריקאי ASTM C 1777 המבוסס על בדיקה כמותית של שינוי הצבע של תמיסת מתילן בלו, וזאת על ידי קביעת מקדם הבליעה. למטרה זו נעשה שימוש במכשיר Hach DR 900 (ציור 3 א')



(ב)



(א)

ציור 3 : (א) המכשיר לקביעת מקדם בליעת האור (ב) ושינויי גוון של תמיסת מתילן בלו, משמאל לימין : תמיסת מתילן בלו 0.50% ; התמיסה עם מדגם עשיר במונטמורילוניט ; התמיסה עם מדגם של בנטוניט (מונטמורילוניט) ; התמיסה עם מדגם של קאוליניט

בבדיקה זו מכינים תמיסה של מתילן בלו בריכוז של 0.5%, אשר לה גוון כחול. לתוך תמיסה זו מכניסים בצורה מבוקרת את החומר הנבדק. החרסית שבמדגם סופחת אליה את המתילן בלו וכתוצאה מכך משתנה גוון התמיסה (ציור 3 ב'). מדידת מקדם הבליעה של התמיסה (דהיינו ההקטנה שלו), מאפשרת לקבוע את כמות המתילן בלו שנספחה אל תוך המדגם. מדד זה, ערך המתילן בלו, משמש כאינדיקציה לתכולת וסוג החרסית שבמדגם. חרסית תופחת (מונטמורילוניט למשל) תספח אליה יותר מתילן בלו מאשר חרסית שאיננה תופחת (קאוליניט למשל). המחשה של ההבדלים בגוון ניתנת בציור 3 ב' אשר בו בולט הבדל בין המדגמים.

התהליך והנחיות הבדיקה מוצגים בנפח א'.

בנוסף נקבעו ערכי המתילן בלו בתערובות של חומר דק המכיל תכולות משתנות של חרסיות נקיות, כדי לשמש כבסיס להערכת הרגישות של הבדיקה של ערך המתילן בלו וכדי לשמש גם כבסיס לכיול להערכת האיכות וההרכב של המדגמים שנלקחו מהמחצבות.

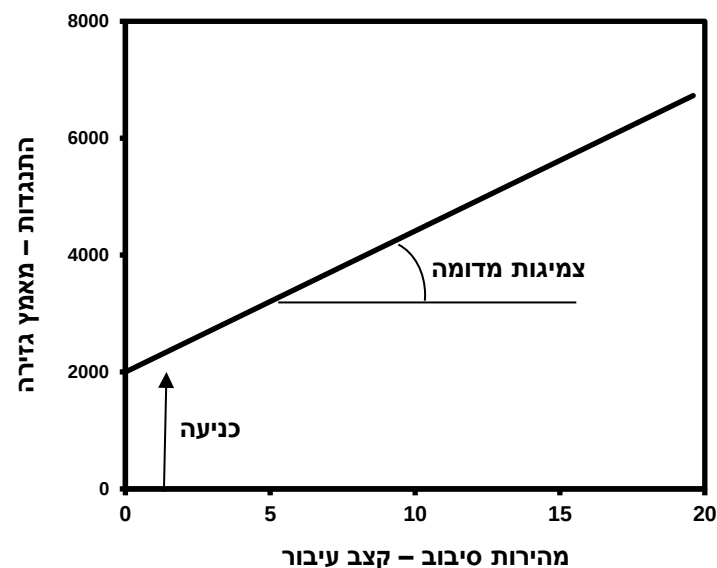
במהלך הבדיקות נמצא שסטיית התקן של מקדמי הבליעה היא כ- 0.50 (טווח של 0.08 – 0.74) ושל ערך המתילן בלו הוא כ- 0.40 (טווח של 0.20 עד 0.80). הערכים של מקדמי השוני לא היו תלויים בערך הנמדד ועל כן מקדם השוני גבוה יותר בערכי מתילן בלו נמוכים ונמוך יותר בערכי מתילן בלו גבוהים.

2.4 אפיון התפקוד של תערובות צמנטיות והרכבן

אפיון התפקוד של התערובות הצמנטיות (מלט, צמנט וחול) במצב הטרי התבסס על קביעת ההתנהגות בויסקומטר (ריאומטר) ושולחן זרימה לפי התקן האמריקאי ASTM C 1437.

במצב הקשוי אופיינו ההרכבים השונים של המלטטים על יד חוזק הלחיצה בגילים של 1, 7, ו-28 ימים של קוביות 25 מ"מ. האשפורה הייתה תקנית (7 ימים במים ולאחר מכן באוויר המעבדה) תוך השוואה גם לאשפורה מתמשכת במים, דהיינו המדגמים של 28 ימים נבדקו לאחר אשפורה רציפה ברטוב או אשפורה של 7 ימים במים ואח"כ באוויר המעבדה.

בדיקת הויסקומטר מבוססת על קביעת המאמץ (התנגדות לסיבוב) בתלות במהירות הסיבוב. את העקום המתקבל בבדיקה זה ניתן לתאר באמצעות מודל בינגהם, המתאפיין על ידי שני פרמטרים, מאמץ הכניעה והצמיגות המדומה (ציור 4).



ציור 4: הבדיקה בויסקומטר: תיאור המכשור ועקום בינגהם המתקבל בבדיקה

התכונות הריאולוגיות נחקרו באמצעות הויסקומטר תוך מעקב אחר ההשתנות שלהן במהלך 30 הדקות הראשונות, בזמנים של 0, 10, 20 ו-30 דקות. תוצאות הבדיקות הריאולוגיות תוארו באמצעות שני הפרמטרים של מודל בינגהם, מאמץ כניעה וצמיגות מדומה. מאחר והמדידה כאן של

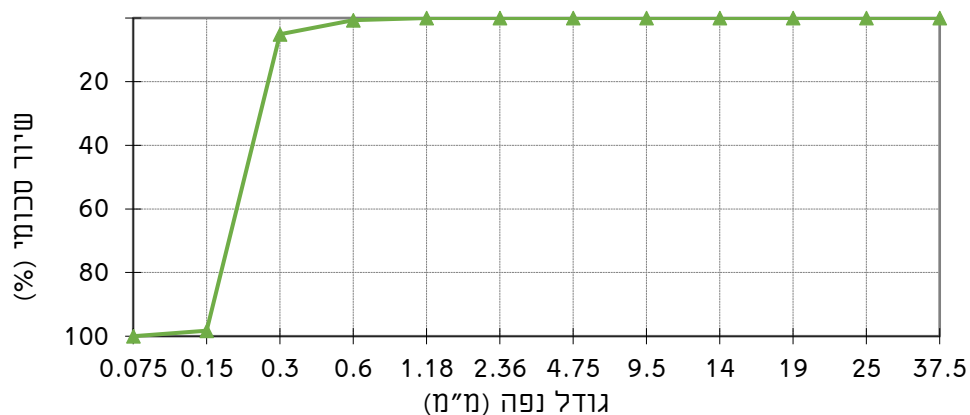
הכוחות והמאמצים איננה ישירה אלא באמצעות ההתנגדות הנמדדת לסיבוב, ההתייחסות לתוצאות המתקבלות תהיה במינוח של "ערך כניעה" ו"ערך צמיגות מדומה" ולא במונחים של מאמצים. היות וההערכה של התפקוד מבוססת על השוואה עם תערובות בקרה די בערכים אלה כדי להגיע למסקנות בדבר השפעת הפרמטרים השונים הנחקרים כאן.

הבדיקה באמצעות שולחן הזרימה מבוססת על יציקת מדגם בתוך קונוס קטום, הרמתו לחשיפת התערובת ולאחר מכן טולטל השולחן במספר נקוב של מכות (ציור 5). הבדיקה היא תקנית על פי התקנים ASTM C 230 ו- ASTM C 1437. במחקר הזה מספר המכות שנקבע היה 15. הקוטר התחתון של תבנית החרוט הקטום הוא 100 מ"מ. נערכה מדידה של קוטר המלט לאחר הרמת התבנית ולאחר הטלטולים. נקבעו שני פרמטרים: השירוע לאחר ההרמה של התבנית ולפני הטלטולים והשירוע לאחר הטלטולים. ערל הזרימה מוגדר כגידול היחסי בקוטר לאחר הטלטולים, יחסית לקוטר לפני הטלטול.



ציור 5: שולחן הזרימה

הבדיקה בוצעה על תערובת מלט (צמנט-חול ביחס 1 : 3) אחידה בהרכב של 460 ג"מ צמנט, 422 ג"מ מים (מנת מים של 0.92) ו- 1380 ג"מ חול טבעי. הדרוג של החול הטבעי מוצג בציור 6. הוא לא הכיל דקים בגודל של מתחת ל- 75 מיקרון. האפיון של התנהגות הדקים ("אבק", "פילר") בתערובת התבסס על החלפת 5% מהחול בחומר הדק המכיל חרסית ולצורך השוואה גם חומר דק ללא חרסית שהיה מלאן אבן גיר נקי ממחצבות כפר גלעדי, Avgil 205. החולות הללו כונו "חולות מהונדסים".



ציור 6: דרוג החול ששמש להכנת המלטים

2.5 אפיון השפעת מוספים

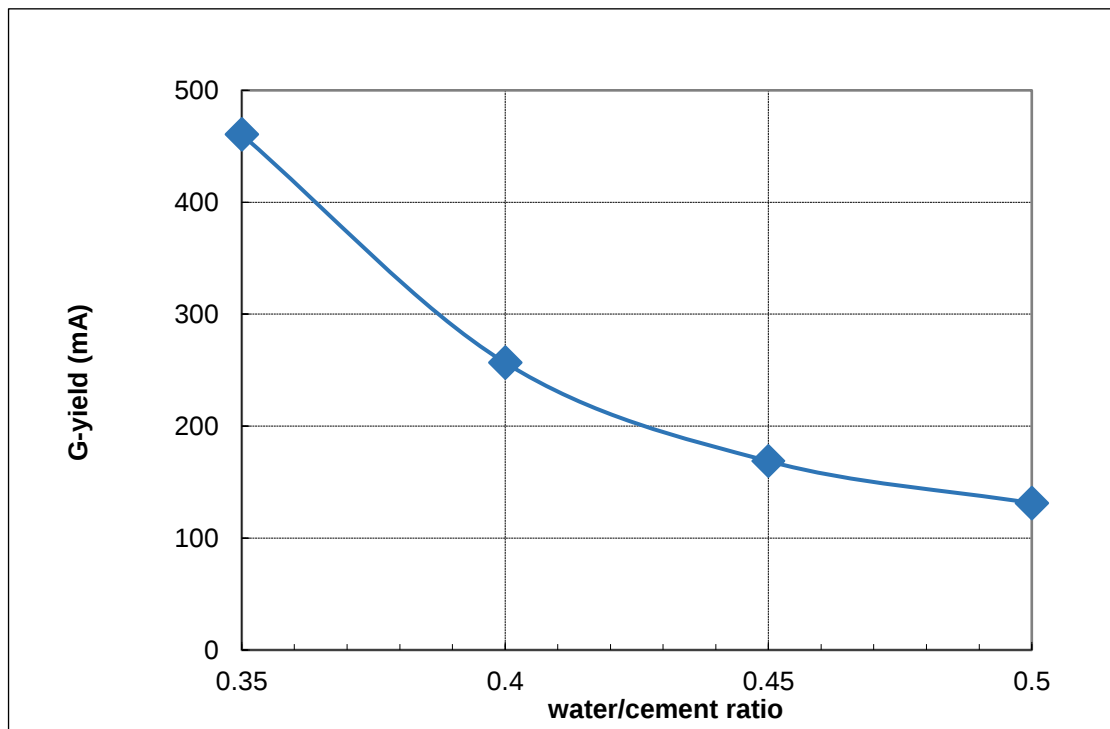
השפעת מוספים נבחנה על ידי אפיון התכונות של מלטרים תוך שימוש במוספים מסחריים. בוצעו שתי סדרות, האחת עם מוסף פוליקרבוקסילטי בעל כושר הפחתת מים גדול במיוחד אשר יכולה בדוח PC-A, לקביעת תכולות אופטימליות והשפעתן במנות מים שונות, והשנייה עם שלושה מוספים פוליקרבוקסילטיים, שניים עם כושר הפחתת מים גבוה במיוחד (מכונים PC-A ו- PC-B) ושלישי בעל כשר הפחתת מים קטן יותר (PC-C), לגינוסולפונט ומוסף מנטרל חרסית (CMA-Clay Mitigating Admixture) מתוצרת WR GRACE הקרוי קלרנה. מוסף מנטרל חרסית שייך לדור חדש של מוספים אשר נועדו לתת מענה למגבלות של אגרגטים כדי לאפשר שימוש באגרגטים גבוליים. במקרה הנוכחי מדובר במוסף אשר נספח אל החרסית ומונע שסיפה של מים אל תוך שטחי הפנים הפנימיים שלה ובכך מונע את נטרול השפעתם של מוספים משפרי עבירות ומפחיתי צריכת מים.

חלק ב: אפיון החרסיות והשפעותיהן על המערכות הצמנטיות

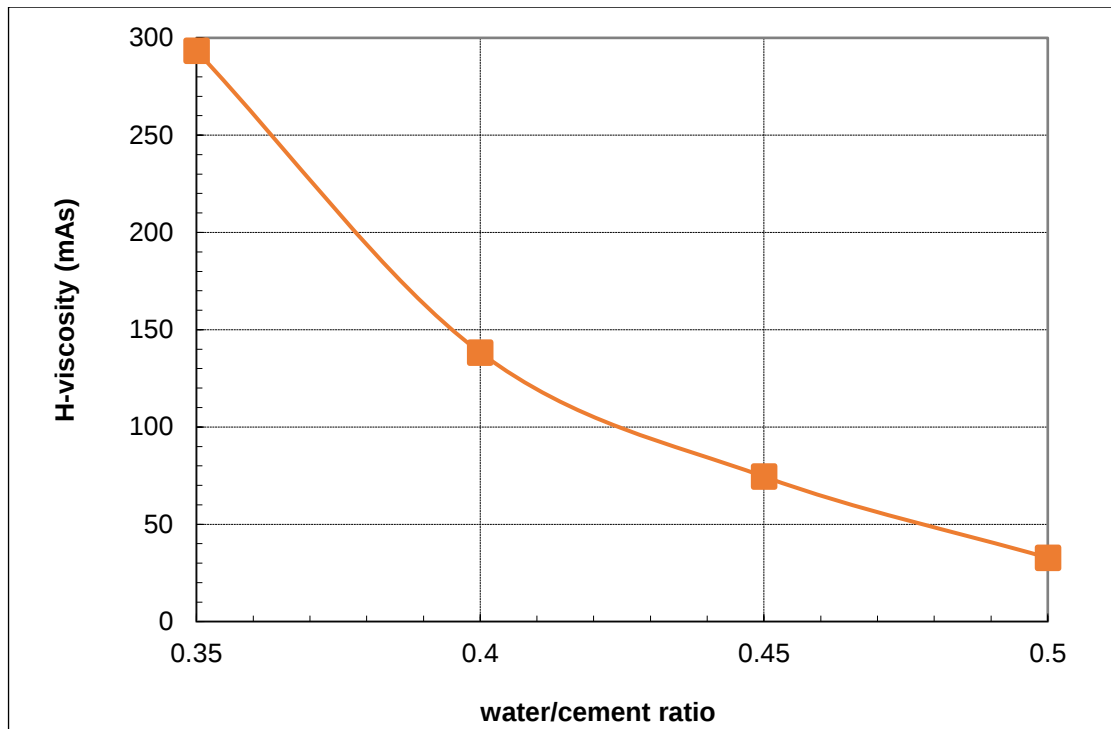
3. תכונות ריאולוגיות של מדגמי בקרה

כאמור, ההתנהגות בבדיקה הריאולוגית מבוססת באמצעות הפרמטרים של מאמץ כניעה וצמיגות מדומה. מאחר ואין כיוול ישיר בין המדידה המאפיינת את המאמץ (זרם חשמלי) ובין המאמץ עצמו, כל התוצאות מוצגות במונחים של זרם עבור מאמץ הכניעה ו-(זרם X זמן) לצמיגות המדומה, והערכים הנגזרים מכונים ערך כניעה וערך צמיגות מדומה.

במסגרת ההרצה של האפיון הריאולוגי נערכו קודם כל בדיקות של עיסות לקביעת השפעת מנת המים בתחומים שהם רלוונטיים לעיסות, דהיינו מנות מים נמוכות יותר בטווח של 0.35 עד 0.50. התוצאות מוצגות בציורים 7 ו-8 עבור ערך הכניעה וערך הצמיגות המדומה, בהתאמה. ניתן לראות בברור את המגמה הצפויה של הגידול בשני פרמטרים אלה עם ההקטנה במנת המים, מגמה המביאה לידי ביטוי את הקטנת העבירות במנות המים הנמוכות יותר.

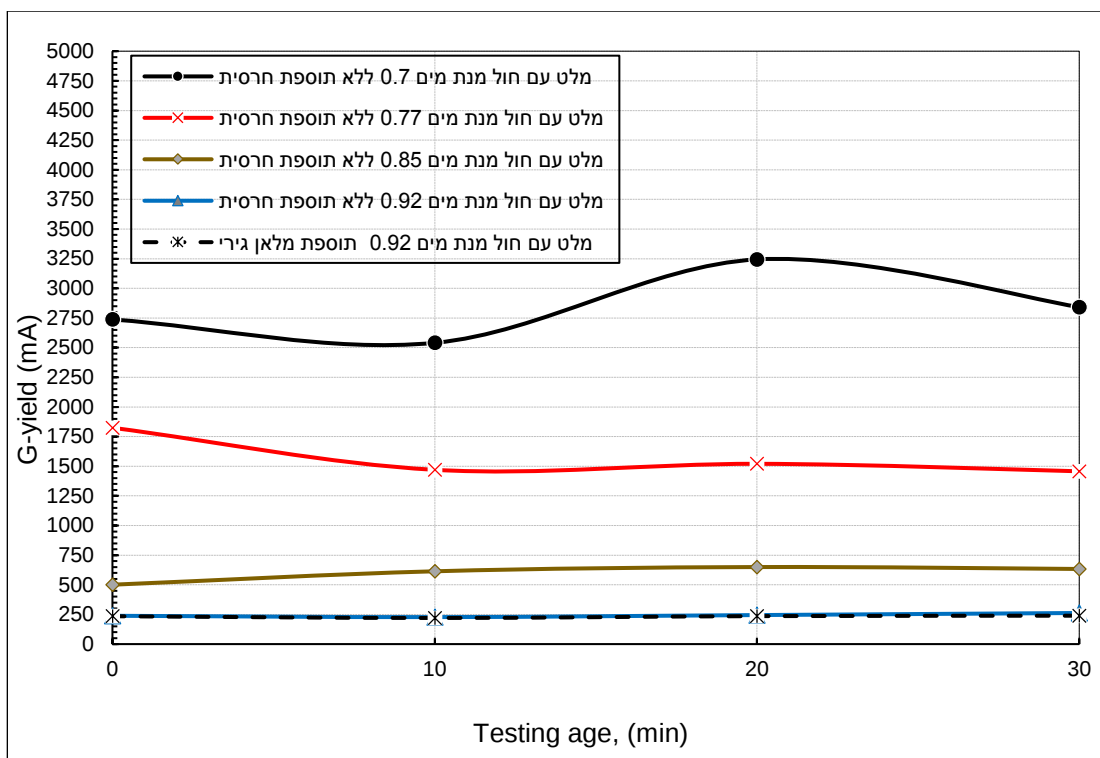


ציור 7 : השפעת מנת המים על ערך הכניעה בעיסות

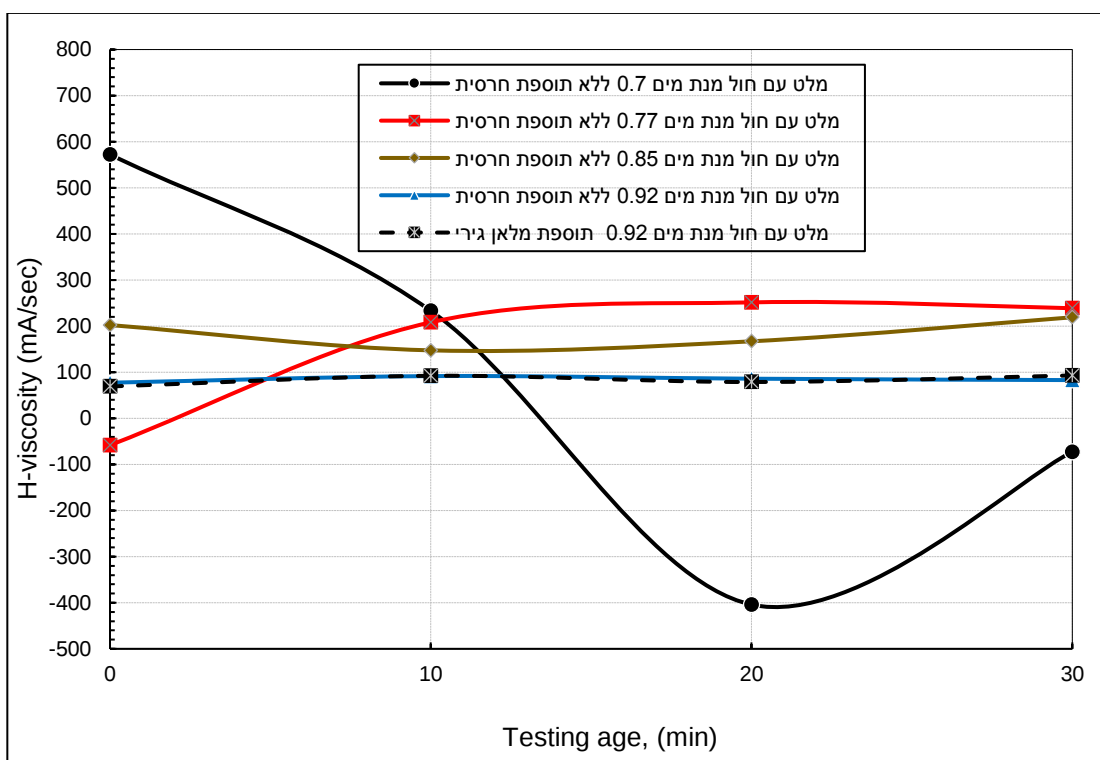


ציור 8 : השפעת מנת המים על ערך הצמיגות המדומה בעיסות

מדגמי הבקרה המהווים תערובות מייצגות של הרכב המלט בבטון (תערובת צמנט-חול) היו בהרכב של 1 : 3 צמנט:חול, כאשר מנות המים היו בתחום 0.70 עד 0.92. מדובר בשלב זה בתערובות ללא מוסף משפר עבידות ועל כן מנת המים הנמוכה ביותר שאפשרה עבידות סבירה הייתה 0.70. מנת מים זו מייצגת בטון בטווח של חוזק רגיל. התכונות הריאולוגיות של המלטים נבדקו מיד בתום הערבוב וכן בפרקי זמן של 10, 20 ו- 30 דקות כדי לאפיין את השפעת הזמן על שינוי התכונות הריאולוגיות. התוצאות מוצגות בציורים 9 ו- 10.



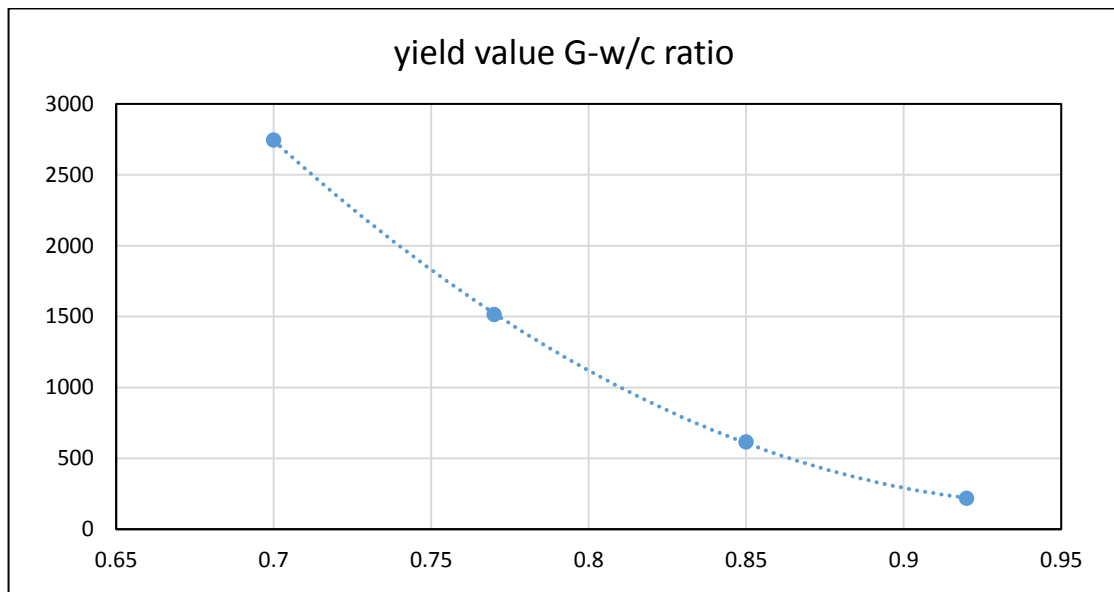
ציור 9: ערך הכניעה של תערובות מלט במנות מים שונות



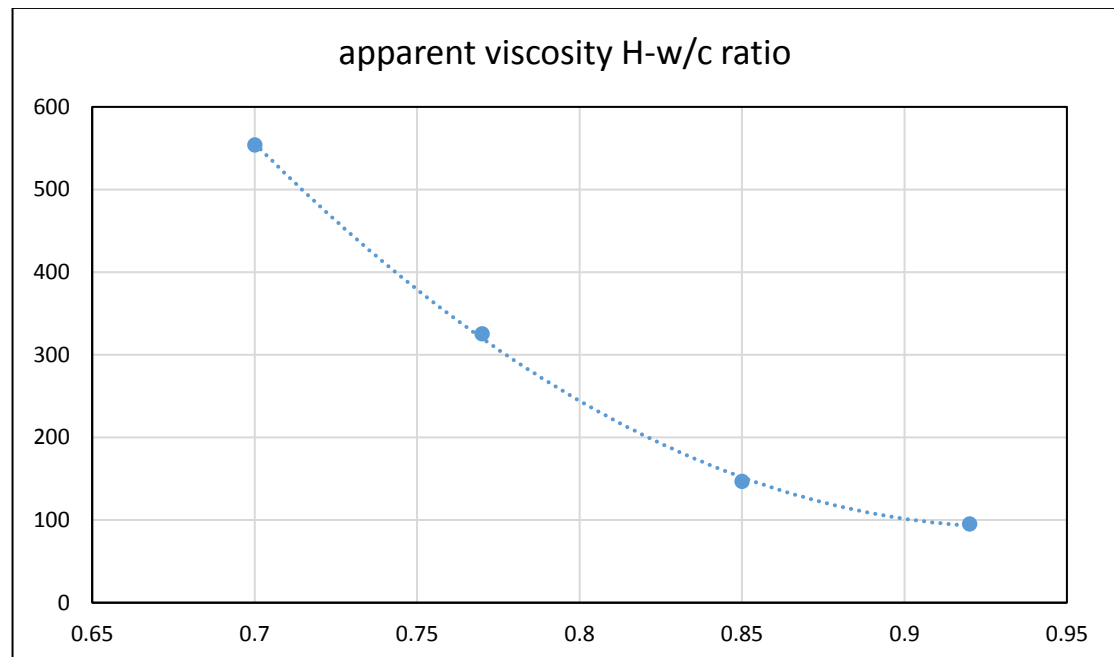
ציור 10: ערך הצמיגות המדומה של תערובות מלט במנות מים שונות

ניתן לראות שהפרמטרים הריאולוגיים נשארים די קבועים במהלך 30 הדקות של המדידה, פרט לצמיגות המדומה במנת המים הנמוכה ביותר שנבדקה של 0.70, אשר שם יש מגמה להקטנה על ציר הזמן.

שני הפרמטרים הריאולוגיים מראים על מגמה של גידול עם ההקטנה במנת המים, כפי שבא לידי ביטוי בציורים 11 ו-12 עבור מאמץ הכניעה והצמיגות המדומה. המגמות הללו דומות לאלה שנצפו בעיסות.



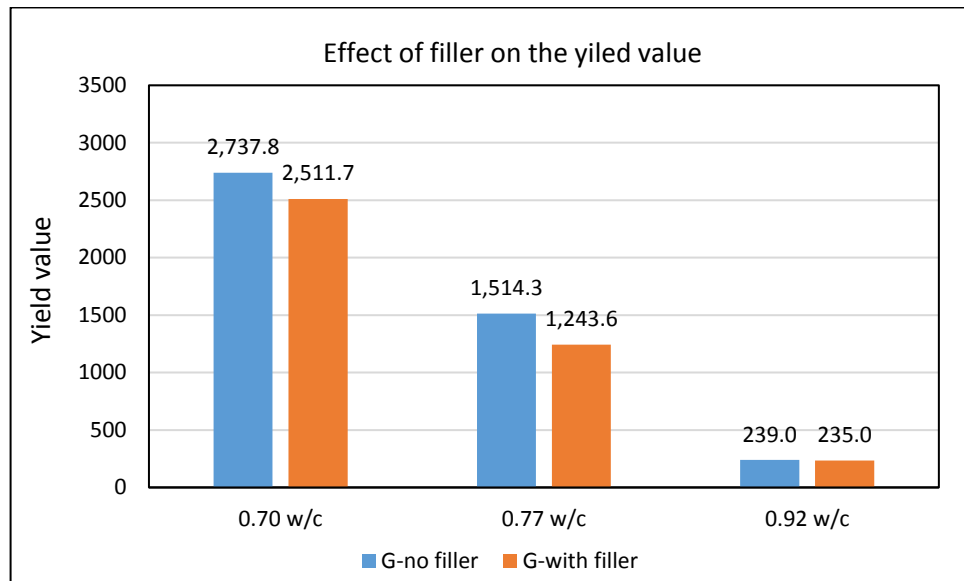
ציור 11 : השפעת מנת המים על ערך הכניעה מיד לאחר הערבוב



ציור 12 : השפעת מנת המים על ערך הצמיגות המדומה, במדידה של 10 דקות לאחר הערבוב

מערכת נוספת של מדגמי בקרה הייתה זהה למלטים שבציורים 11 ו-12, אך 5% מהחול הוחלפו במלאן דק מאבן גיר. אלה משמשים כבקרה לתערובות אשר בהם 5% מהחול יוחלפו בחומר דק המכיל תכולות וסוגים שונים של חרסיות. ההשפעה של הנוכחות של המלאן על ערכי הכניעה מתוארת בציור 13. ניתן לראות שבכל המקרים הנוכחות של המלאן מקטינה במקצת את ערך

הכניעה, בטווח של אחוזים בודדים במנת מים של 0.92, וערכים גבוהים יותר של עד כ- 20% במנות המים הנמוכות יותר.

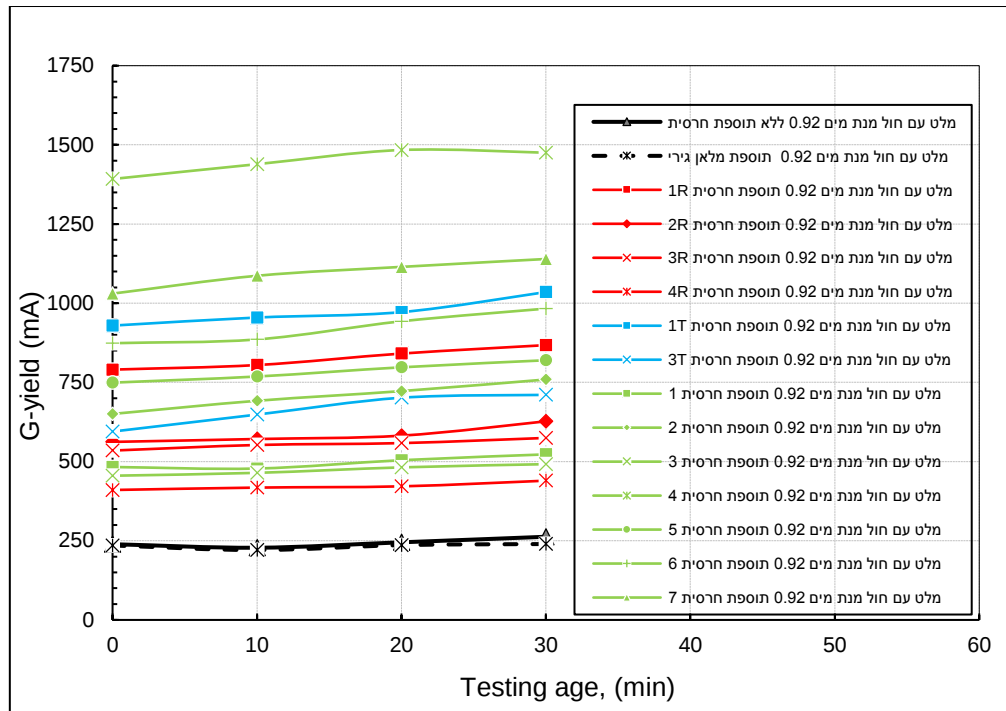


ציור 13 : השפעת נוכחות המלאן על ערכי הכניעה של תערובות במנות מים שונות

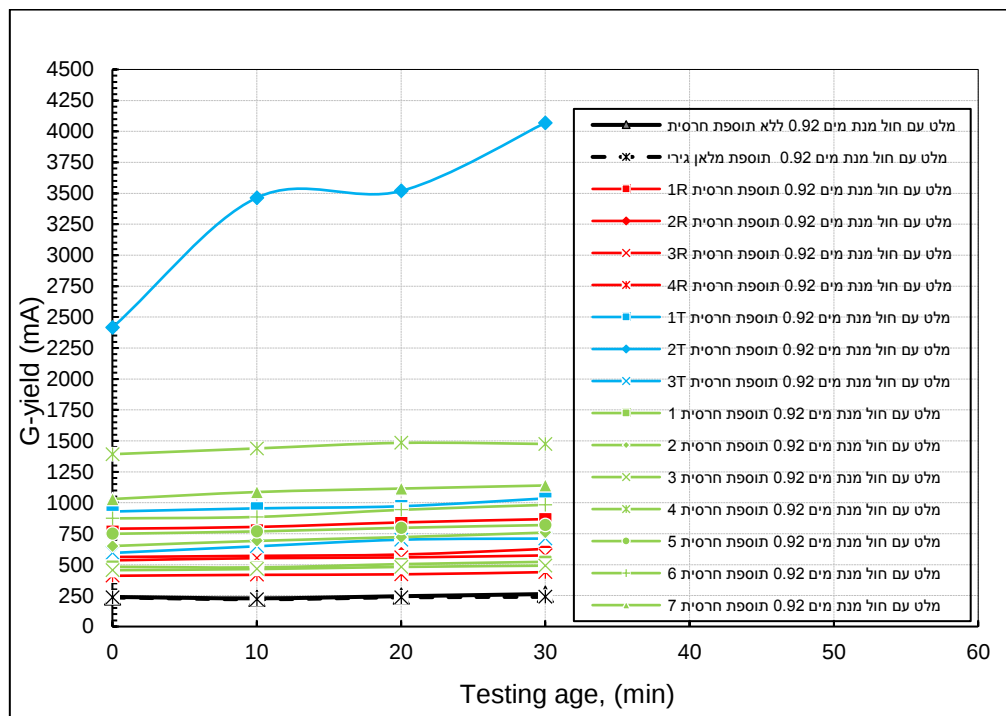
4. תכונות ריאולוגיות של מדגמים עם חומר דק

השפעת הנוכחות של 5% חומר דק בחול על התכונות הריאולוגיות של מלטים במנת מים של 0.92 (69 ג"מ מתוך 1380 ג"מ) מתוארת בציורים 14 ו- 15 עבור ערך הכניעה וערך הצמיגות המדומה. ניתן להבחין שהמקדמים הריאולוגיים כמעט ואינם משתנים על ציר הזמן, פרט למקרה של המונטמורילוניט, אשר בו יש גידול במקדמים על ציר הזמן, בדומה למגמה בתערובת הבקרה עם מנת המים הנמוכה ביותר שנבדקה, של 0.70.

בשני הפרמטרים הריאולוגיים ניתן להבחין שהתוספת של חומר דק שאיננו מכיל חרסית לא משפיעה על הערך של הפרמטר הריאולוגי, בשעה שחומרים דקים המכילים חרסית גורמים לגידול במאמץ הכניעה (ציור 14 ב') ולעומת זאת להקטנה בערך הצמיגות המדומה.

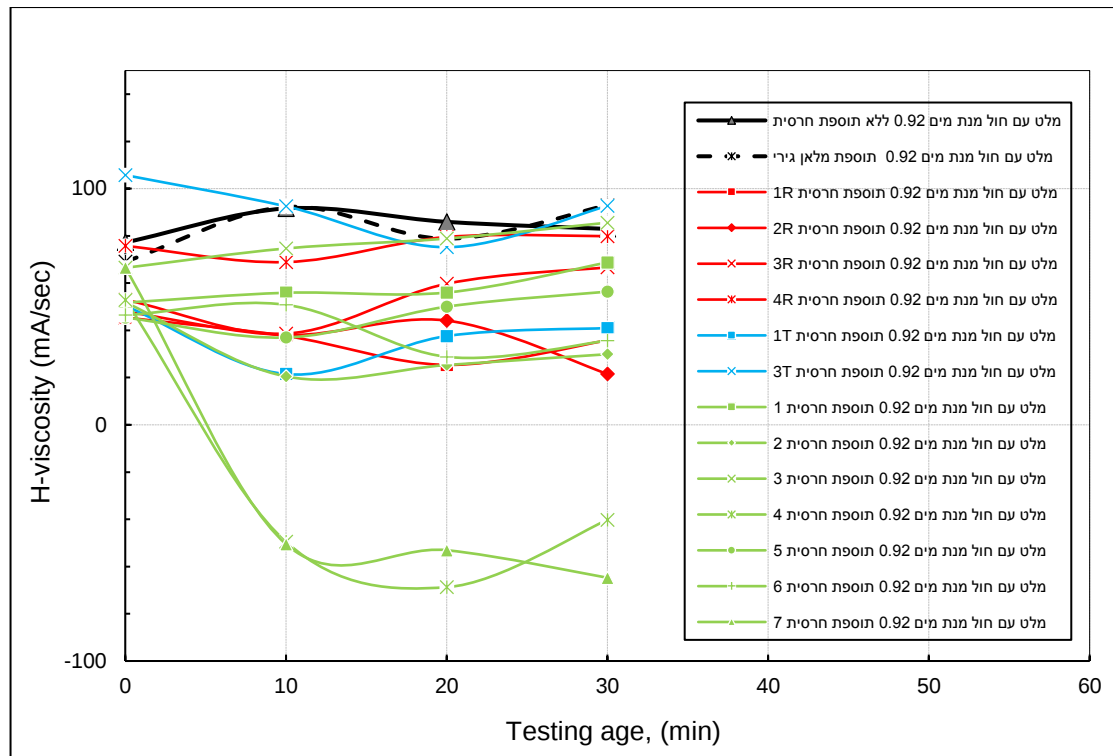


(ב)

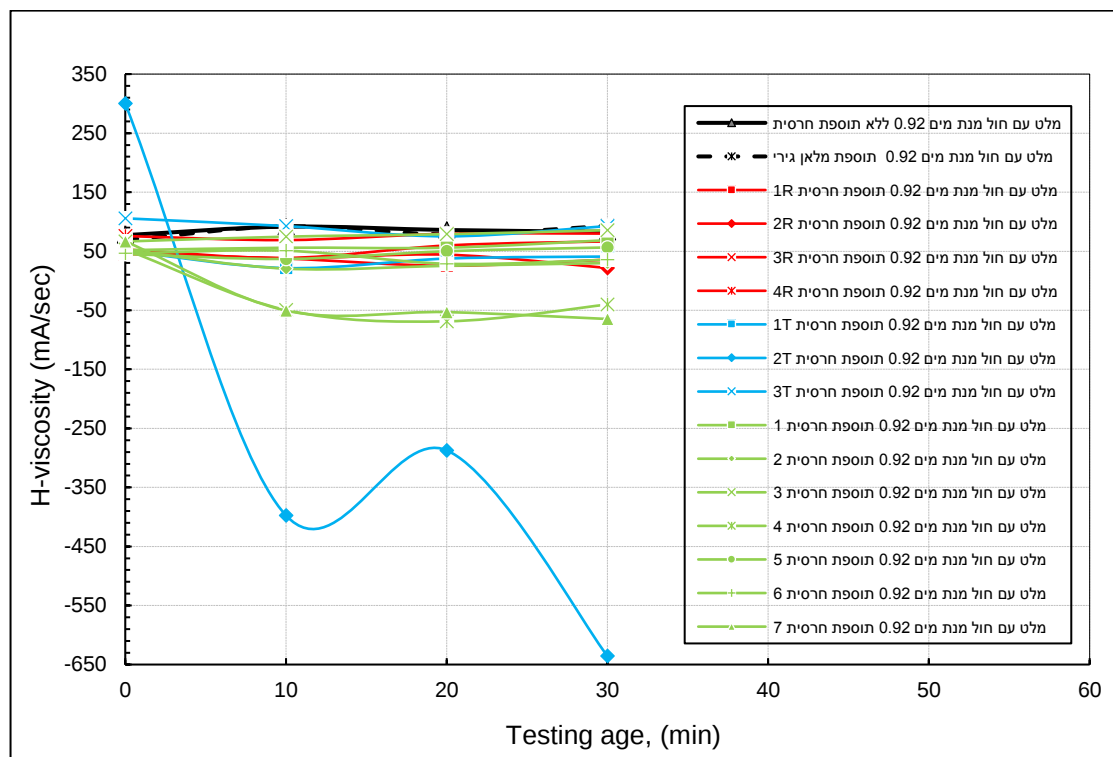


(א)

ציור 14 : השתנות ערך הכניעה G במהלך הבדיקה הריאולוגית במשך 30 דקות. מדגמים T2 ו-T3 הם של מונטמורילוניט וקאוליניט, בהתאמה.



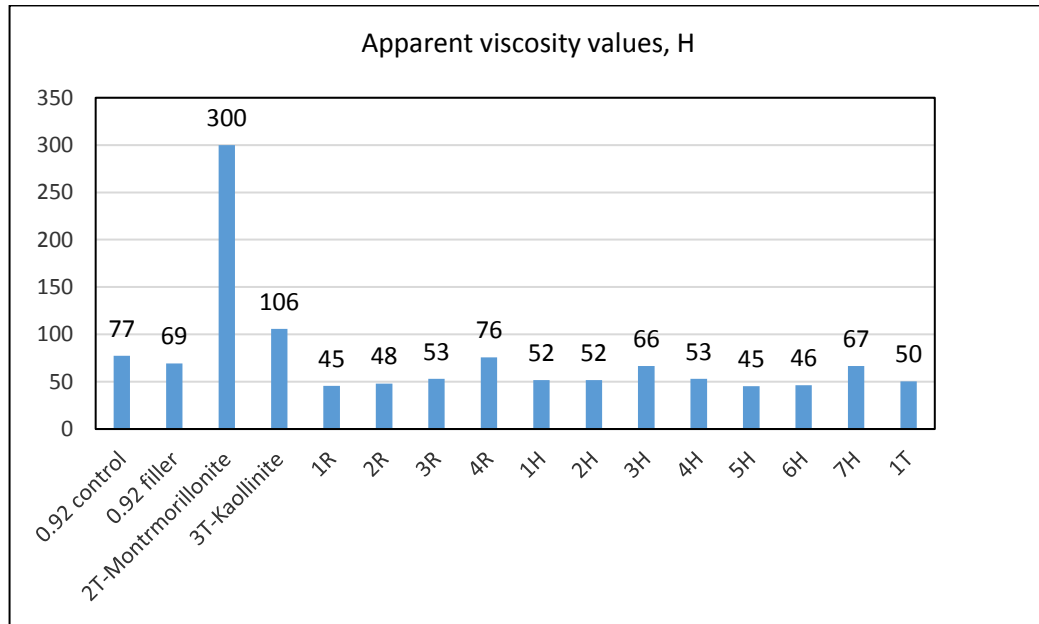
(ב)



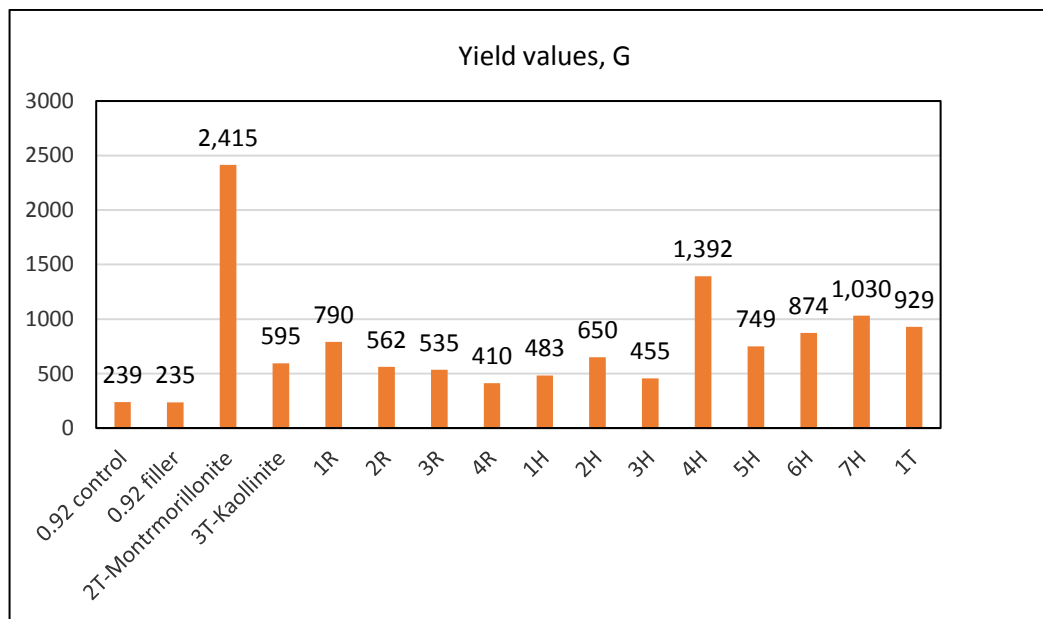
(א)

ציור 15: השתנות ערך הצמיגות המדומה H במהלך הבדיקה הריאולוגית במשך 30 דקות. מדגמים T2 ו-T3 הם של מונטמורילוניט וקאוליניט, בהתאמה.

המגמות של השפעת ההרכב של החומר הדק על הפרמטרים הריאולוגיים מיד לאחר הערבוב עם מים, מוצגות בציור 16, כאשר הערכים היחסיים מוצגים בציורים 17 ו- 18.

