



אוניברסיטת בן גוריון בנגב
הפקולטה למדעי הטבע
המחלקה למדעי הגיאולוגיה והסביבה

ניסיונות חיכוך "קצב מצב" במכבש גזירה ישירה

חיבור לשם קבלת תואר "מגיסטר" בפקולטה למדעי הטבע
מאת עומר בירן

ניסיונות חיכוך "קצב מצב" במכבש גזירה ישירה

חיבור לשם קבלת תואר "מגיסטר" בפקולטה למדעי הטבע

מאת : עומר בירן

מנחים : פרופ' יוסף ח. חצור

ד"ר אלון זיו

המחלקה למדעי הגיאולוגיה והסביבה

הפקולטה למדעי הטבע

אוניברסיטת בן גוריון בנגב

תאריך _____

תאריך _____

תאריך _____

חתימת המחבר _____

אישור המנחים _____

תאריך _____

אישור יו"ר ועדה מחלקתית _____

ניסיונות חיכוך "קצב מצב" במכבש גזירה ישירה

מאת עומר בירן

עבודת גמר לתואר "מגיסטר"

המחלקה למדעי הגיאולוגיה והסביבה

אוניברסיטת בן גוריון בנגב, 2010

תקציר

החלקה של שני גופים אחד כנגד השני מושפעת, בין השאר, מכוחות החיכוך המתפתחים בכיוון מקביל לכוחות המניעים, על ממשק המגע בניהם. במדעי כדור הארץ, הבנת כוחות החיכוך והגורמים המשפיעים עליהם הכרחית הן בתחומים העוסקים בפתרון בעיות הנדסיות הקשורות לתנועה של מסות סלע והן בהבנה טובה יותר של התנועה לאורך שברים גיאולוגיים ורעידות אדמה. מקור רוב הידע הקיים על כוחות החיכוך הינו בניסויי מעבדה. לפי הגישה המסורתית מקדם החיכוך קבוע והינו היחס בין מאמץ הגזירה למאמץ הנורמאלי. מחקרים מאוחרים יותר הראו כי מקדם החיכוך אינו קבוע ותלוי בגורמים רבים כגון היסטוריית ההחלקה בין המישורים, מהירות ההחלקה, חספוס, טמפרטורה, לחות, מאמץ נורמאלי ועוד. מחקר זה מציג מספר סדרות ניסויים הבוחנות את התלות של מקדם החיכוך בגורמים השונים. סדרת ניסויים ראשונה בוחנת את התלות של מקדם החיכוך בהיסטוריית ההחלקה (זמן העצירה), מהירות ההחלקה והמאמץ הנורמאלי כפי שמתואר בתיאוריית ה-"קצב-מצב" (rate and state). סידרת ניסויים זו חוזרת על מערכי ניסוי שבצעו בעבר. החזרה על ניסויים מאמתת את יכולות מכבש הגזירה אשר נמצא בראשותנו ומראה כי סוג מכבש הגזירה אינו משפיע על תוצאות הניסויים. תוצאות סידרת ניסויים אלו תאמו תוצאות ניסויי "קצב-מצב" שבוצעו בעבר ואף תאמו לפתרון משוואות הקצב-מצב החוזות את ערכי מקדם החיכוך בהתאם לשנויי המהירות והמאמץ הנורמאלי. סידרת הניסויים השנייה בוחנת את התלות של מקדם החיכוך במהירות ההחלקה ברמות חספוס שונות באמצעות קריטריון קולומב. מתוצאות הניסויים עולה כי בנוסף לתלות הידועה של מקדם החיכוך ברמת החספוס הראשונית של המשטחים, רמת החספוס של המישורים משפיעה על אופי התלות של מקדם החיכוך במהירות ההחלקה: בממשקים מחוספסים השינוי במקדם החיכוך, כתוצאה משינויי מהירות, קטן יותר מאשר במישורים חלקים יותר. סידרת הניסויים השלישית בוחנת כיצד שינויים איטיים במאמץ הנורמאלי משפיעה על מקדם החיכוך ברמות חספוס שונות. מתוצאות ניסויים אלו עולה כי ישנה תלות של מקדם החיכוך במאמץ הנורמאלי וכי קיים הבדל משמעותי בין המשטחים שעברו ליטוש לבין משטחים מחוספסים. במשטחים המחוספסים נראו שלוש מגמות שינוי בערכי מקדם החיכוך בשלוש טווחי מאמץ נורמאלי שונים: בטווח מאמצים נורמאליים נמוכים (2.5 MPa- 5.22 MPa) ערכי מקדם החיכוך קטנו עם העלאת המאמץ הנורמאלי כאשר ב- 5.22 MPa המקדם בחיכוך הגיע לנקודת מינימום, בטווח מאמצים בינוניים (5.22-10.9 MPa) ערכי מקדם החיכוך עלו עם העלאת המאמץ ובטווח המאמצים הגבוהים (10.9-15 MPa) מקדם החיכוך לא הגיע למצב עמיד והתחזק עם ההחלקה. במשטחים החלקים, התקבלו שתי המגמות האחרונות בלבד: בטווח המאמצים הנורמאליים 2.5-10.9 MPa ערכי מקדם החיכוך עלו עם העלאת המאמץ הנורמאלי ובטווח הערכים 10.9-15 MPa מקדם החיכוך

לא הגיע למצב עמיד והתקבלה התחזקות עם התקדמות הגזירה. מממצאים אלו ניתן לשאר כי מקדם החיכוך מושפע משני מנגנונים עיקריים: האחד הינו החספוס שבא לידי ביטוי בטווח המאמצים הנמוכים, והשני הינו שינוי שטח המגע האמיתי בין הממשקים כתוצאה מכניעה פלסטית של הגבשושיות היוצרות את המגע בין המשטחים.

הבעת תודה

ברצוני להודות לכל האנשים שעזרו לי בהכנת עבודה זו :
למנחים פרופ' יוסי חצור וד"ר אלון זיו על ההנחיה המקצועית ממנה למדתי המון, היחס האישי, הסבלנות הרבה ו"מדיניות הדלת הפתוחה" שאינה דבר מובן מאילו וראוי להערכה רבה !
לד"ר שלמה ביטרמן מ"רותם תעשיות" על מדידות החספוס.
לרבקה עיני וצהלה שרעבי על התמיכה וההתמודדות בבירוקרטיה.
לדוד (דירו) קוסשווילי על העזרה הרבה בניסור וליטוש הסלעים.
לחברי הקבוצה ההנדסית בבניין 60 דגן בקון-מזור, אלייה ווינשטיין, אלחנן ליבנה וגוני על יעוץ, הרמה וניסור סלעים, ארוחות צהרים, כוסות קפה וחברה.
ולבסוף שוב המון תודה לגוני שמלבד "חברה למעבדה" היא גם חברה לחיים....

תוכן עניינים

1	מבוא
3	רקע מדעי
3	2.1 חוקי חיכוך קלאסיים
5	2.1.2 קריטריון קולומב
6	2.1.3 חוק ביירלי (Byerlee law)
7	2.2 חוקי קצב מצב (Rate and State friction law)
7	2.2.1 הקדמה
9	2.2.2 משוואות הקצב מצב ותנאי קצה
13	2.3 השפעת חספוס הממשקים על מקדם החיכוך
15	3. שיטות עבודה
15	3.1 מערכת גזירה ישירה (direct shear system)
16	3.1.1 מפרט ונתונים טכניים של מערכת הגזירה הישירה
21	3.1.2 תדירות הדגימה והשפעתה על תוצאות הניסוי
22	3.1.3 הכנת המדגם לבדיקת גזירה ישירה
24	3.1.4 כיוול ובקרת איכות של מדי התזוזה והבוכנות
27	3.1.5 תכנון וביצוע הניסויים
28	3.1.6 פלט הבדיקות ועיבוד הנתונים
30	3.2 בדיקות ואפיון רמת החספוס של הדוגמאות
32	3.3 בדיקות לחיצה חד ציריות
35	4. תוצאות
35	4.1 בדיקות מקדימות לניסויי גזירה ישירה
35	4.1.1 בדיקות לחיצה חד צירית
36	4.1.2 אפיון החספוס של משורי הגזירה
40	4.2 שחזור ניסויי קצב מצב (Rate & State) במערכת גזירה ישירה על מישור בודד
41	4.2.1 עזירות קצבות - Slide-Hold-Slide (SHS)
45	4.2.2 שינויי מהירות תוך כדי החלקה (Velocity stepping)
49	4.2.3 שינוי מיידי במאמץ הנורמאלי במהלך החלקה
52	4.2.4 חישוב קשיחות מכבש הגזירה
53	4.3 השפעת החספוס על מקדם החיכוך במצב עמיד במהירויות החלקה שונות
58	4.4 שינויים במקדם החיכוך במצב עמיד כתוצאה משינויים במאמץ הנורמאלי
59	4.4.1 ניסויי פריקה והעמסה על משטחי SC
65	4.4.2 ניסויי פריקה על משטחים מלוטשים
69	5. דיון
69	5.1 תלות מקדם החיכוך במהירות ההחלקה דרך קריטריון קולומב
71	5.2 שינויים במקדם החיכוך כתוצאה משינוי במאמץ הנורמאלי
75	6. סיכום ומסקנות

77.....	נספח א : ערכי הכיול וסימון של המדידים השונים במערכת הגזירה הישירה.
87.....	נספח ב: ממשק הבקרה ושימוש במכשיר הגזירה הישירה.
93.....	מקורות ספרותיים

רשימת תרשימים

3.....	תרשים 1. איורו המקורי של לאונרדו דה וינצ'י המדגים את תצפיותיו.
4.....	תרשים 2. גוף בעל שטח A ומסה m וכוח החיכוך הפועל עליו.
4.....	תרשים 3. כוח החיכוך כתלות בכוח המניע.
5.....	תרשים 4. אפיון הקוהזיה וזווית החיכוך מניסויי גזירה ישירה.
6.....	תרשים 5. חוק ביירלי.
8.....	תרשים 6. ניסויים הבוחנים את התלות של מקדם החיכוך הסטטי בזמן העצירה.
9.....	תרשים 7. השפעת מהירות ההחלקה על מקדם החיכוך.
10.....	תרשים 8. תרשים סכמאטי המדגים את השינוי במקדם החיכוך כתוצאה מעליה במהירות ההחלקה.
12.....	תרשים 9. הדגמה לסוגי התלות של מקדם החיכוך במהירות ההחלקה.
13.....	תרשים 10. אופן חישוב הקבועים האמפרים מתוצאות הניסויים.
13.....	תרשים 11. השפעת שינוי המסור בזווית I על חוזק הגזירה.
14.....	תרשים 12. חוזק גזירה עבור משטח מחוספס בזווית חספוס i.
12.....	תרשים 13. סוגי מערכות לבדיקת גזירה בסלעים.
16.....	תרשים 14. מבט כללי על מערכת גזירה ישירה במעבדה למכאניקת סלע באוניברסיטת בן גוריון.
16.....	תרשים 15. שרטוט סכמאטי של מערכת הגזירה הישירה.
17.....	תרשים 16. התמקדות על בוכנת הגזירה.
18.....	תרשים 17. מיקום מדי התזוזה האופקיים והאנכיים על קופסת הגזירה.
19.....	תרשים 18. הדגמת כיול מדיד העומס הנורמאלי.
20.....	תרשים 19. עיקרון מערכת בקרת סרוו.
21.....	תרשים 20. מקדם החיכוך כנגד תזוזה אופקית בשתי סוגי בקרה.
22.....	תרשים 21. מיקום מחצבת הגרניט בבקעת תימנע.
23.....	תרשים 22. דוגמאות הסלע מקובעות למסגרת הפלדה.
25.....	תרשים 23. בדיקה סטטית של מדי התזוזה האופקיים.
26.....	תרשים 24. בדיקת תנאי הניסוי במקטע בודד בניסוי vsonf4.
26.....	תרשים 25. מהירות החלקה מוכתבת כנגד מהירות החלקה בפועל.
27.....	תרשים 26. תזוזות מדי התנועה האופקיים לאורך ניסוי בודד.
28.....	תרשים 27. הגזירה הראשונית שבוצעה לפני כל ניסוי.
30.....	תרשים 28. דוגמה לבעייתיות בקביעת מצב עמיד.
30.....	תרשים 29. אופן בדיקת מצב עמיד של מאמץ הגזירה.
31.....	תרשים 30. בדיקה אופיינית לבדיקות חספוס באמצעות Zygo NewView 5000.
32.....	תרשים 31. פרמטרים הסטטיסטים לאפיון רמת החספוס.

33.....	תרשים 32. מכבש לחיצה טריאקסיאלי.
34.....	תרשים 33. תוצאות אופייניות לבדיקת חוזק לחיצה חד צירי.
35.....	תרשים 34. תוצאות בדיקה חד צירית גרניט תמנע.
38.....	תרשים 35. מאפייני החספוס של הדוגמאות המייצגות.
39.....	תרשים 36. השוואה בין מאפייני החספוס לפני ואחרי גזירה.
40.....	תרשים 37. השוואה בין ניסוי גזירה עם חומר בין הממשקים וללא חומר בין הממשקים.
41.....	תרשים 38. מערכת גזירה ישירה על מישור בודד ומישור כפול.
42.....	תרשים 39. תוצאות אופייניות של ניסוי עצירות קצובות.
42.....	תרשים 40. התמקדות על מקטע בו ישנה עצירה וחידוש ההחלקה.
41.....	תרשים 41. הפרש בין מקדם החיכוך הסטטי לבין מקדם החיכוך במצב עמיד כתלות בזמן העצירה.
44.....	תרשים 42. ניסוי עצירות קצובות במהירויות החלקה שונות.
46.....	תרשים 43. תוצאות אופייניות של ניסוי שינוי מהירות במהלך ההחלקה.
47.....	תרשים 44. התגובה המיידית כתוצאה מעלייה במהירות ההחלקה פי 2.
47.....	תרשים 45. מציאת קבועי "קצב מצב" באופן גראפי מניסוי שינוי מהירות.
48.....	תרשים 46. ניסוי שינוי מהירות ופתרון משוואות הקצב מצב.
50.....	תרשים 47. תוצאות אופייניות של ניסוי בו שונה המאמץ הנורמאלי במהלך ההחלקה.
50.....	תרשים 48. המעבר בין המעוות הליניארי למעוות הפלסטי כתוצאה משינוי במאמץ נורמאלי.
51.....	תרשים 49. מציאת הקבוע α מניסוי בו שונה במאמץ הנורמאלי.
50.....	תרשים 50. חיזוי השינוי של ערכי מקדם החיכוך כתוצאה משינוי במאמץ הנורמאלי באמצעות פתרון משוואות הקצב מצב.
52.....	תרשים 51. חישוב קשיחות הגזירה בניסוי עצירות קצובות.
53.....	תרשים 52. מאמץ הגזירה כנגד תזוזת גזירה על ממשקים מחוספסים תחת מאמצים נורמאליים שונים.
54.....	תרשים 53. קריטריון קולומב עבור מצב עמיד במספר מהירויות ובשתי רמות חספוס.
56.....	תרשים 54. מקדם החיכוך במצב עמיד כנגד מהירות ההחלקה עבור שתי רמות חספוס.
57.....	תרשים 55. קריטריון הכשל של קולומב עבור משטחים חלקים במהירויות החלקה שונות.
56.....	תרשים 56. מקדם החיכוך והמאמץ הנורמאלי בשינויים איטיים במאמץ הנורמאלי על משטחי SC.
62.....	תרשים 57. מקדם החיכוך במצב עמיד כתלות במאמץ הנורמאלי במשטחים מחוספסים.
63.....	תרשים 58. מקדם החיכוך במצב עמיד כתלות במאמץ הנורמאלי במשטחים מחוספסים בניסויי פריקה והעמסה.
63.....	תרשים 59. מאמץ גזירה כנגד תזוזת החלקה בניסוי הפריקה על משטח מחוספס המוצג בתרשים 56א.
64.....	תרשים 60. מאמץ גזירה כנגד תזוזת החלקה בניסוי העמסה על משטח בחספוס SC המוצג בתרשים 56ב.
65.....	תרשים 61. מקדם החיכוך ומאמץ הנורמאלי כנגד תזוזת הגזירה בניסויי פריקה על משטח מלוטש.
66.....	

