

אוניברסיטת בן - גוריון בנגב
הפקולטה למדעי הטבע
המחלקה למדעי הגיאולוגיה והסביבה

השפעת אופי המגעים בין גרגרים על התכונות המכניות של
סלעים סדימנטריים.

חיבור לשם קבלת תואר "מגיסטר" בפקולטה למדעי הטבע
מאת: שלומי מנור

השפעת אופי המגע בין גרגרים על התכונות המכניות של סלעים סדימנטריים.

חיבור לשם קבלת תואר "מגיסטר" בפקולטה למדעי הטבע

מאת: שלומי מנור

מנחים: פרופ' יוסף חודרה חצור

ד"ר ויאצ'סלאב פלצ'יק

מעבדת הנגב ע"ש דייכמן למכניקת סלע - המחלקה למדעי הגיאולוגיה והסביבה,
הפקולטה למדעי הטבע, אוניברסיטת בן גוריון.

_____ תאריך:	_____:	חתימת המחבר
_____ תאריך:	_____:	אישור המנחה
_____ תאריך:	_____:	אישור המנחה
_____ תאריך:	_____:	אישור יו"ר הועדה המחלקתית

תקציר

במחקרים רבים במכניקת הסלע נמצא כי לאופי המגעים בין הגרגרים השפעה חזקה על התכונות המכניות של הסלע. במחקר זה בחנו את השפעת אורך ורציפות המגעים בין גרגרים על התכונות המכניות של סלעים סדימנטרים. לצורך כך נדחסו דוגמאות אבן חול וגיר בלחץ הידרוסטטי (σ_{hyd}) של 20 MPa ו-40 MPa, ונבחנו השינויים בתכונות המכניות ובמיקרוטקסטורה. לצורך אפיון התכונות המכניות בוצעו מבחני לחיצה חד-צירית ומדידת מהירויות גלי P ו-S.

הניתוח המיקרוטקסטורלי בוצע על צילומים של שקפי מיקרוסקופ באמצעות תוכנת GIS (ממ"ג – מערכת מידע גיאוגרפית). במסגרת האנליזה המיקרוטקסטורלית נערכו מדידות על יותר מ-640 גרגרים וכללו מדידות של מספר גרגרים שכנים (n), מספר מגעים (N), אורך מגעים בין גרגרים (L), קוטר גרגר (D_m), היקף גרגר (P) ושטח חתך הגרגר (S) – עבור כל גרגר. מהניתוח המיקרוטקסטורלי נמצא שבדוגמאות ה-Indiana limestone קיימת שונות ראשונית בגודל הגרגרים, בשונה מדוגמאות ה-Berea sandstone שהראו גודל גרגר אחיד בכל השקפים שנבדקו.

המאמצים ההידרוסטטים (σ_{hyd}) בהם דחסנו את הדוגמאות נמצאים בקצה התחתון של עקומת המאמץ-מעוות נפחי. בהתאם לכך תוצאות הדחיסות הראו שהדוגמאות עברו מעוותים בלתי הפיכים קטנים. למרות זאת נמצאה מגמה ברורה של עליה בצפיפות וירידה בנקבוביות (ϕ) עם העליה ב- σ_{hyd} .

מדידות מהירות הגלים הראו שינויים קטנים מאוד (זניחים) במהירויות גלי P ו-S וללא מגמה ברורה. לעומת זאת במבחני לחיצה חד-צירית נראתה מגמה ברורה של עלייה בחוזק הלחיצה המקסימלי (σ_c) ובמודול האלסטיות (E) עם העלייה בגודל הדחיסה ההידרוסטטית. כמו כן, ממדידות מיקרוטקסטורליות נמצא שהעלאת הלחץ ההידרוסטטי מגדילה את אורך המגעים, בשני סוגי הסלעים.

לצורך ניתוח מעמיק יותר נבחנו יחסים שונים של אורך המגעים (L), רציפות המגעים (N ו- n) וגודל הגרגר (P , D_m ו- S), והורכבו מספר פרמטרים של מגע - L/GS , $(L/N)/GS$, ו- $L/(N/n)/GS$, P , $D_m=GS$. בהתאם לכך, בוצע ניתוח סטטיסטי של פרמטרי המגע ונמצא שעבור ה-Berea sandstone כל הערכים של פרמטרי המגע גדלים עם העליה ב- σ_{hyd} . עם זאת, עבור ה-Indiana limestone לא נמצאה מגמה ברורה של שינוי פרמטרי המגע עם העליה בלחץ ההידרוסטטי, ככל הנראה בשל השונות הראשונית בגודל הגרגרים בסלע.

הצבנו את פרמטרי המגע של ה-Berea sandstone ביחס לנקבוביות, לחוזק הלחיצה המקסימלי, ולמודול האלסטיות, ומצאנו שעבור הפרמטרים L/P , L/D , $(L/N)/D$, $(L/N)/P$, ו- $L/(N/n)/D$, ו- $L/(N/n)/P$ התקבלו קורלציות ליניאריות טובות עד טובות מאוד. הקורלציות הראו עלייה בפרמטרי המגע עם העלייה

ב- σ_c וב-E וירידה עם העליה ב- ϕ . נמצא כי קורלציות טובות יותר התקבלו עבור פרמטרים שכללו את רציפות המגעים (כשמבוטאת על ידי N) ואת היקף הגרגר (P). קורלציות טובות במיוחד נמצאו עבור היחס (L/N)/P. הוכח כי לאורך המגעים (L) יחד עם רציפותם (N) השפעה חזקה מאוד על התכונות המכניות של סלע גרנולרי. כמו כן נמצא כי להיקף הגרגר חשיבות גדולה יותר מקוטר הגרגר ושטח החתך שלו, בחישוב הפרמטר המיקרוטקסטורלי.

עבודה זו הינה חלק ממחקר נרחב יותר שמטרתו לנסח קריטריון כשל עבור סלעים נקבוביים המבוסס על המיקרוטקסטורה של הסלע. בהתאם לכך, יש לבחון את היחס בין פרמטרי המגע לתכונות המכניות של סלעי המחקר לאחר דחיסתם בלחצים גדולים יותר, וביחס לתכונות המכניות של סלעים נוספים.

גרסה צבעונית של עבודה זו ניתן למצוא בכתובת האינטרנט הבאה :

<http://www.bgu.ac.il/geol/hatzor/graduate.html>

תודות

ברצוני להודות למנחי בעבודה. לפרופ' יוסי חצור על ההנחיה המסורה, ההדרכה, העזרה, התמיכה, על הדלת שתמיד פתוחה ועל כל מה שלא ניתן לבטא במשפט אחד. ולד"ר ויאצ'סלאב פלצ'יק על ההנחיה המסורה, על ההדרכה, העזרה, על הנכונות לעזור וללמד ועל סובלנות מדהימה.

תודה רבה לד"ר ירון קציר על העזרה, על הדלת הפתוחה, על השימוש במיקרוסקופ ועל הרבה מעבר לכך.

תודה לד"ר ולדימיר פריד על ההדרכה והעזרה בכל הקשור למדידת מהירות הגלים.

תודה לד"ר קוסשווילי על עזרתו בהכנת השקפים והמדגמים.

תודה לחברי לספסל הלימודים: לאיתי אוריין, לאיליה ויינשטיין, לאורי זביקלסקי, לאניה ארבל, לשרית אשכנזי ולכל שאר תלמידי המחלקה.

תודה לסגל המחלקה. תודה לרבקה עיני וצהלה שרעבי שעובדות ללא הרף כדי לאפשר לנו לעבוד בשקט ולהתקדם.

תודה להורי אשר להם מוקדשת עבודה זו.

ותודה אחרונה ללימור אשר תמכה, עזרה והסכימה לסבול את כל הגחמות והאוטיזם במהלך כתיבת העבודה.

תוכן העניינים:

i-ii	תקציר
iii	תודות
iv-vi	תוכן העניינים
vii	רשימת טבלאות
vii-x	רשימת תרשימים
xi-xii	סימנים מוסכמים
1	פרק 1: מבוא
1	1.1 חשיבות אפיון התכונות המכניות של סלעים
1	1.2 מטרת המחקר
1	1.3 יעדי המחקר
2	1.4 הנחות יסוד
2	1.5 האתגר והקושי שבהגדרת קריטריון מיקרוטקסטורלי
4	פרק 2: רקע תיאוריטי
4	2.1 תכונות מכניות של סלעים
4	2.1.1 אלסטיות
6	2.1.2 משמעות המונחים חוזק וכשל בסלעים
8	2.1.3 יחסי מאמץ - מעוות בלחיצה דיביאטורית
10	2.1.4 דחיסה הידרוסטטית
11	2.1.5 בדיקות דינמיות: מהירויות גלים בחומר
12	2.2 מיקרו-מכניקה של השבר
12	2.2.1 שבירה הנשלטת ע"י סדקים קיימים
14	2.2.2 שבירה הנשלטת ע"י סדקים שנוצרו עקב ריכוזי נקעים
14	2.3 המיקרוטקסטורה והשפעתה על התכונות המכניות של הסלע
15	2.3.1 גודל הגרגר
16	2.3.2 נקבוביות
17	2.3.3 צמנט/מטריקס
17	2.3.4 צורת גרגר ואורנטציה

18	2.3.5	צפיפות אריזה
18	2.3.6	מודלים וקריטריונים משולבים
21	2.3.7	המגעים בין גבולות הגרגרים
24		פרק 3: שיטות המחקר
24	3.1	הגישה למחקר ושיטת העבודה
26	3.2	תיאור דוגמאות הסלע
28	3.3	בדיקות דינמיות : מהירות גלים בסלע
29	3.4	בדיקות סטטיות
31	3.4.1	דחיסה הידרוסטטית
31	3.4.2	מבחני לחיצה חד-צירית
32	3.5	אנליזות מיקרוטקסטורליות
34	3.5.1	שיטת העבודה עם מערכת ה-GIS
36	3.5.2	אופן מדידת הפרמטרים המיקרוטקסטורלים
38		פרק 4: תוצאות
38	4.1	מבחני דחיסה הידרוסטטית
38	4.1.1	תוצאות הדחיסות ההידרוסטטיות של ה-Berea sandstone
40	4.1.2	תוצאות הדחיסות ההידרוסטטיות של ה-Indiana limestone
43	4.2	מיקרוטקסטורה
43	4.2.1	ניתוח מיקרוטקסטורלי של ה-Berea sandstone
50	4.2.2	ניתוח מיקרוטקסטורלי של ה-Indiana limestone
56	4.3	התכונות המכניות
56	4.3.1	בדיקות דינמיות : מהירויות גלים בחומר
56	4.3.1.1	בדיקות מהירויות גלים ב-Berea sandstone
56	4.3.1.2	בדיקות מהירויות גלים ב-Indiana limestone
57	4.3.2	בדיקות סטטיות : מבחני לחיצה חד-צירית
57	4.3.2.1	מבחני לחיצה חד-צירית ב-Berea sandstone
58	4.3.2.2	מבחני לחיצה חד-צירית ב-Indiana limestone
61		פרק 5: דיון
61	5.1	השפעת הלחץ ההידרוסטטי על הדוגמאות

61	.....	השפעת הלחץ ההידרוסטטי על המיקרוטקסטורה	5.1.1
61	.....	השפעת הלחץ ההידרוסטטי על התכונות המכניות	5.1.2
61	.....	השפעת הלחץ ההידרוסטטי על התכונות המכניות הסטטיות	5.1.2.1
63	.....	השפעת הלחץ ההידרוסטטי על התכונות המכניות הדינמיות	5.1.2.2
63	.....	יחסי מיקרוטקסטורה – תכונות מכניות	5.2
71	.....	יעילות מערכת ה-GIS לניתוח המיקרוטקסטורלי	5.3
71	.....	הצעות להמשך המחקר	5.4
72	.....	פרק 6: סיכום ומסקנות	
73	.....	מקורות	

רשימת טבלאות:

- 3.1 טבלה : נתוני ההתחלה של ה-Berea sandstone וה-Indiana limestone, כפי שנמצאו במחקר זה 27
- 4.1 טבלה : נתוני תוצאות המבחנים ההידרוסטטיים שנעשו על דוגמת BSD של ה-Berea sandstone..... 39
- 4.2 טבלה : נתוני תוצאות המבחנים ההידרוסטטיים שנעשו על דוגמת ILD של ה-Indiana limestone. 41
- 4.3 טבלה : ערכים סטטיסטיים של הפרמטרים המיקרוטקסטורליים שנמדדו משקפי ה-Berea sandstone (דוגמה BSD) עבור מצבי הדחיסה בשונים. 49
- 4.4 טבלה : ערכים סטטיסטיים של הפרמטרים המיקרוטקסטורליים שנמדדו משקפי ה-Indiana limestone (דוגמה ILD) עבור מצבי הדחיסה בשונים. 55
- 4.5 טבלה : תוצאות מדידות מהירויות גלי P ו-S בדוגמת ה-Berea sandstone. 56
- 4.6 טבלה : תוצאות מדידות מהירויות גלי P ו-S בדוגמת ה-Indiana limestone. 57
- 4.7 טבלה : סיכום תוצאות מבחני הלחיצה החד- צירית שנעשו ב-Berea sandstone. 58
- 4.8 טבלה : סיכום תוצאות מבחני הלחיצה החד- צירית שנעשו ב-Indiana limestone. 58
- 5.1 (א-ד): הערכים הממוצעים של פרמטרי המגע L/GS , $(L/N_1)/GS$, $(L/N_2)/GS$, $L/(N_1/n)/GS$ ו- $L/(N_2/n)/GS$ 65

רשימת תרשימים:

- 2.1 תרשים : מערכת מאמצים תלת-מיימדית. 5
- 2.2 תרשים : עקומות מאמץ – מעוות טיפוסיות עבור סלע אלסטי הנתון תחת שדה מאמצים דביאטורי הולך וגדל (Goodman, 1989). 8
- 2.3 תרשים : עקומת מאמץ – מעוות נפחי עבור דחיסה הידרוסטטית (Goodman, 1989). 10
- 2.4 תרשים : איבוד הנקבוביות עקב תהליכי קומפקציה, וחלקם של מגעי הגרגרים והצמנטציה בתהליך (He et al., 2002). 17
- 2.5 תרשים : מקדם הטקסטורה (TC) של (Howarth & Rowlands, (1986, 1987) של (TC) 19

20	תרשים 2.6: מקדם המטריקס (MC) של (Burgi et al., 2001).....
21	תרשים 2.7: אורך המגע הממוצע מנורמל לגודל הגרגר הממוצע (L/D) ביחס לנקבוביות (ϕ) (David et al., 1998).....
22	תרשים 2.8: אורך המגעים בין הגרגרים לשטח נתון (C) ביחס למהירות גלי הדחיסה שעברו בסלע (V_p) (Alber & Brardt, 2003).....
23	תרשים 2.9: קורלציה בין מודול יאנג ואורך המגעים מנורמל לגודל הגרגר הממוצע (David et al., 1998).....
26	תרשים 3.1: דיאגרמה סכמתית של הבדיקות שנעשו עבור כל שלב של דחיסה הידרוסטטית, והשיטה בה בחנו את השפעת הדחיסה על המיקרוטקסטורה ואת זו האחרונה על התכונות המכניות הסטטיות והדינמיות.....
29	תרשים 3.2: תמונה של המערכת למדידת מהירויות מעבר גלי P ו-S שבמעבדה למכניקת הסלע שבאוניברסיטת בן-גוריון בנגב.....
29	תרשים 3.3: דיאגרמה סכמתית של אופן החיבור בין חלקי המערכת למדידת מהירויות גלים.....
30	תרשים 3.4: תמונה של המכשיר התלת צירי אשר נמצא במעבדה למכניקת הסלע שבאוניברסיטת בן-גוריון בנגב.....
32	תרשים 3.5: תמונה של מיקרוסקופ האור ומעליו מצלמה דיגיטלית המורכבת באמצעות מתאם.....
33	תרשים 3.6: דוגמאות לצילומי מיקרו של: א) ה-Berea sandstone בניקולים פתוחים, בניקולים סגורים ובניקולים סגורים עם פלטת קוורץ. ב) ה-Indiana limestone בניקולים פתוחים, בניקולים סגורים ובניקולים סגורים עם פלטת קוורץ.....
35	תרשים 3.7: תיאור העבודה בשכבות במערכת ה-GIS, ופירוט השכבות השונות במחקר זה.....
37	תרשים 3.8: אופן מדידת הפרמטרים המיקרוטקסטורליים כפי שנעשה באמצעות תוכנת MapInfo Professional (גירסה 7.5).....
39	תרשים 4.1: עקומות מאמץ-מעוות של דוגמאות BSD (מבחן BSD-20) ו-BST-20 אשר עברו דחיסות הידרוסטטיות בכ-20 MPa.....
40	תרשים 4.2: עקומות המאמץ-מעוות של גלעיני BSD ו-BST-40 הכוללות את שני שלבי הדחיסה שעברו (עד 20 MPa ועד 40 MPa), ועקומת המאמץ-מעוות של דוגמה BST-20.....
42	תרשים 4.3: עקומות מאמץ-מעוות של דוגמאות ILD (מבחן ILD-20) ו-ILT-20 אשר עברו דחיסות הידרוסטטיות בכ-20 MPa.....

תרשים 4.4: עקומות המאמץ-מעוות של גלעיני ILD ו-ILT-40 הכוללות את שני שלבי הדחיסה שעברו (עד 20 MPa ועד 40 MPa), ועקומת המאמץ-מעוות של דוגמה ILT-20.	43
תרשים 4.5: תמונות מיקרו של ה-Berea sandstone (צולמו בניקולים סגורים): א) דוגמה BSD לפני שעברה דחיסה (BSD-0). ב) דוגמה BSD לאחר שעברה דחיסה הידרוסטטית ב-20MPa (BSD-20). ג) דוגמה BSD לאחר שעברה דחיסה הידרוסטטית ב-40MPa (BSD-40).	45
תרשים 4.6: היסטוגרמות המראות את התפלגות: א) הקוטר הנמדד (D_m), ב) ההיקף (P), ג) השטח (S), ד) הקוטר המחושב על פי S (D_s) - בדוגמת BSD עבור מצבי הדחיסה השונים (BSD-0, BSD-20 ו-BSD-40).	46
תרשים 4.7: תמונות מיקרו של ה-Berea sandstone (צולמו בניקולים פתוחים): א) דוגמה BSD לפני שעברה דחיסה (BSD-0). ב) דוגמה BSD לאחר שעברה דחיסה הידרוסטטית ב-20 MPa (BSD-20). ג) דוגמה BSD לאחר שעברה דחיסה הידרוסטטית ב-40 MPa (BSD-40). גבולות הגרגר מסומנים בקו רציף לבן. המגעים בין גרגרים מסומנים בקו מקווקו כחול.	47
תרשים 4.8: היסטוגרמות של אורך המגעים המראות את השינוי בהתפלגות אורך המגעים בין מצבי הדחיסה השונים בדוגמת BSD (Berea sandstone).	48
תרשים 4.9: א) אורך המגעים הממוצע (L) ביחס לגודל המאמץ ההידרוסטטי (σ_{hyd}) - ב-Berea sandstone. ב) אורך המגעים הממוצע (L) ביחס לנקבוביות (ϕ) - ב-Berea sandstone.	49
תרשים 4.10: תמונות מיקרו של דוגמת ILD לאחר דחיסתה ב-40 MPa (Indiana limestone).	51
תרשים 4.11: תמונות מיקרו של ה-Indiana limestone (צולמו בניקולים סגורים עם פלטת קוורץ): א) דוגמה ILD לפני שעברה דחיסה (ILD-40). ב) דוגמה ILD לאחר שעברה דחיסה הידרוסטטית ב-20 MPa (ILD-20). ג) דוגמה ILD לאחר שעברה דחיסה הידרוסטטית ב-40 MPa (ILD-40).	52
תרשים 4.12: היסטוגרמות המראות את התפלגות: א) הקוטר הנמדד (D_m), ב) ההיקף (P), ג) השטח (S), ד) הקוטר המחושב על פי S (D_s) - בדוגמת ILD עבור מצבי הדחיסה השונים (ILD-0, ILD-20 ו-ILD-40).	53
תרשים 4.13: היסטוגרמות של אורך המגעים המראות את השינוי בהתפלגות אורך המגעים בין מצבי הדחיסה השונים בדוגמת ILD (Indiana limestone).	54
תרשים 4.14: א) אורך המגעים הממוצע (L) ביחס לגודל המאמץ ההידרוסטטי (σ_{hyd}) - ב-Indiana limestone. ב) אורך המגעים הממוצע (L) ביחס לנקבוביות (ϕ) - ב-Indiana limestone.	55

תרשים 4.15: דיאגרמות המאמץ-מעוות של מבחני הלחיצה החד-צירית שנעשו בדוגמאות: (א) BST-0, (ב) BST-20, (ג) BST-40 (Berea sandstone).....	59
תרשים 4.16: דיאגרמות המאמץ-מעוות של מבחני הלחיצה החד-צירית שנעשו בדוגמאות: (א) ILT-0, (ב) ILT-20, (ג) ILT-40 (Indiana limestone).....	60
תרשים 5.1: חוזק הלחיצה החד-צירי (σ_c) ביחס ללחץ ההידרוסטטי (σ_{hyd}) שהופעל על דוגמאות ה-Berea sandstone וה-Indiana limestone.....	62
תרשים 5.2: מודול יאנג (E) ביחס ללחץ ההידרוסטטי (σ_{hyd}) שהופעל על דוגמאות ה-Berea sandstone וה-Indiana limestone.....	62
תרשים 5.3: (א) פרמטרי המגע L/D_m , $(L/N_1)/D_m$, $(L/N_2)/D_m$, $L/(N_1/n)/D_m$ ו- $L/(N_2/n)/D_m$ ביחס ללחץ ההידרוסטטי (σ_{hyd}). (ב) פרמטרי המגע L/P , $(L/N_1)/P$, $(L/N_2)/P$, $L/(N_1/n)/P$ ו- $L/(N_2/n)/P$ ביחס ללחץ ההידרוסטטי (σ_{hyd}). (ג) פרמטרי המגע L/S , $(L/N_1)/S$, $(L/N_2)/S$, $L/(N_1/n)/S$ ו- $L/(N_2/n)/S$ ביחס ללחץ ההידרוסטטי (σ_{hyd}) – ב-Indiana limestone.....	66
תרשים 5.4: היסטוגרמות המראות את התפלגות פרמטרי המגע: (א) L/D_m , (ב) L/P , (ג) $L/(N_1/n)/D_m$ ו-(ד) $L/(N_1/n)/P$ ב-Berea sandstone.....	67
תרשים 5.5: (א) פרמטרי המגע L/D_m , $(L/N_1)/D_m$, $(L/N_2)/D_m$, $L/(N_1/n)/D_m$ ו- $L/(N_2/n)/D_m$ ביחס ללחץ ההידרוסטטי (σ_{hyd}). (ב) פרמטרי המגע L/P , $(L/N_1)/P$, $(L/N_2)/P$, $L/(N_1/n)/P$ ו- $L/(N_2/n)/P$ ביחס ללחץ ההידרוסטטי (σ_{hyd}). (ג) פרמטרי המגע L/S , $(L/N_1)/S$, $(L/N_2)/S$, $L/(N_1/n)/S$ ו- $L/(N_2/n)/S$ ביחס ללחץ ההידרוסטטי (σ_{hyd}) - ב-Berea sandstone.....	68
תרשים 5.6: קורלציות בין יחסי אורך המגעים L/D_m , $(L/N_1)/P$, L/P , $(L/N_1)/D_m$ ו- $L/(N_1/n)/D_m$ לבין: (א-ב) חוזק הלחיצה החד-צירית (σ_c), (ג-ד) הקשיחות (E_s) ו-הונו הנקבוביות (ϕ) ב-Berea sandstone.....	70

סימנים מוסכמים:

דחיסות	C
קוטר חתך הגרגר	D, d
הקוטר הנמדד של הגרגר	D_m
הקוטר המקסימלי של הגרגר	D_{max}
הקוטר המינימלי של הגרגר	D_{min}
קוטר מעגל בעל שטח זהה לשטח חתך הגרגר הנמדד	D_s
מקדם האלסטיות (מודול יאנג)	E
מקדם האלסטיות (מודול יאנג) הדינמי	E_d
מקדם האלסטיות (מודול יאנג) הסטטי	E_s
מודול הגזירה	G
מודול הגזירה הדינמי	G_d
מודול הגזירה הסטטי	G_s
פרמטרים מאפיינים של גודל הגרגר (D_s או S, P, D_m)	GS
משקל יחסי של מוצקים (specific gravity of solids)	Gs
מודול הנפח	K
מודול הנפח הדינמי	K_d
מודול הנפח הסטטי	K_s
אורך מגעים בין גרגרים	L
אורך הדוגמה	l
מספר מגעים בין גרגרים	N (N_1, N_2)
מספר גרגרים שכנים	n
מספר גרגרים שהשתתפו בסטטיסטיקה	n_{grains}
היקף חתך הגרגר	P
מקדם רגרסיה	R
שטח חתך הגרגר	S
זמן התקדמות הגל בדוגמה	T
נפח	V
מהירות גלי P	V_p

מהירות גלי S	V_s
מסה	m
תכולת רטיבות	w
מעוות נורמלי	ϵ_i
מעוותי גזירה	$\gamma_{ij}, \epsilon_{ij}$
מעוות צירי	ϵ_a
מעוותים רדיאליים	$\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}$
מעוות נפחי	ϵ_v
מעוות נפחי סופי	ϵ_v^f
נקבוביות	ϕ
קבוע למה	λ
יחס פואסון	ν
יחס פואסון הדינמי	ν_d
יחס פואסון הסטטי	ν_s
צפיפות	ρ
חוזק לחיצה חד-צירית (חוזק לחיצה מקסימלי)	σ_c
גודל המאמץ בנקודת תחילת התפיחה (crack damage stress)	σ_{cd}
מאמץ הידרוסטטי	σ_{hyd}
מאמצים נורמלים	σ_i
מאמצי גזירה	τ_{ij}, σ_{ij}

פרק 1 – מבוא

1.1 חשיבות אפיון התכונות המכניות של סלעים

התכונות המכניות של סלע מכתיבות את תגובת הסלע לשינויים בשדה הלחץ, הטמפרטורה, הרטיבות, וכדומה. מבין מגוון התכונות המכניות של הסלע, התכונה החשובה והשימושית ביותר היא חוזקו. מציאת חוזק הסלע ושאר תכונותיו המכניות מאפשרות לחזות את התנהגות הסלע מראש, כאשר נבקש להתערב בו ובסביבתו לצורך בניית כבישים, מנהרות, מכרות, בניינים וכדומה, ובעקבות כך להעריך בהתאם. בכדי להעריך את חוזק הסלע מקובל לבצע בדיקות מעבדה אשר עלותן גבוהה, ואשר דורשות הכנות רבות וציוד מיוחד. תוצאות הבדיקות תלויות במידה רבה בתכונות ציוד המעבדה ובאופן הניסוי, כלומר חוזק הסלע כפי שהתקבל מבדיקות המעבדה, מייצג נתון משתנה ותלוי, ותכונה לא לגמרי אמיתית של הסלע. לפיכך קיים צורך בקריטריון חוזק אשר יוכל לחזות את חוזקו האמיתי של הסלע בקירוב הטוב ביותר והמבוסס על פרמטרים של הסלע עצמו.

המיקרוטקסטורה מהווה תכונה מובהקת של הסלע ומאפיינת את מבנהו הפנימי ואת היחסים בין מרכיביו השונים. לפיכך היא חייבת גם להשפיע על התנהגותו המכנית, כפי שיוסבר להלן בפרק 2.3. מכאן שקריטריון המתבסס על המיקרוטקסטורה של הסלע יאפשר הבנה טובה ומעמיקה יותר של התכונות המכניות, ובהמשך אולי אף מציאת דרכים חדשות, ישירות יותר, לחיזוי תכונות הסלע בכלל וחוזקו בפרט.

1.2 מטרת המחקר

אופי המחקר תיאורטי-ניסיוני בעיקרו ומטרתו לבחון את השפעת אופי המגעים בין הגרגרים על התכונות המכניות של הסלע בכלל, ועל חוזקו בפרט. מטרה נוספת היא הגדרת "קריטריון מגע" אשר יתאר את אופי המגעים שבין הגרגרים המרכיבים את הסלע, ואשר יהיה קורלטיבי עם התכונות המכניות של הסלע המשקפות את חוזקו. בסופו של דבר, המטרה הסופית הינה למצוא קריטריון חדש המבוסס על מיקרוטקסטורה ואשר יוכל לחזות את חוזק הסלע.

1.3 יעדי המחקר

- I. קביעת פרמטר מיקרוטקסטורלי המאפיין את אופי המגע בין הגרגרים, עבור סלעים סדימנטרים (אבן חול ואבן גיר) – להלן יקרא "פרמטר המגע".
- II. בחינת השפעת שינויים בלחץ ההידרוסטטי (עד 40 MPa) על:
 - הפרמטרים המיקרוטקסטורליים (בעיקר – אורך מגעים בין גרגרים וגודל גרגר).
 - חוזק הסלע במבחן לחיצה חד-צירי.
 - המקדמים האלסטטיים (הסטטים והדינמים).

- פרוזיות וצפיפות הסלע.
- III. בחינת וניתוח הקשר בין פרמטר המגע ובין:
 - חוזקו החד-צירי של הסלע.
 - המקדמים האלסטיים של הסלע.
 - מהירות גלי לחיצה (P) וגזירה (S) העוברים בסלע.
- IV. בחינת התאמת תוכנות מסוג G.I.S. לניתוח מיקרוטקסטורלי.

1.4. הנחות יסוד

בגישתנו לנושא המחקר, אנו טוענים ומניחים מספר הנחות אשר מהוות את יסודות המחקר. הנחות הייסוד מתבססות בחלקן על מחקרים קודמים וחלקן ננסה לאמת. להלן הנחות הייסוד של מחקר זה:

- א. לתכונות ולאופי המיקרוטקסטורלי של הסלע השפעה מכרעת על חוזק הסלע (Hatzor et al., 1997; Ersoy & Waller, 1995; Prikryl, 2001).
- ב. אנו יוצאים מנקודת הנחה שאופי המגע בין הגרגרים מושפע מאוד מיחסי הגומלין בין המרכיבים הטקסטורליים השונים (גודל גרגר, צורה, אורנטציה, נקבוביות, צפיפות אריזה וכדומה). כלומר במקום לבחון כל פרמטר בנפרד ניתן לבחון את גבולות הגרגרים והמגעיים ביניהן, שכן הם מהווים ביטוי לאינטראקציה בין המרכיבים הטקסטורליים הבודדים.
- ג. אופי המגעיים וגבולות הגרגר הינם הפרמטרים המשפיעים ביותר, מבין הפרמטרים המיקרוטקסטורליים והמקרוטקסטורליים, על חוזק הסלע (Van de Steen et al., 2002; Palchik & Hatzor, 2000; David et al., 1998; Ersoy & Waller, 1995).
- ד. אורך מגע בין גרגרים גדול יותר – גורם להגדלת חוזק הסלע (David et al., 1998; Ersoy & Waller, 1995; Digby, 1981).
- ה. ככל שהמגעיים רציפים יותר – הסלע יהיה חזק יותר (David et al., 1998).
- ו. דחיסת דוגמת סלע בלחץ הידרוסטטי משמעותי תוביל לשינויים בתכונות המיקרוטקסטורליות בכלל ולשינויים באופי המגעיים בין הגרגרים בפרט (Zhang et al., 1990; Digby, 1981).
- ז. אנו מניחים כי בשני טיפוסים הסלעים שבידינו (אבן-חול ואבן-גיר) חומר הצמנט חלש ורך יותר מחומר הגרגרים. לפיכך אנו גם מניחים שאופי הכשל בסלעים שלנו יהיה בעיקרו בין-גרגרי (אם כי לגבי אבן-הגיר צפוי כשל מורכב יותר).

1.5. האתגר והקושי שבהגדרת קריטריון מיקרוטקסטורלי

חוזק הסלע הינו מדד המושפע ממספר רב מאוד של משתנים, חלקם חיצוניים (כמו טמפרטורה, לחץ, היסטוריה, וכו') וחלקם מהווים את תכונות הסלע עצמו (הרכב, נקבוביות ושאר התכונות

המיקרוטקסטורליות). בפרק הבא מפורטים מחקרים שונים שנעשו בתחום המיקרוטקסטורה והשפעתה על התכונות המכניות של הסלעים. ברוב המחקרים הקודמים נבחן כל פרמטר מיקרוטקסטורלי בודד ביחס לחוזק הסלע, אולם ישנם גם מחקרים אשר שילבו מספר פרמטרים ובחנו את מכלולם ביחס לחוזקו.

בעיה מרכזית בניסיון לקביעת הפרמטר המשפיע ביותר על חוזק הסלע, היא שהפרמטרים המיקרוטקסטורליים הם משתנים תלויים. שינוי בפרמטר מיקרוטקסטורלי אחד מוביל לשינוי בפרמטרים מיקרוטקסטורליים אחרים. לפיכך הבעיה היא שלא ניתן לשנות את אורך המגעים שבין גבולות הגרגרים מבלי לשנות תכונות מיקרוטקסטורליות אחרות, כגון: נקבוביות, גודל גרגר, אורנטציה וכדומה. פיתרון הבעיה נסמך על הנחה ב' מהנחות היסוד של המחקר: שאורכי המגעים בין גבולות הגרגרים מהווים ביטוי לתכונות המיקרוטקסטורליות האחרות ולאינטרקציה ביניהן. לפיכך במחקר זה ההתרכזות היא במציאת אותו "קריטריון של מגע", על ידי העברת תשומת הלב למגעים שבין גבולות הגרגרים.

בעיה נוספת בניתוח אופי המגעים היא העובדה כי בניתוח דו-מימדי של "פרמטר המגע" לא ניתן לראות את כל הגרגרים השכנים של גרגר נתון ולפיכך גם לא את כל המגעים בשלמותם (אורך מגע ארוך יכול להראות כנקודה או לא להיראות בכלל). (David et al., 1998) טענו שלא ניתן לראות כלל מגעים ללא צמנט. גם הגדרת גודל הגרגר "נפגעת" עקב הניתוח הדו-מימדי של החתך. גודל הגרגר נקבע מחתך דק אשר נחתך מגוף הגרגר השלם מוגדר ביחידות אורך או שטח, ויכול להטעות ולא לשקף את גודלו האמיתי של הגרגר.

בעיה נוספת קשורה לדרישה לחומר העונה לקריטריון ה-C.H.I.L.E. (רציף, הומוגיני, איזוטופי, ליניארי, אלסטי) הן ברמת המקרו ולא פחות ברמת המיקרו. חשובה במיוחד הדרישה שהחומר הראשוני איתו נעבוד (לפני דחיסתו באופן הידרוסטטי) יכלול גלעינים זהים בתכונות המכניות והמיקרוטקסטורליות, בכדי שהשפעת הדחיסה ההידרוסטטית תהיה ברורה ככל האפשר ונקייה מגורמים אשר יכולים להפריע לזיהוי הגורמים המושפעים מהדחיסה.

בעיה אחרונה וספציפית קשורה לאבני-הגיר ולאופי הגרגרים והצמנטציה בהם. לעיתים מופיעים מאובנים קלציטיים עם חללים בתוך גופם או שנראים "חדרים" (בפורמיניפריים) – כל זאת מקשה מאוד על אופי הגדרת גבולות הגרגר. גם הופעה של גדילת גרגרים מקשה על אופן קביעת גבולות הגרגר. כאשר גם הגרגרים וגם הצמנט עשויים קלציט תתכן בעיה באפיון מעבר הכשל (בין או תוך-גרגרי).

פרק 2 - רקע תיאורטי

2.1. תכונות מכניות של סלעים

התכונות המכניות של סלע מגדירות את אופיו המכני של הסלע ואת התנהגותו תחת תנאים מאוד מסויימים, כגון שינויי טמפרטורה, מאמץ, רטיבות, בלייה וכדומה. קביעת התכונות המכניות נעשית בדרך כלל על ידי מבחנים סטטיים ודינמיים, ומאפשרת את חיזוי התנהגות הסלע תחת אותם תנאים ספציפיים, בתנאי שדה. התכונות המכניות הנלמדות ממבחנים סטטיים כוללות יחסי מאמץ-מעוות, חוזק הסלע, אלסטיות, השפעת הלחץ המקיף וההידרוסטטי, ועוד. התכונות המכניות הנלמדות ממבחנים דינמיים כוללות במחקרנו מהירות מעבר גלי לחיצה (P) וגלי גזירה (S) בחומר.