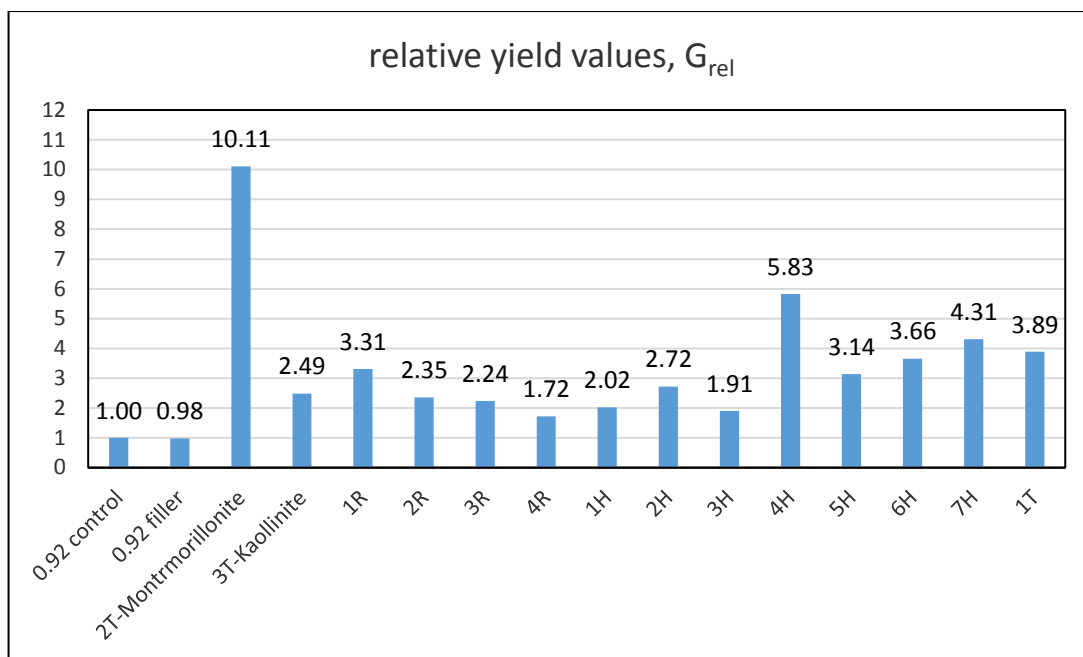


(ב)

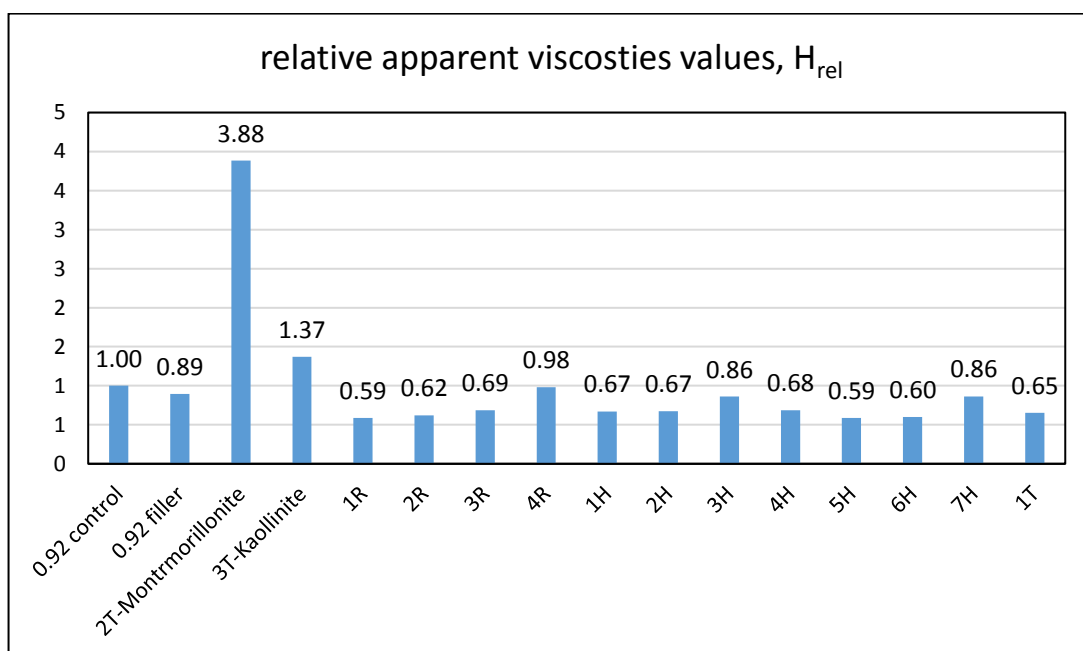


(א)

ציור 16 : ערכי הכניעה G (א) והצמיגות המדומה H- (ב) עבור ההרכבים השונים



ציור 17: ערכי הכניעה היחסיים של (ביחס לתערובת הבקרה במנת מים של 0.97 ללא תוספת דקים), מיד לאחר הערבוב עם מים



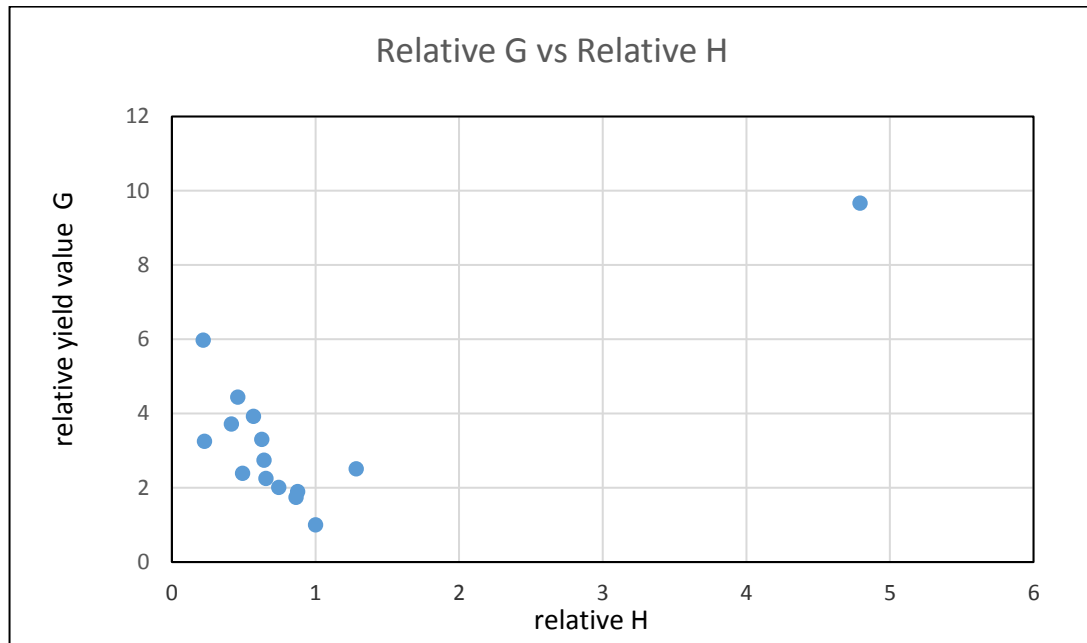
ציור 18: הערכים היחסיים של הצמיגות המדומה (ביחס לתערובת הבקרה במנת מים של 0.917 ללא תוספת דקים), מיד לאחר הערבוב עם מים

החלפת החול ב- 5% חומר דק מהמחצבות (המכיל חרסית) גורמת להגדלת ערך הכניעה G יחסית למדגם הבקרה, בשעה שהצמיגות המדומה, H , קטנה בנוכחות החומר הדק. מגמה זו שונה מההשפעה של הקטנה במנת המים, הגורמת לגידול בשני הפרמטרים הריאולוגיים הללו.

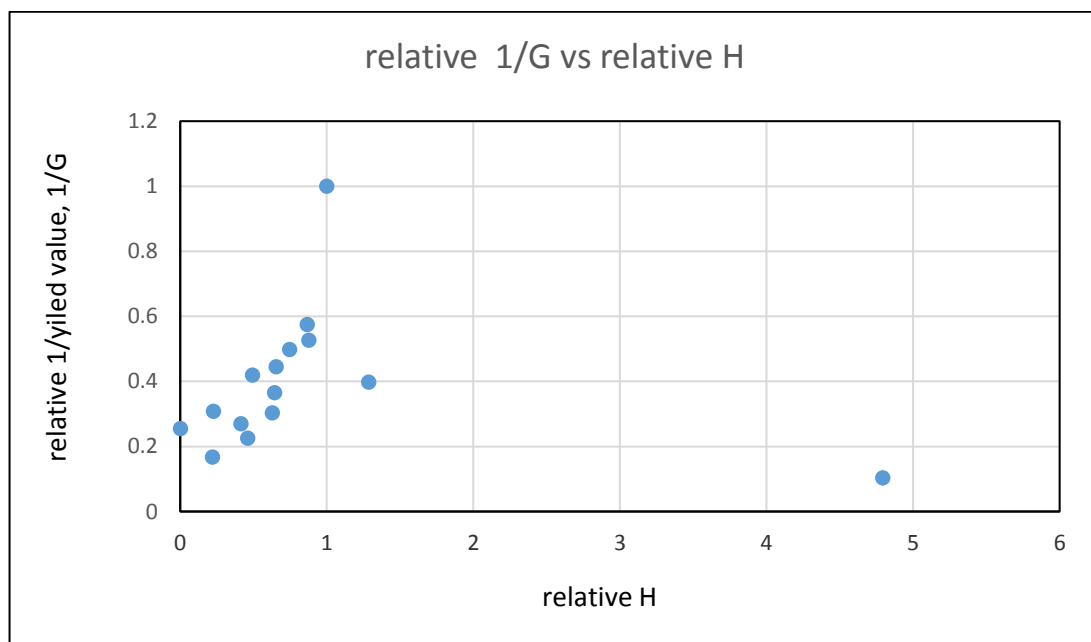
מעניין לציין שהחלפת החול ב- 5% חומר דק שאינו מכיל חרסית (AVGIL 205) לא גרמה לשינוי בפרמטרים הריאולוגיים כפי שהתרחשה בחומר הדק מהמחצבות, ומכאן ניתן להעריך שהשינויים הללו מקורם בנוכחות חרסית ולא בדקות החומר, כי גודל המלאן דומה לזה של חלקיקי החרסית.

מעניין לציין שהמגמה הזו, המתקיימת בהחלפה של חול בשתי החרסיות הנקיות, גורמת לעלייה בשני המקדמים הללו. הגידול הזה הרבה יותר ניכר במונטמורילוניט. מן הראוי לציין שהגידול בערך H בתוספת הקאוליניט הנו קטן יחסית, 28% בלבד.

השוואה בין הערכים היחסיים של G ו-H מוצגת בציורים 19 ו-20.



ציור 19 : הקשר בין הערכים היחסיים של ערך הכניעה G והצמיגות המדומה H



ציור 20 : הקשר בין הערכים היחסיים של ערך הכניעה H ואחד חלקי הצמיגות המדומה ו- 1/G

הקשרים בצירים 19 ו-20 מעידים על קשר בין הערכים של G ו-H, פרט לנקודה חריגה אחת שהיא של מונטמורילוניט "נקי". לכן, פרט למקרה זה, ניתן להסיק שככל שהערך של G (כניעה) גדל בהשפעת תוספת הדקים מהמחצבות, הערך של H (צמיגות מדומה) קטן.

5. מתילן בלו

5.1 אפיון רגישות ומשמעות המדידה באמצעות מתילן בלו

א. עקרונות תהליך האפיון

כדי לאפיין את רגישות ומשמעות המדידה באמצעות מתילן בלו פותח תהליך המבוסס על בדיקה של אגרגט "סינטטי" בעל תכולות מבוקרות של חרסיות בהרכב נתון, המצטיינות בהבדלים ניכרים בכושר הספיחה. בדוגמא שמוצגת כאן נבחרו מונטמורילוניט (בנטוניט) שהיא בעלת כושר ספיחה גבוה של מים, וקאוליניט בעלת כושר ספיחה נמוך. החרסיות היו מתוצרת Witgert גרמניה ונתונים טכניים מוצגים בטבלה 1.

טבלה 1: הרכב כימי ודרוג של החרסיות

תכונה	בנטוניט (מונטמורילוניט)	קאוליניט
הרכב כימי % משקל	SiO ₂	57.5
	Al ₂ O ₃	17.5
	TiO ₂	2.8
	Fe ₂ O ₃	13.8
	CaO	1.9
	MgO	3.3
	Na ₂ O	0.0
	K ₂ O	0.5
	הפסד בקלייה, % משקל	13.5
דרוג % שארית על נפה, מיקרון	500	3.0
	250	2.3
	125	6.0
	63	12.2
	20	9
	6.3	12
	2	14
	<2	54
		50

המלאן האינרטי שנבחר לצורך הכנת האגרנט ה"סינטי" הנו מלאן אבן גיר (קלציום קרבונט) והחרסיות שנבחרו היו בדרגת ניקיון גבוהה, כאשר תכולתן נעה בטווח של 0 – 8% במשקל שהוא הטווח הצפוי באגרנטים.

ב. הרכב תערובות האפיון

התערובות התבססו על מדגמים מבוקרים של מלאן נקי (אבן גיר) עם תכולה מבוקרת של חרסית בעלת הרכב ידוע, כאשר תכולת החרסית תהיה בטווח של 0 עד 8% במשקל.

כל תערובת הייתה במשקל של 20 ג"מ (טבלה 2) כנדרש בסעיף 3 (נספח א') עבור מדגם לבדיקה בקולורימטר.

טבלה 2 : הרכב התערובות לצורך הכיול :

כינוי (%) חרסית)	משקל מלאן, ג"מ	משקל חרסית, ג"מ
0	20.00	0.00
0.5	19.90	0.10
1	19.80	0.20
1.50	19.70	0.30
2	19.60	0.40
4	19.20	0.80
5	19.00	1.00
6	18.80	1.20
8	18.40	1.60

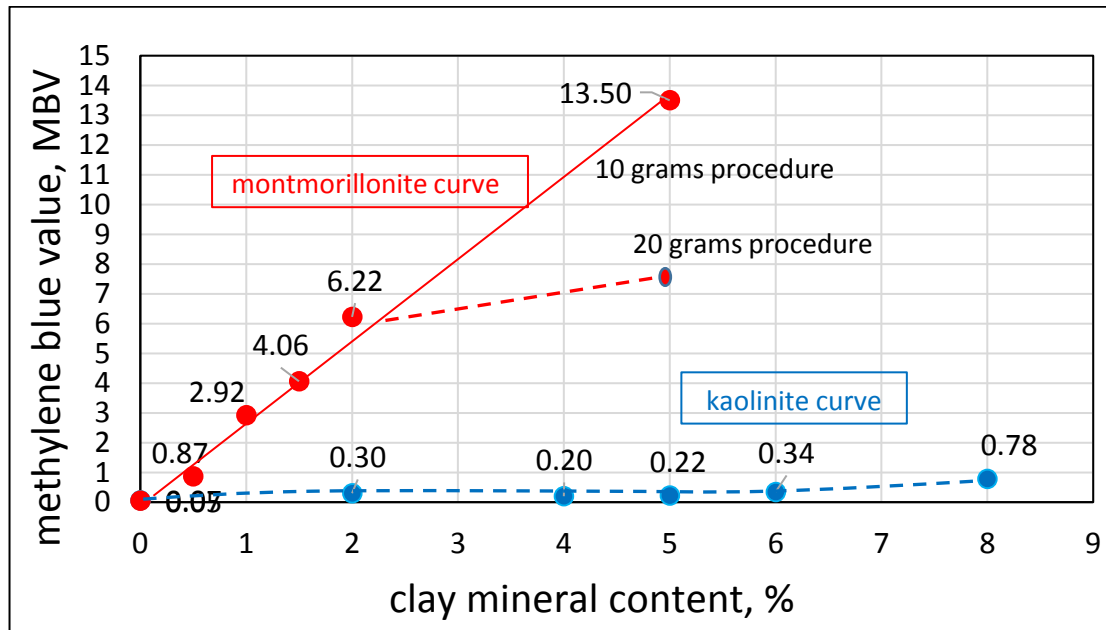
ג. ערכי ה-MBV של תערובות ממונטמורילוניט וקאוליניט

מקדמי הבליעה של ההרכבים השונים בתוך תמיסת מתילן בלו של 0.5% מוצגים בטבלה 3. ניתן לראות שהמקדם קטן בצורה דרסטית עם הגידול בתכולת המונטמורילוניט, וברכוז של 5% הוא נמוך מאוד, כמעט אפסי. לעומת זאת, ההקטנה במקדם הבליעה היא מאוד מתונה במקרה של הקאוליניט וגם בריכוז של 8% הוא די גבוהה, 4.012, יחסית לתמיסת מתילן בלו של 0.5% ששם מקדם הבליעה הוא 4.442. הבדל זה במקדמי הבליעה נראה היטב בשינויים בגוון כפי שמוצגים בציר 3. התמיסה עם המונטמורילוניט היא כמעט שקופה לחלוטין, דבר המצביע על כך שברכוז של 5% כמעט כל המתילן בלו בתמיסה של 0.5% נספח אל המונטמורילוניט.

טבלה 3 : מקדמי הבליעה של התערובות עם תכולות שונות של חרסיתות "נקיות"

תכולת חרסית, %	מונטמורילוניט	קאוליניט
0	4.442	4.442
0.5	3.912	
1	2.702	
1.5	2.031	
2	0.752	4.311
4		4.340
5	0.012	4.340
6		4.244
8		4.012

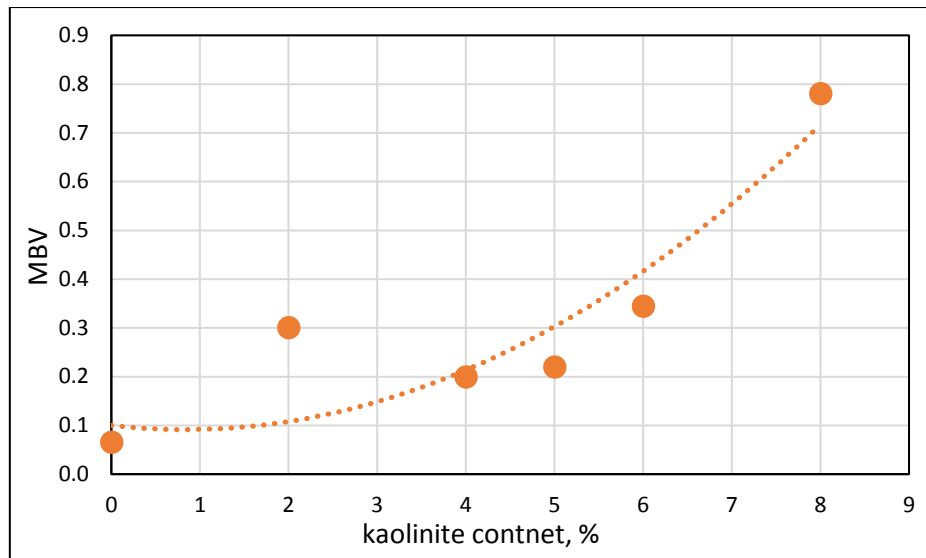
ערכי המתילן בלו חושבו מתוך מקדמי הבליעה והערכים המתקבלים מוצגים בתלות בתכולת החרסית בציר 21. הערכים הגבוהים בהרבה של המונטמורילוניט הם תוצאה של כושר הספיחה הגבוה בהרבה של חרסית זו. העקום של הקאוליניט הוא שטוח, כאשר בתכולה של 8% הערך של MBV הנו פחות מ-1, דבר המעיד על כושר ספיחה נמוך מאד. בהקשר זה ראוי להעיר שמקובלת ההערכה שכאשר ערך MBV של אגרגט נתון הוא פחות מ-3 ההשפעה של החרסית שבו על תפקודו הנה קטנה או זניחה.



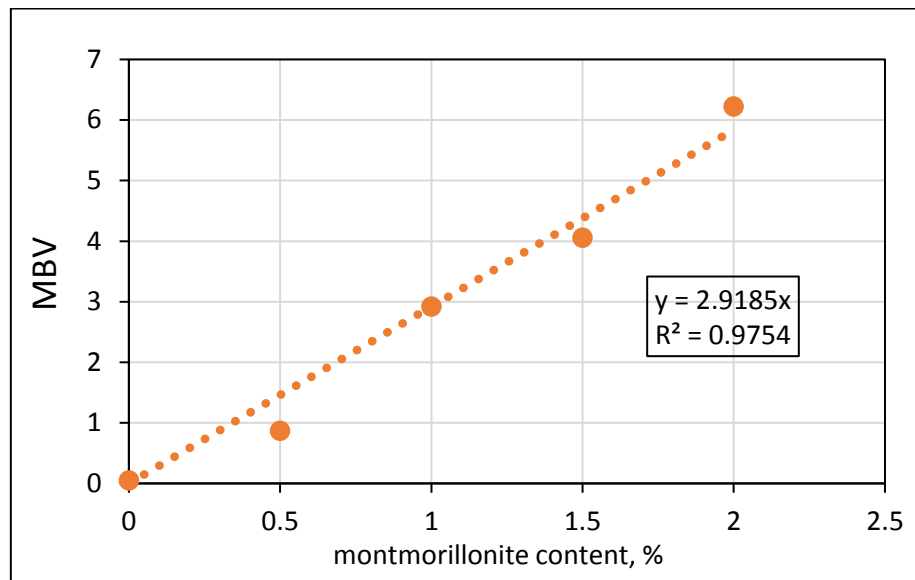
ציר 21: ערכי MBV של חרסית קאוליניט (95% קאוליניט) ובנטוניט (95% מונטמורילוניט) בתלות בתכולת החרסית

בחינה מפורטת יותר של עקום המונטמורילוניט בציר 21 מצביעה על קשר מונטוני עולה עד לערך של מתילן בלו של כ- 6 (2% תכולה של מונטמורילוניט) ולאחר מכן הוא מתמתן. את ההתמתנות הזו ניתן להסביר בכך שעבור ריכוז תמיסת מתילן בלו של 0.5% כפי שנקבע בתקן, די בכ- 2% של מונטמורילוניט כדי לספוח את רוב ה- 0.5% של המתילן בלו שבתמיסה. דבר זה בא לידי ביטוי במקדמי הבליעה שבטבלה 3: מקדם הבליעה בתכולות של 2 ו- 5% מונטמורילוניט הם 16.9 ו- 0.27% מהערך של התמיסה ללא תוספת חרסית. על כן, גידול בתכולת המונטמורילוניט מעבר לתחום זה איננו מלווה בגידול משמעותי בערך של המתילן בלו. על כן, התקן דורש שכאשר הערך של מתילן בלו הוא כ- 7 ויותר, לחזור על הבדיקה עם תכולה נמוכה יותר של חול, 10 ג"מ במקום 20 ג"מ, ואת המשמעות רואים בברור בציר 21.

מן הראוי לציין שבטווח של עד 2% של מונטמורילוניט וערך מתילן בלו של כ- 6, ניתן להבחין בקשר ליניארי בין תכולת החרסית והערך של MBV בבדיקה של 20 ג"מ (ציר 22). בבדיקה של 10 ג"מ הקשר הליניארי מתמשך על פני טווח גדול יותר, עד מתילן בלו של כ- 14.



(ב)



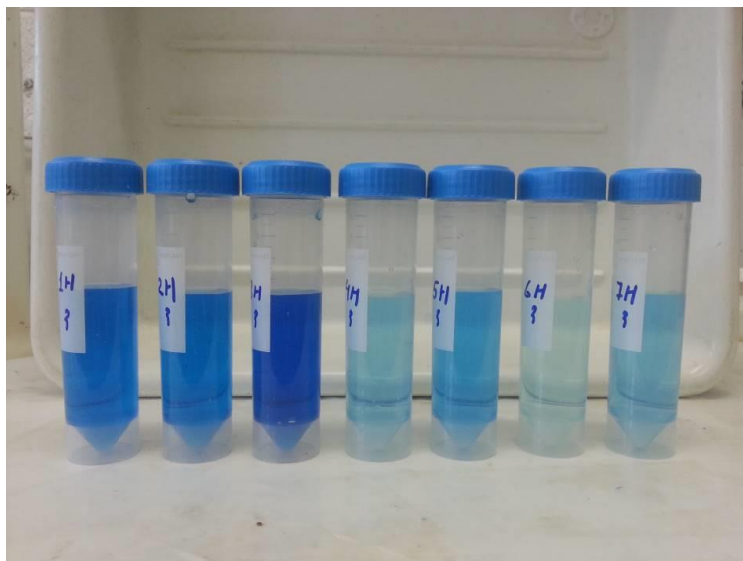
(א)

ציור 22: קשר בין ערך המתילן בלו, MBV, ובין הרכב החרסית
 (א) קשר בין תכולת חרסית מונטמורילוניט, עד 2% מונטמורילוניט, ובין ערך MBV; קשר
 לינארי מובהק עם $R^2=0.975$
 (ב) קשר בין תכולת חרסית קאוליניט ובין ערך MBV

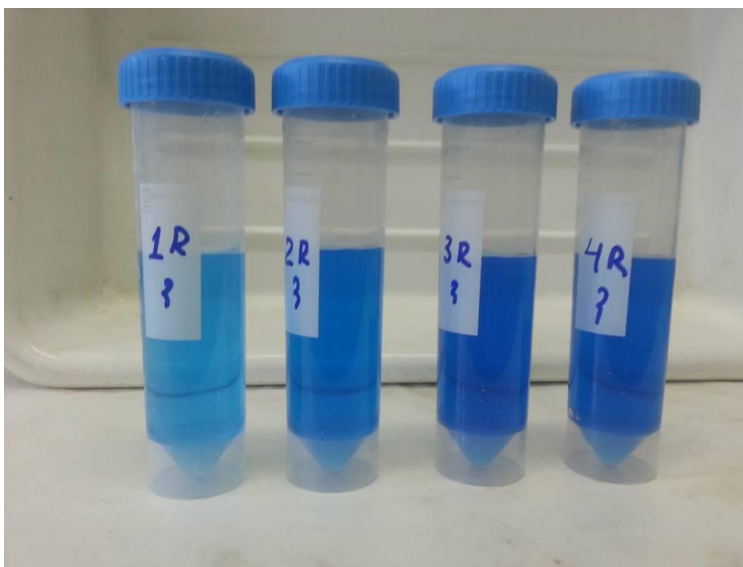
בחינה מפורטת של עקום הקאוליניט (ציור 22ב') מצביעה אמנם על קשר מונוטוני עולה בין
 הערך של MBV ותכולת החרסית, אך הוא איננו ליניארי. יש להביא בחשבון שהטווח של ערכי
 MBV הוא מאד נמוך, פחות מ-1, אשר באופן מעשי נחשב לטווח אפסי מנקודת מבט של השפעת
 החרסית, דהיינו בטווח זה ההשפעה של החרסית על התנהגות האגרנט בבטון הנה זניחה.

5.2 ערכי מתילן בלו של החומרים הדקים

הגוון של התמיסות של המתילן בלו לאחר הכנסת המדגמים של החומר הדק מהמחצבות מוצג בציור 23. ניתן להבחין בברור בהבדלים המשקפים שוני בהרכב ותכולת החרסיות שבהם.



(ב)



(א)

ציור 23 : שינוי גוון צבע אחרי דילול :

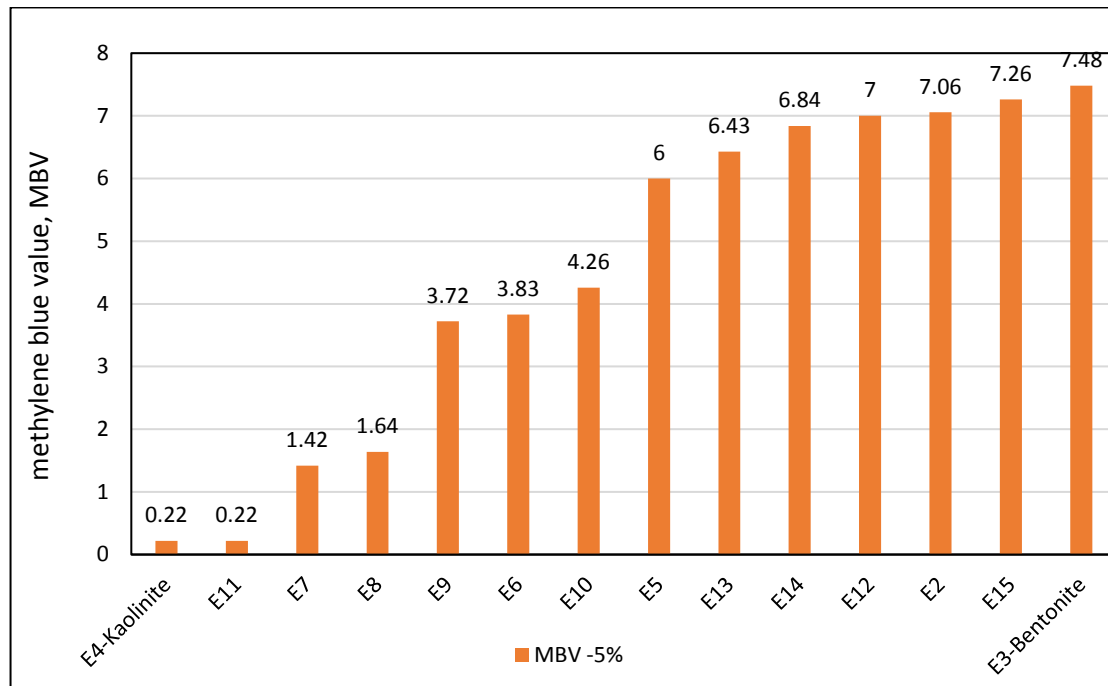
(א) משמאל לימין : תמיסת המתילן בלו עם סוג חרסית 1R, 2R, 3R ו- 4R.

(ב) שינוי גוון צבע אחרי דילול. משמאל לימין : תמיסת המתילן בלו עם סוג חרסית 1H, 2H,

3H, 4H, 5H, 6H ו- 7H.

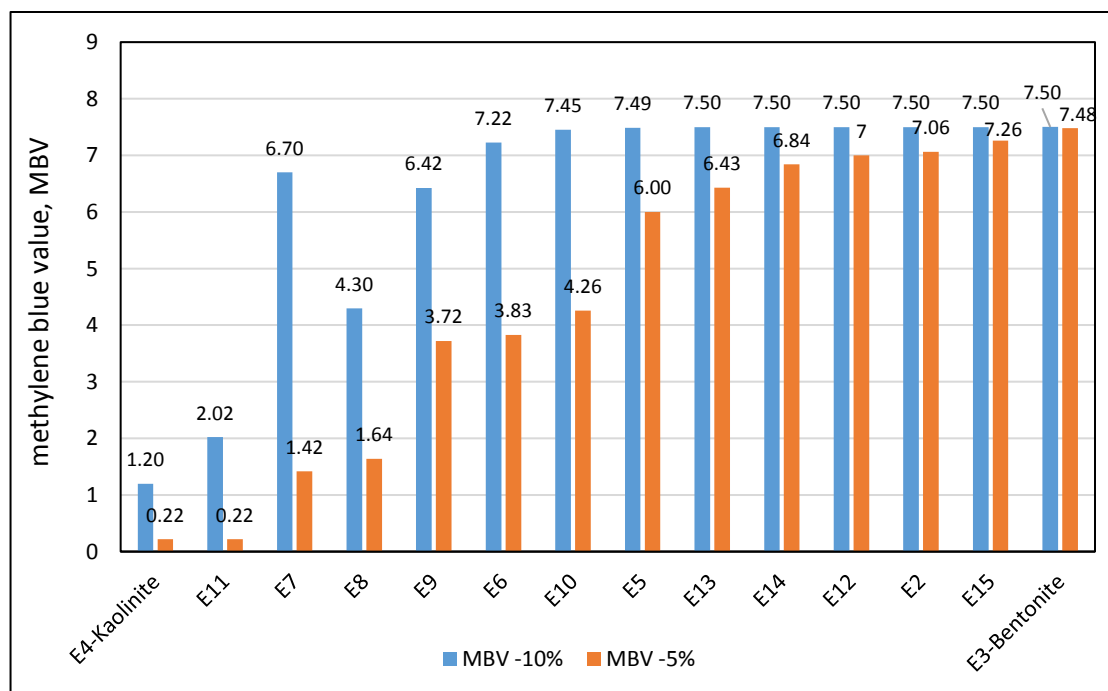
תוצאות בדיקת הבליעה במדגמים אלה באות לידי ביטוי בערכי מתילן בלו המוצגים בציור 24. כצפוי, הערך עבור המונטמורילוניט הנו גבוהה בשעה שהערך עבור קאוליניט נמוך. מאחר ותכולתם במדגם שנבדק הייתה זהה (5%) הרי ההבדל מבטא את כושר הספיחה הגבוה של המונטמורילוניט.

הערכים של המדגמים של המחצבות השונות, גם הם בתכולה דומה של 5%, היו כצפוי בטווח שבין ערכי הקאוליניט והמונטמורילוניט, ומכאן ניתן כבר לקבל הערכה ראשונית לגבי אופיים.



ציור 24: ערכי המתילן בלו עבור המדגמים השונים (מדגמים עם תכולה של 5% של החומר הדק החרסיתי, בדומה לתכולתו בחול ששמש להכנת תערובות המלט לבדיקות הריאולוגיות)

ערכי המתילן בלו בציור 24 הם עבור מדגמים המכילים 5% של החומר הדק חרסיתי (אבק/פילר) כאשר השאר הוא מלאן אבן גיר נקי. הכפלת כמות החומר הדק-חרסיתי אמורה להגדיל את ערכי המתילן בלו, כפי שאכן רואים בציור 25.



ציור 25: ערכי המתילן בלו עבור מדגמים עם 5 ו-10% של החומר הדק החרסיתי

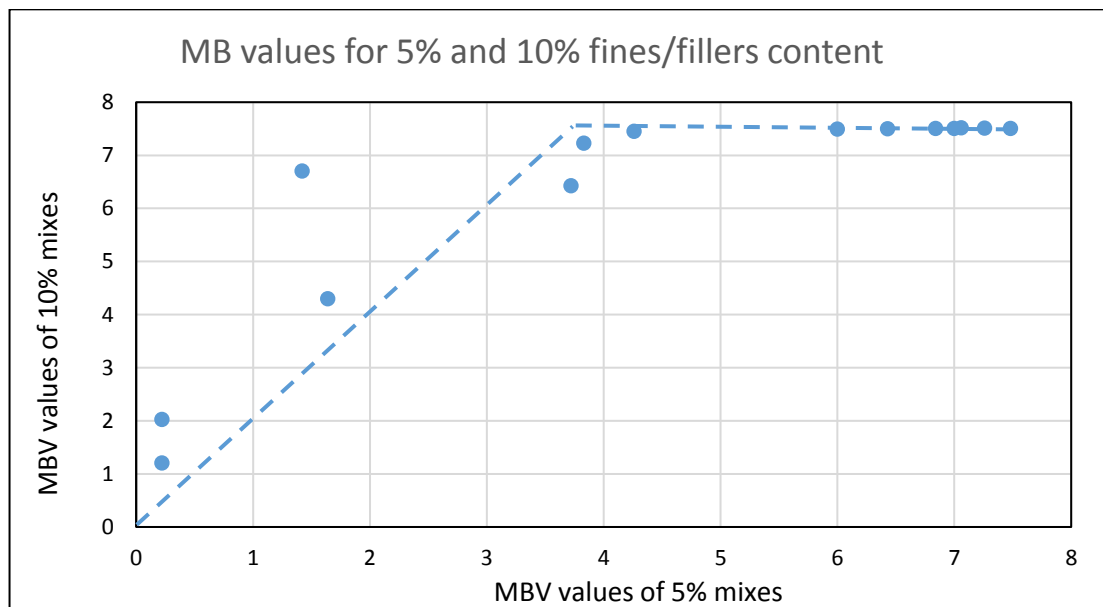
הבדיקה מבוססת על ספיחת מתילן בלו של מדגם בן 20 ג"מ מתוך תמיסה של 30 ג"מ מתילן בלו בריכוז של 0.50%.

ניתן לראות שבערכי MBV נמוכים יותר הגידול בים מדגמי 5 ו-10% הנו גדול, אך הוא הולך וקטן ככל שערכי MBV גבוהים יותר כאשר אין הוא עובר את הערך של 7.5 את ההסבר לכך ניתן לקבל על ידי ניתוח הבדיקה כדלהלן:

המדידה באמצעות הקולורימטר מאפשרת לקבוע את ריכוז התמיסה לאחר שחלק מהמתילן בלו שבה נספח אל תוך החרסית שבמדגם בן ה-20 ג"מ. מתוך כך נקבע ערך המתילן בלו, כמות המתילן בלו הנספחת יחסית למשקל המדגם.

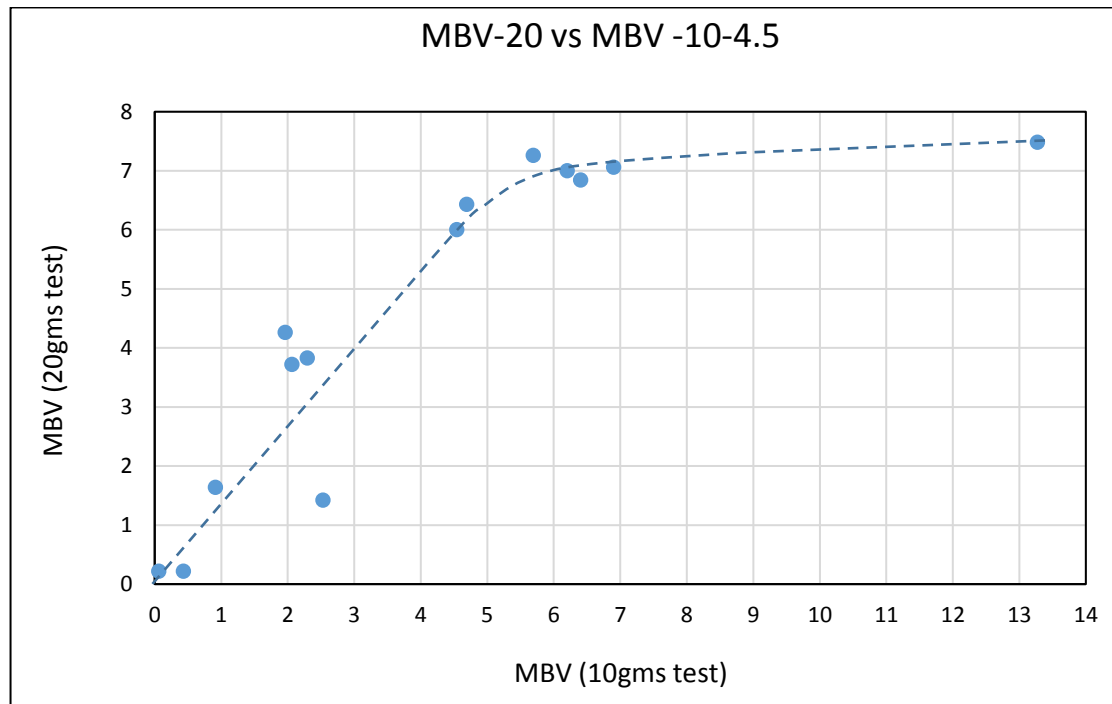
הערך המרבי של מתילן בלו מתקבל במדגם אשר כל ה-0.50% של המתילן בלו שבתמיסה נספח אל המדגם, דהיינו, 0.50% של 30 ג"מ (150 מ"ג) נספח כולו אל המדגם של החומר שמשקלו 20 ג"מ. לכן, הערך המרבי של מתילן בלו יהיה 150 מ"ג ל-20 ג"מ, דהיינו 7.5. במדגמים המכילים חרסית עם כושר ספיחה גדול יותר של מתילן בלו (כתוצאה מכמות גדולה יותר של חרסית או חרסית בעלת כושר ספיחה גדול יותר) הערך שיתקבל יישאר עדיין 7.5, משום שהעודף של כושר הספיחה לא יבוא לידי ביטוי בשינוי צבע התמיסה.

הניתוח הזה מוצא את ביטוי בתוצאות של בדיקות המתילן בלו עם חריסיות אשר "דוללו" בתוך מלאן של אבן גיר נקי בשיעור של 5% ו-10%, כפי שרואים בציר 26. רואים הכפלה בערך המתילן בלו כאשר מגדילים את תכולת החרסית בטווח של עד מתילן בלו של 3.75 בהרכבים עם 5%, דהיינו הכפלת תכולת החרסית מגדילה את ערך המתן בלו עד למקסימום של 7.5 ולאחר מכן הכפלת תכולת החרסית לא מלווה בגידול במתילן בלו.



ציר 26 : הקשר בין ערכי מתילן בלו של חומר המכיל 5% של מלאן חרסיתי ו-10% מלאן חרסיתי מגמות אלה מצביעות על הצורך בזהירות בביצוע הבדיקה כאשר ערכי המתילן בלו מגיעים לסביבות 7 בבדיקה התקנית עם 20 ג"מ חומר. המעבר לבדיקה של 10 ג"מ חומר כפי שמומלץ בתקן פותר בעיה זו. הקשרים בין הערכים המתקבלים בשני תהליכים אלה מתוארים בציר 27. ניתן לראות

שעד ערך של מתילן בלו של בערך 6 הם דומים. מכאן המסקנה שעדיף לעבור לתהליך של בדיקה עם מדגם של 10 ג"מ כאשר הערך של מתילן בלו המתקבל הוא 6 ולא 7 כפי שמומלץ בתקן.



ציור 27 : קשרי הגומלין שבין ערכי מתילן בלו המתקבלים בבדיקה עם 20 ג"מ ו- 10 ג"מ של מדגם נבדק

6 הרכב מינרלוגי של החומר הדק וקשר עם ערכי מתילן בלו

6.1 רקע

הדו"ח הנוכחי מתבסס על חקירה של מדגמים שהתקבלו מעדשות של מחצבות בארץ ("חומר דק"), ושני מדגמים "נקיים", שהתקבלו מספק מגרמניה, האחד קאוליניט והשני מונטמורילוניט.

הדיווח כולל הצגה וניתוח של ההרכב המינרלוגי כפי שנקבע בהרצה בדיפרקצית קרני X במכון הננו באוניברסיטה העברית ובבדיקה לקביעת ערכי המתילן בלו שבוצעה במכון הלאומי לחקר הבנייה.

מן הראוי לציין כאן שהבדיקה של תכולת החומר האורגני הראתה שלמעשה היא אפסית בטווח של מדמגים בעלי ערך מתילן בלו רחב, ומכאן שההרכב המינרלוגי מייצג היטב את הרכב החרסיות. התוצאות של הבדיקה של פחמן אורגני מוצגות להלן :

כינוי המדגם	ערך מתילן בלו	תכולת פחמן אורגני, דיכרומט TOC, %
E1	0	<0.1
E3	7.48 (13.27)	<0.1
E4	0.22	<0.1
E8	1.64	0.2
E10	4.26	0.2
E12	7.00	<0.1

6.2 חישובי ההרכב המינרלוגי מבדיקות XRD

עקומי XRD ותוצאות חישובי ההרכבים כפי שנקבעו בבדיקות המינרלוגיות באוניברסיטה העברית מוצגים בנספח.

החישובים של הריכוזים נעשו באוניברסיטה העברית בשתי צורות, האחת בשיטת ריטולד והשנייה כונתה לצורך המסמך כאן "ריכוז". בתוצאות שהועברו מהאוניברסיטה העברית היו חישוב "ריכוז" לכל ההרכבים וחישובי "ריטולד" רק לחלק מהם.

ריכוז התוצאות מוצג בטבלאות שלהלן עבור החישוב לפי ריכוז (טבלה 4) ולפי ריטולד (טבלה 5). לצורך השלמות כוללות הטבלאות גם תוצאות של ערכי מתילן בלו שנקבעו בטכניון.

טבלה 4 : תוצאות על פי חישוב של שיטת "ריכוז"

		2T	3T	1R	2R	3R	4R	1H	2H	3H	4H	5H	6H	7H	1T
		E3-Benton	E4-Kaolin	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E2
Quartz			2.2	13.8	5.5	4.9	2.6	8.3	12.3	1.1	12.7	23.6	29.1	18.2	17.9
Cristobalite															
Calcite			1.9	6.5	55.2	6.5	10.3	35.9	39.5	39.7		17	3.3	2.70	12.6
Dolomite		1.5		21.3	9.8	68.9	78.6	31.4	7.4	59.2	21.3	10.4	4.4	14.9	
Microcline		2.2						6.8	5.1					8.9	8.2
Albite		2										2.30			3.1
Amphibole													3.40		
Muscovite			1.3												
Clays	Montmorillonite	94.3	0	45	18.7	14.4	3.7	15	27.2	0	49.5	40	43.7	44	54.9
	Kaolin	0	94.6	13.5	10.7	5.3	4.8	3.1	8.6	0	16.5	6.7	7.2	20.4	3.4
Methylene Blue Values		7.48	0.22	6.00	3.83	1.42	1.64	3.72	4.26	0.22	7.00	6.43	6.84	7.26	7.06

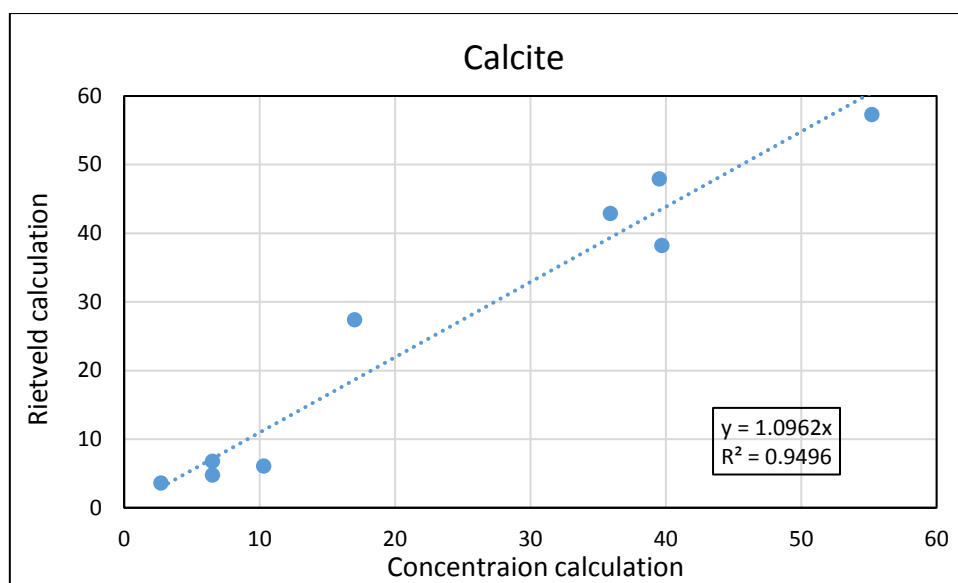
טבלה 5 : תוצאות על פי חישוב של שיטת "ריטולד"

		2T	3T	1R	2R	3R	4R	1H	2H	3H	4H	5H	6H	7H	1T
		E3-Benton	E4-Kaolin	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E2
Quartz				7.49	2.44	3.05	2.69	3.52	7.78	0.67	6.4	17.7		8.07	
Cristobalite															
Calcite				6.76	57.3	4.76	6.1	42.9	47.9	38.2		27.4		3.59	
Dolomite					7.41	71.4	82.03	29.6	5.05	61.1	21.6	17.5		7.33	
Microcline								6.68	2.38						
Albite												4.30			
Amphibole															
Muscovite															
Clays	Montmorillonite			38.35	14.4	7.79	3.36	12.9	26.9	0	41.1	22.5		54.12	
	Kaolin			26.32	18.4	13.0	5.81	4.43	10.1	0	31.1	10.6		27.3	
Methylene Blue Values		7.48	0.22	6.00	3.83	1.42	1.64	3.72	4.26	0.22	7.00	6.43	6.84	7.26	7.06

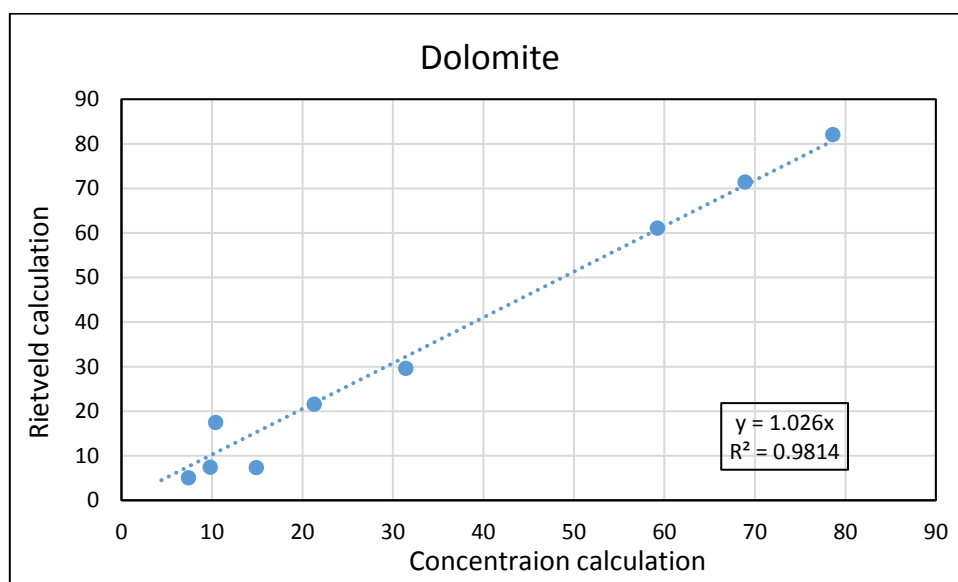
הערה : במדגם E15 הפענוח של התוצאות הצביע על נוכחות של כמות גדולה של מוסקוביט, כ- 35%, ללא נוכחות של מונטמורילוניט. נערך חישוב מחודש והוא זה המוצג בטבלאות, על פי הניתוח של אמיר סנדלר : "בדוגמה 15 יש אכן איליט אבל מעט, אני מעריך שאחוזים ספורים. לעומת זאת יש מונטמורילוניט שלא זוהה. התוכנה חישה את הפיק המשותף לאיליט למונטמורילוניט ולקאוליניט כאילו היה מוסקוביט בלבד. את רוב המוסקוביט יש לקחת כמונטמורילוניט. גם הערכת הקאוליניט כאן גבוהה מדי. בדרך כלל תכולת קאוליניט נמוכה בחרסיות ישראל מזו של מונטמורילוניט. קשה לי להעריך בכמה אבל אחרי שהסתכלתי בגרף שלכם אפשר להעריך שצריך להוסיף למונטמורילוניט כשליש מהקאוליניט". הערכה זו תואמת את העובדה שלמדגם זה ערך מתילן בלו גבוה מאד, 7.26, המצביע על נוכחות של כמות משמעותית של חרסית תופחת בהרכב התואם למונטמורילוניט.

לצורך ניתוח המשמעויות של ההבדלים בין שתי צורות החישוב נותחו הקשרים שבין הערכים המתקבלים עבור הפזות העיקריות בשתי צורות החישוב.

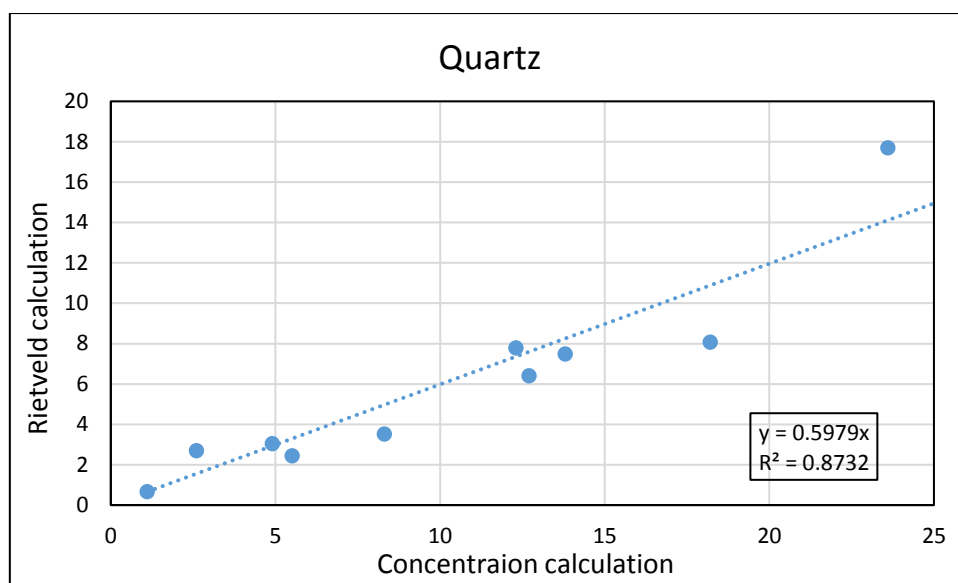
בציורים 28 – 30 מוצגים הקשרים עבור המינרלים שאינם חרסיות (קלציט, דולומיט, קוורץ) ובציורים 31 ו- 32 עבור המינרלים החרסיתיים, קאוליניט ומונטמורילוניט.