תרשים 62. מאמץ גזירה כנגד תזוזת החלקה בניסוי הפריקה על משטח בחספוס #180 המוצג	
בתרשים 61.....	67
תרשים 63. מקדם החיכוך כפונקציה של מאמץ הנורמאלי במשטחים חלקים.....	67
תרשים 64. קריטריון קולומב עבור ניסויי גזירה ברמות חספוס שונות במהירות $1 \mu\text{m/S}$	68
תרשים 65. מקדם החיכוך במצב עמיד (כפי שהתקבל מקריטריון קולומב) כתלות ברמת החספוס.....	68
תרשים 66. קריטריון הכשל של Barton עבור מקדמי חספוס שונים, בטווח מאמצים נורמאליים של 2.5-15 MPa.....	72
תרשים 67. תרשים סכמאטי המדגים את מצב הגבשושיות במאמצים הנורמאליים השונים.....	74
תרשים 68. מיקום המדידים על קופסאות הגזירה.....	89
תרשים 69. הכנת מעגלי השליטה למכשיר הגזירה.....	90
תרשים 70. הכנסת הפרמטרים של הדוגמה לתוכנת TTshear.....	91
תרשים 71. חלון תכנון המקטעים בתוכנת TTshear.....	92

רשימת טבלאות

טבלה 1. פרוט הנתונים המחושבים והנמדדים הנמצאים בפלט הנתונים.....	29
טבלה 2. ערכים אלסטיים מבדיקות חד ציריות (TM-1,2,3).....	36
טבלה 3. אפיון החספוס של הדוגמאות המייצגות.....	37
טבלה 4. נתוני אפיון החספוס של הדוגמאות אשר נגזרו.....	37
טבלה 5. סיכום מהלך ותוצאות של ניסויי עצירות קצובות.....	43
טבלה 6. ערכי קבוע הריפוי (B) מניסויים קודמים.....	43
טבלה 7. נתוני קבועי קצב מצב כפי שחושבו מניסויי שינוי במהירות.....	47
טבלה 8. ערכי מקדם החיכוך שהתקבלו מקריטריון קולומב במהירויות ורמות חספוס שונות.....	55
טבלה 9. פירוט המאמצים הנורמאליים ומהלך של ניסויי "שינוי הדרגתי במאמץ הנורמאלי תוך כדי החלקה.....	59
טבלה 10. מקדמי החיכוך המקסימאליים והמינימאליים במשטחים שעברו ליטוש.....	66
טבלה 11. ערכי מקדם החיכוך וקבועי הקורלציה אשר התקבלו באמצעות קריטריון קולומב.....	68

1. מבוא

החלקה של שני גופים אחד כנגד השני מושפעת מכוחות החיכוך המתפתחים בכיוון מקביל לכוחות המניעים, על ממשק המגע בניהם. הבנת כוחות החיכוך והגורמים המשפיעים עליהם הכרחית בשני תחומים עיקריים העוסקים במדעי כדור הארץ – גיאופיזיקה וגיאולוגיה הנדסית (גיאוטכניקה). בתחום הגיאולוגיה ההנדסית, בעיות בהן מקדם החיכוך הינו משתנה משמעותי עוסקות בהיתכנות כשל של מבנים תחת עומס נתון לדוגמה יציבות מדרונות, יציבות בלוקים במנהרות או במחשופי סלע, תימוך, ביסוס מבנים והתנהגות מסת סלע כתוצאה מרעידות אדמה. בתחום מחקר זה ישנו ניסיון להבין ולאפיין, בין היתר, את ערכי מקדם החיכוך הסטטיים של סוגי סלע שונים, אפיון מקדם החיכוך של מישורי חולשה במסת סלע גדולה, מדידה של מקדם החיכוך השיורי (residual) לאחר שהתרחשה גזירה, השפעת החספוס על מקדם החיכוך ועוד. בתחום הגיאופיזיקה, הבנת כוח החיכוך הינה הכרחית במחקר המנגנון והמכאניקה של רעידות אדמה. בניגוד למחשבה האינטואיטיבית שרעידות אדמה הן תוצאה ישירה של שבירה (fracture) פריכה של השכבות העליונות של כדור הארץ, רוב רעידות האדמה הינן תוצאה של החלקה פתאומית לאורך מישורי אי רציפות קיימים (שברים - faults). ב-1966 הראו Brace and Byerlee (Byerlee & Brace, 1966) שרעידות אדמה הן תוצאה של החלקה לא יציבה מסוג "הדבק החלק" (stick-slip) המתרחשת על מישורי אי רציפות אלו. רעידות האדמה הינן החלק הסיסמי של ה-"החלק" (slip) והתקופות הא-סיסמיות, בין רעידות האדמה, הינן החלק של ה-"הדבק" (stick). הבנה זו, הובילה לכך שכוחות החיכוך המתפתחים על מישור אי הרציפות הינם גורם משמעותי בהבנה של רעידות האדמה.

הבנה טובה יותר של התנאים המשפיעים על מקדם החיכוך כמו טמפרטורה, לחות, חספוס, מהירות והיסטורית החלקה, יכולה להסביר תופעות רבות הקשורות הן במעגל הסיסמי ורעידות אדמה והן בבעיות הנדסיות שונות. במחקר זה ישנו ניסיון לשלב בין שני התחומים ולהקנות לכל תחום ידע מהתחום השני. בתחום הגיאופיזיקה, תיאורית ה"קצב-מצב" (Rate and State) בה מקדם החיכוך תלוי במהירות ההחלקה ופרמטר המצב, ידועה ונפוצה בשימוש כבר מסוף שנות ה-70. מאידך, השימוש בתיאוריה זו בתחומי מכאניקת הסלע אינו נפוץ. לעומת זאת, במכאניקת הסלע השפעת החספוס על חוזק הממשק נחקרה רבות בעבר אך השימוש בה אינו נפוץ בשימושים גיאופיזיים.

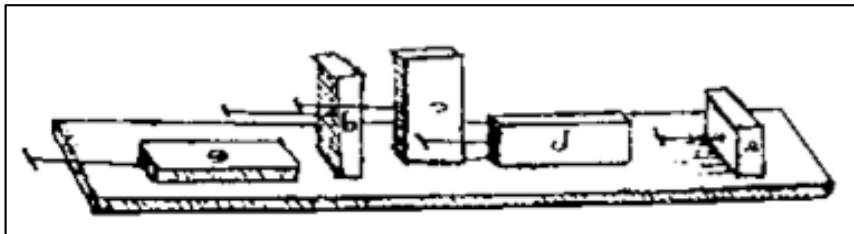
מקור רוב הידע על תכונות מכאניות של סלעים, בשני התחומים המוזכרים, וככלל זה מקדם החיכוך, הינו בניסויי מעבדה שונים המתבצעים על דוגמאות סלע מייצגות. בניסויים אלו ישנו ניסיון לאפיין את הסלע מבחינה מכאנית וכן לראות כיצד הפרמטרים המכאניים מושפעים מהגורמים השונים. אפיון תכונות

מכאניות של דוגמת סלע במעבדה, והשלכתם לתכונות סלע בלתי מופר בתנאים טבעיים כמו בשברים גיאולוגיים או במסות סלע גדולות הינו בעייתי שכן בדיקה במעבדה מפשטת את מורכבות התנאים השוררים בטבע. למרות בעיות זו רוב הידע על תכונות מכאניות של סלעים מבוסס על בדיקות מעבדה ומהווה בסיס לקביעה של תכונות הסלע גם בסקאלות גדולות.

2. רקע מדעי

2.1. חוקי חיכוך קלאסיים

המחקר וההתעניינות בכוח החיכוך העסיק את האדם לאורך כל ההיסטוריה. ישנן עדויות כי כבר ב-3000 שנה לפני הספירה הקדמונים היו ערים לחשיבות כוחות אלו ובעת בניית הפירמידות, בהובלת סלעים גדולים, מרחו גבס במטרה להקטין את הכוח הנדרש להזיזם ובעצם להקטין את מקדם החיכוך בין הסלעים לבין המישור עליו הם נגררים. המחקר הסיסטמאטי המתועד ראשון שעסק בחיכוך נערך על ידי ליאונרדו דה וינצ'י (Leonardo Da Vinci) (1452-1519). לפי התיעוד, במחקרים אלו נערכו ניסויים המודדים את כוח חיכוך במטרה לפתור בעיות הנדסיות מכאניות. תרשים 1 מציג איור מתוך מחקרו של ליאונרדו דה וינצ'י המדגים ניסיונות הבוחנים את כוח החיכוך. בניסויים אלו נבחן הכוח הנדרש להזיז גופים בעלי מסה זהה ושטח פנים שונה (עם המישור עליו הם מחליקים). התצפית המפתיעה של ליאונרדו דה וינצ'י היא שהכוח הנדרש להזיז את הבלוקים שווה כלומר הוא תלוי בכוח האנכי שהגוף מפעיל (כוח נורמאלי) ולא בשטח הפנים. ליאונרדו דה וינצ'י העריך כי עבור משטחים חלקים ההתנגדות להחלקה כתוצאה מהחיכוך שווה לרבע ממשקלו. כמובן שהנחה זו אינה נכונה אבל הערך של $\mu = 0.25$ הינו ריאלי לחומרים רבים. ב-1699 נוסחו חוקי החיכוך בצורה מפורשת על ידי אמונטון (Guillaume Amontons) (1663-1705).



תרשים 1. איורו המקורי של ליאונרדו דה וינצ'י המדגים את תצפיתו. כוח החיכוך פרופורציונאלי לכוח הנורמאלי ולא לשטח המגע.

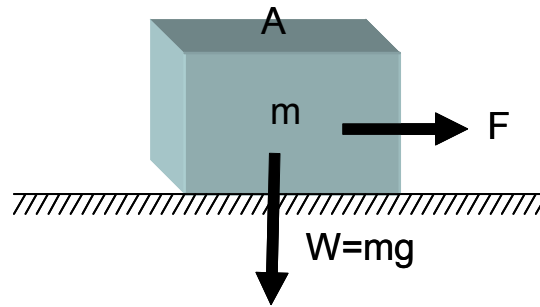
על פי חוקים אלו כאשר מחליקים גוף בעל שטח A המפעיל כוח ניצב W על המישור עליו הוא מחליק (תרשים 2) הכוח המשיקי F, הנדרש להניע את הבלוק פרופורציונאלי לכוח הניצב W במקדם פרופורציה μ באופן הבא:

$$F = \mu W \quad .1$$

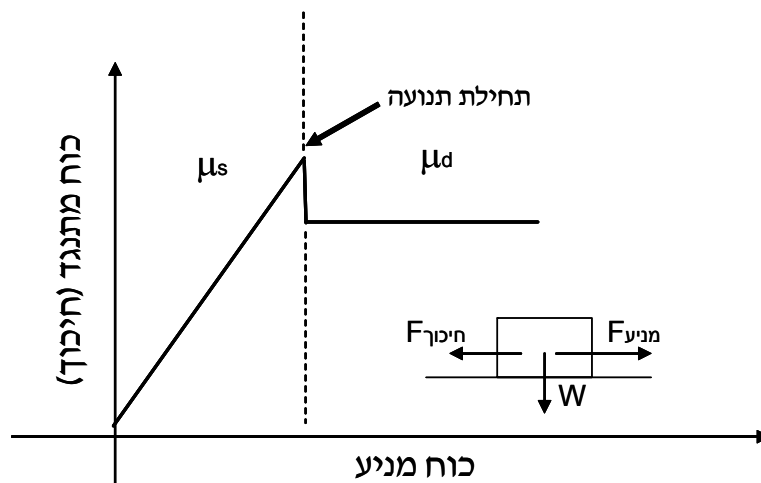
כאשר קבוע הפרופורציה (μ) הוא מקדם החיכוך התלוי בתכונות החומר ובחשפוס שלו. על פי חוק זה, מקדם החיכוך אינו תלוי בשטח הפנים (שטח A באיור 2). כאשר מחלקים את משוואה (1) בשטח A מתקבל החוק במונחים של מאמצים:

$$\tau = \mu \sigma \quad .2$$

כאשר τ ו σ_n הם מאמץ הגזירה והנורמאלי, בהתאמה.



תרשים 2. גוף בעל שטח A ומסה m. על הגוף פועל כוח ניצב W. בכדי להזיז את הגוף מושקע כוח F המקביל לפני השטח. כ- 100 שנה מאוחר יותר, הפיזיקאי הצרפתי צ'ארלס אוגוסטין קולומב (Charles Augustin Coulomb) הגיע להבחנה כי קיים הבדל בין מקדם החיכוך הסטטי (μ_s) ובין מקדם החיכוך הדינאמי (μ_d) וכן שהראשון גבוה מהשני (Coulomb, 1776). כאשר הגוף אינו בתנועה כוח החיכוך הינו כוח החיכוך הסטטי והוא שווה לכוח שמנסה להניע את הגוף. כאשר מתרחשת תנועה, כוח החיכוך קבוע ואינו תלוי בגודל הכוח המניע. כוח חיכוך זה נמוך יותר מכוח החיכוך המרבי המתקבל רגע לפני שמתרחשת החלקה (תרשים 3).