2.1.1. אלסטיות

תורת האלסטיות דנה במעוותים ובתזוזות בגופים עקב העמסה חיצונית הפועלת עליהם, ויחד עם יחסי המאמץ-מעוות מהווה בסיס עבור כמעט כל נושא ובעיה הנדסית-גיאולוגית. האלסטיות מוגדרת כתכונת החומר אשר ביטויה הוא הופכיות (reversibility) המעוות בתגובה להעמסה (Goodman, 1989), או במילים אחרות, יכולת החומר לחזור בו ממעוות עם הסרת העומס (Wang, 1953). נגדיר את הקבועים האלסטיים עבור חומר אלסטי, ליניארי הומוגני ואיזוטרופי במערכת בת שלושה מימדים (כמתואר בתרשים 2.1):

$$[2.1] \quad E = \frac{\Delta \sigma_x}{\Delta \varepsilon_x} \quad \bullet \text{ מקדם האלסטיות (מודול יאנג - E)}$$

$$[2.2] \quad \nu = -\frac{\Delta \varepsilon_y}{\Delta \varepsilon_x} \quad \bullet \text{ יחס פואסון (ν)}$$

$$[2.3] \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \bullet \text{ מודול הגזירה (G)}$$

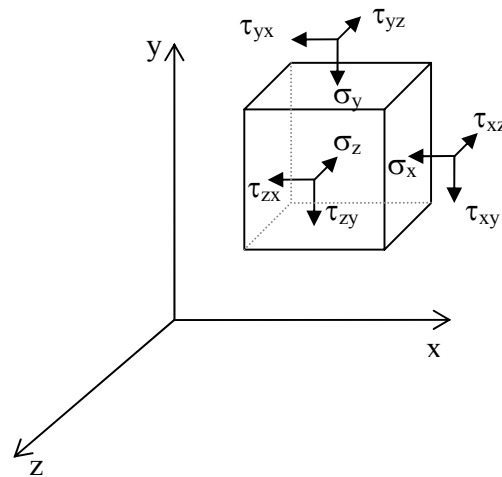
$$[2.4] \quad \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \bullet \text{ קבוע למה (λ)}$$

$$[2.5] \quad K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad \bullet \text{ מודול הנפח (K)}$$

כאשר:

σ_i – מאמץ נורמלי

ε_i – מעוות נורמלי



תרשים 2.1: מערכת מאמצים תלת-מיימדית. σ_i – מאמצים נורמלים; τ_{ij} – מאמצים גזירה.

חוק הוק (Hooke's Law) מגדיר יחס קבוע וליניארי בין המאמץ המופעל על גוף והמעוות הנמדד בו. בצורתו המוכללת ביותר מוגדר יחס זה בצורה הבאה:

$$[2.6] \quad \sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad \text{חוק הוק המוכלל:}$$

כאשר C_{ijkl} הוא "טנזור הקשיחות של החומר" ומגדיר את התכונות האלסטיות שלו. ביטוי מילולי לחוק הוק המוכלל תיהיה ההצהרה כי כל אחד מששת רכיבי המאמץ, בכל נקודה בגוף, הוא פונקציה ליניארית של ששת רכיבי המעוות בנקודה, ולהיפך.

בצורתו המוכללת מהווה C_{ijkl} מטריצה בת 81 קבועים אולם מכיוון שניתוח חומר חסר כל סימטריה הינו מורכב מדי, חסר נתונים וכמעט בלתי אפשרי, דיוננו יהיה מוגבל לחומר רציף, הומוגני, ליניארי, אלסטי ואיזוטרופי (C.H.I.L.E.). על אף שחומר בעל אופי איזוטרופי לחלוטין נדיר בטבע, נמצא מבדיקות מעבדה כי תוצאות מבחנים שבוצעו על חומרים איזוטרופים תקפות לעיתים, ונמצאות בקירוב טוב גם לחומרים פחות איזוטרופים.

מכיוון שעבור חומר הומוגני האלסטיות זהות בכל נקודה בגוף מתקבל $C_{ijkl} = C_{jikl}$ ו- $C_{ijkl} = C_{ijlk}$, ומספר הקבועים יורד ל-36. עבור חומר ליניארי מקבלים גם ש- $C_{ijkl} = C_{klij}$ ומספר הקבועים יורד ל-21. לצורך נוחיות נגדיר ו- $ij=I$ ו- $kl=J$ ונקבל את חוק הוק בצורתו כפי שמופיע בנוסחה 2.7:

$$[2.7] \quad \sigma_I = C_{IJ} \varepsilon_J \quad (C_{IJ} \text{ לא מהווה טנזור})$$

מכיוון שעבור חומר איזוטרופי התכונות האלסטיות זהות בכל הכיוונים בכל נקודה בגוף, מתקבל (בהתאם למערכת הצירים בתרשים 2.1) $C_{xx} = C_{yy} = C_{zz}$ ו- $C_{xy} = C_{yx} = C_{xz} = C_{zx} = C_{yz} = C_{zy}$, וכתוצאה מכך קטן מספר הקבועים ל-2 בלבד. משוואות 2.8 ו-2.9 מהוות את צורתן הסופית של חוק הוק עבור חומר רציף, הומוגני, ליניארי, אלסטי ואיזוטרופי (פיתוח מלא ניתן למצוא ב: Love, 1927; Timoshenko & Goodier, 1970; Wang, 1953).

$$[2.8] \quad \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu)}{E} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu)}{E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu)}{E} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix}$$

$$[2.9] \quad \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2G & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2G & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix}$$

כאשר:

σ_i – מאמץ נורמלי; $\tau_{ij} = \sigma_{ij}$ – מאמצי גזירה.

ε_i – מעוות נורמלי; $\gamma_{ij} = \varepsilon_{ij}$ – מעוותי גזירה.

2.1.2. משמעות המונחים חוזק וכשל בסלעים

באופן כללי משמעות המונח "כשל" מרמזת על אובדן מוחלט או כמעט מוחלט של שלמות מדגם הסלע, אולם בהקשר ההנדסי מונח הכשל מצביע על אובדן יכולת הסלע למלא תפקיד מיועד. לפיכך משמעות המונח אינה קבועה ותלויה באותו תפקיד. אפילו עבור דוגמה בודדת של סלע משמעות המונח "כשל" אינה ברורה וחד משמעית. זאת מאחר וקבלת אובדן מוחלט של קוהיזיה בדוגמת סלע תלויה במידה רבה מאוד באופן בו בוצעה ההעמסה על הדוגמה, אשר תלויה גם היא בנתוני ויכולות מכונת ההעמסה וביחסי הקשיחות מכונה-

דוגמה. אלה האחרונים אינם מהווים כאמור תכונה אמיתית של הסלע ומכאן הקושי הגדול בהגדרת המונח "כשלי". עם זאת בקריטריוני כשל בהנדסה ההתייחסות היא לחוזק הלחיצה המקסימלי (Peak stress) – נקודה D (בתרשים 2.2), למרות שבמקרים רבים ניתן עדיין להמשיך להעמיס על הסלע גם אחרי נקודה זו (ראה תרשים 2.2).

(1967) Bieniawski, הגדיר מונחים שונים הקשורים לשבירה פריכה:

- כשל (Failure) – תהליך בו חומר משתנה ממצב התנהגות אחד למצב התנהגות אחר. סוגי הכשל החשובים ביותר הם כניעה (Yield), כשל חוזק (Strength failure), שבירה (Fracture) וביקוע (Rupture).

1. כניעה (Yield) – תהליך בו חומר משתנה ממצב התנהגות אלסטית בעיקרה למצב התנהגות פלסטית בעיקרה.

2. כשל חוזק (Strength failure) – תהליך בו חומר משתנה ממצב בו יכולתו לשאת עומס הינה קבועה או גדלה עם הגידול בדפומציה, למצב בו יכולתו לשאת עומס קטנה או לא קיימת עוד.

3. שבירה (Fracture) – תהליך בו סדקים חדשים נוצרים בחומר או סדקים קיימים מתארכים ומתפשטים. ניתן להבחין בתנאים ושלבם שונים של שבירה:

(a) תחילת סידוק (crack initiation) – תהליך בו נוצרים סדק אחד או יותר בחומר שהיה עד כה נטול סדקים.

(b) תחילת שבירה (fracture initiation) – תהליך בו סדקים קיימים (אחד או יותר) בחומר מתחילים להתפשט.

(c) התפשטות השבירה (fracture propagation) – תהליך בו סדקים כבר קיימים בחומר, ועתה הם מתפשטים. ניתן לחלק את התהליך לשני תהליכי התפשטות שבירה:

(1) התפשטות יציבה של סדקים (stable fracture propagation) – תהליך בו התפשטות הסדקים היא פונקציה של ההעמסה וניתן לשלוט בתהליך בהתאם.

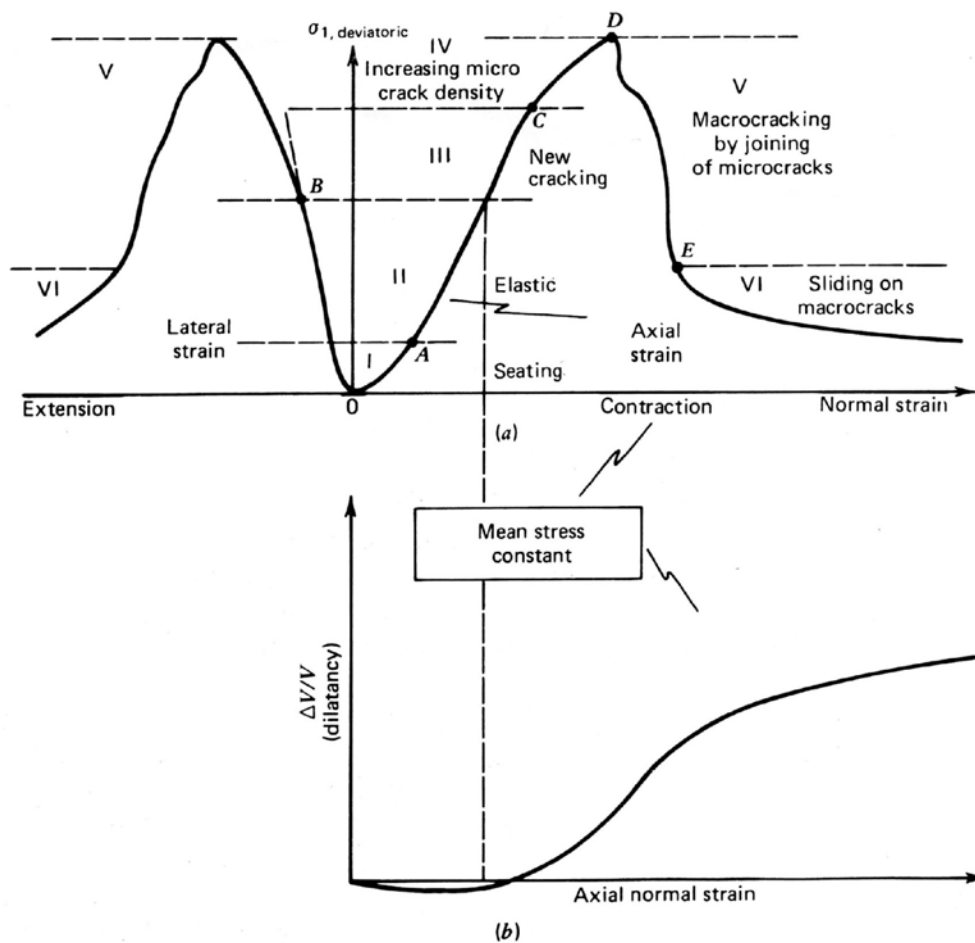
(2) התפשטות בלתי יציבה של סדקים (unstable fracture propagation) – תהליך בו התפשטות הסדקים נשלטת על ידי גורמים אחרים מלבד העמסה, ולפיכך לא ניתן יותר לשלוט בתהליך.

4. ביקוע (Rupture) – תהליך בו המבנה (קרי הדוגמה) מתפרק לשני חלקים או יותר. לעיתים מכונה גם "שבירה סופית" ("Final fracture" or "Ultimate fracture").

5. שבירה פריכה (Brittle fracture) – מוגדרת כשבירה הנגרמת ללא או לאחר מעט מעוות קבוע (פלסטי). הגדרתה מרמזת על התנהגות אלסטית אשר קדמה לשבירה (אולם לא בהכרח ליניארית). המונח ההופכי לה הוא שבירה משיכה (Ductile) אשר קדם לה מעוות פלסטי ניכר.

2.1.3 יחסי מאמץ - מעוות בלחיצה דיביאטורית

יחסי המאמץ – מעוות והאלסטיות מהווים בסיס עבור כמעט כל נושא ובעיה הנדסית-גיאולוגית. יחסי המאמץ – מעוות של סלע מתארים את תגובתו של סלע לשינויים בלחצים המופעלים על הסלע. כאשר פועל על גוף מסויים שדה מאמצים הכולל מאמצים נורמלים ומאמצי גזירה, הנותרים ונוצרים עקב הפרש מאמצים, נהוג לכנות שדה מאמצים זה כ"שדה מאמצים דיביאטורי" (Deviatoric stresses). בתרשים 2.2 מוצגות עקומות מאמץ-מעוות טיפוסיות עבור סלע אלסטי הנתון תחת שדה מאמצים דיביאטורי.



תרשים 2.2: עקומות מאמץ – מעוות טיפוסיות (ותיאורתיות) עבור סלע אלסטי הנתון תחת שדה מאמצים דיביאטורי הולך וגדל (Goodman, 1989).

ניתן להבחין בעקומות המוצגות בתרשים 2.2 במספר מגמות התנהגות של הסלע ונהוג לחלקן לחמישה שלבים עיקריים (Goodman, 1989; Bieniawski, 1967; Wawersik & Fairhurst, 1970):

I. סגירת מיקרו סדקים וחללים - בשלב זה מקדם האלסטיות (E) הולך וגדל, ושיפוע עקומת מאמץ-מעוות נראה קעור במעט ולא ליניארי. העובדה ששלב זה קצר עבור סלעים קשים מעידה על כך שרוב הסדקים היו סגורים עוד לפני שבוצעה הבדיקה.

II. דפורמציה אלסטית – בשלב זה המעוות הצירי, המעוות הלטרלי והמעוות הניפחי, כולם ליניאריים ביחס להפרש המאמצים/המאמץ הראשי. מקדם האלסטיות ויחס פואסון מקבלים ערכים קבועים הנחשבים לערכים המייצגים של הדוגמה. הסרת המאמץ בשלב זה תגרום להסרת רוב המעוות, ולא בהכרח במסלול זהה.

III. התפשטות יציבה של סדקים – מנקודה B קצב המעוות הלטרלי הולך וגדל ביחס לקצב המעוות הצירי, וכתוצאה מכך יחס פואסון גדל. בעוד עקומת המעוות הצירי נשארת ליניארית, עקומות המעוות הרוחבי והנפחי מאבדות תכונה זו. סדקים חדשים נוצרים וישנים מתארכים (בדרך כלל מקבילים לכיוון המאמץ הראשי), ואלה גורמים לשינוי בכיוון המעוות הנפחי - לתפיחה (onset of dilatancy). תפיחה הינה מצב בו למעשה המעוות הרוחבי גדול יותר מהמעוות הצירי, קרי $|\varepsilon_{r1} + \varepsilon_{r2}| > \varepsilon_a$, וכתוצאה מכך נפח הדוגמה גדל (בניגוד לירידה בנפח הדוגמה כפי שהתרחשה בשלבים הקודמים). המעוות הנפחי עבור מבחן לחיצה תלת-צירי מוגדר כ:

$$[2.10] \quad \varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \varepsilon_a + \varepsilon_{r1} + \varepsilon_{r2} \quad \text{או} \quad [2.11] \quad \varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{1-2\nu}{E}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (\text{כאשר } \sigma_2 = \sigma_3)$$

התפשטות הסדקים בשלב זה נחשבת "יציבה", כלומר הסדקים מתארכים עם העליה במאמץ, אולם רק עד הגיעם לאורך סופי ואז הם חדלים לגדול.

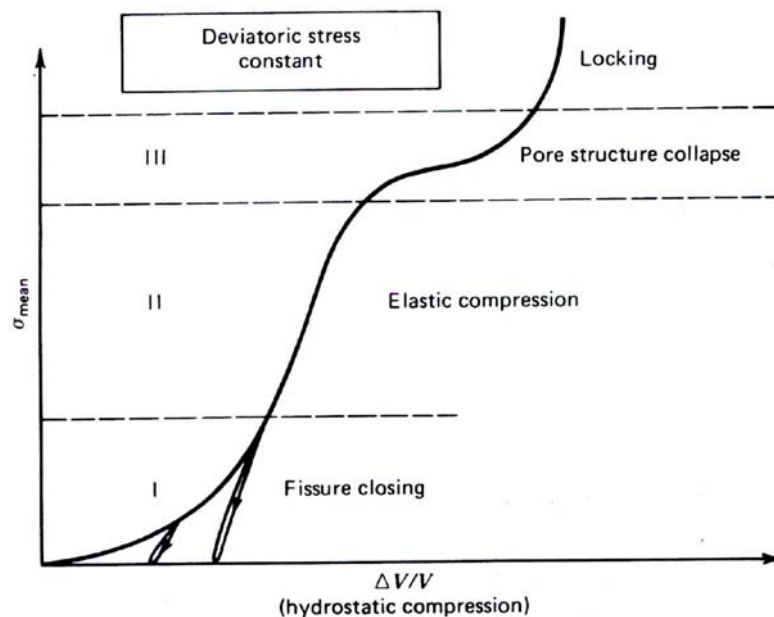
IV. התפשטות בלתי יציבה של סדקים – נקודה C מהווה למעשה את סוף שלב ההתפשטות היציבה ותחילת שלב ההתפשטות הבלתי יציבה של הסדקים. מנקודה זו גידול הסדקים אינו תלוי עוד במאמץ הדביאטורי הראשי, היות והאנרגיה האצורה בגוף הדוגמה מספיקה להמשך התארכות הסדקים. כתוצאה מכך סדקים מתקדמים עד קצוות הדוגמה ומערכת של סדקים החוצים זה את זה ומתלכדים מתפתחת עד לכדי היווצרותו של מישור שבר ברור ומוגדר (סוף שלב IV - נקודה D). Bieniawski (1967) התייחס לנקודה C כאל נקודת הכניעה (Yield point) של הסלע. נקודה D מהווה את סוף שלב זה ומציינת את חוזק הלחיצה המקסימלי, הוא העומס המירבי אותו הסלע מסוגל לשאת (Peak load). בנקודה זו (D) מקדם האלסטיות (E) שווה לאפס, וזוהי הנקודה אשר אותה מנסים לחזות קריטריוני הכשל השונים. עם זאת חשוב לציין כי הסלע אינו בהכרח כושל לחלוטין (מתפרק או קורס) כאשר מגיע לנקודה זו.

VI+V. התחברות המיקרו-סדקים – שלב זה מגיע לאחר השיא, קרי חוזק הלחיצה המקסימלי. בשלב זה המיקרו-סדקים מתלכדים לכדי יצירת מקרו-סדקים ושברים, אשר מביאים לקריסת ופירוק הדוגמה. בשלב VI התנגדות הדוגמה ללחיצה כבר נובעת ברובה מכוח החיכוך של חלקי הדוגמה בהחלקתם לאורך מישורי השברים.

2.1.4 דחיסה הידרוסטטית.

דחיסה הידרוסטטית מתארת מצב בו מאמצים לחיצתיים שווים בגודלם מופעלים על הסלע באורח זהה מכל הכיוונים ($\sigma_{\text{hyd}} = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$). שדה מאמצים כזה מכונה שדה מאמצים לא-דביאטורי (Nondeviatoric stresses) ומיוצג באמצעות σ_{mean} בלבד ($\sigma_{\text{mean}} = 1/3(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = 1/3(\sigma_1 + 2p)$; $p = \sigma_2 = \sigma_3$). הפעלת מאמצים כאלה גורמת להקטנת הנפח וקריסת חללים, תהליך המביא בסופו של דבר לשינויים לצמיתות במירקם הסלע. עם זאת בדחיסה הידרוסטטית לא מתקבלת תגובה של לחץ מירבי ו/או כשל, אלא במצב כזה הסלע תמיד יכול לשאת תוספת בלחץ הלא-דביאטורי ולמעשה מוגבל רק ליכולות המכבש במעבדה. בהיסטוריה המדעית ידועים נסיונות דחיסה בתחומי המגה-בר, ואם כי נתקבלו שינויי פזות במוצק לא התקבלו תוצאות של הגעה ללחץ מירבי (Goodman, 1989).

בתרשים 2.3 מוצג גרף עקומת מאמץ – מעוות נפחי, עבור מצב דחיסה הידרוסטטית. ניתן להבחין בעקומה במגמת עלייה תמידית של הגרף כלפי מעלה, ולחלק את העקומה לארבעה שלבים כמצויין בתרשים.



תרשים 2.3: עקומת מאמץ – מעוות נפחי עבור דחיסה הידרוסטטית והחלוקה לשלבים במעוות הנפחי (Goodman, 1989).

שלבי הדפורמציה בלחיצה הידרוסטטית:

1. Fissure closure - סגירת סדקים ראשוניים ולחיצה מועטה של מינרלים. כאשר מסירים את העומס בשלב זה רוב הסדקים נשארים סגורים ומתקבל מעוות נפחי בלתי הפיך.

II. Elastic compression – לאחר שרוב הסדקים נסגרו, המשך הדחיסה גורמת למעוות חללים ודחיסה של הגרגרים באופן ליניארי. שיפוע עקומת המאמץ–מעוות נפחי בשלב זה הוא ליניארי, מכונה "Bulk modulus" (מקדם הנפח) ומיוצג על ידי האות K , כמתואר במשוואה 2.12:

$$[2.12] \quad K = \frac{\Delta\sigma_{hyd}}{\Delta\varepsilon_V}$$

דחיסות הסלע (C) נתונה על ידי היחס ההפוך ל- K , כמתואר במשוואה 2.13:

$$[2.13] \quad C_{(Compressibility)} = \frac{1}{K}$$

III. Pore structure collapse – בשלב זה מקבלים סגירה וקריסה של החללים עקב ריכוזי מאמץ גבוהים סביב דפנות החללים. נקודת המעבר לשלב זה מאופיינת בשינוי דרסטי בשיפוע הגרף ומכונה "הלחץ הקריטי" (P_{crit} - critical pressure) (Zhang et al., 1990). בסלעים חזקים עם ריכוז גבוה של צמנט שלב זה מתרחש במאמצים גבוהים מ-1 kbar או 100 MPa, בעוד בסלעים חלשים יותר או עם ריכוז צמנט נמוך קריסת החללים מתרחשת במאמצים נמוכים בהרבה. Zhang et al. (1990) מצאו כי נקודת הלחץ הקריטי קורלטיבית עם נקבוביות הסלע וגודל הגרגר. הם מצאו כי ככל שהסלע יותר נקבובי ובעל גודל גרגר ממוצע גדול יותר, נקודת המאמץ הקריטי תהיה במאמצים נמוכים יותר. קריסת החללים הרסנית במיוחד עבור סלעים מאוד נקבוביים.

IV. Locking – לאחר סגירת כל החללים הלחץ מופעל כולו על הגרירים עצמם. בשלב זה שיפוע הגרף נעשה יותר ויותר תלול ו- K (Bulk modulus) הולך וגדל.

2.1.5. בדיקות דינמיות – מהירויות גלים בחומר.

מדידת מהירות מעבר גלים על-קוליים בחומר (Ultrasonic velocity measurement) היא בדיקה דינמית להערכת התכונות המכניות של סלע. בבדיקה זו מועברים גלי לחיצה (P) וגלי גזירה (S) בתדר ידוע דרך גלעין סלע, ואנו מודדים את זמן מעבר הגלים בחומר ומחשבים את מהירותם (שיטת הבדיקה מתוארת להלן בפרק 3.3). בהנחה שהסלע אלסטי, הומוגני, ואיזוטרופי, ניתן לחשב את הקבועים האלסטטיים הדינמיים של הסלע ממהירויות הגלים, כפי שהתקבלו בבדיקה, באמצעות הנוסחאות הבאות:

$$[2.14] \quad E_d = \frac{\rho V_S^2 (3V_P^2 - 4V_S^2)}{(V_P^2 - V_S^2)} \quad \bullet \text{ מקדם האלסטיות (מודול יאנג - E)}$$

$$[2.15] \quad \nu_d = \frac{V_P^2 - 2V_S^2}{2(V_P^2 - V_S^2)} \quad \bullet \text{ יחס פואסון (v)}$$

$$[2.16] \quad G_d = \rho V_S^2 \quad \bullet \text{ מודול הגזירה (G)}$$

$$[2.17] \quad \lambda_d = \rho(V_P^2 - 2V_S^2) \quad \bullet \text{ קבוע למה (λ)}$$

$$[2.18] \quad K_d = \frac{\rho(3V_P^2 - 4V_S^2)}{3} \quad \bullet \text{ מודול הנפח (K)}$$

כאשר: ρ – צפיפות; V_P – מהירות גלי לחיצה (גלי P); V_S – מהירות גלי גזירה (גלי S).

הספרות המקצועית מדווחת על הבדלים בין ערכי הקבועים האלסטיים הדינמיים לעומת ערכי הקבועים האלסטיים הסטטיים. למשל, Van Heerden (1987) בדיקותיו על מגוון רב של סלעים, מצא כי במרבית המקרים ערכי E_d גבוהים מערכי E_s (מקדם האלסטיות הדינמי והסטטי, בהתאמה) וערכי ν_d נמוכים מערכי ν_s (יחס פואסון הדינמי והסטטי, בהתאמה). עם זאת עבור אבן גיר לדוגמה נמצא כי היחס בין המקדם האלסטי הדינמי (E_d) לבין המקדם האלסטי הסטטי (E_s) משתנה בין 0.85 ל-1.86 (Naser, 2004). הסברים רבים ושונים הוצעו להבהרת ההבדל בקבועים, אולם אין עדיין הסכמה בנושא ומחקרים רבים עדיין דנים בכך.

2.2 מיקרו-מכניקה של השבר

2.2.1 שבירה הנשלטת על ידי סדקים קיימים

Griffith טען כי כמעט בכל חומר קיימים פגמים ראשוניים (מיקרו-סדקים) אשר במצב העמסה על החומר, מתרכזים בקצותיהם מאמצי מתיחה (Griffith, 1921; Bieniawski, 1967; Atkinson, 1991). כאשר מופעל לחץ על הדוגמה האנרגיה של ההעמסה (W) מתייצבת על ידי אנרגיית המעוות האלסטי האגורה במבנה החומר (W_d) ועל ידי אנרגיית פני שטח מישורי המיקרו-סדקים (W_s), כפי שניתן לראות מנוסחה 2.19:

$$[2.19] \quad W = W_e + W_s$$

אם מעלים את העומס על החומר, העליה ב- dW יכולה להגיע לשיווי משקל א' באמצעות עליה ב- dW_e בלבד ($dW_e \neq 0$; $dW_s = 0$), עליה ב- dW_s בלבד ($dW_e = 0$; $dW_s \neq 0$), או ג' עליה גם ב- dW_e וגם ב- dW_s .

$(dW_s \neq 0; dW_e \neq 0)$. התפתחות הסידוק תתרחש רק אם נקבל עליה ב- dW_s , כלומר אפשרות ב' או ג' $(dW_s \neq 0)$. בסופו של דבר, פתיחה והתקדמות של סדקים אלו תתרחש רק אם שדה המאמצים בקצה הסדק יגיע לגודל קריטי. נוסחה 2.20 היא ביטוי לגודל המאמץ הקריטי המהווה את התנאי לתחילת הסידוק בלוח דק הנתון תחת מאמץ מתיחה חד-צירי:

$$[2.20] \quad \sigma = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi c}} = \sigma_{IN}$$

כאשר: σ_{IN} – המאמץ הקריטי לתחילת הסידוק.

σ – מאמץ מתיחה חד-צירי המופעל על הדוגמה.

E – מקדם האלסטיות (מודול יאנג).

γ – האנרגייה על פני משטח הסדק ליחידת אורך.

c – חצי אורך הסדק.

מנוסחה 2.20 ניתן ללמוד כי תחילת הסידוק תלויה בשלושה גורמים: מקדם האלסטיות – אשר מהווה ביטוי לקשיחות המגעים בין הגרגרים, חצי אורך הסדק – אשר נגזר מאורך המגעים בין הגרגרים (מגבולות הגרגר), והאנרגייה האצורה בפני שטח הסדק הראשוני. כלומר גודל המאמץ הקריטי הנדרש לתחילת הסידוק תלוי לחלוטין באופי המגעים בין הגרגרים בכלל ובאורך המגעים בפרט.

Irwin (1960) הציע נוסחה עבור שבירה פריכה במתכות המתארת את היחס בין המאמץ המופעל (σ)

ומחצית אורך הסדק (c), עבור שלב ההתפשטות היציבה של הסדקים (Bieniawski, 1967):

$$[2.21] \quad \sigma = \sqrt{\frac{GE}{\pi c}} = \sigma_{IN}$$

כאשר G היא אנרגייה אלסטית המשתחררת מהמערכת ליצירת משטחי סידוק נוספים, ליחידת אורך.

כמובן ששלב זה מחייב $\sigma > \sigma_{IN}$ ונמשך כל עוד היחס בין σ ו- c נשמר (ראה 2.1.3). ניתן לראות שנוסחה זו (2.21) דומה מאוד לנוסחה 2.20 וכמוה, ניתן לראות שגם בשלב זה קיימת אותה תלות באופי המגעים בין הגרגרים.

בשלב ההתפשטות הבלתי יציבה של סדקים הקשר בין המאמץ המופעל (σ) ומחצית אורך הסדק (c) לא קיים עוד ולמעשה לא ניתן לשלוט עוד על התקדמות הסידוק (ראה 2.1.3). Irwin (1960) טען כי תנאי המעבר לשלב זה הוא אם רמת G תגיע לערך קריטי G_c , אשר מהווה תכונה של החומר (Bieniawski, 1967). נוסחה 2.22 מהווה ביטוי לקריטריון זה:

$$[2.22] \quad \sigma \geq \sqrt{\frac{G_c E}{\pi c}} = \sigma_{UFP}$$

כאשר σ_{UFP} הוא המאמץ הקריטי למעבר לשלב ההתפשטות הבלתי יציבה של סדקים. עבור תנאי מעוות מישורי, קצב האנרגיה האלסטית המשתחררת הקריטית (G_c) היא (Atkinson, 1991):

$$[2.23] \quad G_c = \frac{K_{Ic}^2 (1 - \nu^2)}{E} = 2\gamma$$

K_{Ic} - מקדם ריכוז המאמצים (fracture toughness) Gandhi & Ashby, (1979) כינו את המכניזם הנ"ל בשם "פצילות 1" ("cleavage 1").

2.2.2. שבירה הנשלטת על ידי סדקים שנוצרו עקב ריכוזי נקעים

מכניזם זה של שבירה נוצר כאשר מצטברים נקעים אשר מתרכזים בגבולות הגרגר. במצב כזה יכולים להיווצר סדקים שאורכם פרופורציונלים עם גודל הגרגר (d). אם המאמצים באיזור הנקעים מגיעים לערך σ^* ,

$$[2.24] \quad \sigma^* = \sqrt{\frac{EG_c}{\pi c}} \quad \text{כאשר:}$$

אזי סדקים יתחילו להתפשט מיד עם היווצרותם ותיווצר שבירה במאמץ המציין את המעבר להתנהגות מיקרו-פלסטית (σ_y). אם לעומת זאת $\sigma > \sigma_y^*$, אזי סדקים שנוצרו כתוצאה מהצטברות הנקעים לא יתפשטו מיד והמאמץ הנדרש להתפשטותם יצטרך להגיע לערכים גבוהים יותר (Atkinson, 1991). Gandhi & Ashby, (1979) כינו מכניזם זה בשם "פצילות 2" ("cleavage 2").

2.3. המיקרוטקסטורה והשפעתה על התכונות המכניות של הסלע

Williams et al., 1982 הגדירו את המונח טקסטורה כ"דרגת הקריסטליניות, גודל הגרגר או הגרנולריות, והמבנה-מארג או היחסים הגיאומטריים בין מרכיבי הסלע". מונח זה כולל בתוכו מגוון רב מאוד של פרמטרים בעלי קורלציה חזקה מאוד עם חוזק הסלע. הספרות יודעת להעריך את המיקרוטקסטורה של סלע כגורם השולט והמשפיע בצורה הדומיננטית ביותר על חוזקו המכני (Hatzor et al., 1997; Ersoy & Prikryl, 2001; Waller, 1995).

עם זאת, מאחר שמונח "המיקרוטקסטורה" כולל מגוון רב מאוד של פרמטרים, הופך נושא בדיקת השפעת המיקרוטקסטורה על חוזק הסלע לסבוך, מורכב וקשה ביותר. מחקרים שונים שעסקו בתחום זה התמקדו בדרך כלל בהשפעת פרמטרים מיקרוטקסטורליים בודדים על חוזק הסלע, כגון: השפעת ההרכב המינרלוגי של הסלע (Tugrul & Zarif, 1999), גודל הגרגרים וצורתם (Olsson, 1974; Hugman & Friedman, 1979; Onodera & Kumara, 1980; Ersoy & Waller, 1995; Wong et al., 1996; Fredrich Dunn et al., 1973; et al., 1990; Howarth & Rowlands, 1986; Hatzor & Palchik, 1997), הנקבוביות (et al., 1990; Howarth & Rowlands, 1986; Hatzor & Palchik, 1997; Scott & Nielsen, 1991; Palchik & Hatzor, 2000; Hatzor & Palchik, 1997), התארכותם וצפיפותם (Scott & Nielsen, 1991; Palchik & Hatzor, 2000; Hatzor & Palchik, 1997), אורנטציית הגרגרים, התארכותם וצפיפותם (Howarth & Rowlands, 1987; Burgi et al., 2001; Van de Steen et al., 2002), הבלייה של הסלע (Howarth & Rowlands, 1987; Burgi et al., 2001; Van de Steen et al., 2002), ועוד (Prikryl, 2001; Gupta & Seshagiri Rao, 2000).

ברוב המחקרים נמצא כי חוזק הסלע נקבע על ידי שילוב של מספר תכונות מיקרו אשר משתנות בין הסלעים השונים. עקב כך נעשו מספר ניסיונות לבניית מודלים או קריטריונים להערכת חוזק סלעים המורכב משילובם של מספר תכונות מיקרוטקסטורה (Howarth & Rowlands, 1986, 1987; Burgi et al., 2001). בפרק זה מובאת סקירה מתומצתת על מחקרים שונים אשר חקרו את הפרמטרים המיקרוטקסטורליים השונים, יחסם בהשפעה על חוזק הסלע ובסלע עצמו וכן על מודלים תיאורטיים המסבירים את הקשר בין הפרמטרים המיקרוטקסטורליים והתכונות המכניות של הסלע.

2.3.1 גודל גרגר

הצעדים הראשונים בהתייחסות להשפעת המיקרוטקסטורה על חוזק הסלע נעשו כבר בשנות ה-50 של המאה ה-20. Handin & Hager (1957) ו-Paterson (1958) אבחנו באופן כללי כי עבור סלעי גיר ושיש חוזק הסלע גדל עם הירידה בגודל הגרגר. Olsson (1974) בחן את השפעת גודל הגרגר על חוזק הסלע בסלעי שיש ומצא יחס ליניארי בין השורש ההופכי של גודל הגרגר הממוצע ($d^{-0.5}$) לבין המאמץ המכסימלי (σ_y), כפי שניתן לראות ממשוואה 2.25:

$$[2.25] \quad \sigma_y = \sigma_i + kd^{-0.5}$$

- σ_y - מאמץ מכסימלי.
- d - גודל גרגר ממוצע.
- σ_i, k - קבועים.

כהסבר ליחס זה הציע Olsson (1974) את מודל "הערמות הנקעים" של Petch (1953). על פי תיאוריה זו אשר נבנתה במקור עבור מתכות פולימריסטילניות, מאמצי מתיחה מרכזים בראש ערמת נקעים אשר מרכזים בגבולות הגרגר ומתגלים לבסוף כמיקרו-סדק (ראה 2.2.2). הערמות הנקעים בגבולות הגרגר יוצרת, אם כן, את תלות חוזק הסלע בגודל הגרגר. במילים אחרות ניתן לומר שחוזקו המכני של הסלע גדל עם הירידה בגודל הגרגר הממוצע. מגמה זו נתמכת על ידי מחקרים רבים נוספים (Fredrich et al., 1990; Wong

,(et al., 1996; Hatzor & Palchik, 1997; Hugman & Friedman, 1979; Onodera & Kumara, 1980 ;
 אם כי לעיתים אופי היחס נמצא שונה (יחס ליניארי - Hugman & Friedman, 1979, יחס לוגריתמי -
 Prikryl, 2001, וכדומה).