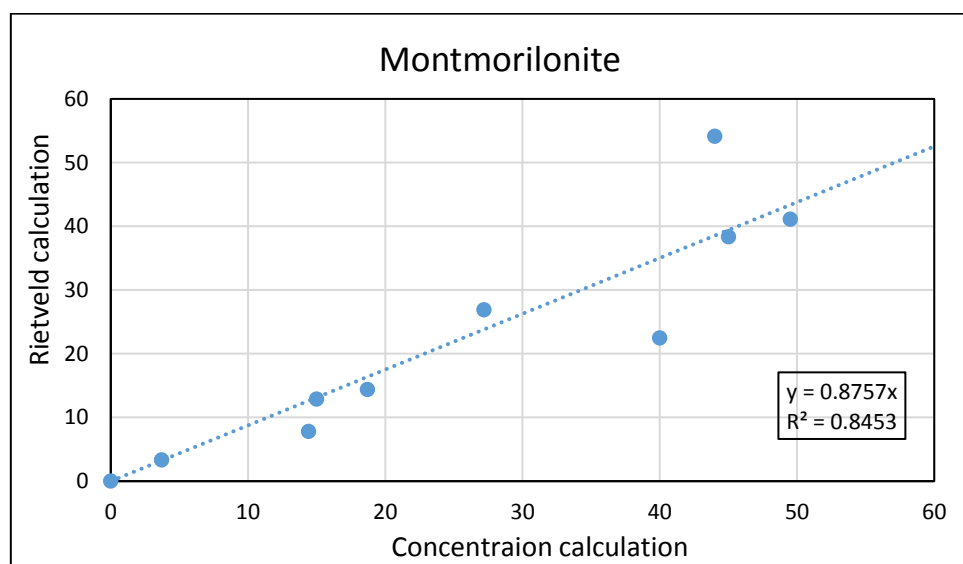
ציור 28 : הקשר בין ההרכב המחושב לפי שיטת הריכוז ושיטת ריטולד עבור הקלציט



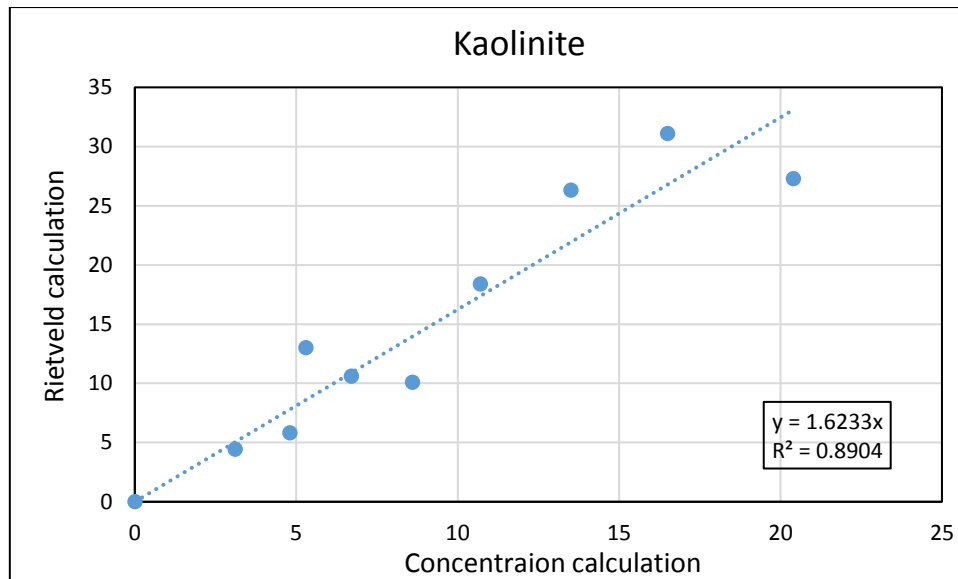
ציור 29 : הקשר בין ההרכב המחושב לפי שיטת הריכוז ושיטת ריטולד עבור הדולומיט



ציור 30 : הקשר בין ההרכב המחושב לפי שיטת הריכוז ושיטת ריטולד עבור הקוורץ



ציור 31 : הקשר בין ההרכב המחושב לפי שיטת הריכוז ושיטת ריטולד עבור המונטמורילוניט



ציור 32 : הקשר בין ההרכב המחושב לפי שיטת הריכוז ושיטת ריטולד עבור הקאוליניט

ניתן לראות שבכל המקרים מתקבלים קשרים לינאריים ברמת מובהקות גבוהה, עם מקדם R^2 שהוא מעל 0.95 עבור הקלציט והדולומיט ובין 0.85 ל- 0.90 עבור החרסיות והקוורץ.

במקרה של הקלציט והדולומיט ההבדלים בין שתי השיטות הנם פחות מ- 10%.

במקרה של הקוורץ הערכים שנקבעו בשיטת ריטולד קטנים בכ- 40% באופן עקבי.

עבור המונטמורילוניט, הערכים בשיטת ריטולד קטנים בכ- 13% באופן עקבי, בעוד שעבור הקאוליניט הם גבוהים בכ- 60% באופן עקבי.

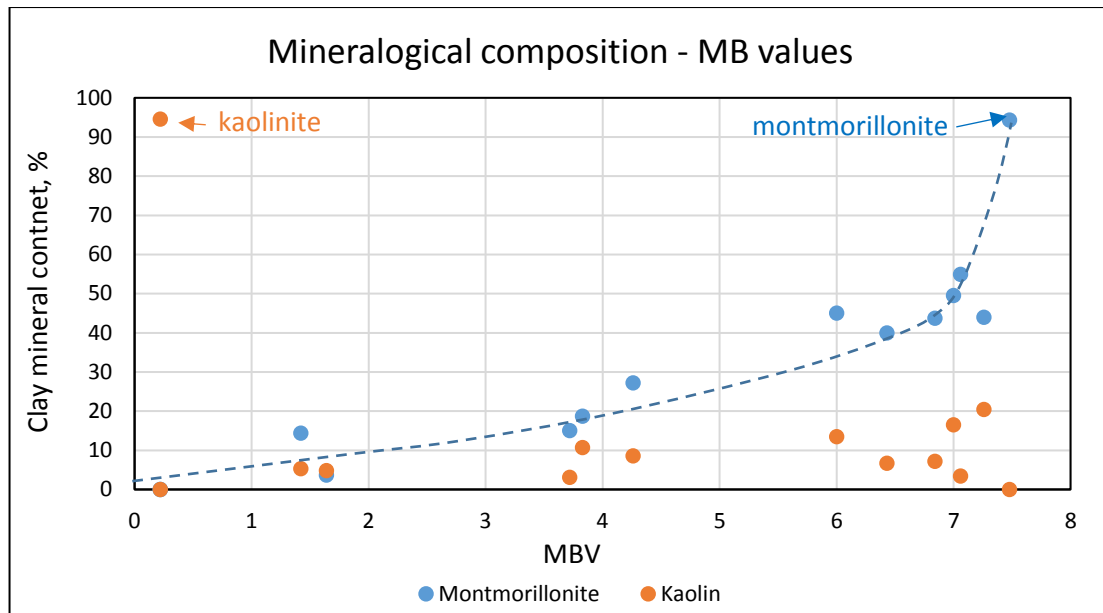
מן הראוי לציין שהתכולות של הקאוליניט כפי שנקבעו בשתי הצורות עבור המדגמים שהתקבלו מהעדשות במחצבות היו קטנים יחסית, פחות מ- 30% בחישוב לפי שיטת ריטולד, ופחות מכ- 20% בחישוב לפי שיטת הריכוז.

בחישוב לפי שיטת הריכוז נמצא שתכולות של המונטמורילוניט והקוליניט במדגמים ה"נקיים" היו מעל כ- 94% (מדגמים T2 ו-T3). לאור זאת, ולאור הקשרים הלינאריים המובהקים שהתקבלו בין שתי שיטות החישוב, הניתוח של ההבדלים בין המדגמים השונים בסעיפים הבא מתבסס על החישוב לפי שיטת הריכוז.

6.3 קשרים בין המינרלוגיה וערכי מתילן בלו

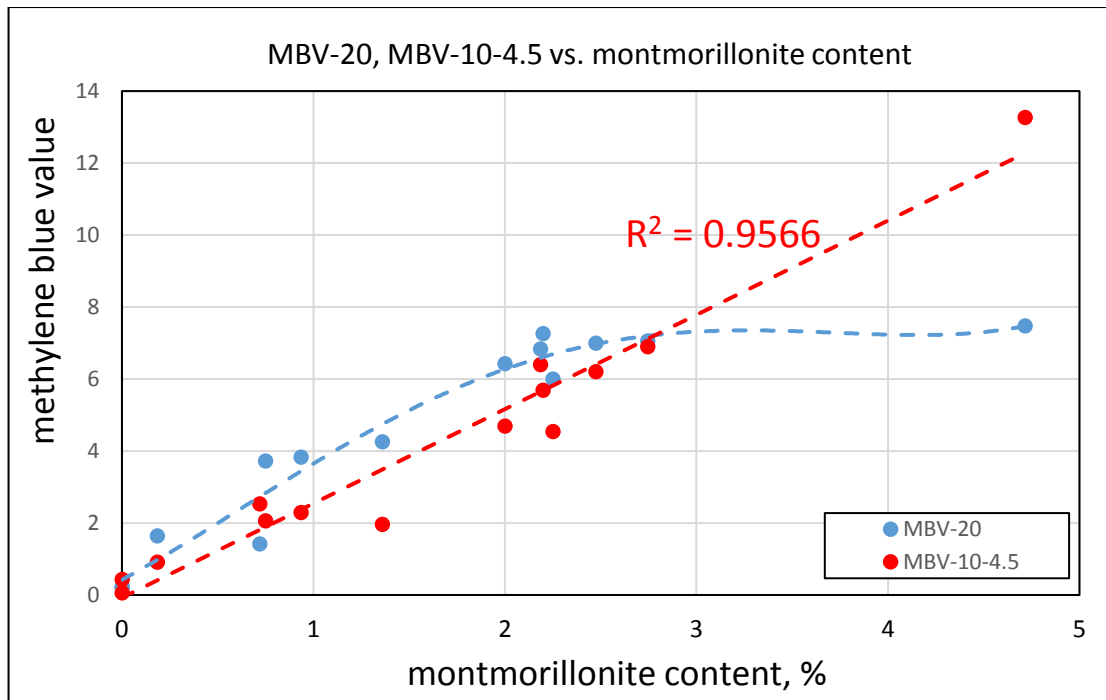
מתוך טבלה 3 ניתן ללמוד שהערכים שהתקבלו בבדיקה המינרלוגית לגבי המדגמים ה"נקיים" מצביעים שאכן הם בדרגת ניקיון גבוהה, 94.6% קאולין במדגם הקאולין (E4), ו- 94.3% מונטמורילוניט במדגם הבנטוניט (E3).

ניתוח הקשר שבין הרכב החרסיות המחושבות לפי שיטת הריכוז ובין ערכי המתילן בלו מוצג בציור 33.



ציור 33 : הקשר בין ההרכב המינרלוגי של החרסיות ובין ערכי מתילן בלו
התוצאות שבציור מצביעות על מספר מגמות :

- ערך המתילן בלו של מדגם הקאוליניט ה"נקי" הנו נמוך מאד, דבר המשקף את העדר כושר ספיחה של מים במינרל זה
- ערך המתילן בלו של מדגם המונטמורילוניט הנו המקסימלי הניתן לקבלה בבדיקה זו, 7.48 (באופן תאורטי המקסימום הוא 7.5), דבר המשקף את היותו מורכב כמעט כולו ממונטמורילוניט (94.3%) שהוא מינרל הסופח מים
- יש קשר בין ערך המתילן בלו ותכולת המונטמורילוניט, המצביע על גידול בערך המתילן בלו עם הגידול בתכולת המונטמורילוניט.
- הגידול התלול בקשר החל מערך מתילן בלו של כ- 6, משקף את העדר הרגישות של בדיקת המתילן בלו בתחום זה (בין 6 ל- 7.5) משום שעל פי הבדיקה התקנית התמיסה של מתילן בלו היא בריכוז של 0.50%. בבדיקה אשר בה המדגמים עם ערכי מתילן בלו גבוהים נבדקים בתהליך של 10 ג"מ ניתן לצפות לקשר בעל אופי דומה לכל אורך הטווח, כפי שרואים בציור 34.



ציור 34 : הקשר בין תכולת המונטמורילוניט וערכי מתילן בלו הנקבעים בתהליך עם מדגם במשקל 20 ג"מ ו- 10 ג"מ

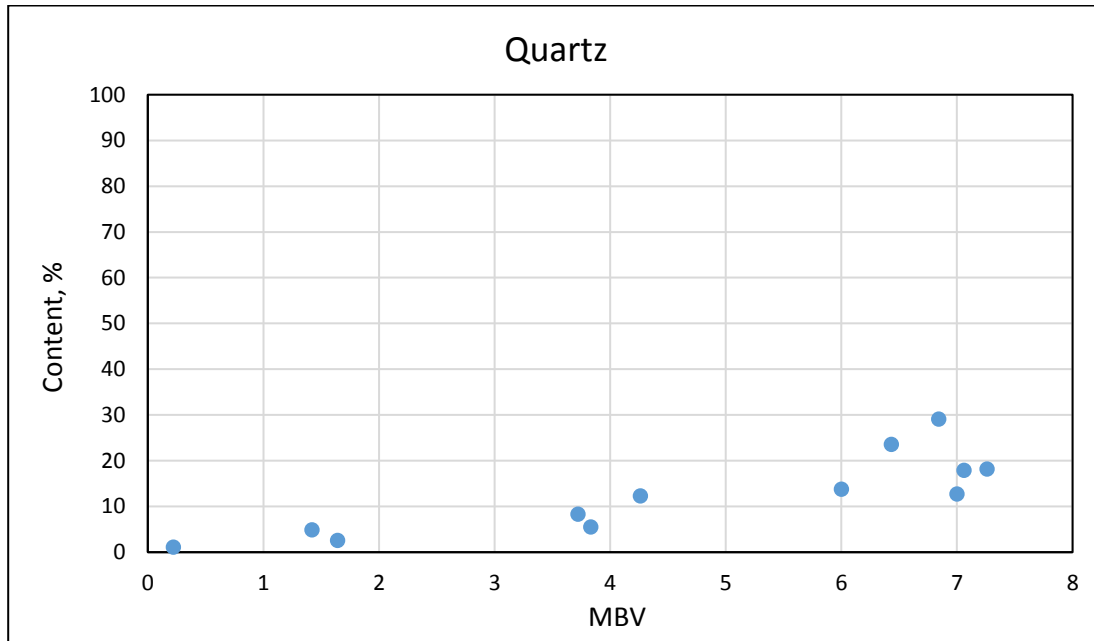
6.4 מאפיינים של ההרכבים המינרלוגיים

הבדיקות ב XRD מצביעות על כך שמדגמי הבקרה ה"נקיים" שהתקבלו מגרמניה, קאוליניט ובנטוניט הם אכן נקיים ומכילים מעל 94% של קאוליניט ומונטמורילוניט, בהתאמה.

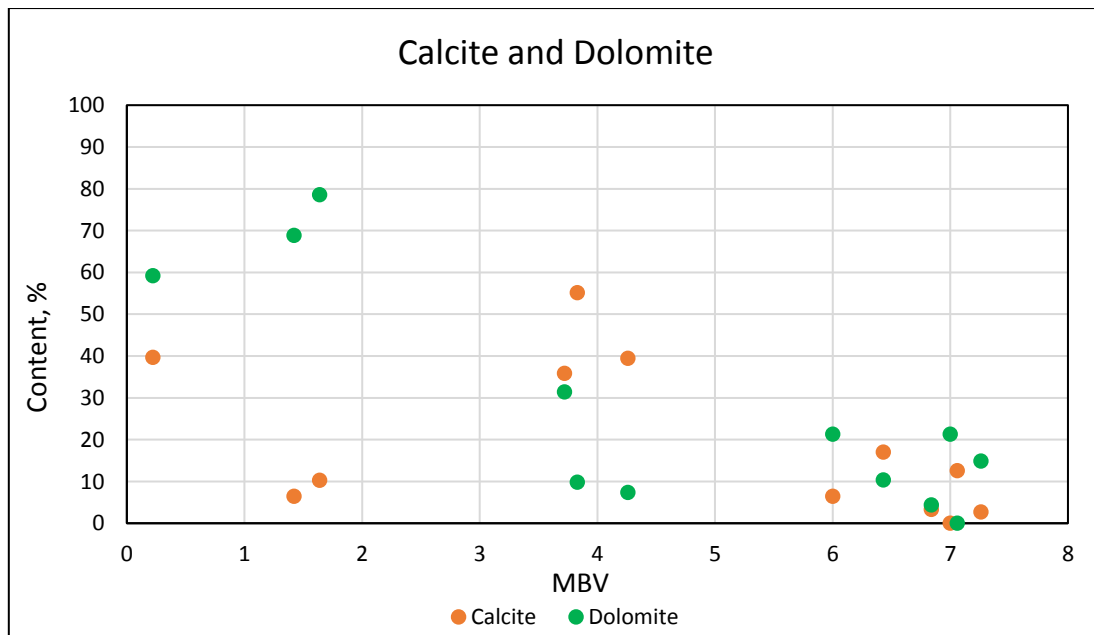
ההרכב של החרסיות במדגמים שהתקבלו מהעדרשות שבמחצבות השונות מצביע על מספר מגמות (ציורים 33, 35, 36) :

- בכל המדגמים תכולת הקאוליניט היא קטנה יחסית, פחות מכ- 20%, ללא תלות בתכולת המונטמורילוניט
- במדגמים אשר להם ערך גבוה של מתילן בלו יש נוכחות של תכולה גבוהה של מונטמורילוניט, בשיעור של עד כ- 55% במדגם עם ערך מתילן בלו של כ- 7. בקבוצת מדגמים זו (ערך מתילן בלו מעל כ- 6) יש על כן תכולה גבוהה של חרסית, כ- 40 עד 55% מונטמורילוניט וכ- 20% קאוליניט, דהיינו מעל כ- 60% חרסית, כאשר השאר הוא בעיקר קלציט, דולומיט וקוורץ (ציורים 35 ו- 36)
- בקבוצת המדגמים בעלי ערך מתילן בלו מתחת לכ- 4.0, תכולת המונטמורילוניט והקאוליניט הם פחות מ- 20% כל אחד, ומכאן שמרבית החומר בתחום זה מכיל את המינרלים ה"לא חרסיתיים", בעיקר קלציט ודולומיט, כאשר בתחום זה תכולת הקוורץ נמוכה מאד (ציורים 35 ו- 36)
- במדגמים שאופיינו בעבודה זו נראה שבאלה שהם בעלי ערך של מתילן בלו בסביבות 4 תכולת הקלציט גבוהה יותר מאשר הדולומיט, ובאלה שלהם ערכי מתילן בלו הקטנים מכ- 2 תכולת הדולומיט גבוהה יותר מהקלציט. זוהי מגמה מעניינת שיש לבחון האם היא משמעותית, כי אם כן יכולה להיות לה השלכה על שימוש במוספים לשיפור העבירות

- המגמה הבולטת של תכולות חרסית גבוהות במדגמים עם ערכי מתילן בלו גבוהים מכ- 6, לעומת מדגמים עם ערכי מתילן בלו נמוכים מכ- 4, מחייבת לימוד נוסף של ההבדלים בגודל החלקיקים. ניתן לצפות לפי מגמה זו שבערכי מתילן בלו גבוהים, לא רק שהספיחה של מים היא בעייתית (נוכחות של מונטמורילוניט) מבחינת השפעה על הבטון אלא גם גודל חלקיקים שצפוי להיות קטן יותר מאחר ורובם חרסיתיים. מכאן החשיבות לאפיון מדוקדק של פילוג גדול החלקיקים של המדגמים השונים



ציור 35 : תכולת הקוורץ במדגמים השונים (כפונקציה של ערכי מתילן בלו)



ציור 36 : תכולת הקלציט והדולומיט במדגמים השונים (כפונקציה של ערכי המתילן בלו)

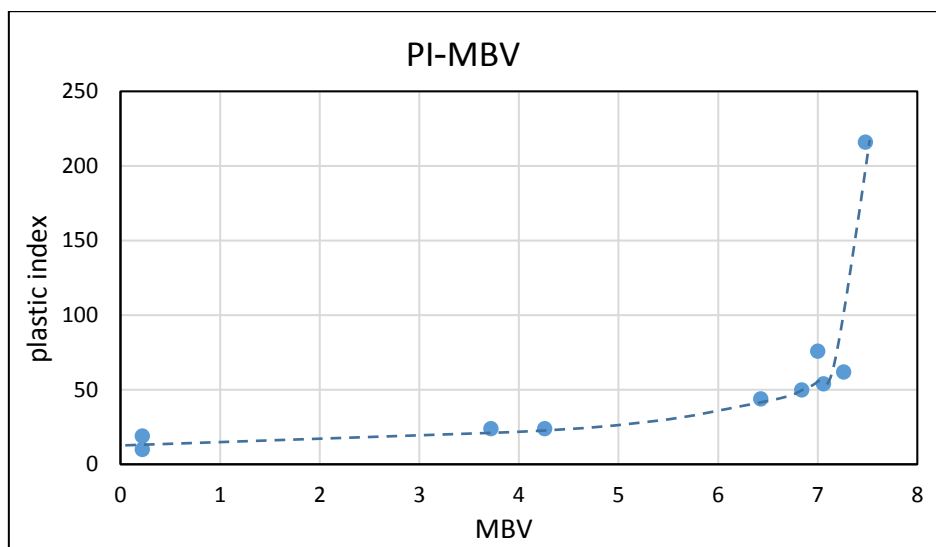
7. גבול הנזילות והפלסטיות

בדיקה זו בוצעה לגבי רוב המדגמים אך לא כולם, בגלל כמות לא מספקת של חומר שהיה ברשותנו. התוצאות מוצגות בטבלה 6.

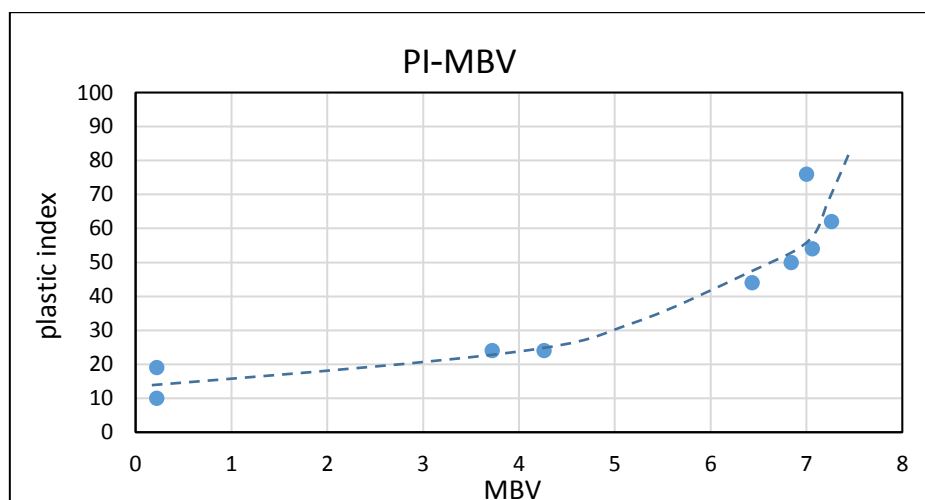
טבלה 6 : ערכי גבול הנזילות, גבול הפלסטיות ואינדקס הפלסטיות

E15	E14	E13	E12	E11	E10	E9	E4-Kalinite	E3-Bentonite	E2	
95	74	65	102	24	50	39	50	255	75	גבול הנזילות L.L. לפי (%) A.S.T.M D-423
33	24	21	26	14	16	15	31	39	21	גבול הפלסטיות P.L. לפי (%) A.S.T.M D-424
62	50	44	76	10	24	24	19	216	54	אינדקס הפלסטיות P.I. (%)

נמצאו קשרי גומלין בין ערכים אלה והאפיון של החומר הדק בשיטת המתילן בלו, ציורים 37-39.

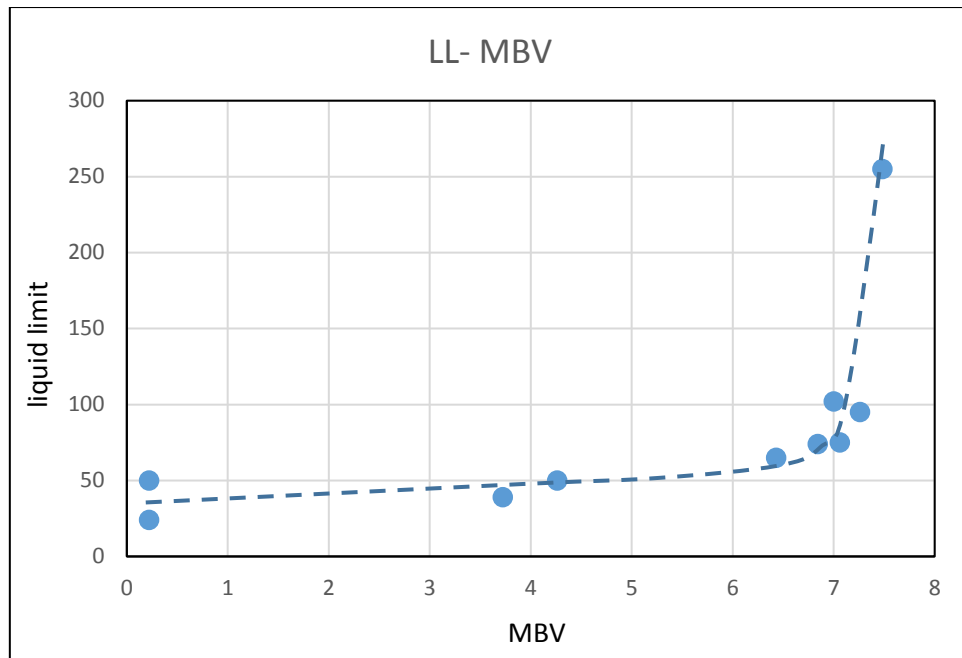


(ב)

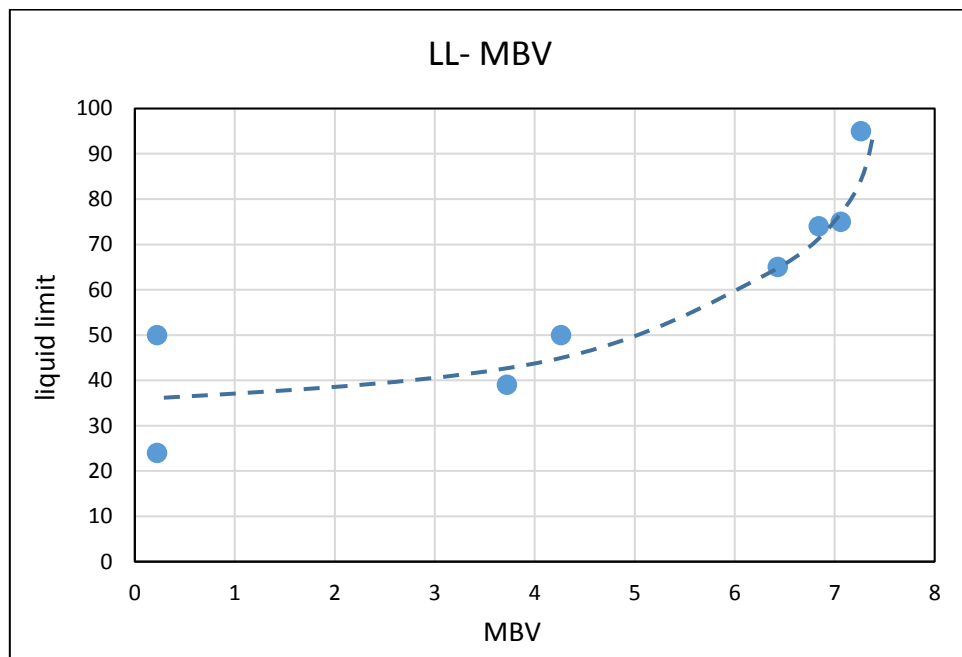


(א)

ציור 37 : קשרי גומלין בין אינדקס הפלסטיות וערך מתילן בלו



(ב)



(א)

ציור 38 : קשרי גומלין בין גבול הנזילות וערך מתילן בלו

משני ציורים אלה ניתן לראות בברור את התלות של ערכי גבול הנזילות והפלסטיות עם הגידול בערכי המתילן בלו, בתחילה בקצב נמוך (ציורים 37 ב' ו- 38 ב') ולאחר מכן בקצב הולך וגדל (ציורים 37 ו- 38).

8. פילוג גודל החלקיקים

בדיקות לאפיון גודל החלקיקים בוצעו במספר מעבדות המשתמשות בציוד דומה של דיפרקצית קרני לייזר, אך בדרך הכנה שונה של המדגמים. בשתיים מהן הפיזור הוא ביבש (מעבדה תעשייתית 1, מעבדה תעשייתית 2) ובאחת הפיזור ברטוב (המכון הגיאולוגי). תהליך הפיזור ברטוב כלל את השלבים הבאים:

- ניפוי מתחת ל 2 מ"מ
- פיזור בתמיסת הקסאמטאפוספט,
- ערבוב במשך 5 דקות
- פיזור אולטראסוני במשך 30 שניות

לצורך אפיון היעילות של השיטות השונות נערכה ראשית כל השוואה ביקורתית של התוצאות המתקבלות עבור מדגמים "נקיים" אשר הרכבם המינרלוגי ידוע: מלאן אבן גיר (Avgil 205) מכפר גלעדי שהרכבו 99.2% קלציום קרבונט, ומדגמים "נקיים" של חרסית קאוליניט ומונטמורילוניט עם תכולה של כ- 95% של המינרלים הללו.

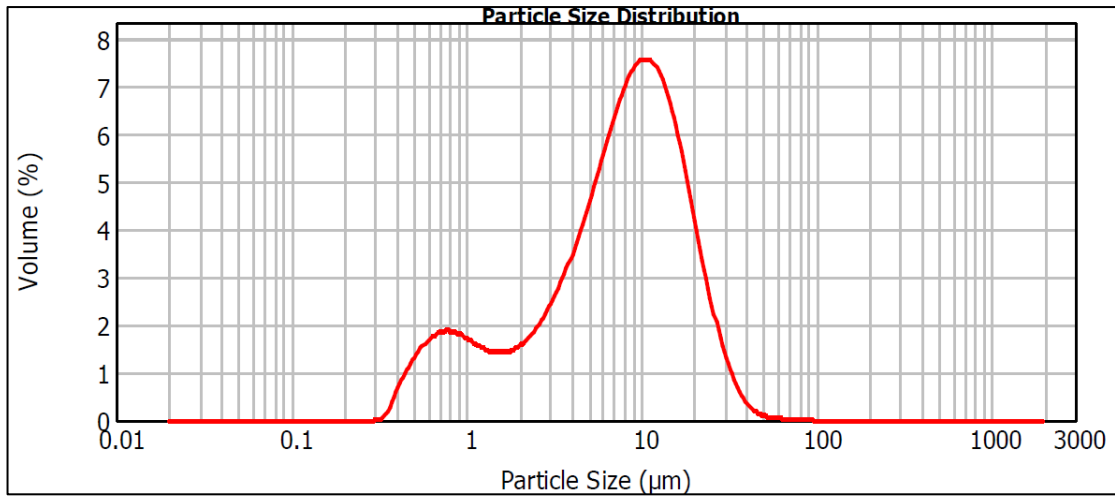
פילוג החלקיקים של כל אחד מאלה מוצג להלן ונערך ניתוח של המשמעויות של התוצאות המתקבלות מהמעבדות השונות.

מלאן אבן גיר

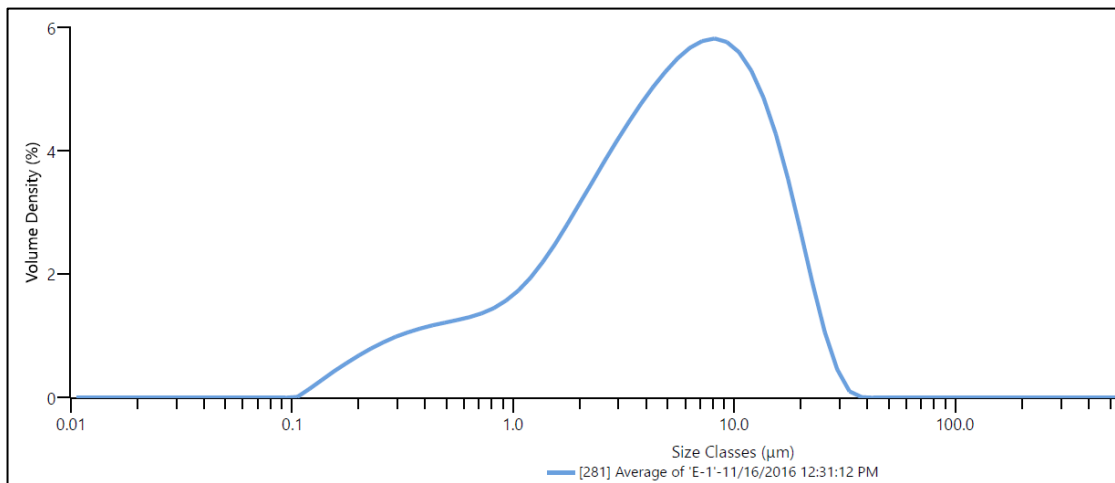
התוצאות של המאפיינים של עקומי הפילוג עבור מלאן אבן גיר מוצגות בטבלה 7 ובציור 39.

טבלה 7: תוצאות המאפיינים של עקומי הפילוג של מלאן אבן גיר שהתקבלו במעבדות השונות

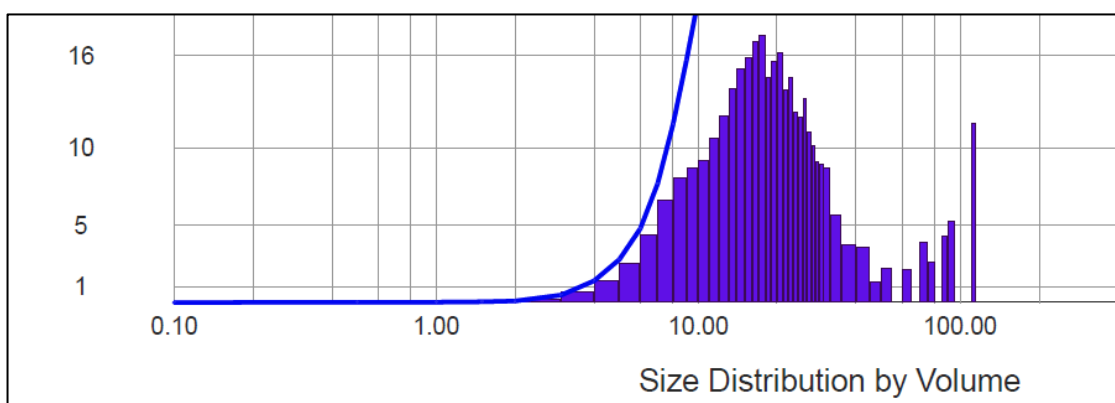
בדיקה	D(10)	D(50)	D(90)
מכון גיאולוגי	1.03	7.89	19.4
מעבדה תעשייתית 1	0.68	5.04	15.3
מעבדה תעשייתית 2	7.61	17.09	40.9
דף טכני של היצרן	2	4.5	25



(ג) מכון גיאולוגי



(ב) מעבדה תעשייתית 1



(א) מעבדה תעשייתית 2

ציור 39 : פילוג החלקיקים של אבן גיר כפי שהתקבל בבדיקות במעבדות השונות

באופן כללי ניתן לראות התאמה טובה בין התוצאות של המכון הגיאולוגי, מעבדה תעשייתית 1 ונתוני היצרן, כאשר גודל החלקיק החציוני הוא בטווח של 4.5 עד 7.9 מיקרון, עם פילוג בי-מודלי

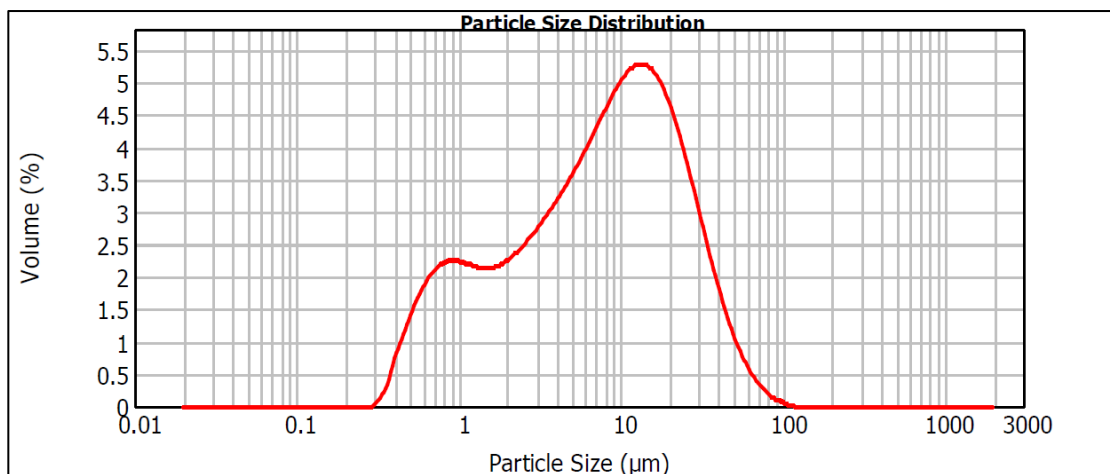
אשר שיא אחד הוא בסביבות 10 מיקרון והשני בסביבות 0.7 מיקרון. התוצאות במעבדה תעשייתית 2 מצביעות על גדלים גבוהים יותר של חציון של 17.1 מיקרון, פי שניים או יותר מהתוצאות האחרות, כאשר בפילוג לא נראית התנהגות בי-מודלית. ניתן לפרש הפרש זה בכך שהפיזור של החלקיקים במעבדה תעשייתית 2 פחות יעיל. ההתאמה הטובה בים שלושת המעבדות האחרות מצביעה על כך שעבור מלאן זה המדידות נותנות אפיון טוב של הגדלים הממוצעים והפיזורים.

חרסית קאוליניט

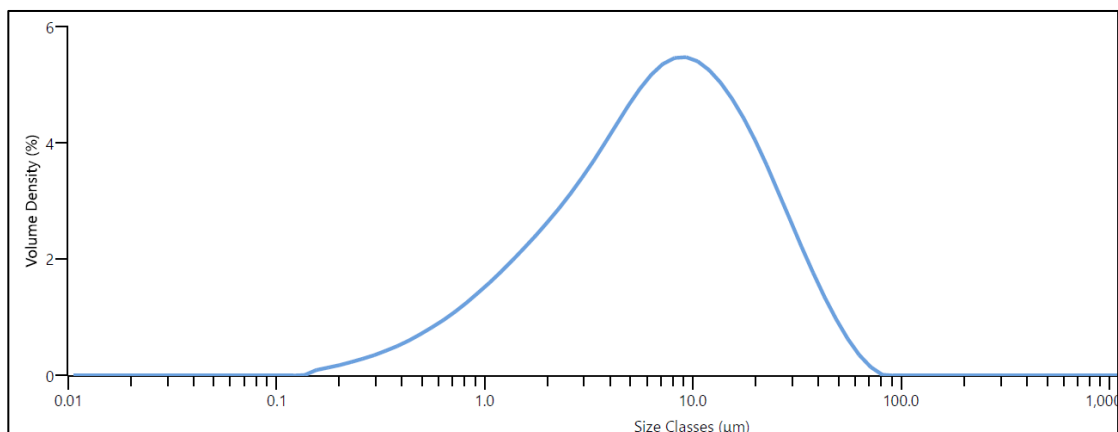
התוצאות של המאפיינים של עקומי הפילוג עבור קאוליניט מוצגות בטבלה 8 ובציר 40.

טבלה 8 : תוצאות המאפיינים של עקומי הפילוג של חרסית קאוליניט שהתקבלו במעבדות השונות

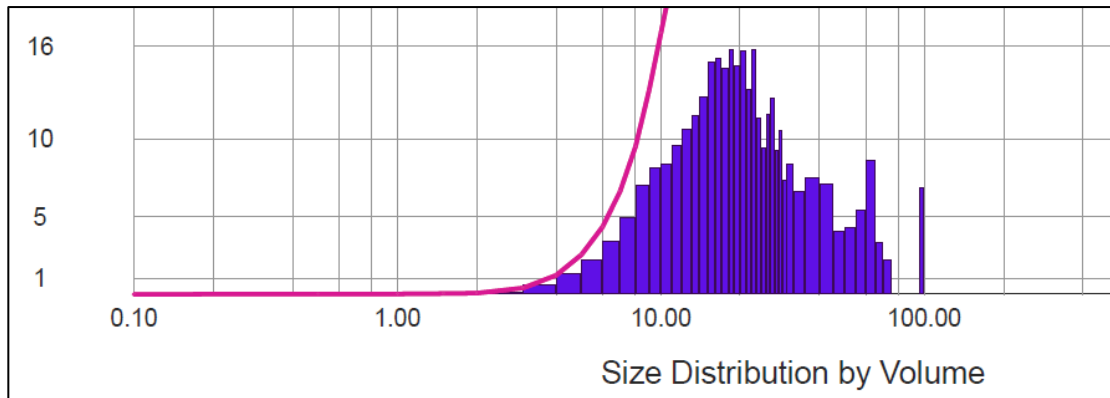
בדיקה	D(10)	D(50)	D(90)
מכון גיאולוגי	0.9	7.77	27.9
מעבדה תעשייתית 1	1.24	7.07	25.3
מעבדה תעשייתית 2	8.14	18.79	49.96



(ג) מכון גיאולוגי



(ב) מעבדה תעשייתית 1



(א) מעבדה תעשייתית 2

ציור 40 : פילוג החלקיקים של קאוליניט כפי שהתקבל בבדיקות במעבדות השונות גם כאן נראית התאמה סבירה בין התוצאות של המכון הגיאולוגי ומעבדה תעשייתית 1, עם ערכים של חציון בטווח 7 – 8 מיקרון, כאשר החציון המתקבל בבדיקה של המעבדה התעשייתית 2 הרבה יותר גבוה, 18.8 מיקרון. פילוג החלקיקים בבדיקה במכון הגיאולוגי מצביע על פילוג בי-מודלי עם פיק בכ- 10 מיקרון וכ- 0.7 מיקרון, בשעה שבפילוג המתקבל מעבדה תעשייתית 1 ישנה כתף לכיוון החלקיקים הקטנים אך לא פיק ברור כמו בבדיקה במכון הגיאולוגי. בבדיקה מעבדה תעשייתית 2 לא נראית אפילו כתף.

הצפי בפילוג גודל החלקיקים היה לקבל ערכים הרבה יותר נמוכים, כי המאפיין את גודל חלקיקי החרסית הם גרגרים הקטנים מכ- 3 מיקרון. בהקשר זה יש להתייחס להערה שהתקבלה מהמכון הגיאולוגי אשר מסבירה הבדלים אלה :

"פרקצית החרסית חושבה פעמיים, פעם אחת לפי החלוקה "המקובלת" של גבול חרסית-סילט ב 2 מיקרון ופעם אחת עם הגבול הנ"ל ב 8 מיקרון. הסיבה היא שהלייזר נוטה להעריך ביתר מינרלים לא כדוריים sphere בגלל צורתם המוארכת. כך מינרל חרסיתי שבמידה "רגילה" יתנהג בגרגר בגודל 2 מיקרון, יימדד בלייזר בגודל 5 או 8 מיקרון. מכאן שמדידה בלייזר נוטה להעריך בחסר את הפרקציה החרסיתית או מחשבים לפי הגבול המסורתי של 2 מיקרון. יש אנשים שמעבירים את הגבול ב 5 מיקרון."

ייתכן גם, ולכך אין התייחסות בהערה מהמכון הגיאולוגי שהפילוג של החלקיקים איננו מלא וחלקם עוברים אגלומרציה ובבדיקה נראים לכן כחלקיקים גדולים יותר.

חרסית מונטמורילוניט

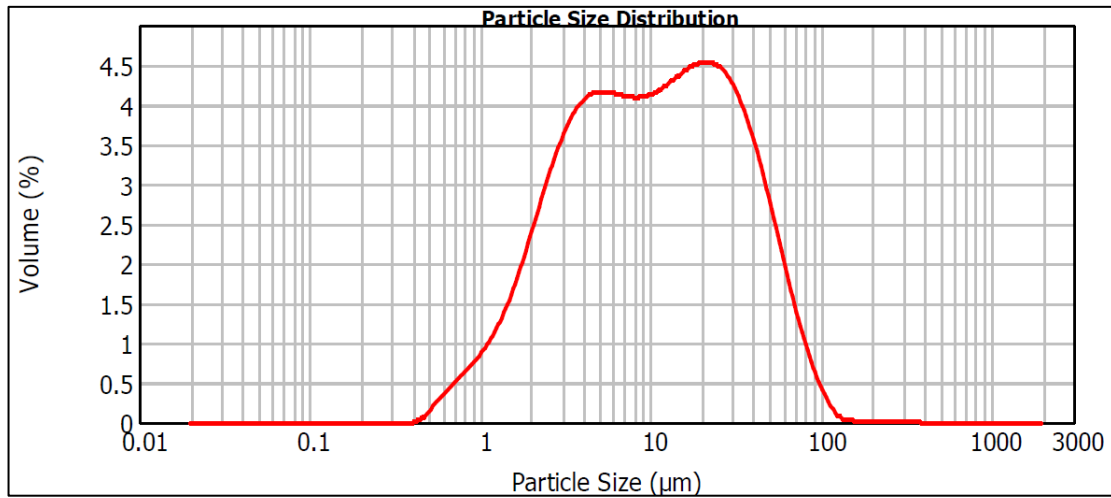
התוצאות של המאפיינים של עקומי הפילוג עבור מונטמורילוניט מוצגות בטבלה 9 ובציור 41.

טבלה 9 : תוצאות המאפיינים של עקומי הפילוג של חרסית מונטמורילוניט שהתקבלו במעבדות השונות

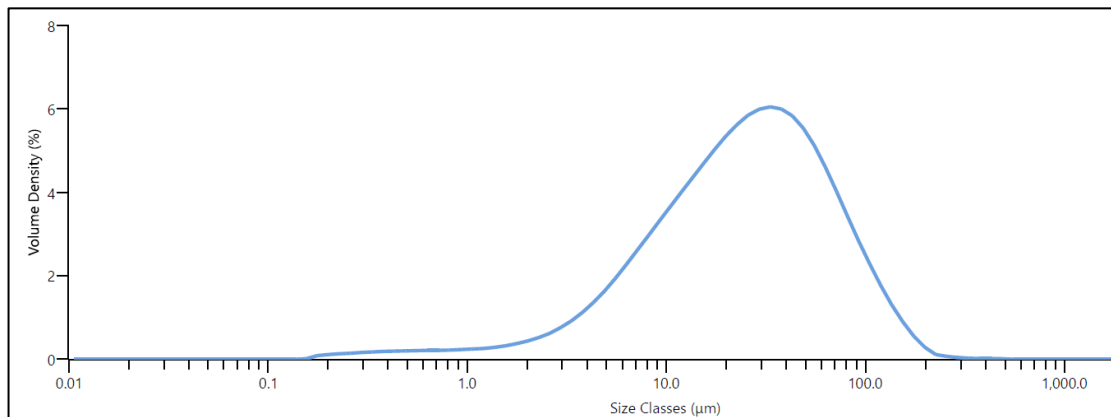
בדיקה	D(10)	D(50)	D(90)
מכון גיאולוגי	2.09	10.3	43.4
מעבדה תעשייתית 1	5.45	25.6	80.8
מעבדה תעשייתית 2	13.63	57.56	184

עקומי הפילוג :

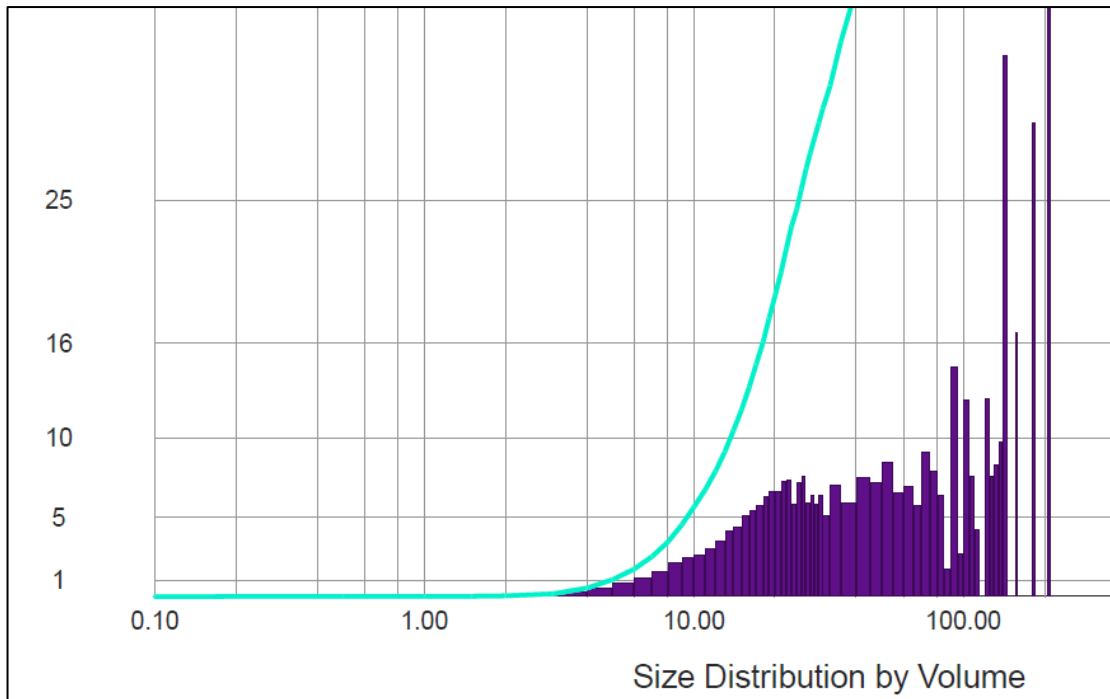
המכון הגיאולוגי



(ג) מכון גיאולוגי



(ב) מעבדה תעשייתית 1



(א) מעבדה תעשייתית 2

ציור 41: פילוג החלקיקים של מונטמורילוניט כפי שהתקבל בבדיקות במעבדות השונות כאן כבר רואים הבדלים גדולים בין כל המעבדות, כאשר הערכים המתקבלים במכון הגיאולוגי הם הנמוכים ביותר, נמוכים במידה משמעותית גם מהבדיקה של מעבדה תעשייתית 1, שהיא עצמה נמוכה מזו של מעבדה תעשייתית 2. גם אופי העקומים שונה, בי-מודלי במדידה במכון הגיאולוגי לעומת חד-מודלי במעבדה תעשייתית 1 והתנהגות מוזרה עם כתף לכיוון חלקיקים גדולים של מעל 20 מיקרון בבדיקה במעבדה תעשייתית 2.