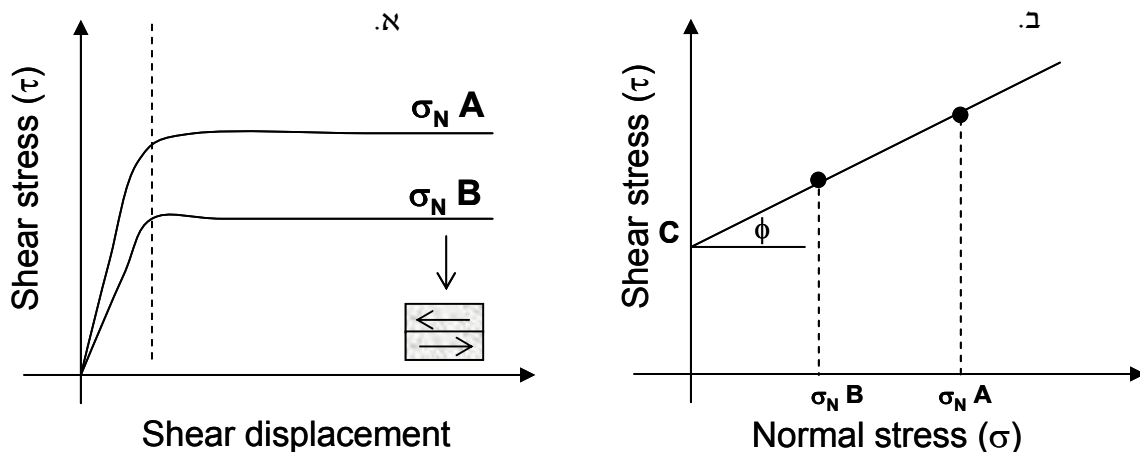
תרשים 3. כוח החיכוך כתלות בכוח המניע.

2.1.2 קריטריון קולומב

קריטריון כשל אמפירי מקובל מאוד לחיזוי חוזק גזירה של סלעים רציפים ושל מישורי אי רציפות הינו קריטריון קולומב (Coulomb, 1776):

$$\tau = \sigma_N \tan \phi + c \quad .3$$

כאשר τ ו- σ_N הם מאמצי הגזירה והנורמאלי בהתאמה, C קוהזיה (חוזק) ו- ϕ הינה זווית החיכוך הפנימית. ניתן לראות כי נוסחת הקריטריון מבטאת קו ישר כאשר השיפוע ונקודת החיתוך עם ציר ה-y הינם קבועים אמפירים (תרשים 4ב) אותם ניתן לחשב. על פי רוב הקוהזיה של משורי אי רציפות חלקים ללא מילוי הינה אפס. זווית החיכוך (שיפוע הגרף) יכולה להיות זווית החיכוך המקסימאלית או זווית החיכוך השיורית. אחת השיטות לאפיון קריטריון כשל זה היא באמצעות ניסויי גזירה ישירה. בניסויים אלו מפעילים מאמצי גזירה בקצב קבוע על מישור אי רציפות או על סלע רציף תחת מאמצים נורמאליים שונים (תרשים 4א). מאמץ הגזירה (מקסימאלי או שיורי) הנדרש בכדי לגזור את הדוגמה נמדד בכל מאמץ נורמאלי. באמצעות הצגה גראפית של מאמץ הגזירה המרבי או השיורי במרחב $\tau - \sigma$ כמתואר בתרשים 4ב, ניתן למצוא את זווית החיכוך השיורית או המקסימאלית והקוהזיה. קריטריון כשל זה משמש הן ככלי לאפיון סלעים בבעיות הנדסיות כגון יציבות מדרונות והן בפיתרון בעיות גיאופזיות, כגון ניתוח השינוי בשדה מאמצים הגורמים לרעידות אדמה (Gomberg, 1996).



תרשים 4. איור סכמאטי המתאר כיצד מאפיינים את זווית החיכוך והקוהזיה בניסויי גזירה ישירה באמצעות קריטריון קולומב. א. מאמץ הגזירה כפי שנימדד בניסויי גזירה בשני מאמצים נורמאליים שונים - $\sigma_N A$ ו- $\sigma_N B$. ב. השלכת מאמץ הגזירה במרחב $\tau - \sigma$ ומציאת זווית החיכוך (ϕ) ו הקוהזיה (C).

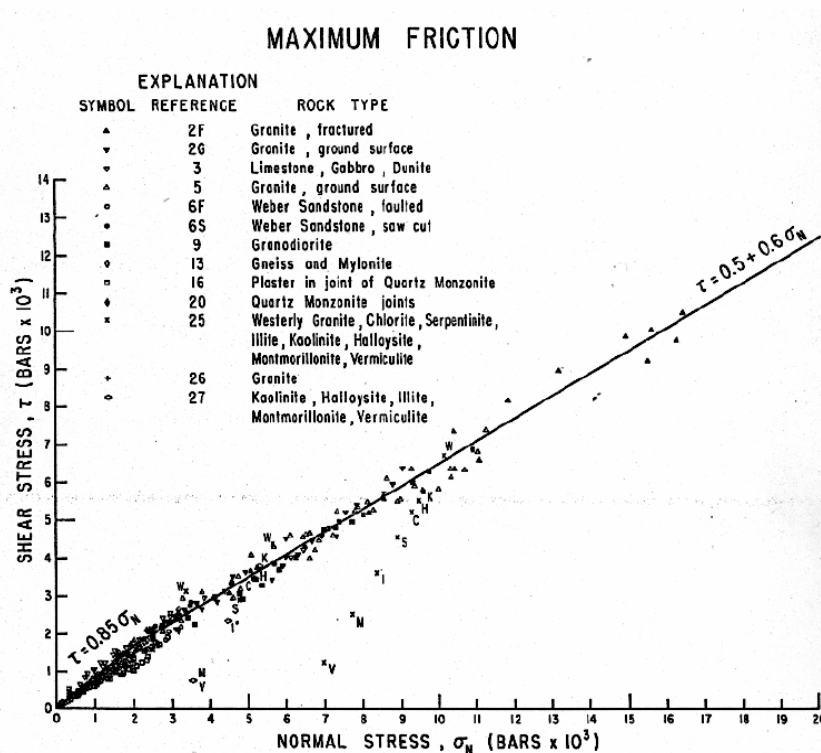
2.1.3 חוק ביירלי (Byerlee law)

קריטריון נוסף באמצעותו ניתן לאפיין את ערכי מקדם החיכוך של סלעים בטווחי מאמץ נורמאלי שונים הינו חוק ביירלי (Byerlee law) (Byerlee, 1978). לפי חוק זה מקדם החיכוך לכל החומרים, למעט חרסיות הינו קבוע ותלוי במאמץ הנורמאלי:

$$\begin{aligned} \tau &= 50 + 0.6\sigma_n \text{ MPa} & \sigma_n &> 200 \text{ MPa} \\ \tau &= 0.85\sigma_n \text{ MPa} & \sigma_n &< 200 \text{ MPa} \end{aligned} \quad .4$$

חוק ביירלי (תרשים 5) הינו בליניארי ומקרב את מקדם החיכוך של סלעים קרבונטים וסיליקטים בטבע קירוב **מסדר ראשון**. היתרון של חוק זה הוא כולל בתוכו חומרים רבים ולכן ניתן להעריך בעזרתו חוזק גזירה במאמץ הנורמאלי נתון. חסרונותיו העיקריים הם שהוא כוללני ואינו כולל שינויים מסדר שני במקדם החיכוך.

חוקי חיכוך אמפריים נוספים המתארים את כוחות החיכוך בסלעים הוצעו במטרה לתת מנגנון אפשרי לתופעות הקשורות ברעידות אדמה כמו "הדבק החלק" (stick slip) והמעגל הסיסמי. חוק חיכוך חשוב, עליו יפורט בהרחבה בפרק 2.2 הוצע על ידי (Dieterich, 1979; Ruina, 1983). חוק זה קושר את מקדם החיכוך לשטח המגע האמיתי של המשטחים ותלותו במהירות ההחלקה. חוקי חיכוך אלו מוכרים כחוקי "קצב-מצב" - **Rate and State friction laws**.

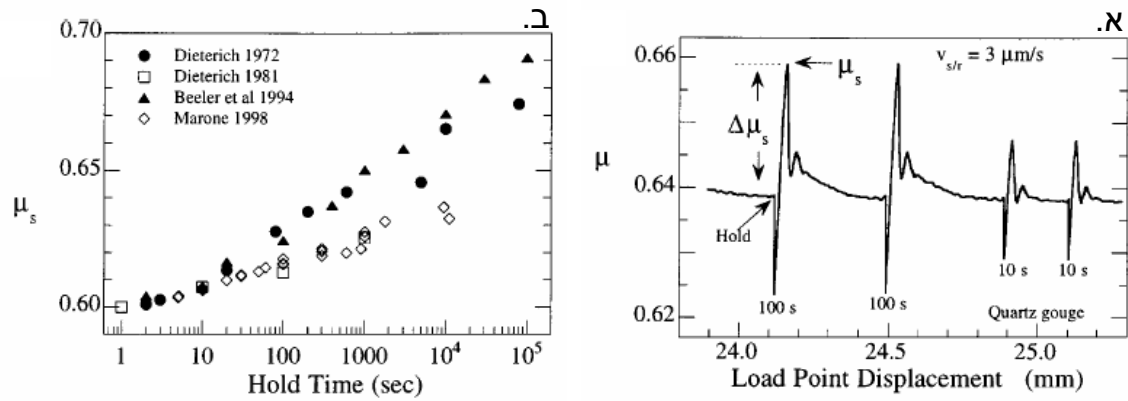


תרשים 5. חוק ביירלי (Byerlee law) מתוך (Byerlee, 1978)

2.2. חוקי קצב מצב (Rate and State friction law)

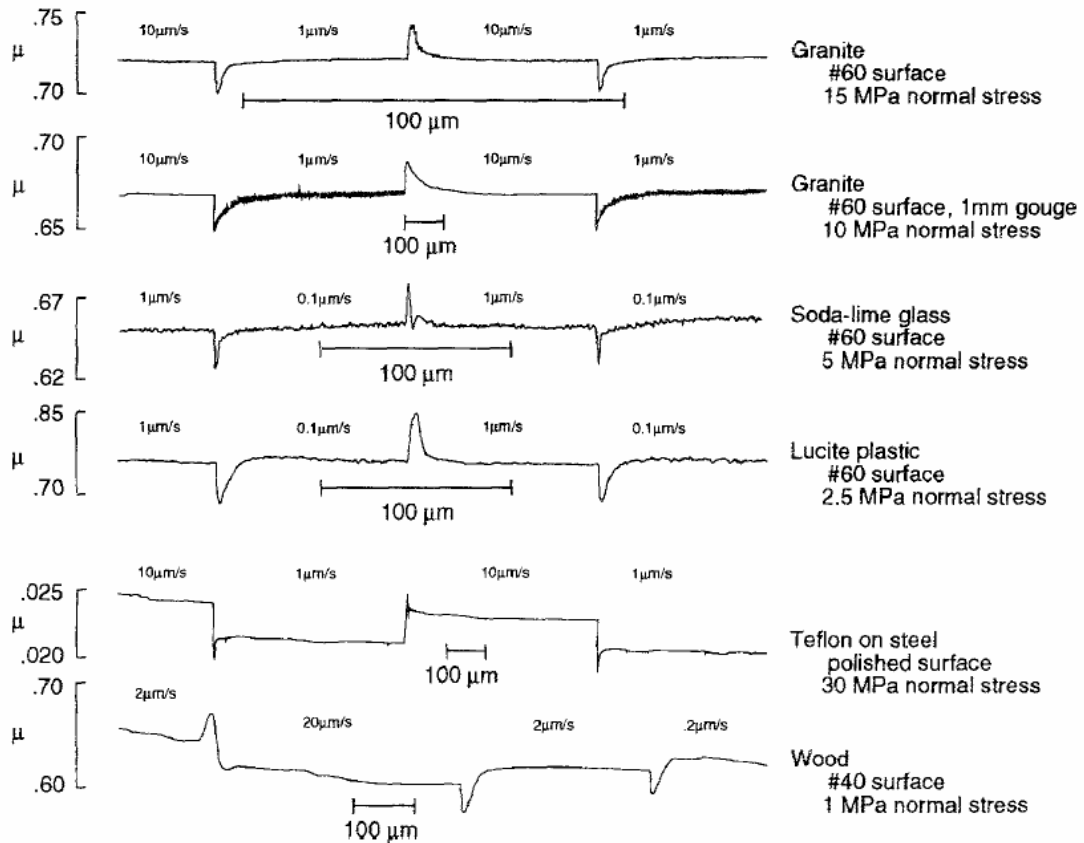
2.2.1. הקדמה

בשנות ה-70, עם תחילתה של הגישה המודרנית של Brace and Byerlee (Brace & Byerlee, 1966) החלו לחקור את החיכוך בסלעים כגורם משמעותי לאי יציבות בהחלקה על שברים גיאולוגיים וכמנגנון ליצירה של המעגל הסיסמי. תרומה משמעותית בהבנה של תופעות גיאופיזיות רבות התקבלה עם פרסומם של חוקי "הקצב-מצב" (Rate & State). חוקי חיכוך אלו, הקושרים את מקדם החיכוך בסלעים במהירות ההחלקה (rate) ובפרמטר המצב (state), הוצעו לראשונה על ידי Dieterich ו-Ruina (Dieterich, 1979; Ruina, 1983). חוקים אלו משמשים כלי חשוב במחקר והבנה של תופעות רבות הקשורות ברעידות אדמה כגון נוקליאציה של רעידות אדמה (Dieterich, 1992), אפטר ופרה- שוקים (Ziv & Cochard, 2006), שבירה קו-סיסמית (Rice, 1993) ועוד. תרשימים 6 ו-7 מציגים תוצאות אופייניות של ניסויים בהן ניתן לראות שמקדם החיכוך אינו קבוע, כפי שהוצג בחוקי חיכוך אחרים (אמונטון, קולומב, ביירלי). בתרשימים 6א מוצגות תוצאות ניסוי הבוחן את התלות של מקדם החיכוך הסטטי בזמן העצירה. בניסויים אלו מחליקים את הדוגמה עד למצב בו מקדם החיכוך קבוע ולא משתנה בזמן (מצב עמיד). לאחר שמקדם החיכוך הגיע למצב עמיד מכתיבים לדוגמה לעמוד לפרק זמן כלשהו (בניסוי המוצג לפרקי זמן של 10 ו-100 שניות). ניתן לראות כי מקדם החיכוך מייד בתום העצירה גבוהה יותר ממקדם החיכוך בזמן ההחלקה וכי הוא תלוי בזמן העצירה (תרשימים 6ב). בתרשימים 7 מוצגות תוצאות ניסויים על חומרים שונים הבוחנים את התלות של מקדם החיכוך במהירות ההחלקה. מניסויים אלו ניתן לראות כי שינוי במהירות ההחלקה גורם לשינוי מיידי במקדם החיכוך ולאחר מכאן התייצבות הדרגתית של מקדם החיכוך לערך חדש. בחינה של ערכי מקדם החיכוך מראה כי ישנם חומרים שערכי מקדם החיכוך עולים עם הורדת המהירות (velocity strengthening) וכאלה שערכי מקדם החיכוך יורדים עם הורדת המהירות (velocity weakening). תוצאות ניסויים אלו הביאו לניסוח חוקים אמפיריים באמצעותם ניתן לחזות ולדמות בהצלחה תוצאות רבות המתקבלות מניסויי מעבדה.