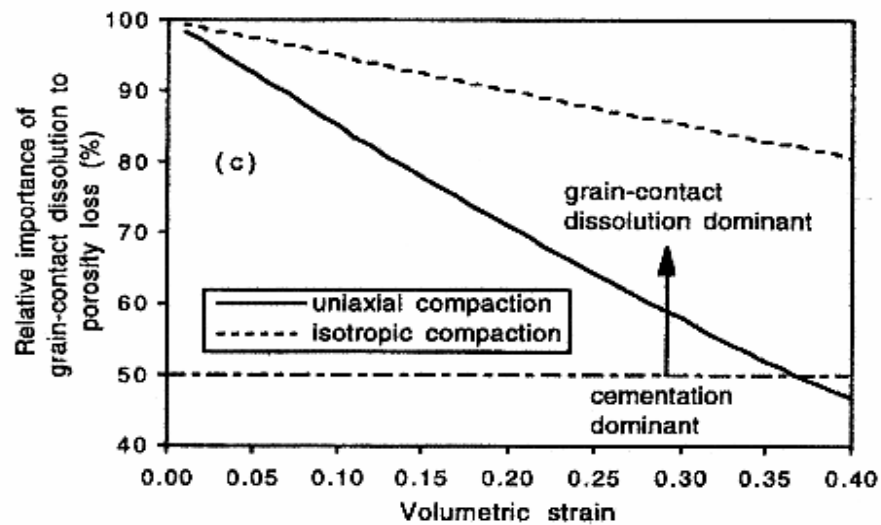
מחקרים רבים רואים בגבולות הגרגר כ"פגמי גריפית" (Griffith flaws) פוטנציאלים (Palchik &
 Hatzor, 2000; Palchik, 1999; Atkinson, 1991; Bieniawski, 1967; Griffith, 1921). עפ"י גישה זו,
 אורך הפגם הראשוני הוא פונקציה של אורך הגרגר (ראה 2.2.1).

חצור ופלצייק הראו בסדרת מאמרים (Hatzor & Palchik, 1997; Hatzor et al., 1997; Palchik, 1999;)
 כי מחקרים אחרים אשר מצאו קורלציה טובה במיוחד בין גודל הגרגר
 בלבד וחוזק הסלע, חייבים היו להעשות על סלעים מאוד הומוגניים ובעלי נקבוביות נמוכה מאוד (3-4%). הם
 טענו כי: א) בסלעים היותר נקבובים יש לקחת בחשבון גם את הנקבוביות, שכן הנקבוביות יכולה אף היא
 לקבוע את אורך הפגם הראשוני. ב) לא די בשני הפרמטרים האחרונים (גודל גרגר ונקבוביות) ויש לקחת
 בחשבון גם את אופי המגע בין הגרגרים. טענותיהם תואמות את ממצאיהם של (Ersoy & Prikryl, 2001)
 ו-(Waller (1995), ו-(Eberhardt et al. (1999).

2.3.2. נקבוביות

הנקבוביות השפעה חזקה מאוד על התכונות המכניות של סלע. הנקבוביות מאפשרת ומקלה על התקדמות
 הסדקים, וכתוצאה מכך בסלעים סדימנטרים כל פרמטרי החוזק יורדים עם העליה בנקבוביות (Dunn et
 al., 1973; Howarth & Rowlands, 1986, 1987; Scott & Nielsen, 1991; Palchik & Hatzor, 2000,
 1998; Palchik, 1999; David et al., 2002).

בתרשים 2.4 (He et al., 2002) מתוארת חשיבות השפעת מגעי הגרגרים על איבוד הנקבוביות בסלע אבן-
 חול שעבר המסת לחץ בתהליכי קומפקציה איזוטרופית וחד-צירית. טענתם של He et al. (2002) היא כי שני
 המנגנונים העיקריים המשפיעים על איבוד הפורוזיות בתהליכים אלו הם המסת מגעי גבולות הגרגר
 והצמנטציה. מבין שני המנגנונים הנ"ל נמצא כי המסת מגעי גבולות הגרגר הוא הגורם הדומיננטי ביותר
 לירידה בנקבוביות בתהליך הדחיסה של אבן-החול והמסת לחץ. מכיוון שכמות ההמסה בגבולות הגרגר
 תלויה במידה רבה באורך המגע בין הגרגרים ניתן לראות בכך חיזוק להנחת הקשר שבין אורך המגע
 שבין הגרגרים לנקבוביות הסלע. ההנחה היא כי הדחיסה ההידרוסטטית גורמת להגדלת אורכי המגע בין
 הגרגרים, ושינוי נקבוביות הסלע קטנה עם העליה באורך המגע בין הגרגרים (Digby, 1981; Zhang et al.,
 1990; Sayers, 2001).



תרשים 2.4: איבוד הנקבוביות עקב תהליכי קומפקציה, וחלקם של מגעי הגרגרים והצמנטציה בתהליך זה (הנקבוביות ההתחלתית היא 40%) (He et al., 2002).

2.3.3 צמנט/מטריקס

צמנטציה הינה אחד הגורמים המשפיעים ביותר על ההתנהגות המכנית של סלעים גרנולרים (Saidi et al., 1990; Leroueil & Vaughan, 2003). מחקרים הראו כי נוכחות צמנט, בהשפעתו על מבנה החללים, משפיע באופן מוחלט על התכונות המכניות של סלע סדימנטרי (Zang & Wong, 1995; David et al., 1998). עליה בתכולת הצמנט בסלע מובילה לעליה בקשיחות הסלע (במודול האלסטי E), לעליה ב- P_{crit} ולנקודת מעבר מהתנהגות פריכה להתנהגות דוקטילית בשדה מאמצים גבוה יותר. מצד שני העליה בצמנטציה גורמת לירידה בפורוזיות ובדחיסות (עליה ב- K) (Saidi et al., 2003; He et al., 2002; David et al., 1998; Zhang et al., 1990). David et al. (1998) ו-Saidi et al. (2003) טענו כי לא רק כמות הצמנט חשובה אלא גם מיקומו. הם מצאו כי הצמנט נוטה להתרכז בסביבות המגעים שבין הגרגרים ועקב כך מקטין את רגישות המגעים ללחצים. אפילו כמות מינימלית של צמנט, אם ממוקמת בנקודות המגע שבין הגרגרים, יכולה להשפיע באופן ניכר על החוזק והקשיחות של סלע גרנולרי. כתוצאה מכך סלעים בעלי תכולת צמנט גבוהה יותר הם יותר חזקים, יותר קשיחים ופחות דחיסים.

2.3.4 צורת גרגר ואורנטציה

צורת הגרגר הינה גורם מיקרוטקסטורלי נוסף המשפיע על חוזק הסלע (Prikryl, 2001; Ersoy & Waller, 1995; Howarth & Rowlands, 1986, 1987; Onodera & Kumara, 1980; Hawkes & Mellor,

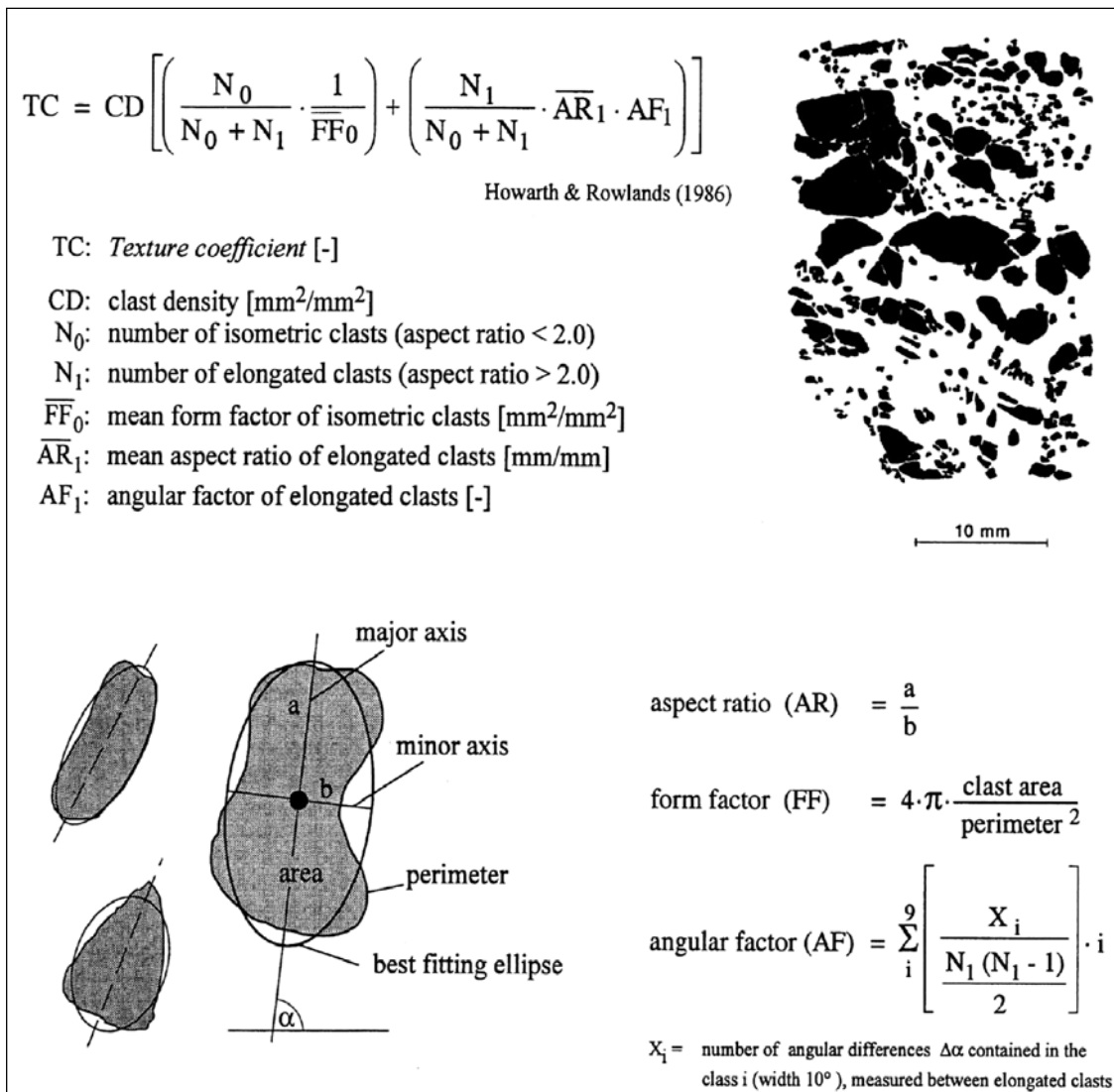
(1970). בשל המגוון האינסופי בצורות הגרגרים בסלעים קיים קושי רב בקביעת קריטריון צורה לגרגרי הסלע. עם זאת ישנם מספר מדדים לאיפיון צורת הגרגר המתבססים על התארכות הגרגר ("Aspect ratio" - Howarth & Rowlands, 1986, 1987) או על הסטיה מעיגוליות הגרגר ("roughness coefficient" - Ehrlich & Weinberg, 1970; Howarth & Rowlands, 1986, 1987). במקרה של סטיה מעיגוליות או התארכות הגרגר, מתווסף אלמנט חשוב נוסף – אורנטצית הגרגר. Howarth & Rowlands, (1986, 1987) ו-Burgi et al. (2001), במודל המיקרוטקסטורלי שפיתח כל צוות בנפרד (Texture Coefficient ו-Matrix Coefficient, בהתאמה), הצליחו לכמת את אורנטציית הגרגרים באמצעות פרמטר זווית ("Angle factor" ו-" δ ", בהתאמה). באופן כללי נמצא כי ככל שהגרגרים יותר אנגולרים, מחוספסים ומאורכים (כלומר פחות מעוגלים וכדוריים), כך קצב בליית הסלע גדל וזמן החדירה (ROP – Rate of Penetration) של PDC (Polycrystalline Diamond Compact) ומקדח יהלומים - קטן. כלומר הסלע פחות עמיד לקידוח ובלייה (Ersoy & Waller, 1995). כאמור, טענתנו לגבי השפעת צורת הגרגר על התכונות המכניות היא שהשפעתו תלויה בעיקרה באופי המגע עם שכניו.

2.3.5. צפיפות אריזה

הכוונה בצפיפות אריזה היא לאחוז השטח שתופסים הגרגרים מתוך שטח נתון (או, פרופורציה יחסית של גרגרים ומטריקס). ההנחה הרווחת היא כי עליה בצפיפות האריזה מובילה ליותר מגעים בין הגרגרים (Digby, 1981), לעליה בחוזק החד צירי, בחוזק במתיחה ובמודול יאנג (E) (Howarth & Rowlands, 1986,) (1987).

2.3.6. מודלים וקריטריונים משולבים

Howarth & Rowlands, (1986, 1987) בנו מודל להערכת חוזק הסלע המורכב משילובם של מספר תכונות מיקרוטקסטורה, המכונה "מקדם הטקסטורה" ("Texture Coefficient"). המודל משלב בתוכו שיקולים של גודל גרגר, צורה והתארכות הגרגר, אורנטציה וצפיפות אריזה (ראה תרשים 2.5). Ersoy & Waller (1995) הראו כי על אף שנמצא קשר קורלטיבי בין מקדם הטקסטורה (TC) וחוזק הסלע, מקדם הטקסטורה מתעלם ממספר תכונות חשובות, ולפיכך לא די בו להערכה מדוייקת מספיק של כל התכונות המכניות של הסלע.

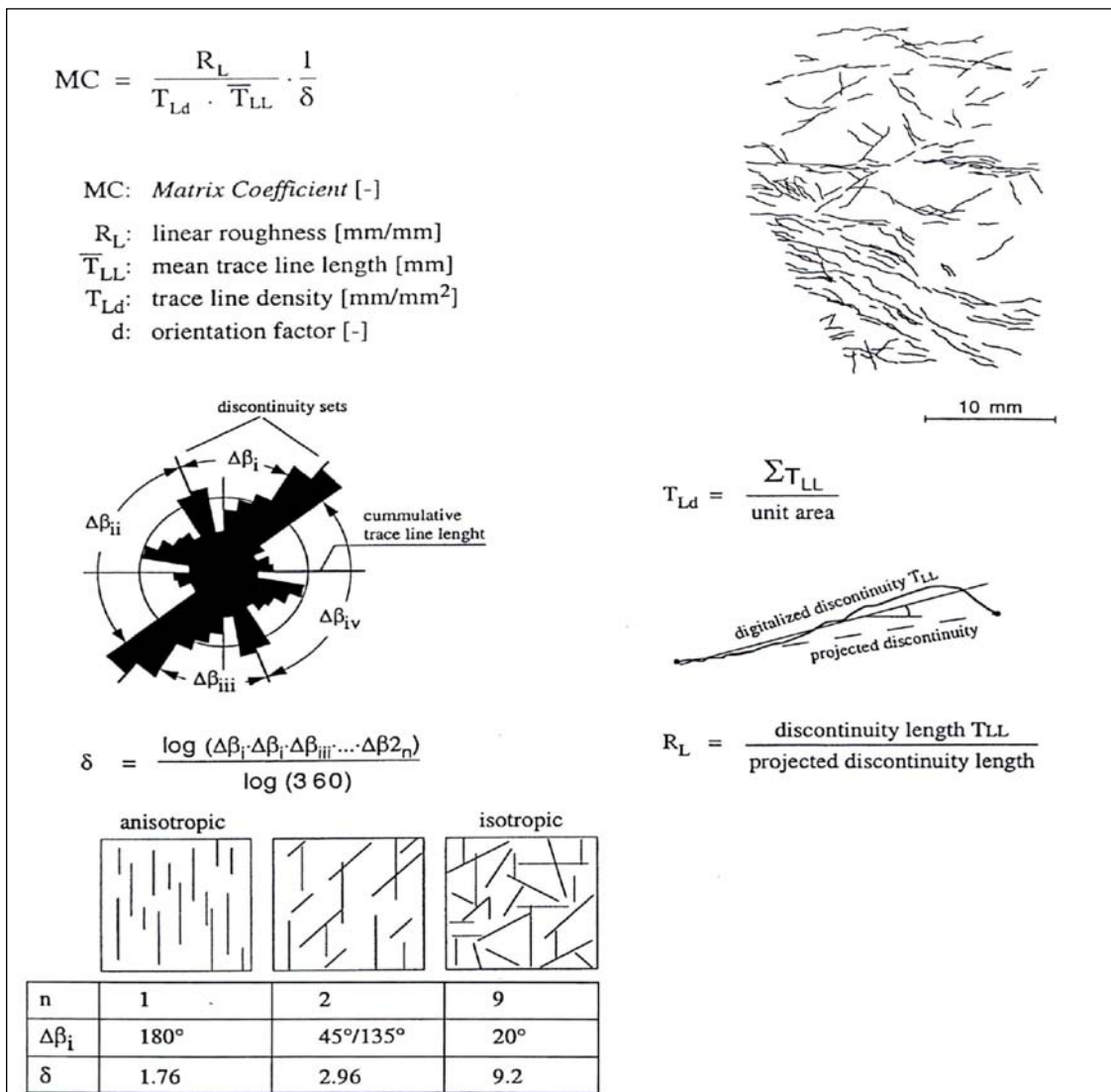


תרשים 2.5: מקדם הטקסטורה (TC) של Howarth & Rowlands, (1986, 1987), הפרמטרים המשתתפים בחישוב המקדם ואופן חישובם (לתיאור מפורט יותר של מקדם הטקסטורה – ראה Howarth & Rowlands, 1986, 1987).

Burgi et al. (2001) הציעו קריטריון חדש נוסף – "מקדם המטריקס" (MC), הלוּקח בחשבון את אורכי חוסר הרציפויות (T_{LL}), החספוס (R_L), הצפיפות (T_{Ld}) והאורנטציה של אי הרציפויות (δ) (ראה תרשים 2.6). יחד עם מקדם הטקסטורה של Howarth & Rowlands, (1986, 1987), ו"הערך הממוצע של חוזק ויקרס" (Calement et al., (1980) של (mwVh – "mean weighted Vickers hardness") המינרולוגי להערכת חוזק הסלע. היחידות ב-GPa), הם חיברו מודל המשלב מגוון רחב יותר של פרמטרים מיקרוטקסטורליים. המודל החדש מכונה "MSI" (אינדקס מינרולוגי וסטרוקטורלי – Mineralogical and Structural Index), ואת ביטויו ניתן לראות בנוסחה 2.26.

$$[2.26] \quad MSI = mwVh(MC + TC)$$

Burgi et al. (2001) בדקו את מודל ה-MSI על מגוון סלעי שבר קטקלסטיים חלשים. הם הראו קורלציה יפה של מדד ה-MSI עם חוזק הסלעים, אולם הדגישו כי קורלציה זו מוגבלת לדוגמאות שכיוון האנאיזוטרופיה שלהן נמצא בניצב לכיוון המאמץ העיקרי (σ_1). במקרים אחרים כאשר כיוון האנאיזוטרופיה נמצא בשיפוע ל- σ_1 , ה-MSI הראה ערכים גבוהים מדי.



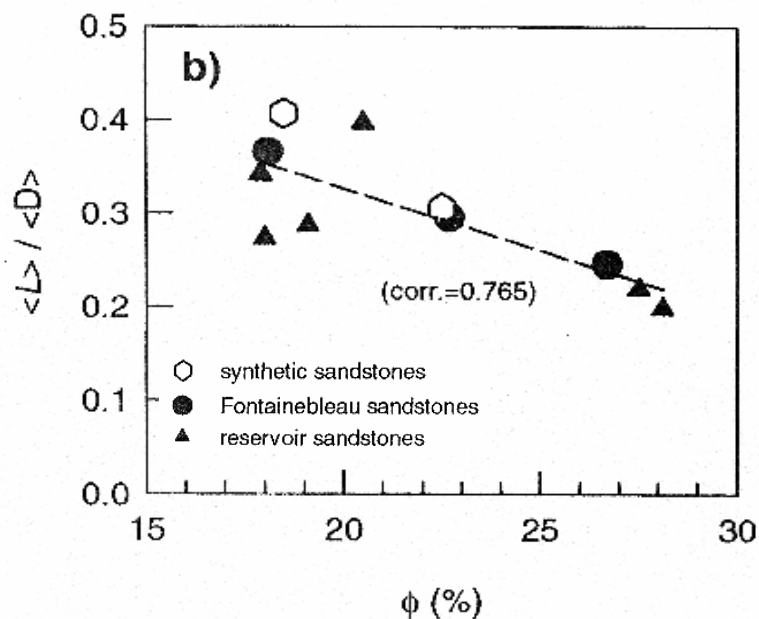
תרשים 2.6: מקדם המטריקס (MC) של Burgi et al. (2001), הפרמטרים המשתתפים בחישוב המקדם ואופן חישובם (לתיאור מפורט יותר של מקדם המטריקס – ראה Burgi et al., 2001).

2.3.7. המגעים בין גבולות הגרגרים.

למרות שמחקרים רבים מכירים בחשיבות התיאורתית שבגבולות הגרגר ואופי המגעים בין הגרגרים, ובהשפעתם על התכונות המכניות של הסלע, מעט ידוע עד כה ממחקרים ניסויים אשר בחנו את הקשר באופן ישיר ומעשי. החשיבות התיאורתית של הנושא ידועה, אולם מחקרי מעבדה אשר יתמכו בתיאוריה עדיין חסרים בספרות. לפיכך בשנים האחרונות נעשים יותר ויותר מחקרים העוסקים בגבולות הגרגר על ידי חוקרים הבאים ממגוון תחומי מחקר כמו גיאו-הנדסה, גיאופיזיקה והנדסת חומרים (בעיקר מתכות, בטון וחומרים קרמיים).

התקדמות סדקים בין גרגרים שכיחה מאוד בייחוד באבני-חול ובסלעים נקבוביים אחרים, אולם קיימת גם בסלעים קריסטליניים. גבולות הגרגר מהווים מסלול מועדף להתקדמות סדקים, כאשר נקודות המגע בין הגרגרים מהוות מכשולים עבור התקדמות הכשל (Van de Steen et al., 2002). כאמור, מחקרים רבים רואים בגבולות הגרגר פגמי גריפית (פרק 2.3.1).

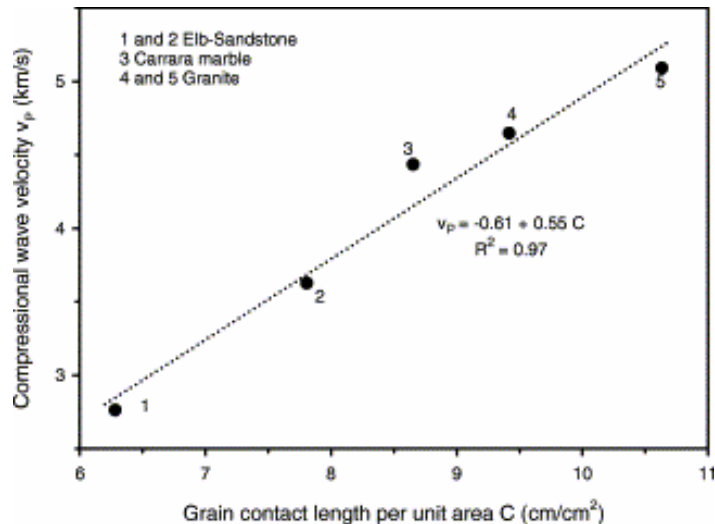
נמצא כי ככל שהסלע פחות נקבובי או יותר צפוף, כך אורך המגעים בין הגרגרים גדול יותר (David et al., 1998; Ersoy & Waller, 1995; Howarth & Rowlands, 1987; Digby, 1981). בתרשים 2.7 מוצגת קורלציה בה ניתן לראות את השפעת הנקבוביות על אורך המגע הממוצע שבין הגרגרים מנורמל לגודל הגרגר הממוצע, בסלעי חול (David et al., 1998).



תרשים 2.7: אורך המגע הממוצע מנורמל לגודל הגרגר הממוצע (L/D) ביחס לנקבוביות (ϕ) (David et al., 1998).

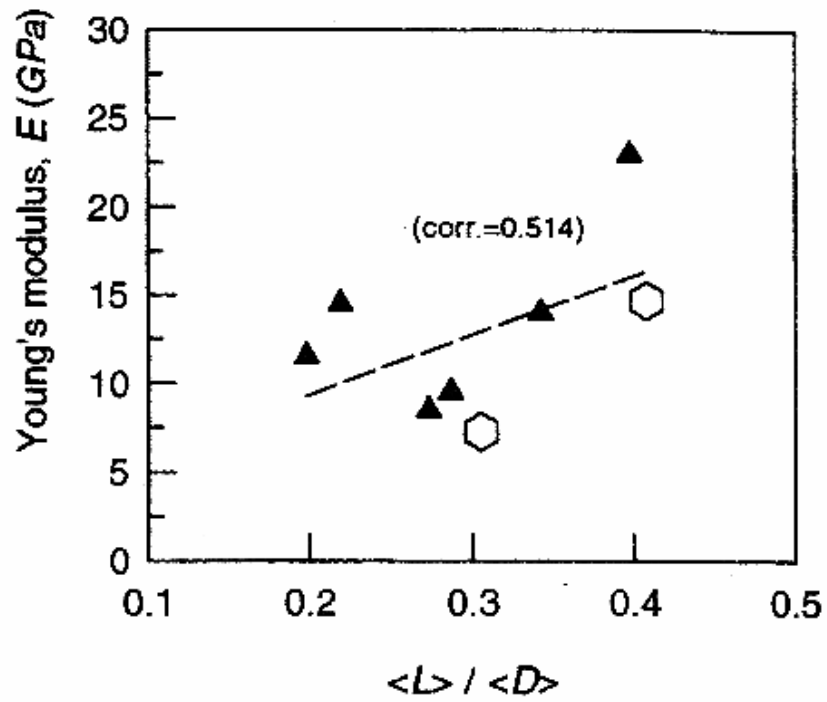
מתרשים 2.7 ניתן לראות כי ככל שהפורוזיות קטנה היחס L/D גדל. כתוצאה מכך, ניתן להניח כי ריכוז המאמצים בנקודות המגע שבין הגרגרים קטן עם העלייה ביחס L/D , מה שמאפשר לסלע לשאת יותר עומס.

משמעות הדבר היא שככל שאורך המגעים יהיה גדול יותר הסלע יהיה חזק וקשיח יותר. תופעה זו נתמכת על ידי מחקרים רבים אחרים (Alber & Brardt, 2003; Watanabe & Tsurekawa, 1999; David et al., 1998; Ersoy & Waller, 1995; Zhang et al., 1990; Digby, 1981; ועוד).



תרשים 2.8: אורך המגעים בין הגרגרים לשטח נתון (C) ביחס למהירות גלי הדחיסה שעברו בסלע (V_p) (Alber & Brardt, 2003).

(Alber & Brardt, 2003) בדקו את היחס בין מהירות גלי הלחיצה לבין אורך המגעים בין הגרגרים לשטח נתון, עבור מגוון סלעים. התוצאה מוצגת בתרשים 2.8, וניתן לראות כי התקבל יחס ליניארי בעל מקדם רגרסיה גבוה ($R^2=0.97$) המצביע על קשר ברור בין מהירויות הגלים לאורך המגעים. לאור העובדה כי מהירות הגלים היא פונקציה של נקבוביות וקשיחות הסלע (ראה 2.1.5 ו-Alber & Brardt, 2003), ניתן להניח שקיים גם קשר מהותי בין אורך המגעים וקשיחות הסלע. (David et al. (1998) בחנו את הקשר בין אורך המגעים בסלעי חול סינטטיים וטיבעיים מנורמלים לגודל הגרגר, לבין קשיחות הסלע המיוצגת על ידי מודול יאנג. התוצאה מוצגת בתרשים 2.9 וניתן לראות כי על אף שטיב היחס הליניארי נמוך למדי, ניתן עדיין ללמוד מהגורף על מגמת השפעת אורך המגעים על קשיחות הסלע. ממצאים אלו תומכים ומחזקים את הנחותינו לגבי השפעת אורך המגע בין הגרגרים על חוזק הסלע, וניתן לצפות כי היחס שיתקבל בקורלציה ביניהם יהיה חיובי.



תרשים 2.9: קורלציה בין מודול יאנג ואורך המגעים מנורמל לגודל הגרגר הממוצע (David et al., 1998). סמלים פתוחים (משושים) – סלעי חול סינטטיים. סמלים מלאים (משולשים) – סלעי חול טיבעיים.

פרק 3 – שיטות המחקר

3.1. הגישה למחקר ושיטת העבודה

השיטה באמצעותה בחנו את השפעת אופי המגעים בין הגרגרים על חוזק הסלע היא ע"י מדידת אורך ורציפות המגעים בסלעי חול וגיר, נירמולם (ביחס לגודל הגרגר) והשוואתם לחוזק הלחיצה החד-צירי (UCS – Uniaxial Compressive Strength) ולמקדם האלסטיות של הסלעים. לשם כך נזקקנו למספר דוגמאות סלע אשר יענו לקריטריון ה-C.H.I.L.E. (רציף, הומוגני, איזוטרופי, ליניארי ואלסטי) ויראו שינוי באורך המגעים שבין הגרגרים (ראה פרק 1.5). מכיוון שרצינו להימנע ככל האפשר מהשפעה של גורמים אחרים (כמו: מינרולוגיה, צמנטציה, גודל גרגר וכדומה), החלטנו להשתמש בגלעינים זהים ולשנות את תכונותיהם על ידי דחיסתם באופן הידרוסטטי בלחצים שונים. לצורך כך הוזמנו שמונה דוגמאות משני סוגי סלעים מחברת Terra-Tek שבסולט לייק סיטי, ארצות הברית: ארבע דוגמאות של אבן חול מה-Berea sandstone וארבע דוגמאות של אבן גיר מה-Indiana limestone.

תחילה נעשה אימות שכל ארבע דוגמאות מאותו סלע (Indiana limestone או Berea sandstone) עומדים בקריטריון ה-C.H.I.L.E., וללא שונות בתכונות המכניות והמיקרוטקסטורליות. אימות זה נעשה באמצעות מדידת צפיפות ונקבוביות, ומדידת מהירות גלי P ו-S. שלב זה נועד גם לבדוק את תנאי ההתחלה של הדוגמאות. לאחר שמצאנו שהשונות בצפיפות, בנקבוביות ובמהירות הגלים בין כל ארבע גלעינים זניחה, הנחנו שבהתאם לכך גם השונות המיקרוטקסטורלית זניחה.

בחרנו גלעין מכל סלע אשר שימש "דוגמת דמה" ("Dummy Sample") (BSD עבור ה-Berea sandstone ו-ILD עבור ה-Indiana limestone), ושלושת הגלעינים האחרים מאותו סלע שימשו "דוגמאות מבחן" ("Test Samples") (BST-0, BST-20, BST-40 עבור ה-Berea sandstone, ו-ILT-0, ILT-20, ILT-40 עבור ה-Indiana limestone). דוגמת הדמה שימשה לצורך הניתוח המיקרוטקסטורלי והמדידות המכניות הדינמיות, ודוגמאות המבחן שימשו לצורך מבחני הלחיצה החד-צירית כמתואר להלן:

- כל דוגמת דמה עברה מדידת מהירות גלי P ו-S ואנליזה מיקרוטקסטורלית לפני דחיסתה באופן הידרוסטטי, לאחר דחיסתה ב-20 MPa ולאחר דחיסתה ב-40 MPa.
- דוגמאות מבחן ILT-0 ו-BST-0 עברו מבחני לחיצה חד-צירית ללא שעברו קודם דחיסות הידרוסטטיות, ותוצאות מבחני הלחיצה הושו מול תוצאות האנליזות המיקרוטקסטורליות והבדיקות הדינמיות של גלעיני הדמה לפני שעברו דחיסות הידרוסטטיות (ILD-0 ו-BSD-0, בהתאמה).
- דוגמאות מבחן ILT-20 ו-BST-20 עברו מבחני לחיצה חד-צירית לאחר שעברו דחיסות הידרוסטטיות ב-20 MPa, ותוצאותיהם הושו מול תוצאות האנליזות המיקרוטקסטורליות

והבדיקות הדינמיות של גלעיני הדמה לאחר שעברו דחיסות הידרוסטטיות ב-20 MPa (BSD-20) ו-20 ILD, (בהתאמה).

• דוגמאות מבחן BST-40 ו-ILT-40 עברו מבחני לחיצה חד-צירית לאחר שעברו דחיסות הידרוסטטיות ב-20 MPa וב-40 MPa, ותוצאותיהם הושוו מול תוצאות האנליזות המיקרוטקסטורליות והבדיקות הדינמיות של גלעיני הדמה לאחר שעברו דחיסות נוספות ב-40 MPa (BSD-40 ו-ILD-40), (בהתאמה).

לאחר כל דחיסה הידרוסטטית בוצעה הסרת עומס מהדוגמה. ביצוע מבחני הלחיצה החד-צירית בוצעו מיד לאחר דחיסת הדוגמאות וללא הוצאתם מהמכש. בשל כך לא התאפשרו מדידת צפיפות ונקבוביות דוגמאות המבחן לאחר דחיסתם ויוחסו להן תוצאות חישובי הצפיפות והנקבוביות שנעשו בדוגמאות הדמה הקורלטיביות. לכל אורך המחקר חושבו צפיפות ונקבוביות המדגמים על פי משוואות 3.1 ו-3.2 (בהתאמה), בהנחה שהמשקל היחסי של מוצקים הוא $G_s=2.7$ ותכולת הרטיבות $w=0\%$, ובשל כך גם עם שגיאה מקסימלית ואחידה (לכל סוג סלע) של 0.1% .

$$[3.1] \quad \rho = \frac{m}{V}$$

$$[3.2] \quad \phi = \left(1 - \frac{\rho}{G_s \cdot \rho_w}\right) * 100\%$$

כאשר:

ρ - צפיפות

m - מסה

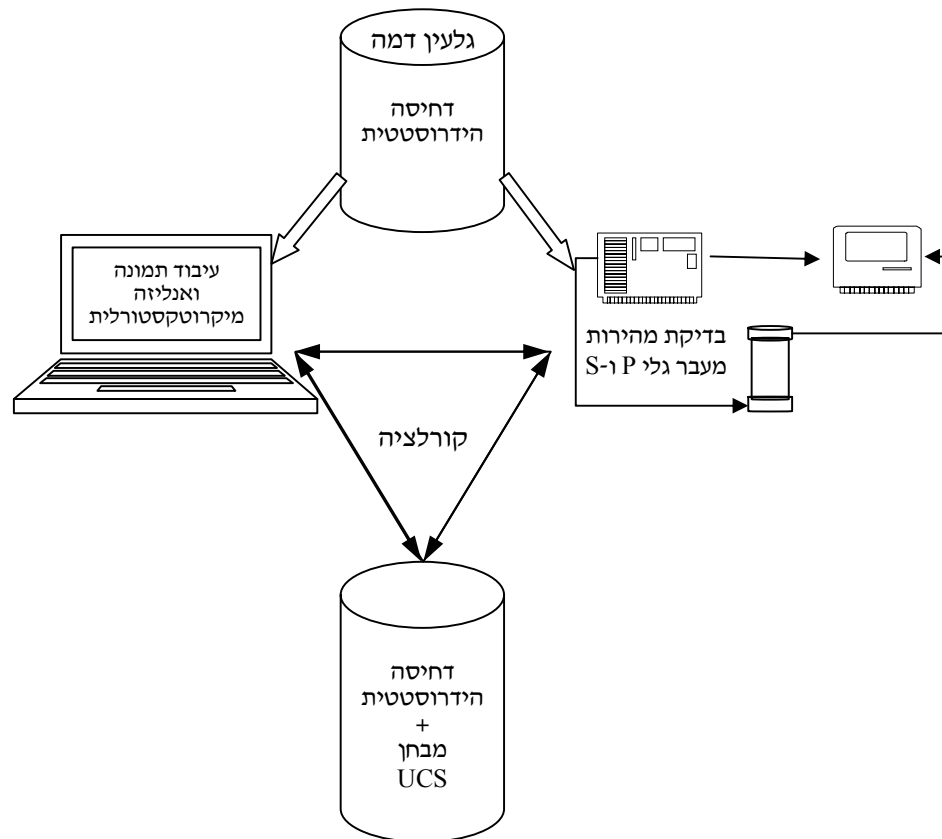
V - נפח

ϕ - נקבוביות

G_s - משקל יחסי של מוצקים (specific gravity of solids)

ρ_w - צפיפות המים ($= 1 \text{ g/cm}^3$)

בתרשים 3.1 מוצגת דיאגרמה המתארת באופן סכמתי את המדידות שנערכו עבור כל שלב דחיסה הידרוסטטית ואת השיטה בה בחנו את השפעת הדחיסה על המיקרוטקסטורה, והשפעת שני אלה על התכונות המכניות הסטטיות והדינמיות. יש לציין שמכיוון שמסקנותינו על השפעת תהליכי הדחיסה ההידרוסטטית מסתמכות על מבחנים שונים שנעשו על שתי דוגמאות קורלטיביות (דמה ומבחן), חשוב מאוד היה שתנאי ההתחלה של הדוגמאות יהיו זהים ושדוגמאות הדמה והמבחן יעברו בדיוק את אותם תהליכים.



תרשים 3.1: דיאגרמה סכמתית של הבדיקות שנעשו עבור כל שלב של דחיסה הידרוסטטית (עבור $\sigma_{hyd}=0, 20, 40$ MPa), והשיטה בה בחנו את השפעת הדחיסה על המיקרוטקסטורה ואת זו האחרונה על התכונות המכניות הסטטיות והדינמיות. UCS – חוזק לחיצה חד-צירית (Uniaxial Compressive Strength).