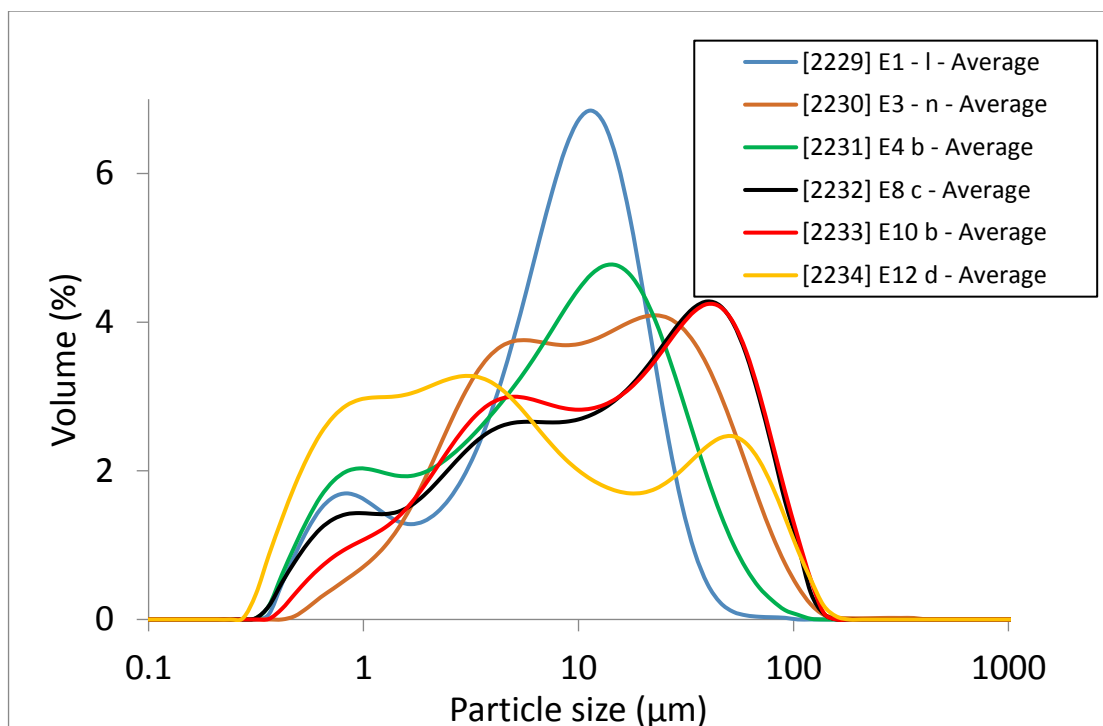
יש לציין שהערך המתקבלים בבדיקה במכון בגיאולוגי, חציון של 10.3 מיקרון, גדול בהרבה מהצפוי ממדגם שכמעט כולו חרסית.

ניתן לפרש את התוצאות כאן באגלומרציה משמעותית, שהיא יותר גדולה מזו המתקבלת בחרסית קאוליניט, ועל כן ההשפעה שלה באה לידי ביטוי מיוחד בבדיקות אשר בהן הפיזור של החלקיקים הוא באוויר ולא בנוזל, כפי שנעשה בבדיקה במכון הגיאולוגי.

אפיון פילוג החלקיקים ותכולת החרסית בכלל המדגמים

הפרמטרים המאפיינים את כל המדגמים שנבדקו מוצגים בטבלה 10 והפילוג שלהם מוצג בציור 42. טבלה 10: פרמטרים מאפיינים של פילוג החלקיקים המתקבל בבדיקה של המכון הגיאולוגי והשוואה עם תכולת חרסית שנקבעה בבדיקה כמותי ב- XRD

	type of sample	d (0.1)	d (0.5)	d (0.9)	Clay <2.00µm	Clay <8.00µm	clay content (mineralogy)	MBV
E1	calcium carbonate filler	1.03	7.89	19.41	16.5	50.6	0.0	0.00
E3	montmorillonite	2.09	10.30	43.58	9.3	43.2	94.3	7.48
E4	kaolin	0.91	7.77	27.92	21.2	50.9	94.0	0.22
E8	finer of sand (< 75 microns)	1.17	12.83	56.41	16.0	40.6	8.5	1.64
E10	finer of sand (< 75 microns)	1.68	12.99	57.71	12.4	40.0	35.8	4.26
E12	finer of sand (< 75 microns)	0.66	3.98	50.72	33.9	63.4	66.0	7.00



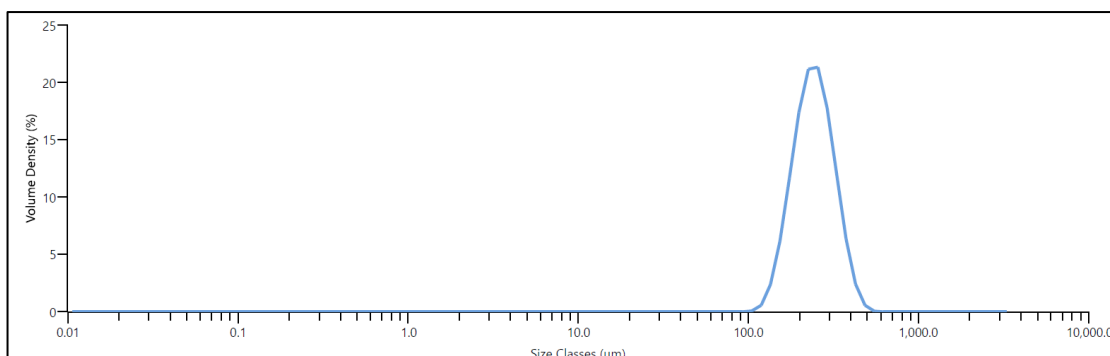
ציור 42: פילוג גודל החלקיקים המתקבל בבדיקה במכון הגיאולוגי

מהציור ניתן לראות שבכל המקרים הפילוג הוא תלת מודלי או נוטה להיות כך, עם שלושה מקבצי חלקיקים: קטן במקצת מ-1 מיקרון, בין כ-5 עד 10 מיקרון, וכ-50 מיקרון.

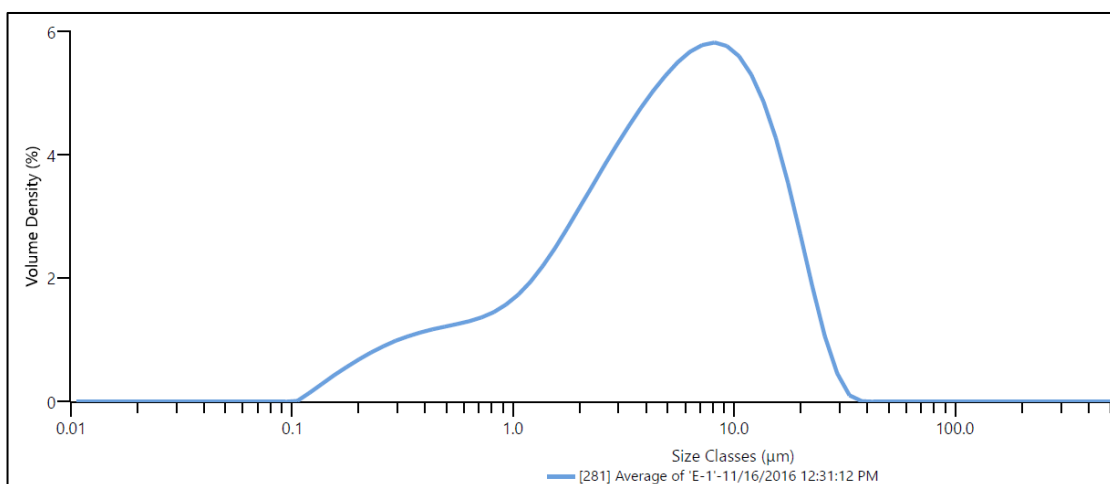
תכולת החרסית הנקבעת מתוך פילוג החלקיקים (קטנים מ-2 או 8 מיקרון) קטנה בדרך כלל מהתכולה שנקבעה בבדיקה המינרלוגית ב-XRD. הדבר בולט במיוחד בחומרים ה"נקיים", קאוליניט ומונטמורילוניט (E3 ו-E4 בטבלה 10). מכאן ניתן להסיק שיש אגלומרציה גם בהכנת מדגמים אלה, וזה אולי ההסבר לפילוג התלת מודלי, כאשר הערכים הגבוהים יותר של קוטרים הם תוצאה של אגלומרציה של חלקיקי חרסית. ההתאמה הטובה בניתוח של פילוג חלקיקי המלאן מצביעה על כך שבמקרה זה ההשפעה של אגלומרציה, אם קיימת, היא קטנה.

פילוג גודל חלקיקי החול ומלאן אבן הגיר

החומרים ששמשו כבסיס להכנת "החול הסינטטי" היו חול קוורצי טבעי באיכות גבוהה ומלאן אבן גיר. פילוג גודל החלקיקים שלהם כפי שנקבע בדיפרקציה בקרני X במעבדה תעשייתית מס' 1 מוצג בציור 43. ובטבלה 11.



(ב) חול קוורצי



(א) מלאן אבן גיר

ציור 43 : פילוג חלקיקי החול והמלאן שהיו הבסיס להכנת "חול סינטטי", כפי שנקבעו במעבדה תעשייתית מס' 1

טבלה 11 : פרמטרים של פילוג החלקיקים בחול הקוורצי ובמלאן אבן גיר כפי שנקבעו בבדיקה במעבדה תעשייתית מס' 1

מיקרון, d(90)	מיקרון, d(50)	מיקרון, d(10)	
349	241	170	חול קוורצי
15.3	5.04	0.68	מלאן אבן גיר
25.3	7.07	1.24	קאוליניט

ניתן לראות שגודל חלקיקי המלאן קטן בכמעט שני סדרי גודל מזה של החול הקוורצי. לצורך השוואה מוצגים בטבלה 11 הנתונים לגבי חרסית קאוליניט וניתן להבחין שחלקיקי המלאן הם מסדר גודל דומה בממדים שלהם לחלקיקי החרסית.

מסקנות

התוצאות והניתוח כאן מצביעים על כך שהבדיקה במכון הגיאולוגי אשר בה הכנת המדגמים ממבוססת על טיפול ברטוב נותנת את התוצאות האמינות ביותר, גם במדגמים המכילים חרסית, אם כי כאשר החרסית היא מונטמורילוניט נראה שהבדיקה נותנת ערכים גבוהים, כנראה בגלל אגלומרציה שהיא יותר גדולה בחרסית מונטמורילוניט מאשר חרסית קאוליניט. הניתוח של ההרכב

המינרלוגי בהתבסס על השוואה בין אפיון תכולת חרסית מתוך הפילוג (קטנים מ – 2 או 8 מיקרון) ובבדיקה כמותית ב- XRD, מצביעה על כך שגם בנוכחות של קאולין מתקבלת אגלומרציה.

במדגמים שאינם מכילים חרסית, גם אם הם דקים, דוגמת המלאן של כפר גלעדי, הערכים המתקבלים בבדיקה במעבדה תעשייתית 1 דומים לאלה המתקבלים בבדיקה במכון הגיאולוגי. מכאן ניתן להסיק שבדיקה זו משקפת כראוי את פילוג גודל החלקיקים בחומר דק שאיננו חרסיתית.

בהקשר זה ראוי לציין שפילוג החלקיקים של מלאן האבן גיר שבו נעשה שימוש מאופיין בחלקיקים קטנים מאוד, עם חציון של 5 מיקרון, קרוב מאוד לגודל חלקיקי החרסית.

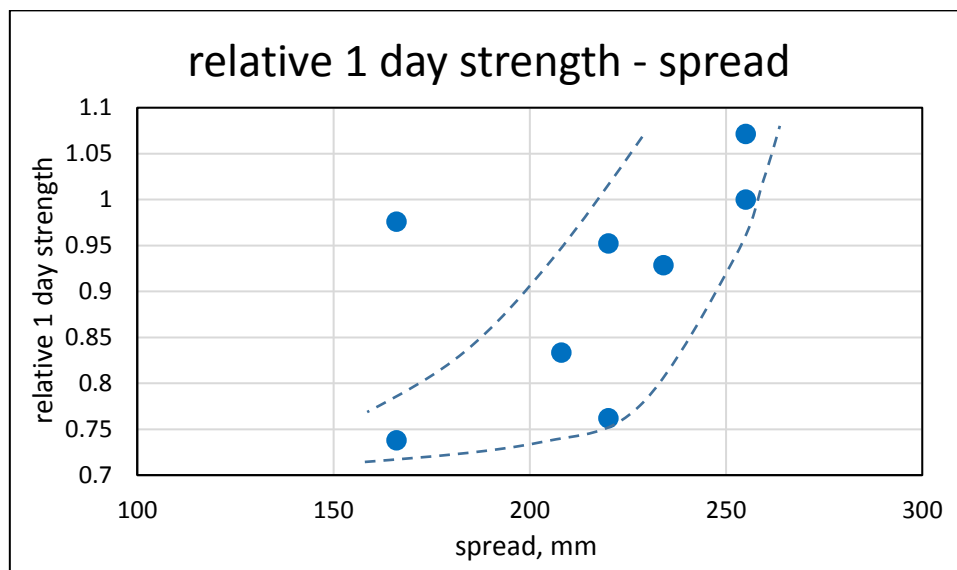
9. חוזקי לחיצה

תוצאות חוזקי לחיצה של ההרכבים השונים מוצגים בטבלה 12 עבור מנת מים של 0.92.

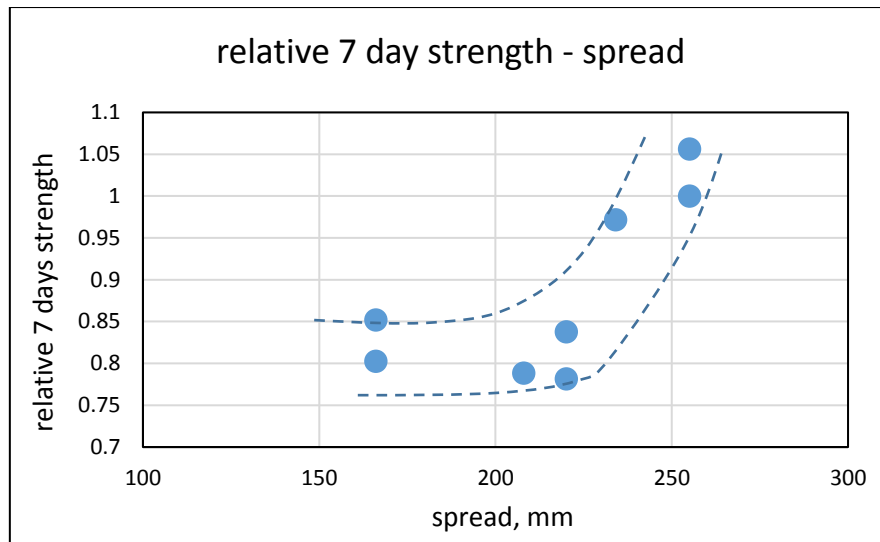
טבלה 12 : חוזקים של תערובות במנת מים של 0.92

מס' יציקה תערובת		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	17	18
תוספת סוג		0.92, ללא מוסף, -2T מונטמורי לוניט	0.92, ללא מוסף, -3T קאוליני ט	0.92, ללא מוסף, 4R	0.92, ללא מוסף, 2H	0.92, ללא מוסף, 4H	0.92, ללא מוסף, ללא תוספת	0.92, ללא מוסף, 1R	0.92, ללא מוסף, 2R	0.92, ללא מוסף, 3R	0.92, ללא מוסף, 1H	0.92, ללא מוסף, 3H	0.92, ללא מוסף, 5H	0.92, ללא מוסף, 6H	0.92, ללא מוסף, 7H	0.92, ללא מוסף, גירי 1T	0.92, ללא מוסף, ללא מוסף, 1T
בדיקה מועד	1 ימים	4.1	4.0	4.5	3.90	3.50	4.20	3.20	3.10	4.80	4.40	4.60	3.40	3.40	3.30	4.90	4.20
	7 ימים	11.4	11.1	15	13.8	11.2	14.2	11.9	12.1	14.1	13.7	15.1	13.2	11.8	10.9	17.8	12.6
	28 באוויר יבש ימים	17.8	21.2	27.8	23.4	20.3	25.9	21.5	18.5	25.7	22.4	27.2	22.2	20.2	18.7	28.2	21
	28 במים ימים	15.1	15.5	22.1	20.1	16.1	24.5	18.6	16.9	21.3	18.8	21.6	19.4	16.2	15.5	26.6	18

ההבדלים בין החוזקים של ההרכבים השונים בגיל נתון היו בטווח של עד כ- 30%. ניתוח הבדלים אלה במגמה הסבר העלה שהקשר היחידי שנמצא שיש בו היגיון מסוים הוא עם העבדות כפי שמבוטאת בשירוע בשולחן הזרימה, ציורים 44 ו- 45. אמנם הפיזור בציורים אלה הוא גדול יחסית אך ניתן להבחין במגמה כללית של הקטנה בחוזק עם ירידה בעבדות (שירוע), אשר ניתנת להסבר בהקטנה ביעילות הציפוף.

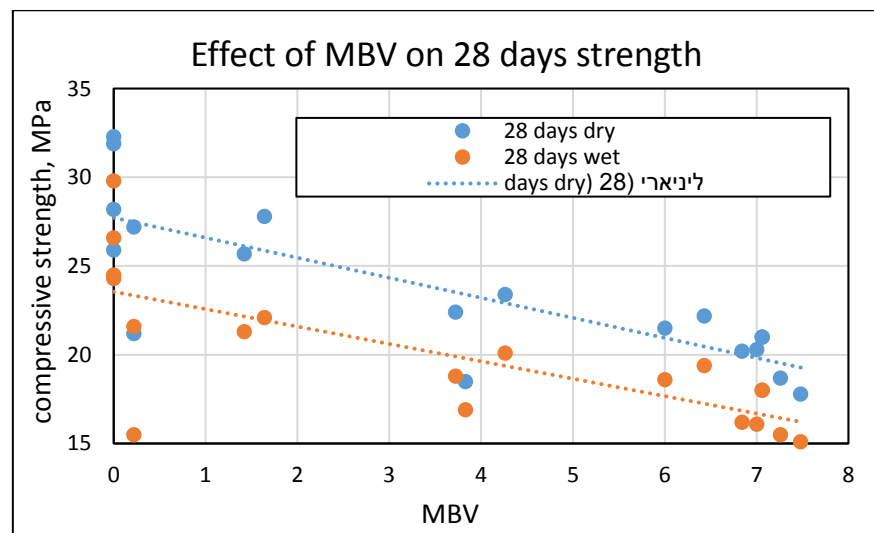
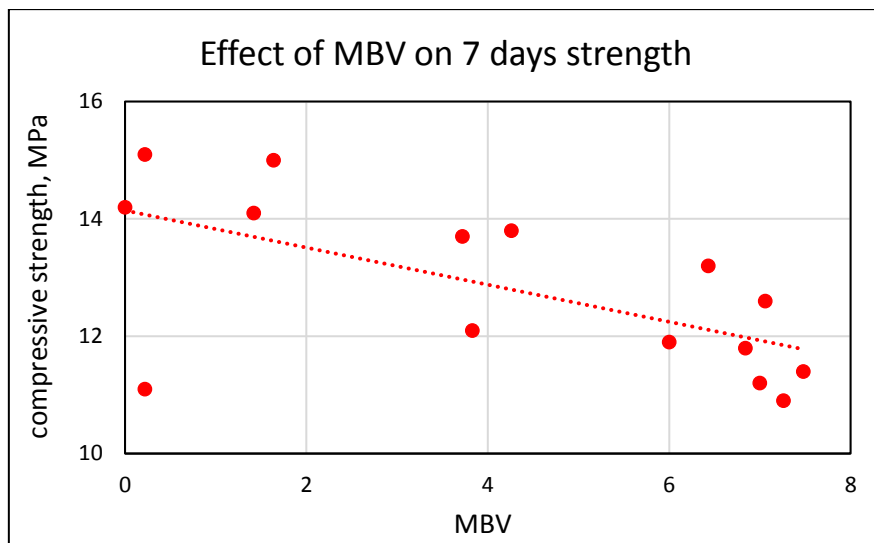
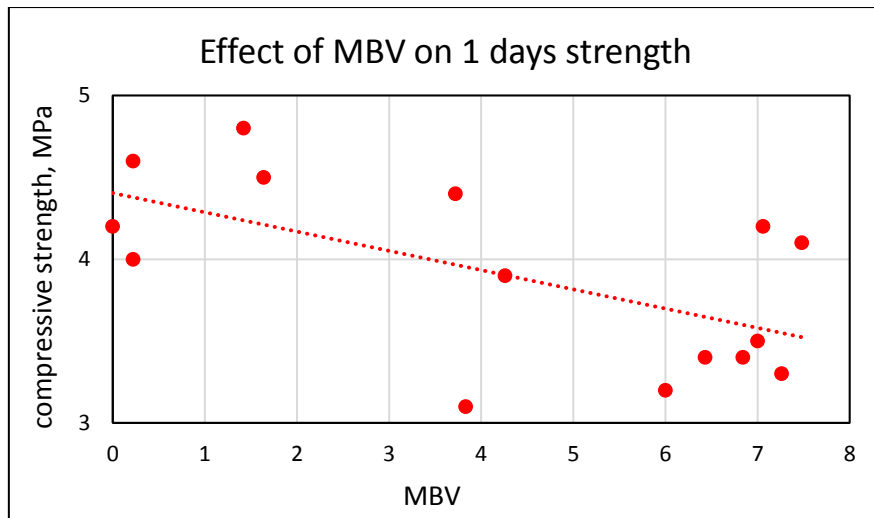


ציור 44 : חוזק יחסי בגיל יום בתלות בשירוע



ציור 45 : חוזק יחסי בגיל 7 ימים בתלות בשירוע

מאחר ונמצא שככל שהערך של מתילן בלו גבוה יותר העבידות נמוכה יותר נמצאה כצפוי מגמה של הקטנה בחוזק עם הגידול בערך מתילן בלו, כפי שרואים בציור 46



ציור 46: הקשר בין ערכי החוזק בגילים של 1, 7 ו-28 ימים בתלות בערכי המתילן בלו.

10. דיון: קשרי גומלין בין תכונות והרכב של החומר הדק והמערכות הצמנטיות שבהן הוא משולב

קשר בין מתילן בלו והרכב מינרלוגי

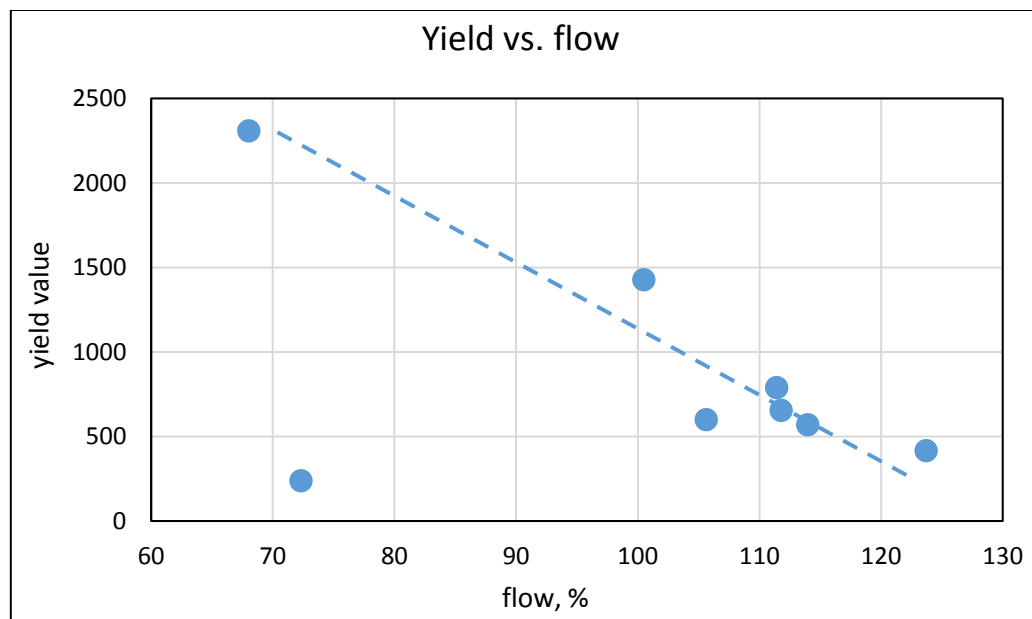
לא נמצא קשר ברור בין ערכי המתילן בלו ובין תכולת הקאוליניט, אך לעומת זאת מסתמן קשר עם תכולת המונטמורילוניט, של גידול בערכי המתילן בלו עם הגידול בתכולת המונטמורילוניט, ציור 34.

קשרי גומלין בין המאפיינים של החומר הדק וגבולות הנזילות

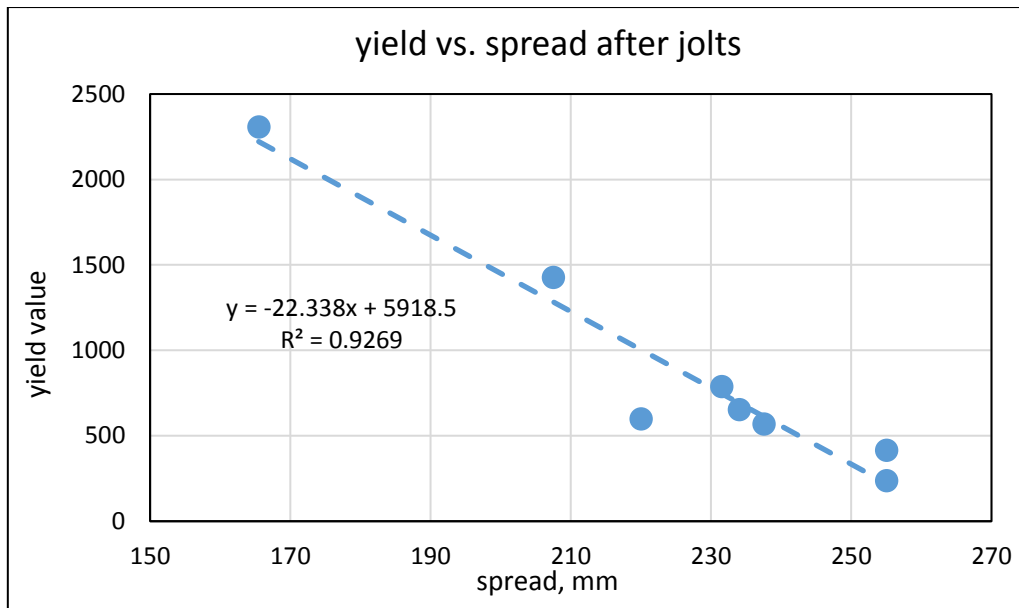
קשרי הגומלין שנבחנו היו בין ההרכב המינרלוגי, גבול הנזילות ופילוג גודל החלקיקים. לא נמצאו כל קורלציות בין הפרמטרים של פילוג גודל החלקיקים ובין הפרמטרים האחרים. ניתן היה אבל להבחין בקשרי גומלין בין ההרכב המינרלוגי, גבול הנזילות וערכי המתילן בלו, ציורים 37 ו-38, עם גידול בערכים הללו בתלות בגידול בערכי מתילן בלו. משמעות הדבר היא גידול בעכרי גבול הנזילות ואינדקס הפלסטיות עם הגידול בתכולת המונטמורילוניט.

קשרי גומלין בין פרמטרים של עבידות

העבדות אופיינה באמצעות בדיקות ריאולוגיות אשר בהן תכונות החומר מבוטאות באמצעות פרמטרים של ערך הכניעה וערך הצמיגות המדומה. בדרך כלל מקובל שהפרמטר של גבול הכניעה הוא המשמעותי יותר לגבי אפיון עבדות החומר מאחר וקיימת קורלציה בינו ובין פרמטרים של עבדות הנקבעים בבדיקות תקניות. הנחה זו נבחנה כאן על ידי בחינת קשרי הגומלין בין ערך הכניעה מייד לאחר הערבוב עם הפרמטרים של עבדות המתקבלים בשולחן הזרימה מיד לאחר הערבוב, ציורים 74 ו-84.



ציור 47: הקשר בין ערך הכניעה וערך הזרימה ב- % המתקבל בבדיקת שולחן הזרימה



ציור 48: הקשר בין ערך הכניעה ובין השירוע המתקבל בבדיקת שולחן הזרימה לאחר 15 מכות בשני הציורים רואים קשר ליניארי ברור. הקשר עם ערך הזרימה, ציור 47 הנו קצת פחות משמעותי כי יש שם נקודה אחת שסוטה במידה ניכרת, נקודה זו היא תערובת הבקרה עם חול בלבד ללא 5% דקים בו. לעומת זאת הקשר עם השירוע בציור 48 הוא מצוין.

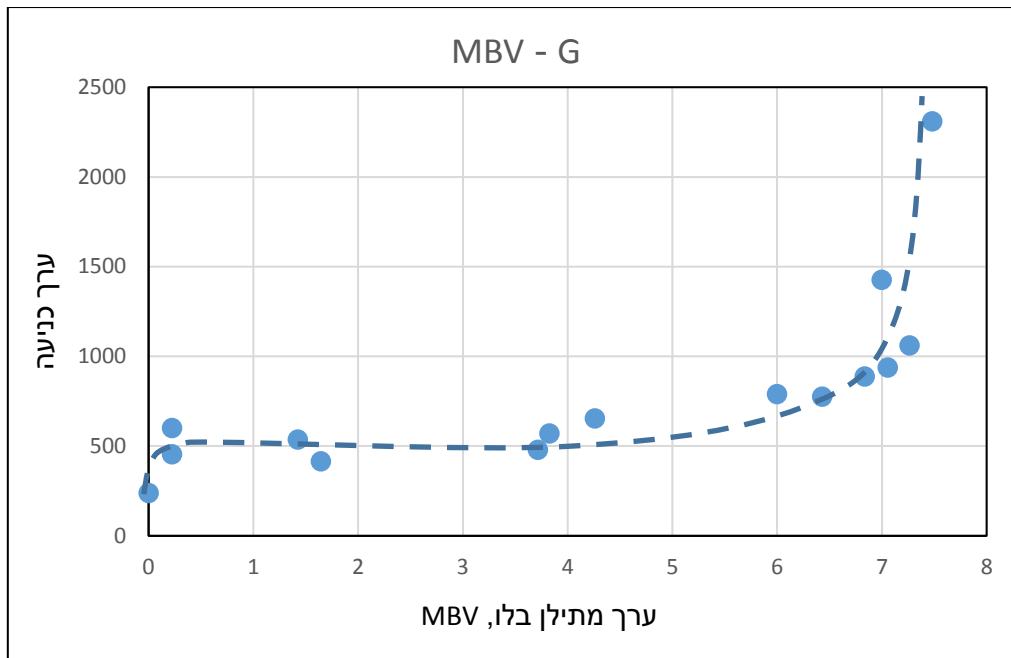
מכאן ניתן להעריך שערך הכניעה הנו מאד משמעותי ואמין לכימות תכונות הזרימה של תערובות המלט והוא ישמש לכן כבסיס לאפיון קשרי הגומלין עם ההרכב של החומר הדק בסעיפים שלהלן.

קשרי גומלין בין הרכב החומר הדק והתכונות הריאולוגיות: קשר עם ערכי מתילן בלו

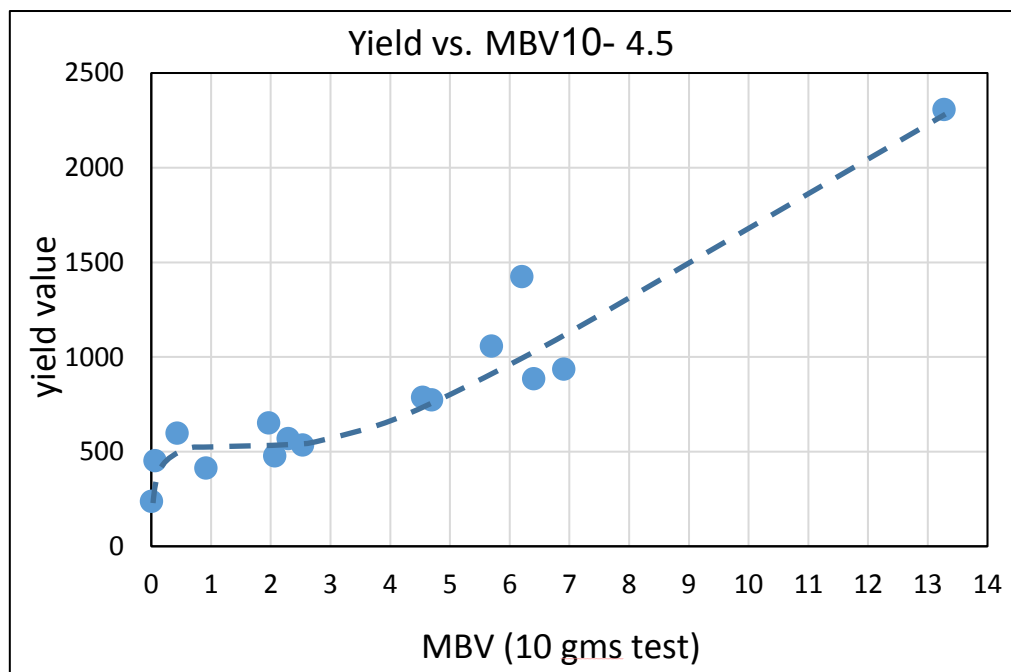
קשרי הגומלין בין הפרמטרים הריאולוגיים ובין ערכי המתילן בלו מוצגים בציורים 49 ו- 50 עבור ערך הכניעה, G, והצמיגות המדומה, H, בהתאמה.

ניתן להבחין בקשר ברור בין ערך הכניעה ובין ערך המתילן בלו (ציור 49): עלייה ראשונית מהחומר שאין בו חרסית כלל (ערך מתילן בלו 0) ולאחר מכן ערך כניעה קבוע בטווח של עד מתילן בלו של כ- 4. בתחום של מתילן בלו גדול מ- 4 ניכר גידול חד בערך הכניעה עם הגידול בערך המתילן בלו. התנהגות זו יכולה להסביר את הקביעה המקובלת בהנחיות ובתקינה שהשימוש בחומר דק עובר נפה 200 מותר כל עוד הערך של מתילן בלו נמוך מ- 3. לעומת זאת לא נמצא קשר בין ערך המתילן בלו ובין הצמיגות המדומה.

בהקשר זה יש לציין שידוע שהסומך של תערובות בטון כפי שנקבע בבדיקות חמיטה או שולחן זרימה תלוי בעיקר במאמץ הכניעה אך כמעט ואיננו מושפע מהצמיגות המדומה.



(ב) ערך מתילן בלו בבדיקת 20 ג"מ

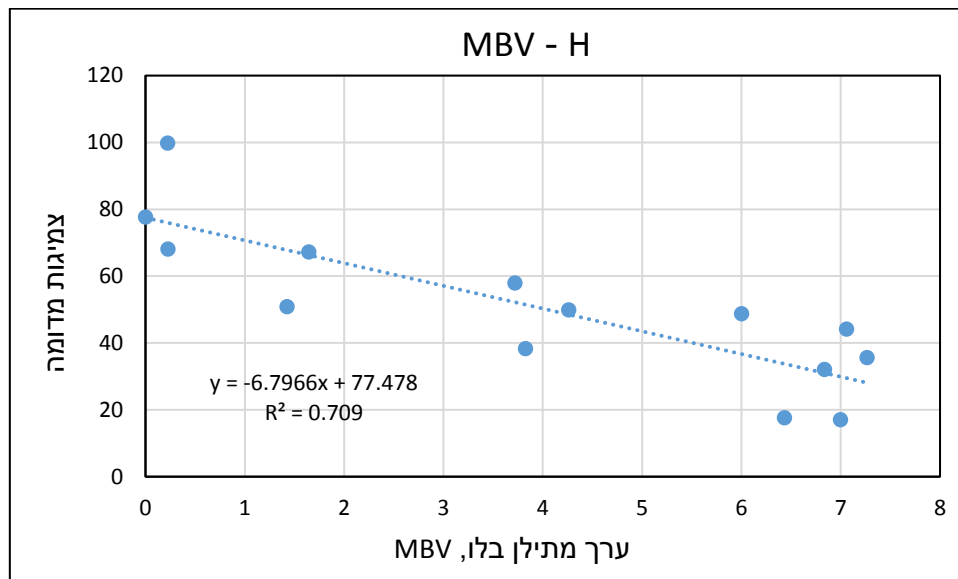


(א) ערך מתילן בלו בבדיקת 10 ג"מ

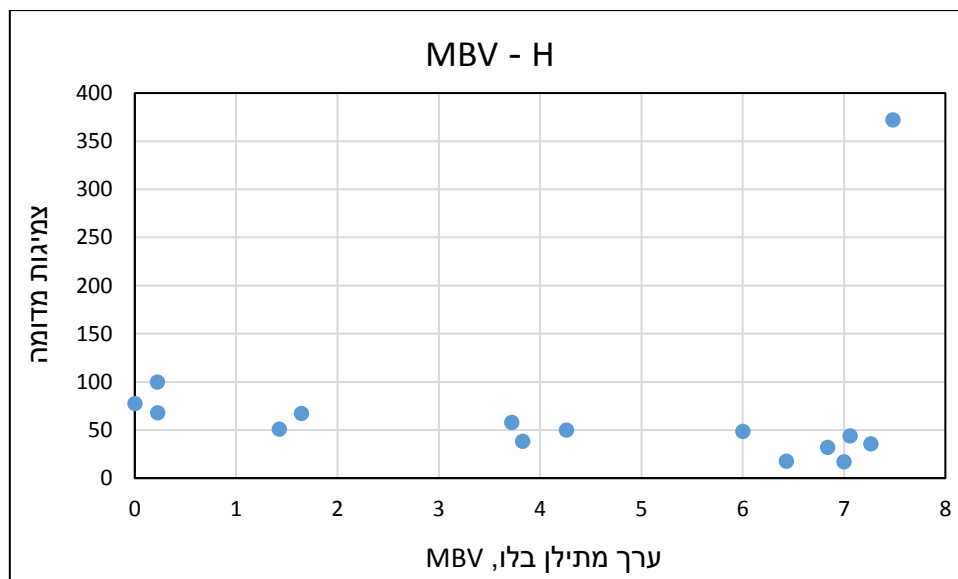
ציור 49: קשרי גומלין בין ערכי המתילן בלו וערך הכניעה, G

הקשר בין המתילן בלו ובין הצמיגות המדומה (ציור 50 א') מצביעה על ירידה קלה בערך הצמיגות המדומה עם הגידול בערך המתילן בלו, כאשר נקודה אחת היא חריגה ומדובר במונטמורילוניט הנקייה. אם מתעלמים ממנה, ניתן להבחין במגמה ברורה יותר של ירידה בערך הצמיגות המדומה

עם הגידול בערך המתילן בלו (ציור 50ב'), כאשר הקשר הוא בעל אופי לינארי, בעל מקדם הקורלציה R שהוא בתחום בינוני, 0.709 עם פיזור מסביב.



(ב)

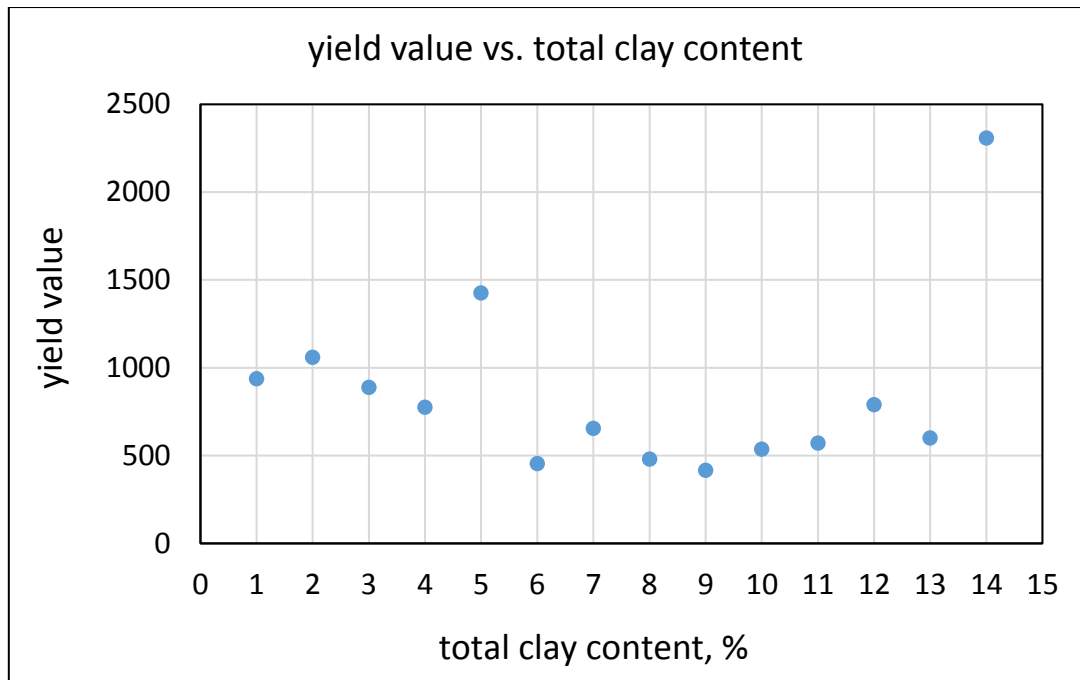


(א)

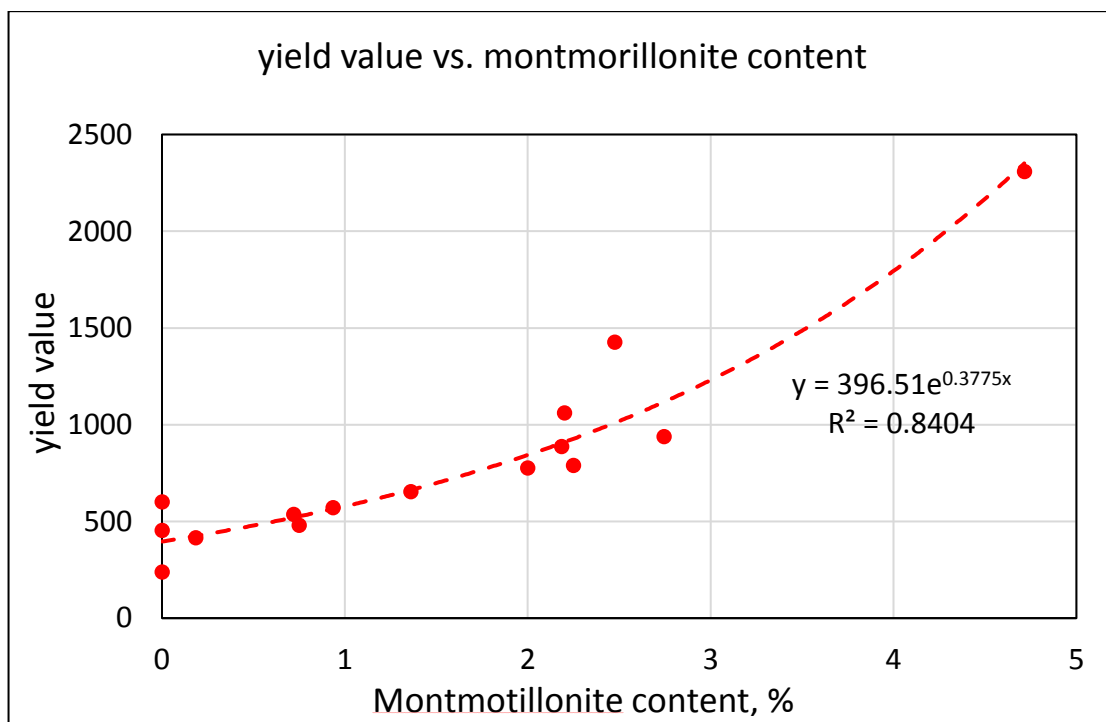
ציור 50 : קשרי גומלין בין ערכי המתילן בלו והצמיגות המדומה, H, (א) כולל המונטמורילוניט הנקייה, (ב) ללא המונטמורילוניט הנקייה

קשרי גומלין בין הרכב החומר הדק והתכונות הריאולוגיות : קשר עם הרכב מינרלוגי

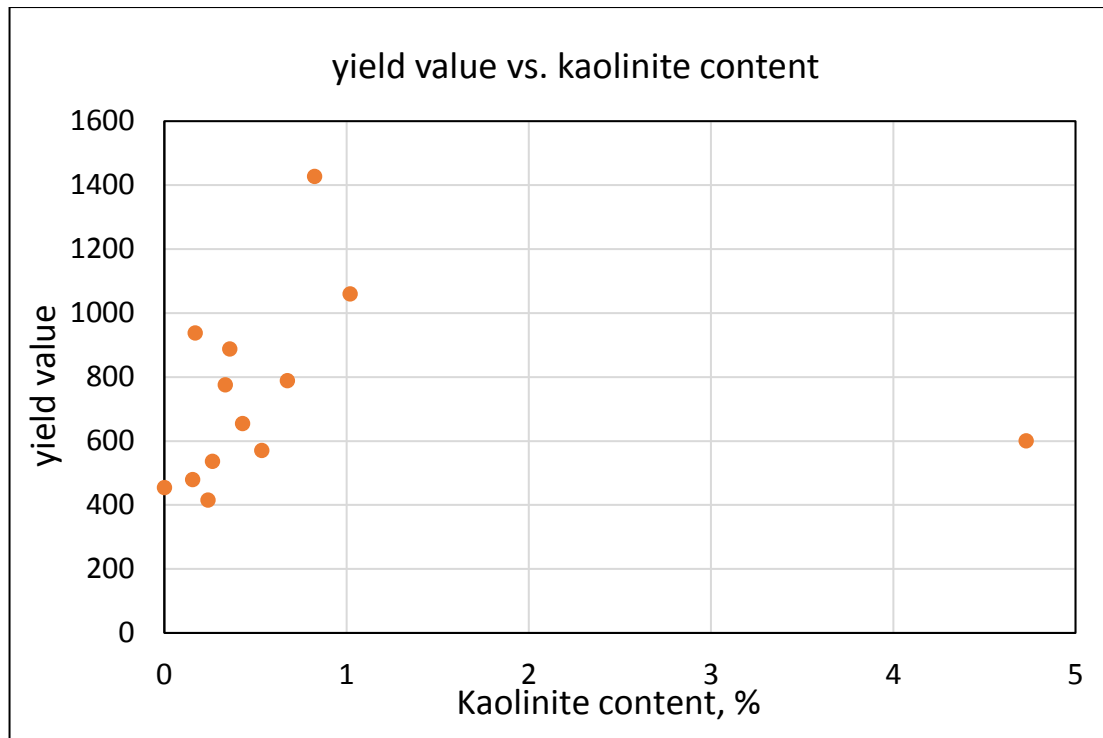
כדי לקבלת אומדן ותחושה ראשונית לגבי התלות של ההתנהגות הריאולוגית בהרכב, הוצגו הערכים של ערך הכניעה G בתלות בתכולת החרסית הכוללת (ציור 51), תכולת המונטמורילוניט והקאוליניט (ציורים 52, 53).



ציור 51 : הקשר בין ערך הכניעה G ותכולת החרסית הכוללת בחול המהונדס



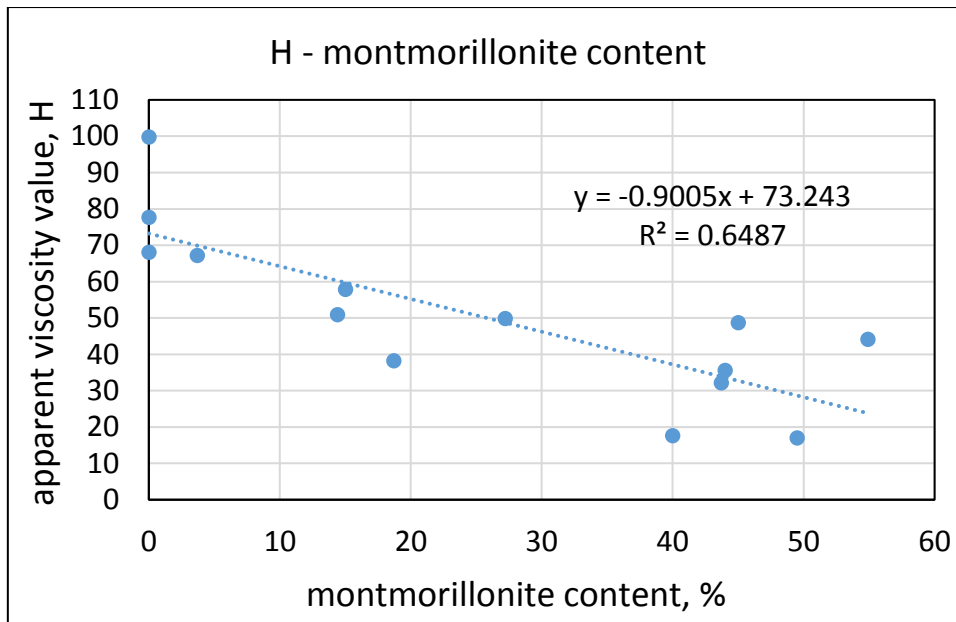
ציור 52 : הקשר בין ערך הכניעה G ותכולת המונטמורילוניט בחול המהונדס



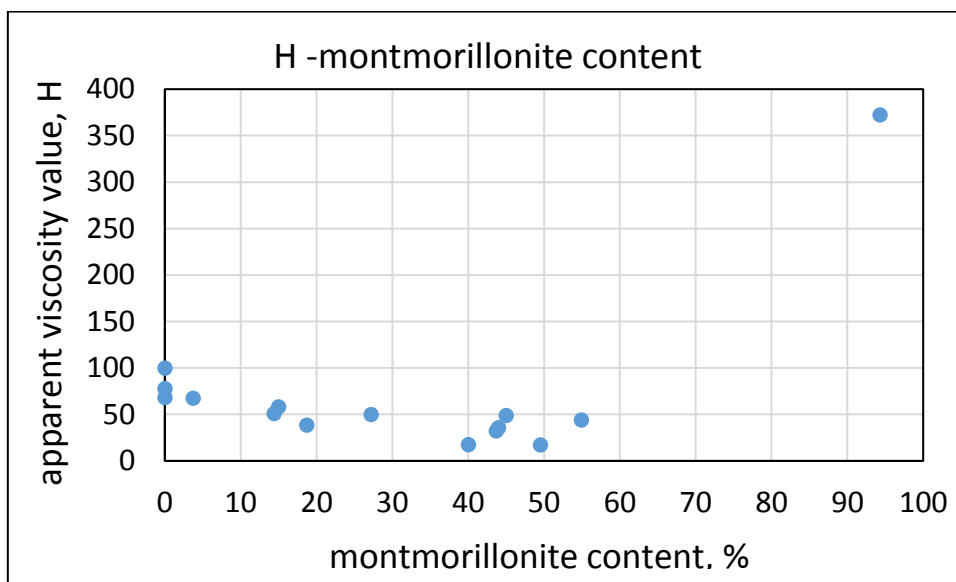
ציור 53 : הקשר בין ערך הכניעה G ותכולת הקאוליניט בחול המהונדס

ניתן לראות שיש מגמה לגידול של ערך הכניעה (ציור 51) עם הגידול בתכולת החרסית הכוללת, אך הפיזור גדול מאוד. מגמה דומה מתגלה עבור הקשר בין ערך הכניעה G ובין תכולת המונטמורילוניט עם פיזור הרבה יותר קטן (ציור 52). לא נמצא קשר בין ערך הכניעה ובין תכולת הקאוליניט (ציור 53). מכאן ניתן להעריך שערך הכניעה תלוי בעיקר בתכולת הכוללת של המונטמורילוניט בחול הסינטטי.