תרשים 6. א. ניסויים הבוחנים את התלות של מקדם החיכוך הסטטי בזמן העצירה (מתוך (Marone, 1998b)). ב. תלות של מקדם החיכוך הסטטי בזמן העצירה

חוקי וניסויי הקצב מצב עולים בקנה אחד עם תצפיות בנסויי חיכוך שבוצעו על מתכות, ואף מוסברים מבחינה פיסקאלית באמצעות תיאורית ההצמדות (Adhesion theory) (in Bowden & Tabor, 2001). לפי תיאוריה זו, הגורם המשפיע על מקדם החיכוך הינו שטח המגע האמיתי בין המשטחים. לכל משטח, גם החלק ביותר ישנה מיקרו-טופוגרפיה. שטח המגע בין המשטחים תלוי בטופוגרפיה ומתרחש בין גבשושיות (asperities) בלבד. כלומר, שטח המגע בין המשטחים קטן יותר משטח הפנים הגיאומטרי הנראה לעין. בנוסף, שטח זה משתנה בזמן כתוצאה מכניעה פלסטית של המגעים התלויה באופי החומר. שינוי שטח המגע בזמן גורם לכך שיש משמעות להיסטוריית ההחלקה ולגיל אוכלוסיית המגעים. הגישה של חוקי הקצב מצב שונה בצורה משמעותית מחוקי החיכוך שתוארו בפרק 2.1, שכן לפיה אין הבחנה בין מקדם חיכוך סטטי ודינאמי מכיוון שמקדם החיכוך תלוי בגיל המגעים שהינו פרמטר של המהירות. ניסויים מאוחרים יותר על חומרים שקופים (plastic Lucite acrylic) הדומים בחלק מתכונותיהם לסלעים, מראים בצורה ויזואלית וכמותית כי שטח המגע בין שני משטחים מתרחש על שטח קטן מהשטח הגיאומטרי הנראה לעין וכי הוא משתנה בזמן. (Dieterich & Kilgore, 1994).



תרשים 7. השפעת מהירות ההחלקה על מקדם החיכוך (μ) במגוון חומרים. ארבעת החומרים הראשונים מראים החלשות עם עליה במהירות (velocity weakening). טפלון על פלדה (חומר שלישי) מראה התחזקות עם העלייה במהירות (velocity strengthening). (Dieterich & Kilgore, 1994). מתוך

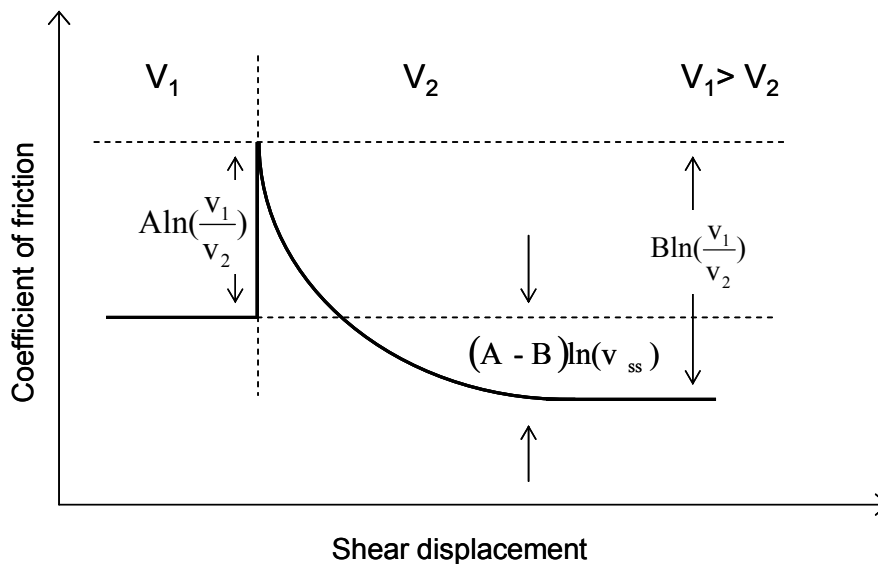
2.2.2. משוואות הקצב מצב ותנאי קצה

חוק החיכוך כפי שהוצא על ידי (Dieterich, 1979) מציע כי תחת מאמצים נורמאליים קבועים, ההתנגדות להחלקה (מאמץ הגזירה או מקדם החיכוך) מוכתבת ממהירות ההחלקה ופרמטר המצב θ המייצג את מצב המגעיים ברגע נתון. פרשנות נפוצה למשמעות הפיזיקאלית של פרמטר המצב, המבוססת על תצפיות הבוחנות את התלות של מקדם החיכוך בזמן העצירה, היא שפרמטר המצב מייצג את גיל המגעיים בין שני המשטחים המחליקים. גיל המגעיים יכול להיות מושפע מזמן העצירה או ממהירות ההחלקה ומרחק ההחלקה האופייני, D_c . בעת החלקה במהירות קבועה, גיל המגעיים קבוע וכך גם מקדם החיכוך (על כל מגע שנהרס כתוצאה מהתנועה נוצר מגע חדש). כאשר ישנו שינוי מיידי במהירות ההחלקה, מרחק ההחלקה האופייני הינו המרחק הדרוש לשנות את אוכלוסיית המגעיים כתלות במהירות החדשה. היחס D_c/V

(יחידות זמן) מתאר את הגיל הממוצע של אוכלוסיית המגעיים. הקשר בין מקדם החיכוך פרמטר המצב מהירות ההחלקה ומרחק החלקה אופייני D_c מתואר באופן הבא:

$$\mu = \mu^* + A \ln\left(\frac{V}{V^*}\right) + B \ln\left(\frac{V^* \theta}{D_c}\right) \quad .5$$

כאשר μ^* הינו קבוע אשר מייצג את מקדם החיכוך במצב עמיד במהירות יחוס כלשהי V^* , V מהירות ההחלקה, θ פרמטר המצב ו- A ו- B הינם קבועי חומר אמפרים. האיבר $B \ln(V^* \theta / D_c)$ תלוי בפרמטר המצב ובמרחק ההחלקה האופייני ולכן השינוי ההדרגתי במקדם החיכוך תלוי בו ואילו האיבר השני מתאר את השינוי המידי (תרשים 8).



תרשים 8. תרשים סכמאטי המדגים את השינוי במקדם החיכוך כתוצאה מעליה במהירות ההחלקה; תחילה תגובה מיידית ולאחר מכאן התייצבות של מקדם החיכוך למצב עמיד חדש במרחק החלקה אופייני D_c . בניסוי אידיאלי ניתן למדוד את הקבועים ישירות מתוצאות הניסוי.

כדי לתאר את מקדם החיכוך באמצעות משוואה (5) יש לצרף אליה ביטוי נוסף, המתאר כיצד פרמטר המצב משתנה בזמן. עבור פרמטר המצב הוצאו מספר ביטויים, המקובלים ביותר הם חוק ההאטה (Ruina, 1983) (slowness law):

$$\frac{d\theta}{dt} = 1 - \frac{V\theta}{D_c} \quad .6$$

וחוק ההחלקה (Dieterich, 1979) (slip law):

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{V\theta}{D_c} \ln\left(\frac{V\theta}{D_c}\right) \quad .7$$

כאשר t הוא זמן. ההבדל המהותי בין שני חוקים אלו טמון בתנאי הקצה: בעוד שבחוק ההאטה פרמטר המצב מוגדר בזמן עצירה ($V=0$) בחוק ההחלקה פרמטר המצב אינו מוגדר (הביטוי אינו מוגדר מתמטית כאשר $V=0$). המשמעות היא שלפי חוק ההחלקה נדרשת החלקה בכדי שיתרחש שינוי כל שהו במקדם החיכוך לעומת חוק האטה שאינו מקיים תנאי זה ולכן יתכן שינוי במקדם החיכוך גם ללא החלקה. חוק ההאטה וחוק ההחלקה, בצורתם המקורית (משוואות 6,7) מתארים את פרמטר המצב עבור מאמץ הנורמאלי קבוע. כמובן שתנאים אילו אינם משקפים את המציאות והמאמץ הנורמאלי על שברים יכול להשתנות (Scholz, 2002). ניסויים בהם שונה המאמץ הנורמאלי בוצעו על ידי Linker & Dieterich, (1992) ובעקיבותם הורחב חוק האטה כך שמשתנה המצב תלוי גם במאמץ הנורמאלי:

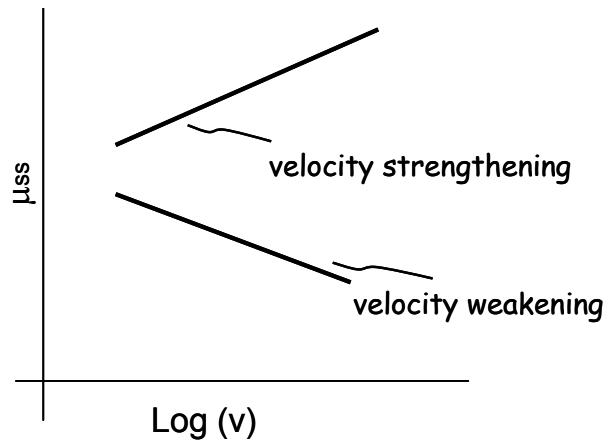
$$\frac{d\theta}{dt} = 1 - \frac{V\theta}{D_c} - \frac{\alpha\theta}{B} \frac{d\sigma}{\sigma} \quad .8$$

כאשר σ הוא המאמץ הנורמאלי ו- α הינו קבוע אמפירי.

משוואות (5-8) הן לא-ליניאריות ובאופן כללי אינן ניתנות לפיתרון באופן אנליטי. עם זאת, קיימים פתרונות אנליטיים למספר מצבי קצה. בחינת פתרונות אלו מסייעת בהבנת התהליך הפיזיקאלי: **מצב עמיד** (steady state), מעצם הגדרתו אין שינוי של פרמטר המצב בזמן כלומר $d\theta/dt = 0$. כאשר מציבים 0 בחלק השמאלי של משוואות (6) או (7) מתקבל פרמטר המצב במצב עמיד: $\theta_{ss} = D_c/V_{ss}$. בהצבת פיתרון זה ב- (5) מתקבל:

$$\mu_{ss} = \mu^* + (A - B)\ln(V_{ss}) = \mu^* + (B - A)\ln(\theta_{ss}) \quad .9$$

לפיכך, מקדם החיכוך במצב עמיד תלוי במהירות ההחלקה V_{ss} . כמות ואופי השינוי של מקדם החיכוך כתוצאה משינוי מהירות תלוי בהפרש בין הקבועים האמפירים A ו-B: במצב בו $A - B < 0$ מקדם החיכוך במצב עמיד קטן עם העלאת המהירות ומצב זה מכונה velocity weakening. כאשר $A - B > 0$ מקדם החיכוך במצב עמיד גדל עם העלאת המהירות ומצב זה מכונה velocity strengthening (תרשים 9). תנאי לקבלת "הדבק החלק" על שברים גיאולוגיים הוא ש $A - B < 0$ (Rice & Ruina, 1983; Ruina, 1983).



תרשים 9. הדגמה לסוגי התלות של מקדם החיכוך במהירות ההחלקה.

זמן עצירה כאשר $V=0$. במצב זה, חוק ההחלקה אינו רלוונטי מכיוון שאינו מוגדר. לעומת זאת, בהצבה $V=0$ בחוק ההאטה (6) מתקבל $d\theta/dt = 1$ כלומר השינוי של פרמטר המצב קבוע בזמן ולכן:

$$\theta = \theta_{t=0} + \Delta t \quad .10$$

כאשר $\theta_{(t=0)}$ הוא פרמטר המצב בזמן אפס ו Δt מייצג את זמן העצירה. ממשוואות (10) ו (5) עולה ש:

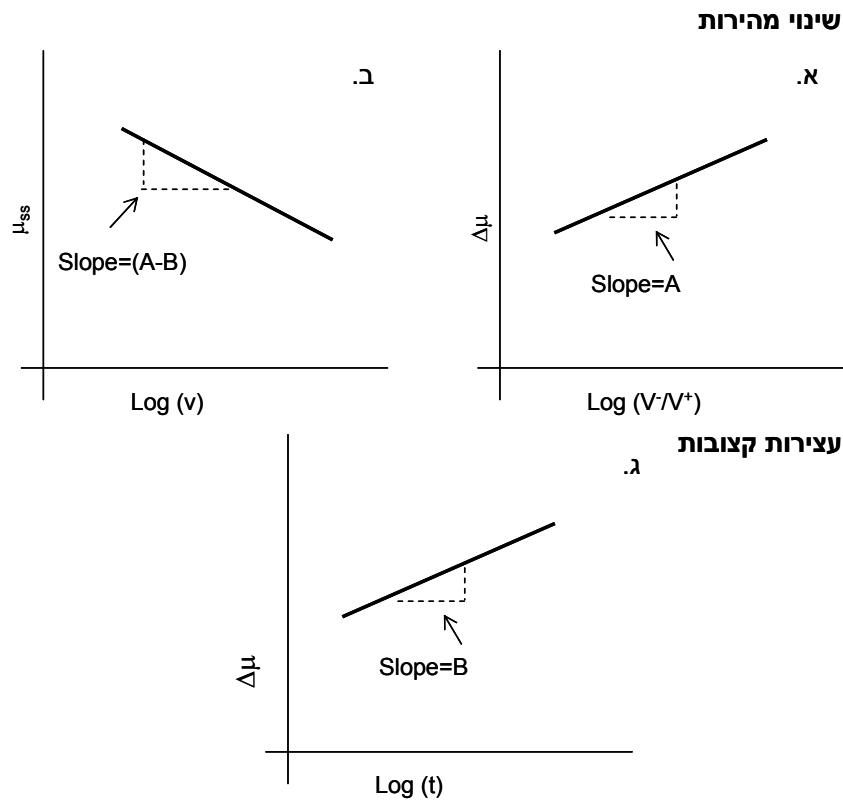
$$\mu_{ss} \propto B \ln(\theta_{t=0} + \Delta t) \quad .11$$

שינוי מיידי במהירות ההחלקה מ V_1 ל V_2 . השינוי במהירות גורם לשינוי מיידי (תרשים 8) במקדם החיכוך המתואר באופן הבא:

$$\Delta\mu = A \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad .12$$

לאחר התגובה המיידית, התלויה במקדם A וביחס המהירויות, מקדם החיכוך מגיע למצב עמיד חדש במרחק החלקה אפייני (D_c). מרחק זה תלוי בתכונות החומר ורמת החספוס של המשטח (Dieterich & Kilgore, 1994).