3.2. תיאור דוגמאות הסלע

לצורך המחקר הוזמנו ארבע דוגמאות של ה-Berea sandstone וארבע דוגמאות של ה-Indiana limestone מחברת Terra-Tek שבסולט לייק סיטי, ארצות הברית. סלעים אלו נבחרו מאחר ותכונותיהם נחקרו רבות בעבר (Lomov et al., 2001; Katz et al., 2000; Menendez et al., 1995; Hard & Wang, 1970; Wawersik & Fairhurst, 1995), ונמצא כי ביחס לסלעים טבעיים אחרים הם עומדים בקירוב טוב לדרישה לסלע העומד בקריטריון ה-C.H.I.L.E.

ה-Berea sandstone הינו סלע סדימנטרי, גרנולרי מגיל המיססיסיפיאן. בספרות מדווח על הרכבים הנעים בין 75-85% קוורץ, 5-10% פלדספרים, כ-5% קלציט ו-10-5% חרסית. הסלע מאופיין במיון טוב, עם גרגרים בעלי עיגוליות בינונית, גדילה של גרגרי הקוורץ וגודל גרגר ממוצע בינוני של כ-86 μm עד 250 μm . מחקרים קודמים מדווחים על צפיפות של כ-2.1 g/cm^3 , נקבוביות של כ-17.9% עד 21%, מהירות גלי P של

כ-2640 m/s, לחץ קריטי (P_{crit}) של כ-380 MPa, חוזק לחיצה חד-צירית של כ-74 MPa ומודול יאנג של 14.0 GPa עד 19.3 GPa (Lomov et al., 2001; Katz et al., 2000; David et al., 1998; Menendez et al.,) אורך המגעים עבור סלע זה (עבור סלע עם $\phi=17.9\%$, $E=14.0$ GPa, $D=86\mu\text{m}$) David et al. (1998). (1995; Hard & Wang, 1995; Zhang et al., 1990; Carmichael, 1989; לגרגר של $29.2\mu\text{m}$ עם סטיה סטנדרטית של $0.93\mu\text{m}$. בטבלה 3.1 מצויינים נתוני ההתחלה של סלע ה-Berea sandstone כפי שנמצאו במחקר זה.

ה-Indiana limestone הינו סלע סדימנטרי, קרבונטי מגיל המיססיפיאן. מכיל מעל 98% קלציום קרבונט, כ-0.075% מגנזיום קרבונט וכ-0.21% תחמוצות ברזל. הסלע מכיל מאובני צדפות, פורומיניפרים ואאיוליטים. בספרות מצויינים ערכי צפיפות של כ- 2.36 g/cm^3 , נקבוביות של כ-13% עד 18%, חוזק לחיצה חד צירית של כ-62 MPa ומודול יאנג של 25.3 GPa (Katz et al., 2000; Dodd & Nelson, 1998; Hard &) Indiana limestone כפי שנמצאו במחקר זה.

הדוגמאות עברו דחיסה הידרוסטטית, מבחני לחיצה חד-צירית, בדיקות מהירויות גלי P ו-S ואנליזה מיקרוטקסטורלית. לצורך כך הוכנו גלעינים ושקפים בהתאם לסטנדרטים של ASTM.

טבלה 3.1: נתוני ההתחלה של ה-Berea sandstone וה-Indiana limestone, כפי שנמצאו במחקר זה.

Indiana limestone	Berea sandstone	תכונות
מעל 98% קלציט	קוורץ 83% פלדספר 6% חרסית 5% קלציט 5% ברזל > 1%	הרכב
גבוהה	נמוכה	דרגת צמנטציה
2.27 g/cm^3	2.17 g/cm^3	צפיפות (ρ)
15.80%	19.60%	נקבוביות (ϕ) *
45.4 MPa	81.46 MPa	חוזק לחיצה חד-צירי מקדם האלסטיות
21.6 GPa	17.26 GPa	E **
0.23	0.37	ν ***
3503 m/s	2552 m/s	מהירות גלי P (V_p)
1934 m/s	1435 m/s	מהירות גלי S (V_s)
$426 \mu\text{m}$	$98 \mu\text{m}$	קוטר גרגר (D)

** מחושבת על פי משוואה 3.2, בהנחה ש- $G_s=2.7$ ותכולת הרטיבות $w=0\%$.

*** מחושב על פי נוסחאה 2.1 כמתואר להלן בפרק 3.4.2.

**** מחושב על פי נוסחאה 2.2 כמתואר להלן בפרק 3.4.2.

3.3. בדיקות דינמיות: מהירות גלים בסלע

מדידות מהירות גלי לחיצה (P) וגזירה (S) בוצעו על דוגמאות המחקר במעבדה למכניקת הסלע שבאוניברסיטת בן-גוריון בנגב. המדידות בוצעו באמצעות מכשיר למדידת מהירות התקדמות גלים על-קולים בסלעים מתוצרת Rodispr (סנט פטרסבורג, רוסיה), ובאמצעות מכשיר אוסצילוסקופ (Oscilloscope - מכשיר לשיקוף תנודות) מתוצרת Tektronix, דגם TDS 2014 (תרשים 3.2).

מכשיר מדידת הגלים עובד על עיקרון של יצירת גלים אלקטרומגנטיים באמצעות גנרטור ותרגום לגלים על-קולים באמצעות המערכת העל-קולית (המתמר) (תרשים 3.3). זו האחרונה מורכבת משני משטחים גליליים עשויים טיטניום המונחים משני צידי הדוגמה, ומהווים את:

(א) המשדר (Transmitter) אשר הופך את הגלים האלקטרומגנטיים לגלים על-קוליים ומעביר אותם לדוגמה.

(ב) המקלט (Receiver) אשר קולט את הגלים העל-קוליים מהדוגמה והופך אותם לגלים חשמליים.

המערכת מודדת את זמן יציאת הגל מהמשדר ועד קליטתו על-ידי המקלט. המשוב מתקבל באמצעות האוסצילוסקופ אשר מקבל את המידע מהמקלט ומציג אותו בצורה ויזואלית של צורת הגל. חישוב המהירות נעשה על-ידי חלוקת אורך הדוגמה (אורך המסלול שעבר הגל) בזמן שלקח לגל לעבור מהמשדר למקלט (כפי שנמדד על-ידי המערכת) כמתואר בנוסחאות 3.3 ו-3.4. באמצעות נוסחאות 2.14-2.18 אשר מופיעות בפרק 2.1.5, חושבו הקבועים האלסטטים הדינמיים של הדוגמאות.

$$[3.3] \quad V_p = \frac{l}{T_p}$$

$$[3.4] \quad V_s = \frac{l}{T_s}$$

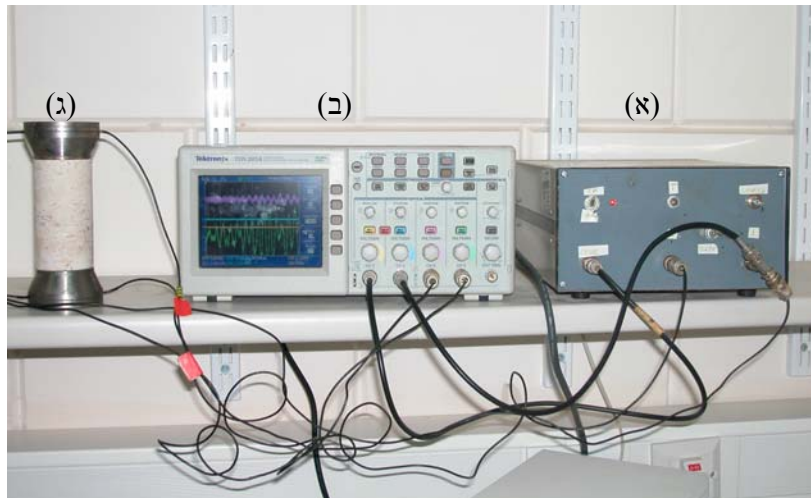
כאשר: V_p – מהירות גלי P

V_s – מהירות גלי S

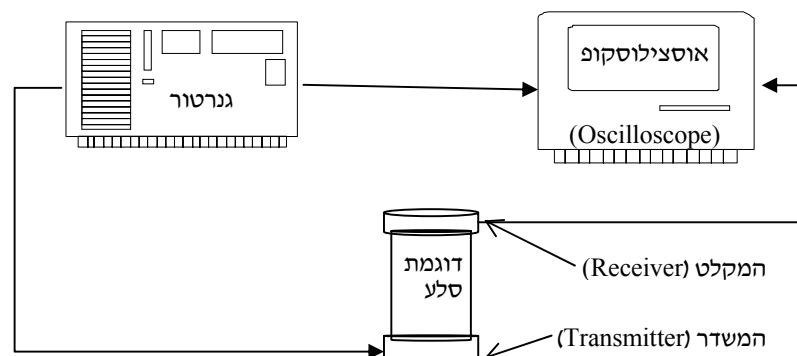
l – אורך הדוגמה

T – זמן התקדמות הגל בדוגמה בלבד (הזמן הנמדד פחות הזמן שהגל עבר בתוך חלקי המערכת)

מדידות מהירות הגלים בוצעו בגלעיני הדמה לפני ולאחר כל דחיסה הידרוסטטית. המדידות בוצעו על מדגמי סלע בקוטר 52 mm, באורך ציר 93-109 mm, עם חספוס קצה של עד 0.025 mm, סטייה מניצבות שאינה עולה על 0.25° (בהתאם לתקן ASTM D4543, D2845) ולאחר שיובשו ב- 110°C במשך 24 שעות (בהתאם לתקן ASTM D2216). גלי ה-S וה-P עברו דרך הגלעינים בתדר קבוע של כ-277 kHz.



תרשים 3.2: המערכת למדידת מהירויות מעבר גלי S-P שבמעבדה למכניקת הסלע שבאוניברסיטת בן-גוריון בנגב. (א) הגנרטור (Rodispr). (ב) מכשיר האוסצילוסקופ (Tektronix, דגם TDS 2014). (ג) המערכת העל-קולית (המתמר) המורכבת מהמשדר (Transmitter) והמקלט (Receiver), וביניהם הדוגמה.



תרשים 3.3: דיאגרמה סכמטית של אופן החיבור בין חלקי המערכת למדידת מהירויות גלים.

3.4. בדיקות סטטיות

לצורך שינוי התכונות המכניות והמיקרוטקסטורליות עברו דוגמאות הסלעים דחיסה הידרוסטטית, ולצורך אפיון התכונות המכניות בוצעו מבחני לחיצה חד-צירית. בדיקות אלה נערכו במעבדה למכניקת הסלע שבאוניברסיטת בן-גוריון בנגב, בהתאם לסטנדרטים של ASTM. הבדיקות נעשו באמצעות מכשיר הידראולי מתוצרת Terra-Tek, דגם FX-S-33090, הפועל על עיקרון של בקרת-סרוו במעגל סגור (תרשים 3.4). המערכת בעלת קשיחות מסגרת של 5×10^9 N/m ובשילוב עם המערכת ההידראולית מסוגלת לספק כוח צירי של עד 1.4 MN ולחץ מקיף של עד 70 MPa (בטמפרטורה של עד 149°C). המערכת מקבלת משוב באופן רציף

במהלך הבדיקה ומגיבה בהתאם לתוכנית עבודה שנקבעה מראש. המערכת מאפשרת שליטה בתהליך הלחיצה באחת משתי דרכים: על ידי קצב העמסה קבוע או על ידי קצב מעוות קבוע. המשוב והשליטה מושגים באמצעות מערכת מדידים, המזינים את מערכת הבקרה והכוללים:

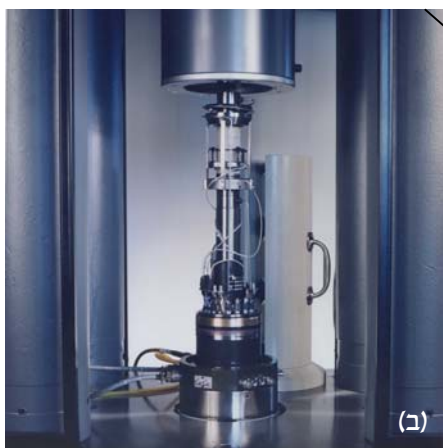
(א) מד-תזוזה (Linear Variable Differential Transformer) LVDT רגיש במיוחד העוקב אחר תנועת הבוכנה במכבש.

(ב) מד-עומס (Load cell) בעל יכולת מדידה של עד 1000 kN וליניאריות של 0.5% לאורך כל הטווח, אשר מודד את רמת העומס המופעל על הדוגמה.

(ג) מד-מעוות צירי (Axial cantilever) בעל גבול מעוות של עד 10% עם ליניאריות של 1% לאורך כל הטווח, אשר מודד את המעוות הצירי (ϵ_a) של הדוגמה במהלך ההעמסה.

(ד) מד-מעוות רוחבי (Transversal cantilever) בעל גבול מעוות של עד 7% עם ליניאריות של 1% לאורך כל הטווח, אשר מודד את המעוות הרוחבי לאורך שני צירים ניצבים (ϵ_{r1} ו- ϵ_{r2}) של הדוגמה במהלך ההעמסה.

בבדיקות אותם ערכנו חושב המעוות הנפחי הכולל (ϵ_v) על ידי סכום מרכיבי המעוות הרוחבי (ϵ_{r1} , ϵ_{r2}) והצירי (ϵ_a), כלומר $\epsilon_v = \epsilon_a + \epsilon_{r1} + \epsilon_{r2}$ (משוואה 2.10).



תרשים 3.4: המכבש התלת צירי אשר נמצא במעבדה למכניקת הסלע שבאוניברסיטת בן-גוריון בנגב (מתוצרת Terra-Tek, דגם FX-S-33090). (א) תמונה כוללת של המכבש (מסגרת ההעמסה, תא הלחץ והמערכת ההידראולית המייצרת את הלחץ המקיף). (ב) הגדלה של תא הדוגמה ומדי המעוות המורכבים עליה.

3.4.1 דחיסה הידרוסטטית

לצורך שינוי התכונות המכניות והמיקרוטקסטורליות עברו דוגמאות הסלעים דחיסה הידרוסטטית. הדחיסות בוצעו במכבש הידראולי (מתוצרת Terra-Tek, דגם FX-S-33090 – כמתואר בפרק 3.4 ובתרשים 3.4) תחת קצב עיבור הנשלט באופן ידני ולא קבוע ותוך מדידה חשמלית של הלחץ ההידרוסטטי (σ_{hyd}), העיבור הצירי (ϵ_a) ושני כוונים ניצבים של העיבור הרחבי (ϵ_{r1} ו- ϵ_{r2}).

הדחיסות נעשו על מדגמים בקוטר 52 mm, באורך ציר 93-109 mm, עם חספוס קצה של עד 0.025 mm וסטייה מניצבות שאינה עולה על 0.25° (בהתאם לתקן ASTM D4543). הדוגמאות נדחסו במצב יבש לאחר שיובשו ב- 110°C במשך 24 שעות (בהתאם לתקן ASTM D2216).

דוגמאות הדמה (BSD ו-ILD) עברו דחיסות הידרוסטטיות ב-20 MPa וב-40 MPa עם זמן מנוחה ארוך בין הדחיסות לצורך מדידות של מהירות גלים והוצאת שקפים. דוגמאות מבחן BST-20 ו-ILT-20 עברו דחיסות הידרוסטטיות ב-20 MPa ודוגמאות מבחן BST-40 ו-ILT-40 עברו דחיסות הידרוסטטיות ב-20 MPa וב-40 MPa, עם הסרת עומס בין הדחיסות וללא זמן מנוחה.

לאחר דחיסת הדוגמאות באופן הידרוסטטי נבחנו השינויים שארעו בדוגמאות באמצעות חישובי צפיפות ונקבוביות, בדיקות מהירות גלי P ו-S, מבחני לחיצה חד-צירית ואנליזות מיקרוטקסטורליות כמתואר בפרק 3.1.

3.4.2 מבחני לחיצה חד-צירית

לצורך אפיון התכונות המכניות הסטטיות ומציאת חוזק הדוגמאות בוצעו מבחני לחיצה חד-צירית. מבחני הלחיצה בוצעו במכבש הידראולי (מתוצרת Terra-Tek, דגם FX-S-33090 – כמתואר בפרק 3.4 ובתרשים 3.4) תחת קצב מעוות קבוע של $1 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$ עד ההגעה לחוזק הלחיצה המקסימלי (ה- Peak load – נקודה D בתרשים 2.2).

מבחני הלחיצה בוצעו על מדגמים בקוטר 52 mm, בעלי יחס אורך לקוטר של כ-1:2 (אורך ציר - 109 mm), עם חספוס קצה של עד 0.025 mm, סטייה מניצבות שאינה עולה על 0.25° (בהתאם לתקן ASTM D4543) ולאחר שיובשו ב- 110°C במשך 24 שעות (בהתאם לתקן ASTM D2216).

המבחנים בוצעו על דוגמאות המבחן מיד לאחר דחיסתן וללא הוצאתן מהמכבש. תרשמי מאמץ-מעוות הוכנו עבור כל מבחני הלחיצה והוגדרו הפרמטרים המכניים הבאים:

- חוזק הלחיצה החד-צירית (σ_c – נקרא גם חוזק הלחיצה המקסימלי) - נקבע כנקודה D בתרשים 2.2 וכמתואר בפרק 2.1.3.
- גודל המאמץ בנקודת תחילת התפיחה ($\text{crack damage stress} - \sigma_{cd}$) - נקבע מעקומת המאמץ-מעוות נפחי (של מבחן הלחיצה החד-צירית) כמאמץ שבו המעוות הנפחי הגיע לערך המקסימלי.

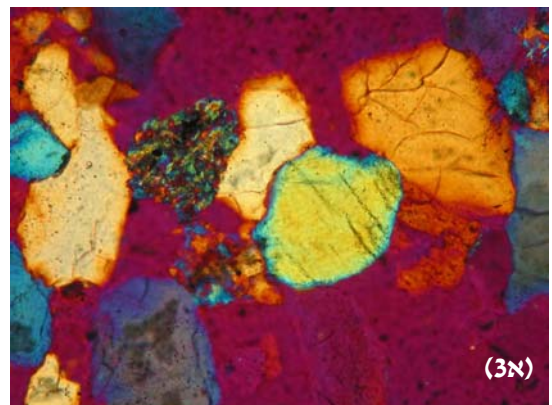
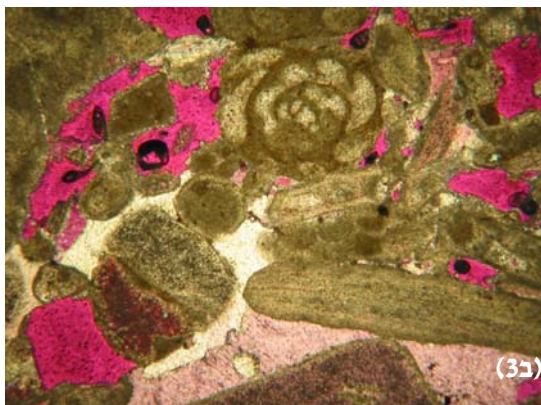
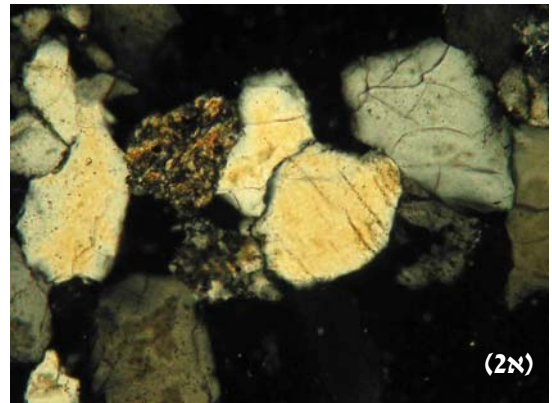
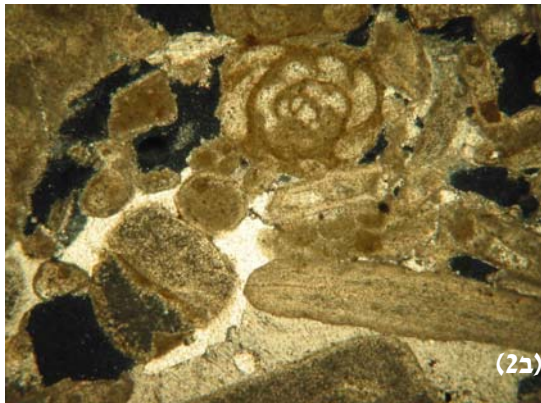
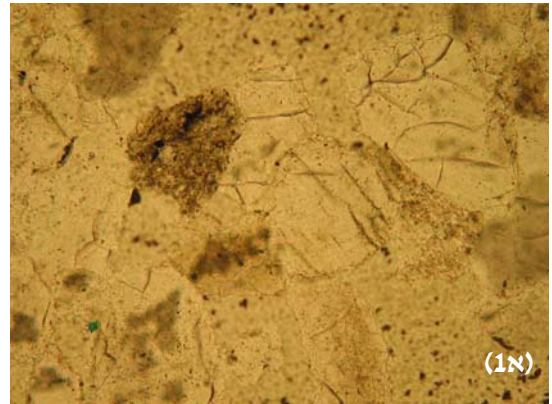
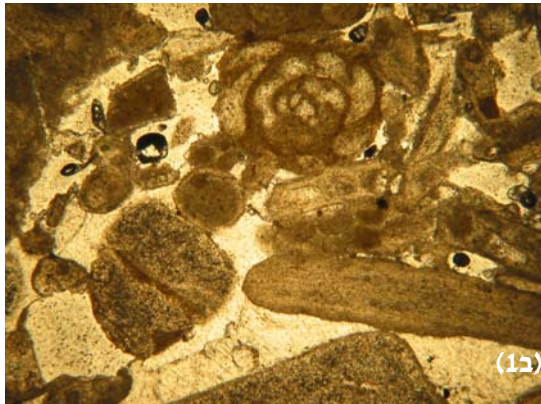
- מודול יאנג (מקדם האלסטיות - E) - חושב כשיפוע גרף המאמץ-מעוות צירי בשלב האלסטי על פי נוסחה 2.1 (כמתואר בפרק 2.1.3).
- יחס פואסון (ν) - חושב כשיפוע גרף המעוות רוחבי-מעוות צירי בשלב האלסטי על פי נוסחה 2.2 (כמתואר בפרק 2.1.3).

3.5. אנליזות מיקרוטקסטורליות

לצורך הניתוח המיקרוטקסטורלי הוכנו שקפים בעובי של כ- $30\mu\text{m}$, אשר נלקחו מדוגמאות הדמה לפני ולאחר כל דחיסה הידרוסטטית (ראה פרק 3.1). השקפים נבחנו תחת מיקרוסקופ אור מתוצרת Zeiss וצילומי מיקרו של השקפים נלקחו באמצעות מצלמה דיגיטלית תוצרת Canon, דגם PowerShot G2 (תרשים 3.5). בתרשים 3.6 מוצגות תמונות מיקרו מייצגות שנלקחו מדוגמאות הדמה של ה-Berea sandstone וה-Indiana limestone. עיבוד התמונה של צילומי המיקרו ומדידת הפרמטרים המיקרוטקסטורליים נעשו באמצעות מערכת מידע גיאוגרפית (GIS – Geographical Information System) (ראה 3.5.1 ו-3.5.2) ותרשימים 3.7 ו-3.8).



תרשים 3.5: מיקרוסקופ האור (מתוצרת Zeiss) ומעליו מצלמה דיגיטלית (מתוצרת Canon, דגם PowerShot G2) המורכבת באמצעות מתאם.



תרשים 3.6: דוגמאות לצילומי מיקרו של: א) ה-Berea sandstone בניקולים פתוחים, בניקולים סגורים ובניקולים סגורים עם פלטת קוורץ (1א, 2א ו-3א, בהתאמה). מידות התמונות – 0.64×0.48mm. ב) ה-Indiana limestone בניקולים פתוחים, בניקולים סגורים ובניקולים סגורים עם פלטת קוורץ (1ב, 2ב ו-3ב, בהתאמה). מידות התמונות – 2.05×1.54mm

עבור מצב דחיסה הידרוסטטי של 0 MPa הוכנו שני שקפים מייצגים – במקביל ובמאונך לכיוון ציר הגלעין. עבור מצב דחיסה הידרוסטטי של 20 MPa הוכן שקף בודד – במאונך לכיוון ציר הגלעין. עבור מצב דחיסה הידרוסטטי של 40 MPa הוכנו שלושה שקפים מייצגים – במקביל, במאונך ובזווית לכיוון ציר הגלעין. עבור כל מצב דחיסה נעשו מדידות על יותר מ-100 גרגרים מייצגים, במטרה להגיע לקירוב סטטיסטי אופטימלי. המדידות שנעשו על כל גרגר בשקף כללו: מספר שכנים, מספר מגעים, סכום אורכי המגעים עבור כל גרגר, קוטר גרגר, היקף הגרגר ושטחו.

3.5.1 שיטת העבודה עם מערכת ה-GIS

מערכות GIS (בתרגום לעברית נקראות ממ"ג - "מערכות מידע גיאוגרפיות") הן מערכות מידע אשר עוצבו לעבוד עם מידע מרחבי המשויך לרשת קורדינטות גיאוגרפיות ועובדות על עיקרון של עבודה בשכבות. מערכת ה-GIS בה בחרנו להשתמש במחקר זה הינה תוכנת MapInfo Professional (גירסה 7.5) והשימוש בה צומצם לצורך עיבוד תמונה ומדידת הפרמטרים המיקרוטקסטורלים בלבד.

יתרון המערכת למחקר הוא בכך שעל ידי העבודה בשכבות ניתן ליצור שכבה עבור כל פרמטר מיקרוטקסטורלי אותו רוצים למדוד, להשוות אותה ביחס לשכבות אחרות, לבצע את מדידות הפרמטרים בדיוק רב יחסית ולקבל את התוצאות באמצעות טבלאות נתונים.

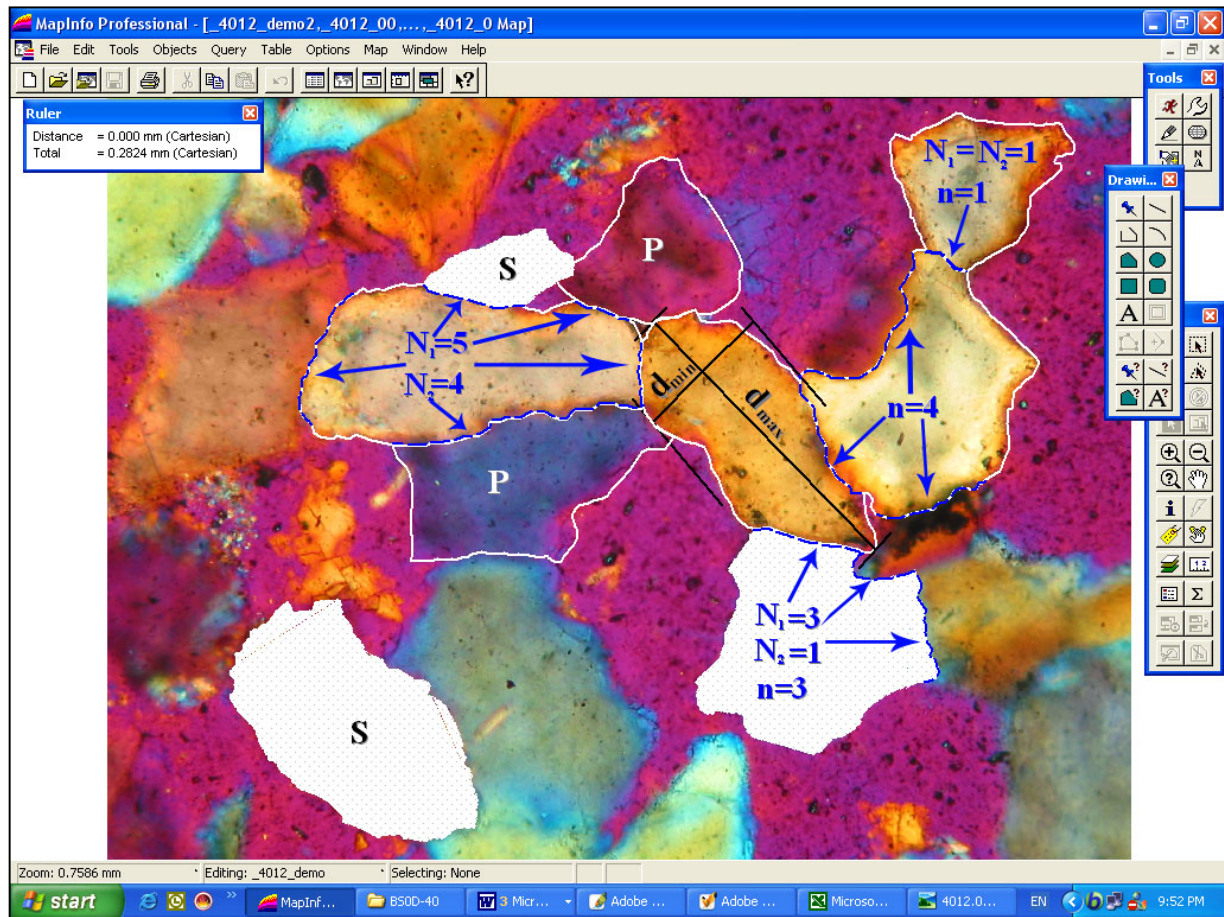
לשם כך צולמו תחילה תמונות מיקרו משקפי הדוגמאות באמצעות מצלמה דיגיטלית מתוצרת Canon, דגם PowerShot G2, אשר הורכבה על המיקרוסקופ בעזרת מתאם (תרשים 3.5). לאחר מכן כויילו תמונות השקפים באמצעות תוכנת MapInfo Professional על ידי הגדרת קורדינטות של ארבעת פינות התמונה (יחידות האורך והרוחב של התמונה כפי שנמדדו באמצעות מיקרומטר, ובדיוק של 0.001 mm). כל גרגר צולם שלוש פעמים: פעם ראשונה בניקולים פתוחים, פעם שנייה בניקולים סגורים ופעם שלישית בניקולים סגורים עם פלטת קוורץ להדגשת גבולות הגרגר. לאחר שכל שלושת הצילומים כויילו החלה עבודת הדיגיטציה. תחילה יצרנו שכבה של היקף הגרגרים בה הוגדרו גבולותיהם על ידי יצירת פולי-קווים (polylines). לאחר מכן יצרנו שכבה נוספת של שטחי הגרגרים על ידי הפיכת הפולי-קווים משכבת ההיקף לפוליגונים. הסיבה להפרדה בין שתי השכבות האחרונות ושיטת העבודה המסורבלת נעוצה בקושי זיהוי גבולות הגרגרים, הצורך להגדרתם בשלבים ובשילוב שלושת שכבות צילומי המיקרו. לאחר שגבולות הגרגרים זוהו, הוגדרו וסומנו יצרנו את שכבת המגעים על ידי העברת פולי-קווים על גבי היקפי הגרגרים בנקודות ואורכי המגעים שביניהם. סך הכול עובר כל גרגר אנליזה באמצעות שש שכבות: שלוש שכבות רסטוריות – צילומי המיקרו, ושלוש שכבות וקטוריות – היקף, שטח ואורך המגעים (ראה תרשים 3.7). שלושת שכבות הרסטור (צילומי המיקרו) עובדו ברזולוציה של גודל פיקסל הקטן מ- $1 \mu\text{m}^2$, אשר איפשר את ביצוע המדידות בדיוק רב מאוד של $0.1 \mu\text{m}$ עד $0.01 \mu\text{m}$.

3.5.2. אופן מדידת הפרמטרים המיקרוטקסטורליים

מדידות הפרמטרים המיקרוטקסטורליים נעשו על שקפים בעובי של כ- $30\mu\text{m}$ (עד $40\mu\text{m}$ אצל ה- Indiana limestone) אשר הוכנו מדוגמאות הדמה עבור מצבי הדחיסה השונים, ובאמצעות תוכנת GIS מסוג MapInfo Professional (גירסה 7.5). עבור כל שלב של דחיסה הידרוסטטית נעשו מדידות מיקרוטקסטורליות על יותר מ-100 גרגרים. הפרמטרים שנמדדו הם: מספר שכנים, מספר מגעים, סכום אורכי המגעים עבור כל גרגר, קוטר גרגר, היקף הגרגר ושטחו. אופן מדידת הפרמטרים נעשה באופן הבא, כמתואר בתרשים 3.8 ובדומה לשיטה המתוארת ב-David et al. (1998):

- מספר השכנים (n) נקבע באופן ישיר כאשר "שכן" הוגדר כגרגר בעל מגע ישיר עם הגרגר הנמדד.
- בחישוב מספר המגעים לגרגר נבחנו שתי גישות: במקרה שבו נראה מגע יחיד ורציף של גרגר עם שני שכנים צמודים, חושב המגע בגישה ראשונה כשני מגעים ($N_1=2$), ובגישה שנייה חושב כמגע אחד ($N_2=1$).
- אורך המגע לגרגר (L) נקבע כסכום אורכי המגעים לאותו גרגר ולאורך היקפו (בתרשים 3.8 מסומן בקו כחול מקווקו). תוצאות אורכי המגעים התקבלו באופן ישיר מטבלת הנתונים של שכבת הפולי-קווים המתאימה (שכבת המגעים) עם שגיאה מקסימלית של 5% לגרגר.
- שלושה פרמטרים לאיפיון גודל הגרגר נמדדו: קוטרו (D_m), היקפו (P) ושטחו (S - ביחידות שטח).
 - ההיקף ושטח הגרגר נמדדו באופן ישיר. תוצאותיהם התקבלו מתוך טבלאות הנתונים של שכבות הפולי-קווים והפוליגונים המתאימים (שכבות ההיקף והשטח, בהתאמה), עם שגיאה מקסימלית של 0.5% לגרגר (עבור שני הפרמטרים).
 - קוטר הגרגר (D_m) חושב עבור כל גרגר כממוצע בין הקוטר המינימלי (D_{min}) והמקסימלי (D_{min}) שלו, ואלה אינם חייבים להיות ניצבים זה לזה. הקוטר חושב עם שגיאה מקסימלית של 0.5% לגרגר.
- עבור כל גרגר נבחנו היחסים בין סכום אורכי המגע לקוטרו (L/D_m), להיקפו (L/P) ולשטחו (L/S).

לאחר שכל תוצאות המדידות רוכזו נבחנו היחסים השונים בין הפרמטרים שהתקבלו ובוצע ניתוח סטטיסטי מפורט, אשר נתן אינדיקציה לשינויים המיקרוטקסטורליים שעבר הסלע עקב שדות המאמצים ההידרוסטטים השונים שעבר (ראה פרק תוצאות ופרק דיון).



תרשים 3.8: אופן מדידת הפרמטרים המיקרוטקסטורליים כפי שנעשה באמצעות תוכנת MapInfo Professional (גירסה 7.5). מקרא: n – מספר השכנים לגרגר; N_1 – מספר המגעים לגרגר על פי הגישה הראשונה; N_2 – מספר המגעים לגרגר על פי הגישה השנייה; D_{max} – הקוטר המקסימלי לגרגר; D_{min} – הקוטר המינימלי לגרגר; P – היקף הגרגר; S – שטח הגרגר. קוטר הגרגר (D_m) נקבע לפי ממוצע הקוטר המקסימלי והמינימלי. אורך המגעים נקבע כסכום אורכי המגעים לגרגר (באיור מסומן בקו כחול מקווקו).

פרק 4 - תוצאות

4.1 מבחני דחיסה הידרוסטטית

לצורך שינוי התכונות המכניות והמיקרוטקסטורליות עברו דוגמאות ה-Berea sandstone (BS) וה-Indiana limestone (IL) דחיסות הידרוסטטיות. דוגמאות הדמה BSD ו-ILD עברו כל אחת שני מבחני דחיסה הידרוסטטית: ב-20 MPa ולאחר מכן שוב ב-40 MPa. דוגמאות מבחן BST-20 ו-ILT-20 עברו דחיסות הידרוסטטיות ב-20 MPa. דוגמאות המבחן BST-40 ו-ILT-40 עברו כל אחת דחיסות הידרוסטטיות: תחילה ב-20 MPa ולאחר מכן שוב ב-40 MPa. פירוט האופן בו נעשו הדחיסות והתהליכים שעברה כל דוגמה מתואר בפרקים 3.1 ו-3.4.1.