הקשר היחיד שנמצא בין ערך הצמיגות המדומה (H) ובין הפרמטר של הרכב היה תכולת המונטמורילוניט, אך קשר זה היה חלש יחסית, ציור 54. הקשר שהתקבל היה רק כאשר לא כללנו את הנקודה המייצגת את המונטמורילוניט הנקי (ציור 54א') וגם אז מקדם הקורלציה הלינארי לא היה גבוה במיוחד (0.65), אך נראית מגמה להקטנה בערך הצמיגות המדומה עם הגידול בתכולת המונטמורילוניט. מגמה זו דומה להקטנה בערך הצמיגות המדומה עם הגידול בערך מתילן בלו, ציור 50ב', שהוא תלוי בעיקר בתכולת המונטמורילוניט. בשני המקרים (ציור 50ב' וציור 54ב'), מקדם הקורלציה דומה.



(ב)



(א)

ציור 54 : הקשר בין ערך הצמיגות המדומה (H) ובין תכולת המונטמורילוניט

ניתוח להערכת הגדלת תצרוכת המים

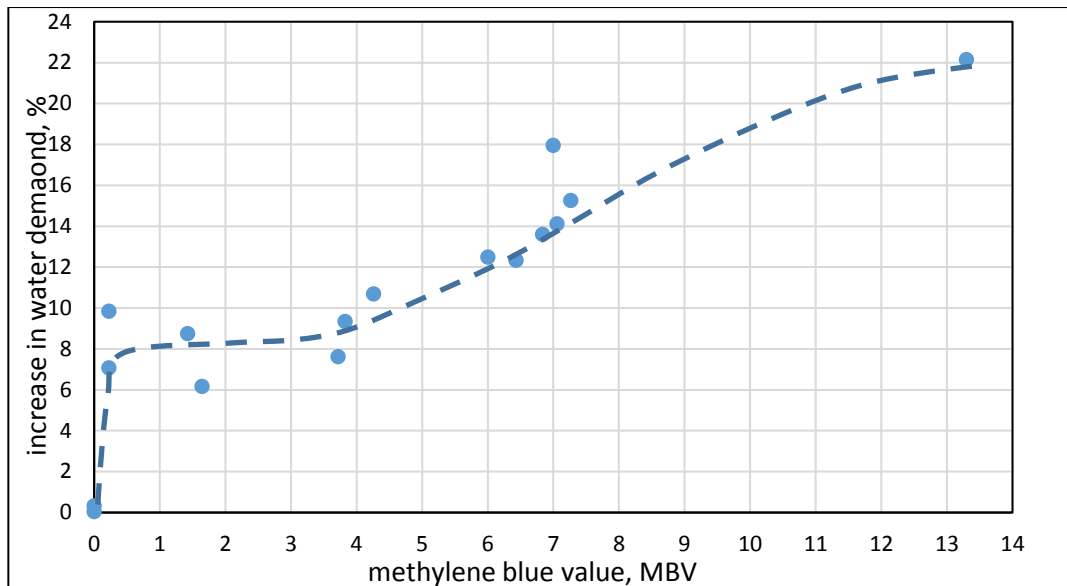
כפי שרואים בציור 54 בתערובות אשר בהן מנת המים קבועה, 0.92, ערך הכניעה G גדל הנוכחות חומר דק מהמחצבות ובנוכחות חרסיות נקיות. ניתן לקבל הערכה ראשונית לגבי המשמעות של שינוי זה על הגדלת תצרוכת המים עקב נוכחות דקים אלה, על יד קביעת מנת המים האקוויוולנטית אשר בה היה מתקבל מאמץ כניעה דומה. קביעה זו נעשתה על יד מציאת מנת המים מתוך העקום שבציור 11 אשר תיתן את אותו ערך כניעה של החומר הדק כפי שמצוין בטבלה 13 להלן. ההפרש בין מנת מים אקוויוולנטית זו ובין מנת מים של 0.92 היה הבסיס לחישוב לצורך ההערכה של הגדלה

בתצורות המים עקב הנוכחות של 5% של החומר הדק. הערכים הללו מוצגים בעמודה האחרונה שבטבלה 13, ΔW , %. ערכים אלה יכולים לשמש כאינדיקציה להשפעה הנדרשת של מוסף כימי אשר נועד לפצות על הפסד העבירות כתוצאה מנוכחות החומר הדק. טבלה 13: ערכי מתילן בלו, מקדמים ריאולוגיים והערכה של הגידול בתצורות המים עקב נוכחות של חומר דק בשיעור של 5% מהחול.

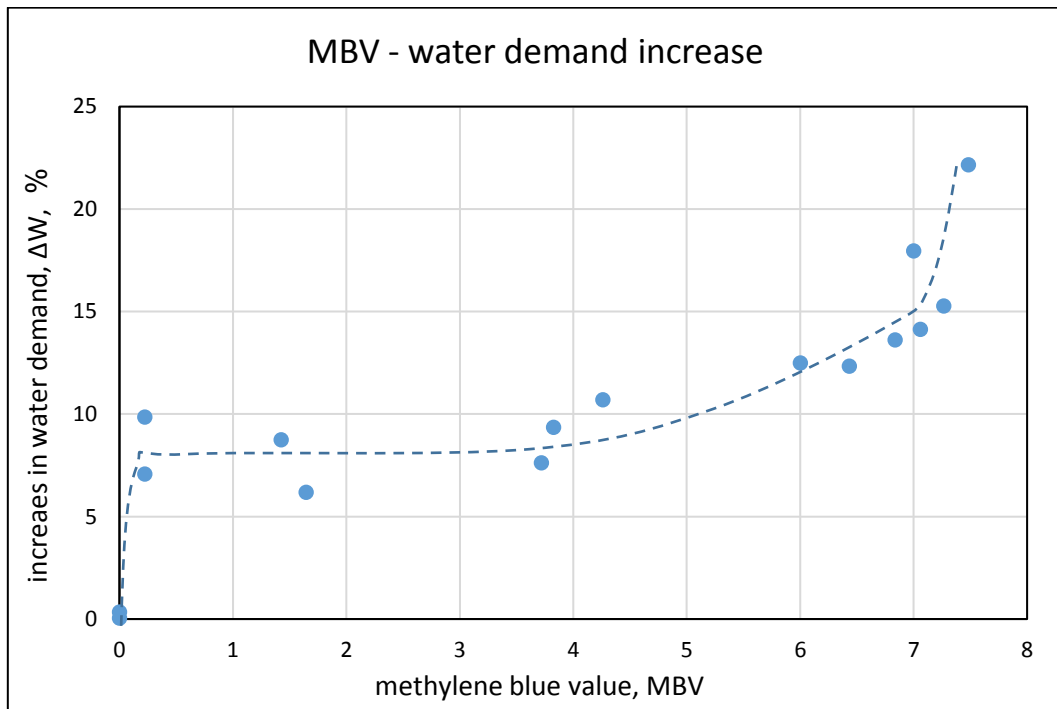
Sample	MBV	G	H	ΔW , %
0.92 control	0	238.8	77.67	0
0.92 filler	0	232.53	73.69	0
2T-Montmorillonite	7.48	2309.1	372.19	22
3T-Kaollinite	0.22	600.3	99.76	10
1R	6.00	789.1	48.73	12
2R	3.83	570.5	38.26	9
3R	1.42	536.7	50.87	9
4R	1.64	415.72	67.21	6
1H	3.72	479.5	57.9	8
2H	4.26	654.27	49.88	11
3H	0.22	454.13	68.04	7
4H	7.00	1427	17	18
5H	6.43	776.22	17.58	12
6H	6.84	887.55	32.12	14
7H	7.26	1060.4	35.61	15
1T	7.06	937.8	44.1	14

הערך של ΔW הנו אמד להשפעת החומר הדק על עבירות התערובת. מאחר ויש להניח שהוא תלוי בתכולת וסוג החרסית שבו, נעשה ניסיון לקבוע את קשרי הגומלין בינו ובין הערך של המתילן בלו, ציור 55.

ניתן לראות שעקב הנוכחות של חרסית בעלת ערכי מתילן בלו הקטנים מכ- 3 יש גידול קטן בתצורות המים של כ- 10%, בלתי תלוי בערך של המתילן בלו בטווח זה. כאשר הערך של מתילן בלו הוא מעל כ- 4, ניתן לראות עלייה חדה בתצורות המים עם הגידול בערך של המתילן בלו, עד לכ- 20% עבור מתילן בלו של 7 – 7.5 (ציור 31 א'), אך כאשר קובעים את הקשר בבדיקה עם 10 ג"מ, העלייה היא מונוטונית (ציור 31 ב'). גידול זה ניתן בוודאי לייחוס לנוכחות של מונטמורילוניט.



(ב) ערך מתילן בלו בבדיקה של מדגם של 10 ג"מ



(א) ערך מתילן בלו בבדיקה של 20 ג"מ

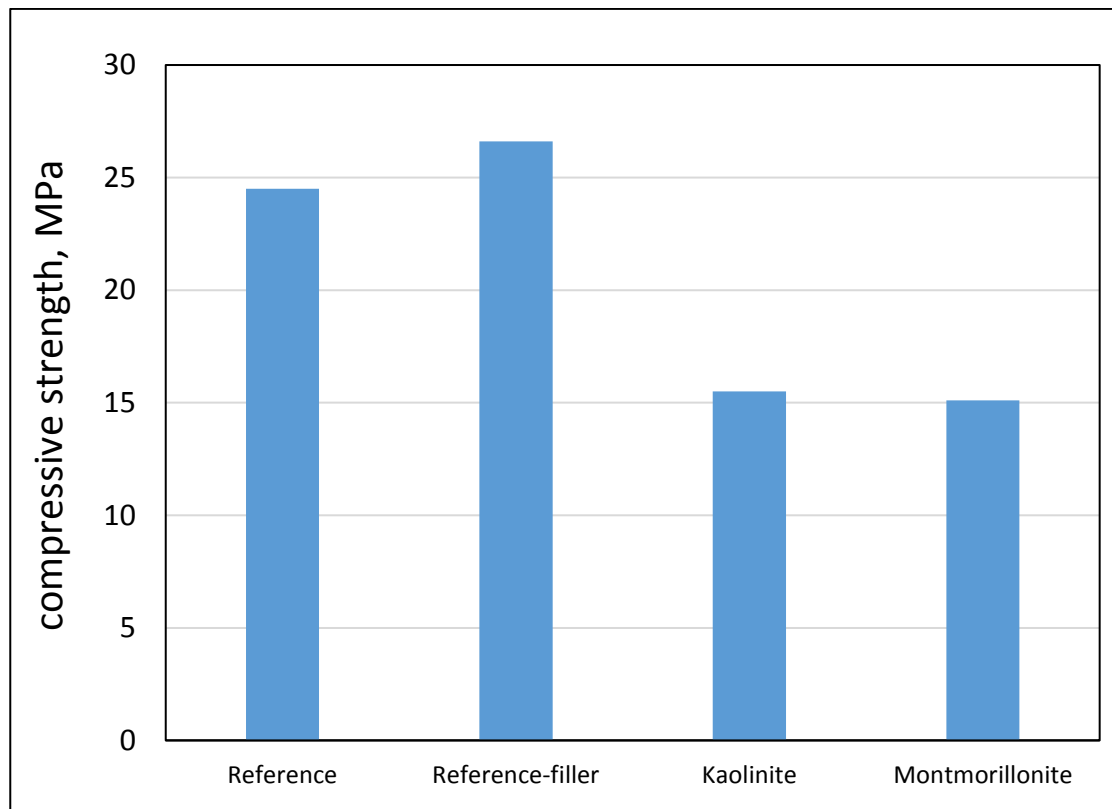
ציור 55 : קשרי גומלין בין אומדן הגידול בתצרוכת המים עקב נוכחות החומר הדק, ΔW , ובין ערך המתילן בלו

ניתוח להערכת שינויים בחוזק

מאחר ומנות המים בכל התערובות היו זהות הרי החוזק היה אמור להיות בלתי תלוי בהרכב החומר הדק. התוצאות אבל מראות ירידה בחוזק, אשר נמצאה תלות בינה ובין ערך המתילן בלו (ציור 46) וההסבר היה שהיא קשורה אולי בירידה בעבירות עם הגידול בערך המתילן בלו (ציורים 44 ו- 45).

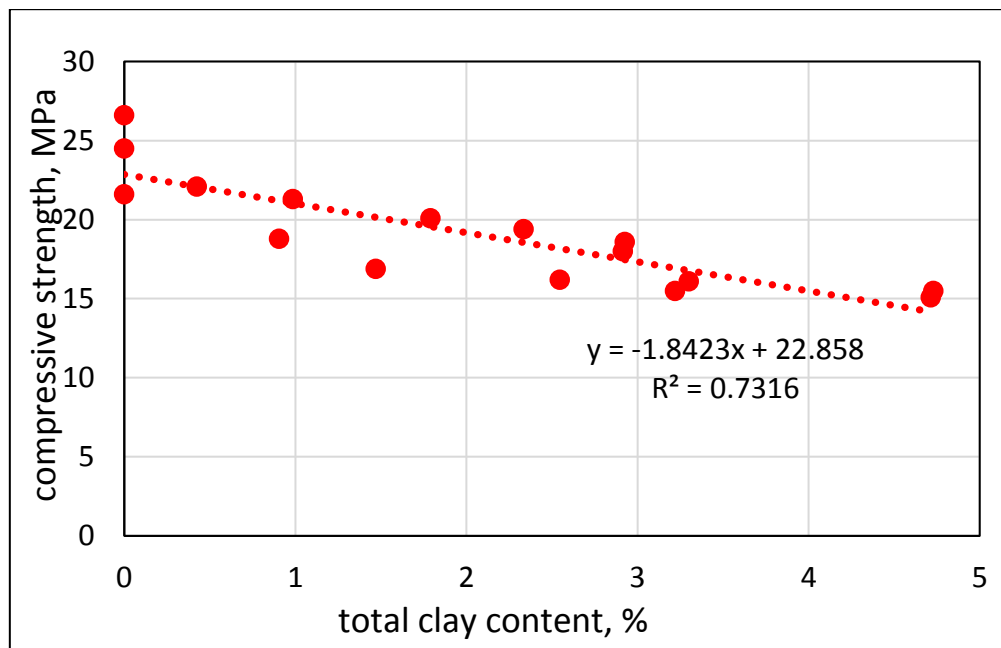
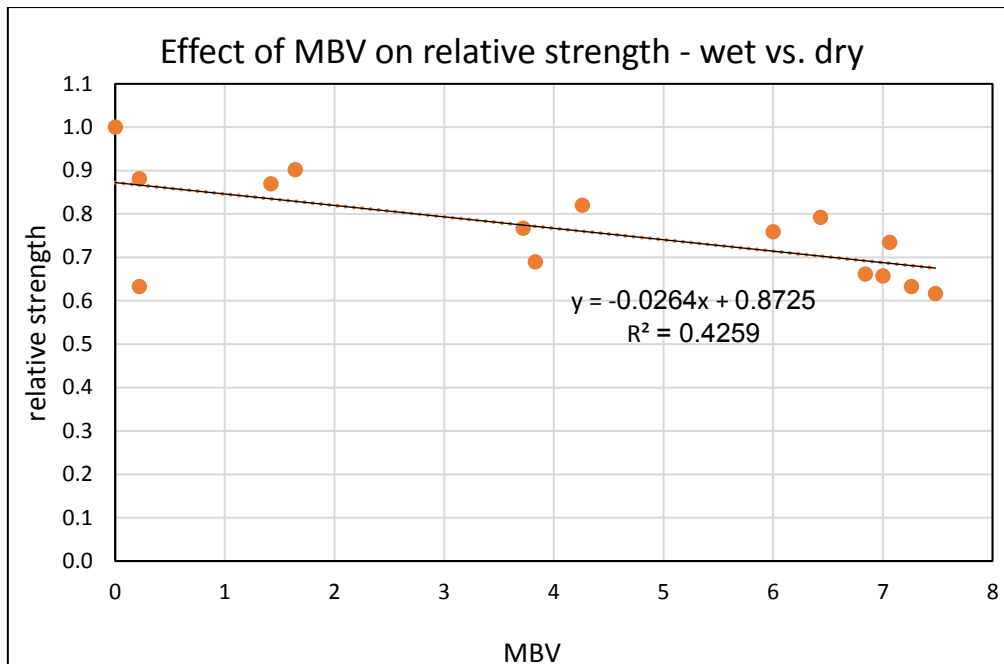
הקשר הזה בין החוזק והעבירות הצביע על מגמה מאד כללית, עם פיזור גדול ועל כן קשה לקבוע האם זו אכן הסיבה.

בהקשר זה מעניין לציין שהירידה בחוזק הגדולה ביותר התקבלה במדגמים שבהם המרכיב הדק של החול הסינטטי היה מחרסית נקייה, כאשר הירידה בחוזק הייתה דומה בשני סוג החרסיות, כפי שרואים בציור 56. הירידה בעבירות היא הרבה יותר גדולה במדגם עם המונטמורילוניט, ולמרות זאת הירידה בחוזק שלו דומה לזו של המדגם עם הקאולין. מכאן ניתן להעריך שיייתכן והבעיה איננה קשורה בעבירות כי אם בהשפעה הקשורה בנוכחות החלקיקים הקטנים של החרסית. הירידה בחוזק בנוכחות חלקיקים אלה הייתה כ-40%, בשעה שהחלפה בחלקיקים של מלאן אבן גיר בעל גודל דומה לא התקבלה החלשה אלא אפילו חיזוק קל. מכאן שאם מדובר בהשפעה של גודל, הרי היא קיימת בחרסיות אך לא במלאן ואולי היא קשורה באופי החלקיקים שיש להם מבנה של פלטות במקרה של החרסית.



ציור 56: השפעת נוכחות של מלאנים וחרסיות "נקיות" בחול הסינטטי (5% החלפה) על חוזק הלחיצה בגיל 28 ימים של מדגמים במנת מים של 0.92

הערכים היחסיים של הירידה בחוזק יחסית למדגם ללא חומר דק, בתלות בערך של המתילן בלו ובתכולת החרסית הכוללת מתוארת בציור 56. הירידה היא בטווח של עד כ-40%. ניתן לראות שיש קשר מובהק יותר של הירידה בחוזק עם הגידול בתכולת החרסית מאשר עם הגידול ערך של המתילן בלו וזה תומך בהשערה שהגורם הדומיננטי יותר המשפיע על הירידה בחוזק הוא נוכחות החרסית ולא דווקא הרכבה.



ציור 57 : השפעת ערכי מתילן בלו ותכולת החרסית הכוללת בחומר הדק על החוזק היחסי בגיל 28 ימים של מדגמים שעברו אשפחה ברטוב

חלק ג: ניטרול השפעת החרסיות באמצעות מוספים

11. משתנים באפיון השפעת המוספים

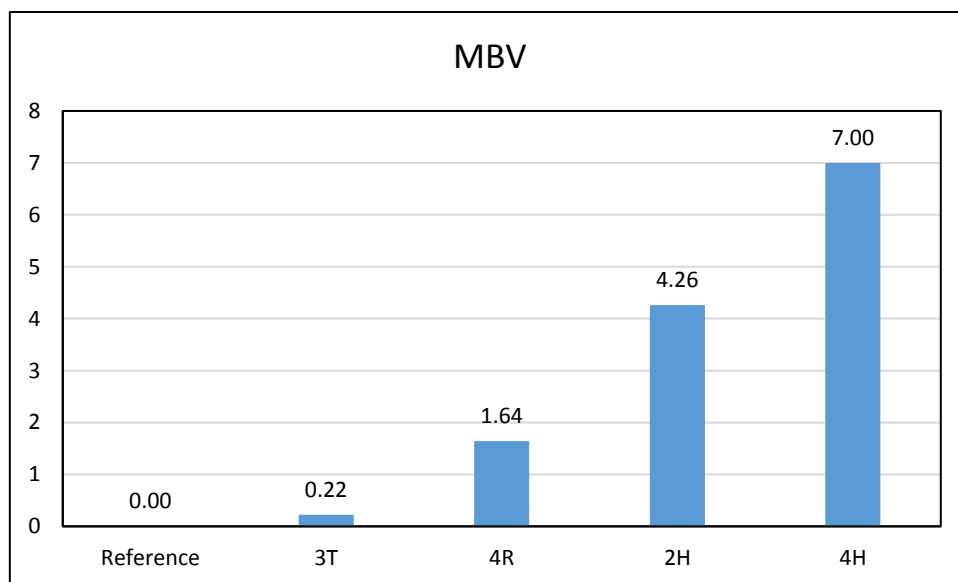
סדרת ניסויים ראשונה

בשלב ראשון נבחנה היעילות של מוסף על פלסטי חזק, PC-A ונקבעה התכולה הנדרשת שלו לנטרול השפעת החרסיות. כצעד ראשון נבחנו תערובות מלט 1:3 במנת מים של 0.92 כאשר 5% מהחול מוחלף בחומר הדק, כדי לקבוע את תכולת המוסף הנדרשת (תכונה להלן "אופטימלית") להקטנת ערך הכניעה שבו לערך השווה לערך הכניעה של מלט שבו לא הייתה נוכחות של 5% הדקים.

הבחינה הראשונית של יעילות המוספים בוצעה בתערובות במנות מים של 0.92 משום שזו מספיק גבוהה כדי שיתאפשר אפיון התכונות הריאולוגיות של מדגמים עם ערכי מתילן בלו גבוהים ללא תוספת של מוספים. כידוע, בנוכחות החומר הדק, הגידול במאמץ הכניעה הוא גבוה ויש לכן קושי באפיון התנהגותם ללא מוסף במנות מים נמוכות יותר.

לאחר מכן, נבחנו תערובות מלט עם מנות מים של 0.77 ו-0.70 עם תכולת המוסף האופטימלית, לבחון האם המסקנות המתקבלות מתערובות במנות מים של 0.92 מתקיימות גם במנות מים נמוכות יותר.

למטרת הניסויים כאן נבחנו 5 מדגמים של חומרים דקים, מכלל המדגמים שנחקרו בשלב הראשון של העבודה, כך שהם יתנו ייצוג לכל הטווח של ערכי מתילן בלו. מדגמים אלה וערכי המתילן בלו שלהם מוצגים בציור 58.



ציור 58: המדגמים של החומרים הדקים שנבחרו לאפיון המוספים וערכי המתילן בלו שלהם

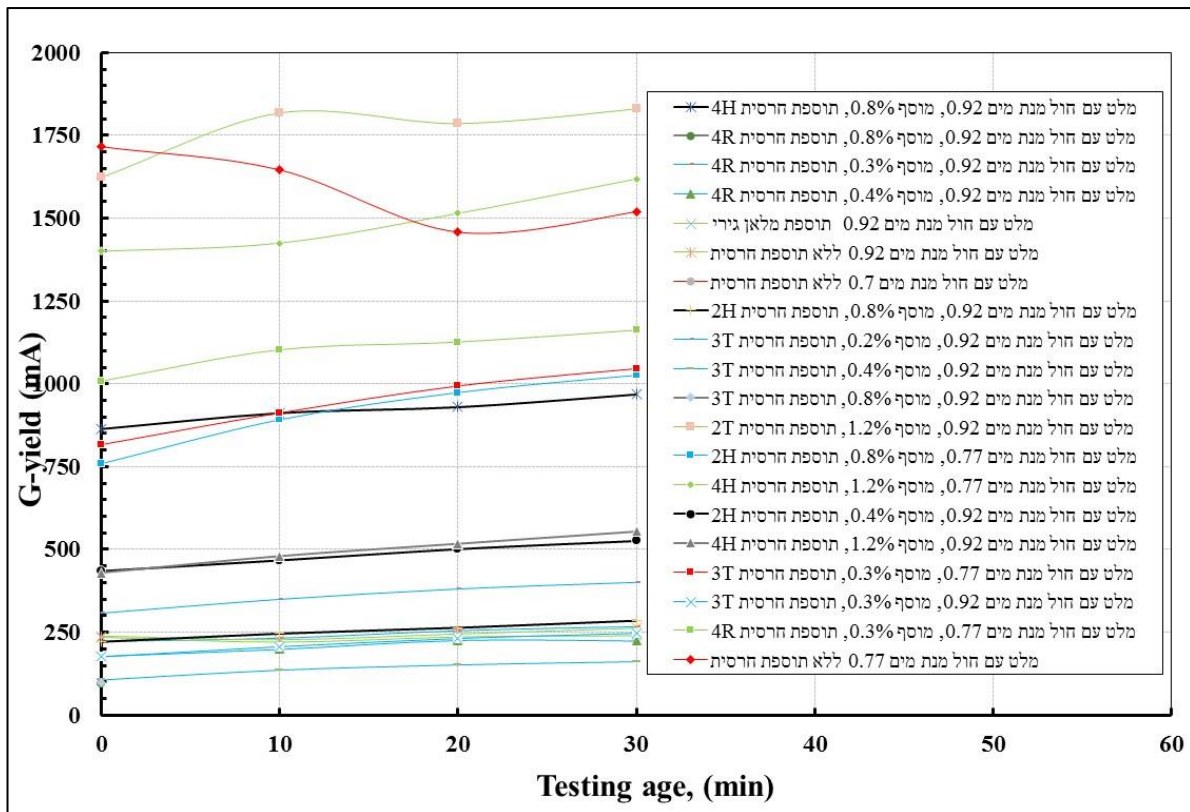
סדרת ניסויים שנייה

בשלב השני נערכה השוואה בין שלושת המוספים פוליקרבוקסילטיים. ההשוואה בוצעה על ידי אפיון ההתנהגות הריאולוגית של תערובות מלט (1:3) במנת מים של 0.70. לצורך הבהרת היעילות של המוספים הללו, נבחנה השפעתם על התכונות הריאולוגיות גם במדגמי הבקרה עם תכולות

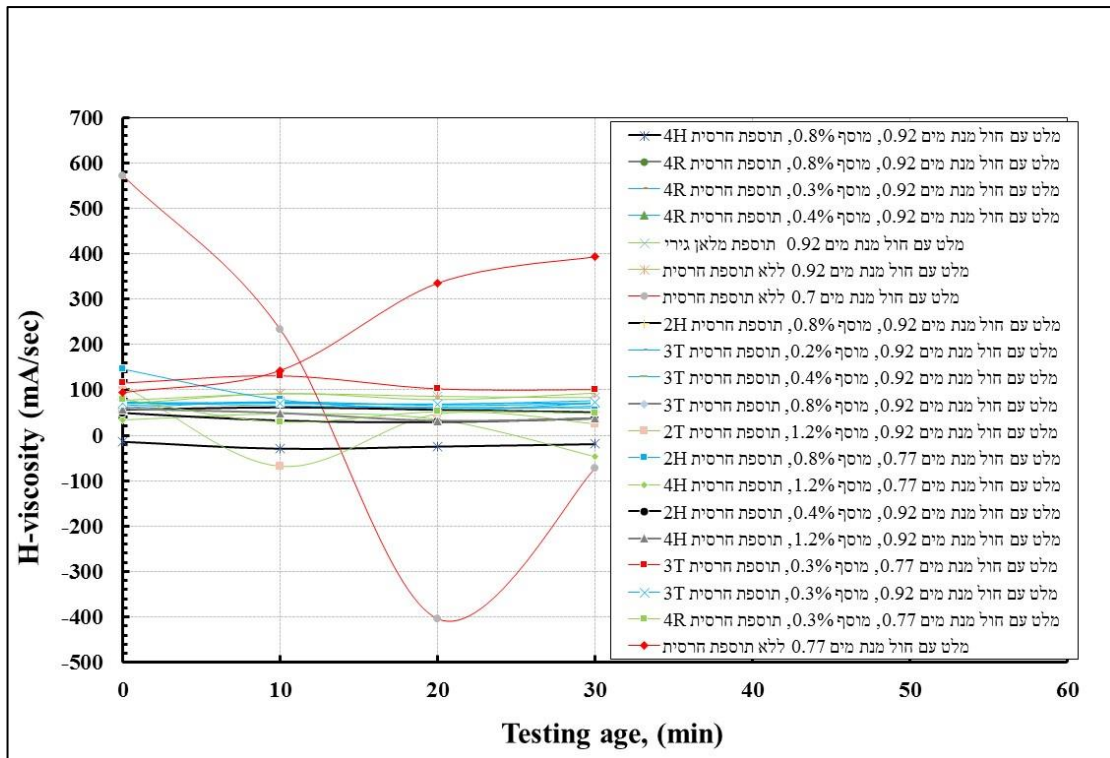
משתנות של מוסף, האחד עם חול בלבד והשני עם החלפה של 5% מהחול במלאן אבן גיר. תכולות המוסף שנבחנו לגבי שני המוספים היו זהות לערכים האופטימליים שנקבעו לגבי מוסף PC-A בבדיקות של תערובות עם מנת מים של 0.92.

12. השפעת מוסף פוליקרבוקסילטי חזק על הפרמטרים הריאולוגיים

התוצאות של כלל המדגמים שנבדקו בסדרה זו מוצגים בציורים 59 ו-60 אשר בהם ניתנים ערכי הכניעה (G) והצמיגות המדומה (H) בתלות בזמן.



ציור 59 : עקומים של ערכי הכניעה בתלות בזמן

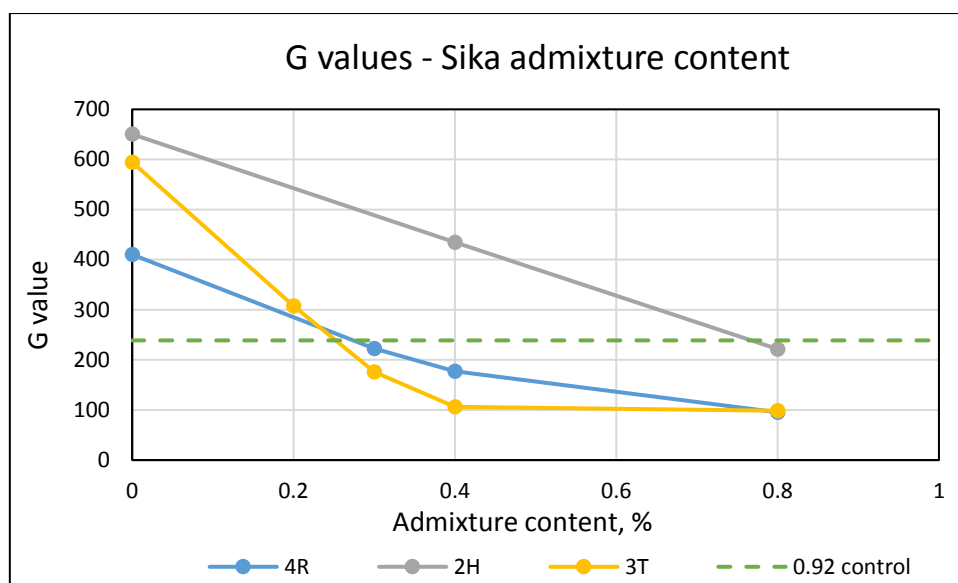


ציור 60 : עקומים של ערכי הצמיגות המדומה בתלות בזמן

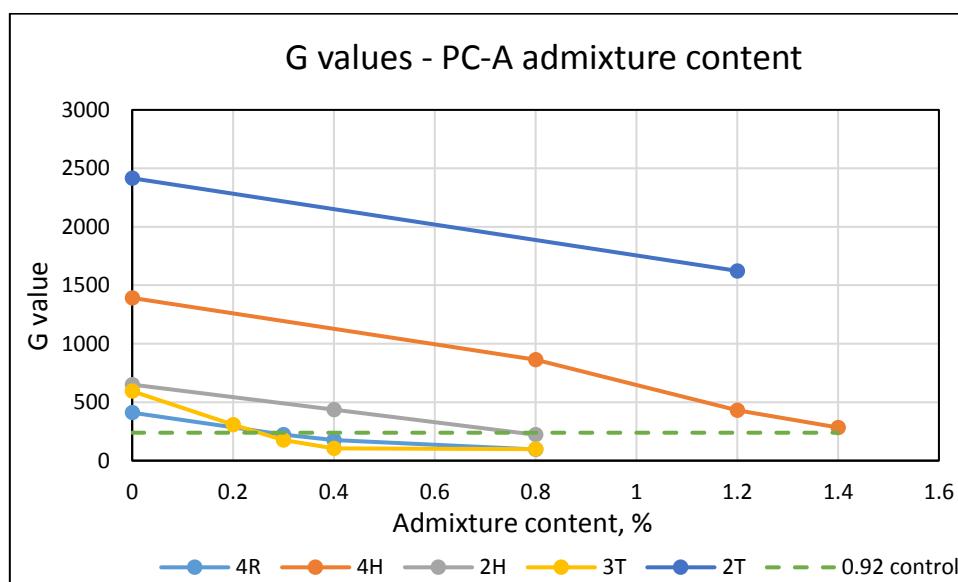
ניתן לראות שבמשך 30 דקות אין בדרך כלל שינויים משמעותיים בפרמטרים הריאולוגיים. יש הבדלים ניכרים בין ההרכבים השונים במאמץ הכניעה, G, ציור 58, אך ההבדלים קטנים בהרבה לגבי הצמיגות המדומה, H.

מלטים במנת מים של 0.92

השפעת המוספים על הפרמטרים הריאולוגיים מיד לאחר הערבוב מוצגת בציורים 61 ו- 62. ההשפעה של המוסף על ערך הצמיגות המדומה (ציור 62) הנה קטנה בעוד שהשפעתו על ערך הכניעה, G, היא משמעותית. פרמטר ריאולוגי זה הנו פרופורציוני בדרך כלל לסומך במבחן החמיטה או לשירות בבדיקת שולחן זרימה, ועל כן השפעת המוסף התבססה עליו.

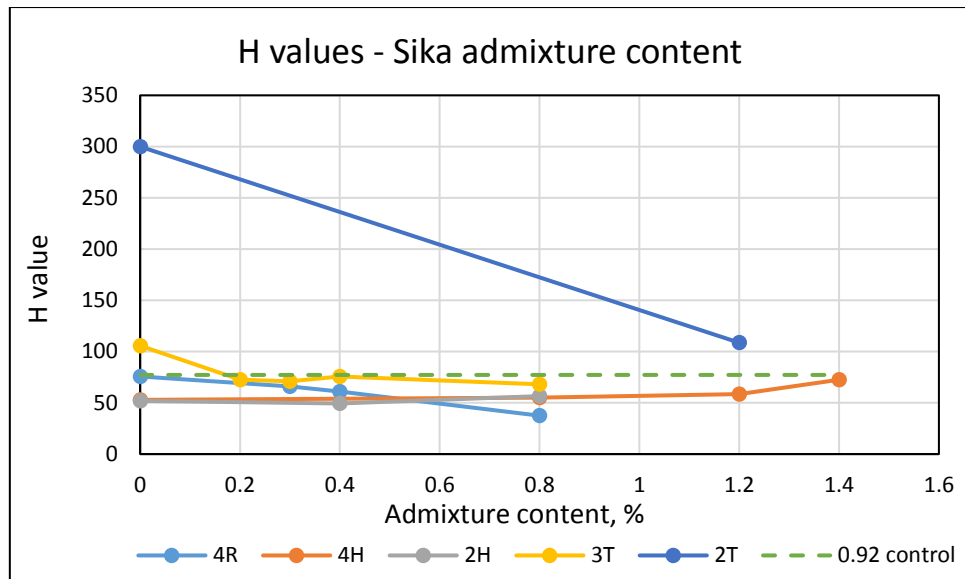


(ב)

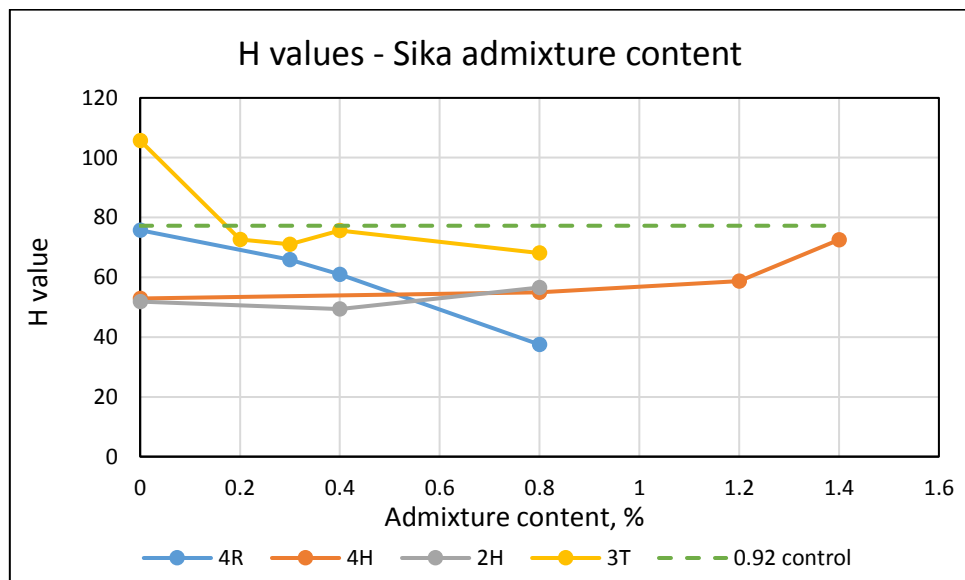


(א)

ציור 61: השפעת תכולת המוסף על ערך הכניעה, G, של תערובות מלט 3:1 במנת מים של 0.92 כאשר 5% של החול מוחלף בחומר הדק. מדגם הבקרה (הקו המקווקו) היה במנת מים של 0.92 כאשר החול היה ללא חומר דק או עם החלפה של 5% ממנו במלאן אבן גיר נקי (החלפה זו במלאן לא השפיעה על ערך הכניעה).



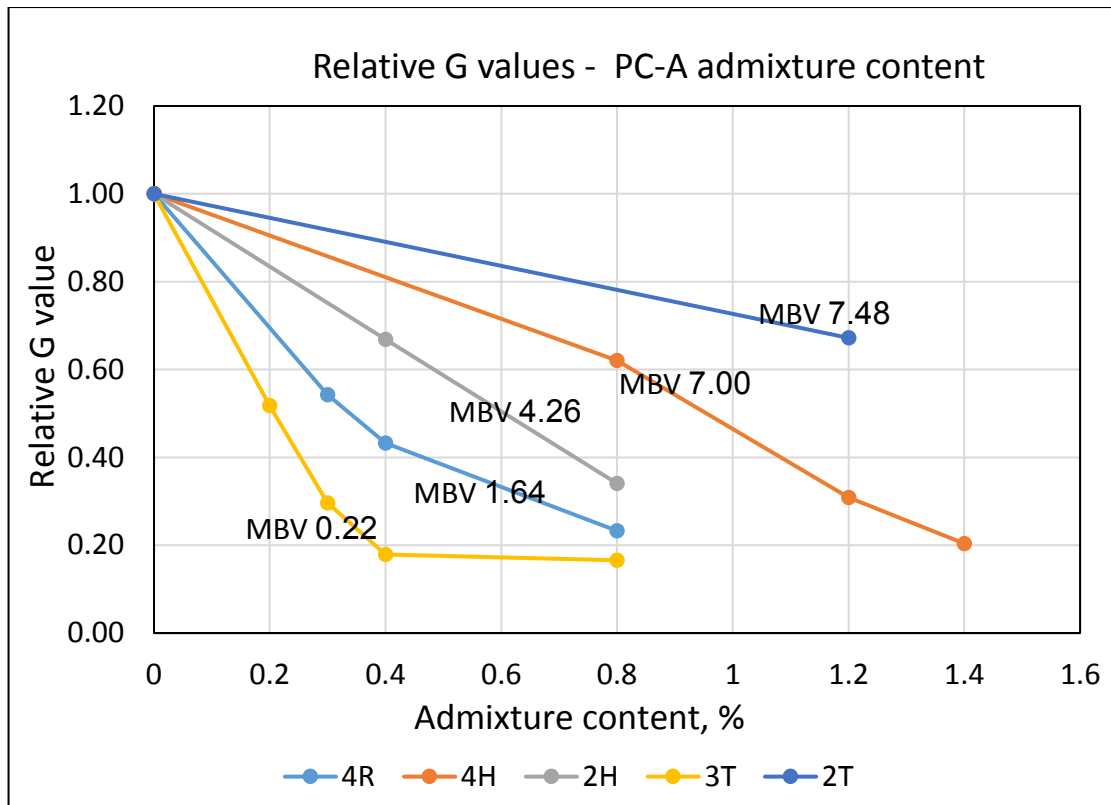
(ב)



(א)

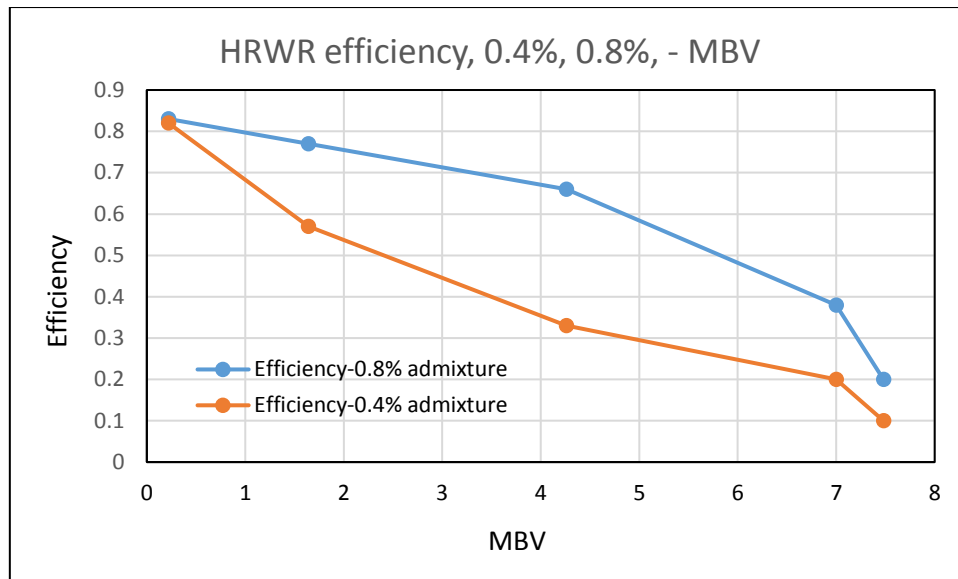
ציור 62 : השפעת תכולת המוסף על ערך הצמיגות המדומה, H, של תערובות מלט 3 : 1 במנת מים של 0.92 כאשר 5% של החול מוחלף בחומר הדק

כפי שניתן לראות מציור 16 ההשפעה על ערך הכניעה G הנה ניכרת יותר עבור המדגמים אשר ערכי המתילן בלו שלהם נמוכים יותר. הדבר בא לידי ביטוי בולט כאשר מציגים את הערך היחסי של ערך הכניעה (ערך כניעה עם מוסף, יחסית לערך הכניעה של אותו חומר ללא המוסף) בתלות בתכולת המוסף, ציור 63.



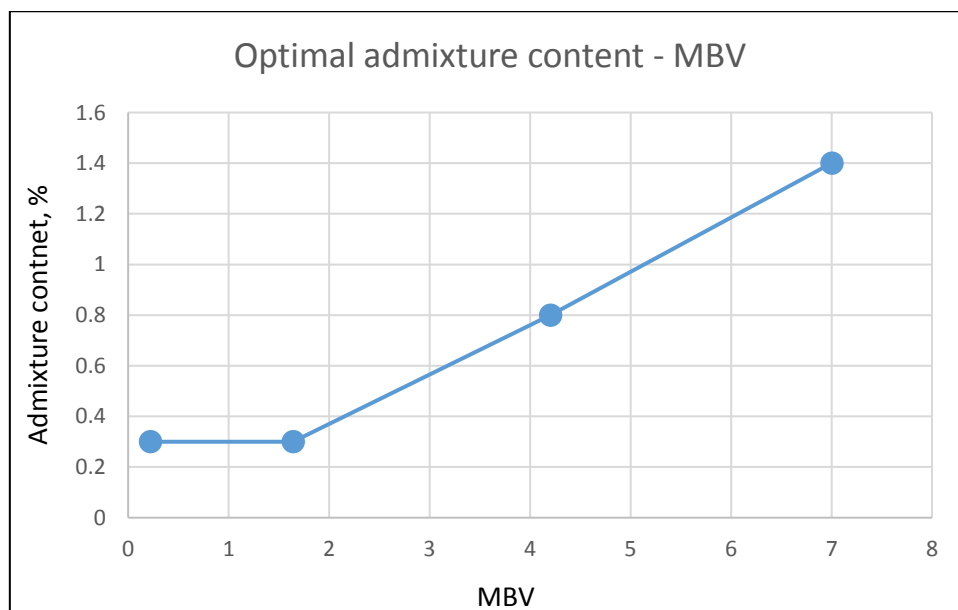
ציור 63 : השפעת תכולת המוסף על ערך הכניעה G היחסי של תערובות מלט 3:1 במנת מים של 0.92, כאשר 5% מהחול מוחלף בחומר הדק. הערך הוא יחסי לאותו הרכב ללא מוסף

מתוך יחס זה ניתן לחשב את מקדם היעילות של המוסף עבור תכולת מוסף נתונה, דהיינו מידת ההקטנה של ערך הכניעה בנוכחות כמות זו של מוסף. מקדמי יעילות אלה מוצגים בציור 64 עבור שתי תכולות של מוסף בתלות בערך המתילן בלו. ציור זה מראה בברור שהיעילות של המוסף גדולה יותר ככל שהערך של מתילן בלו נמוך יותר. כמו כן, ניתן לראות שעבור ערכי מתילן בלו של 7 ויותר, מקדם היעילות נשאר נמוך גם כאשר תכולת המוסף גבוהה יותר. עבור ערכי מתילן בלו בתחום הביניים של כ-4, ניתן להבחין שהגדלת תכולת המוסף משפרת את היעילות במידה משמעותית.



ציור 64 : מקדמי היעילות של המוסף בתלות בערכי המתילן בלו של החומר הדק (5% מתכולת החול) ותכולת המוסף

לצורך קביעת תכולת המוסף הנדרשת לנטרול השפעת החרסית ("תכולה אופטימלית") נקבעה התכולה אשר בה ערך הכניעה בנוכחות המוסף קטן לערך של תערובת הבקרה ללא חומר דק המכיל חרסית (או חומר דק שהנו מלאן נקי מאבן גיר). ערך זה נקבע על ידי החיתוך של הקווים האופייניים שבציור 60 עם הקו המקווקו המייצג את מאמץ הכניעה של מלט הבקרה ללא חומר דק המכיל חרסית. ערכים אלה היו 0.3%, 0.3%, 0.8% ו-1.4% עבור המדגמים 3T, 4R, 2H ו-4H אשר ערכי מתילן בלו שלהם הם 0.22, 1.64, 4.26 ו-7.0 בהתאמה. הקשר שבין תכולת המוסף האופטימלית וערך מתילן בלו מתואר בציור 65. מעל ערך מתילן בלו של כ-1.5 התכולה האופטימלית גדלה עם הגידול בערך מתילן בלו.