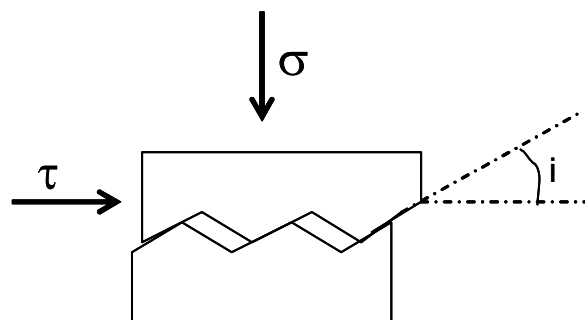
מבחינה של שלושת תנאי הקצה שהוצגו (משוואות 9,11,12) עולה כי ניתן לחשב בצורה גראפית את הביטוי A-B והקבועים A ו-B (תרשים 10). בניסויים בהם משנים את מהירות ההחלקה, ניתן לחשב את הקבוע A והביטוי A-B. בניסויים בהם בודקים את התלות של מקדם החיכוך בזמן העצירה ניתן לחשב את הקבוע B.



תרשים 10. אופן חישוב הקבועים האמפרים A ו-B מתוצאות הניסויים. א. חישוב הביטוי A-B מניסוי שינוי מהירות. ב. חישוב הקבוע A מניסוי שינוי מהירות. ג. חישוב הקבוע B מניסוי עצירות קצובות.

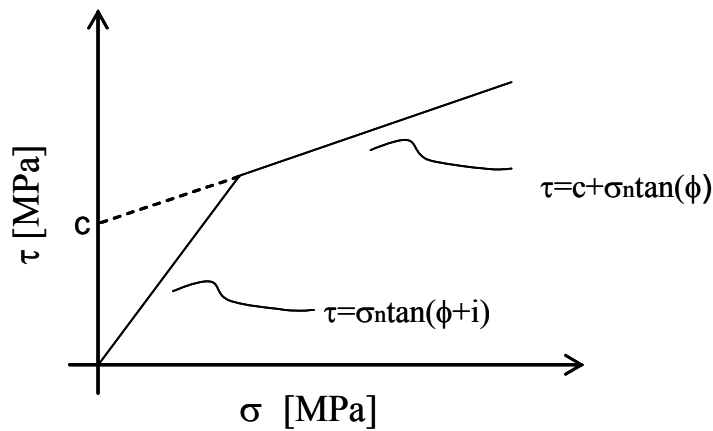
2.3 השפעת חספוס הממשקים על מקדם החיכוך

מישורי אי רציפות טבעיים בסלעים (סדקים ושברים) אינם חלקים ובעלי רמות חספוס שונות המושפעות מהמיקרו-טופוגרפיה של המשטחים. רמת החספוס של הסדקים יכולה להשפיע בצורה משמעותית על חוזק הגזירה של הממשקים. בדרך כלל חוזק הגזירה של משורים מחוספסים גבוהה יותר מאשר משורים חלקים. Patton (Patton, 1966) הדגים את השפעת החספוס בסדרת ניסויים על ממשק עם "שיניים" מלאכותיות כמודגם בתרשים 11.



תרשים 11. תרשים סכמתי של ניסויים הבודקים את השפעת שיניים בזווית i על חוזק הגזירה (מתוך Patton, 1966).

בניסויים אלו, הראה Patton כי החספוס משפיע על חוזק הגזירה של הממשקים בטווחי מאמץ נורמאלי שונים (תרשים 12).

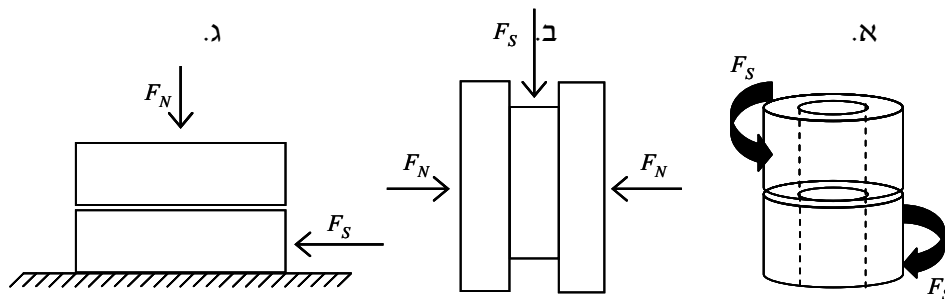


תרשים 12. חוזק הגזירה עבור משטח מחוספס בזווית חספוס i .

במאמצים נורמאליים נמוכים הגבשושיות "מטפסות" אחת על השנייה ולכן חוזק הגזירה מושפע הן מזווית החיכוך של החומר (ϕ) והן מזווית החספוס i . במאמצים נורמאליים גבוהים לא מתאפשרת תפיחה וטיפוס של הגבשושיות אחת מעל השנייה ולכן חוזק הגזירה מושפע מזווית החיכוך הבסיסית בלבד. מודל זה עבור משורים מחוספסים הינו פשטני ואינו ניתן ליישום שכן מישורי אי רציפות אינם אחידים ברמת החספוס וכן קשה למדוד ולאפיין את זווית החספוס. בכדי לאפיין את חוזק הגזירה של משורים מחוספסים הוצעו מספר קריטריוני כשל המביאים בחשבון את החספוס (Barton & Choubey, 1977; Jaeger, 1971). קריטריונים אילו מציעים אפשרויות מדידה שונות של החספוס בשדה ומשלבים אותם בחישוב חוזק הגזירה של הממשק. יש לציין כי הקריטריונים עבור חוזק הגזירה המוזכרים הינם עבור משטחים מחוספסים שניתן למדוד בשדה ולא עבור שינויים קטנים בחספוס כפי שיוצג בעבודה זו.

3. שיטות עבודה**3.1 מערכת גזירה ישירה (direct shear system)**

ניסיונות לבדיקת מקדם החיכוך בוצעו במכבש גזירה ישירה, באמצעותו ניתן להפעיל כוחות אופקיים (גזירה) וניצבים (לחיצה ומתיחה) על דגם סלע באמצעות בוכנות הידראוליות. בניסויי גזירה ישירה, ניתן לאפיין את חוזק הגזירה של מדגמים רציפים וכן של מישורי אי רציפות (סדקים). קיימים מספר סוגים של מערכות גזירה ישירה (תרשים 13), ההבדל בין סוגי המערכות השונות נובע ממבנה הבוכנות, מיקום הדגם בין הבוכנות וצורת הדגם. לכל סוג מכבש יש את היתרונות והחסרונות הנובעים מהמבנה.



תרשים 13. שרטוט סכמתי של מערכות גזירה ישירה שונות. א. גזירה ישירה סיבובית (Rotary shear test). ב. גזירה ישירה על מישור כפול (Double shear test). ג. גזירה ישירה על מישור בודד. (מתוך (Jaeger, Cook, & Zimmerman, 2007).

מכבש הגזירה במעבדה למכאניקת סלע ע"ש דייכמן באוניברסיטת בן גוריון הינו מכבש גזירה על מישור בודד מדגם DS-4250 שיוצר ותוכנן על ידי Terratek System Inc, ארה"ב (תרשימים 14,15,16). המערכת כוללת ארבעה רכיבים עיקריים :

- משאבה הידראולית המספקת לחץ שמן לבוכנות המכבש.
- בוכנות הידראוליות בכיוונים ניצבים (גזירה ולחיצה).
- מדי עומס ותזוזה המצויים על הבוכנות ועל הדגם.
- מערכת בקרה השולטת בזמן אמת על התזוזות, הכוחות והמאמצים שהבוכנות מפעילות על הדגם ושומרת את הנתונים.

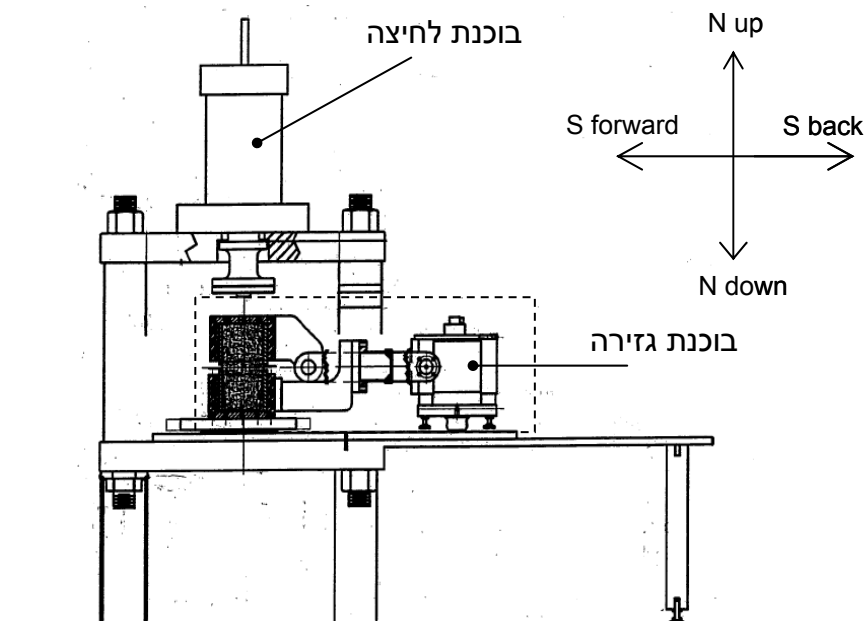


תרשים 14. מבט כללי על מערכת הגזירה הישירה - DS-4250 במעבדה למכאניקת סלע באוניברסיטת בן גוריון .

3.1.1. מפרט ונתונים טכניים של מערכת הגזירה הישירה

בוכנות הידראוליות וקופסאות הגזירה

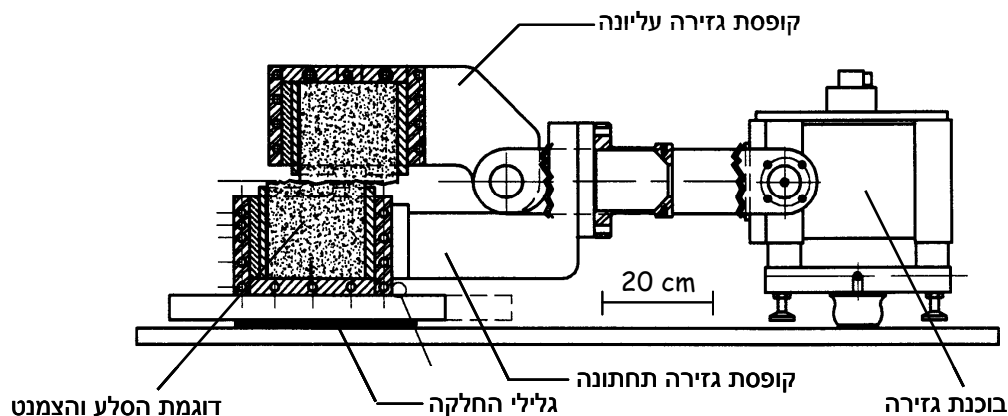
שתי בוכנות הידראוליות המופעלות בו-זמנית על קופסאות הגזירה במהלך הבדיקה בכיוונים ניצבים: בוכנת לחיצה המפעילה כוח ניצב למישור ההחלקה ובוכנת גזירה המפעילה כוח מקביל למישור ההחלקה. הבוכנות מורכבות בתוך מסגרת העמסה קשיחה העשויה פלדה (תרשים 15). הכוחות המרביים אשר הבוכנות מסוגלות להפעיל הם 300 KN ו- 1000 KN עבור בוכנות הגזירה והלחיצה, בהתאמה.



תרשים 15. שרטוט סכמאתי של מערכת הגזירה הישירה: מסגרת העמסה ובתוכה בוכנות הגזירה והלחיצה. החצים בצד ימין מציינים את כיווני התזוזה N-Normal, S-Shear.

לקופסאות הגזירה העשויות פלדה מקובעים מדגמי הסלע. קופסאות הגזירה הינן הרכיב, במערכת הניסיונית, המקשר בין דגמי הסלע לבוכנות. בוכנת הגזירה מחוברת לקופסת הגזירה התחתונה באמצעות

ברגים, ובוכנת הלחיצה מתחברת לקופסת הגזירה העליונה באמצעות פין המצוי על הבוכנה וניכנס לשקע במרכזו של החלק העליון של הקופסה (תרשים 16).