4.1.1 תוצאות הדחיסות ההידרוסטטיות של ה-Berea sandstone

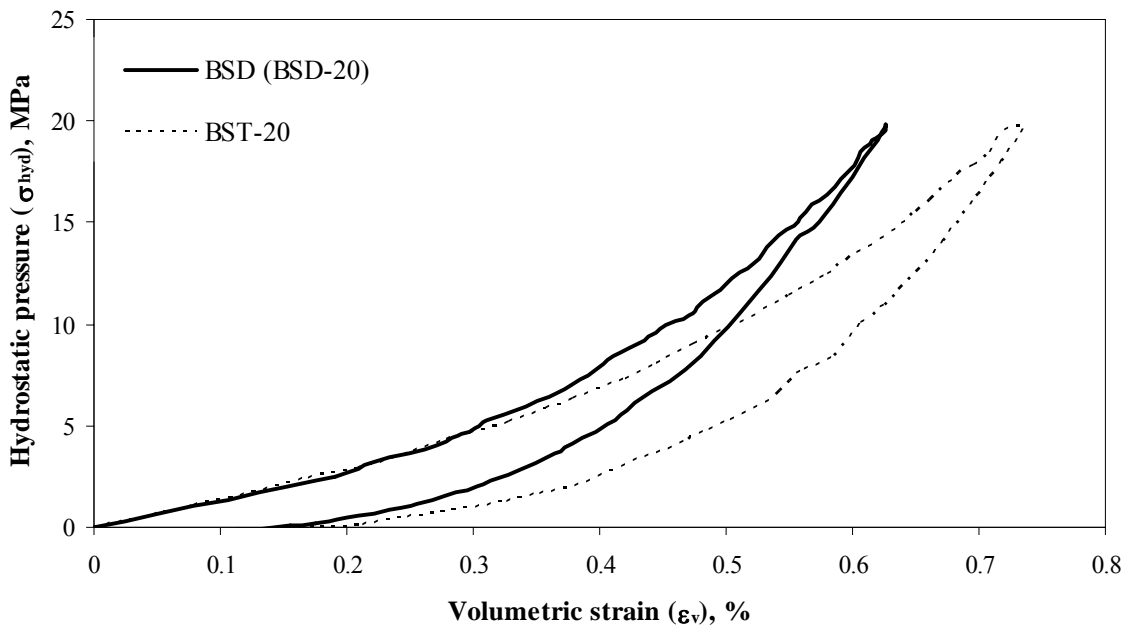
בטבלה 4.1 מסוכמים תוצאות המבחנים ההידרוסטטיים שנעשו על דוגמת BSD של ה-Berea sandstone. BSD-0 מייצג את דוגמת הדמה של ה-Berea sandstone (BSD) לפני דחיסתה (כלומר עבור מצב דחיסה ב-0 MPa), BSD-20 מייצג את דוגמת הדמה לאחר דחיסתה ב-20 MPa ו-BSD-40 מייצג את דוגמת הדמה לאחר שנדחסה שוב ב-40 MPa. σ_{hyd} מציין את גודל המאמץ ההידרוסטטי המקסימלי בו נדחסה הדוגמה, ρ - מציין את צפיפות הדוגמה במצב יבש לאחר דחיסתה, $\Delta\rho$ - מציין את השינוי בצפיפות הדוגמה (במצב יבש), ϕ - מציין את נקבוביות הדוגמה (מחושבת בהנחה שהמשקל היחסי של מוצקים הוא $G_s=2.7$ ותכולת הרטיבות $w=0\%$), $\Delta\phi$ - מציין את השינוי בנקבוביות הדוגמה ו- ε_v^f - מציין את המעוות הנפחי הסופי שנוצר בדוגמה בשל דחיסתו.

מהטבלה ניתן לראות שהדחיסות ההידרוסטטיות ב-20 MPa ו-40 MPa גרמו לשינויים קטנים מאוד בנקבוביות וצפיפות הסלע. אולם למרות ההבדלים האבסולוטיים הקטנים הרי שנמצאה מגמה ברורה של עליה בצפיפות וירידה בנקבוביות עם העליה ב- σ_{hyd} . מחישובי נפח, נקבוביות וגודל המעוות אנו מסיקים שמעוות הדוגמה הוא תוצאה של איבוד נקבוביות וסגירת (או צמצום) חללים. בתרשימים 4.1 ו-4.2 מוצגות עקומות המאמץ-מעוות (נפחי) של מבחני הדחיסה שנעשו בדוגמאות המבחן (BST-20 ו-BST-40). על פי צורת הגרפים ותוצאות הדחיסות ניתן לשייך את הדחיסות ב-20 MPa ו-40 MPa לשלב ה-Fissure closure שבקצה התחתון של עקומת המאמץ-מעוות נפחי (ראה תרשים 2.3 פרק 2.1.4). בשלב זה מקבלים סגירה של סדקים ראשוניים אשר רובם נשארים סגורים בהסרת העומס, וכתוצאה מכך מתקבל מעוות נפחי בלתי הפיך. מכיוון שבשלב זה שיפוע הגרף אינו קבוע (גדל) לא ניתן לחשב ממנו את מודול הנפח (K – נוסחה 2.12).

טבלה 4.1: נתוני תוצאות המבחנים ההידרוסטטיים שנעשו על דוגמת BSD של ה-Berea sandstone.

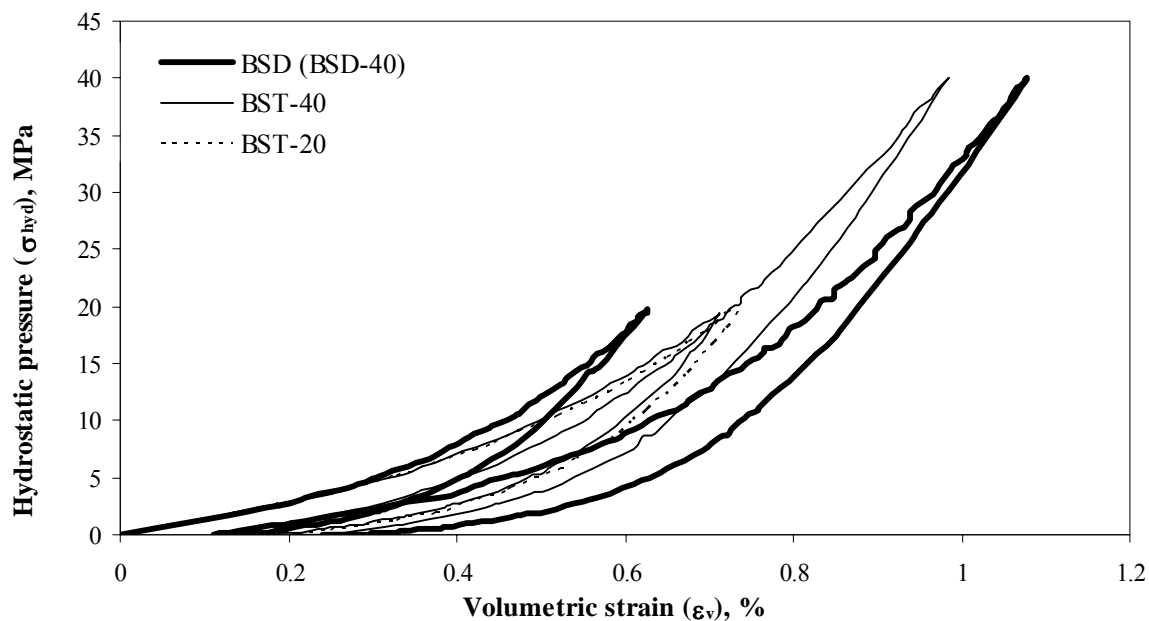
Test	σ_{hyd} (MPa)	ρ (gr/cm ³)	$\Delta\rho$ (gr/cm ³)	ϕ (%)	$\Delta\phi$ (%)	ϵ_v^f (%)
BSD-0	0	2.17	0	19.65	0	0
BSD-20	20	2.17	0.003	19.53	0.12	0.112
BSD-40	40	2.18	0.005	19.43	0.10	0.242

בתרשים 4.1 מוצגות עקומות מאמץ-מעוות של דוגמאות BSD (BSD-20) ו-BST-20 אשר עברו דחיסות הידרוסטטיות ב-20 MPa. ניתן להבחין שעקומות המאמץ-מעוות שהתקבלו משני מבחני הדחיסה שונות מעט, כאשר דוגמה BST-20 עברה מעוותים נפחיים גדולים יותר מדוגמה BSD. עם זאת נמצא שהמעוותים הנפחיים שהתקבלו בכל דוגמה בסוף מבחני הדחיסה (ϵ_v^f – מעוות נפחי סופי) היו כמעט זהים, כאשר ההפרש ביניהם הוא 0.020%. נמצא שמגמת השינוי המסתמנת עבור שתי הדוגמאות היא עליה בצפיפות וירידה בנקבוביות עם העליה ב- σ_{hyd} . ניתן להסיק מכך שהפעלת הלחץ ההידרוסטטי ב-20 MPa השפיע על הדוגמאות באופן דומה, ובהתאם לכך יהיו השינויים בסלע.



תרשים 4.1: עקומות מאמץ-מעוות של דוגמאות BSD (מבחן BSD-20) ו-BST-20 אשר עברו דחיסות הידרוסטטיות בכ-20 MPa.

בתרשים 4.2 מוצגות עקומות המאמץ-מעוות ממבחני הדחיסה ההידרוסטטית של דוגמאות BSD (BSD-40) ו-BST-40, אשר עברו דחיסות הידרוסטטיות ב-20 MPa וב-40 MPa, כמתואר בפרק 3.1. לצורך השוואה הוספנו את עקומת המאמץ-מעוות הנפחי של דוגמה BST-20. מעקומות המאמץ-מעוות ניתן להבחין שקיימים הבדלים קטנים בין תוצאות הדחיסות השונות. בשלב הדחיסה עד 20 MPa מבחני הדחיסה של BSD-40 ו-BST-20 כמעט זהות וביחס אליהן BSD שונה במעט עם מעוותים נפחיים קטנים יותר. לעומת זאת בשלב הדחיסה עד 40 MPa דוגמה BSD עברה מעוותים נפחיים הגדולים מעט מ-BST-40. עם זאת נמצא שהמעוותים הנפחיים הסופיים שהתקבלו בכל דוגמה בסוף מבחני הדחיסה (לאחר דחיסתם ב-20 MPa וב-40 MPa) היו דומים ובהפרש של 0.048%. נמצא שמגמת השינוי המסתמנת עבור שתי הדוגמאות היא עליה בצפיפות וירידה בנקבוביות עם העליה ב- σ_{hyd} . ניתן להסיק מכך שהפעלת הלחץ ההידרוסטטי ב-20 MPa וב-40 MPa השפיע על הדוגמאות באופן די דומה, ובהתאם לכך יהיו השינויים בסלע.



תרשים 4.2: עקומות המאמץ-מעוות של גלעיני BSD ו-BST-40 הכוללות את שני שלבי הדחיסה שעברו (עד 20 MPa ועד 40 MPa), ועקומת המאמץ-מעוות של דוגמה BST-20.

4.1.2 תוצאות הדחיסות ההידרוסטטיות של ה-Indiana limestone

בטבלה 4.2 מסוכמים תוצאות המבחנים ההידרוסטטיים שנעשו על דוגמת ILD של ה-Indiana limestone. ILD-0 מייצג את דוגמת הדמה של ה-Indiana limestone (ILD) לפני דחיסתה (כלומר עבור מצב דחיסה ב-0 MPa), ILD-20 מייצג את דוגמת הדמה לאחר דחיסתה ב-20 MPa ו-ILD-40 מייצג את דוגמת

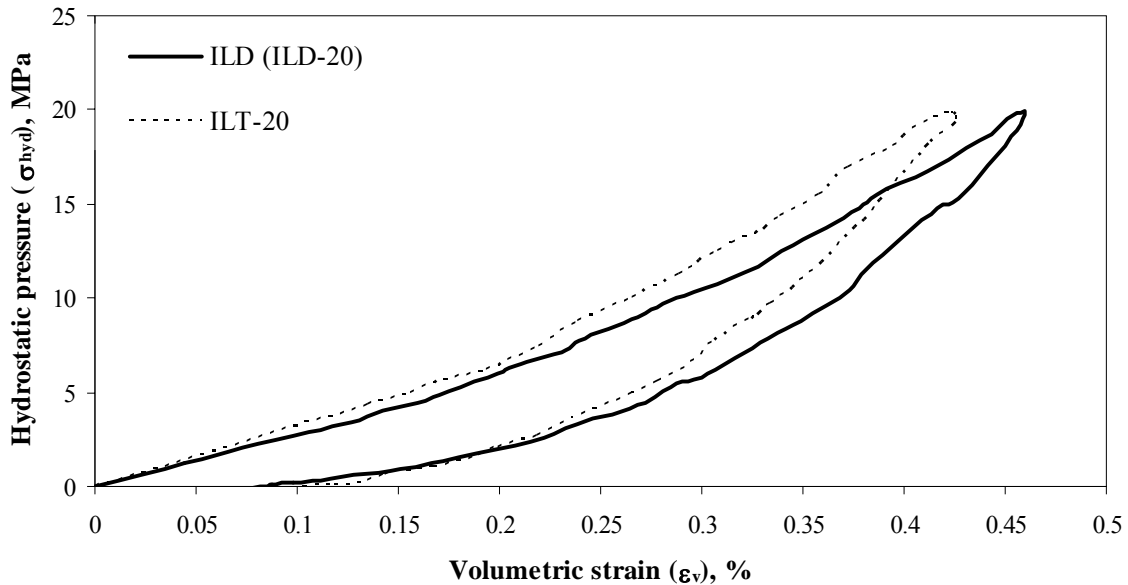
הדמה לאחר שנדחסה שוב ב-40 MPa. σ_{hyd} מציין את גודל המאמץ ההידרוסטטי המקסימלי בו נדחסה הדוגמה, ρ - מציין את צפיפות הדוגמה במצב יבש לאחר דחיסתה, $\Delta\rho$ - מציין את השינוי בצפיפות הדוגמה (במצב יבש), ϕ - מציין את נקבוביות הדוגמה (מחושבת בהנחה שהמשקל היחסי של מוצקים הוא $G_s=2.7$ ותכולת הרטיבות $w=0\%$), $\Delta\phi$ - מציין את השינוי בנקבוביות הדוגמה ו- ε_v^f - מציין את המעוות הנפחי הסופי שנוצר בדוגמה בשל דחיסתה.

מהטבלה ניתן לראות שהדחיסות ההידרוסטטיות ב-20 MPa ו-40 MPa גרמו לשינויים קטנים מאוד בנקבוביות וצפיפות הסלע. אולם למרות ההבדלים האבסולוטיים הקטנים הרי שנמצאה מגמה ברורה של עליה בצפיפות וירידה בנקבוביות עם העליה ב- σ_{hyd} . מחישובי נפח, נקבוביות וגודל המעוות אנו מסיקים שרוב המעוות בדוגמה הוא תוצאה של איבוד נקבוביות וסגירת (או צמצום) חללים. בתרשימים 4.3 ו-4.4 ניתן לראות את עקומות המאמץ-מעוות (נפחי) של מבחני הדחיסה שנעשו בדוגמת הדמה ובדוגמאות המבחן (ILT-20 ו-40). על פי צורת הגרפים ותוצאות הדחיסות ניתן לשייך את הדחיסות ב-20 MPa ו-40 MPa לשלב ה-Fissure closure (ראה תרשים 2.3 פרק 2.1.4). בשלב זה שיפוע הגרף אינו קבוע (גדל) ולא ניתן לחשב ממנו את מודול הנפח (K – נוסחה 2.12).

טבלה 4.2: נתוני תוצאות המבחנים ההידרוסטטיים שנעשו על דוגמת ILD של ה-Indiana limestone.

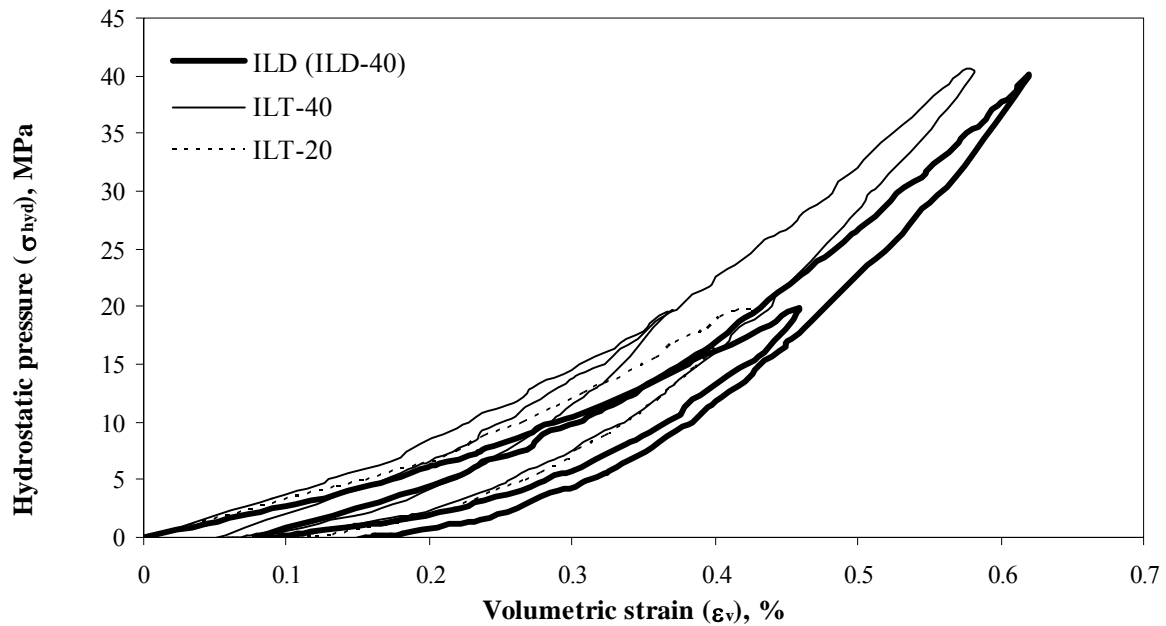
Test	σ_{hyd} (MPa)	ρ (gr/cm ³)	$\Delta\rho$ (gr/cm ³)	ϕ (%)	$\Delta\phi$ (%)	ε_v^f (%)
ILD-0	0	2.27	0	15.80	0	0
ILD-20	20	2.27	0.0002	15.79	0.01	0.077
ILD-40	40	2.28	0.0106	15.53	0.26	0.149

בתרשים 4.3 מוצגות עקומות המאמץ-מעוות של דוגמאות ILD (ILD-20) ו-ILT-20 אשר עברו דחיסות הידרוסטטיות ב-20 MPa. ניתן להבחין שעקומות המאמץ-מעוות שהתקבלו משני מבחני הדחיסה שונות מעט, כאשר דוגמה ILD עברה מעוותים גדולים יותר מדוגמה ILT-20. נמצא שהמעוותים הנפחיים שהתקבלו בשתי הדוגמאות לאחר הסרת העומס היו קטנים מאוד וכמעט זהים, כאשר עבור ILD התקבל $\varepsilon_v^f=0.077\%$ ועבור ILT-20 - $\varepsilon_v^f=0.090\%$ (ההפרש ביניהם הוא 0.013%). ניתן להסיק מכך שהפעלת הלחץ ההידרוסטטי ב-20 MPa על דוגמאות ה-Indiana limestone השפיע עליהן במידה מועטה בלבד ובאופן דומה, כאשר מגמת השינוי היא עליה בצפיפות וירידה בנקבוביות עם העליה ב- σ_{hyd} .



תרשים 4.3: עקומות מאמץ-מעוות של דוגמאות ILD (מבחן ILD-20) ו-ILT-20 אשר עברו דחיסות הידרוסטטיות בכ-20 MPa.

בתרשים 4.4 מוצגות עקומות המאמץ - מעוות ממבחני הדחיסה ההידרוסטטית של דוגמאות ILD (ILD-40) ו-ILT-40, אשר עברו דחיסות הידרוסטטיות ב-20 MPa וב-40 MPa, כמתואר בפרק 3.1. לצורך השוואה הוספנו את עקומת המאמץ-מעוות הנפחי של דוגמה ILT-20. מעקומות המאמץ-מעוות ניתן להבחין שתוצאות הדחיסות שונות מעט, כאשר דוגמה ILD עברה מעוותים גדולים יותר בשני שלבי הדחיסה. המעוות הנפחי הסופי של ILT-40 נמצא קטן מאוד ($\epsilon_v^f=0.089\%$), בדומה ל-ILT-20 (אשר עברה דחיסה ב-20 MPa בלבד) וב-0.06% קטן מזה של ILD ($\epsilon_v^f=0.149\%$). ניתן להסיק מכך שהפעלת הלחץ ההידרוסטטי ב-40 MPa על דוגמאות ה-Indiana limestone השפיע עליהן במידה מועטה ובאופן לא אחיד. עם זאת מגמת השינוי המסתמנת עבור שתי הדוגמאות היא עליה בצפיפות וירידה בנקבוביות עם העליה ב- σ_{hyd} .



תרשים 4.4: עקומות המאמץ-מעוות של גלעיני ILD ו-ILT-40 הכוללות את שני שלבי הדחיסה שעברו (עד 20 MPa ועד 40 MPa), ועקומת המאמץ-מעוות של דוגמה ILT-20.

4.2. מיקרוטקסטורה

לפני ולאחר כל דחיסה נבחנו דוגמאות הדמה תחת מיקרוסקופ אור ונעשו אנליזות מיקרוטקסטורליות באמצעות תוכנת G.I.S. (פרק 3.5). BSD-0 ו-ILD-0 מייצגים את דוגמאות הדמה של Berea sandstone וה-Indiana limestone (BSD ו-ILD, בהתאמה) לפני דחיסתם (כלומר עבור מצב דחיסה ב-0 MPa), BSD-20 ו-ILD-20 מייצגים את דוגמאות הדמה לאחר דחיסתם ב-20 MPa ו-BSD-40 ו-ILD-40 מייצגים את דוגמאות הדמה לאחר שנדחסו שוב ב-40 MPa. המדידות המיקרוטקסטורליות נעשו על יותר מ-640 גרגרים (מעל 100 עבור כל דוגמה ושלב) וכללו (עבור כל גרגר): מספר שכנים, מספר מגעים, אורך מגעים, קוטר, היקף ושטח הגרגר.

4.2.1. ניתוח מיקרוטקסטורלי של Berea sandstone

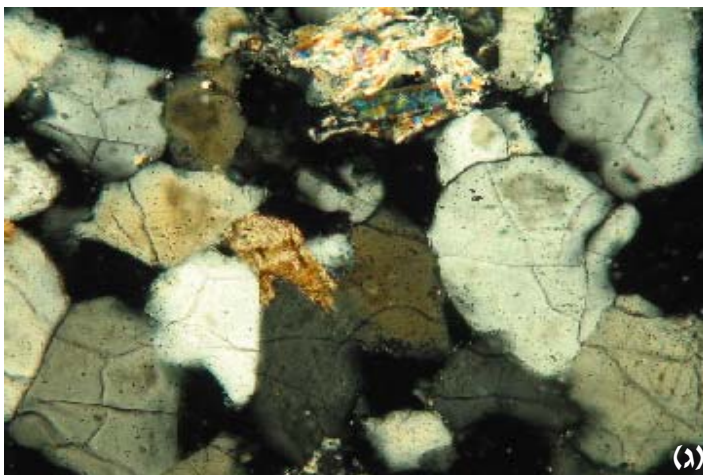
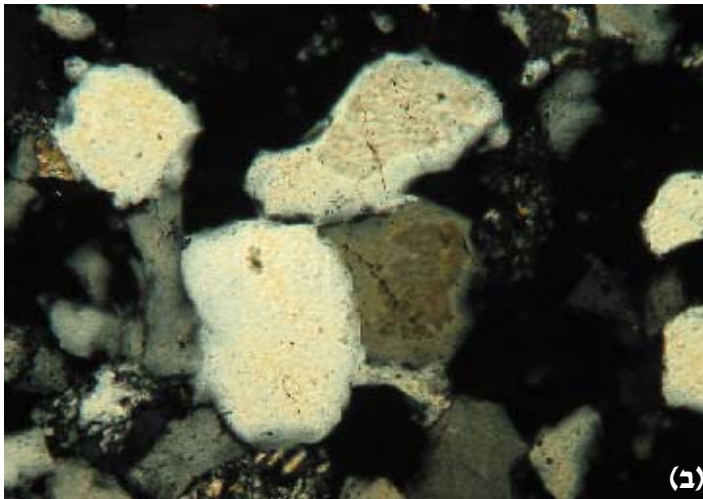
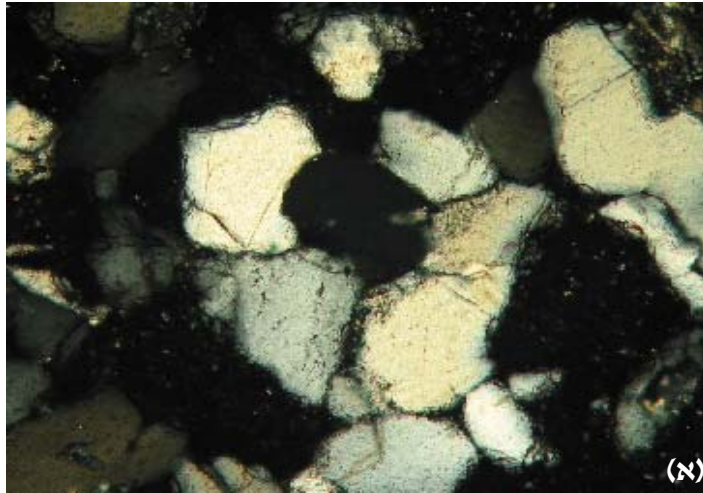
במבט דרך מיקרוסקופ אור נמצא סלע Berea sandstone עשיר בקוורץ (מעל 80%) עם מעט פלדספר, חרסית וקלציט, עם מיון טוב ועיגוליות בינונית. כמו כן זיהינו הופעה מועטה של גדילת גרגרי הקוורץ. בתרשים 4.5 (א-ג) מוצגות תמונות מיקרו של דוגמת BSD עבור מצבי הדחיסה השונים. תוצאות המדידות המיקרוטקסטורליות של דוגמת BSD עבור מצבי הדחיסה השונים מופיעות להלן בתרשימים 4.6 (א-ד) ו-4.8 ובטבלה 4.4.

בתרשים 4.6 (א-ג) מוצגות היסטוגרמות של תוצאות מדידות הקוטר (D_m), ההיקף (P) והשטח (S) של חתכי הגרגרים שנעשו בדוגמת BSD עבור מצבי הדחיסה השונים (BSD-0, BSD-20 ו-BSD-40). בתרשים 4.6 (ד) מוצגת היסטוגרמה של פרמטר נוסף שנבדק שמאפיין את גודל הגרגר - D_s . D_s הוא קוטר מעגל בעל שטח זהה לשטח הגרגר הנמדד (מחושב לפי S ונוסחת שטח המעגל). ניתן לראות שהתפלגות D_s בסלע ה-Berea sandstone כמעט זהה לקוטר הנמדד (D_m) בכל שלבי הדחיסה. מההיסטוגרמות ניתן לראות כי בהשוואה בין השקפים של מצבי הדחיסה השונים לא נמצא שינוי בקוטר, בהיקף או בשטח החתכים, כלומר גדלי הגרגרים נשארו קבועים. מגמה זו נשמרת גם בחישוב הערכים הממוצעים של הפרמטרים האחרונים כפי שניתן לראות בטבלה 4.3. מכיוון שעבור כל דחיסה הידרוסטטית השקפים נלקחו מנקודות אחרות בגלעין הדמה (BSD) ניתן להסיק שדוגמאות ה-Berea sandstone בהם השתמשנו היו בעלי דרגת הומוגניות גבוהה.

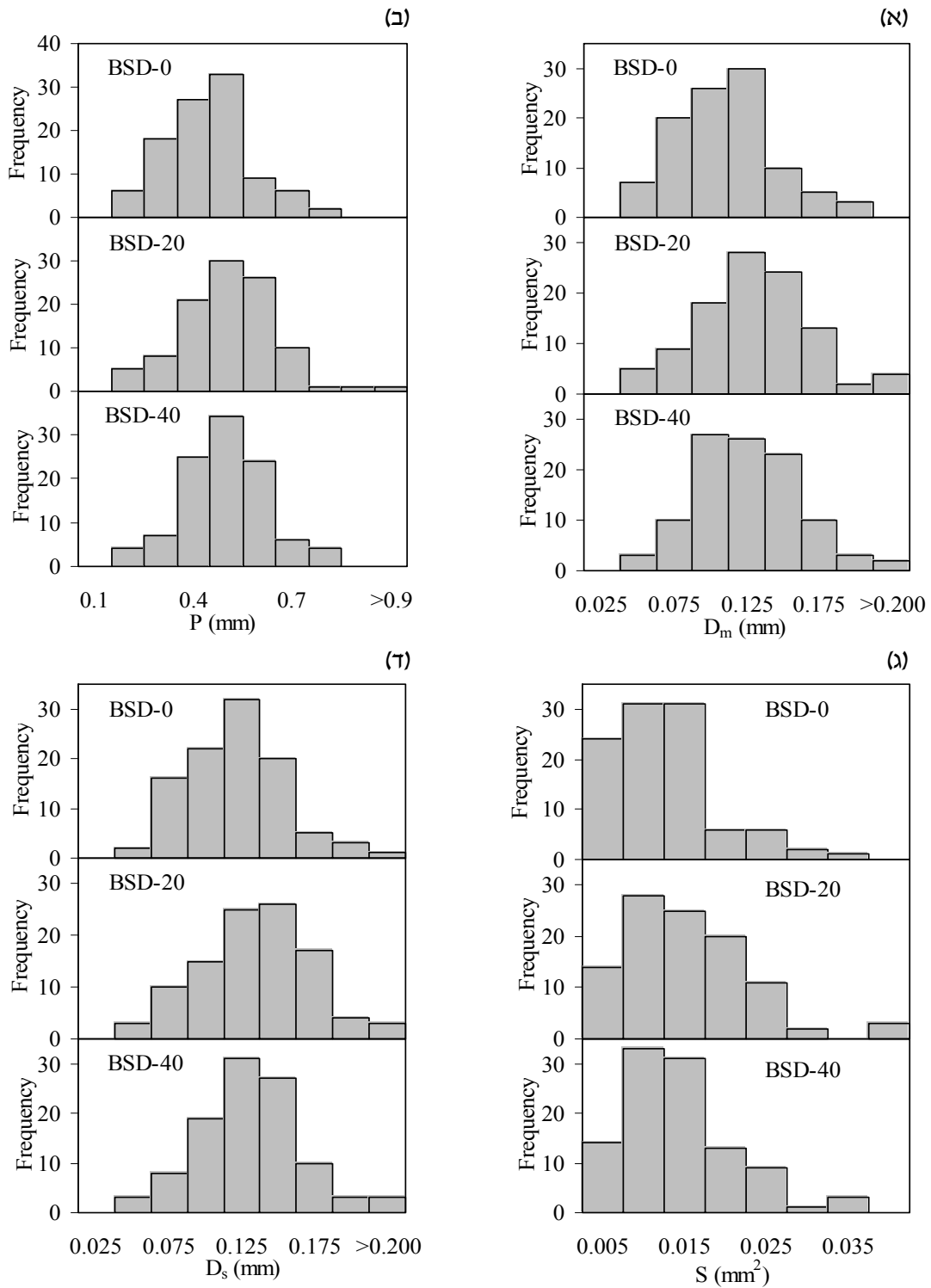
בתרשים 4.7 (א-ג) מוצגות תמונות מיקרו אופייניות של ה-Berea sandstone עבור מצבי הדחיסה השונים עם גבולות גרגר מודגשים (בקו לבן), וניתן לראות כי אין סטייה משמעותית בגודל הגרגר (ניתן להשוות את התמונות עם תמונת אחרות של ה-Berea sandstone שמופיעות בתרשימים 3.6 (א), 3.8, 4.5 (א-ג)).

בטבלה 4.3 מוצגים הערכים הסטטיסטיים של הפרמטרים המיקרוטקסטורליים שנמדדו משקפי ה-Berea sandstone עבור מצבי הדחיסה השונים. av – מייצג את הערך הממוצע של הפרמטר, min – מייצג את הערך המינימלי שנמדד עבור הפרמטר ו- max – הערך המקסימלי שנמדד עבור הפרמטר. D_m – מייצג את הקוטר הנמדד, P – מייצג את היקף חתך הגרגר, S – שטח חתך הגרגר, D_s – קוטר מעגל בעל שטח זהה לשטח הגרגר הנמדד (מחושב על פי S), L – אורך המגעיים הנמדדים לאורך גבולות הגרגר ו- n_{grains} – מספר הגרגרים שהשתתפו בסטטיסטיקה. מהטבלה ניתן לראות כי בהתאם למה שמצאנו בהיסטוגרמות שבתרשים 4.6, גודל הלחץ ההידרוסטטי לא השפיע על הפרמטרים הממוצעים של גודל הגרגר (D_m, P, S ו- D_s).

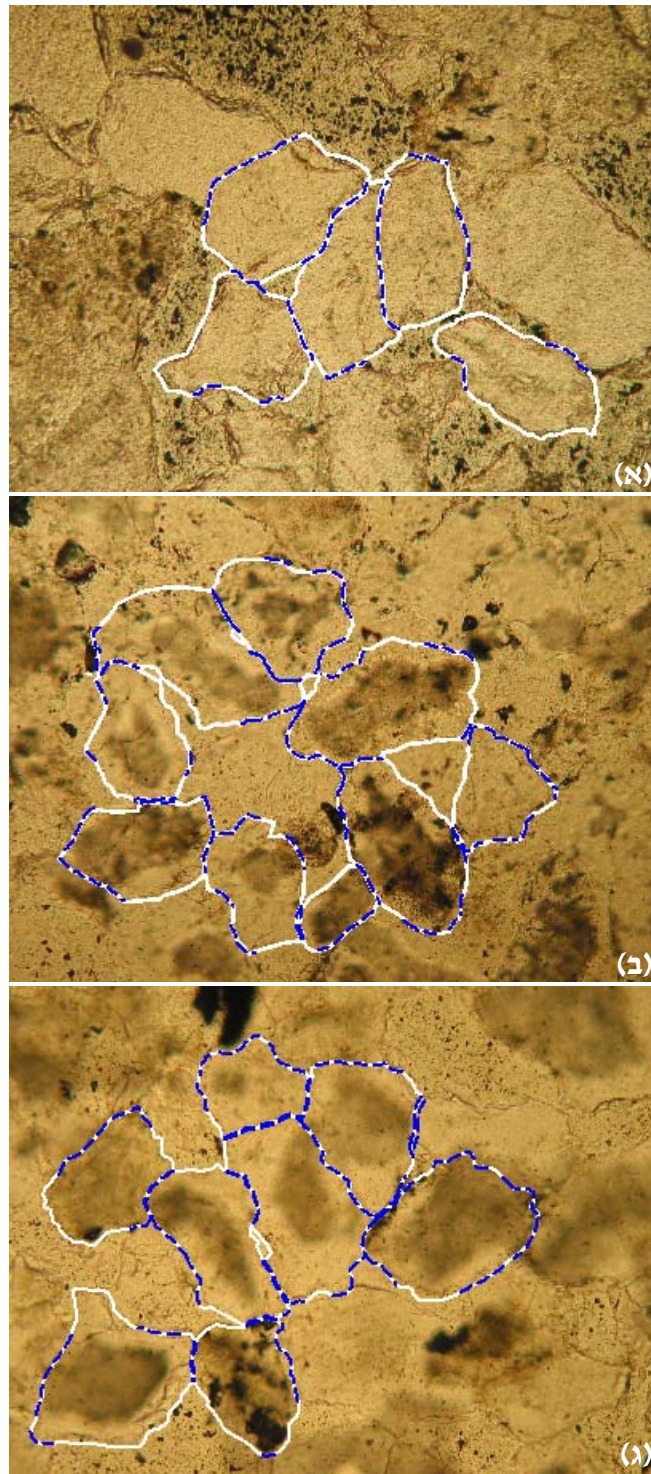
בתרשים 4.8 מוצגות היסטוגרמות של אורך המגעיים (L) המראות את השינוי בהתפלגות אורך המגעיים בין מצבי הדחיסה השונים ובטבלה 4.3 מצויינים ערכי L הממוצעים עבור אותם מצבי דחיסה. ניתן לראות כי עם העליה בלחץ ההידרוסטטי ההיסתברות המקסימלית של אורך המגעיים נעה לערכים גבוהים יותר ואורך המגעיים הממוצע גדל מעט. ניתן להבחין בכך גם מסימוני המגעיים בין הגרגרים (מסומן בקו כחול מקווקו) שבתרשים 4.7 (א-ג). בתרשים 4.9 (א) הצבנו את אורך המגעיים הממוצע (L) ביחס לגודל המאמץ ההידרוסטטי (σ_{hyd}) וניתן לראות שהתקבל יחס ישר וחיובי בעל מקדם רגרסיה גבוה ($R^2=0.985$). בתרשים 4.9 (ב) הצבנו את אורך המגעיים הממוצע (L) ביחס לנקבוביות (ϕ) וקיבלנו יחס ישר הפוך בעל מקדם רגרסיה גבוה מאוד ($R^2=0.995$). מכיוון שגודל הגרגרים נשאר קבוע בין מצבי הדחיסה נשללת האפשרות שהתארכות המגעיים היא תוצאה של שינויים בגודל הגרגרים, וניתן להסיק שהיא נגרמת בשל דחיסת הדוגמה והירידה בנקבוביות.