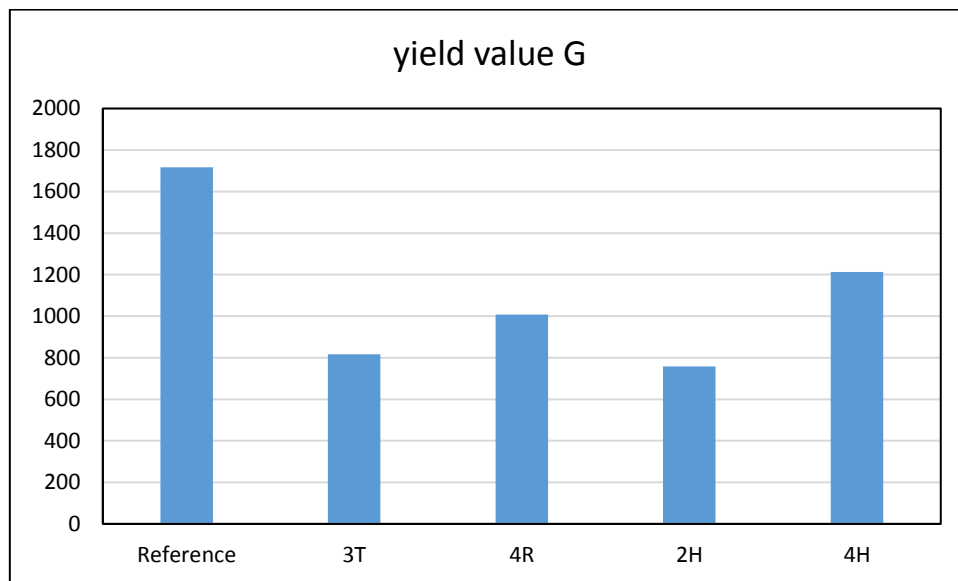


ציור 65 : התלות של תכולת המוסף האופטימלית (PC-A) במלטים במנת מים של 0.92 בערך המתילן בלו של החומר הדק

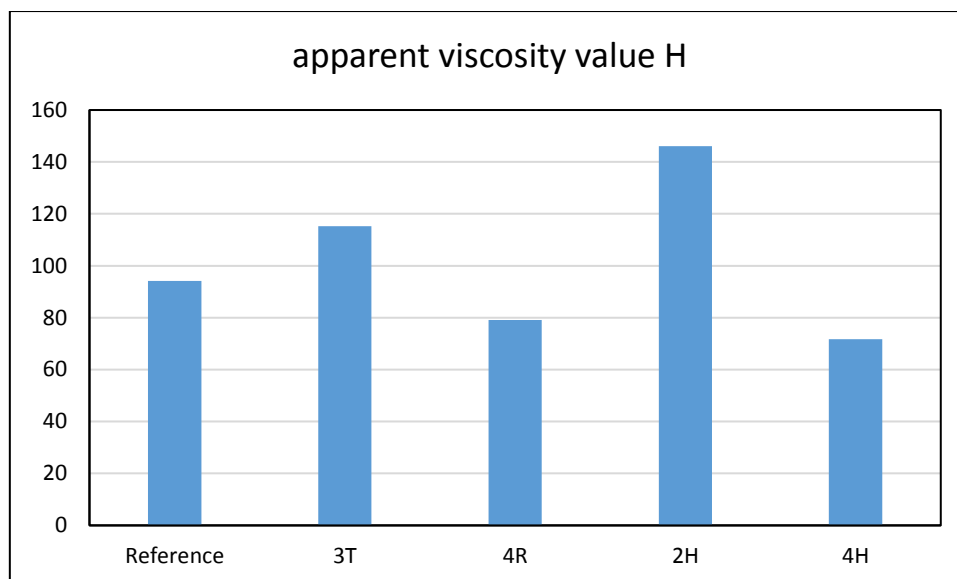
מלטים במנות מים של 0.77 ו-0.70 עם תכולת מוסף אופטימלית

התכולה האופטימלית של המוסף נקבעה על סמך ניסויים עם תערובת מלט במנת מים של 0.92. כדי לבחון האם ערך זה הנו אופייני ויתאים גם לתערובות במנות מים נמוכות יותר נבחנה ההתנהגות של תערובות במנות מים של 0.77 ו-0.70 עם תכולות מוסף אלה, תוך השוואה לתערובת הבקרה ללא מוסף וללא חומר דק המכיל חרסית.

התוצאות בתערובת עם מנת מים של 0.77 מוצגות בציור 66 ו-67 עבור ערך הכניעה והצמיגות המדומה, בהתאמה. לגבי הצמיגות המדומה לא נראות מגמות ברורות של השפעת המוסף והיא קטנה יחסית. לגבי ערך הכניעה, נראה שעבור החומרים הדקים עם ערכי מתילן בלו בטווח של 0.22 עד 4.26 (מדגמים 3T, 4R, 2H) מתקבלים ערכים דומים של מאמץ הכניעה; מאמץ הכניעה במדגם עם מתילן בלו גבוה, 7.0 (מדגם 4H), הנו בערך פי שניים גבוה יותר. מגמות אלה דומות לתצפיות של התכולות האופטימליות שנקבעו עבור מנת מים של 0.92. יחד עם זאת, ראוי לציין שבמנת מים של 0.92 ערכי הכניעה של מדגמים אלה היו שווים למאמץ הכניעה של מדגם הבקרה, בשעה שכאן הם בערך פי שניים קטנים יותר. לכן מסתמן שהתכולות האופטימליות שנקבעו עבור תערובות עם מנת מים של 0.92 יעילות יותר כאשר הן מופעלות בתערובת עם מנת מים של 0.77.

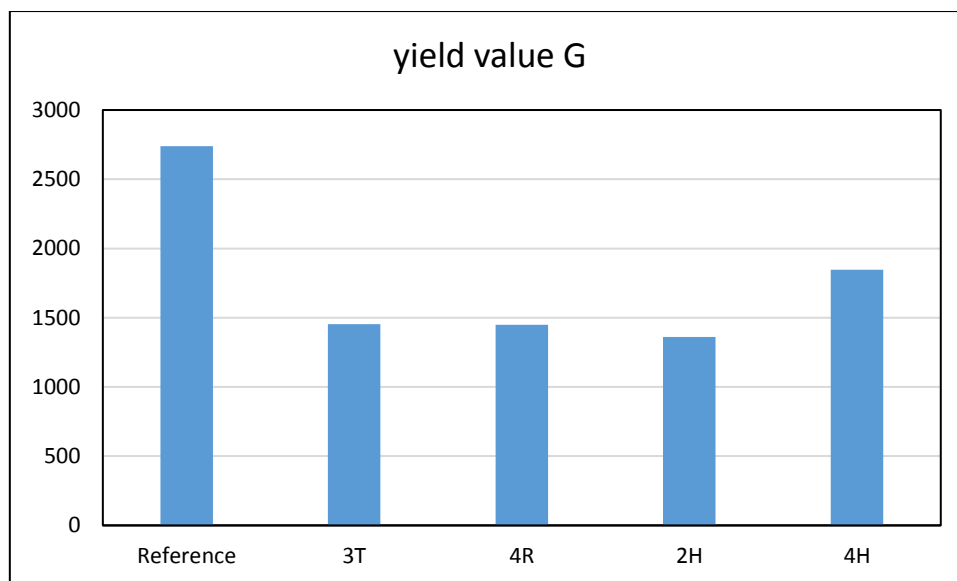


ציור 66 : ערכי הכניעה של תערובות במנות מים של 0.77 עם תכולת המוסף האופטימלית (PC-A), תוך השוואה למדגם בקרה ללא מוסף וללא חומר דק המכיל חרסית

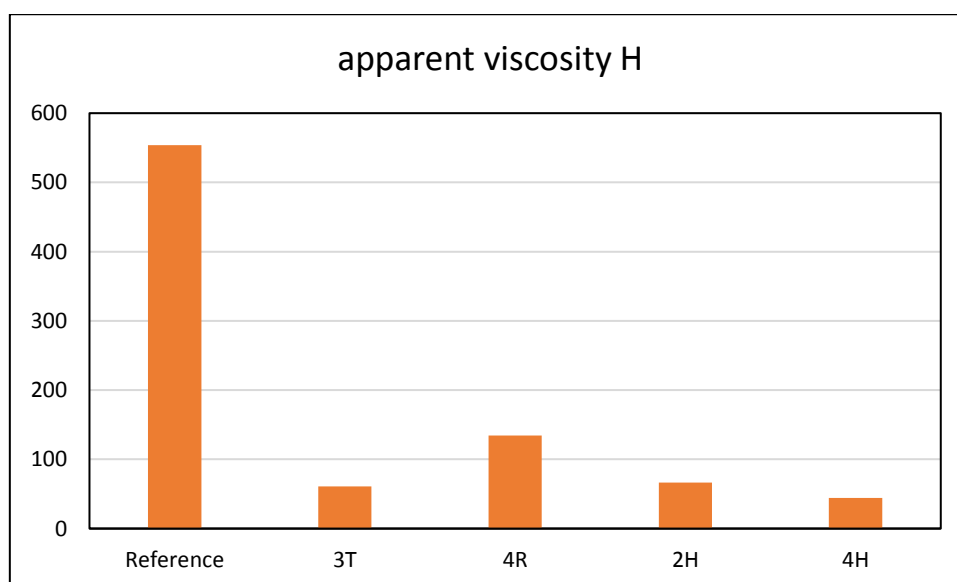


ציור 67 : ערכי הצמיגות המדומה של תערובות במנות מים של 0.77 עם תכולת המוסף האופטימלית (PC-A), תוך השוואה למדגם בקרה ללא מוסף וללא חומר דק המכיל חרסית התוצאות עבור תערובת עם מנת מים של 0.70 מוצגות בציור 68 ו- 69 עבור ערך הכניעה והצמיגות המדומה, בהתאמה.

אכן, הדבר נתן את ביטויי בערך הכניעה כפי שרואים בציור 68 : נראה שעבור החומרים הדקים מתקבלים ערכים דומים של ערך הכניעה. גם כאן, כמו במנת מים של 0.77 הם קטנים בהרבה ממדגם הבקרה, בשעה שבמנת מים של 0.92 הם דומים לו. לגבי הצמיגות המדומה הערכים הרבה יותר קטנים במדגמים המכילים חומרים דקים עם מוסף בתכולה האופטימלית, כאשר ביניהם יש דמיון, ללא תלות ברורה בערך המתילן בלו. מניתוח תוצאות המגמות של ערך הכניעה מסתמך שהתכולות האופטימליות שנקבעו עבור תערובות עם מנת מים של 0.92 יעילות יותר כאשר הן מופעלות בתערובת עם מנת מים של 0.70 בדומה לתצפיות לגבי מנת מים של 0.77.



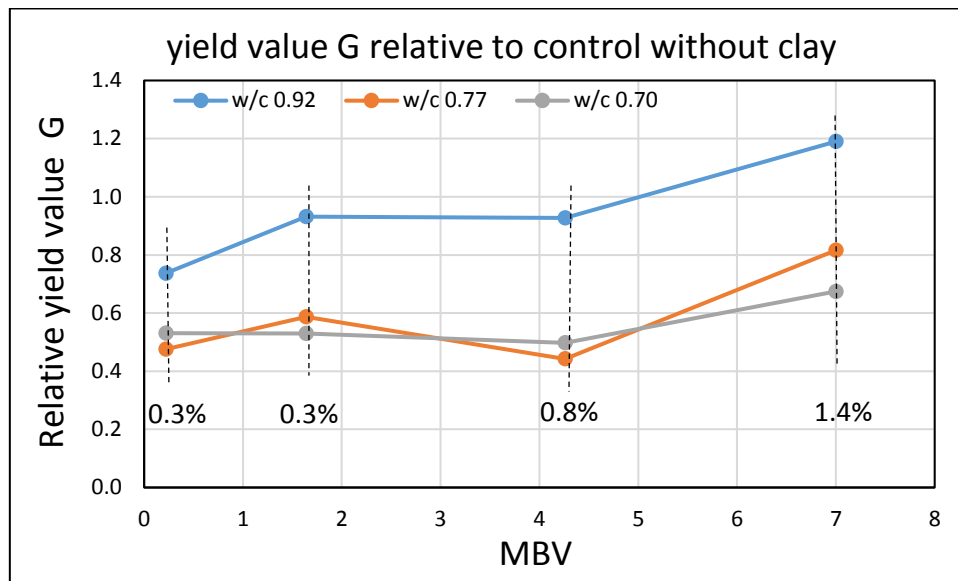
ציור 68 : ערכי הכניעה של תערובות במנות מים של 0.70 עם תכולת המוסף האופטימלית (PC-A), תוך השוואה למדגם בקרה ללא מוסף וללא חומר דק המכיל חרסית



ציור 69 : ערכי הצמיגות המדומה של תערובות במנות מים של 0.70 עם תכולת המוסף האופטימלית (PC-A), תוך השוואה למדגם בקרה ללא מוסף וללא חומר דק המכיל חרסית

לאור המגמות שדווחו כאן, חושבו הערכים היחסיים של ערך הכניעה (ערך הכניעה של המדגם עם החומר הדק יחסית למדגם הבקרה באותה מנת מים ללא חומר דק עם חרסית) ונערכה השוואה עבור מנות המים השונות, ציור 70. ניתן לראות שבמנות המים של 0.77 ו-0.70 ההקטנה הנה הרבה יותר משמעותית בהשוואה למנת מים של 0.92 אשר על פיה נקבעה הערכים האופטימליים של תכולת המוסף. משמעות הדבר שבמנות המים הנמוכות היעילות של המוסף הנה גדולה יותר מזו המתקבלת במנת מים של 0.92.

יחד עם זאת, המגמות בין מדגמי החומר הדק עם החרסית דומות ומבחינה זו ניתן להעריך שהתכולה האופטימלית שנקבעה על בסיס מנות מים 0.92 עבור מדגמים בעלי ערכי מתילן בלו שונים תופסות גם במנות מים אחרות.



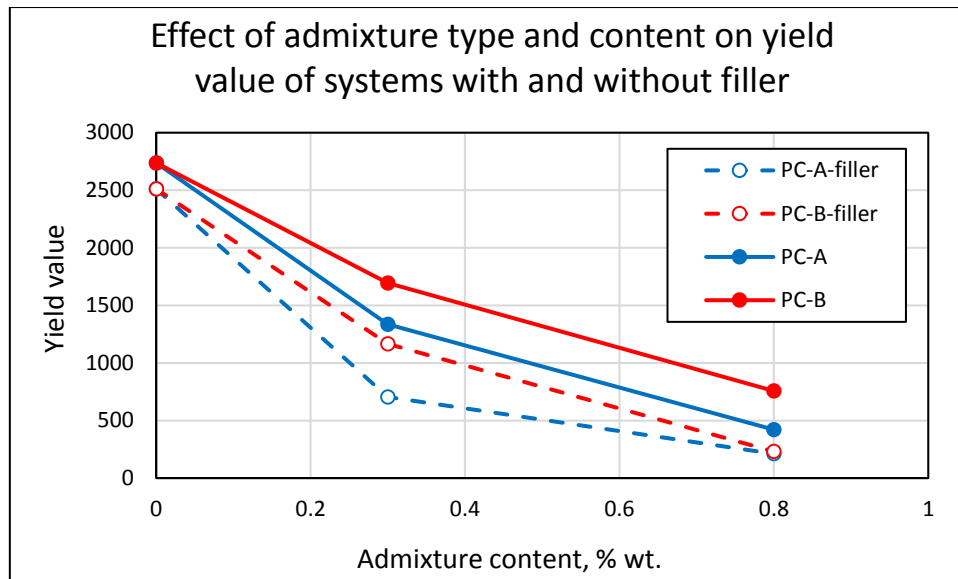
ציור 70: ערכי יחסיים של ערכי הכניעה (מדגמים עם חומר דק המכיל חרסית ותכולת מוסף אופטימלית יחסית למדגם בקרה ללא חומר דק המכיל חרסית וללא מוסף)

13. השוואה בין יעילות מוספים פוליקרבוקסילטיים שונים

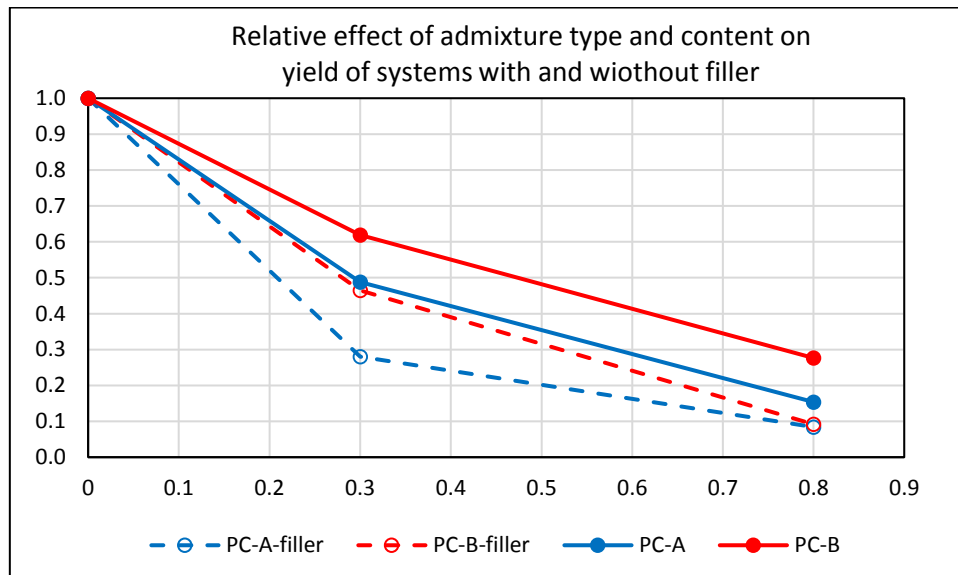
אפיון ההשפעה של המוספים השונים התבסס על קביעת ערכי הכניעה בתערובת מלט 3:1 במנת מים של 0.70. בשלב הראשון של ההשוואה מוצגות התוצאות לגבי מדגמי בקרה עם וללא מלאן אבן גיר אשר גודל חלקיקיו היה בטווח דומה לזה של החומרים הדקים המכילים חרסיות. בשלב השני מוצגת ההשוואה לגבי ההרכבים עם חומרים דקים המכילים חרסיות.

השוואת ההשפעה על מדגמי בקרה עם וללא מלאן אבן גיר

ההשפעה של שני המוספים הפוליקרבוקסילטים החזקים, PC-A ו-PC-B על חולות שאינם מכילים חומר דק חרסיתי מתוארת בציור 71. ניתן לראות שההשפעה של שני המוספים דומה. מעניין לציין שההשפעה של שניהם על הקטנת ערך הכניעה הייתה יותר גדולה כאשר החול הכיל 5% של מלאן אבן גיר דק, ויש בכך ביטוי להתנהגות המאפיינת תערובת של בטון SCC, דהיינו סינרגיה בין נוכחות מלאן ומוסף פוליקרבוקסילטי.



(ב)



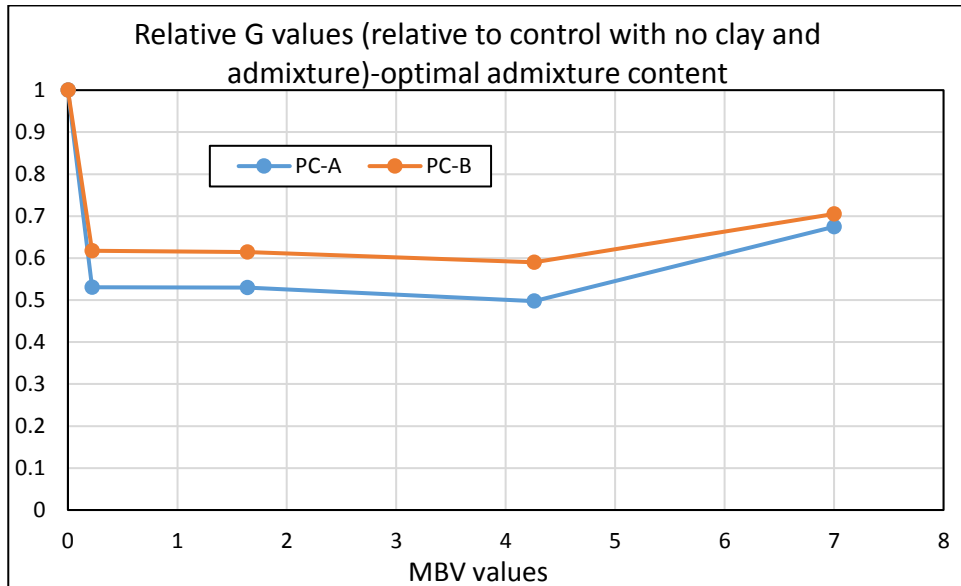
(א)

ציור 71 : השפעת המוספים הפוליקרבוקסילטים על ערך הכניעה האבסולוטי והיחסי בתערובות מחול בקרה ומחול מהונדס המכיל 5% מלאן אבן גיר אשר גדול חלקיקיו קטן, כ- 5 מיקרון בדומה חלקיקי חרסית

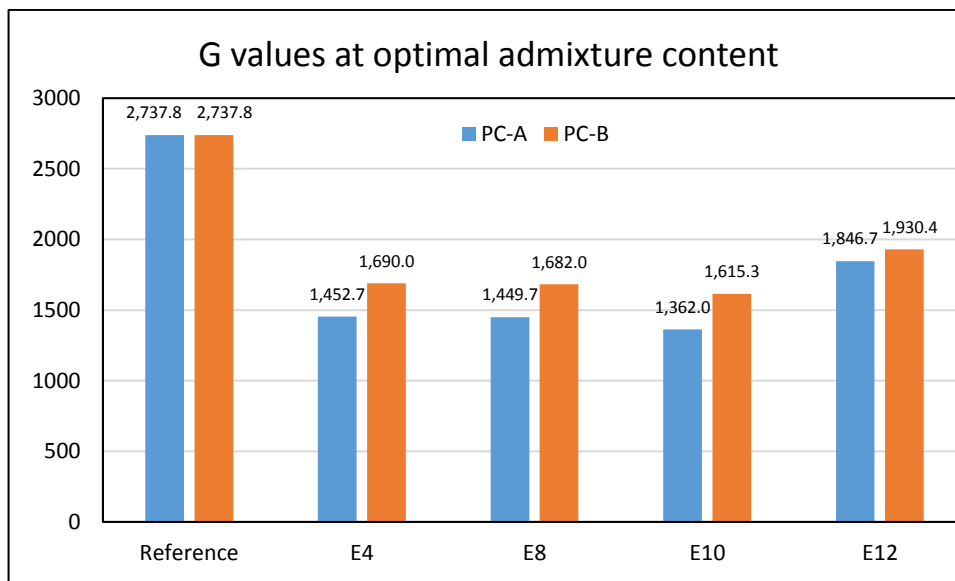
השוואת ההשפעה על מדגמים עם חומרים דקים חרסיתיים

ההשוואה בין ההשפעה של שני המוספים הפוליקרבוקסילטים על ערך הכניעה בחולות מהונדסים המכילים חרסיות בעלות ערכי מתילן בלו שונים (קטנים – 0.22 ו-1.64, בינוניים – 4.26 וגבוהים – 7.00) מוצגת בציור 72 תוך השוואה למדגם בקרה מחול ללא חומר חרסיתי וללא מוסף. תכולות שני המוספים הנן זהות ומותאמות לערך מתילן בלו של החול המהונדס (0.3% בערך הנמוך של מתילן

בלו- 0.22 ו- 1.64, 0.8% בערך הבינוני של מתילן בלו – 4.26, ו- 1.4% בערך הגבוה של מתילן בלו – (7.00)



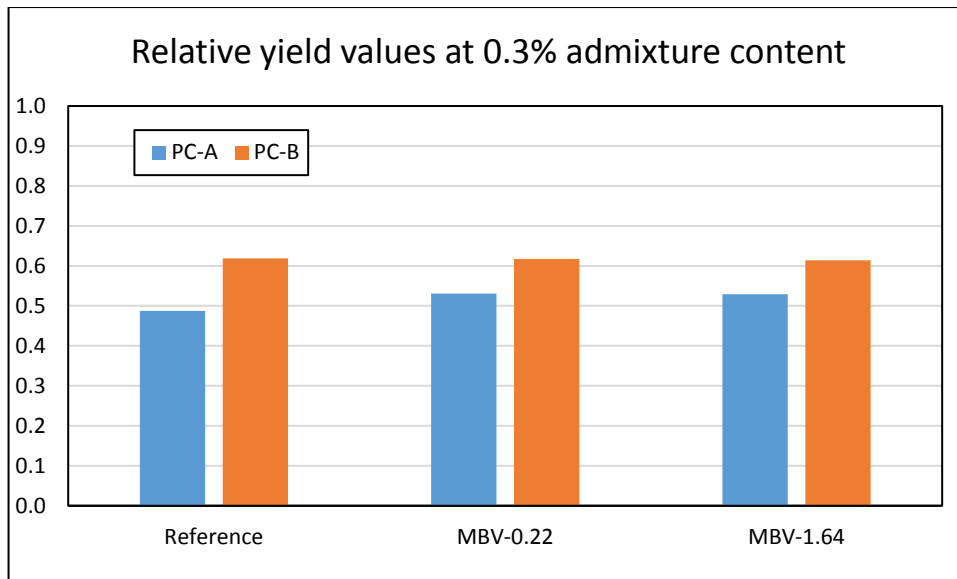
(ב) ערכים יחסיים



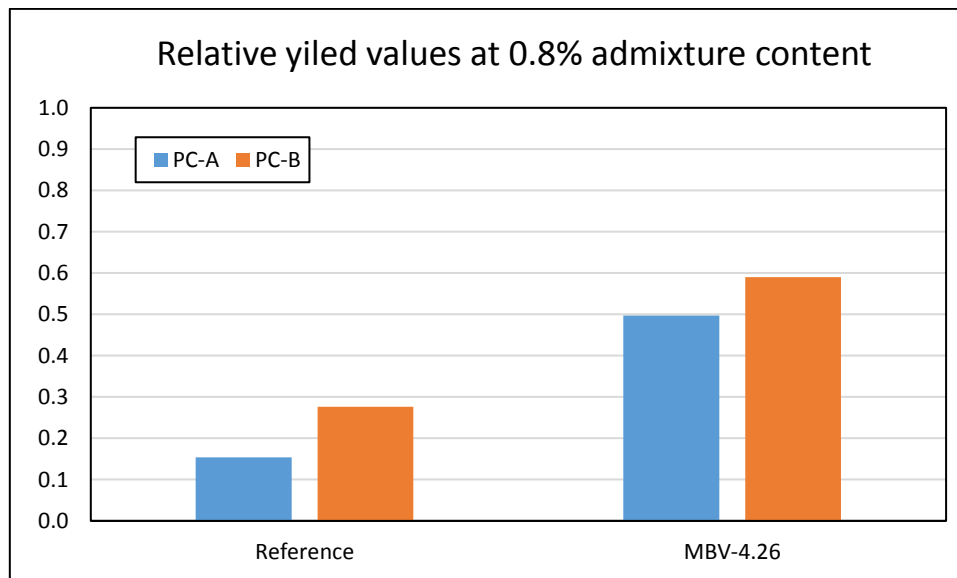
(א) ערכים אבסולוטיים

ציור 72 : השפעת המוספים הפוליקרבוקסילטים החזקים על ערכי הכניעה של תערובות מלט מחולות מהונדסים המכילים חומר דק חרסיתי בעל ערכי מתילן בלו נמוכים (E4, E8 – 0.22 ו- 1.64 בהתאמה), בינוניים (E10 – 4.26) וגבוהים (E12 – 7.00), תוך השוואה למדגם רפרנס של חול ללא חומר דק.

בציורים 73 ו- 74 מוצגות התוצאות היחסיות של השפעת המוספים הללו עבור החולות הסינטטיים בעלי ערכי מתילן בלו נמוכים ובינוניים, תוך המחשה של הדמיון בהשפעה של שני המוספים הללו.



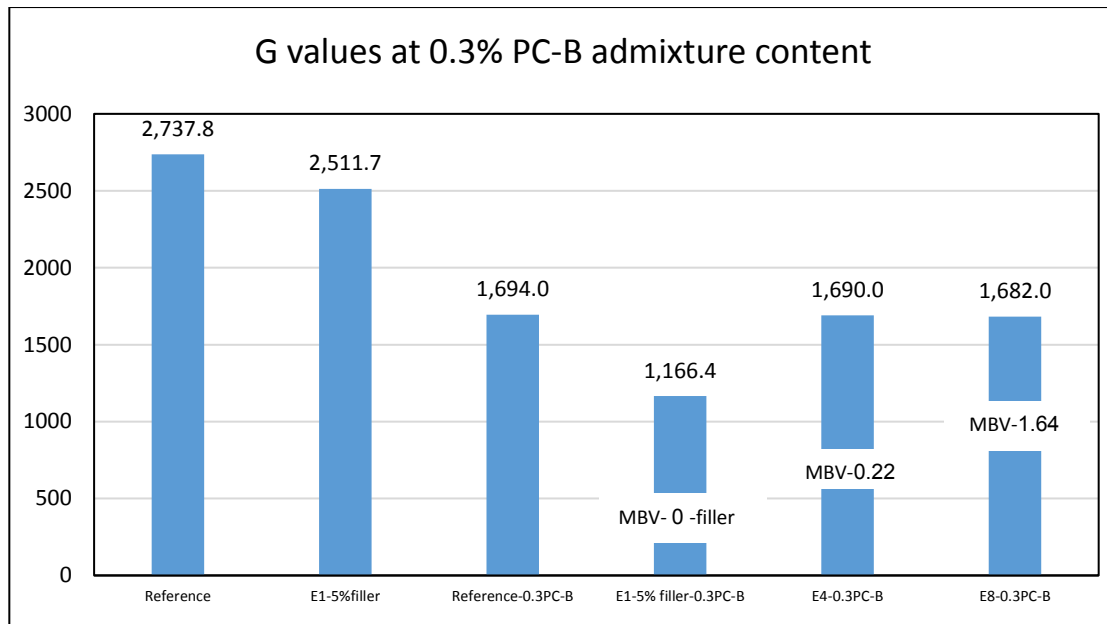
ציור 73 : ההשפעה של המוספים הפוליקרבוקסילטים החזקים על ערך הכניעה היחסי של מלטים מחולות מהונדסים בעלי ערך מתילן בלו נמוך, יחסית לחול בקרה ללא דקים וללא מוסף.



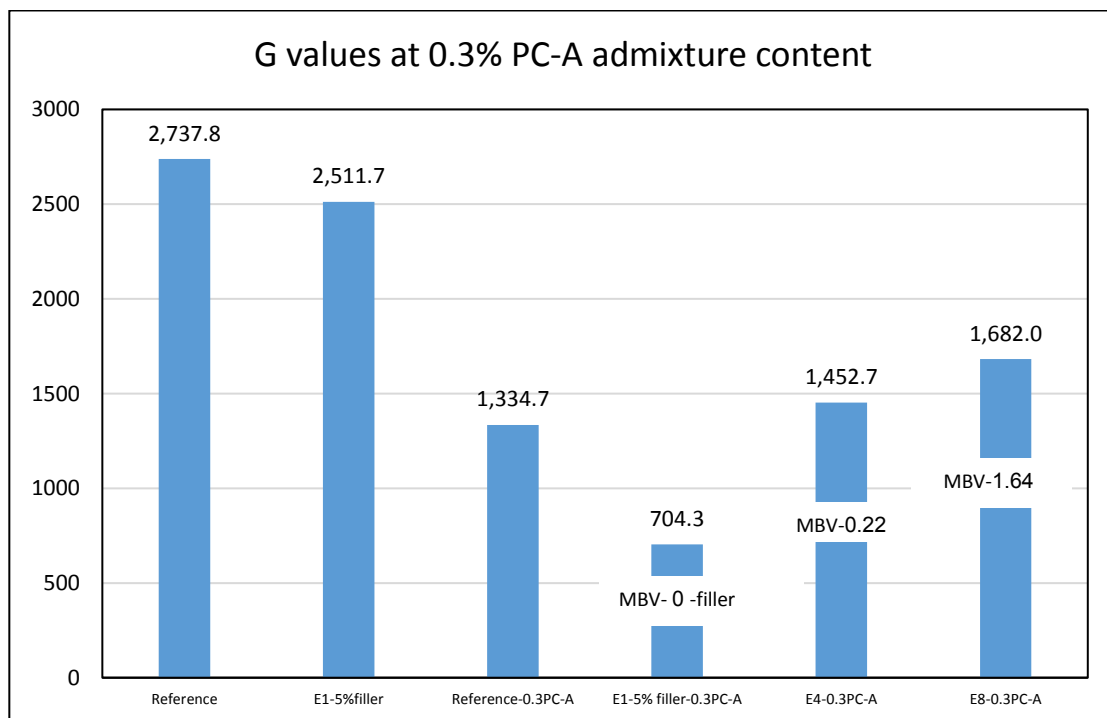
ציור 74 : ההשפעה של המוספים הפוליקרבוקסילטים החזקים על ערך הכניעה היחסי של מלטים מחולות מהונדסים בעלי ערך מתילן בלו בינוני, יחסית לחול בקרה ללא דקים וללא מוסף.

ההשוואה לעיל הייתה ביחס למדגם בקרה באותה מנת מים אשר לא הכיל מוסף, דהיינו המדגם המכיל חרסית עם מוסף, ביחס למדגם בקרה ללא חרסית וללא מוסף. לצורך השוואת היעילות של המוסף במדגמים עם חול בקרה ללא חומר דק חרסיתי ועם חומר דק חרסיתי נערכו מספר ניסויים אשר בהם שולב מוסף גם בחול הבקרה, כשהוא ללא כל מוסף דק (reference) ועם 5% מלאן אבן גיר נקי filler (E1-5% filler) בהשוואה לחול המכיל חומר דק חרסיתי בעל ערכי מתילן בלו שונים : ערכי מתילן בלו נמוכים של 0.22 ו-1.64 (ציור 75) ובינוניים של 4.26 (ציור 76). ניתן להבחין בהבדלים משמעותיים במגמות המתקבלות לגבי ההשפעות של חולות סינטטיים בערכי מתילן בלו נמוכים ובינוניים :

- בערכי מתילן בלו הנמוכים (ציור 75) ההשפעה של המוספים הפוליקרבוקסילטיים החזקים די דומה בכל הקשור להקטנת ערכי הכניעה, בדומה למדגם הבקרה ללא דקים כלל (reference), כאשר במדגם הבקרה עם מלאן אבן גיר דק (E1 – 5% filler) היעילות של המוספים גדולה יותר גם בהשוואה למדגם הבקרה ללא דקים. מגמה זו מביאה לידי ביטוי אפקט של SCC
- בערך מתילן בלו בינוני (ציור 76) היעילות של המוספים הפוליקרבוקסילטיים החזקים קטנה בהרבה בהשוואה למדגם הבקרה ללא דקים כלל (reference), כאשר היעילות של המוספים הנה עוד הרבה יותר גדולה במדגם הבקרה עם מלאן אבן גיר דק (E1 – 5% filler) אשר בו האפקט של SCC הנו ברור ביותר.

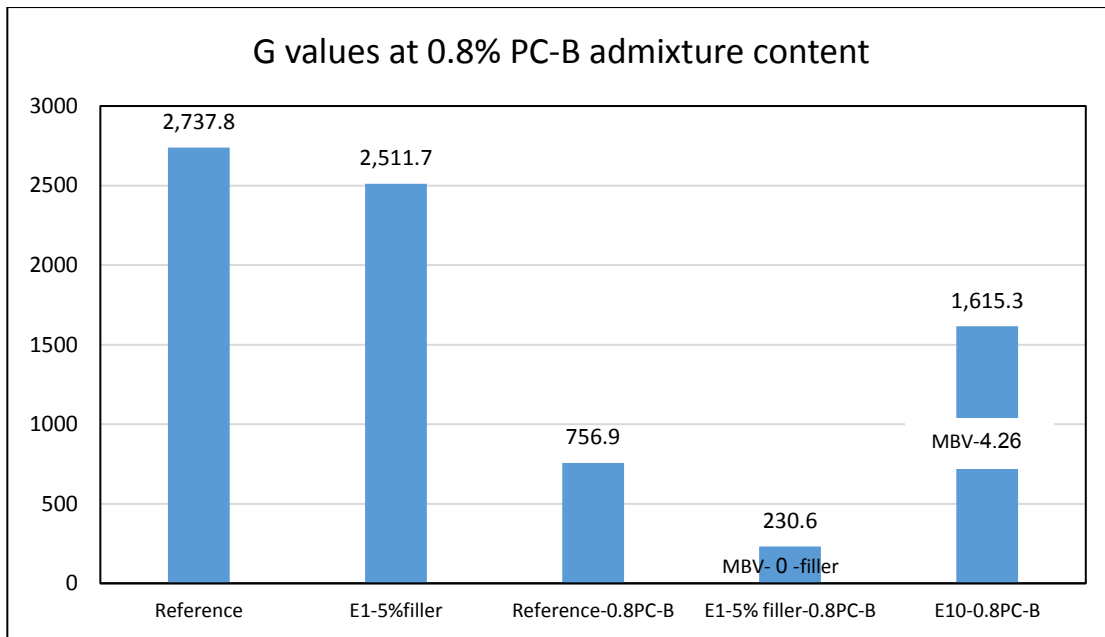


(ב) מוסף PC-B

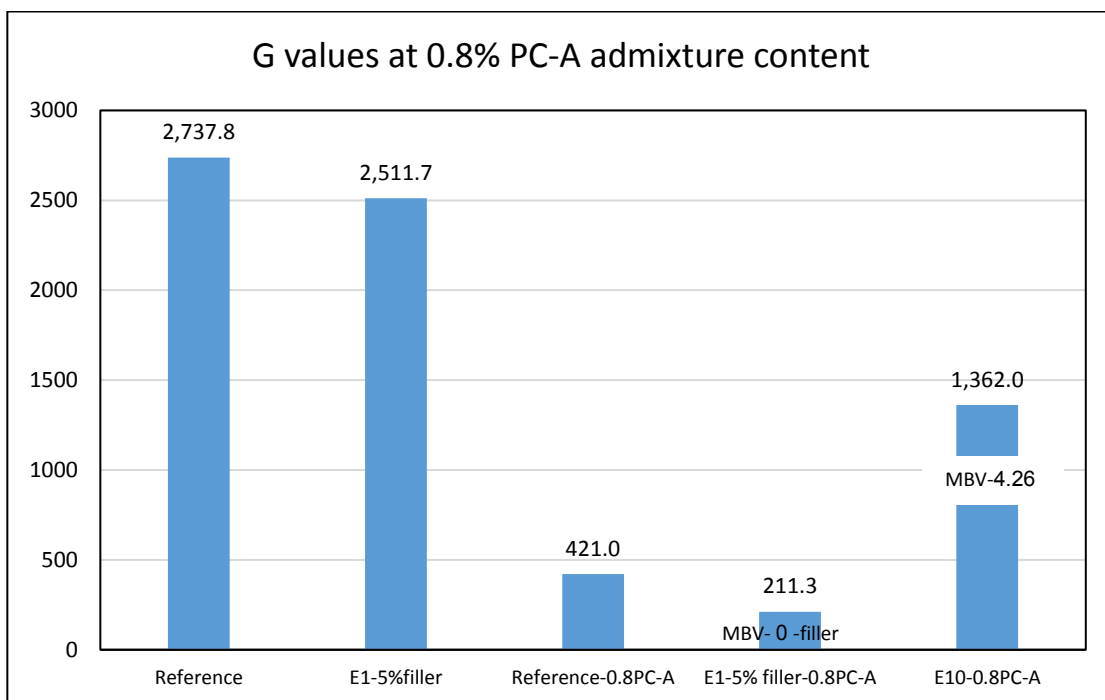


(א) מוסף PC-A

ציור 75 : השפעת מוספים פוליקרבוקסילטיים חזקים על ערך הכניעה של מדגמי בקרה (חול בקרה, חול סינטטי עם מלאן אבן גיר דק) עבור חולות מהונדסים עם ערכי מתילן בלו נמוכים, 0.22 ו- 1.64



(ב) מוסף PC-B



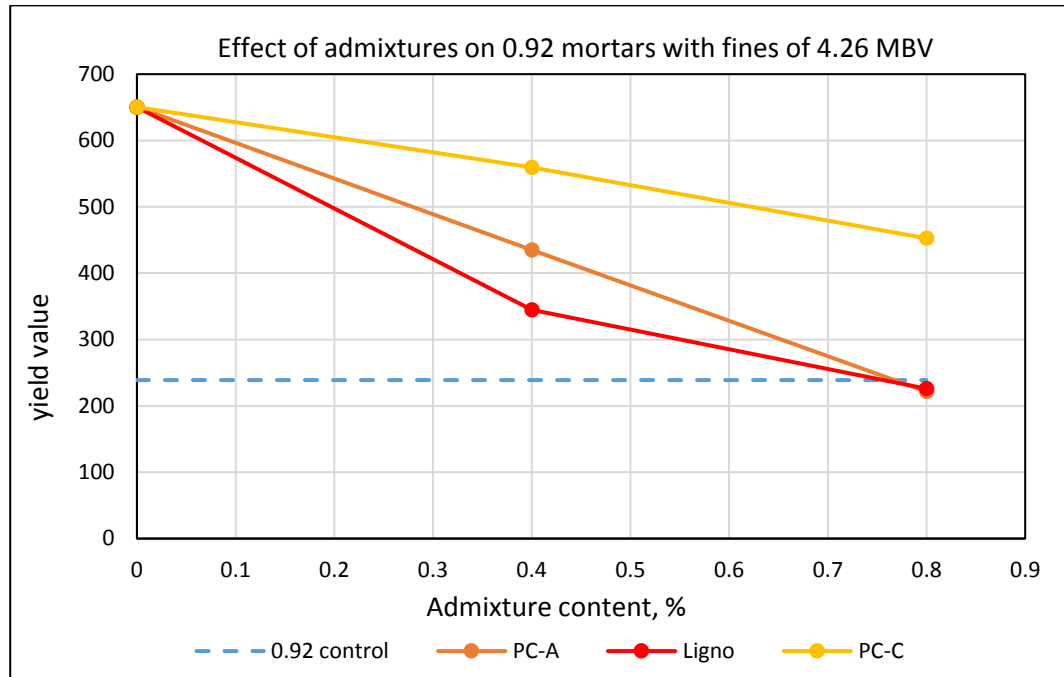
(א) מוסף PC-A

ציור 76 : השפעת מוספים פוליקרבוקסילטיים חזקים על ערך הכניעה של מדגמי בקרה (חול בקרה, חול סינטטי עם מלאן אבן גיר דק) עבור חולות מהונדסים עם ערך מתילן בלו בינוני (4.26)

14. השוואת ההשפעה של מוספים פוליקרבוקסילטים חלשים

וליגנוסולפונטים

ההשוואה של התפקוד של מוספים חלשים יותר, פוליקרבוקסילט בעל יכולת הפחתת מים נמוכה יותר (PC-C) וליגנוסולפונט מתוארת בציור 77 עבור תערובות מלט במנת מים 0.92, עבור חול סינטי בעל ערך מתילן בלו בינוני של 4.26. נערכת שם השוואה למדגם בקרה עם חול ללא דקים כלל. היעילות הנמוכה יותר של הפוליקרבוקסילט החלש באה לידי ביטוי בולט בציור זה. לעומת זאת מפתיע היעילות הגבוהה יחסית של הליגנוסולפונט.

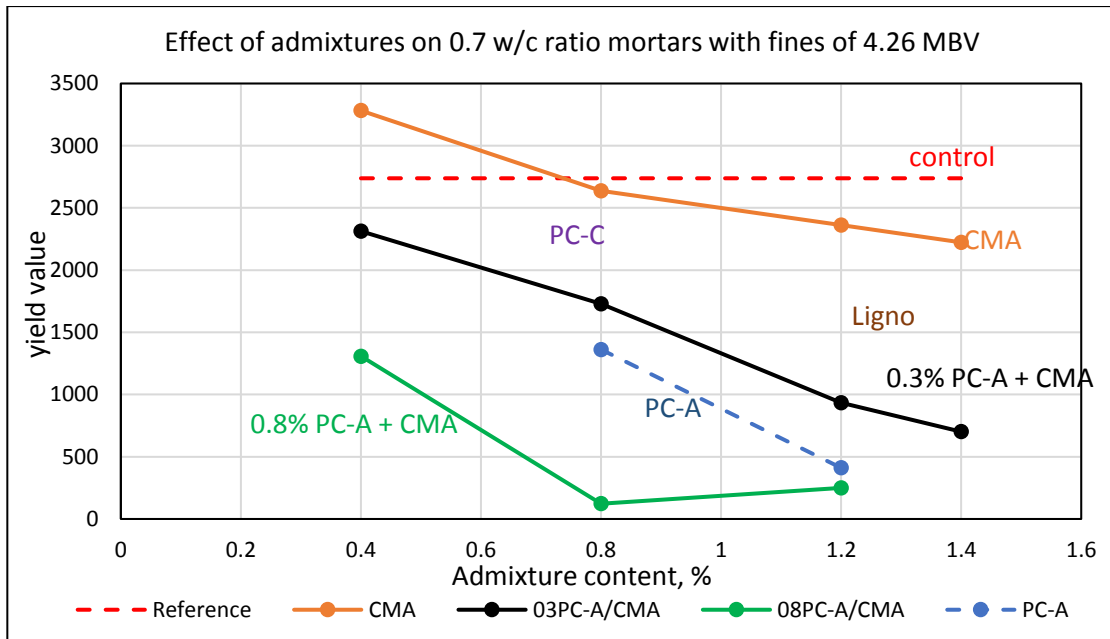


ציור 77 : השפעת מוספים פוליקרבוקסילטיים, חזק (PC-A) וחלש (PC-C) ומוסף ליגנוסולפונט על ערך הכניעה של מערכת עם חול מהונדס בעל ערך מתנול בלו בינוני של 4.26

15. שילוב של פוליקרבוקסילטים עם מוספים מנטרלי חרסית

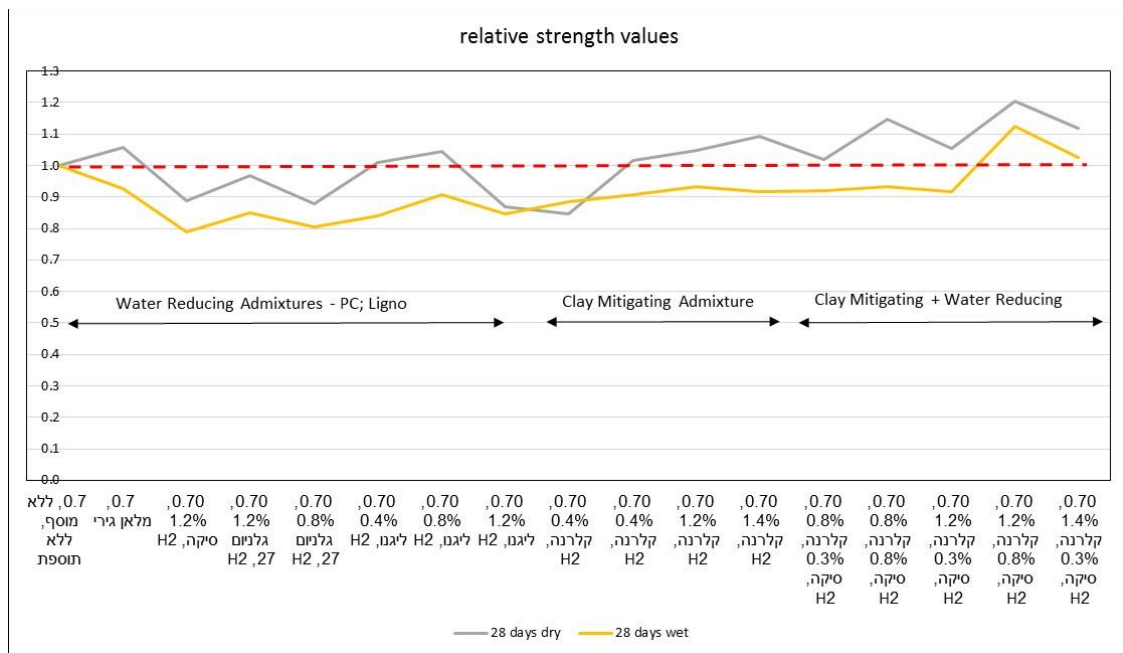
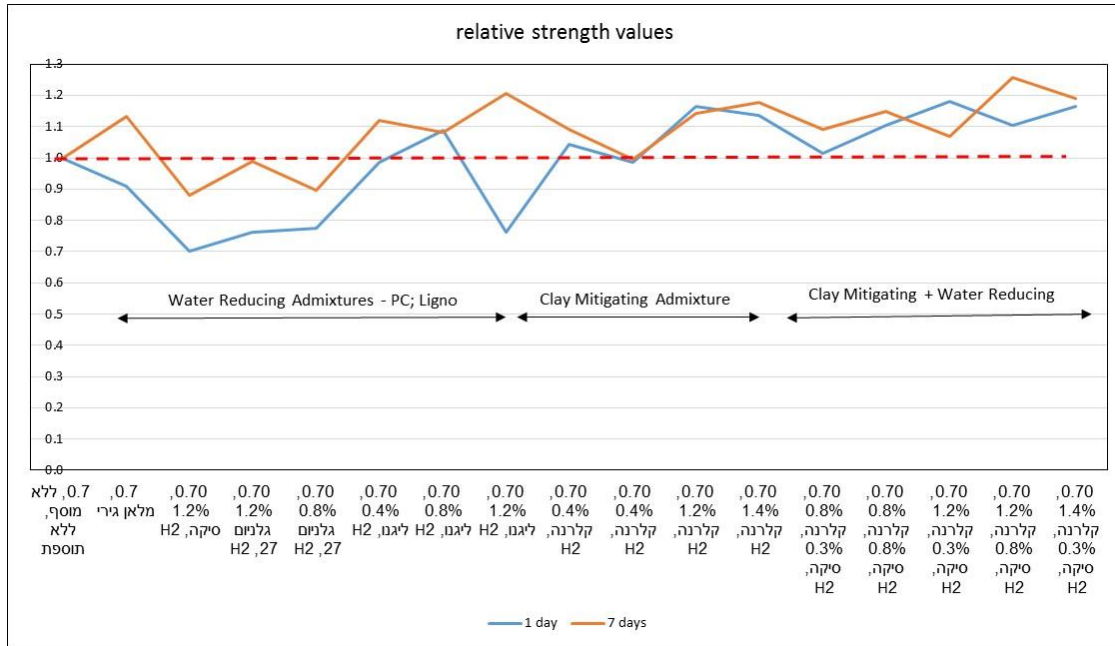
לאור הקטנת היעילות של המוסף הפוליקרבוקסילטי בחול סינטי אשר בו ערכי המתילן בו בינוניים וגבוהים, והצורך בתכולה מאד גבוהה של מוסף זה לקבלת השפעה משמעותית על הקטנת ערך הכניעה, נבחנה האפשרות לשיפור היעילות שלו על ידי שילוב עם מוסף מנטרל חרסית, CMA. התוצאות מוצגות בציור 78 לגבי מלט במנת מים של 0.70 מצביעות על מספר מגמות :

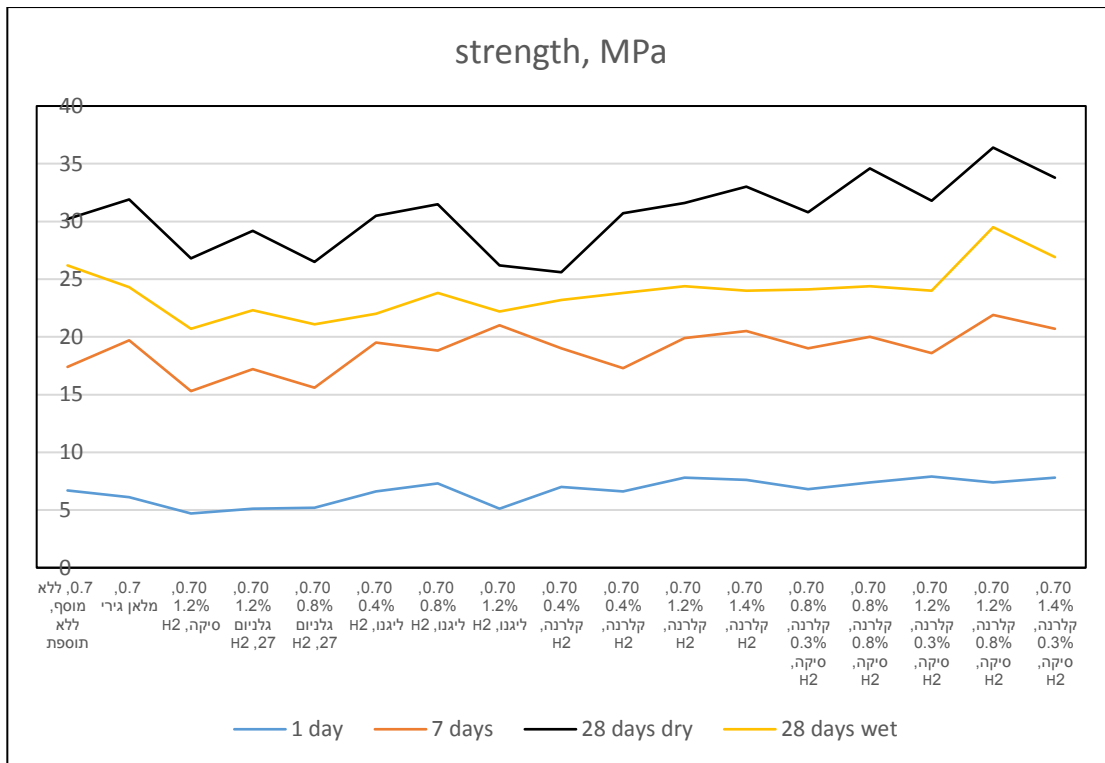
- למוסף מנטרל חרסית בפני עצמו השפעה קטנה יחסית על ערך הכניעה
- השילוב של עם המוסף הפוליקרבוקסילטי משפר בצורה משמעותית את יעילות המוסף, כפי שבא לידי ביטוי בשיפור יכולתו להקטין את ערך הכניעה מעבר לזו המתקבלת עם המוסף הפוליקרבוקסילטי לבד כשהוא בתכולת 0.8% (השוואה של עקום 0.8% PC-A + CMA עם עקום 0.3% PC-A), או לחלופין לקבל הקטנה דומה עם תכולה נמוכה יותר של המוסף, 0.3% לעומת 0.8% (השוואה של עקום 0.3% PC-A + CMA עם עקום 0.8% PC-A).