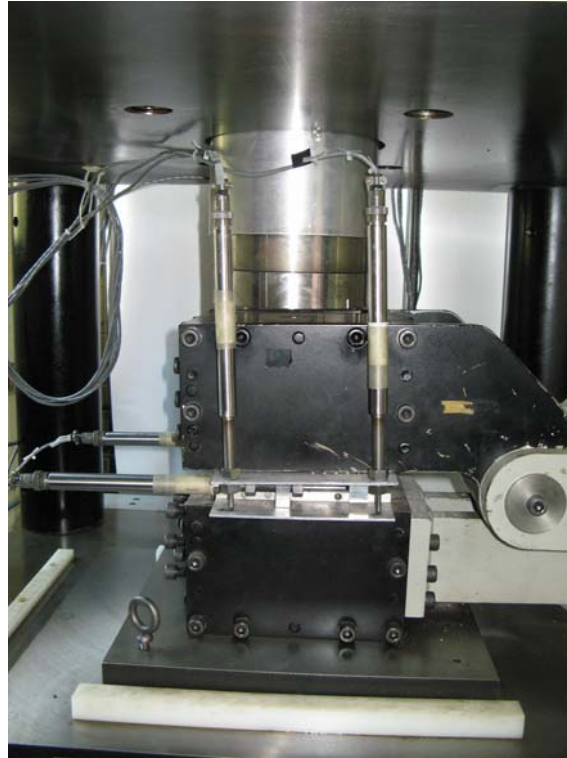


תרשים 16. התמקדות על בוכנת הגזירה (מסומן בתרשים 15).

הפעלת כוח גזירה, על הבלוק התחתון גורמת לתנועה יחסית המתרחשת על מישור אי רציפות המוכתב מראש, בין הבלוק העליון והתחתון (תרשימים 13,16). בכדי לוודא שכוח החיכוך המתנגד להחלקה מתפתח רק במישור אי הרציפות בין הבלוקים, הבלוק העליון מקובע למסגרת העמסה ולבוכנת הלחיצה והבלוק התחתון מונח על גלילים החופשיים לנוע ומבטלים התפתחות כוחות חיכוך בין הבלוק לבין המשטח עליו הוא מונח. היתרון העיקרי של מערכת גזירה מסוג זה הינו במיקום הקרוב של מדי התזוזה לממשק עליו מתרחשת ההחלקה. מיקום המדידים משפר את דיוק המדידה ואת יכולת הבקרה על תזוזת הדוגמה. חסרונותיה העיקריים של מערכת זו הם מרחק החלקה מוגבל ומהירות איטית (ביחס לגזירה ישירה סיבובית) ופיזור מאמצים א-סימטרי (ביחס לגזירה ישירה כפולה ובכלל).

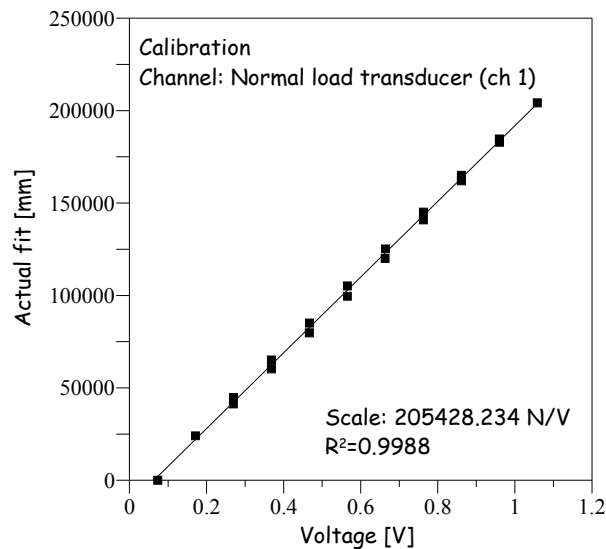
מדי עומס ותזוזה

הכוחות אשר מפעילות שתי הבוכנות נמדדים בעזרת שני מדי עומס (load cell) הנמצאים על הבוכנות. התזוזות האופקיות והאנכיות של הדוגמה נמדדות בעזרת 6 מדי תזוזה ליניאריים (Linear Variable Differential Transformer-LVDT) מסוג Macro Sensor: GHSA-750-1000 המורכבים על קופסאות הגזירה; ארבעה מדי תזוזה המודדים את התזוזה האנכית ממוקמים בכל פינה של קופסת הגזירה ושני מדידים המודדים את התזוזה האופקית וממוקמים בחזית הדוגמה במקביל לכיוון ההחלקה (תרשים 17). מדי התזוזה ממוקמים על משטחי אלומיניום המקובעים למסגרות פלדה הנמצאות בקופסאות הגזירה ובתוכן נמצאת דוגמת הסלע.



תרשים 17. מדי התזוזה האופקיים והאנכיים מורכבים על קופסאות הגזירה.

באופן פשוטני, מדי התזוזה והכוח הינם מתמרים המודדים שינוי של מתח חשמלי הנגרם מתזוזה של קפיץ הנמצא בתוכם. כתוצאה מהתקצרות או התארכות של הקפיץ משתנה המתח החשמלי שהמדיד פולט ליחידת הבקרה. הפלט החשמלי [וולט] מתורגם ליחידות מרחק על ידי הכפלתו בקבוע [מרחק/וולט] אשר ממירו ליחידות מרחק. התמרת יחידות המתח החשמלי למרחק נעשית באופן אוטומטי על ידי תוכנת המחשב, אליה הוזן קבוע התמרה ייחודי לכל מדיד (נספח א). התזוזה והכוחות מוצגים בממשק הבקרה ביחידות מרחק ובולטים. בכדי למצוא את קבוע ההתמרה (יחס בין כוח ליחידת וולט [ניוטון/וולט] עבור מדי העומס ויחס בין יחידת אורך לוולט [מרחק/וולט] עבור מדי התזוזה), בוצע לפני סדרת הניסויים כיוול פרטני עבור כל המדידים במכבש. הכיוול נעשה בעזרת מד כיוול המודד את התזוזה של המדיד ואת הפלט החשמלי. הצגה גראפית של הפלט החשמלי כנגד התזוזה האמיתית הנמדדת על ידי מד הכיוול, מאפשרת לחשב את קבוע הכיוול (תרשים 18). בנוסף, כיוול המדידים מאפשר לבדוק את הליניאריות כלומר האם קבוע ההמרה משתנה לאורך מהלך התזוזה של המדיד. הליניאריות נבחנת על ידי התאמת הקו ישר לנקודות הבדיקה. כל כיוול נעשה על ידי מדידה של לפחות 10 נקודות לאורך כל טווח המדיד. ערכי מקדמי הכיוול של מדי התזוזה והעומס מוצגים בנספח א.

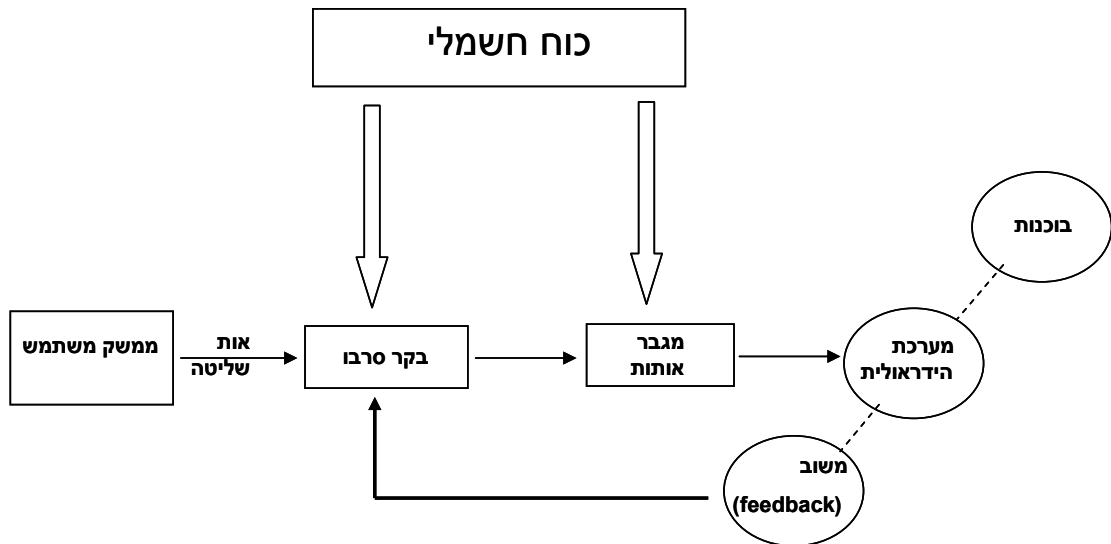


תרשים 18. דוגמה לכיול של מדיד העומס הנורמאלי

מדי התזוזה GHSA-750-1000 מסוגלים למדוד מרחק מקסימאלי של 50 mm בליניאריות הקטנה מ 0.25% בדיוק מדידה קטן מ-0.6 μm . רגישות המדידים לתזוזה הינה מותאמת ליחידת התזוזה הקטנה ביותר שהבוכנות יכולות לזוז.

מערכת ניטור ובקרה בזמן אמת

כמתואר, מכבש הגזירה מורכב ממספר רכיבים. בכדי שכול הרכיבים יפעלו יחד כך שהמאמצים, כמות ומהירות ההחלקה של הדוגמה יהיו זהים למה שהמשתמש הזין נדרשת מערכת בקרה ושליטה שתפקידה לסנכרן בין כל רכיבי המכבש. מערכת הבקרה והשליטה הינה Terra TEST V 7.2 אשר פותחה במיוחד למכבש הגזירה. מערכת זו מורכבת משני מחשבים המחוברים ביניהם בכבל תקשורת. האחד (TTRT) אחראי על בקרה, קליטה ועיבוד הנתונים והשני (User Interface Computer-UIC) אחראי על איסוף הנתונים והממשק למשתמש. מחשב ה-TTRT בעל כרטיס שליטה NI REAL TIME™ 8176 RT Controller אשר מסוגל לקלוט ולעבד 16 ערוצים שונים. כל רכיב אשר פולט נתונים וניקלט על ידי המחשב מהווה ערוץ נפרד (מדי תזוזה ועומס שעל הבוכנה והדגם). השליטה על הבוכנות ההידראוליות נעשית באמצעות בקרת סרוו במעגל סגור (חלק מ-Terra TEST V 7.2). מערכת בקרה מסוג זה מבוססת על עיקרון של שליחה וקבלה של אותות חשמליים למשאבה ההידראולית האחראית להנעת הבוכנות. בעוד שבמערכות שליטה פתוחות הבקר שולח אות חשמלי למשאבה ובזאת תהליך הבקרה מסתיים, במערכות בקרה מסוג זה הפקודות הנשלחות למשאבה ההידראולית הינן בהתאם לאותות שהיא קיבלה מהמשאבה או מהמדידים לפני כן (תרשים 19). קצב השליטה במעגל המערכת הינו 300 μs , קצב איסוף הנתונים של המערכת לצרכי הבקרה תלוי בערוץ הבקרה ונע בין 20 Hz ל 4000 Hz.



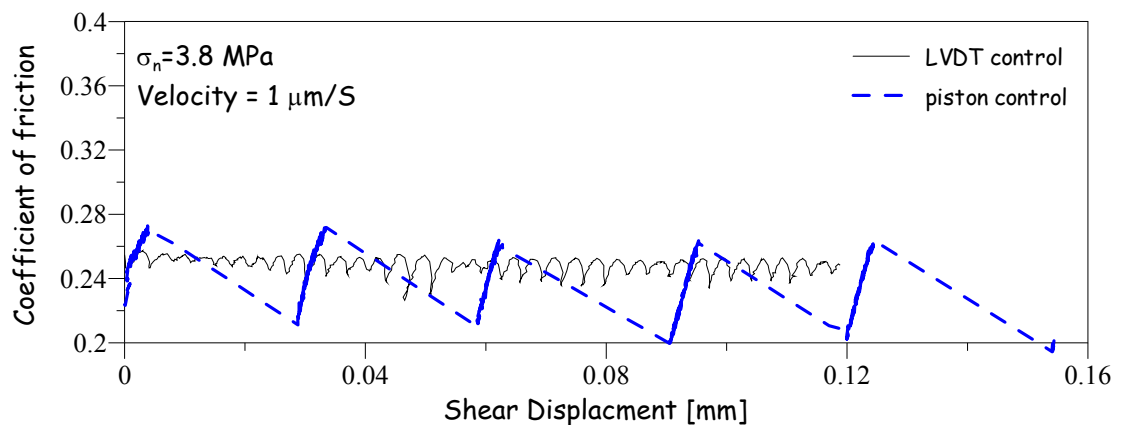
תרשים 19. עיקרון מערכת בקרת סרוו.

ממשק הבקרה במחשב UIC מציג במהלך הבדיקה, את הנתונים השונים (כוחות, מאמצים, תזוזות) של כל המערכת, הן בערכים מספריים והן בצורה גראפית. ממשק הבקרה מחולק לשני מעגלים בלתי תלויים – מעגל אופקי (גזירה) ומעגל אנכי (לחיצה). באמצעות הממשק ניתן לשלוט בכל מעגל בנפרד על ערוץ השליטה, פרמטרים של בקרת הסרוו (PID), מהירות, ומטרה סופית. כמו כן ניתן לקבוע, עבור שני המעגלים יחד, את קצב דגימת הנתונים לצרכי שמירה ועיבוד התוצאות. לכל מעגל קיימים מספר אפשרויות שליטה:

מעגל אנכי	מעגל אופקי
תזוזה של הבוכנה האנכית (displacement control)	תזוזה אופקית של בוכנת הגזירה
תזוזה של LVDT אנכיים (ממוצע של ארבעה מדידים)	תזוזה של LVDT אופקיים (ממוצע של שני מדידים)
עומס אנכי המופעל על הדוגמה (load control)	עומס אופקי של בוכנת הגזירה
קשיחות הבוכנה הנורמאלית (stiffness)	

כאשר קובעים כי בקרת השליטה היא על ערוץ מסוים, יש להזין נתוני יעד שיהיו רלוונטיים עבור ערוץ זה בלבד (לדוגמה מאמץ וקצב שינוי המאמץ). הבוכנות יתנהגו כך שהמטרה שהוכתבה לערוץ זה תבוצע. מבחינה טכנית, האותות החוזרים למערכת הבקרה הם מערוץ עליו שולטים, תיקון המיקום הבוכנות יהיה לפי ערוץ זה. לדוגמה כאשר ערוץ השליטה הוא על מדי התזוזה האופקיים, יידרש להכניס מהירות תזוזה ומרחק יעד למדידים. בוכנת הגזירה תזוז כך שמהירות התזוזה של המדידים תהיה במהירות הרצויה, כלומר הבוכנה תזוז במהירות וכיוון כך שהמדידים ינועו במהירות הרצויה. יש לציין שבכדי שהמדידים האופקיים ינועו במהירות המוכתבת, מגמות ומהירות התזוזה של המדידים והבוכנה לא תמיד זהים. ערוץ השליטה במהלך הבדיקה הינו גורם משמעותי המשפיע על תוצאות הבדיקה. בתרשים 20 מוצגות שתי

בדיקות גזירה אשר בוצעו בתנאים זהים מלבד ערוץ השליטה על התזוזה האופקית. כאשר ערוץ הבקרה היה על בוכנת הגזירה (קו מקוקו) התקבלה החלקה לא יציבה. לעומת זאת, כאשר ערוץ הבקרה הוא על מדי התזוזה, הנמצאים קרוב למישור ההחלקה התקבלה החלקה יציבה ואחידה יותר (קו רציף). כל הניסויים שנערכו במחקר זה בוצעו בבקרת עומס על המעגל האנכי (SigX) ובקרת תזוזה של ממוצע שני המדידים האופקיים (Yave) במעגל האופקי. פרוט על ממשק הבקרה ותפעול מכש הגזירה מבחינה טכנית מצורף בנספח ב.