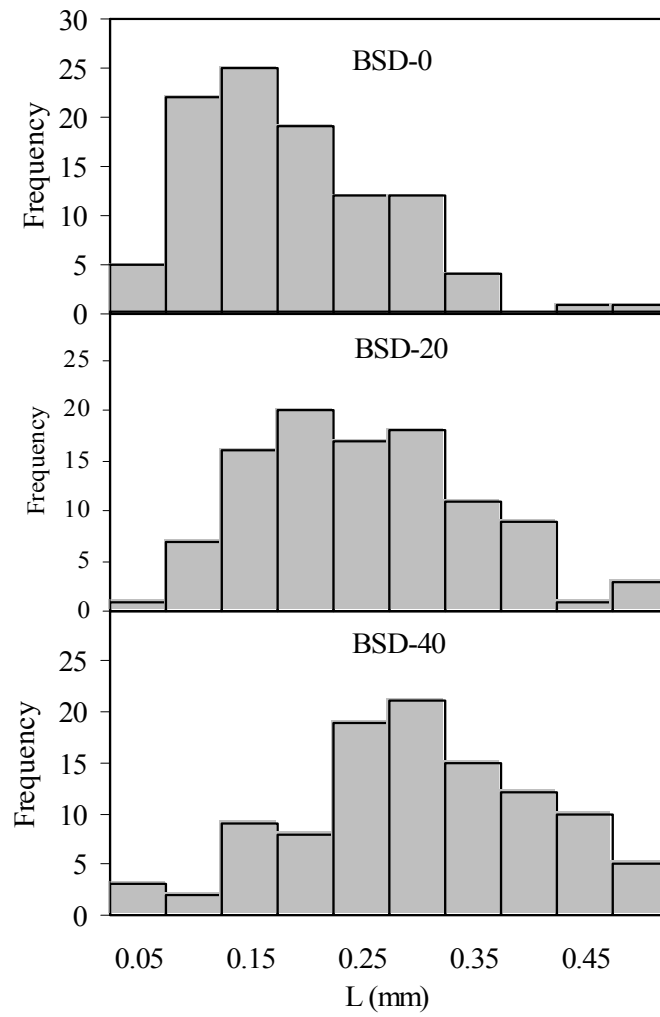
תרשים 4.5: תמונות מיקרו של ה-Berea sandstone (צולמו בניקולים סגורים): א) דוגמה BSD לפני שעברה דחיסה (BSD-0). ב) דוגמה BSD לאחר שעברה דחיסה הידרוסטטית ב-20MPa (BSD-20). ג) דוגמה BSD לאחר שעברה דחיסה הידרוסטטית ב-40MPa (BSD-40). מידות התמונות – $0.64 \times 0.48 \text{mm}$.



תרשים 4.6: היסטוגרמות המראות את התפלגות: (א) הקוטר הנמדד (D_m), (ב) ההיקף (P), (ג) השטח (S), (ד) הקוטר המחושב על פי S (D_s) - בדוגמת BSD עבור מצבי הדחיסה השונים (BSD-0, BSD-20, ו-BSD-40).



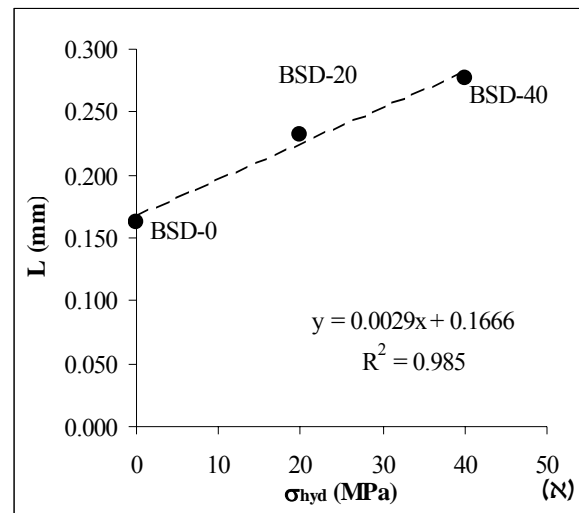
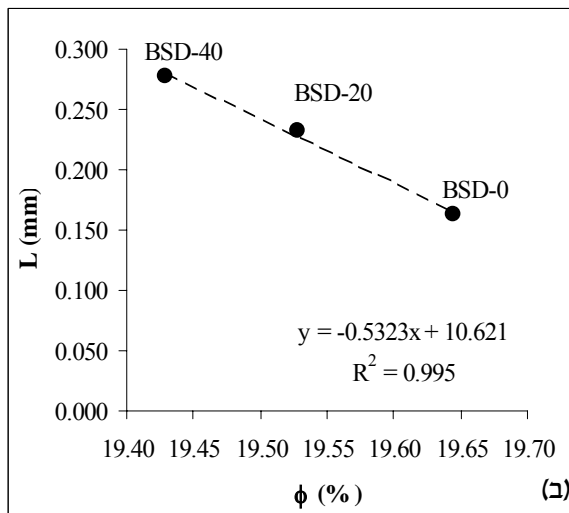
תרשים 4.7: תמונות מיקרו של ה-Berea sandstone (צולמו בניקולים פתוחים): א) דוגמה BSD לפני שעברה דחיסה (BSD-0). ב) דוגמה BSD לאחר שעברה דחיסה הידרוסטטית ב-20MPa (BSD-20). ג) דוגמה BSD לאחר שעברה דחיסה הידרוסטטית ב-40MPa (BSD-40). גבולות הגרגר מסומנים בקו רציף לבן. המגעים בין גרגרים מסומנים בקו מקווקו כחול. מידות התמונות – 0.64×0.48mm.



תרשים 4.8: היסטוגרמות של אורך המגעים המראות את השינוי בהתפלגות אורך המגעים בין מצבי הדחיסה השונים בדוגמת BSD (Berea sandstone).

טבלה 4.3: ערכים סטטיסטיים של הפרמטרים המיקרוטקסטורליים שנמדדו משקפי ה-Berea sandstone (דוגמה BSD) עבור מצבי הדחיסה בשונים.

		BSD-0MPa	BSD-20MPa	BSD-40MPa
D _m (mm)	av	0.099	0.122	0.113
	min	0.035	0.038	0.029
	max	0.196	0.445	0.206
P (mm)	av	0.396	0.459	0.445
	min	0.149	0.153	0.123
	max	0.773	1.042	0.778
S (mm ²)	av	0.010	0.013	0.012
	min	0.002	0.001	0.001
	max	0.034	0.058	0.034
D _s (mm)	av	0.108	0.123	0.118
	min	0.045	0.042	0.035
	max	0.209	0.272	0.207
L (mm)	av	0.163	0.232	0.277
	min	0.012	0.000	0.000
	max	0.477	0.584	0.496
n _{grains}		101	103	104



תרשים 4.9: אורך המגעים הממוצע (L) ביחס לגודל המאמץ ההידרוסטטי (σ_{hyd}) - ב-Berea sandstone (א). אורך המגעים הממוצע (L) ביחס לנקבוביות (ϕ) - מחושבת בהנחה שהמשקל היחסי של מוצקים הוא $G_s=2.7$ ותכולת הרטיבות ב-Berea sandstone - ב ($w=0\%$).

4.2.2. ניתוח מיקרוסקטורלי של ה-Indiana limestone

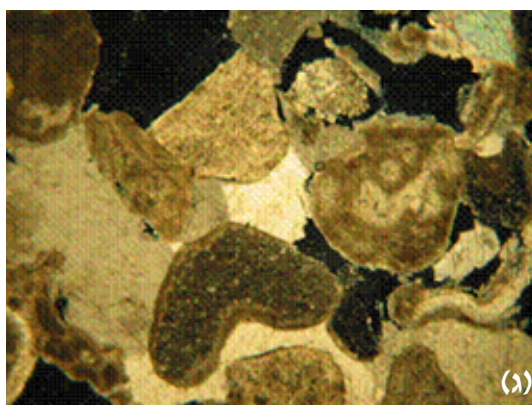
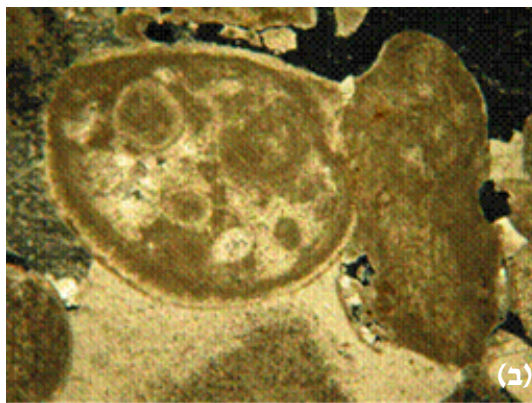
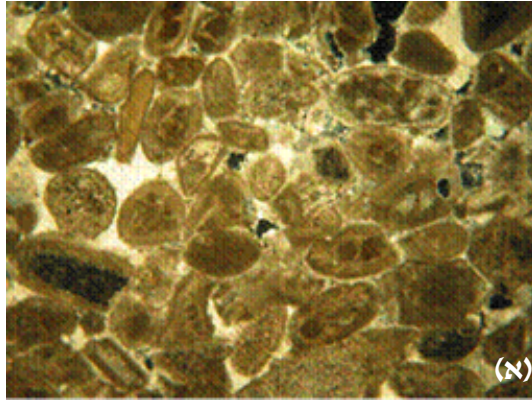
במבט דרך מיקרוסקופ אור נמצא כי סלע ה-Indiana limestone בעל אחוז גבוה מאוד של קלציט (מעל 98%), עם דרגת צמנטציה גבוהה והופעה שכיחה מאוד של גדילת גרגרים. בשקפים נמצאו הרבה מאוד מאובנים ממגוון מינים וצורות, ובניתוח המיקרוסקטורלי נמצא שבסלע מגוון גדול של גדלי גרגרים. בתרשים 4.10 (א-ג) מוצגות תמונות מיקרו של דוגמת ILD לאחר דחיסתה ב-40 MPa וניתן לראות בהן את המגוון הרב בגדלי וצורות הגרגרים. בתרשים 4.11 (א-ג) מוצגות מספר תמונות מיקרו של דוגמת ILD עבור מצבי הדחיסה השונים, עם גבולות גרגר ואורך מגעים מודגשים. תוצאות המדידות המיקרוסקטורליות של דוגמת ILD עבור מצבי הדחיסה השונים מופיעות להלן בתרשימים 4.12 (א-ד) ו-4.13 ובטבלה 4.4.

בתרשים 4.12 (א-ד) מוצגות היסטוגרמות המתארות את התפלגות גודל הגרגר המתואר על ידי S, P, D_m ו- D_s , כפי שנמדדו משקפים המייצגים את שלושת מצבי הדחיסה של דוגמת ILD (ILD-0, ILD-20 ו-ILD-40). מההיסטוגרמות ניתן לראות שהתפלגויות גדלי הגרגרים ב-ILD-0 ו-ILD-20 דומות ביניהן אך שונות מהתפלגות גודל הגרגר ב-ILD-40. מכיוון שדרגת הלחצים שהפעלנו על הסלע נמוכה יחסית, לא סביר לדעתנו שהשינוי בגודל הגרגר הוא תוצאה של הפעלת הלחץ ההידרוסטטי עליו.

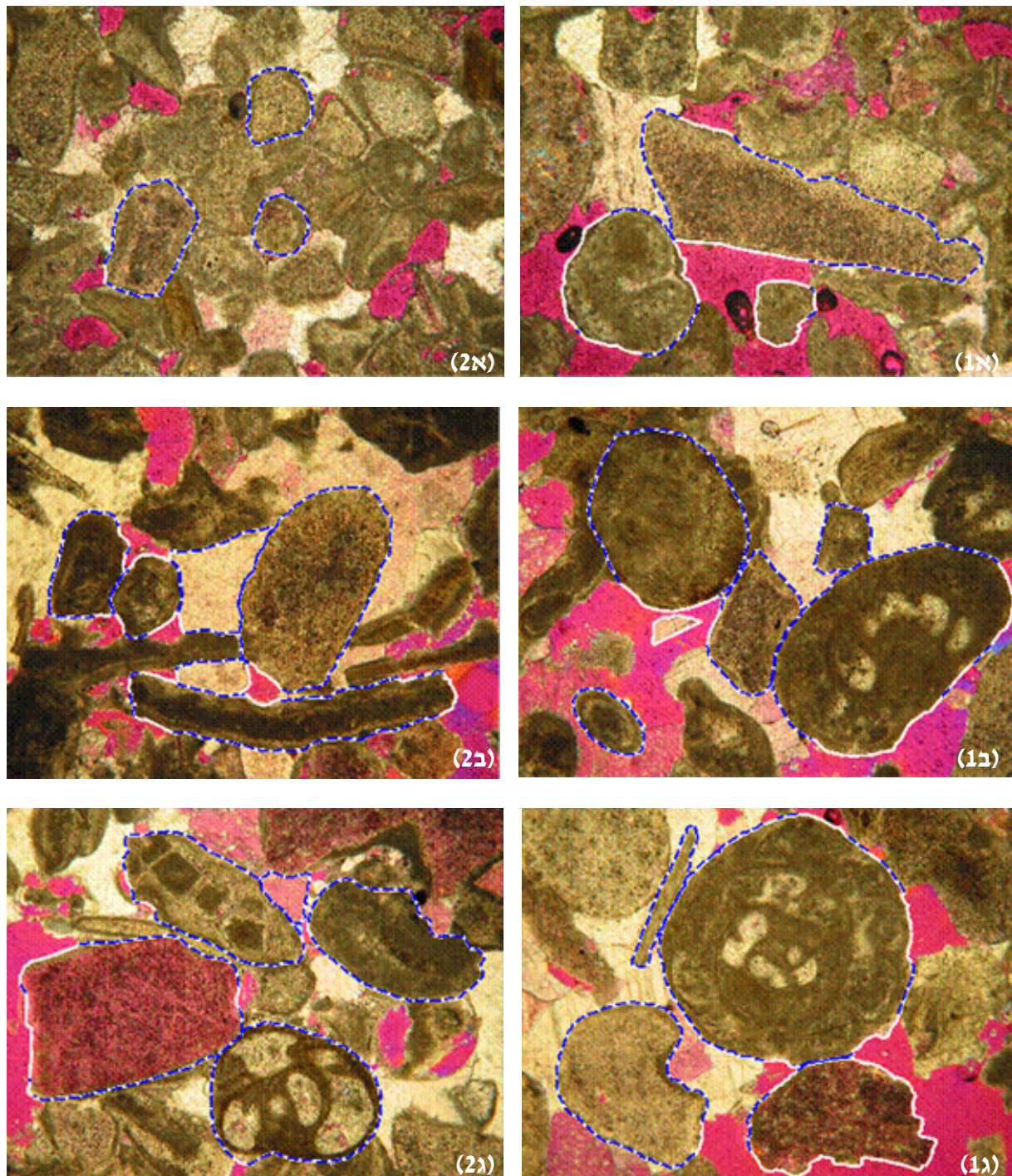
בטבלה 4.4 מוצגים ערכים סטטיסטיים של הפרמטרים המיקרוסקטורליים שנמדדו משקפי ה-Indiana limestone עבור מצבי הדחיסה השונים. av – מייצג את הערך הממוצע של הפרמטר, min – מייצג את הערך המינימלי שנמדד עבור הפרמטר ו- max – הערך המקסימלי שנמדד עבור הפרמטר. D_m – מייצג את הקוטר הנמדד, P – מייצג את היקף חתך הגרגר, S – שטח חתך הגרגר, D_s – קוטר מעגל בעל שטח זהה לשטח הגרגר הנמדד (מחושב על פי S), L – אורך המגעים הנמדדים לאורך גבולות הגרגר ו- n_{grains} – מספר הגרגרים שהשתתפו בסטטיסטיקה. מהטבלה ניתן להבחין שעם עליית הלחץ ההידרוסטטי הערכים הממוצעים של D_m, S, P ו- D_s גדלים מעט. תוצאות אלה תואמות את התוצאות שהתקבלו מההיסטוגרמות בתרשים 4.12 ומחזקות את ההנחה שהלחץ ההידרוסטטי ב-20 MPa וב-40 MPa לא השפיע על גודל הגרגר. אם היה משפיע היינו מצפים לראות ירידה בגודל הגרגר עם העליה בגודל הלחץ ההידרוסטטי, ולא עליה בגודל הגרגר כפי שקיבלנו. מכיוון שעבור כל דחיסה הידרוסטטית השקפים נלקחו מנקודות אחרות בגלעין הדמה (ILD) ניתן להסיק מכך שהסלע בעל דרגת הומוגניות מיקרוסקטורלית נמוכה עד בינונית.

בתרשים 4.13 מוצגות היסטוגרמות של אורך המגעים המראות את השינוי בהתפלגות אורך המגעים בין מצבי הדחיסה השונים. ניתן להבחין שעם העליה בלחץ ההידרוסטטי יש ירידה בערכים הנמוכים של אורך המגע ועליה בערכים הגבוהים יותר (עקומת ההיסטוגרמה מתמתנת). מטבלה 4.4 ניתן לראות שאורך המגעים הממוצע (L) גדל עם העליה בלחץ ההידרוסטטי שהופעל על הדוגמה. מכיוון שמצאנו שגודל הגרגרים אינו קבוע בין מצבי הדחיסה יתכן שהתארכות המגעים היא תוצאה של הבדלים בגודל הגרגרים ולא נגרמה כתוצאה מדחיסת הדוגמה. בתרשים 4.14 (א) הצבנו את אורך המגעים הממוצע (L) ביחס לגודל המאמץ ההידרוסטטי (σ_{hyd}) וניתן לראות שהתקבל יחס ישר וחיובי בעל מקדם רגרסיה גבוה ($R^2=0.98$). בתרשים

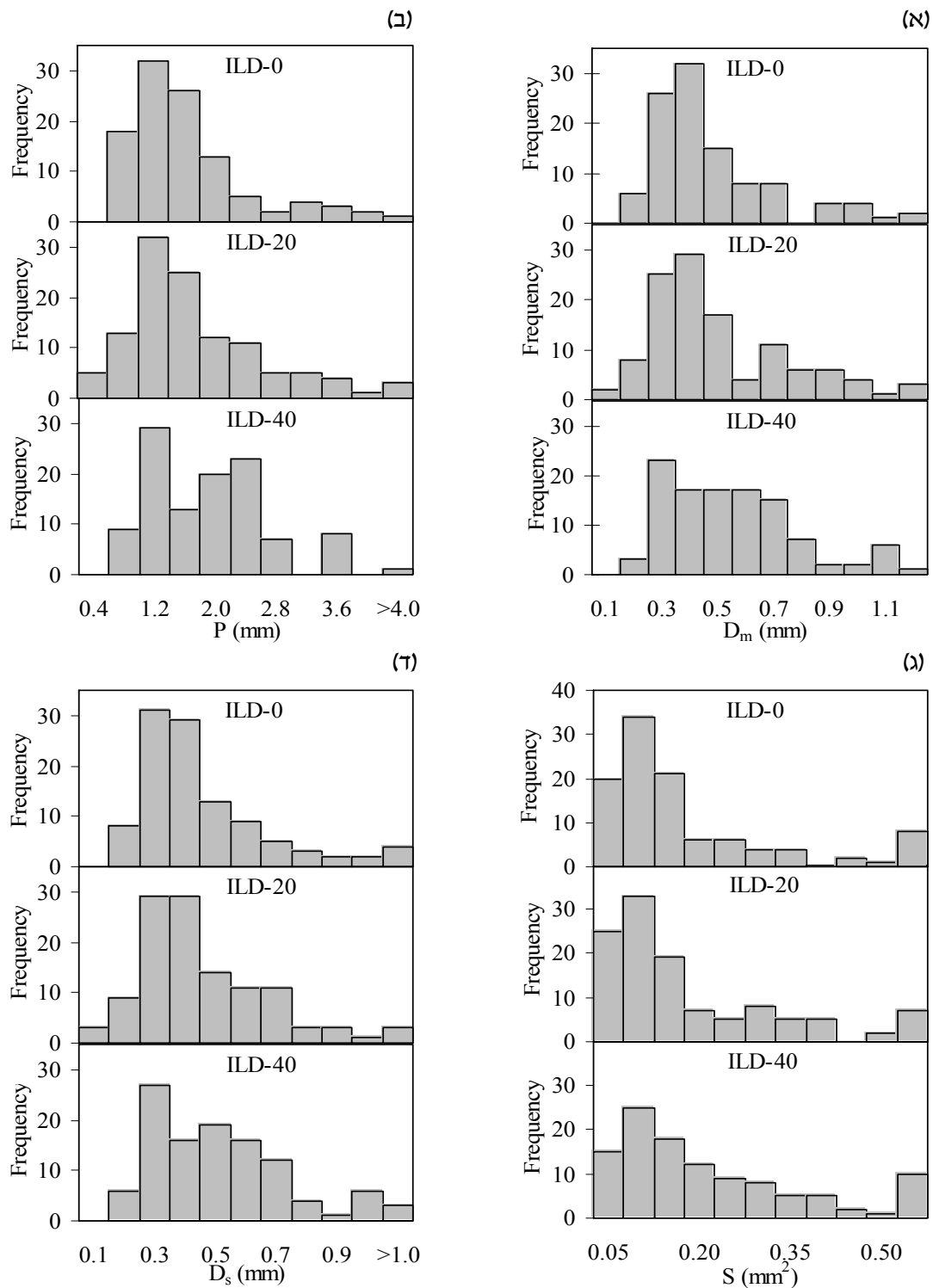
4.14 (ב) הצבנו את אורך המגעים הממוצע (L) ביחס לנקבוביות (ϕ) וכפי שניתן לראות קיבלנו יחס הפוך ביניהם עם מקדם רגרסיה נמוך ($R^2=0.65$).



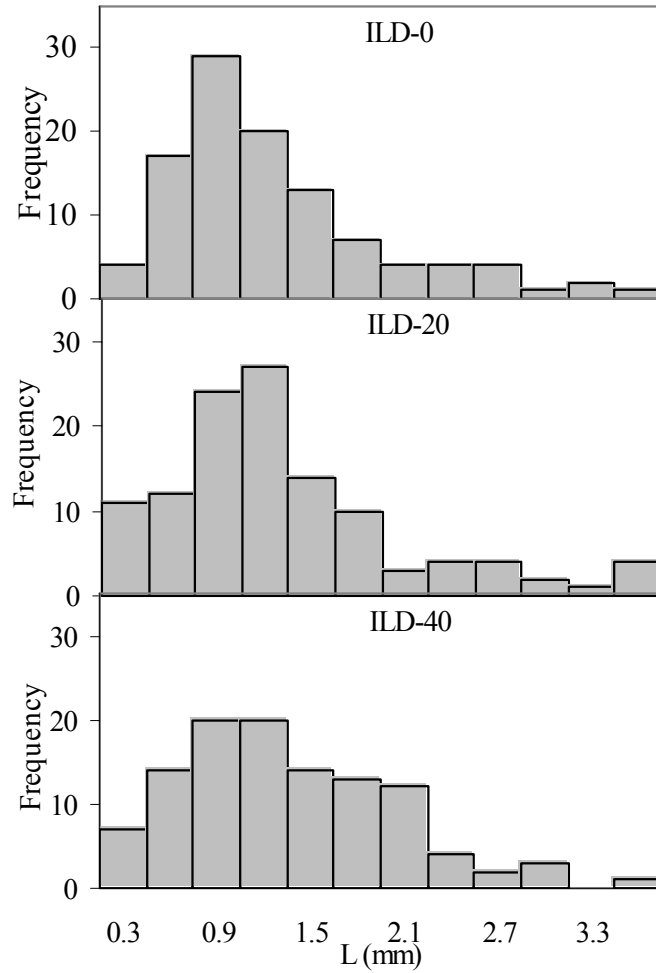
תרשים 4.10: תמונות מיקרו של דוגמת ILD לאחר דחיסתה ב-40 MPa (Indiana limestone). התמונות צולמו בניקולים סגורים. מידות התמונות – 2.53×1.90mm.



תרשים 4.11: תמונות מיקרו של ה-Indiana limestone (צולמו בניקולים סגורים עם פלטת קוורץ): (א) דוגמה ILD לפני שעברה דחיסה (ILD-40). (ב) דוגמה ILD לאחר שעברה דחיסה הידרוסטטית ב-20MPa (ILD-20). (ג) דוגמה ILD לאחר שעברה דחיסה הידרוסטטית ב-40MPa (ILD-40). מידות התמונות – 2.05×1.54mm.



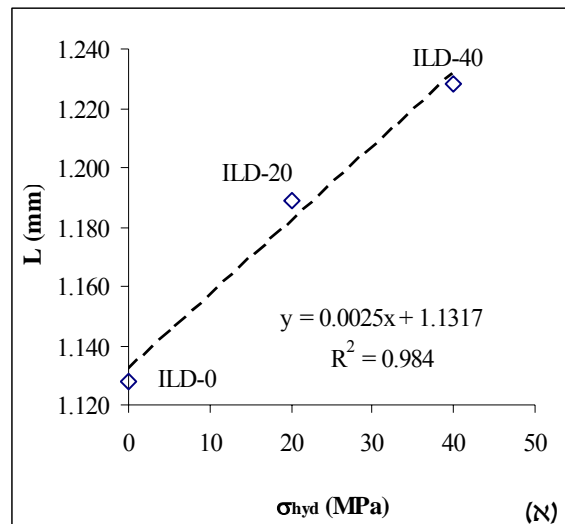
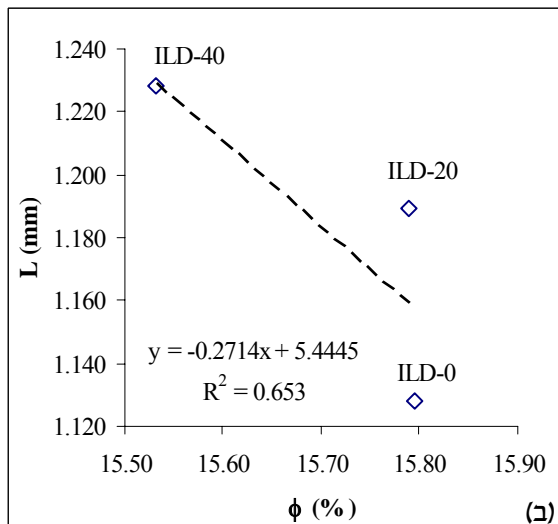
תרשים 4.12: היסטוגרמות המראות את התפלגות: (א) הקוטר הנמדד (D_m), (ב) ההיקף (P), (ג) השטח (S), (ד) הקוטר המחושב על פי S (D_s) - בדוגמת ILD עבור מצבי הדחיסה השונים (ILD-0, ILD-20, ו-ILD-40).



תרשים 4.13: היסטוגרמות של אורך המגעים המראות את השינוי בהתפלגות אורך המגעים בין מצבי הדחיסה השונים בדוגמת ILD (Indiana limestone).

טבלה 4.4: ערכים סטטיסטיים של הפרמטרים המיקרוטקסטורליים שנמדדו משקפי ה-Indiana limestone (דוגמה ILD) עבור מצבי הדחיסה בשונים.

		ILD-0MPa	ILD-20MPa	ILD-40MPa
D _m (mm)	av	0.426	0.459	0.505
	min	0.152	0.072	0.128
	max	1.147	1.589	1.328
P (mm)	av	1.451	1.572	1.727
	min	0.519	0.226	0.422
	max	4.068	5.211	4.846
S (mm ²)	av	0.169	0.176	0.210
	min	0.016	0.004	0.011
	max	1.056	1.627	1.025
D _s (mm)	av	0.411	0.415	0.466
	min	0.144	0.069	0.117
	max	1.160	1.439	1.142
L (mm)	av	1.128	1.189	1.228
	min	0.000	0.000	0.000
	max	3.467	4.243	3.972
n _{grains}		106	116	110



תרשים 4.14: (א) אורך המגעים הממוצע (L) ביחס לגודל המאמץ ההידרוסטטי (σ_{hyd}) - ב-Indiana limestone. (ב) אורך המגעים הממוצע (L) ביחס לנקבוביות (ϕ) - מחושבת בהנחה שהמשקל היחסי של מוצקים הוא $G_s=2.7$ ותכולת הרטיבות (w=0%) - ב-Indiana limestone.

4.3. התכונות המכניות

4.3.1. בדיקות דינמיות: מהירויות גלים בחומר

מציאת התכונות המכניות הדינמיות של דוגמאות הניסוי נעשתה באמצעות מדידת מהירויות גלי P ו-S. המדידות נעשו על גלעיני הדמה BSD ו-ILD לפני ולאחר כל דחיסה הידרוסטטית שנעשתה בהם. BSD-0 ו-ILD-0 מייצגים את דוגמאות הדמה של ה-Berea sandstone וה-Indiana limestone (BSD ו-ILD), בהתאמה) לפני דחיסתם (כלומר עבור מצב דחיסה ב-0 MPa), BSD-20 ו-ILD-20 מייצגים את דוגמאות הדמה לאחר דחיסתם ב-20 MPa, ו-BSD-40 ו-ILD-40 מייצגים את דוגמאות הדמה לאחר דחיסתם ב-40 MPa. לאחר שמהירויות גלי P ו-S חושבו כמתואר בפרק 3.3 חושבו הקבועים האלסטיים על-פי נוסחאות 2.14-2.18, כמתואר בפרק 2.1.5.

4.3.1.1 בדיקות מהירויות גלים ב-Berea sandstone

תוצאות בדיקות מהירויות הגלים שנעשו על דוגמה BSD (Berea sandstone) מובאות בטבלה 4.5. ניתן לראות שמהירויות גלי P (V_p) ו-S (V_s) עלו במידה מועטה מאוד לאחר דחיסת הדוגמה ב-20 MPa וירדו לאחר דחיסתה ב-40 MPa. תוצאות חישובי המקדם האלסטי הדינמי (E_d) ומודול הגזירה הדינמי (G_d) משקפות מגמה זהה לזו של המהירויות, ועבור יחס פואסון הדינמי (ν_d) ומודול הנפח הדינמי (K_d) התקבלו ערכים נמוכים יותר ככל שהדוגמה נדחסה במאמצים גדולים יותר. סך הכול הראו התוצאות שינויים זניחים במהירויות הגלים, עובדה המרמזת על כך שהלחצים ההידרוסטטיים שהופעלו על הדוגמה לא היו מספיק חזקים ולא הצליחו ליצור שינוי מהותי במיקרוטקסטורה, כך שישפיע על מהירות הגלים בסלע.

טבלה 4.5: תוצאות מדידות מהירויות גלי P ו-S בדוגמת ה-Berea sandstone.

Test	σ_{hyd} (MPa)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	E_d (GPa)	ν_d	G_d (GPa)	K_d (GPa)	ρ (gr/cm ³)	ϕ_{cal} (%)
BSD-0	0	2552	1435	11.35	0.27	4.48	8.18	2.17	19.65
BSD-20	20	2566	1560	12.77	0.21	5.29	7.26	2.17	19.53
BSD-40	40	2467	1549	12.27	0.17	5.23	6.28	2.18	19.43

4.3.1.2 בדיקות מהירויות גלים ב-Indiana limestone

תוצאות בדיקות מהירויות הגלים שנעשו על דוגמה ILD (Indiana limestone) מובאות בטבלה 4.6. ניתן לראות שמהירות גלי P (V_p) ירדה עם העליה בלחץ ההידרוסטטי ומהירות גלי S (V_s) עלתה במידה מועטה לאחר דחיסת הדוגמה ב-20 MPa וירדה לאחר דחיסתה ב-40 MPa. תוצאות חישובי המקדם האלסטי הדינמי (E_d) ומודול הגזירה הדינמי (G_d) משקפות מגמה זהה לזו של מהירות גלי S, מודול הנפח הדינמי (K_d)

ירד באופן עקבי עם העליה בלחץ ההידרוסטטי ויחס פואסון הדינמי (v_d) ירד לאחר הדחיסה ב-20 MPa ונשאר ללא שינוי לאחר הדחיסה ב-40 MPa. סך הכול הראו התוצאות שינויים זניחים במהירויות הגלים, עובדה המרמזת על כך שהלחצים ההידרוסטטיים שהופעלו על הדוגמה לא היו מספיק חזקים ולא הצליחו ליצור שינוי מהותי במיקרוסטרוקטורה של הסלע, כמו במקרה של ה-Berea sandstone.

טבלה 4.6: תוצאות מדידות מהירויות גלי P ו-S בדוגמת ה-Indiana limestone.

Test	σ_{hyd} (MPa)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	E_d (GPa)	v_d	G_d (GPa)	K_d (GPa)	ρ (gr/cm ³)	ϕ_{cal} (%)
ILD-0	0	3503	1934	21.79	0.28	8.51	16.55	2.27	15.80
ILD-20	20	3277	2019	22.14	0.19	9.27	12.06	2.27	15.79
ILD-40	40	3219	1984	21.43	0.19	8.97	11.67	2.28	15.53

4.3.2. בדיקות סטטיות: מבחני לחיצה חד-צירית

מציאת התכונות המכניות הסטטיות של דוגמאות הניסוי נעשתה באמצעות מבחני לחיצה חד-צירית. המבחנים בוצעו על דוגמאות המבחן לאחר שחלקן עברו דחיסה הידרוסטטית כלהלן (כמתואר בפרקים 3.1 ו-4.1):

- דוגמאות BST-0 ו-ILT-0 (Berea sandstone ו-Indiana limestone, בהתאמה) לא עברו דחיסות הידרוסטטיות לפני שעברו את מבחני הלחיצה החד-צירית.
- דוגמאות BST-20 ו-ILT-20 עברו דחיסות הידרוסטטיות ב-20 MPa לפני שעברו את מבחני הלחיצה החד-צירית.
- דוגמאות BST-40 ו-ILT-40 עברו דחיסות הידרוסטטיות ב-20 MPa ולאחר מכן שוב ב-40 MPa לפני שעברו את מבחני הלחיצה החד-צירית.

כל מבחני הלחיצה החד-צירית בוצעו בקצב מעוות קבוע של $1 \times 10^{-5} \text{sec}^{-1}$ כמתואר בפרק 3.4.2. חוזק הלחיצה החד-צירית (UCS) חולץ ישירות ממבחן הלחיצה, והקבועים האלסטיים חושבו בעזרת דיאגרמות המאמץ-מעוות ונוסחאות 2.1-2.5 (פרק 2.1.1).

4.3.2.1 מבחני לחיצה חד-צירית ב-Berea sandstone

תוצאות מבחני הלחיצה שבוצעו בגלעיני ה-Berea sandstone (BST-0, BST-20 ו-BST-40) מסוכמים בטבלה 4.7 ובתרשים 4.15 (א-ג). חשוב לציין שחישובי הצפיפות והנקבוביות בטבלה 4.7 חושבו מדוגמת הדמה של ה-Berea sandstone (BSD) לאחר שעברה את אותו תהליך דחיסה שעברה דוגמת המבחן

הקורלטיבית (BST-0, BST-20 ו-BST-40). זאת מכיוון שלא התאפשר למדוד את הצפיפות והנקבוביות של דוגמאות המבחן לאחר דחיסתן ולפני לחיצתן באופן חד-צירי.

מטבלה 4.7 ותרשים 4.15 (א-ג) נמצא שבעקבות עליית הלחץ ההידרוסטטי שהופעל על הדוגמאות קיבלנו עליה מועטה בחוזק הלחיצה החד-צירית (σ_c), בגודל המאמץ בנקודת תחילת התפיחה (σ_{cd}) ובמודול האלסטי הסטטי (E_s) של הסלע. עם זאת, מסתמנת מגמה ברורה של עליה בחוזק ובקשיחות עם הגדלת לחץ הכליאה הראשוני.

טבלה 4.7: סיכום תוצאות מבחני הלחיצה החד-צירית שנעשו ב-Berea sandstone.

Sample	σ_{hyd} (MPa)	E_s (GPa)	ν_s	σ_c (MPa)	σ_{cd} (MPa)	ρ^* (gr/cm ³)	ϕ_{cal}^* (%)
BST-0	0	17.26	0.37	81.46	56.92	2.17	19.65
BST-20	20	18.49	0.42	85.87	57.58	2.17	19.53
BST-40	40	18.69	0.36	86.04	59.59	2.18	19.43

* - חושבו מדוגמת BSD.