ציור 78 : השפעת מוסף מנטרל חרסית (CMA) עם וללא שילוב עם מוסף פוליקרבוקסילטי (PC-A) על ערך הכניעה בתערובת מלט עם חול סינטטי בעל ערך מתילן בלו של 4.26 ומנת מים של 0.70 ; תכולת המוסף הפוליקרבוקסילטי ששולב עם מנטרל החרסית הייתה 0.3% או 0.8%, ותכולת המוסף מנטרל החרסית השתנתה בטווח של עד 1.4%. בציור נערכת השוואה עם מדגם בקרה מחול ללא דקים כלל.

השפעת המוספים השונים על החוזק, בהשוואה לחוזק של מדגם בקרה מחול בקרה ללא תוספת דקים מוצגת בציור 79.





ציור 79: ערכי חוזק אבסלוטיים ויחסיים של מלט במנת מים של 0.70 עם חול מהונדס בעל ערך מתילן בלו של 4.26 עם מוספים שונים בהשוואה למערכת רפרנס באותה מנת מים עם חול ללא דקים

ניתן להבחין מציור 79 במספר מגמות:

- החוזק היחסי ברטוב נמוך יותר מהחוזק ביבש כמעט בכל תוספות המוספים וניתן אולי ליחס זאת להשפעת החרסית בפרקציה הדקה של החול אשר מכילה כ- 30% מונטמורילוניט (כ- 1.5% מהחול המהונדס)
- ניתן לאפיין שלושה אזורי השפעה של המוספים כפי שרואים על גבי העקומים של החוזק היחסי (ציורים 79 ב' ו- ג'):
 - אזור של מוסף מפחית מים (פוליקרבוקסילט וליגנוסולפונט) שבו יש נטייה לחוזק יחסי נמוך יותר מ- 1 (חוזק נמוך מהרפרנס בשיעור של עד 10% – 20%); אזור של שילוב שני מוספים, מנטרל חרסית + מפחית מים, אשר בו החוזק היחסי גבוה מ- 1 (חוזק גבוה מהרפרנס בשיעור של עד כ- 10-20%), כאשר ביניהם אזור של מוסף מנטרל חרסית אשר בו החוזק היחסי הוא בסיביות 1 (נע בין 10%- ל- 10% + מהרפרנס בגיל של 28 ימים, וכ 0% עד 10% + מהרפרנס בגיל של 1 ו- 7 ימים).

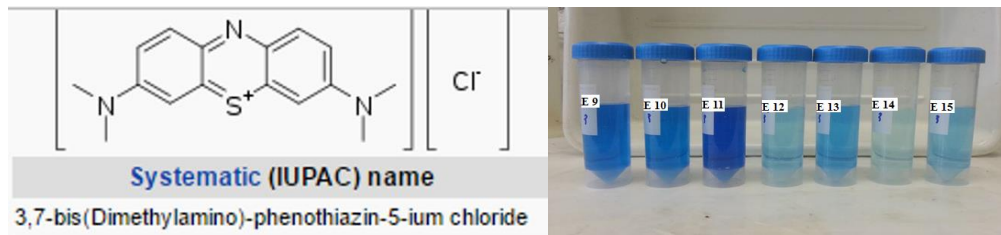
החוזק הנמוך יותר כאשר נעשה שימוש רק במוסף מקטין מים נמצא בהתאמה לתצפית של הקטנת החוזק במדגמים המכילים חרסית, ראה ציורים 56 ו- 57 אשר מצביעים על הקטנת חוזק בשיעור של כ- 20% עבור ערכי מתילן בלו של כ- 4. ההסבר שניתן שם היה קשור בהשפעת גרגרי החרסית. ייתכן שנטרול השפעתם באמצעות מוסף מנטרל חרסית משפיע לא רק על העבירות כי אם גם על השפעתם השלילית על החוזק.

חלק ד: סיכום ומסקנות

16. סיכום ומסקנות

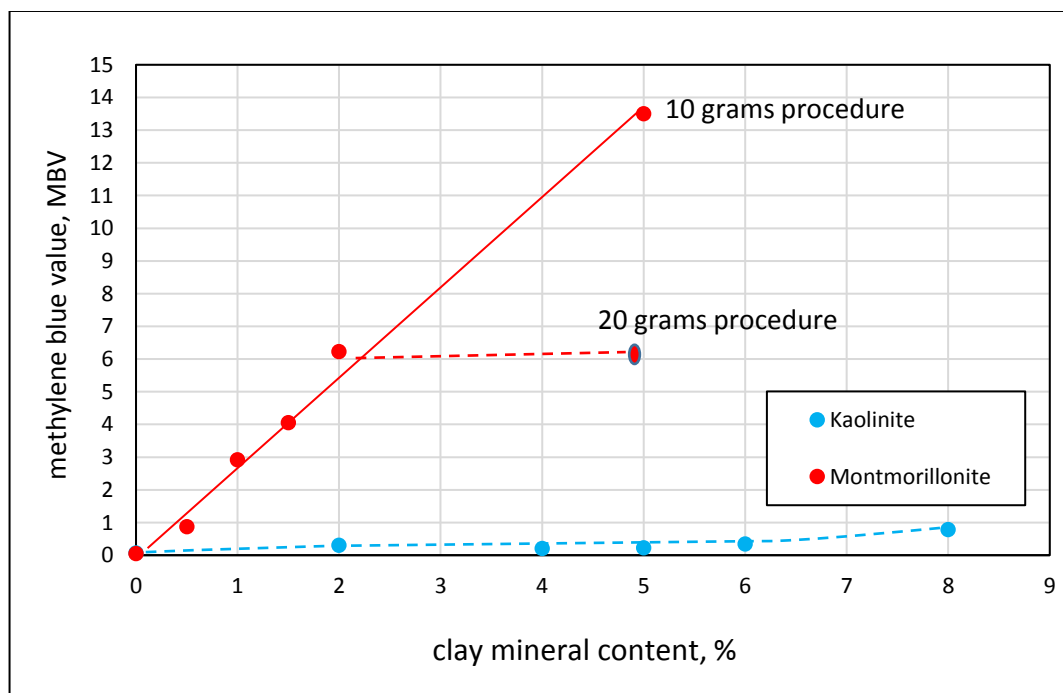
בדיקת המתילן בלו

- בדיקת המתילן בלו מבוססת על מדידה כמותית של שינוי הצבע בתמיסת מתילן בלו, כאשר מולקולת המתילן בלו מקנה לתמיסה כוון כחול. המולקולה הזו נספחת אל חרסית וכתוצאה מכך צבע התמיסה משתנה ככל שתכולת החרסית גדולה יותר והרכבה נוטה יותר לספיחה של מולקולה זו (מונטמורילוניט לעומת קאוליניט), ציור 80. מתקבל בבדיקה התקנית ערך של מתילן בלו המבטא את כמות המתילן בלו שנספחה.

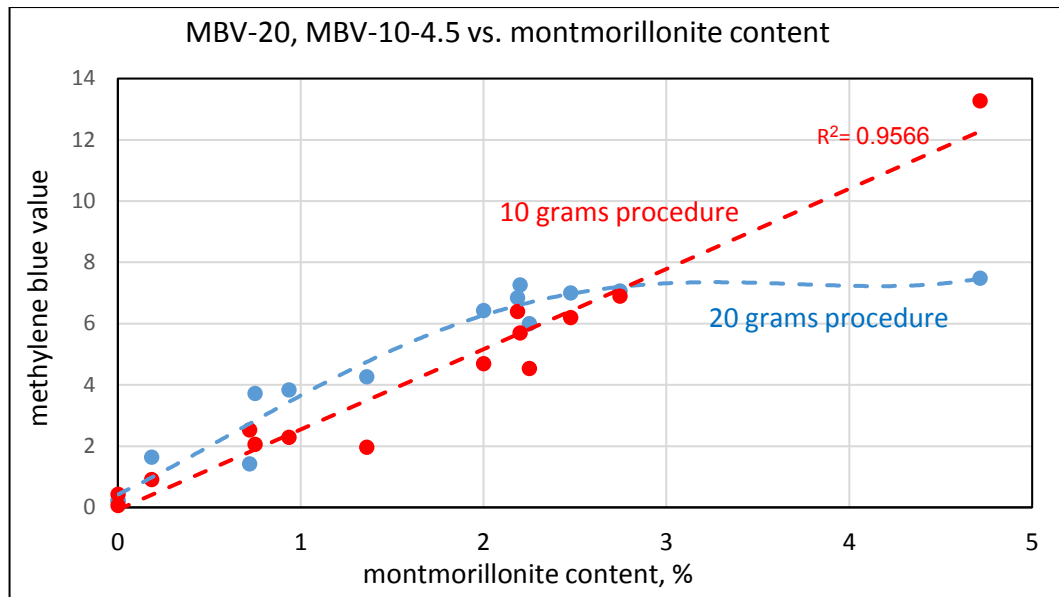


ציור 80: מולקולת מתילן בלו ושינוי צבע התמיסה כתוצאה ממגע עם חולות העלי תכולה והרכב שונה של חרסיות

- עקום כיוול מצביע על קשר בין תכולת והרכב החרסיות במדגם הנבדק ובין ערך מתילן בלו; כאשר הערך המדוד של המתילן בלו מעל 6 יש צורך לעוד עם התהליך המבוסס על מדגם של 10 ג"מ (20 ג"מ מדגם בבדיקה הרגילה), ציור 80



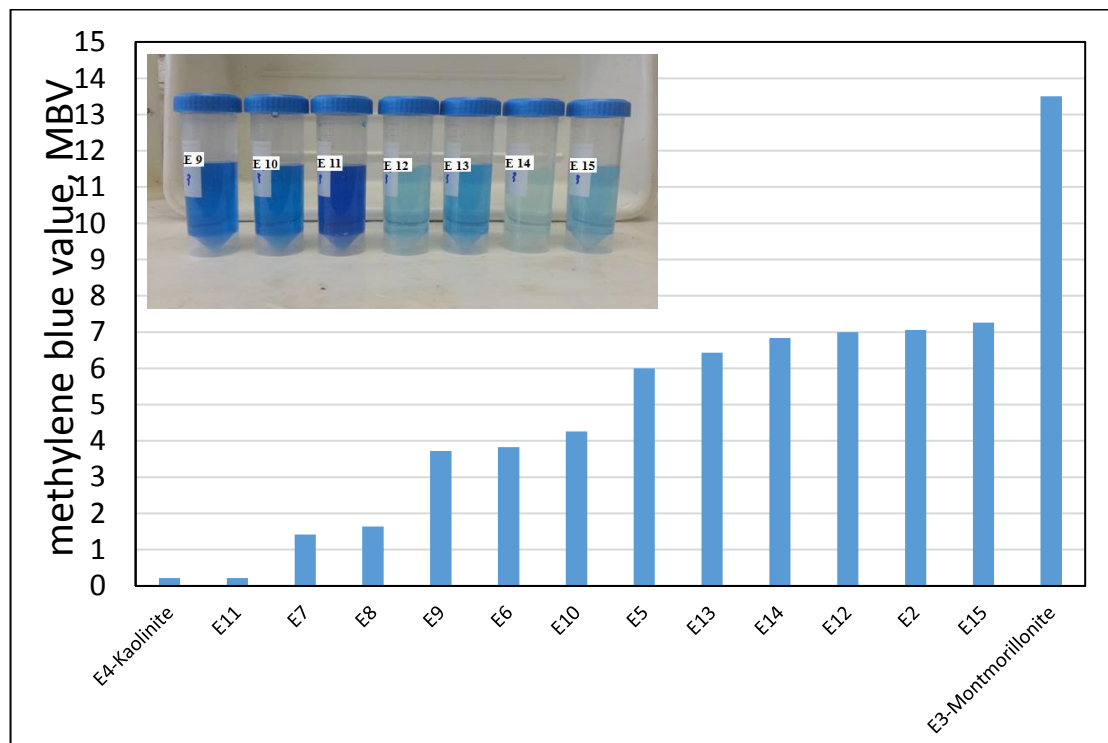
(ב)



(א)

ציור 81 : הקשר בין הערך של מתילן בלו והרכב ותכולת החרסית בחולות מהונדסים (א) ובתערובות לכיול (ב)

החולות המהונדסים שנבדקו בעבודה היו בכל הטווח הרלוונטי, החל מערכים נמוכים של מתילן בלו עד לערכים גבוהים של כ- 7.0 (ציור 82)

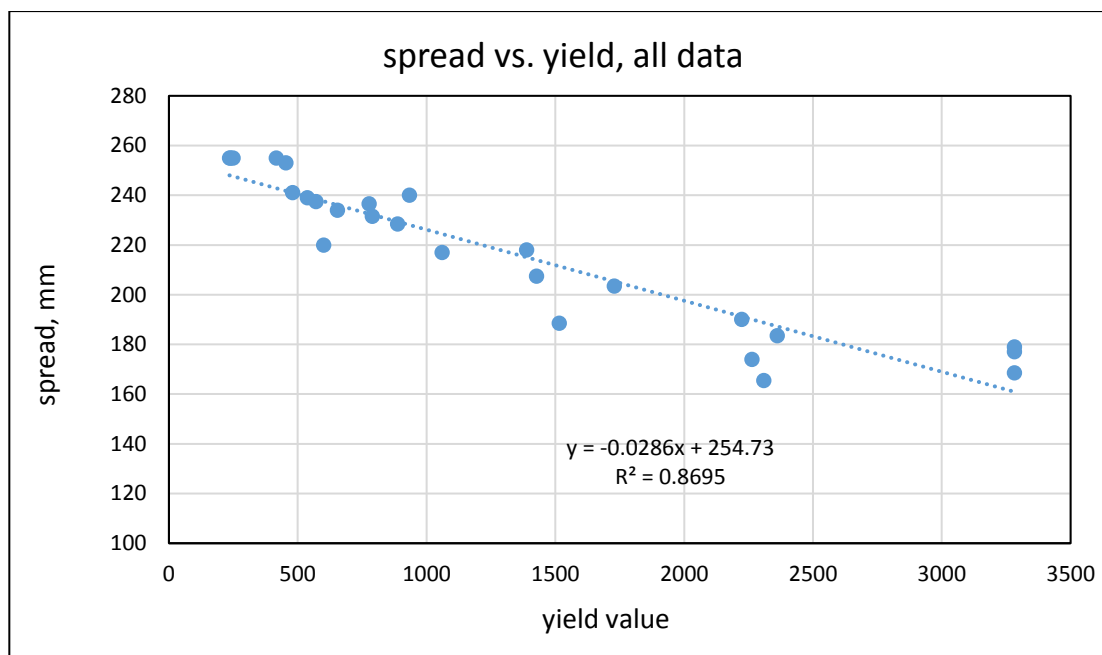


ציור 82 : טווח ערכי מתילן בלו של החולות המהונדסים

עבדות

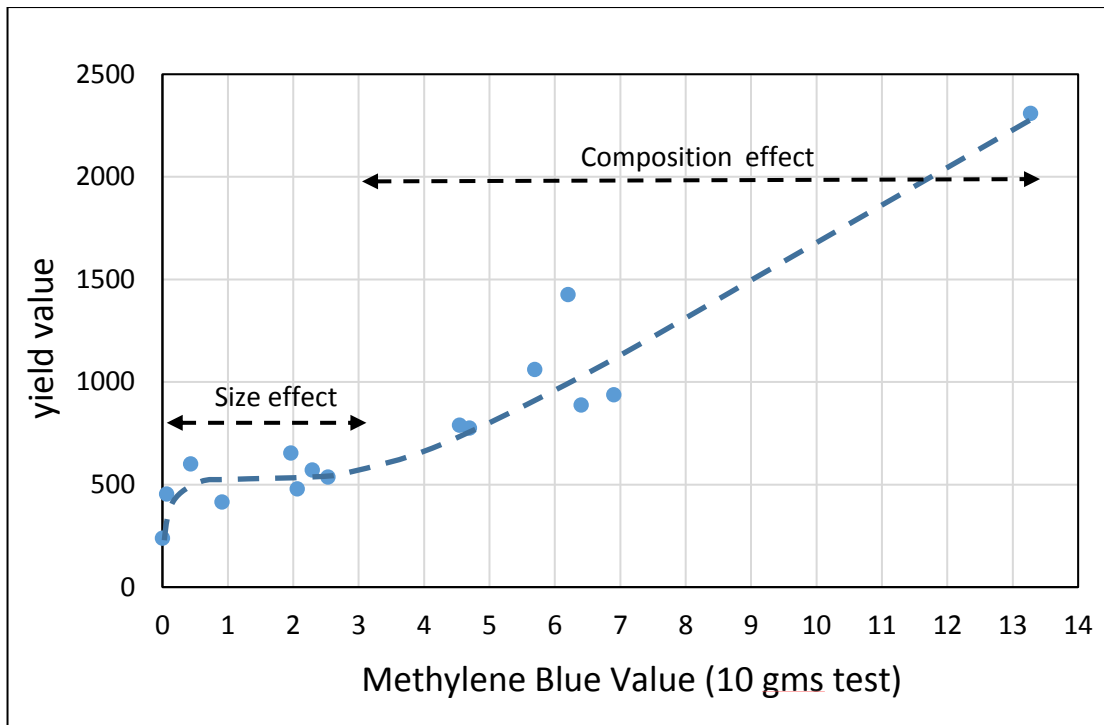
- נמצאו קשרי גומלין לינאריים בין עבדות המאופיינת באמצעות השירוע בבדיקת שולחן זרימה ובין זו הנקבעת באמצעות ערך הכניעה בבדיקה ריאולוגית בויסקומטר, ציור 83.

הבדיקה בויסקומטר פחת רגישה ליד אדם ועל כן יש לה עדיפות ולפיכך יש טעם בהשקעה בהקמת תשתית בדיקה זו במעבדה מרכזית, לצד ציוד של שולחן זרימה במעבדות שדה.



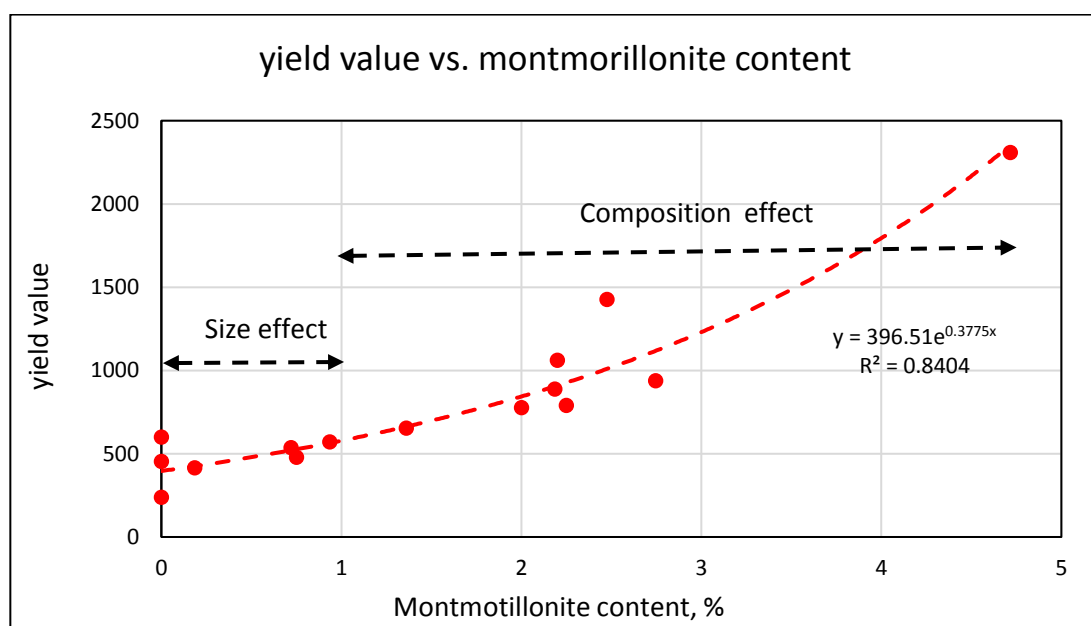
ציור 83: קשר בין אפיון עבירות באמצעות השירוע המתקבל בשולחן זרימה וערך הכניעה המתקבל בבדיקה ריאולוגית באמצעות ויסקומטר

- ניתן לאפיין את השפעת החומר הדק על העבירות של חול במערכת צמנטית באמצעות הערך של המתילן בלו, ציור 84: עד למתילן בלו של כ- 3 ערך הכניעה קצת יותר גדול מתערובת בקרה של חול ללא דקים חרסיתיים (דהיינו הפסד עבירות קטן יחסית) והחל מערך מתילן בלו של 3 יש גידול מונוטוני ומשמעותי במאמץ הכניעה (דהיינו הפסד עבירות) עם הגידול בערך של מתילן בלו.



ציור 84 : התלות של ערך הכניעה בערך של מתילן בלו

- בהתבסס על הקשר שבין הערך של מתילן בלו והרכב המינרלוגי (ציור 85) ניתן להסביר את העקום בציור 84 בהשפעה של גדול חלקיקי החרסית עד למתילן בלו של 3, ובערכי מתילן בלו גבוהים יותר השינוי בעבירות הוא תוצאה של שינוי בהרכב החרסית, של גידול בתכולת המונטמורילוניט שבה

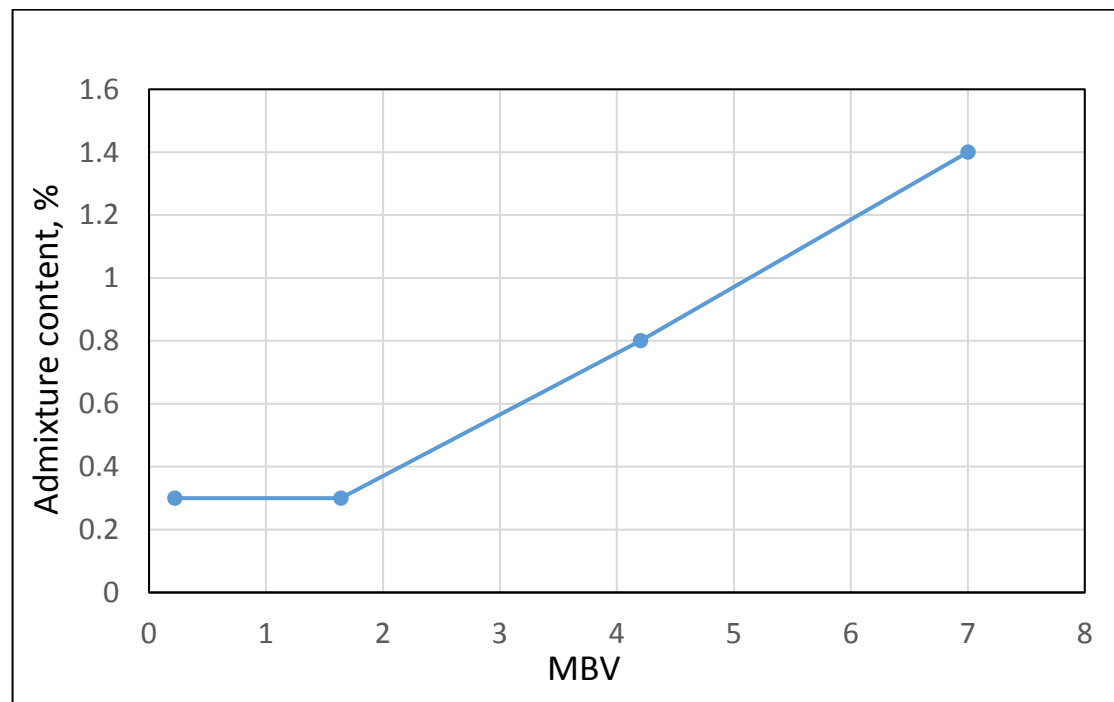


ציור 85 : הקשר בין ערך הכניעה ותכולת המונטמורילוניט בחול

- מניתוח זה ניתן להסיק שאפשר להגדיר את איכות החול בכל הקשור להשפעת החומר החרסיתי אשר נמצא בדקים על העבידות באמצעות הערך של מתילן בלו, אשר אותו ניתן לקבוע בבדיקה פשוטה יחסית ומהירה באמצעות מכשור קולורימטרי

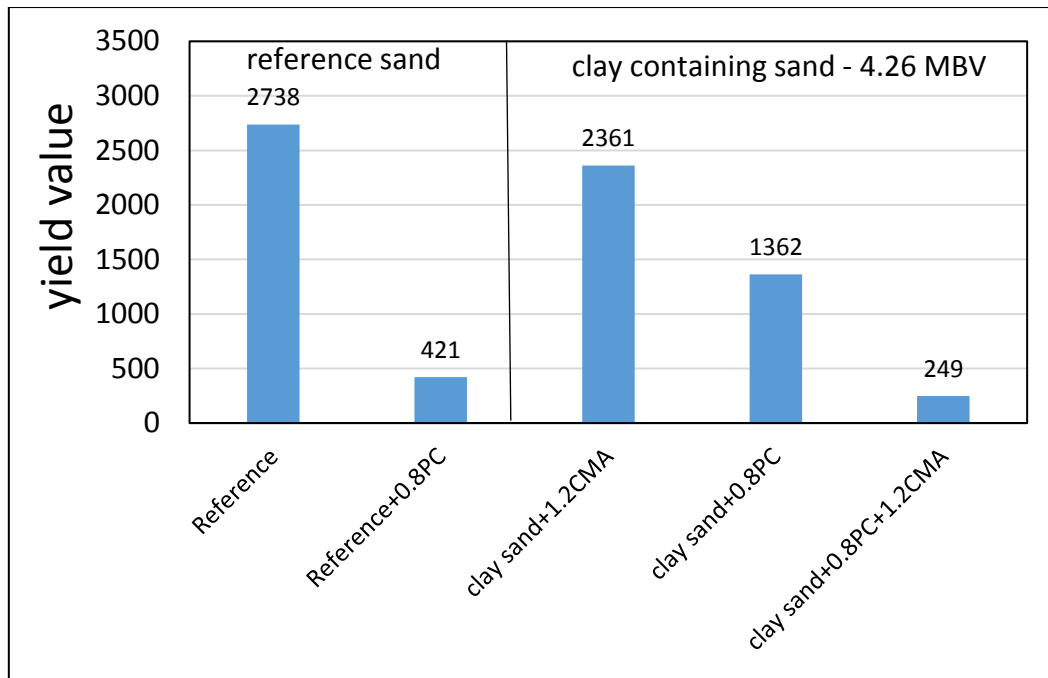
מוספים לנטרול השפעת החרסית על העבידות

ניתן לנטרל את השפעת החרסית על הקטנת העבידות על ידי מוספים מקטיני תצרוכת מים (משפרי עבידות), ציור 86. תכולת המוסף הנדרשת לנטרול השפעה זו הנה קטנה יחסית עבור חול עם ערכי מתילן בלו נמוכים, והיא הולכת וגדלה עם הגידול בערך המתילן של החול. ההסבר האפשרי לכך הוא ספיחה של המוסף אל המונטמורילוניט (שנוכחותו מאופיינת על יד הערך של מתילן בלו) ובכך ניטרולו כמוסף המשפר עבידות.



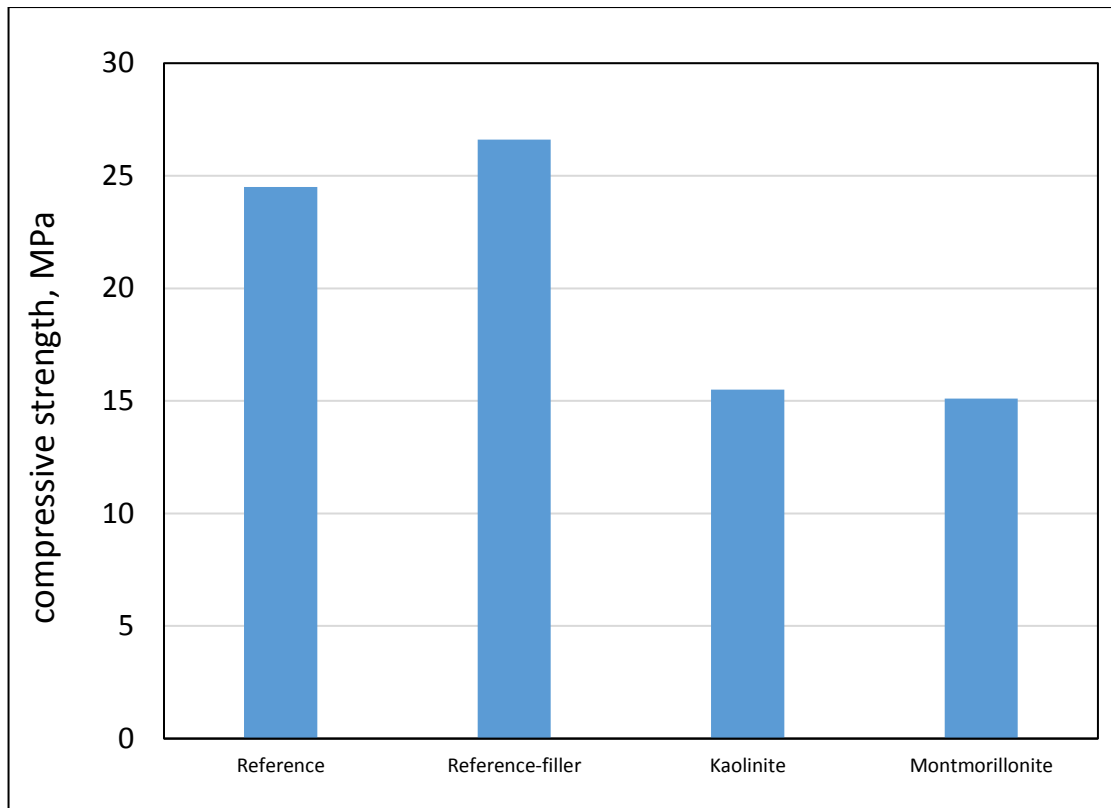
ציור 86 : התלות בין תכולת המוסף הפוליקרבוקסילטי (PC-A) הנדרשת לנטרול השפעת החרסית בחול על הקטנת העבידות ובין ערך המתילן בלו של החול

- כדי להקטין את תכולת המוסף הפוליקרבוקסילטי הנדרשת לנטרול השפעת החרסית על הקטנת העבידות, ניתן לשלב אותו עם מוסף מנטרל חרסית, כאשר לשילוב ביניהם יש כנראה אפקט סינרגטי, ציור 87

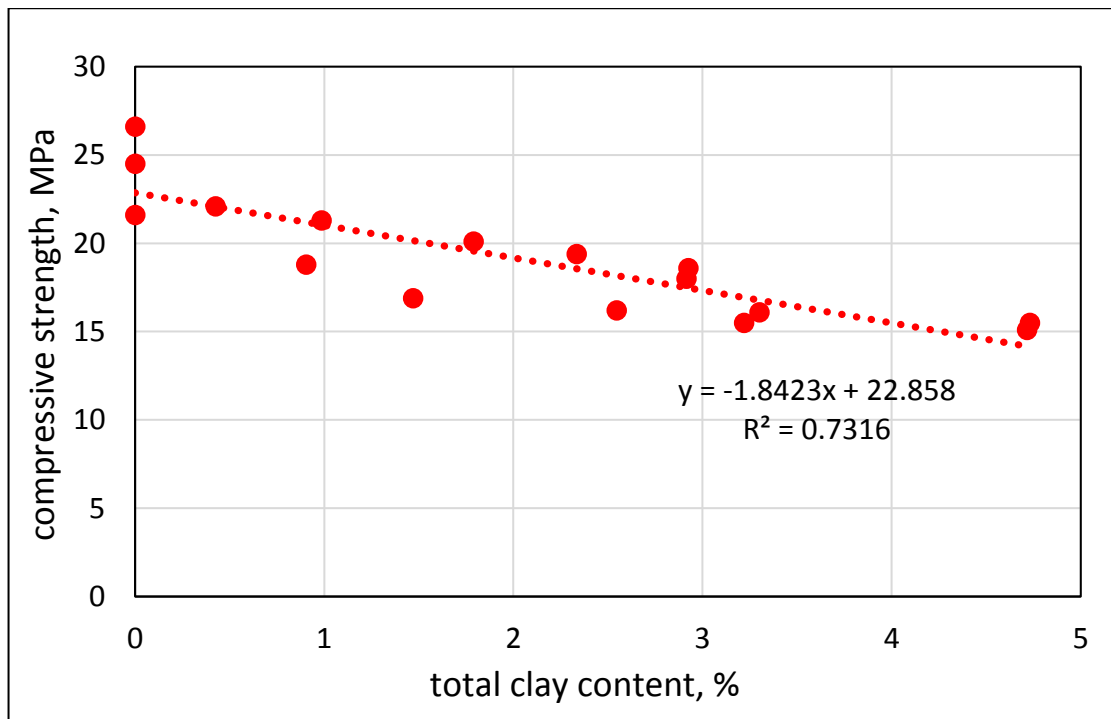


ציור 87 : השפעת מוסף פוליקרבוקסילט על שיפור בעבירות (הקטנת ערך כניעה) בתערובת עם חול רפרנס (ללא דקים) עם חול המכיל דקים חרסיתיים, והאפקט הסינרגטי המושג בשילוב של מוסף פוליקרבוקסילטי עם מוסף מנטרל חרסית

- המגמות לעיל מצביעות על כך שהערך של מתילן בלו של החול יכול לשמש כקו מנחה לאסטרטגיה של מתיון השפעת החרסית באמצעות מוספים
- הנוכחות של חרסית בדקים מובילה להקטנה בחוזק גם כאשר מנת המים נשארת קבועה (ציור 85א') והירידה הזו גדולה יותר ככל שתכולת החרסית גבוהה יותר. הירידה איננה תלויה בהרכב המינרלוגי של החרסית (ציור 88ב')



(ב)



(א)

ציור 88 : השפעת תכולת החרסית בדקים של חול אשר מכיל 5% דקים (א) והרכב החרסית שבו (ב) על החוזק של מערכות צמנטיות בעלות מנת מים זהה

רשימת ספרות

1. M.I.Nehdi, Clay in cement based materials: critical review of state of the art, *Construction and Building Materials*, 51, 372-382, 2014
2. T.P.Chang, J.Y.Shih, K.M.Yang and T.C.Hsiao, Material properties of Portland cement paste with nano-montmorillonite, *J.Materials Science*, 42, 478-487, 2007
3. W.Y.Kuo, J.S.Huang and C.H.Lin, Effects of organo-modified montmorillonite on strength and permeability of cement mortars, *Cement and Concrete Research*, 36, 886-895, 2006
4. L.Quintero, An overview of surfactant applications in drilling fluids for the petroleum industry, *J. Dispersion Science and Technology*, 23, 393-404, 2002
5. J.K.Norvell, J.G.Stewart, M.C.G.Juenger and D.W.Fowler, Influence of clay-sized particles on concrete performance, *ASCE J. Materials of Materials in Civil Engineering*, 19, 1053-1059, 2007
6. A.A.Jeknavorian, L.Jardine, C.C.Ou, H.Koyata and K.Folliard, Interaction of superplasticizers with clay-bearing aggregates, *Proc. 7th CANMET/ACI Int. Conf. on Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete*, Special Publication (SP-217), V.M.Malhotra, editor, American Concrete Institute
7. A.Katz and H.Baum, Effect of high levels of fines content on concrete properties, *ACI Materials Journal*, 103, 474-282, 2006
8. P.N.Quiroga, N.Ahn and D.W.Fowler, Concrete mixtures with high microfines, *ACI Materials Journal* 103, 258-264, 2006
9. A.J.G.Yool, T.P.Lees and A.Fried, Improvements to the methylene blue dye test for harmful clay in aggregates for concrete and mortar, *Cement and Concrete Research*, 28, 1417-1428, 1998
10. N.A.Tregger, M.E.Pakula and S.P.Shah, Influence of clays on the rheology of cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 40, 384-391, 2010
11. Manufactured Sand: National test methods and specification values, *Research Report*, Cement, Concrete and Aggregate, Australia, 2007
12. D.Manning and J.Vetterlein, Exploitation and use of quarry fines, *Mineral Solution*, 2004
13. T.Naik, R.N.Kraus, Y. Chun, F.Canpolat and B.W.Ramme, Use of limestone quarry by-products for developing economical self-compacting concrete, *Center for By-products Utilization, The University of Wisconsin, Milwaukee*, 2004
14. A.Lieber, Filler Material for mixtures for concrete and bricks manufacturing, *Israeli Patent Application* 235686, 2014
15. R.S.Cummings and S.P.G.Chuckran, Method for recycling construction and demolition fines, *US Patent* 815729, 2009
16. R.Siddique, Utilization of industrial by-products in concrete, *Procedia Engineering*, 95, 2014, 335-347

נספח א'

הנחיות לביצוע בדיקות ערך מתילן בלו (MBV) לפי ASTM C 1777

1. סטנדרטיזציה של תמיסת המתילן בלו

הכן תמיסה של 0.50% מתילן בלו (תריהדרט)

דילול

- מכינים מבחנה של 50 סמ"ק ומאפסים על משקל
- באמצעות מיקרופיטה שואבים 130 מיקרוליטר של התמיסה אל תוך המבחנה
- מוסיפים מים למבחנה (דילול) עד למשקל של 45.0 ג"מ בדיוק של 0.1 ג"מ
- מכסים את המבחנה ומנערים בעדינות את התמיסה המדוללת למשך 5 שניות, בדיוק של שנייה אחת

בדיקה בקולורימטר

- באמצעות מיקרופיטה ממלאים את מבחנת הזכוכית של הקולורימטר עד לכ- 2/3 מנפחה
- מכניסים את המבחנה עם תמיסת המתילן בלו המדוללת לקולורימטר
- מודדים את הבליעה בדיוק של 0.01 A.
- מסובבים רבע סיבוב ומודדים שוב
- חוזרים על המדידה עבור ארבעה סיבובים
- רושמים את ערך הבליעה הממוצע A_{std} עבור תמיסת המתילן בלו המדוללת

2. מדידת הריכוז בפועל של תמיסת מתילן בלו חדשה

המדידה הזו היא עבור תמיסת מתילן בלו חדשה, כדי ליצור בסיס להשוואה עם מדידות קודמות עם תמיסה דומה. לכאורה שתי התמיסות צריכות להיות זהות כי התמיסות צריכות להיות בריכוז זהה של 0.50%. אבל בפועל יכולות להיות סטיות קטנות, בין התמיסה המקורית בריכוז 0.50% ששמשה לכויל, אשר הבליעה שלה הייתה A_{std} , ובין התמיסה החדשה בריכוז C_i , אשר הבליעה שלה היא A_i , ועל כן נדרשת המדידה של הריכוז בפועל, C_i :

$$C_i = (0.50\%) (A_i/A_{std})$$

3. הכנת מדגם לבדיקה

כמויות חומרים:

- 20 ג"מ (בדיוק של 0.1 ג"מ) של אגרגט יבש דק, עובר נפה 4.75 מ"מ
- 30 ג"מ של תמיסת מתילן בלו (0.5% של מתילן בלו טריהדרט), בדיוק של 0.1 ג"מ

ערבוב וניעור

- ממלאים מבחנה במשקלם הנדרש לעיל של התמיסה (30 ג"מ), כאשר אליה מוסיפים את האגרגט הנבדק (20 ג"מ)
- מכסים את המבחנה ומנערים במשך 60 שניות (בדיוק של שנייה), מנוחה של 180 שניות ושוב ניעור של 60 שניות

פילטרציה

- מסירים את הבוכנה ממזרק של 3 סמ"ק (עדיף מזרק 5 סמ"ק)
- מרכיבים פילטר "לואר לוקר" בתחתית המזרק (0.2 micron syringe filter)
- מטפטים באמצעות פיפטה 2 סמ"ק מדגם לתוך המזרק
- מחזירים את הבוכנה ודוחסים דרך הפילטר כמות של 0.5 עד 1.0 סמ"ק למבחנה של 1 סמ"ק (רצוי מבחנה של 4-5 סמ"ק)

דילול

- מכינים מבחנה של 50 סמ"ק ומאפסים על משקל
- באמצעות מיקרופיפטה שואבים 130 מיקרוליטר של מדגם מסונן ומכניסים אל תוך המבחנה
- מוסיפים מים למבחנה (דילול) עד למשקל של 45.0 ג"מ בדיוק של 0.1 ג"מ
- מכסים את המבחנה ומנערים בעדינות את התמיסה המדוללת למשך 5 שניות, בדיוק של שנייה אחת

הכנת מדגם לקולורימטר

- באמצעות מיקרופיפטה ממלאים את מבחנת הזכוכית של הקולורימטר עד לכ- 2/3 מנפחה

4. מדידת הבליעה בקולורימטר – מדגם מדולל

- מאפסים את הקולורימטר עבור מבחנה המכילה מים, שמולאה עד כ- 2/3 במים
- מוציאים את מבחנת המים ומחליפים במבחנה עם המדגם המדולל
- מודדים את הבליעה בדיוק של 0.01 A (יחידות בליעה אבסלוטיות)
- מסובבים רבע סיבוב ומודדים שוב
- חוזרים על המדידה עבור ארבעה סיבובים
- רושמים את ערך הבליעה הממוצע A_f עבור המדגם המדולל

5. חישוב ריכוז המתילן בלו עבור מדגם לא מדולל

חישוב ריכוז המתילן בלו של המדגם הלא מדולל, C_f :

$$C_f = (0.50\%) (A_f/A_{std})$$

6. חישוב הערך של מטילן בלו, MBV

הערך של MBV עבור האגרנט הנבדק, ביחידות של mg/g:

$$MBV = \frac{10(C_i - C_f)(M_{MB})}{M_{FM}}$$

כאשר:

C_i - הערך הממוצע של הריכוז בפועל של תמסת המתילן בלו כפי שנקבעה בסעיף 2

C_f - הריכוז הסופי של תמיסת מתילן בלו בתמיסה עם האגרנט הנבדק, סעיף 5

M_{MB} - המסה של תמיסת מתילן בלו כפי שנקבע בפועל בסעיף 3 (30 ג"מ בקרוב)

M_{FM} - המסה של האגרנט או המלאן שנקבע בפועל בסעיף 3 (20 ג"מ בקרוב)

נספח א-1

הנחיות להפעלת הקולורימטר ולמדידת מקדם הבליעה במכשיר Hach DR 900

הבדיקה נועדה לקבוע את מקדם הבליעה לאור באורך גל של 610nm של תמיסה של מתילן בלו.

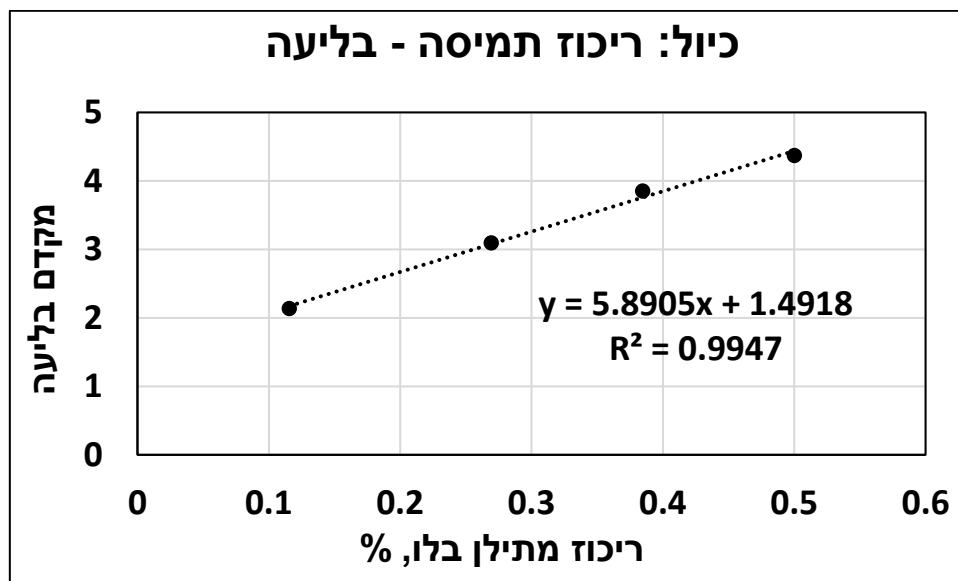
- לחץ על מתג הפעלה
- בחר OPTIONS
- נווט ל- (%T/Abs?Conc) ובחר (SELECT)
- נווט ל- (Abs) ובחר (SELECT)
- הכנס מבחנת זכוכית עם מים מזוקקים
- נווט ל- (Start Timer) ובחר (SELECT)
- נווט ל- (Timer manual) ובחר (SELECT)
- נווט ל- (00:10), דהיינו משך המדידה הוא על פני 10 שניות
- הקש (DONE) והמתן 10 שניות
- הקש (ZERO) לאיפוס המבחנה עם המים כנקודת הייחוס
- סובב את המבחנה רבע סיבוב ובחר (READ); אמור לתת קריאה של אפס או קרוב לה
- חזור על פעולה זו על ידי סיבוב לכל ארבעת הרבעים ורשום את הקריאה בכל אחד מהם (לוודא שהממוצע הוא אפס)
- הוצא את מבחנת המים והכנס במקומה מבחנה עם התמיסה הנבדקת
- הקש (READ) ורשום את המספר המופיע על הצג
- סובב את המבחנה רבע סיבוב, הקש (READ) ורשום את המספר המופיע על הצג
- חזור על הפעולה לכל ארבעת הרבעים ובכל אחד רשום את המספר המופיע על הצג
- מקדם הבליעה הוא הממוצע של ארבעת הערכים הללו (ערך A_f בסעיף 4, או ערך A_{std} בסעיף 1)

נספח א-2

כיוול: בליעה של תמיסות מתילן בלו בריכוזים שונים

העיקרון של הבדיקה הוא מדידת בליעת אור באורך גל של 610nm ע"י תמיסת מטילן בלו. תמיסת הבסיס היא בריכוז של 0.50% מתילן בלו טריהידרט. כאשר מערבבים אל תוכה מדגם המכיל חרסית, סופחת החרסית מולקולות של מתילן בלו, בתלות בתכולת החרסית וכושר הספיחה שלה. ככל שעוצמת הספיחה גדולה יותר, הריכוז של המתילן בלו בתמיסה קטן, וכתוצאה מכך כושר הבליעה קטן (ראה נוסחה 5 לעיל). לכן, הכיוול הראשון של המערכת הוא על ידי קביעת קשרי הגומלין שבין הריכוז של תמיסות מתילן בלו בטווח של 0 - 0.50% ובין מקדם הבליעה.

ניסוי כיוול בטווח זה נתן את התוצאות המוצגות בציור א-1. ניתן לראות בברור קשר ליניארי עם מקדם קורלציה מאד גבוה.