תרשים 20 . מקדם החיכוך כנגד התזוזה האופקית בשתי סוגי בקרה. הקו המקוקו בקרה על תזוזת הבוכנה (Sx) והקו השחור בקרה על המדידים האופקיים (Yave). ניתן לראות כי ישנם הבדלים ניכרים בסוג ההחלקה.

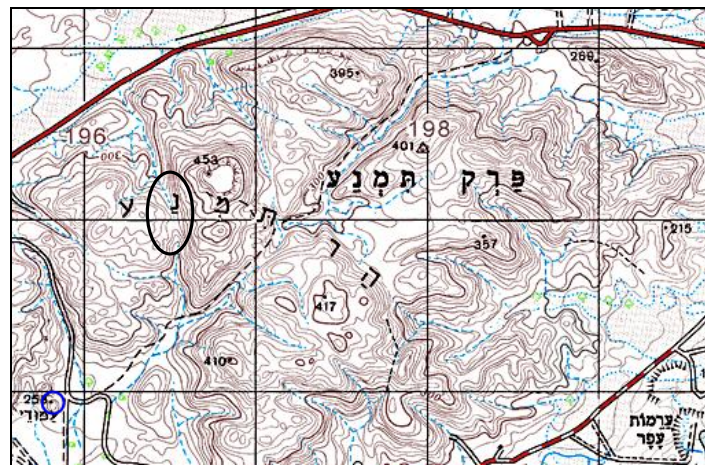
3.1.2. תדירות הדגימה והשפעתה על תוצאות הניסוי.

נתוני הבדיקות, מכל הערוצים, נדגמים ונשמרים על ידי מערכת איסוף הנתונים שנמצאת על מחשב UIC. קצב הדגימה ניתן לשינוי, על ידי המשתמש, בטווח תדירויות 1 Hz-10 Hz. תדירות שמירת הנתונים הגבוהה ביותר, נמוכה בהרבה מקצב איסוף הנתונים לצורכי הבקרה. תדירות הדגימה תלויה בכמות הזיכרון הזמינה לשימור הנתונים, במהירות המחשב, ובהגדרות תוכנת ההפעלה. במקרה של תדירות של 10 Hz מהירות המחשב אינה מהווה גורם מגביל מכיוון שמהירות המעבדים גבוהה בהרבה ממהירות הדגימה. תדירות דגימת הנתונים הינה גורם מגביל כאשר בודקים החלקה במהירויות גבוהות. בכדי שנוכל למדוד בצורה המדויקת ביותר שהמערכת מאפשרת, תדירות דגימת הנתונים צריכה להיות גדולה בהרבה ממשך כל הבדיקה. כאשר מהירות ההחלקה גבוהה משך הבדיקה קצר ולכן בכדי להגיע למספר נתונים גבוה המאפשר ניתוח נתונים, יש לדגום את הנתונים בתדירות המתאימה למהירות ההחלקה. מכיוון שתדירות איסוף הנתונים המקסימאלית במערכת הנתונה הינה 10Hz, כלומר 10 נתונים לשנייה, מהירות ההחלקה המרבית אשר נבדקה היא $100 \mu\text{m/S}$.

3.1.3. הכנת המדגם לבדיקת גזירה ישירה

סוג הסלע הנבדק

ניסויי גזירה ישירה הבודקים את מקדם חיכוך ותלותו במשתנים שונים בוצעו על מגוון רב של סלעים וחומרים. מכיוון שמטרת מחקר זה היא לבחון כיצד משתנה מקדם החיכוך כתלות בגורמים שונים ולא הערך האבסולוטי של מקדם החיכוך של חומר זה או אחר, נבחר סוג סלע אחיד לכל הניסויים. הסלע שניבחר הינו גרניט תמנע אשר הובא ממחצבת הגרניט בבקעת תמנע (תרשים 21). סלע זה הומוגני, מאסיבי, עם מעט סידוק, בעל חוזק לחיצה גבוהה ומאופיין בגודל גרגר קטן.



תרשים 21. מיקום מחצבת הגרניט בבקעת תמנע, ממנה נלקחו הדוגמאות.

סיבה נוספת לבחירתו של סלע זה הינה קירבה בתכונותיו המכאניות ל- Westerly Granite. רבים מניסויי קצב- מצב אשר בוצעו בעבר בוצעו על Westerly Granite (Dieterich, 1972; Dieterich, 1979;) (Dieterich & Conrad, 1984; Linker & Dieterich, 1992), מכיוון שמטרת חלקו הראשון של מחקר זה הייתה שחזור ניסויים קודמים, נבחר סלע דומה בהרכבו ובתכונותיו ל- Westerly Granite.

הכנת הדגם להכנסה למכשיר הגזירה

דגם הסלע הנבדק בנוי משני בלוקים שנוסרו מאותו גוש סלע. כל בלוק מעוגן למסגרת פלדה עם פינות מעוגלות בגודל 7X7X6 inch (תרשים 22). מסגרות פלדה אלו נכנסות ומקובעות לקופסאות הגזירה. מספר שלבים בהכנת הדגם לבדיקת גזירה ישירה:

1. חיתוך הסלע במסור יהלום לגודל מתאים, כך שיכנס למסגרות הפלדה. בכדי להבטיח ששני הבלוקים זהים מבחינת סוג החומר, הבלוקים נוסרו מאותו גוש גרניט. הדוגמאות נחתכו בצורה מלבנית בכדי להקל על מדידת השטח. במהלך הניסור הושם דגש על כך ששטח הבלוקים יהיה גדול ככל שניתן (בהתאם לגודלן של מסגרות הפלדה). גובהה של הדוגמה לפחות 5 cm על מנת להבטיח עיגון טוב למסגרות הפלדה.

גיאומטרית מכבש גזירה זו, בה הבלוק התחתון זו ואלו הבלוק העליון מקובע יוצרת מצב בו שטח המשטח עליו מתרחשת ההחלקה לא נישאר קבוע לאורך כל הבדיקה (במידה ומימדי הבלוק העליון והתחתון שווים). בכדי להבטיח ששטח ההחלקה יישאר קבוע לאורך כל הבדיקה, מימדו של הבלוק העליון קטנים מאלה של התחתון. ההפרש באורך בין הבלוקים מגדיר את מרחק ההחלקה המרבי שניתן לבצע בדוגמה הנתונה. בכל הדוגמאות מרחק ההחלקה המרבי הינו לפחות 20 mm.



תרשים 22. דוגמאות הסלע המקובעות למסגרות הפלדה. הבלוק העליון קטן יותר מהבלוק התחתון.

2. מיקום דוגמאות הסלע במסגרות הפלדה ועיגוןן לקופסאות על ידי מילוי צמנט פורטלנד 350. הצמנט אשר מעגן את הדוגמה לקופסאות הגזירה תוכנן כך שחוזקו יהיה גבוהה מ- 30 MPa על ידי שימוש ביחס מים/צמנט של 0.62 ויבוש במשך כ-14 יום תוך כדי אשפחה של הבטון. בעת העיגון הובטח כי המשטחים העליונים בולטים מעל מסגרות הפלדה ב- 5 mm ופאותיהם מקבילות באמצעות פלס מים. אמצעי זה אינו מדויק אך מקנה כלי ראשוני בקביעה של המקבילות של הדוגמה. בשלב מאוחר יותר, בעת ליטוש הדוגמאות, נמדדה מקבילות הדוגמאות בצורה מדויקת יותר. בהתאם לצורך, הדוגמה יושרה באמצעות ליטוש.

3. יצירה של רמת חספוס אופייניות. רמות החספוס הושגו על ידי שיטות ליטוש שונות:

- ליטוש ידני באמצעות אבקת סיליקון קרביד (SiC). הליטוש נעשה בעזרת שולחן מסתובב עליו מניחים את הדוגמה. על השולחן מפזרים אבקת SiC עם מים. רמת הליטוש נקבעת לפי גודל הגרגר של האבקה, ככל שגודל הגרגר קטן יותר הליטוש של המשטח עדין יותר. סימון גדלי הגרגר של האבקה הוא לפי מספר הגרגרים שנכנסים באינץ' מרובע (inch^2). ככל שמספר הסימון של

האבקה גדול, הגרגירים קטנים יותר ולכן הליטוש עדין יותר. בשיטה זו בוצע ליטוש בשתי רמות #180 ו-#220.

- משחת פני שטח (Surface Grinder-SG) מכשיר ליטוש אוטומטי בו הדוגמה נעה באופן אוטומטי מתחת לגלגל ליטוש המקובע במקום. גלגל הליטוש מלטש ברמה של אבקת SiC של #320.
- ללא ליטוש, החספוס מתקבל כתופעת לוואי מניסור הדוגמה במסור יהלום (Saw Cat-SC).

בדוגמאות אשר עברו ליטוש, בכדי להבטיח שכל פני השטח לוטשו, לפני ביצוע הליטוש נצבעים פני השטח בצבע עמיד למים. אזורים אשר הצבע לא ירד מהם בעת הליטוש מסמנים מקומות בהם לא הוסר חומר ויש ללטשם שוב. בעת ליטוש הדוגמאות, נבדקת מקבילות המשטחים באמצעות מד מקבילות. מכשיר זה הינו מחט מקובעת המחוברת לשעון המודד את התזוזה שלה בדיוק של 1 mm. מדידה מדגמית של תזוזת המחט על המשטח בוחנת את מקבילות המשטח בדיוק של שעון התזוזות. במידה ונימצא כי המשטח לא מקביל הוא יושר באמצעות ליטוש. לאחר הליטוש, הדוגמאות נשטפו במים ויובשו בטמפרטורת החדר למשך שבוע לפחות. רמות החספוס השונות אופיינו באופן כמותי בעזרת סורק אלקטרוני. על שיטה זו יפורט בהרחבה בחלק 3.2.

4. חישוב שטח הדגם. השטח הנמדד הינו שטח הבלוק הקטן (העליון). חישוב השטח נעשה בכדי שתהיה אפשרות לחשב את המאמצים הפועלים על הדגם. מדידת השטח נעשתה על ידי צילום הדוגמה ברזולוציה גבוהה ועיבודה בצורה דיגיטאלית.

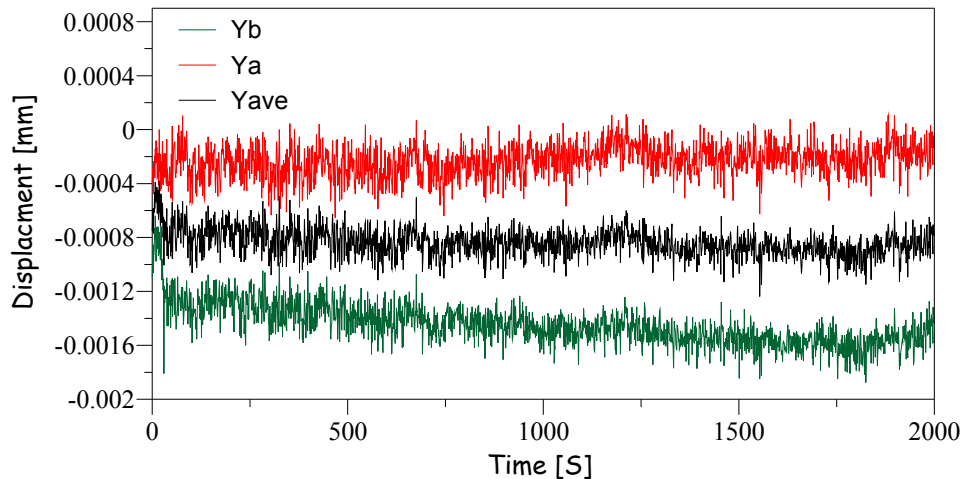
3.1.4. כיול ובקרת איכות של מדי התזוזה והבוכנות.

בדיקות הגזירה הישירה במחקר הנוכחי בודקות השפעות מסדר שני על מקדם החיכוך. מכיוון שהשינויים במקדם החיכוך אשר נבדקים קטנים (0.1-0.3±), טעויות המדידה הנובעות מרעש במכשור או מהליך הבדיקה צריכות להיות קטנות מאוד. בכדי להבטיח זאת, בתחילת המחקר בוצע כיול של כל מדידים (כוח או תזוזה) כמתואר בפרק 3.1.1. בנוסף, בכל ניסוי, בוצעו מספר בדיקות המבקרות את איכות הניסוי, התוצאות והמערכת לפני ניתוח התוצאות.