4.3.2.2 מבחני לחיצה חד צירית ב-Indiana limestone

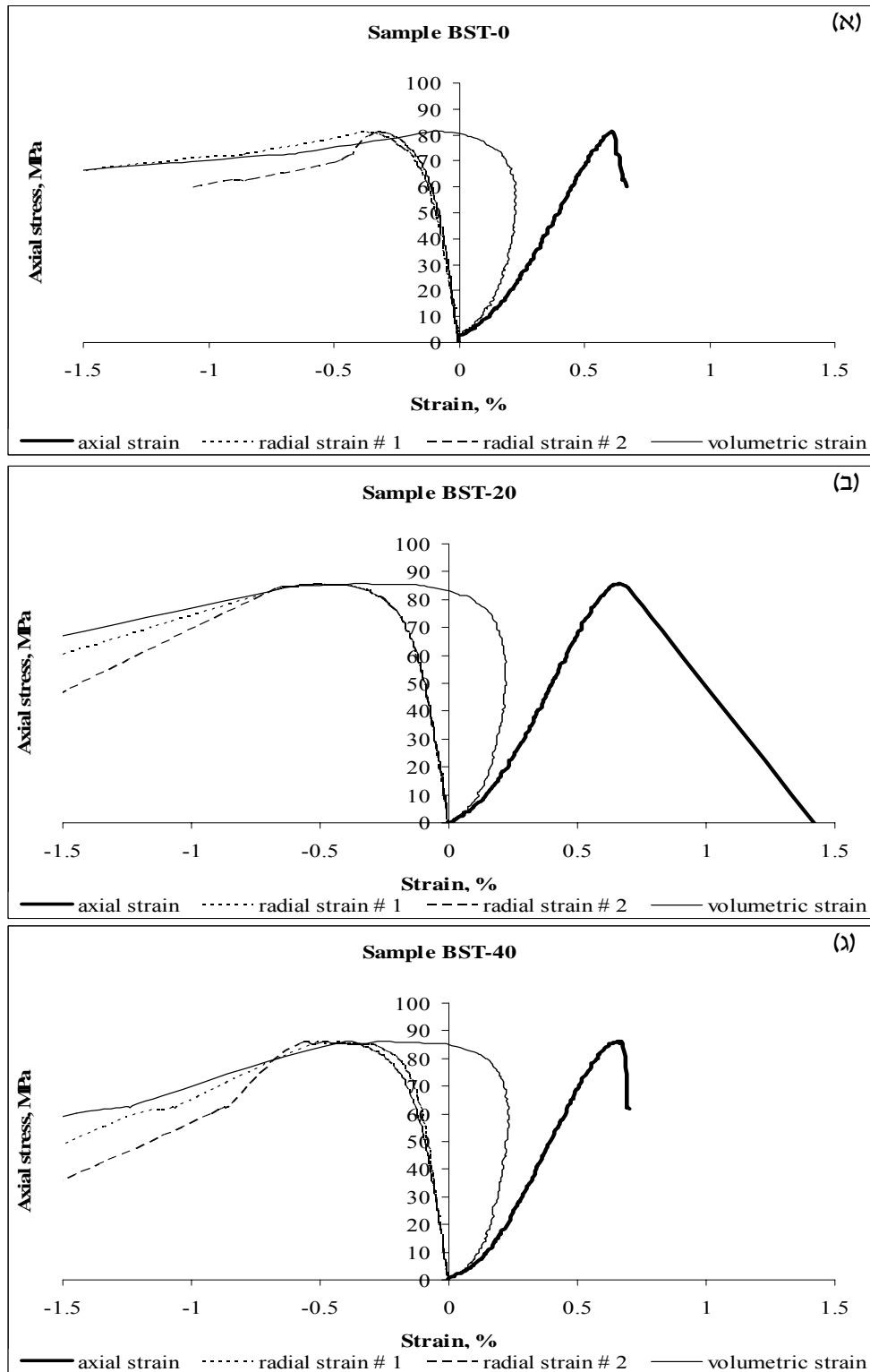
תוצאות מבחני הלחיצה שבוצעו בגלעיני ה-Indiana limestone (ILT-0, ILT-20 ו-ILT-40) מסוכמים בטבלה 4.8 ובתרשים 4.16 (א-ג). חשוב לציין שחישובי הצפיפויות והנקבוביות בטבלה 4.8 (כמו בטבלה 4.7) חושבו מדוגמת הדמה של ה-Indiana limestone (ILD) לאחר שעברה את אותו תהליך דחיסה שעברה דוגמת המבחן הקורלטיבית (ILT-0, ILT-20 ו-ILT-40). זאת מכיוון שלא התאפשר למדוד את הצפיפות והנקבוביות של דוגמאות המבחן לאחר דחיסתן ולפני לחיצתן באופן חד-צירי.

מטבלה 4.8 ותרשים 4.16 (א-ג) נמצא שבעקבות עליית הלחץ ההידרוסטטי שהופעל על הדוגמאות קיבלנו עליה מועטה בחוזק הלחיצה החד-צירית (σ_c), במודול האלסטי הסטטי (E_s) וביחס פואסון הסטטי (ν_s) של הסלע. כמו במקרה של ה-Berea sandstone, מסתמנת גם כאן מגמה ברורה של עליה בחוזק ובקשיחות הסלע עם הגדלת לחץ הכליאה הראשוני.

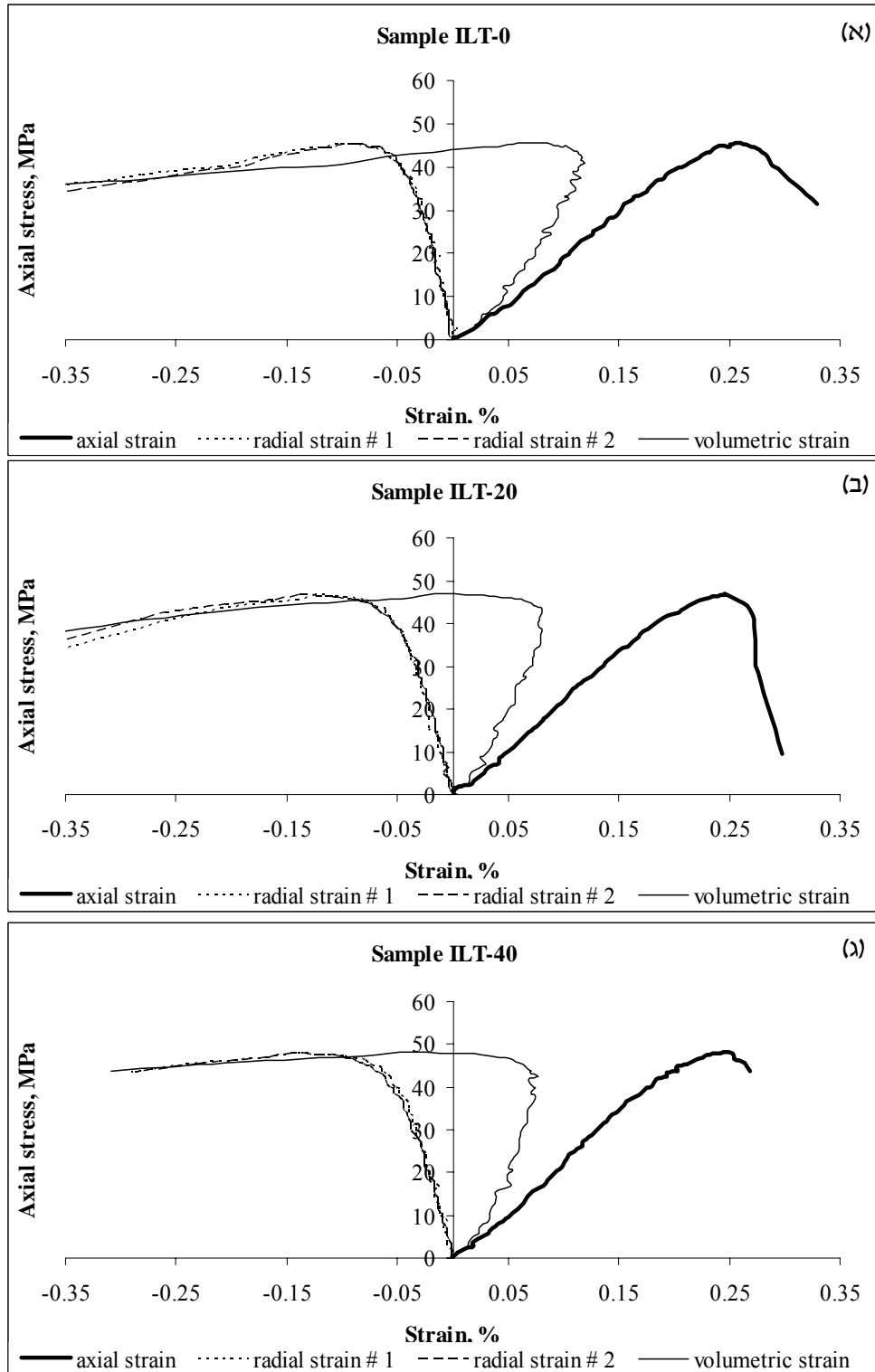
טבלה 4.8: סיכום תוצאות מבחני הלחיצה החד-צירית שנעשו ב-Indiana limestone.

Sample	σ_{hyd} (MPa)	E_s (GPa)	ν_s	σ_c (MPa)	σ_{cd} (MPa)	ρ^* (gr/cm ³)	ϕ_{cal}^* (%)
ILT-0	0	21.60	0.231	45.41	40.96	2.27	15.80
ILT-20	20	23.76	0.277	46.85	43.64	2.27	15.79
ILT-40	40	25.02	0.349	48.14	42.57	2.28	15.53

* - חושבו מדוגמת ILD.



תרשים 4.15: דיאגרמות המאמץ-מעוות של מבחני הלחיצה החד-צירית שנעשו בדוגמאות: (א) BST-0, (ב) BST-20, (ג) BST-40 (Berea sandstone).



תרשים 4.16: דיאגרמות המאמץ-מעוות של מבחני הלחיצה החד-צירית שנעשו בדוגמאות: (א) ILT-0, (ב) ILT-20, (ג) ILT-40 (Indiana limestone).

פרק 5 - דיון

5.1. השפעת הלחץ ההידרוסטטי על הדוגמאות

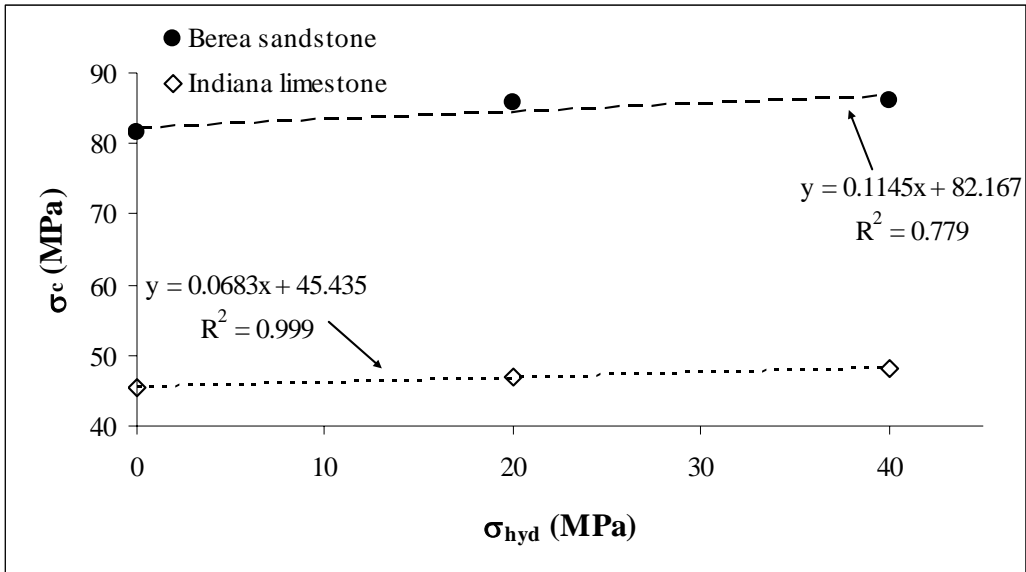
5.1.1. השפעת הלחץ ההידרוסטטי על המיקרוטקסטורה

במחקר זה בדקנו את השפעת הלחץ ההידרוסטטי על המיקרוטקסטורה בכלל ואורך המגעים שבין הגרגרים בפרט. סלעי חול וגיר (Berea sandstone ו-Indiana limestone, בהתאמה) נדחסו בלחצים הידרוסטטיים של 20 MPa ו-40 MPa ונבחנו תחת מיקרוסקופ אור. לחצים אלו נמצאים בקצה התחתון של עקומת המאמץ-מעוות נפחי ועל פי תרשימים 4.1-4.4 נמצאים ככל הנראה בשלב ה-Fissure closure. מהמידות המיקרוטקסטורליות נמצא כי בשני סוגי הסלעים התקבלו עליות באורך המגעים עם העלייה בלחץ ההידרוסטטי. עבור סלע ה-Berea sandstone נמצא שגודל הגרגרים נשאר קבוע ושהלחץ ההידרוסטטי לא השפיע עליו. לעומת זאת, ב-Indiana limestone נמצא שגודל הגרגר עלה בין מצבי הדחיסה השונים. עליה זו מקורה ככל הנראה בשונות ראשונית בדוגמאות הסלע ואינה תוצאה ישירה של הדחיסה. מכיוון שאורך המגעים בין הגרגרים תלוי בגודל הגרגר יתכן שגם העליה באורך המגעים, כפי שמצאנו ב-Indiana limestone, היא תוצאה של השונות הראשונית. לעומת זאת, מכיוון שב-Berea sandstone גודל הגרגר לא השתנה, ניתן להסיק כי העליה באורך המגעים באבן החול היא ללא ספק תוצאה ישירה של הדחיסה והירידה בנקבוביות.

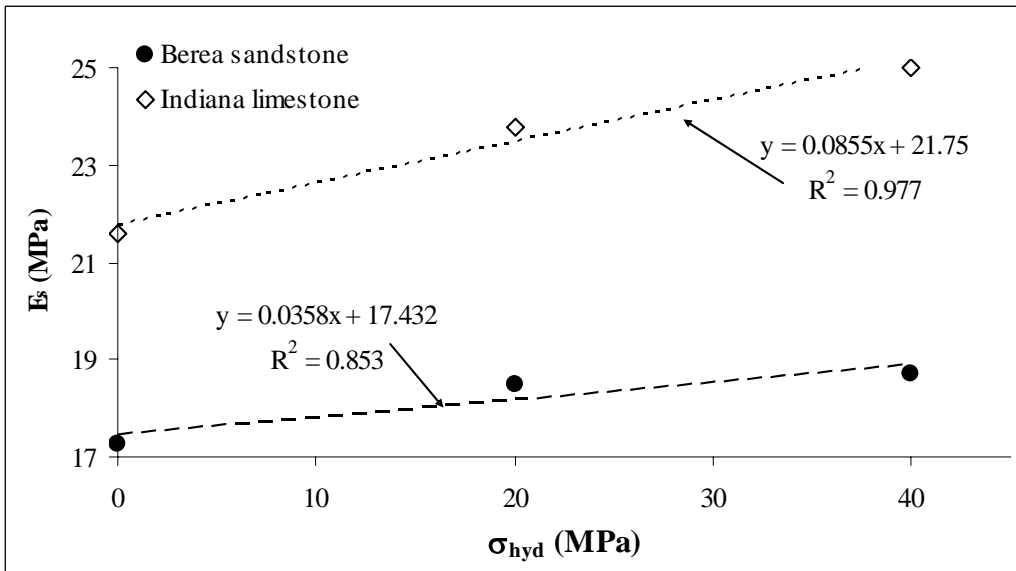
5.1.2. השפעת הלחץ ההידרוסטטי על התכונות המכניות

5.1.2.1. השפעת הלחץ ההידרוסטטי על התכונות המכניות הסטטיות

לאחר דחיסת דוגמאות המבחן של סלעי החול והגיר נבחנו השינויים בתכונות המכניות הסטטיות באמצעות מבחני לחיצה חד-צירית. תוצאות מבחני הלחיצה עבור מצבי הדחיסה השונים של דוגמאות ה-Berea sandstone וה-Indiana limestone מוצגות בטבלאות 4.7 ו-4.8 ובתרשימים 4.15 ו-4.16 (בהתאמה). נמצא שבשני סוגי הסלעים החוזק והקשיחות גדלים עם העלייה בגודל הלחיצה ההידרוסטטית. בתרשימים 5.1 ו-5.2 מוצגים חוזק (σ_c) וקשיחות (E) הסלעים ביחס ללחץ ההידרוסטטי שהופעל על דוגמאות הסלעים (σ_{hyd}). ניתן לראות שהקורלציות שהתקבלו הן ליניאריות וחיוביות, כאשר ב-Indiana limestone הן בעלי מקדמי רגרסיה גבוהים מאוד ($R^2_{(\sigma_c)}=0.999$ ו- $R^2_{(E)}=0.977$) ביחס ל-Berea sandstone ($R^2_{(\sigma_c)}=0.779$ ו- $R^2_{(E)}=0.853$).



תרשים 5.1: חוזק הלחיצה החד-צירי (σ_c) ביחס ללחץ ההידרוסטטי (σ_{hyd}) שהופעל על דוגמאות ה-Berea sandstone וה-Indiana limestone.



תרשים 5.2: מודול יאנג (E) ביחס ללחץ ההידרוסטטי (σ_{hyd}) שהופעל על דוגמאות ה-Berea sandstone וה-Indiana limestone.

5.1.2.2 השפעת הלחץ ההידרוסטטי על התכונות המכניות הדינמיות

מבדיקות מהירות גלי P ו-S שנעשו בשני סוגי הסלעים עבור מצבי הדחיסה השונים לא נמצאו שינויים מהותיים במהירות הגלים (טבלאות 4.5 ו-4.6). ההבדלים שנמצאו בין מצבי הדחיסה הם זניחים ואינם מעידים על מגמה ברורה בעקבות עליית הלחץ ההידרוסטטי. המסקנה המתבקשת מכך היא שהשינויים המיקרוטקסטורליים שהתרחשו במדגמים שנבחנו עקב הפעלת לחץ הידרוסטטי ראשוני של עד 40 MPa אינם מספיק משמעותיים מבחינת מהירות גלים סיסמיים בחומר. קרי – יתכן שמדד המהירות איננו מספיק רגיש עבור טווח כזה של לחץ הידרוסטטי. מעניין עם זאת, שדווקא הפרמטרים המכניים הסטטיים כן רגישים מספיק.

5.2 יחסי מיקרוטקסטורה – תכונות מכניות

במחקר זה נדחסו דוגמאות של אבן חול ואבן גיר (Berea sandstone ו-Indiana limestone, בהתאמה) בלחץ הידרוסטטי של 20 MPa ו-40 MPa, ונבחנו השינויים בתכונות המכניות הסטטיות והדינמיות ובמיקרוטקסטורה. להלן עיקר הממצאים:

- נמצא שרמת המאמצים ההידרוסטטיים שהפעלנו מספקת לסגירת בקיעים בלבד (Fissure closure) ויש להגיע לרמות לחץ הידרוסטטי גבוהות בהרבה לצורך קבלת שינויים מבניים משמעותיים.
- למרות זאת, ממדידות מיקרוטקסטורליות נמצא שאורך המגעים גדל בעקבות עליית הלחץ ההידרוסטטי. גדילה זו נמצאה באופן חד משמעי עבור סלע ה-Berea sandstone, בעוד שעבור ה-Indiana limestone היא איננה חד משמעית ויכלה להיגרם כתוצאה מהשונויות הראשוניות של הסלע.
- מחישובי צפיפות ונקבוביות נמצא שהעליה בלחץ ההידרוסטטי גרמה לעליה בצפיפות וירידה בנקבוביות הסלעים.
- ממבחי לחיצה חד-צירית נמצא שעלייה בלחץ ההידרוסטטי גרמה לעלייה בחוזק וקשיחות הסלעים.
- תוצאות בדיקות של מהירויות גלי P ו-S לא הראו שינויים בעקבות דחיסת הדוגמאות. מכאן ניתן להסיק שמדד המהירויות האולטרה סוניות איננו מספיק רגיש לשינויים מבניים קלים.

מהתוצאות נראה כי בהתאם להנחת המחקר עליית אורך המגעים מצביעה על עליה בחוזק וקשיחות הסלע. בכדי להעמיק ולחקור את השפעת אופי המגעים (אורך ורציפות) על התכונות המכניות הצבנו את אורך המגעים (L) ביחס לרציפות (N ו-n) ונרמלנו אותם לערכים השונים של גודל הגרגר (D_s, S, P, D_m), בהתאם ליחסים הבאים: $L/GS, (L/N_1)/GS, (L/N_2)/GS, L/(N_1/n)/GS$ ו- $L/(N_2/n)/GS$ - להלן פרמטרי המגע ("Grain contact parameters"). כאשר: L – אורך מגעים, N_1 – מספר מגעים לגרגר על פי גישה 1 (ראה פרק 3.5.2), N_2 – מספר מגעים לגרגר על פי גישה 2 (ראה פרק 3.5.2), n – מספר גרגרים שכנים לגרגר ו-GS (Grain Size) $D_s, S, P, D_m =$ על ידי הצבת פרמטרים אלו ביחס לתכונות המכניות יכולנו לבחון את השפעת אורך ורציפות המגעים על התכונות המכניות ולמצוא את פרמטר גודל הגרגר המשמעותי ביותר.

עבור כל פרמטרי המגע הוכנו היסטוגרמות ונבדקו השינויים בהתפלגותם בעקבות עליית הלחץ ההידרוסטטי. מהיסטוגרמות פרמטרי המגע של ה-Indiana limestone לא נמצא שינוי בהתפלגותם המראה מגמה ברורה. בטבלאות 5.1 (א-ד) מוצגים הערכים הממוצעים של פרמטרי המגע עם שגיאה מקסימלית של פחות מ-0.5%, ובתרשים 5.3 (א-ג) הם מוצגים ביחס ללחץ ההידרוסטטי (D_s) כמעט זהה ל- D_m ולכן לא מופיע). ניתן לראות כי עבור ה-Indiana limestone לא נמצא שינוי משמעותי בערכי הפרמטרים עם העלייה בלחץ ההידרוסטטי פרט ליחס $L/(N_2/n)/GS$ אשר הראה ירידה בערכים. מכיוון שנמצא שאורך המגעיים גדל עם עליית הלחץ ההידרוסטטי וקיימת שונות ראשונית בגודל הגרגרים, ניתן להסיק שבשל השונות הראשונית לא ניתן לזהות מגמה ברורה של פרמטרי המגע ביחס ללחץ הכליאה ולא ניתן להסיק מכך על התכונות המכניות של הסלע. למרות זאת ניתן לראות מגמה עקבית של עליה בחוזק החד-צירי ובמודול יאנג וירידה מועטה בנקבוביות עם העלאת לחץ הכליאה הראשוני. כלומר האפקט המכני של הגדלת לחץ הכליאה הראשוני גדול יותר מתרומת השונות הראשונית. סביר להניח שבלחצים הידרוסטטים גדולים יותר ניתן יהיה לראות שינוי משמעותי יותר באורך המגעיים, ויתכן שבמקרים אלו ניתן יהיה לראות עליה בפרמטרים המגע.

טבלאות 5.1(א-ד): הערכים הממוצעים של פרמטרי המגע L/GS , $(L/N_1)/GS$, $(L/N_2)/GS$, $L/(N_1/n)/GS$ ו- $L/(N_2/n)/GS$ כאשר: L – אורך מגעים, N_1 – מספר מגעים לגרגר על פי גישה 1, N_2 – מספר מגעים לגרגר על פי גישה 2, n – מספר שכנים לגרגר ו- $GS = (D_s, S, P, D_m)$ (Grain Size).

(א)

Rock type	Test	σ_{hyd}	L/D_m	$(L/N_1)/D_m$	$(L/N_2)/D_m$	$L/(N_1/n)/D_m$	$L/(N_2/n)/D_m$
Berea sandstone	BSD-0	0	1.651	0.409	0.514	1.474	1.968
	BSD-20	20	2.000	0.479	0.612	1.894	2.532
	BSD-40	40	2.480	0.536	1.016	2.411	4.688
Indiana limestone	ILD-0	0	2.611	0.496	1.564	2.479	8.525
	ILD-20	20	2.493	0.538	1.538	2.380	8.092
	ILD-40	40	2.414	0.462	1.279	2.253	7.022

(ב)

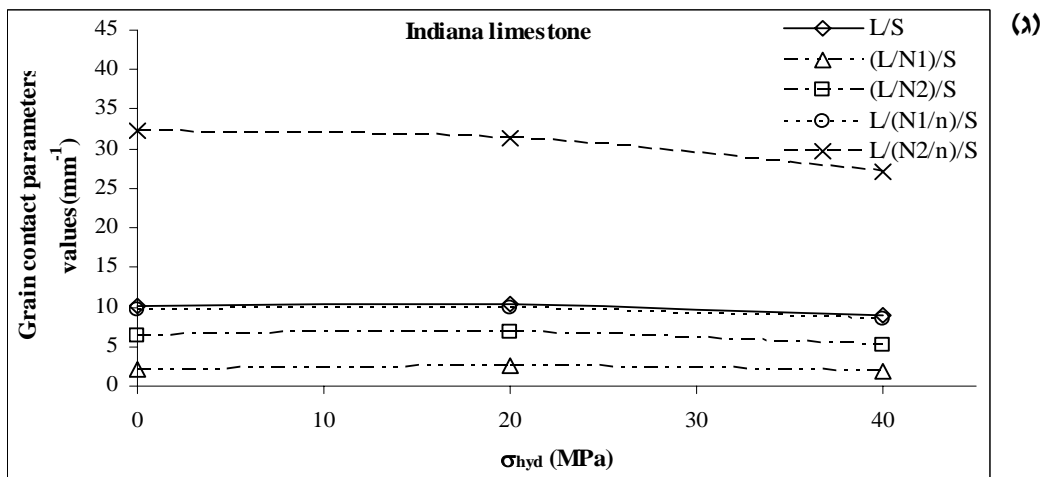
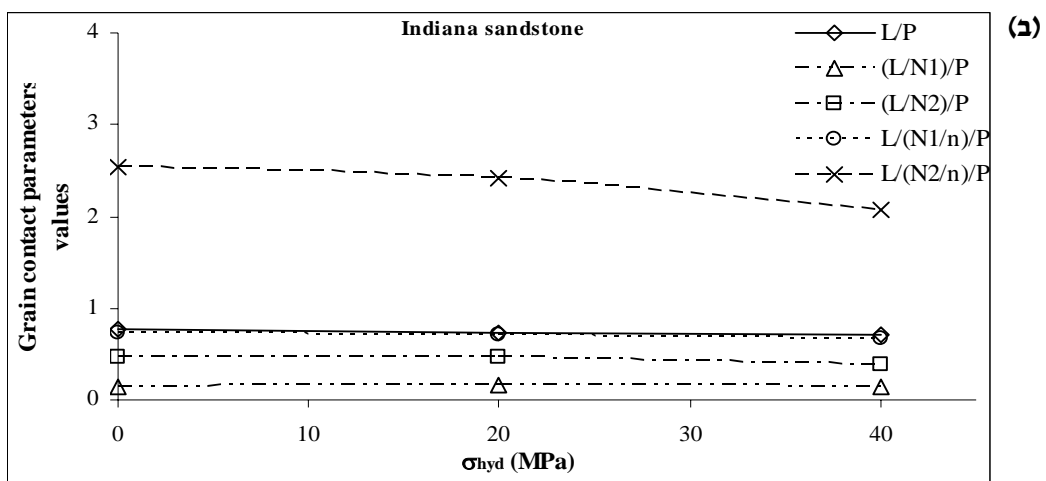
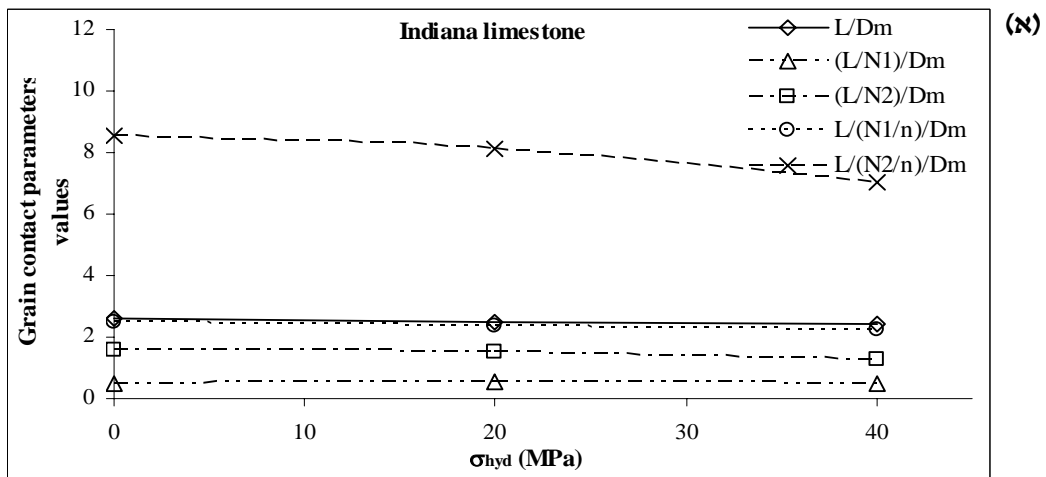
Rock type	Test	σ_{hyd}	L/P	$(L/N_1)/P$	$(L/N_2)/P$	$L/(N_1/n)/P$	$L/(N_2/n)/P$
Berea sandstone	BSD-0	0	0.411	0.102	0.129	0.367	0.493
	BSD-20	20	0.507	0.122	0.156	0.479	0.644
	BSD-40	40	0.625	0.135	0.256	0.607	1.182
Indiana limestone	ILD-0	0	0.774	0.148	0.466	0.735	2.532
	ILD-20	20	0.738	0.161	0.461	0.706	2.408
	ILD-40	40	0.709	0.136	0.378	0.663	2.071

(ג)

Rock type	Test	σ_{hyd}	L/S	$(L/N_1)/S$	$(L/N_2)/S$	$L/(N_1/n)/S$	$L/(N_2/n)/S$
Berea sandstone	BSD-0	0	19.82	5.20	6.62	17.79	24.29
	BSD-20	20	22.26	5.85	7.50	21.17	28.67
	BSD-40	40	29.14	6.72	13.73	28.38	58.98
Indiana limestone	ILD-0	0	10.19	2.01	6.26	9.69	32.39
	ILD-20	20	10.31	2.62	6.81	9.93	31.45
	ILD-40	40	8.93	1.86	5.27	8.47	27.12

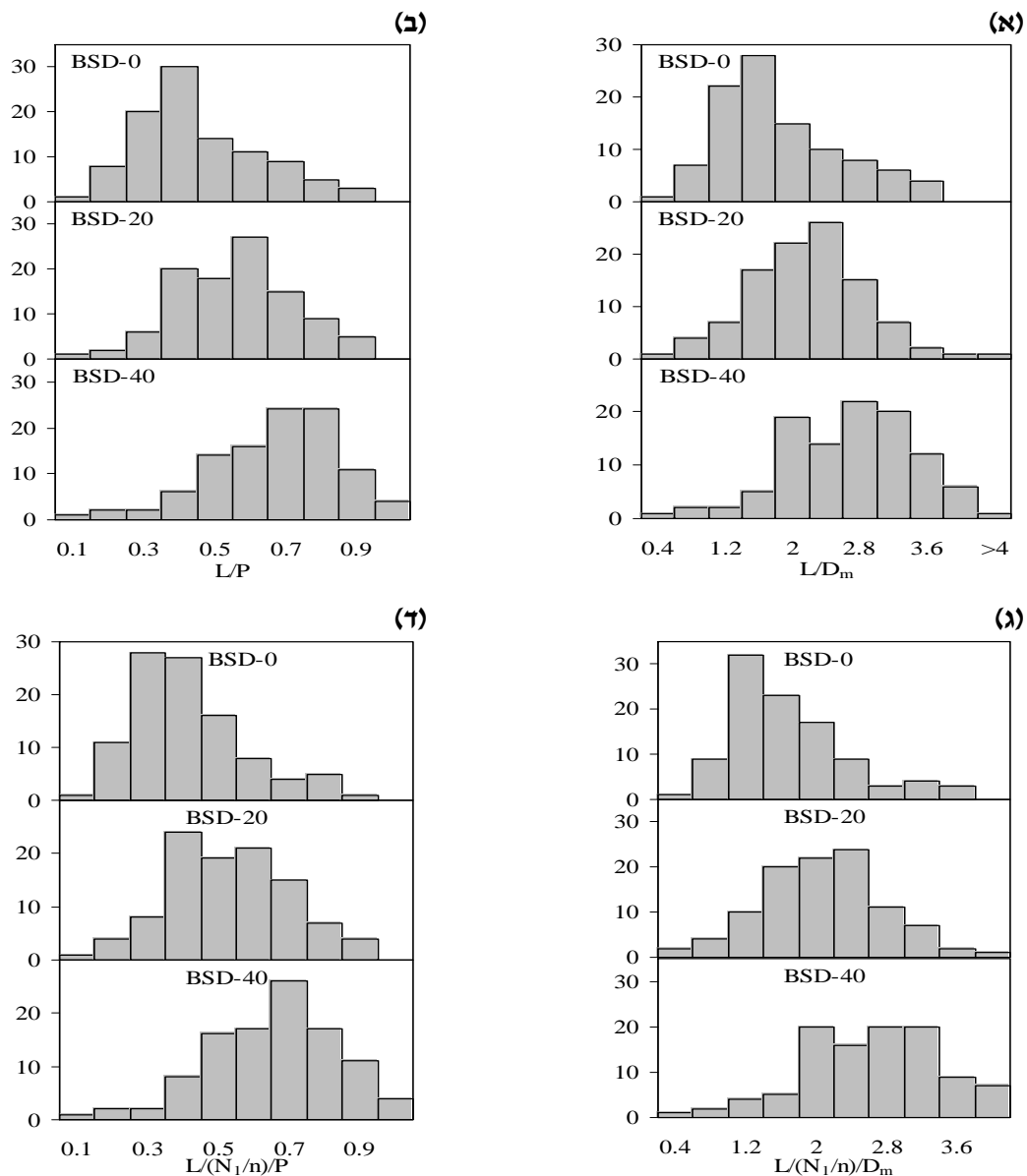
(ד)

Rock type	Test	σ_{hyd}	L/D_s	$(L/N_1)/D_s$	$(L/N_2)/D_s$	$L/(N_1/n)/D_s$	$L/(N_2/n)/D_s$
Berea sandstone	BSD-0	0	1.504	0.372	0.470	1.339	1.800
	BSD-20	20	1.890	0.457	0.583	1.787	2.394
	BSD-40	40	2.374	0.511	0.974	2.308	4.507
Indiana limestone	ILD-0	0	2.730	0.516	1.631	2.589	8.904
	ILD-20	20	2.745	0.584	1.682	2.613	9.064
	ILD-40	40	2.651	0.506	1.410	2.477	7.744

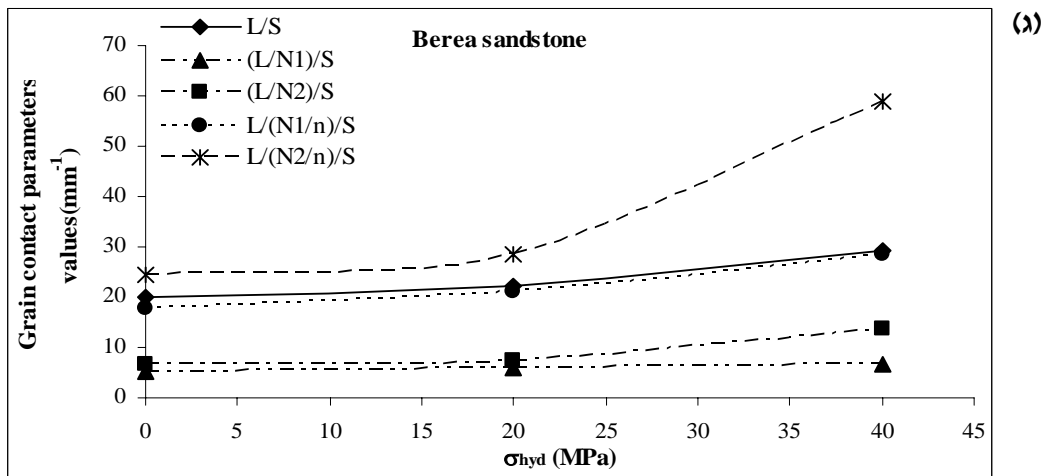
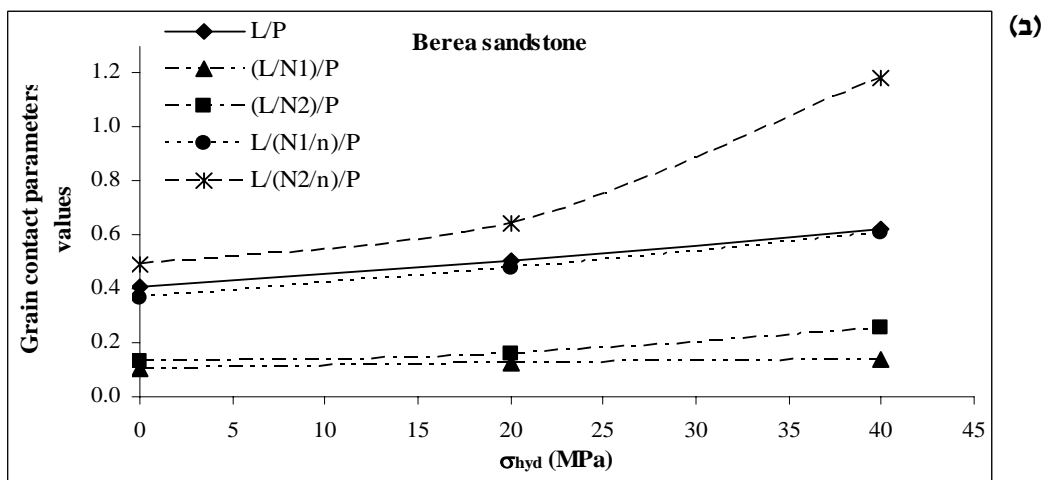
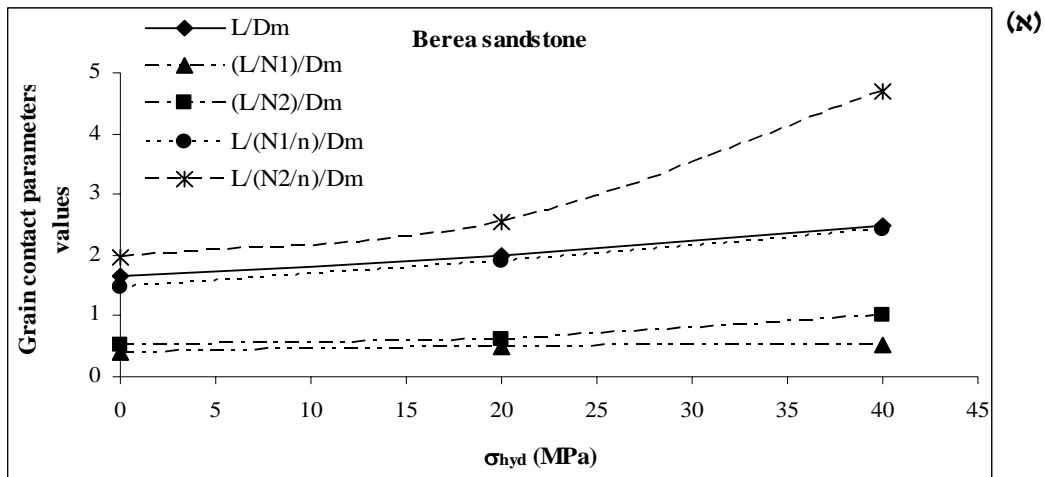


תרשים 5.3 (א-ג): (א) פרמטרי המגע L/D_m , $(L/N_1)/D_m$, $(L/N_2)/D_m$, $L/(N_1/n)/D_m$ ו- $L/(N_2/n)/D_m$ ביחס ללחץ ההידרוסטטי (σ_{hyd}). (ב) פרמטרי המגע L/P , $(L/N_1)/P$, $(L/N_2)/P$, $L/(N_1/n)/P$ ו- $L/(N_2/n)/P$ ביחס ללחץ ההידרוסטטי (σ_{hyd}). (ג) פרמטרי המגע L/S , $(L/N_1)/S$, $(L/N_2)/S$, $L/(N_1/n)/S$ ו- $L/(N_2/n)/S$ ביחס ללחץ ההידרוסטטי (σ_{hyd}) – ב-Indiana limestone.