ציור א-1: עקום כיוול מקדם בליעה-ריכוז תמיסת מתילן בלו

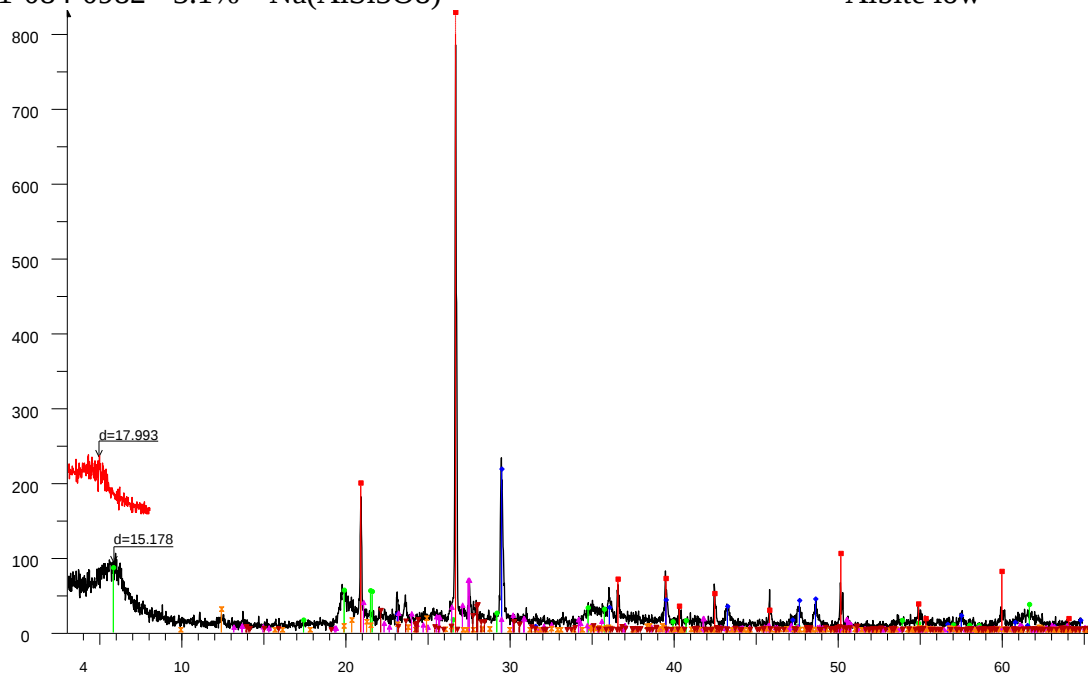
נספח ב'

ריכוז תוצאות בדיקות מינרלוגיות בדיפרקציה בקרני X

Sample name: E2, MBV 7.06

Concentrations:

00-058-2038	54.9%	(Ca,Na)0.3Al ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·xH ₂ O	Montmorillonite, calcian
01-086-1629	17.9%	SiO ₂	Quartz low
01-072-1651	12.6%	CaCO ₃	Calcite
01-076-1238	8.2%	K(AlSi ₃)O ₈	Microcline maximum
01-080-0886	3.4%	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	Kaolinite
01-084-0982	3.1%	Na(AlSi ₃ O ₈)	Albite low



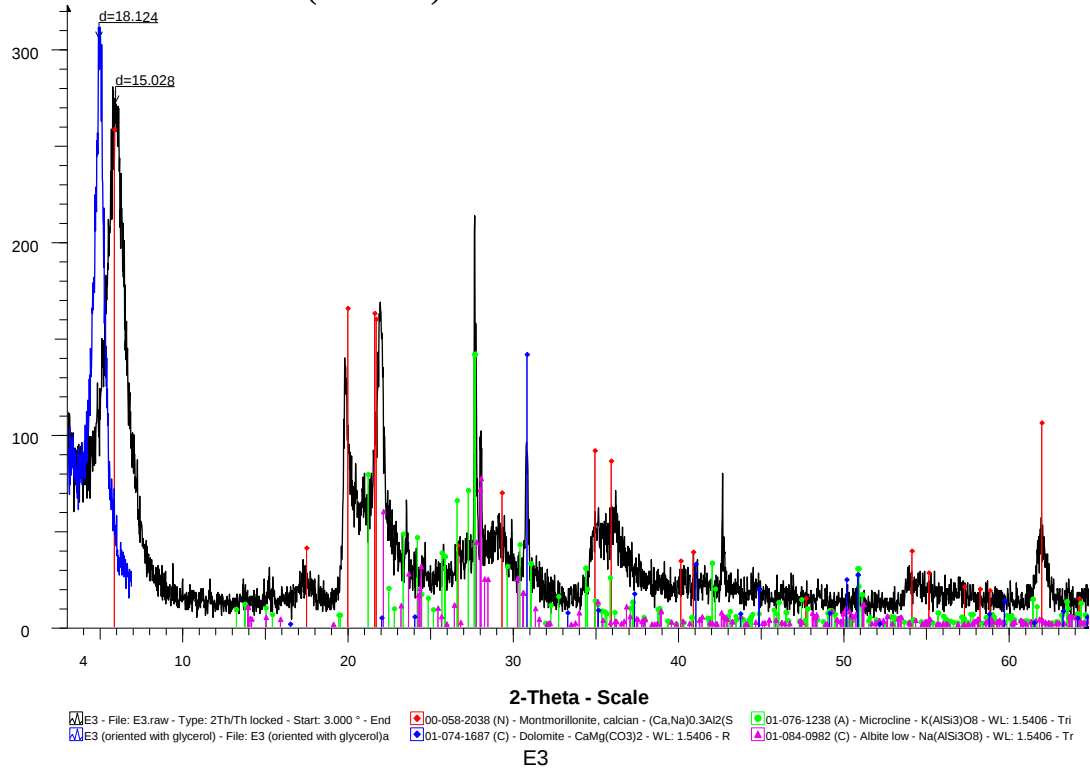
2-Theta - Scale

E2 - File: E2.raw - Type: 2Th/Th locked - St
 E2 (oriented with glycerol) - File: E2 (orientate)
 00-058-2038 (N) - Montmorillonite, calcian -
 01-086-1629 (A) - Quartz low - SiO₂ - WL:
 01-072-1651 (A) - Calcite - CaCO₃ - WL: 1.
 01-076-1238 (C) - Microcline maximum - K(
 01-080-0886 (C) - Kaolinite - Al₂(Si₂O₅)(O
 01-084-0982 (C) - Albite low - Na(AlSi₃O₈)

E2

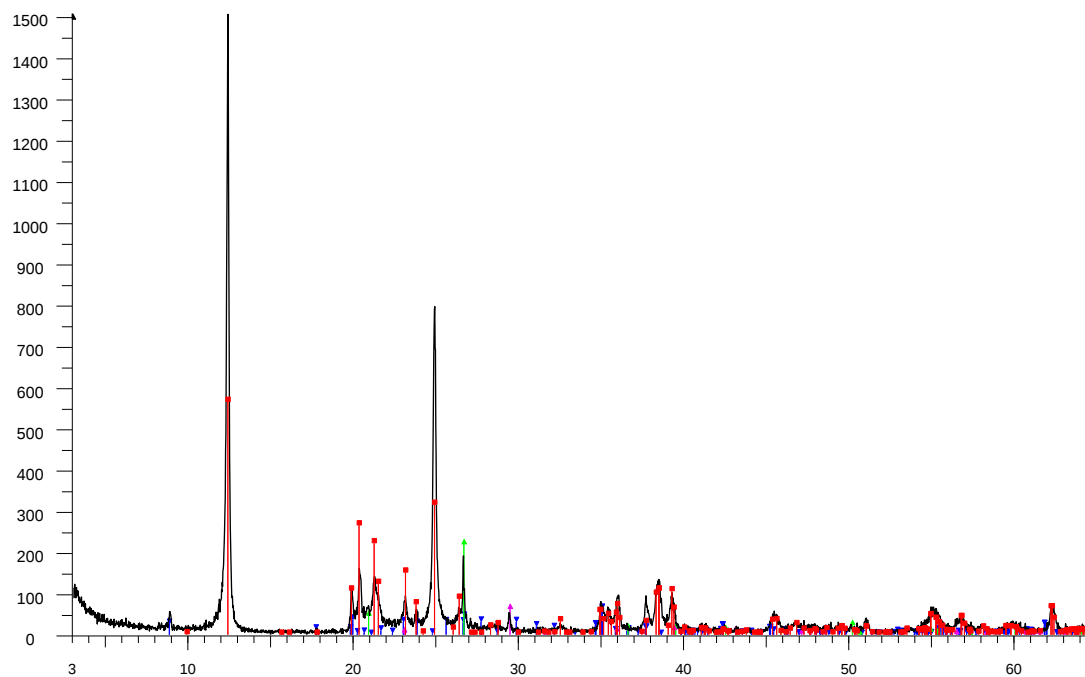
Sample name: E3, Bentonite, MBV – 7.48**Concentrations:**

00-058-2038	94.3%	$(\text{Ca},\text{Na})_0.3\text{Al}_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	Montmorillonite, calcian
01-074-1687	1.5%	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Dolomite
01-076-1238	2.2%	$\text{K}(\text{AlSi}_3)\text{O}_8$	Microcline
01-084-0982	2.0%	$\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	Albite low



Sample name: E4, Kaoline, MBV – 0.22**Concentrations:**

01-080-0886	94.6%	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	Kaolinite
04-011-5240	1.3%	$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Muscovite
01-086-1629	2.2%	SiO_2	Quartz low
01-072-1651	1.9%	CaCO_3	Calcite

**2-Theta - Scale**

E4 - File: E4.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.983 ° - End: 60.000 °
 01-080-0886 (C) - Kaolinite - $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ - WL: 1.5406
 04-011-5240 (A) - Muscovite - $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ - WL: 1.54
 01-086-1629 (A) - Quartz low - SiO_2 - WL: 1.5406 - Hexago
 01-072-1651 (A) - Calcite - CaCO_3 - WL: 1.5406 - Rhombo.

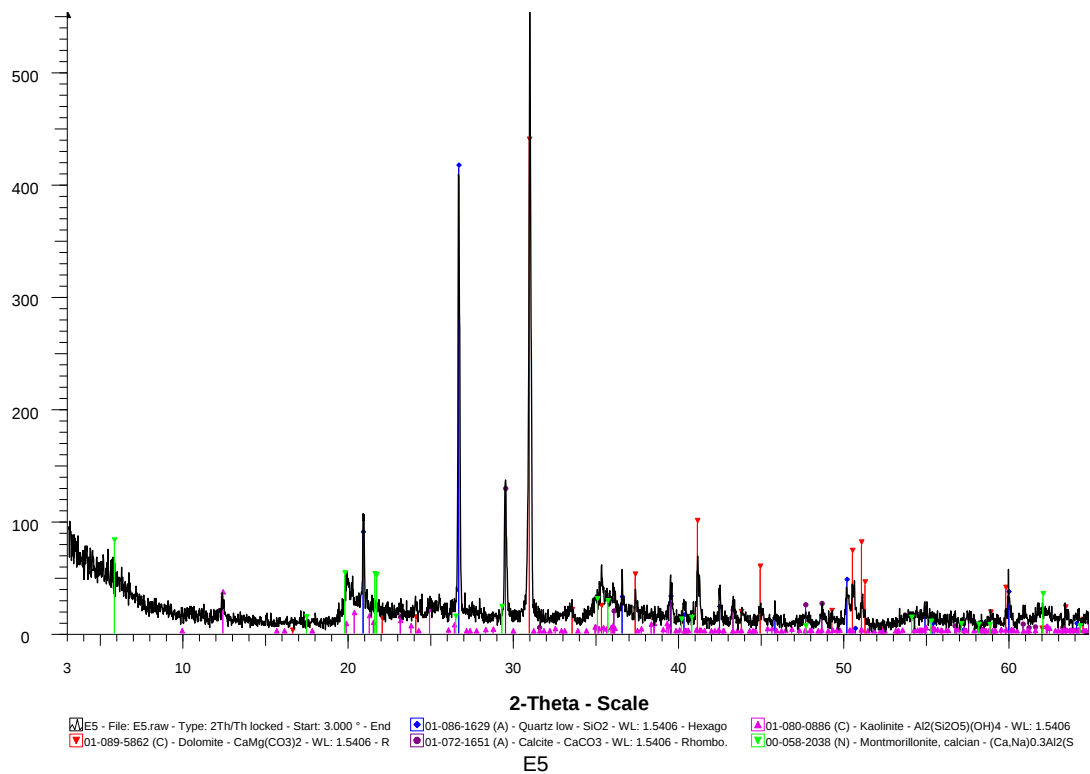
E4

Sample name: E5, MBV - 6**Concentrations:**

01-089-5862	21.3%	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Dolomite
01-086-1629	13.8%	SiO_2	Quartz low
01-072-1651	6.5%	CaCO_3	Calcite
01-080-0886	13.5%	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	Kaolinite
00-058-2038	45.0%	$(\text{Ca},\text{Na})_0.3\text{Al}_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	Montmorillonite, calcian

Quantitative Analysis - Rietveld

Phase 1	:	Dolomite	21.08 (87)	%
Phase 2	:	Quartz low	7.49 (41)	%
Phase 3	:	Calcite	6.76 (46)	%
Phase 4	:	Kaolinite	26.32 (14)	%
Phase 5	:	Montmorillonite	38.35 (13)	%



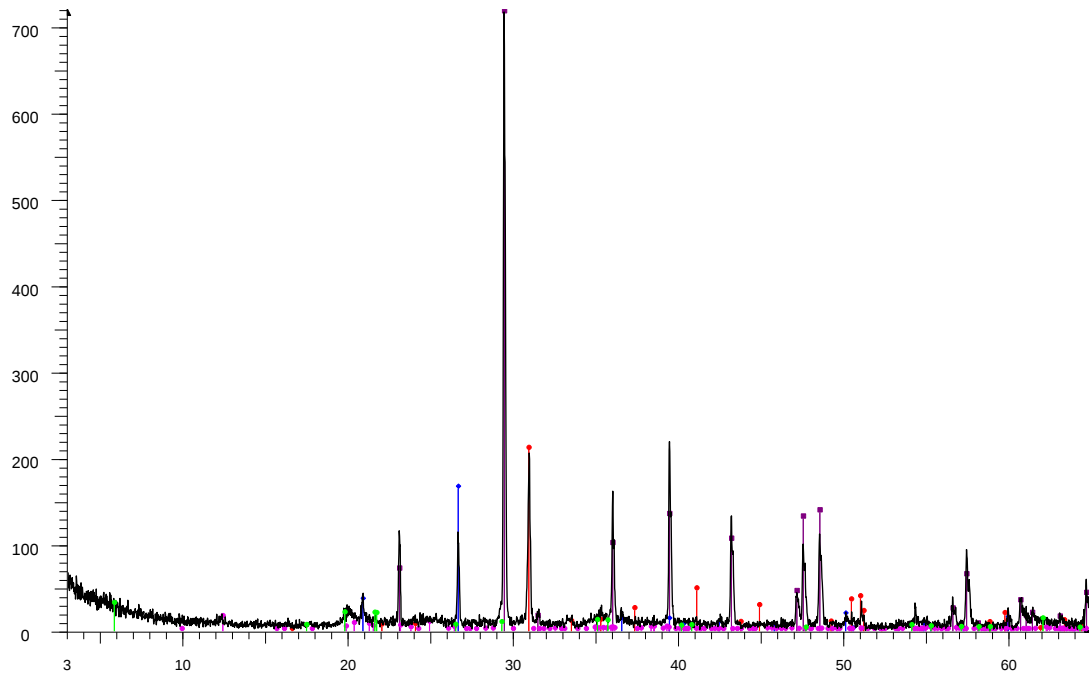
E5

Sample name: E6, MBV – 3.83**Concentrations:**

01-072-1651	55.2%	CaCO ₃	Calcite
01-089-5862	9.8%	CaMg(CO ₃) ₂	Dolomite
01-086-1629	5.5%	SiO ₂	Quartz low
01-080-0886	10.7%	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	Kaolinite
00-058-2038	18.7%	(Ca,Na) _{0.3} Al ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·xH ₂ O	Montmorillonite, calcian

Quantitative Analysis - Rietveld

Phase 1	:	Dolomite	7.41 (60)	%
Phase 2	:	Quartz low	2.44 (32)	%
Phase 3	:	Calcite	57.3 (14)	%
Phase 4	:	Kaolinite	18.4 (15)	%
Phase 5	:	Montmorillonite	14.4 (12)	%

**2-Theta - Scale**

E6 - File: E6.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.922 ° - End: 65.000 °
 01-072-1651 (A) - Calcite - CaCO₃ - WL: 1.5406 - Rhombo. 01-089-5862 (A) - Dolomite - CaMg(CO₃)₂ - WL: 1.5406 - R 01-080-0886 (C) - Kaolinite - Al₂(Si₂O₅)(OH)₄ - WL: 1.5406
 01-086-1629 (A) - Quartz low - SiO₂ - WL: 1.5406 - Hexago 00-058-2038 (N) - Montmorillonite, calcian - (Ca,Na)_{0.3}Al₂(Si,Al)₄O₁₀(OH)₂·xH₂O - WL: 1.5406

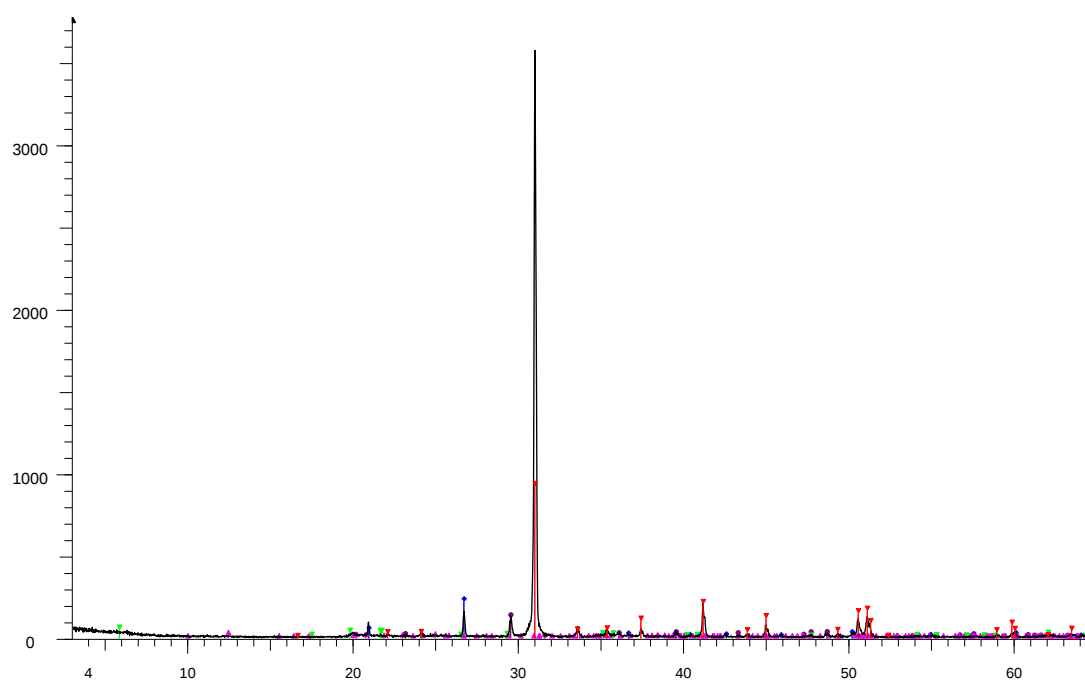
E6

Sample name: E7, MBV – 1.42**Concentrations:**

01-089-5862	68.9%	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Dolomite
01-086-1629	4.9%	SiO_2	Quartz low
01-072-1651	6.5%	CaCO_3	Calcite
01-080-0886	5.3%	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	Kaolinite
00-058-2038	14.4%	$(\text{Ca},\text{Na})_0.3\text{Al}_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	Montmorillonite, calcian

Quantitative Analysis - Rietveld

Phase 1	:	Dolomite	71.4 (13) %
Phase 2	:	Quartz low	3.05 (31) %
Phase 3	:	Calcite	4.76 (40) %
Phase 4	:	Kaolinite	13.0 (13) %
Phase 5	:	Montmorillonite	7.79 (77) %

**2-Theta - Scale**

E7 - File: E7.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.958 ° - End: 60.000 ° - Wavelength: 1.5406 Å - Hexagonal
 01-089-5862 (C) - Dolomite - $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ - WL: 1.5406 - Rhombohedral
 01-086-1629 (A) - Quartz low - SiO_2 - WL: 1.5406 - Hexagonal
 01-072-1651 (A) - Calcite - CaCO_3 - WL: 1.5406 - Rhombohedral
 01-080-0886 (C) - Kaolinite - $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ - WL: 1.5406 - Monoclinic
 00-058-2038 (N) - Montmorillonite, calcian - $(\text{Ca},\text{Na})_0.3\text{Al}_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ - WL: 1.5406 - Monoclinic

E7

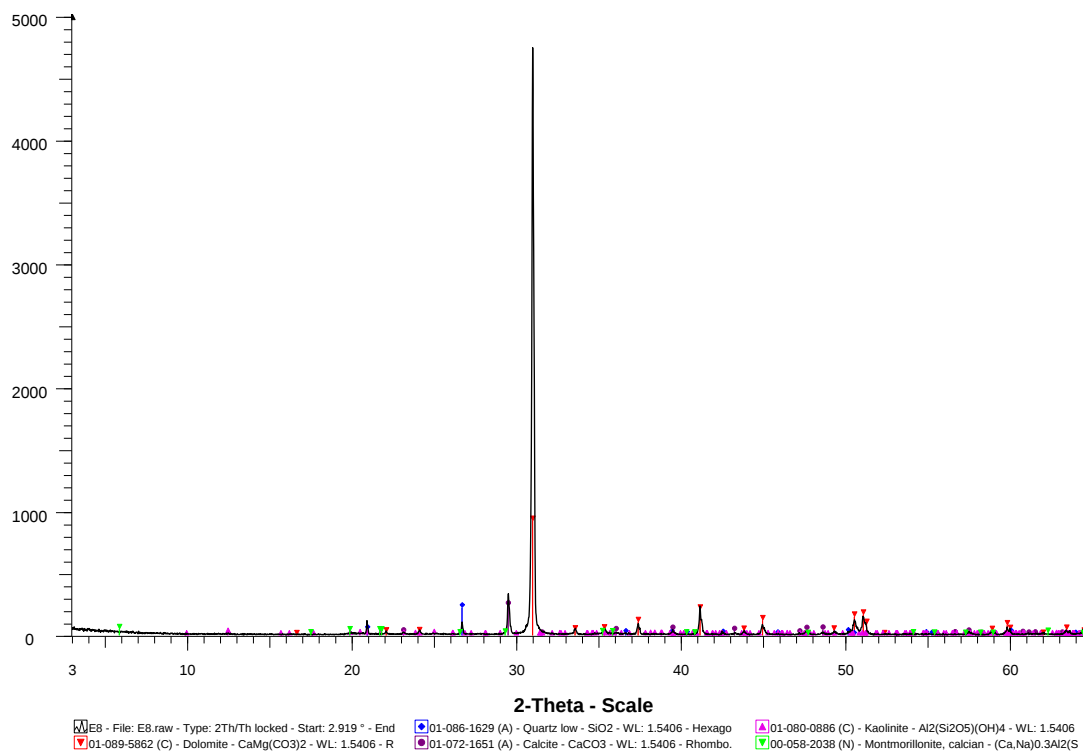
Sample name: E8, MBV 1.64

Concentrations:

01-089-5862	78.6%	CaMg(CO ₃) ₂	Dolomite
01-086-1629	2.6%	SiO ₂	Quartz low
01-072-1651	10.3%	CaCO ₃	Calcite
01-080-0886	4.8%	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	Kaolinite
00-058-2038	3.7%	(Ca,Na)0.3Al ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·xH ₂ O	Montmorillonite, calcian

Quantitative Analysis - Rietveld

Phase 1	:	Dolomite	82.03 (88) %
Phase 2	:	Quartz low	2.69 (27) %
Phase 3	:	Calcite	6.10 (36) %
Phase 4	:	Kaolinite	5.81 (71) %
Phase 5	:	Montmorillonite	3.36 (57) %



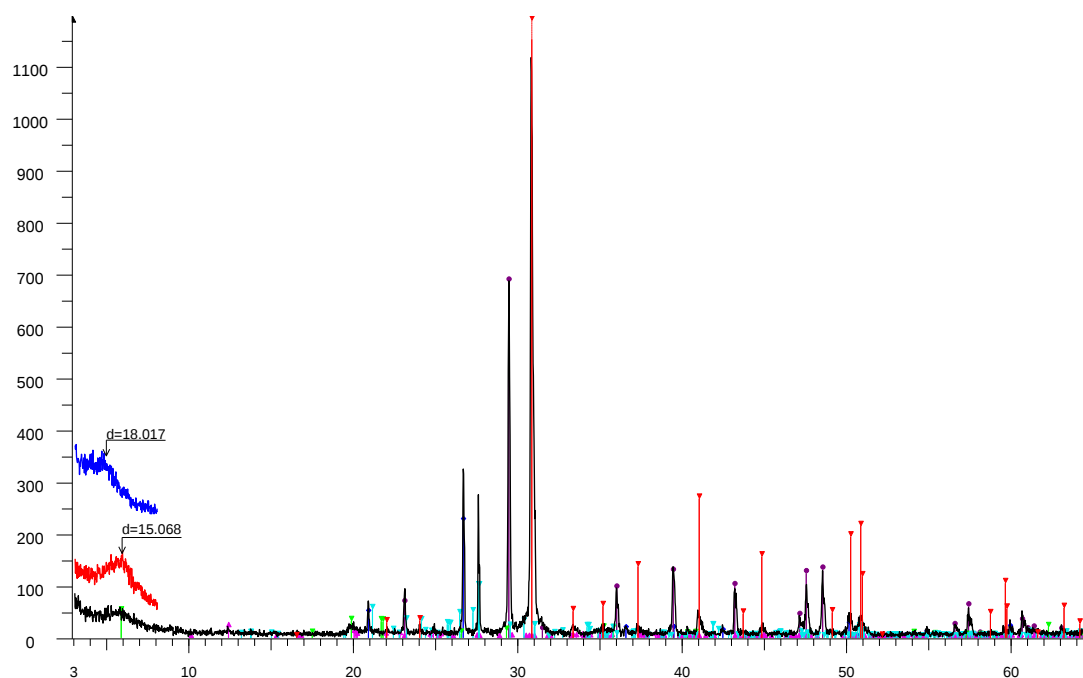
E8

Sample name: E9, MBV – 3.72**Concentrations:**

01-089-5862	31.4%	CaMg(CO ₃) ₂	Dolomite
01-086-1629	8.3%	SiO ₂	Quartz low
01-072-1651	35.9%	CaCO ₃	Calcite
01-080-0886	3.1%	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	Kaolinite
00-058-2038	15.0%	(Ca,Na) _{0.3} Al ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·xH ₂ O	Montmorillonite, calcian
01-076-1238	6.2%	K(AlSi ₃)O ₈	Microcline

Quantitative Analysis - Rietveld

Phase 1	:	Dolomite	29.60 (13) %
Phase 2	:	Quartz low	3.52 (35) %
Phase 3	:	Calcite	42.90 (15) %
Phase 4	:	Kaolinite	4.43 (69) %
Phase 5	:	Montmorillonite	12.90 (89) %
Phase 6	:	Microcline	6.68 (58) %

**2-Theta - Scale**

E9 - File: E9.raw - Type: 2Th/Th I
 E9 (oriented with glycerol) - File:
 E9 (oriented) - File: E9 (oriented).
 01-086-1629 (A) - Quartz low - Si
 01-089-5862 (C) - Dolomite - Ca
 01-072-1651 (A) - Calcite - CaCO
 01-080-0886 (C) - Kaolinite - Al₂(Si₂O₅)(OH)₄
 00-058-2038 (N) - Montmorillonite
 01-076-1238 (A) - Microcline - K(AlSi₃)O₈

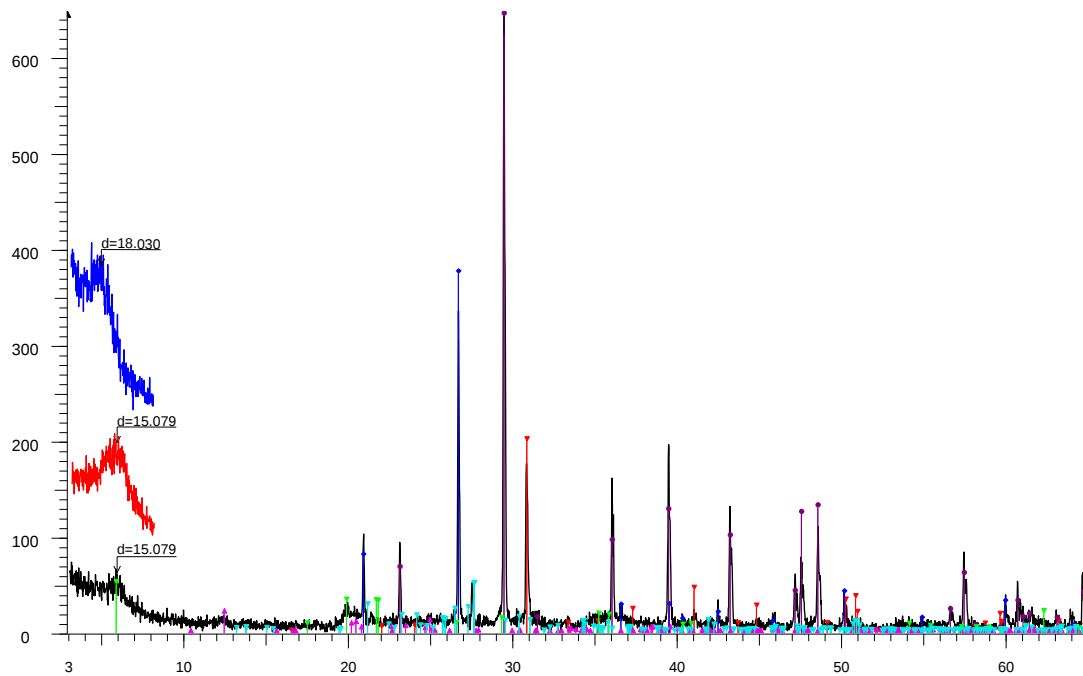
E9

Sample name: E10, MBV – 4.26**Concentrations:**

01-089-5862	7.4%	CaMg(CO ₃) ₂	Dolomite
01-086-1629	12.3%	SiO ₂	Quartz low
01-072-1651	39.5%	CaCO ₃	Calcite
01-080-0886	8.6%	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	Kaolinite
00-058-2038	27.2%	(Ca,Na) _{0.3} Al ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·xH ₂ O	Montmorillonite, calcian
01-076-1238	5.1%	K(AlSi ₃)O ₈	Microcline

Quantitative Analysis - Rietveld

Phase 1	:	Dolomite	5.05 (60)	%
Phase 2	:	Quartz low	7.78 (52)	%
Phase 3	:	Calcite	47.9 (16)	%
Phase 4	:	Kaolinite	10.1 (15)	%
Phase 5	:	Montmorillonite	26.9 (18)	%
Phase 6	:	Microcline	2.38 (54)	%

**2-Theta - Scale**

E10 - File: E10.raw - Type: 2ThT E10 (oriented with glycerol) - File: 01-086-1629 (A) - Quartz low - Si 01-080-0886 (C) - Kaolinite - Al₂(Si₂O₅)(OH)₄ 01-076-1238 (A) - Microcline - K(AlSi₃)O₈
 E10 (oriented) - File: E10 (oriented) 01-089-5862 (C) - Dolomite - CaMg(CO₃)₂ 01-072-1651 (A) - Calcite - CaCO₃ 00-058-2038 (N) - Montmorillonite, calcian

E10

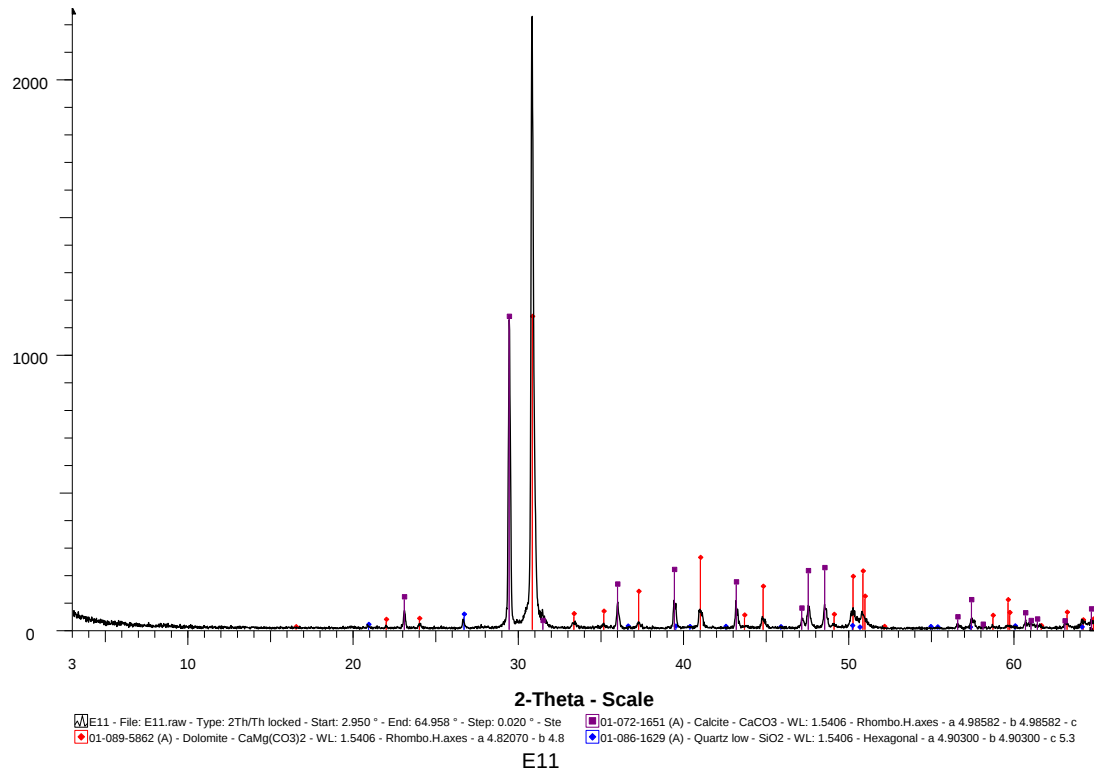
Sample name: **E11, MBV – 0.22**

Concentrations:

01-089-5862	59.2%	CaMg(CO ₃) ₂	Dolomite
01-072-1651	39.7%	CaCO ₃	Calcite
01-086-1629	1.1%	SiO ₂	Quartz low

Quantitative Analysis - Rietveld

Phase 1	:	Dolomite	61.1(11) %
Phase 2	:	Calcite	38.2(11) %
Phase 3	:	Quartz low	0.673(91) %



Sample name: **E12, MBV 7**

Concentrations:

01-086-1629 12.7% SiO₂

01-089-5862 21.3% CaMg(CO₃)₂

00-058-2038 49.5% (Ca,Na)_{0.3}Al₂(Si,Al)₄O₁₀(OH)₂·xH₂O

01-080-0886 16.5% Al₂(Si₂O₅)(OH)₄

Quartz low

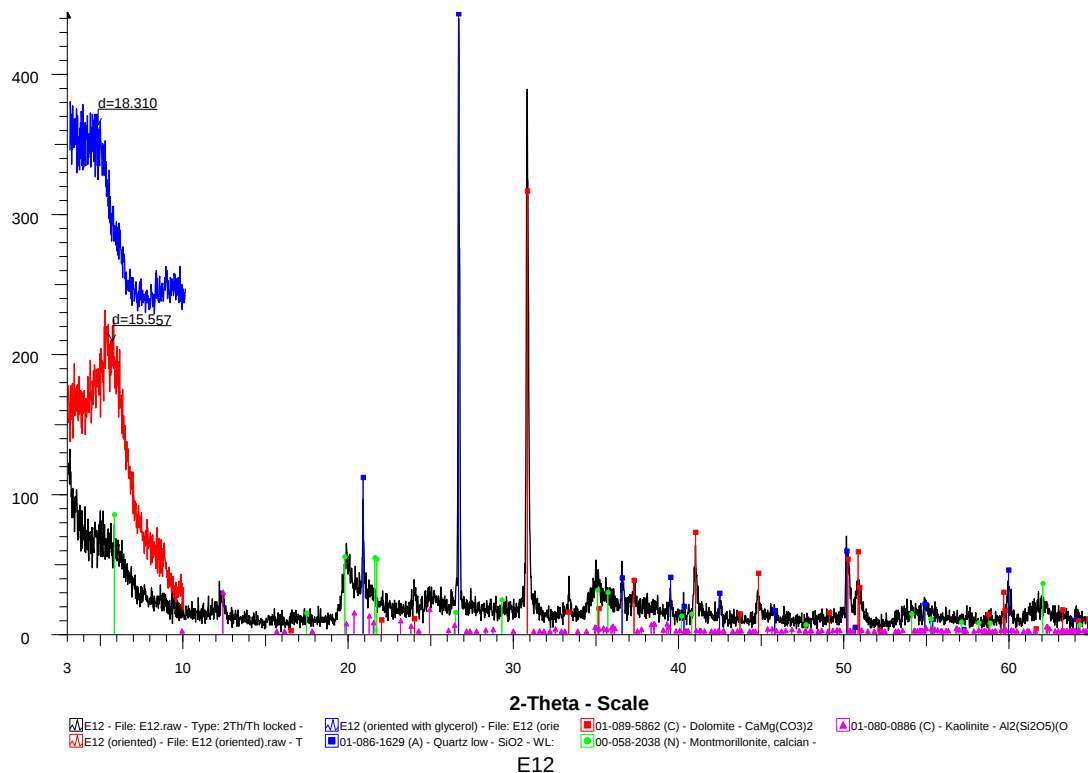
Dolomite

Montmorillonite, calcian

Kaolinite

Quantitative Analysis - Rietveld

Phase 1	:	Dolomite	21.6 (11) %
Phase 2	:	Quartz low	6.4 (41) %
Phase 3	:	Kaolinite	31.1 (20) %
Phase 4	:	Montmorillonite	41.1 (19) %

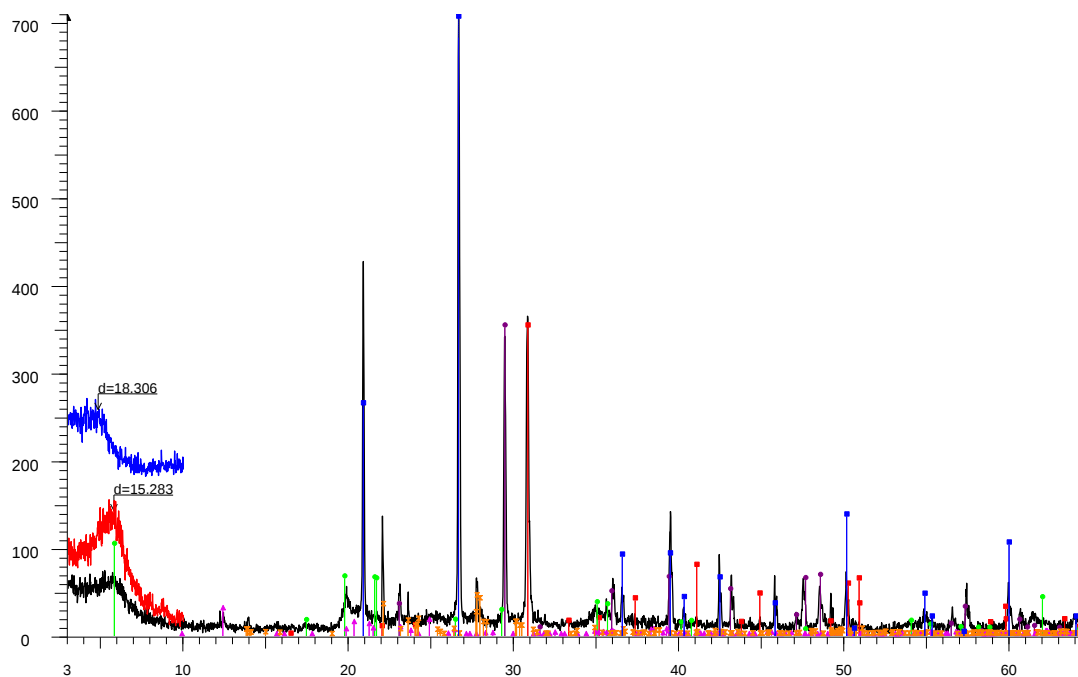


Sample name: E13, MBV – 6.43**Concentrations:**

01-086-1629	23.6%	SiO ₂	Quartz low
01-072-1651	17.0%	CaCO ₃	Calcite
01-089-5862	10.4%	CaMg(CO ₃) ₂	Dolomite
00-058-2038	40.0%	(Ca,Na) _{0.3} Al ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·xH ₂ O	Montmorillonite, calcian
01-080-0886	6.7%	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	Kaolinite
01-084-0982	2.3%	Na(AlSi ₃ O ₈)	Albite low

Quantitative Analysis - Rietveld

Phase 1	: Dolomite	17.5 (16) %
Phase 2	: Quartz low	17.7 (13) %
Phase 3	: Kaolinite	10.6 (11) %
Phase 4	: Calcite	27.4 (20) %
Phase 5	: Montmorillonite	22.5 (55) %
Phase 6	: Albite low	4.30 (73) %

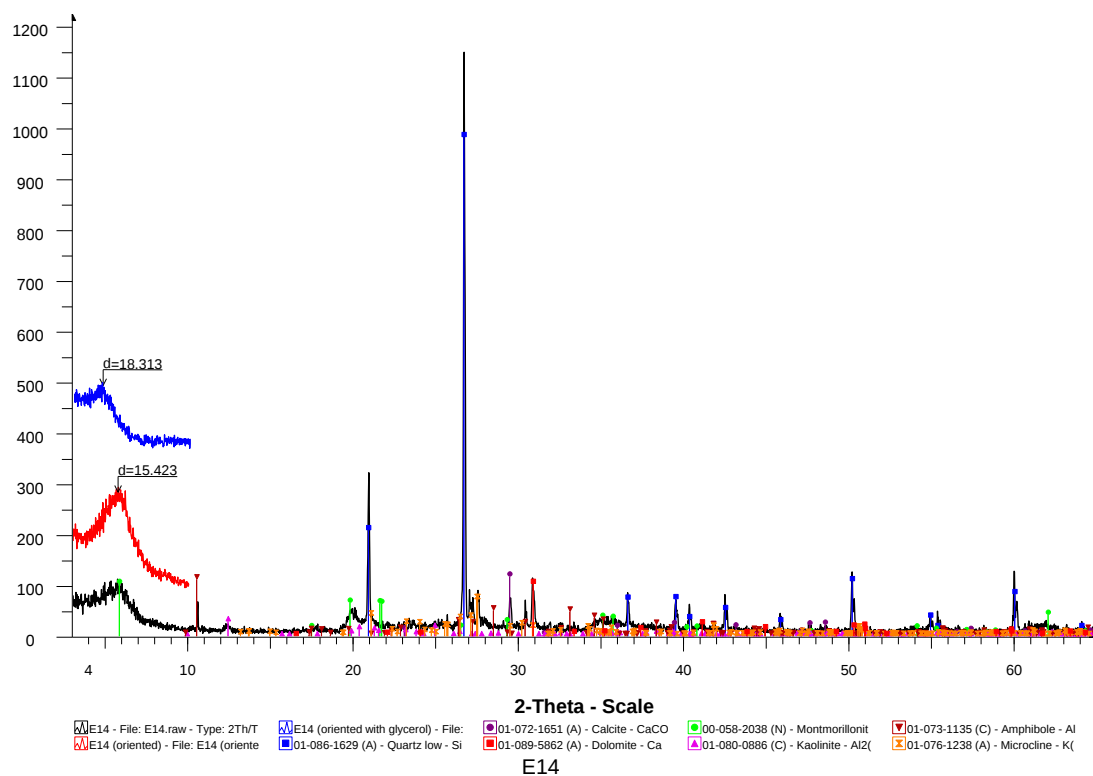


E13 - File: E13.raw - Type: 2Th/T
 E13 (oriented) - File: E13 (orient
 E13 (oriented with glycerol) - File:
 01-086-1629 (A) - Quartz low - Si
 01-072-1651 (A) - Calcite - CaCO
 01-089-5862 (A) - Dolomite - Ca
 00-058-2038 (N) - Montmorillonit
 01-084-0982 (C) - Albite low - Na
 01-080-0886 (C) - Kaolinite - Al₂(

E13

Sample name: E14, MBV – 6.84**Concentrations:**

01-086-1629	29.1%	SiO ₂	Quartz low
01-072-1651	3.3%	CaCO ₃	Calcite
01-089-5862	4.4%	CaMg(CO ₃) ₂	Dolomite
00-058-2038	43.7%	(Ca,Na) _{0.3} Al ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·xH ₂ O	Montmorillonite, calcian
01-080-0886	7.2%	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	Kaolinite
01-073-1135	3.4%	Al _{3.2} Ca _{3.4} Fe _{4.0} K _{0.6} Mg _{6.0} Na _{1.0} Si _{12.8} O ₄₄ (OH) ₄	Amphibole
01-076-1238	8.9%	K(AlSi ₃)O ₈	Microcline



Sample name: E15 (7H) MBV 7.26

Concentrations:

01-086-1629	18.2%	SiO ₂	Quartz low
01-089-5862	14.9%	CaMg(CO ₃) ₂	Dolomite
01-072-1651	2.7%	CaCO ₃	Calcite
01-080-0886	30.5%	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	Kaolinite
04-011-5240	33.8%	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	Muscovite

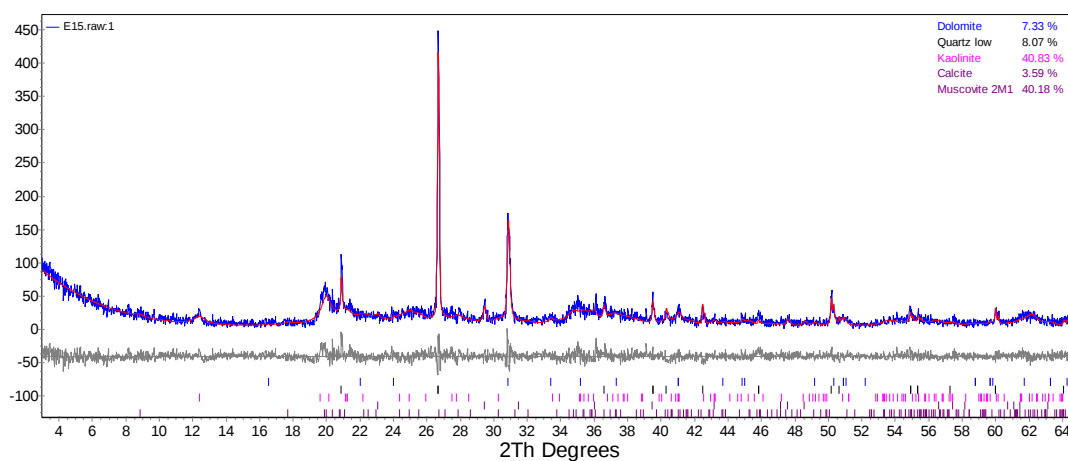
Quantitative Analysis - Rietveld

Phase 1 : Dolomite,
7.33%
Phase 2 : Quartz low,
8.07%
Phase 3 : Kaolinite,
40.8%
Phase 4 : Calcite,
3.59%
Phase 5 : Muscovite
40.52%

הערה: לפי ניתוח של אמיר סנדלר יש לקחת את כל המוסקוביט כמונטמורילוניט ואליו להוסיף כ- 1/3 מהקאוליניט, דהיינו:

עבור "ריכוזים": 44.0% מונטמורילוניט ו- 20.4% קאוליניט

עבור ריטבלד: 54.12% מונטמורילוניט ו- 27.3% קאוליניט



Abstract

The objective of the report was the development of fundamentals required for extensive use of manufactured sand in concrete, as replacement for natural sand, to enable the use of low quality material, especially high in clay content.

The research methodology was based on engineering of sand samples containing known amounts of clays representing clay compositions available in Israel. The "engineered sands" were prepared from high quality siliceous sand in which portions were replaced with fine material obtained from clay lenses in quarries operated by the ready mixed concrete industry in Israel. The material from the lenses was sieved to remove particles coarser than 75 microns. In addition, "engineered sands" were prepared using pure kaolinite and montmorillonite.

The material from the lenses was tested to characterize its mineralogical composition, particle size distribution and the Atterburg limits- liquid limit, plastic limit and plastic index. The engineered sand was tested to determine its methylene blue value, using the colorimetric test method. The range of values for the methylene blue were from 0.2 to about 14. The effect of the composition of the engineered sand on cementitious systems was evaluated by studying the behavior of 1:3 cement:sand mortars prepared from the engineered sand. Fresh properties were evaluated by rheological test using a viscometer and by the flow table test. Hardened mortar properties were determined by testing for strength at 1, 7 and 28 days.

The main conclusions:

- The methylene blue test enables proper characterization of the fines containing clays, as there are good relations between it and the mineralogical composition as well as with the fresh properties quantified by the yield stress in the rheological test.
- Up to methylene blue values of 3 the effect on the fresh properties is relatively mild, an increase of about 8% of the water demand; beyond it the yield stress of the fresh mix increases markedly with the increase in the methylene blue value; the main influence beyond methylene blue value of 3 is largely due to the increasing presence of montmorillonite.
- The use of admixtures can mitigate the detrimental influence of the clays in the fines on the properties of the fresh mix; the content and strength of the admixtures required increases with increase in the methylene blue value; at high methylene blue value there is advantage of combining clay mitigating admixture with water reducing one, due to synergy between the two.



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



2022400

Utilization of clay containing aggregates for concrete production Research Report, Stage A, 2016

**M.Sc. P.Larianovsky Prof. A.Bentur Dr. G.Agranati
Mr. A.Lieber**

Copyright © 2017 by P.Larianovsky, A.Bentur, G.Agranati, A.Lieber
The Israeli Ministry of Construction and Housing and the Technion Research and
Development Foundation Limited, Haifa

Haifa

January 2017

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 | Tel: e-mail: nbri@tx.technion.ac.il
<http://nbri.net.technion.ac.il>