מההיסטוגרמות של פרמטרי המגע שנעשו עבור ה-Berea sandstone נמצא כי כל ערכי הפרמטרים נעים לערכים גבוהים יותר עם העליה בלחץ ההידרוסטטי. מגמה זו בולטת במיוחד עבור הפרמטרים L/P , L/D_m , $L/(N_1/n)/P$ ו- $L/(N_1/n)/D_m$ כמתואר בתרשים 5.4(א-ד). בטבלאות 5.1(א-ד) מוצגים הערכים הממוצעים של פרמטרי המגע ובתרשים 5.5(א-ג) הם מוצגים ביחס ללחץ ההידרוסטטי (D_s כמעט זהה ל- D_m ולכן לא מופיע). ניתן לראות כי עבור ה-Berea sandstone כל היחסים מראים עלייה בערכים עם עליית הלחץ ההידרוסטטי.



תרשים 5.4(א-ד): היסטוגרמות המראות את התפלגות פרמטרי המגע: (א) L/D_m , (ב) L/P , (ג) $L/(N_1/n)/D_m$ ו- (ד) $L/(N_1/n)/P$. Berea sandstone.



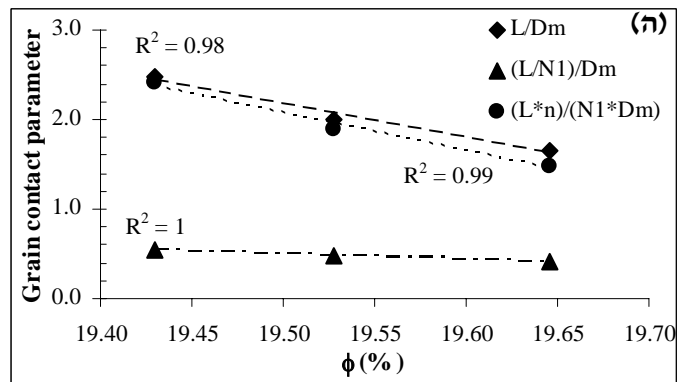
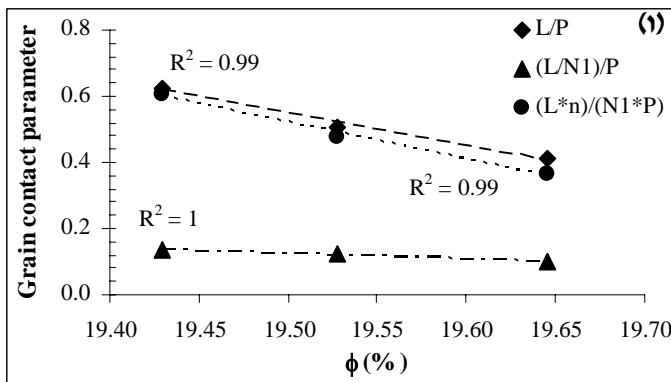
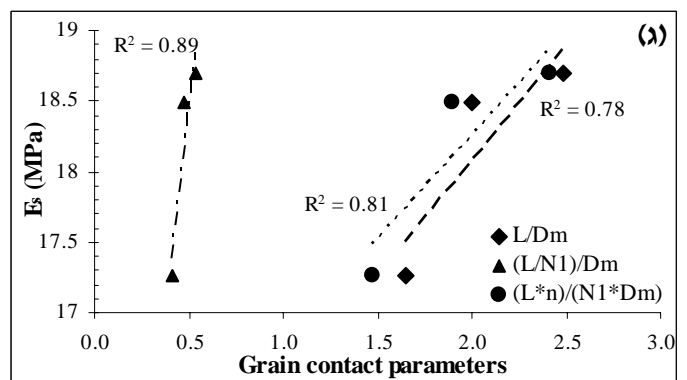
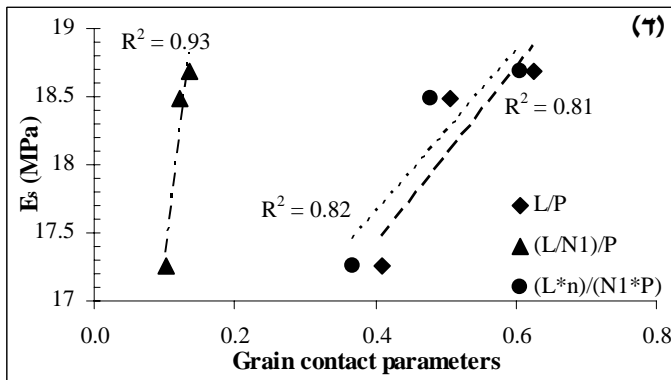
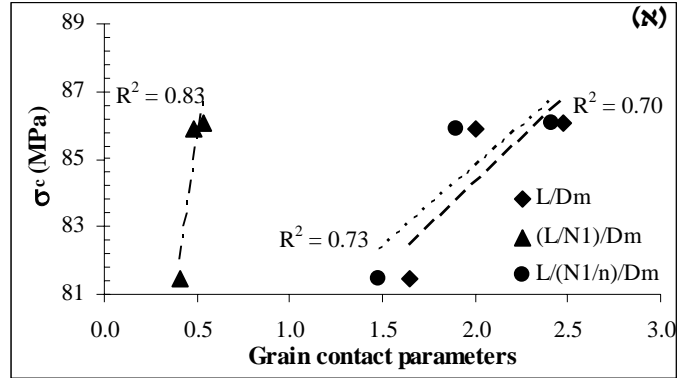
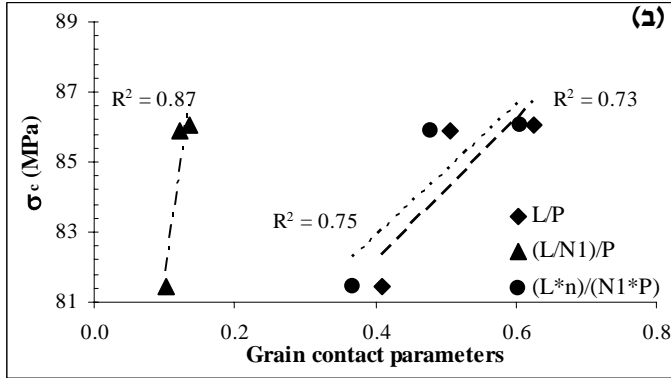
תרשים 5.5 (א-ג): (א) פרמטרי המגע L/D_m , $(L/N_1)/D_m$, $(L/N_2)/D_m$, $L/(N_1/n)/D_m$ ו- $L/(N_2/n)/D_m$ ביחס ללחץ ההידרוסטטי (σ_{hyd}). (ב) פרמטרי המגע L/P , $(L/N_1)/P$, $(L/N_2)/P$, $L/(N_1/n)/P$ ו- $L/(N_2/n)/P$ ביחס ללחץ ההידרוסטטי (σ_{hyd}). (ג) פרמטרי המגע L/S , $(L/N_1)/S$, $(L/N_2)/S$, $L/(N_1/n)/S$ ו- $L/(N_2/n)/S$ ביחס ללחץ ההידרוסטטי (σ_{hyd}) - ב-Berea sandstone.

לאחר שנמצאה השפעה של לחץ הכליאה על אורך המגעים, נקבוביות, קשיחות וחוזק בחנו את השפעת אורך המגעים על התכונות המכניות באופן ישיר. בתרשים 5.6 (א-ו) הצבנו את הפרמטרים L/P , L/D_m , $L/(N_1/n)/P$ ו- $L/(N_1/n)/D_m$, $(L/N_1)/D_m$, $(L/N_1)/P$ ו- $(L/N_1)/P$ ביחס לחוזק הלחיצה החד-צירית (σ_c), למודול יאנג (E_s) ולנקבוביות (ϕ) של ה-Berea sandstone. הפרמטרים המוצגים בגרפים נמצאו בעלי הקורלציה הטובה ביותר מבין פרמטרי המגע שנחקרו בעבודה זו. ביחס לחוזק הלחיצה החד-צירי נמצאו קורלציות ליניאריות טובות כאשר פרמטרי המגע מראים עלייה בערכים עם העלייה בחוזק. קורלציות טובות יותר התקבלו בין E_s לפרמטרי המגע, כאשר פרמטרי המגע מראים עלייה בערכים עם העלייה במודול יאנג. טיב הקורלציות עם החוזק והקשיחות והמגמות שהתקבלו מחזקים את ההנחה שהתארכות המגעים בין הגרגרים מקטינה את ריכוז המאמצים בגבולותיהם ובכך מגדילה את חוזק וקשיחות הסלע.

בהצבת פרמטרי המגע ביחס לנקבוביות קיבלנו את הקורלציות עם מקדמי הרגרסיה הגבוהים ביותר ($R^2=0.98-1.00$). נמצא כי פרמטרי המגע מקבלים ערכים גבוהים יותר עם הירידה בנקבוביות. ממצא זה מחזק את הטענה שמגעי גבולות הגרגרים הם הגורם הדומיננטי ביותר לירידה בנקבוביות בתהליך הדחיסה של אבן-החול (Digby, 1981; Zhang et al., 1990; He et al, 2002).

בהשוואה בין הקורלציות של פרמטרי המגע נמצא כי קורלציות טובות יותר התקבלו עבור פרמטרים שכללו את רציפות המגעים (כשמבוטאת על ידי N_1) ואת היקף הגרגר. הקורלציות הטובות ביותר התקבלו עבור הפרמטר $(L/N_1)/P$. ניתן להסיק מכך שלרציפות המגעים (יחד עם אורכם) תפקיד חשוב בקביעת התכונות המכניות של סלע נקבובי, ויש לקחת אותה בחשבון. כמו כן מבין הפרמטרים של גודל הגרגר היקף הגרגר הוא המשמעותי ביותר במציאת התכונות המכניות של סלע נקבובי.

נמצא שהגדלת לחץ הכליאה משפיעה ישירות על אורך המגע בין גרגרים בסלעים גרנולרים. במחקר זה הודגם, בהתאם להנחת העבודה, שהעלאת אורך המגעים בין גרגרים תורמת לעליה בחוזק ובקשיחות.



תרשים 5.6: קורלציות בין יחסי אורך המגעים $L/(N_1/n)/P$ ו- $L/(N_1/n)/D_m$, $(L/N_1)/D_m$, $(L/N_1)/P$, L/P , L/D_m לבין: א-ב) חוזק הלחיצה החד-צירית (σ_c), ג-ד) הקשיחות (E_s) ו-ה-ו) הנקבוביות (ϕ) ב-Berea sandstone.

5.3. יעילות מערכת ה-GIS לניתוח המיקרוטקסטורלי

תוכנות GIS הן מערכות מידע גיאוגרפי אשר עוצבו לעבוד עם מידע מרחבי המשוויך לרשת קורדינטות גיאוגרפיות ועובדות על עיקרון של עבודה בשכבות. במחקר זה השימוש במערכת נעשה לצורך עיבוד תמונה ומדידת הפרמטרים המיקרוטקסטורלים. השימוש במערכת איפשר עבודה ברזולוציה גבוהה מאוד (בגודל פיקסל הקטן מ- $1\mu\text{m}^2$) והעבודה בשכבות איפשרה עבודה על מספר שכבות במקביל וקבלת המידע באופן מרוכז באמצעות טבלאות. העבודה במקביל נדרשת כאשר יש קושי בזיהוי גבולות הגרגרים. במקרים כאלה השימוש ב-GIS מאפשר עבודה עם כמה שכבות צילומים (במקרה שלנו נעשו 3 שכבות צילומים) כאשר העבודה עצמה נעשית על שכבת העבודה וברקע מתחלפות שכבות הצילומים בהתאם לצורך ותוך שמירה על אותן קורדינטות.

חיסרון המערכת הוא בכך שלצורך עיבוד התמונה ובניית שכבות העבודה יש צורך בהגדרת אותן קורדינטות. במחקר זה נלקחו מעל 350 תמונות מיקרו ונוצרו מספר שווה של שכבות עבודה, מה שהפך את תהליך הגדרת הקורדינטות למסורבל ואיטי.

5.4. הצעות להמשך המחקר

עבודה זו היא חלק ממחקר גדול יותר שמטרתו הגדרת קריטריון מגע אשר יתאר את אופי המגעים בין גרגרי הסלע ויהיה קורלטיבי עם התכונות המכניות של הסלע. בהתאם לכך מובאות בפרק זה המלצות ודרכים להמשך המחקר.

בכדי למנוע שונות ראשונית אפשר להשתמש בסלעים סינטטיים בעלי גודל גרגר אחיד ודרגת צמנטציה נמוכה. כמו כן יש להמשיך לדחוס את סלעי המחקר בהם השתמשנו בעבודה זו עד להגעה למאמץ הקריטי (אצל ה-Berea sandstone נמצא בלחצים של כ-380 MPa).

בכדי לזרז ולשפר את תהליך מדידת הפרמטרים המיקרוטקסטורלים מומלץ להשתמש במערכת משולבת הכוללת מצלמה המורכבת על מיקרוסקופ ומחוברת ישירות לתוכנת עיבוד תמונה במחשב, דוגמת מצלמות Leica למיקרוסקופים. מערכות אלה מכויילות בהתאם לרזולוציית המיקרוסקופ ויחד עם תוכנת עיבוד התמונה המתאימה מאפשרות מדידה ישירה של הפרמטרים המיקרוטקסטורלים וללא הגדרה חוזרת של הקורדינטות.

פרק 6 – סיכום ומסקנות

במחקר זה בחנו את השפעת אורך ורציפות המגעים בין הגרגרים על התכונות המכניות של סלעים סדימנטריים. לצורך כך נדחסו דוגמאות אבן חול וגיר (Berea sandstone ו-Indiana limestone) בלחץ הידרוסטטי של 20 MPa ו-40 MPa ונבחנו השינויים בנקבוביות, בחוזק הלחיצה החד-צירי, במקדם האלסטיות, במהירויות גלי P ו-S ובמיקרוטקסטורה.

הלחצים ההידרוסטטיים שהופעלו על הדוגמאות נמצאים בקצה התחתון של עקומת המאמץ-מעוות נפחי – בשלב ה-Fissure closure, וגרמו למעוותים קטנים בלתי הפיכים בדוגמאות. מבדיקות של מהירויות גלי P ו-S לא נמצאו שינויים משמעותיים או מגמה ברורה בעקבות עליית הלחץ ההידרוסטטי. עם זאת בשני סוגי הסלעים נמצאה מגמה ברורה של עליה בצפיפות המדגמים וירידה בנקבוביות עם העליה ב- σ_{hyd} . כמו כן מבחני לחיצה חד-צירית הראו מגמה ברורה של עליה בחוזק החד-צירי (σ_c) ובמקדם האלסטיות (E) עם העליה בלחץ ההידרוסטטי.

האנליזות המיקרוטקסטורליות כללו מדידות של (עבור כל גרגר): מספר גרגרים שכנים (n), מספר מגעים (N), אורך מגעים (L), קוטר (D), היקף (P) ושטח חתך הגרגר (S), בחינת היחסים ביניהם וניתוח סטטיסטי שלהם ושל יחסיהם. מהאנליזות המיקרוטקסטורליות נמצא כי ה-Indiana limestone בעלת שונות ראשונית בגודל הגרגר. עם זאת בשני סוגי הסלעים נמצאה עלייה באורך המגעים כתוצאה מעליית הלחץ ההידרוסטטי. על ידי הצבת אורך המגעים (L) ביחס לצפיפותם (מיוצגת על ידי n, ו-N) ונרמולם לפרמטרים השונים של גודל הגרגר (S ו-P, D) ניסחנו מספר פרמטרים של מגע. עבור ה-Berea sandstone נמצא כי פרמטרי המגע עולים באופן עיקבי עם העליה בלחץ הכליאה. לעומת זאת, עבור ה-Indiana limestone לא נמצאה מגמה כלשהי של פרמטרי המגע, ככל הנראה בשל השונות הראשונית, ויש לבחון זאת עבור מאמצי כליאה גדולים יותר. בבדיקת היחס בין פרמטרי המגע $L/D_m, L/P, (L/N_1)/D_m, (L/N_1)/P$ ו- $L/(N_1/n)/P$ לנקבוביות, לחוזק הלחיצה החד-צירי ולמקדם האלסטיות התקבלו קורלציות טובות עד טובות מאוד עבור ה-Berea sandstone. הקורלציות מראות עליה בערכים של פרמטרי המגע עם העליה בחוזק החד-צירי ובמקדם האלסטיות, וירידה עם העליה בנקבוביות.

קורלציות טובות במיוחד התקבלו עבור הפרמטר $(L/N_1)/P$. עם זאת, בחיפוש אחר פרמטר המגע האמין ביותר יש להמשיך לבצע מבחני דחיסה נוספים בלחצים גדולים יותר ועל מגוון גדול יותר של סלעים. לפיכך לא ניתן לשלול את פרמטרי המגע האחרים.

נמצא שהגדלת לחץ הכליאה משפיעה ישירות על אורך ורציפות המגעים בין גרגרים בסלעים גרנולריים. במחקר זה הודגם, בהתאם להנחת העבודה, שהעלאת אורך ורציפות המגעים בין גרגרים תורמת לעליה בחוזק וקשיחות הסלע.

- Alber M. and Brardt A., 2003. Technical Note: Factors influencing fracture toughness K_{IC} from simple screening tests. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 40 (5), 779-784.
- Annual book of ASTM standards, 1994. *ASTM*. Vol. 04.08, Soil and Rock (I), D420 – D4914.
- Ashby M.F. and Hallam S.D., 1986. The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states. *Acta. Metall.* 34, 497-510.
- Atkinson B.K., 1991. Fracture mechanics of rock. *Academic Press, Harcourt Brace Jovanovich, London*. 534.
- Bruhn R.W., 1972. A study of the effects of pore pressure on the strength and deformability of Berea sandstone in triaxial compression, 3rd interim report. *U.S. Army Corps of Engrs, Mo. River Div. Lab.* 64/493 Omaha.
- Bieniawski Z.T., 1967. Mechanism of brittle fracture of rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 4, 395-430.
- Brace W.F., 1961. Dependence of fracture strength of rocks on grain size. *Proceeding of the 4th Symposium Rock Mechanics, University Park, USA*. 99-103.
- Burgi C., Parriaux A. & Franciosi G., 2001. Geological characterization of weak cataclastic fault rocks with regards to the assessment of their geomechanical properties. *Quarterly J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 34, 225-232.
- Calembert T., Popescu C., Popescu M. and Schroeder C., 1980. Relationships between the petrographic and mineralogical properties of soils and rocks and their mechanical properties. *Bull. Int. Ass. Eng. Geol.* 22, 167-172.
- Carmichael R.S., 1989. Practical handbook of physical properties of rock and minerals. *CRC Press Inc., Boston*.
- David C., Menendez B. and Bernabe Y., 1998. The mechanical behaviour of synthetic sandstone with varying brittle cement. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 35 (6), 759-770.
- Digby P.J., 1981. The effective elastic moduli of porous granular rocks. *J. Appl. Mech.* 48, 803-808.
- Dodd J.R. and Nelson C.S., 1998. Diagenetic comparisons between non-tropical Cenozoic limestones of New Zealand and tropical Mississippian limestones from Indiana, USA: Is the non-tropical model better than the tropical model?. *Sediment. Geol.* 121, 1-21.

- Dunn D.E., LaFountain L.J. and Jackson R.E., 1973. Porosity dependence and mechanism of brittle fracture in sandstone. *J. Geophys. Res.* 78, 2403-2417.
- Durrast H. and Siegesmund S., 1999. Correlation between rock fabrics and physical properties of carbonate reservoir rocks. *Int. J. Earth Sci.* 88 (3), 392-408.
- Eberhardt E., Stimpson B. and Stead D., 1999. Effects of grain size on the initiation and propagation thresholds of stress-induced brittle fractures. *Rock Mech. Rock Eng.* 32 (2), 81-99.
- Ehrlich R. and Weinberg B., 1970. An exact method for characterization of grain shape. *J. Sedimentary Petrology.* 40 (1), 205-212.
- Ersoy A. And Waller M.D., 1995. Textural characterization of rocks. *Eng. Geol.* 39, 123-136.
- Fredrich J.T., Evans B. and Wong T., 1990. Effect of grain size on brittle and semibrittle strength: Implications for micromechanical modeling of failure in compression. *J. Geophys. Res.* 95 (B7), 10907-10920.
- Gandhi C. and Ashby M.F., 1979. Overview no. 5: Fracture-mechanism maps for materials which cleave: F.C.C., B.C.C. and H.C.P. metals and ceramics. *Acta Metall.* 27, 1565-1602.
- Goodman R.E., 1989. Introduction to rock mechanics, 2nd. *John Wiley & Sons., N.Y.*
- Griffith A.A., 1921. The phenomena of Rupture and flow in solids. *Philos. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A*, 221, 163-197.
- Gupta A.S. and Seshagiri Rao K., 2000. Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial compression state. *Eng. Geol.* 56, 257-274.
- Haimson B. and Kovacich J., 2003. Borehole instability in high-porosity Berea sandstone and factors affecting dimensions and shape of fracture-like breakouts. *Eng. Geol.* 69, 219-231.
- Handin J. and Hager R.V., 1957. Experimental deformation of sedimentary rocks under confining pressure: Test at room temperature on dry samples. *Amer. Ass. Petrol. Geol. Bull.* 41, 1-50.

- Hard D.J. and Wang H.F., 1995. Laboratory measurements of complete set of poroelastic moduli for Berea sandstone and Indiana limestone. *J. Geophys. Res.* 100 (9), 17741-17751.
- Hatzor Y.H. and Palchik V., 1997. The influence of grain size and porosity on crack initiation stress and critical flow length in dolomites. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 34 (5), 805-816.
- Hatzor Y.H. and Palchik V., 1998. A microstructure-based failure criterion for Aminadav dolomites. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 35 (6), 797-805.
- Hatzor Y.H., Zur A. and Mimran Y., 1997. Microstructure effects on microcracking and brittle failure of dolomites. *Tectonophysics.* 281, 141-161.
- Herdan G. and Smith M.L., 1953. Small particle statistic. *Elsevier Publishing Company, Houston.*
- Hart D.J. and Wang H.F., 1995. Laboratory measurement of a complete set of poroelastic moduli for Berea sandstone and Indiana limestone. *J. Geophys. Res.* 100 (B9), 17741-17751.
- Hawkes I. and Mellor M., 1970. Uniaxial testing in rock mechanics laboratories. *Eng. Geol.* 4, 177-285.
- He W., Hajash A. and Sparks D., 2002. A model for porosity evolution during creep compaction of sandstones. *Earth Planet. Sci. Lett.* 197, 237-244.
- Howarth D.F. and Rowlands J.C., 1986. Development of an index to quantify rock texture for qualitative assessment of intact rock properties. *Geotech. Testing J.* 9, (4), 169-179.
- Howarth D.F. and Rowlands J.C., 1987. Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties. *Rock Mech. Rock Eng.* 20, 57-85.
- Hugman R.H.H. and Friedman M., 1979. Effects of texture and composition on mechanical behavior of experimentally deformed carbonate rocks. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 63, (9), 1478-1489.
- Irwin G.R., 1960. Fracture mechanics. Structural mechanics, (Goodier and Hoff, Eds.). *Pergamon Press.* 557-592.
- Katz O., Reches Z. and Roegiers J.-C., 2000. Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 37, 723-728.

- Leite M.H. and Ferland F., 2001. Determination of unconfined compressive strength and Young's modulus of porous materials by indentation tests. *Eng. Geol.* 59, 267-280.
- Leroueil S. and Vaughan P.R., 1990. The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. *Geotech.* 40, 467-488.
- Lloyd G.E., 2000. Grain boundary contact effects during faulting of quartzite: An SEM/EBSD analysis. *J. Struct. Geol.* 22, 1675-1693.
- Love A.E.H., 1927. A treatise on the mathematical theory of elasticity, 4nd. *Dover Publications, N.Y.*
- Lomov I.N., Hiltl M., Vorobiev O.YU. and Glenn L.A., 2001. Dynamic behavior of Berea sandstone for dry and water-saturated conditions. *Int. J. Impact Eng.* 26, 465-474.
- Menendez B., Zhu W. and Wong T., 1996. Micromechanics of brittle and cataclastic flow in Berea sandstone. *J. Struct. Geol.* 18 (1), 1-16.
- Naser A.A.-S., 2004. Effects of testing methods and conditions on the elastic properties of limestone rock. *Eng. Geol.* 74, 139-156.
- Olsson W.A., 1974. Grain size dependence of yield stress in marble. *J. Geophys. Res.* 79, 4859-4862.
- Onodera T.F. and Asoka Kumara H.M., 1980. Relation between texture and mechanical properties of crystalline rocks. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* 22, 173-177.
- Palchik V., 1999. Influence of porosity and elastic modulus on uniaxial compressive strength in soft brittle porous sandstones. *Rock Mech. Rock Eng.* 32 (4), 303-309.
- Palchik V. and Hatzor Y.H., 2000. Correlation between mechanical strength and microstructural parameters of dolomites and limestones in the Judea Group-Israel. *Isr. J. Earth Sci.* 49, 65-79.
- Palchik V. and Hatzor Y.H., 2002. Crack damage stress as a composite function of porosity and elastic matrix stiffness in dolomites and limestone. *Eng. Geol.* 63, 233-245.
- Paterson, M.S., 1958. Experimental deformation and faulting in Wombeyan marble. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 69, 465-476.
- Petch N.J., 1953. The cleavage strength of polycrystals. *J. Iron Steel Inst.* 174, 25-28.
- Prikryl R., 2001. Some microstructural aspects of strength variation in rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 38, 671-682.

- Saidi F., Bernabe Y. and Reuschle T., 2003. The mechanical behaviour of synthetic, poorly consolidated granular rock under uniaxial compression. *Tectonophys.* 370, 105-120.
- Sayers C.M., 2001. Stress-dependent elastic anisotropy of sandstone. *Geophys. Pros.* 50, 85-95.
- Scott T.E. and Nielsen K.C., 1991. The effects of porosity on the brittle-ductile transition in sandstones. *J. Geophys. Res.* 96 (B1), 405-414.
- Timoshenko S. and Goodier J.N., 1970. Theory of elasticity, 3rd. *McGraw-Hill., N.Y.*
- Tugrul A. and Zarif I.H., 1999. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Eng. Geol.* 51, 303-317.
- Van Heerden W.L., 1987. General relations between static and dynamic moduli of rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 4 (6), 381-385.
- Van de Steen B., Vervoort A. and Sahin K., 2002. Influence of internal Structure of crinoidal limestone on fracture paths. *Eng. Geol.* 67, 109-125.
- Vanorio T., Prasad M., Patella D. and Nur A., 2002. Ultrasonic velocity measurement in volcanic rocks: correlation with microtexture. *Geophys. J. Int.* 149, 22-36.
- Wang C.T., 1953. Applied elasticity. *McGraw-Hill., New York, N.Y.*
- Watanabe T. and Tsurekawa S., 1999. The control of brittleness and development of desirable mechanical properties in polycrystalline systems by grain boundary engineering. *Acta Mater.* 47, 4171-4185.
- Wawersik W.R. and Fairhurst C., 1970. A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 7, 561-575.
- Williams H., Turner F.J. and Gilbert C.M., 1982. Petrography: An introduction to the study of rock in thin sections. *W.H. Freeman and Company, San Francisco, Calif.*
- Winkler K., 1983. Frequency-dependent ultrasonic properties of high-porosity sandstone. *J. Geophys. Res.* 88, 9493-9499.
- Wong R.H.C., Chau K.T. and Wang P., 1996. Microcracking and grain size effect in Yuen Long marbles. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 33 (5), 479-485.
- Zang A. and Wong T.-F., 1995. Elastic stiffness and stress concentration in cemented granular material. *Int. J. Rock Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 32, 563-574.
- Zhang J., Wong T.-F. and Davis D.M., 1990. Micromechanics of pressure-induced grain crushing in porous rocks. *J. Geophys. Res.* 95, 341-352.

Ben-Gurion University of the Negev
Faculty of Natural Science
Department of Geological and Environmental Sciences

**The influence of grain contact geometry on the
mechanical behavior of sedimentary rocks.**

Research Thesis
Submitted for M.Sc. Degree in the faculty of Natural Sciences

by
Shlomy Manor

This thesis was prepared under the supervision of
Prof. Yossef Hodara Hatzor
and
Dr. Vyacheslav Palchik

March 2005

The influence of grain contact geometry on the mechanical behavior of sedimentary rocks.

Research Thesis Submitted for M.Sc. Degree in the faculty of Natural Sciences

By: Shlomy Manor

Name of supervisors: Prof. Yossef Hodara Hatzor.

Dr. Vyacheslav Palchik.

Department of Geological and Environmental Sciences.

Faculty of Natural Sciences.

Ben-Gurion University of the Negev.

Signature of the author : _____ Date : _____

Signature of the supervisor : _____ Date : _____

Signature of the supervisor : _____ Date : _____

Signature of the department committee chairman : _____ Date : _____

Abstract

Recent studies in rock mechanics suggest that grain contact geometry has a very strong influence on the mechanical behavior of porous rocks. In this research we studied the influence of contact length and its continuity on the mechanical properties of sedimentary rocks. We applied initial hydrostatic pressure of 20 and 40 MPa on samples of Berea sandstone and Indiana limestone and examined the change in porosity (ϕ), uniaxial compressive strength (σ_c), elastic modulus (E), elastic wave velocities (V_p , V_s), and micro-structural parameters.

Microstructural analysis was performed using photos of thin sections which were analyzed using geographic information system (GIS). GIS based microstructural analyses were performed on more than 640 grains. The following parameters were studied: grain diameter (D), grain perimeter (P), grain area (S), inter-granular contact length (L), number of contacts per grain (N), and number of neighboring grains (n). Microstructural analysis showed that while the Berea sandstone samples exhibited high homogeneity in grain size, the Indiana limestone samples exhibited some degree of initial heterogeneity.

After application of hydrostatic compression the loaded specimens exhibited a small amount of permanent deformation which may be related to the fissure closure stage of volumetric deformation. An expected tendency of increasing density (ρ) and decreasing porosity (ϕ) with increasing initial hydrostatic pressure (σ_{hyd}) was found. Ultrasonic velocity measurements indicated very minor changes in the P and S-wave velocities under the applied compression. However, uniaxial compression tests and microstructural analyses showed that the peak axial strength, elastic modulus and the contact lengths increased with increasing hydrostatic pressure, for both rock types.

Different ratios of contact length (L), contact continuity (n and N) and grain size parameters (D_m , P and S) were examined and several grain contact parameters were formulated – L/GS , $(L/N)/GS$ and $L/(N/n)/GS$ ($GS = D_m, P, S$). Accordingly, we performed a statistical analysis of these parameters and found that for the Berea sandstone all grain contact parameter values

increased with increasing σ_{hyd} . No such changes were detected for the Indiana limestone specimens, probably due to the original microstructural inhomogeneity.

We plotted grain contact parameters vs porosity, Young's modulus and peak axial strength for the Berea sandstone, and found very good linear correlations for the parameters L/D , L/P , $(L/N)/D$, $(L/N)/P$, $L/(N/n)/D$ and $L/(N/n)/P$. It was found that the grain contact parameters increased with increasing elastic modulus and peak axial strength, and decreased with increasing porosity. Better correlations were found for ratios that included the continuity of contacts (N) and the perimeter (P). The best correlation was found for the parameter $(L/N)/P$. It is suggested that the continuity of contact (N) together with the contact length (L) play an important role in the mechanical response of granular rocks, and that grain perimeter is more significant than grain diameter or area.

Table of Contents:

Abstract.....	i-ii
Acknowledgments.....	iii
Table of contents.....	iv-vi
List of tables.....	vii
List of figures.....	vii-x
Notation.....	xi-xii
Chapter 1: INTRODUCTION.....	1
1.1. The importance of characterization of mechanical behavior.....	1
1.2. Aim of present research.....	1
1.3. Scope of present research.....	1
1.4. Premises.....	2
1.5. The challenge and difficulty of defining a microstructural criterion.....	2
Chapter 2: THEORETICAL BACKGROUND.....	4
2.1. Mechanical behavior of rocks.....	4
2.1.1. Elasticity.....	4
2.1.2. The meaning of “rock strength” and “rock failure”.....	6
2.1.3. Stress-Strain relations in deviatoric stresses.....	8
2.1.4. Hydrostatic compression.....	10
2.1.5. Dynamic measurements: ultrasonic velocity.....	11
2.2. Micromechanisms of fracture.....	12
2.2.1. Fracture controlled by pre-existing cracks.....	12
2.2.2. Fracture controlled by cracks generated by dislocation pile up.....	14
2.3. The influence of microstructure on the mechanical behavior of rocks.....	14
2.3.1. Grain size.....	15
2.3.2. Porosity.....	16
2.3.3. Cement and matrix.....	17
2.3.4. Grain shape and orientation.....	17
2.3.5. Packing density.....	18
2.3.6. Combined criteria and models.....	18

2.3.7.	Inter-granular grain contacts	21
Chater 3: INVESTIGATION METHODS.....		24
3.1.	Approach and working method.....	24
3.2.	Experimental material	26
3.3.	Dynamic measurements: ultrasonic velocity	28
3.4.	Static measurements.....	29
3.4.1.	Hydrostatic compression.....	31
3.4.2.	Uniaxial compression tests	31
3.5.	Microstructural analysis.....	32
3.5.1.	GIS working method.....	34
3.5.2.	Microstructural measurements.....	36
Chapter 4: RESULTS.....		38
4.1.	Uniaxial compression tests	38
4.1.1.	Uniaxial compression test results of Berea sandstone	38
4.1.2.	Uniaxial compression test results of Indiana limestone.....	40
4.2.	Microstructure	43
4.2.1.	Berea sandstone's microstructural analysis	43
4.2.2.	Indiana limestone's microstructural analysis.....	50
4.3.	Mechanical properties	56
4.3.1.	Dynamic measurements: ultrasonic velocity	56
4.3.1.1.	Ultrasonic velocity measurements of Berea sandstone.....	56
4.3.1.2.	Ultrasonic velocity measurements of Indiana limestone.....	56
4.3.2.	Static measurements: uniaxial compression tests	57
4.3.2.1.	Uniaxial compression of Berea sandstone.....	57
4.3.2.2.	Uniaxial compression of Indiana limestone.....	58
Chapter 5: DISCUSSION		61
5.1.	The influence of hydrostatic pressure on specimens	61
5.1.1.	The influence of hydrostatic pressure on microstructure.....	61
5.1.2.	The influence of hydrostatic pressure on mechanical behavior.....	61
5.1.2.1.	The influence of hydrostatic pressure on static properties.....	61
5.1.2.2.	The influence of hydrostatic pressure on dynamic properties.....	63

5.2. Microstructure - mechanical properties relations	63
5.3. The efficiency of GIS for microstructural analysis.....	71
5.4. Suggestions for further research	71
Chapter 6: SUMMARY AND CONCLUSIONS.....	72
REFERENCES.....	73