בדיקה סטטית של המדידים

בדיקה זו התבצעה לפני כל ניסוי והפעלת המדידים. מטרת בדיקה זו היא לבחון את הרעש החשמלי, הסטייה של המדידים ואת החישובים שהמערכת מבצעת (לדוגמה מאמצים, ממוצע תזוזות ועוד). בנוסף, בדיקה זו נועדה כדי לבחון כי מצב סטטי בו ידוע בוודאות שאין תזוזה, המדידים לא מצבעים על תזוזה כלשהי הנובעת מבעיה חשמלית. במהלך בדיקה זו כל המערכת מורכבת בשלמותה ומוכנה לביצוע ניסוי. מערכת הבקרה מופעלת ללא המשאבה ההידראולית. במצב זה מבוצע מעקב בזמן אמת על תזוזות

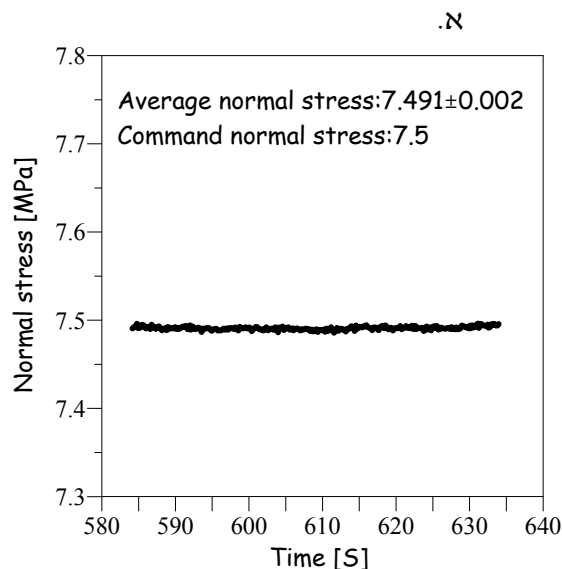
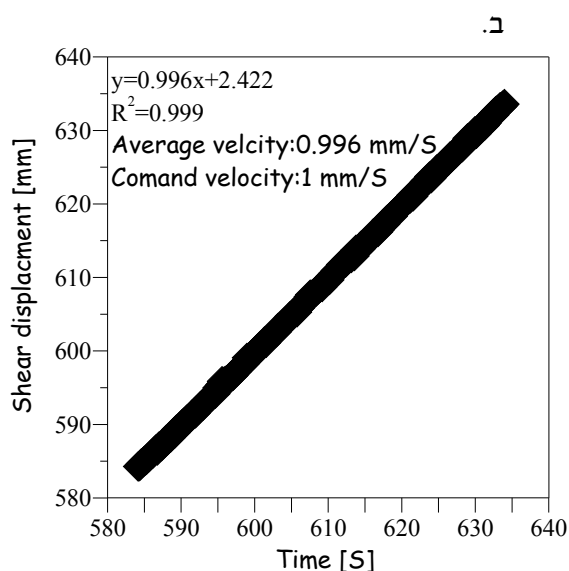
המדדים. בתרשים 23 מוצגת דוגמה לבדיקה סטטית של מדי התזוזה האופקיים (Y_a, Y_b) והממוצע ביניהם (Y_{ave}). ניתן לראות כי המדדים אינם מצבעים על תזוזה כלשהי והרעש החשמלי האינהרנטי הוא קטן מטווח המדידה ($>1 \cdot 10^{-3} \mu m$).



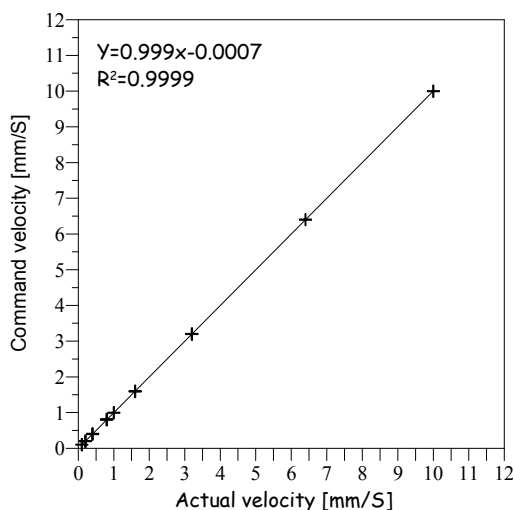
תרשים 23. דוגמה לבדיקה סטטית של מדי התזוזה האופקיים והממוצע שלהם.

אימות המשתנים שהוכתבו במהלך הניסוי

מהירות ההחלקה והמאמץ הנורמאלי המוכתבים הינם גורם משמעותי המשפיע על מקדם החיכוך. שינויים רגועים, לא רצויים של המהירות או המאמץ נורמאלי הנגרמים מסיבות שונות עלולים להוביל למסקנות שגויות. כדי להבטיח במהלך הניסויים שלא היו שינויים כאלה ולבחון את המהירות והמאמץ הנורמאלי האמיתיים, בוצע בקרה על נתוני הבדיקה. בכל ניסוי, נבדקה וחושבה המהירות האמיתית (ממוצעת) של המדדים האופקיים (עליהם היה ערוץ השליטה) וכן המאמץ הנורמאלי. לאחר מכן נבדקו ערכים אלו והשוו לערכים שהוכתבו בממשק הבקרה. לא הייתה התחשבות בתוצאות ניסויים שבהם היה פער גדול בין הערכים שהוכתבו לבין הערכים שהיו בפועל. תרשים 24 מציג דוגמה עבור חישוב המהירות הממוצעת ובדיקה של המאמץ הנורמאלי במהלך ניסוי בודד. מבדיקות אלה עולה כי הסטייה בין המהירות המוכתבת לבין המהירות הממוצעת היא $0.004 \mu m/S$ והסטייה במאמץ הנורמאלי היא $\pm 0.02 MPa$ לאורך מהלך הניסוי. בנוסף, בדיקת המהירות הממוצעת מראה כי מהירות ההחלקה נשמרת קבועה לאורך כל הניסוי ואין שינויים פתאומיים במהירות. תרשים 25 מציג בדיקה גראפית של ההבדלים בין המהירות המוכתבת בממשק הבקרה לבין המהירות הממוצעת במהלך ניסוי שלם של שינויי מהירות. בדיקות אלו, בכל ניסוי וניסוי, מראות כי מערכת הבקרה והשליטה עובדות בצורה מדויקת.



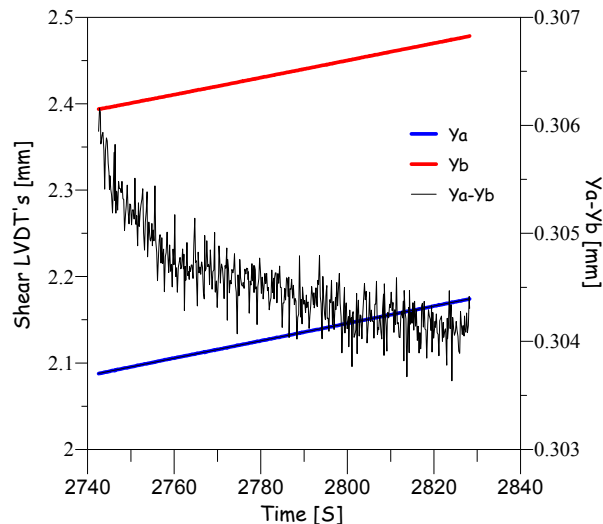
תרשים 24. דוגמה לבדיקת תנאי הניסוי השונים במקטע בודד בבדיקה vsonf4. א. בדיקת המאמץ הנורמאלי וחישוב מאמץ נורמאלי ממוצע במהלך הבדיקה. ב. חישוב גרפי של מהירות החלקה הממוצעת.



תרשים 25. מהירות החלקה מוכתבת (command velocity) כנגד המהירות הממוצעת בפועל (actual velocity). ניתן לראות כי ישנה התאמה טובה בין המהירות האמיתית למהירות המוכתבת.

בדיקת התנועה של הבלוק העליון ויצירה של מומנטי פיתול

במערכת גזירה הישירה על מישור בודד הנמצאת בראשותנו, הגיאומטריה אינה מבטיחה שהמישור העליון יחליק על גבי המישור התחתון בצורה מקבילה, ללא סיבוב הדוגמה ויצירת מומנט פיתול. בכדי לבדוק זאת, נבדקה בצורה מפורטת התזוזה של שני המדידים האופקיים (Ya, Yb). תזוזה לא מקבילה או שינוי בגודל ההפרש בין שני המדידים מעידים על סיבוב של הדוגמה. תרשים 26 מדגים בדיקה של תזוזת המדידים וההפרש ביניהם. כאשר ההפרש משתנה ביותר מ-5% מסך כל כמות התזוזה של המדיד לא הייתה התחשבות בתוצאות. יש לציין כי בבדיקות רבות בהן נצפה שהתנועה של הדוגמה לא הייתה מקבילה והיה רכיב סיבובי גדול בתנועה, מאמץ הגזירה ומקדם החיכוך לא הגיעו למצב עמיד או שהתקבלה החלקה לא יציבה.



תרשים 26. תזוזת מדי התזוזה האופקית לאורך ניסוי בודד (ציר אנכי שמאלי). ההפרש בניהם (קו שחור ציר אנכי שמאלי) מתייצב על ערך הקטן מהרעש החשמלי, דבר המעיד על תזוזה מקבילה של הדוגמה ללא רכיב סיבובי.

3.1.5. תכנון וביצוע הניסויים.

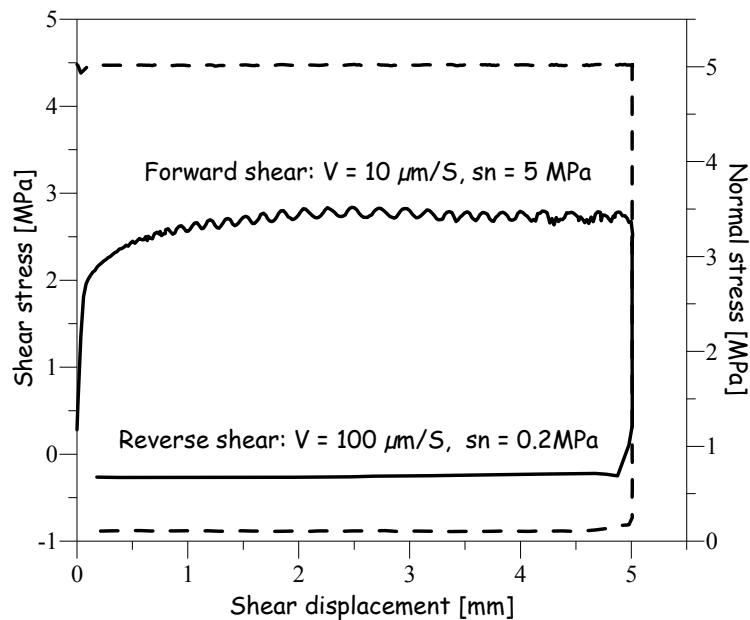
במהלך המחקר, בוצעו מספר סוגים של ניסויי גזירה ישירה : עצירות קצובות, שינוי מהירות תוך כדי החלקה, שינוי מידי במאמץ הנורמאלי במהלך החלקה, ניסויי גזירה במטרה למצוא את קריטריון קולומב ושינויים איטיים של המאמץ הנורמאלי במהלך החלקה (מטרת ומהלך הניסויים יפורטו בפרק). כל ניסוי מחולק למקטעים (segments), כל מקטע הינו שלב בו מעגל הגזירה והמעגל האנכי מבצעים פעולה מסוימת. בכל שינוי של סוג הפעולה (באחד מהמעגלים) מוגדר מקטע חדש בניסוי. הגדרת מקטעי הניסויים במערכת הבקרה Terra TEST V 7.2 יכולה להתבצע בשתי שיטות :

תכנות כל המקטעים מראש. במקרה זה הניסוי "רץ" מתחילתו ועד סופו ללא התערבות של המפעילים. שינוי נתוני הניסוי במהלך הבדיקה בזמן אמת. כל שינוי זהו מקטע הנרשם בפלט הנתונים של הניסוי. השיטה הראשונה מאפשרת לחזור על ניסויים בצורה מדויקת ולקבוע זמנים קבועים עבור כל מקטע. לעומת זאת, השיטה השנייה מאפשרת לראות את התוצאות בזמן אמת ולהגיב בהתאם. בניסויים כמו עצירות קצובות בהם המשתנה החשוב הוא זמן של המקטעים, הניסויים בוצעו בשיטה הראשונה, בשאר הניסויים בהם היה חשוב לראות כי מאמץ הגזירה הגיע למצב עמיד, השינויים של הפרמטרים השונים בוצעו במהלך הניסוי.

החלקה ראשונית של המשטח

מרבית ניסויי הגזירה אשר בוצעו, בדקו את מקדם החיכוך במצב עמיד. בבדיקות גזירה ישירה שבוצעו במחקר זה ועל ידי חוקרים אחרים (Hong & Marone, 2005) הראו כי מקטע הגזירה הראשון, בניסוי, מאופיין בשתי תופעות :

- מרחק החלקה הנדרש כדי להגיע למצב עמיד גדול בהרבה ממקטעים שאינם ראשוניים.
 - החלקה לא יציבה (stick slip) המאופיינת בקפיצות וירידות מהירות של מאמץ הגזירה.
- יתכן שתופעות אלו נגרמות מכיוון שהממשק בין הבלוקים נקי לחלוטין ללא חומר מרוסק. הצטברות חומר בין הבלוקים (gouge) כתוצאה מגזירה של גבשושיות ממתן תופעות אלו. בכדי להימנע מתופעות אלו ולהגיע לתנאי התחלה זהים בכל הניסויים בוצע הליך מקדים לפני כל ניסוי. בהליך זה, המשטח עליו מתבצעת החלקה מנוקה באמצעות לחץ אוויר ומבוצעת החלקה ראשונית. בהחלקה זו, מבוצעת גזירה לפניים במהירות של $10 \mu\text{m}/\text{S}$ תחת מאמץ נורמאלי של 5 MPa למרחק של 5 mm וגזירה לאחור, לנקודת ההתחלה, במהירות של $100 \mu\text{m}/\text{S}$ תחת מאמץ נורמאלי קבוע של 0.2 MPa (תרשים 27). לאחר הליך זה מבוצע הניסוי אשר תוכנן מראש.



תרשים 27. הגזירה ראשונית שבוצע לפני כל ניסוי. מאמץ גזירה (קו רציף - ציר אנכי שמאלי) ומאמץ נורמאלי (ציר אנכי ימני - קו מקוקו) כנגד תזוזת גזירה.

3.1.6. פלט הבדיקות ועיבוד הנתונים.

קובץ נתונים

קובץ הנתונים המתקבל לאחר הבדיקה מכיל שלושה סוגי נתונים:

- נתונים כללים של המערכת כגון קבועי הכיול בעת הניסוי, סוג יחידות המדידה ושטח הדוגמה.
- נתונים אשר הוזנו עבור כל מקטע בממשק המשתמש: מספר סידורי, זמן התחלה, ערוצי שליטה (עבור כל מעגל), מהירות, טווח יעד, נתוני בקרה (PID) ותדירות איסוף הנתונים.

- נתוני המדידה שהינם החלק העיקרי. נתונים אלו כוללים נתונים שנמדדים ישירות מהמדידים ונתונים המחושבים בצורה אוטומטית על ידי התוכנה. פירוט נתוני המדידה מוצג בטבלה 1. ניתוח התוצאות התבצע בעיקר בצורה גראפית. מקטעים לא רלוונטיים כמו מקטע העמסה ראשוני או גזירה לאחור הושמטו. בכדי להתמקד על מקטעים ספציפיים (לדוגמה נקודה של שינוי מהירות או מאמץ) אותרו מקובץ הנתונים נקודות הזמן הרלוונטיות, שרטטו ונבחנו בפרוט.

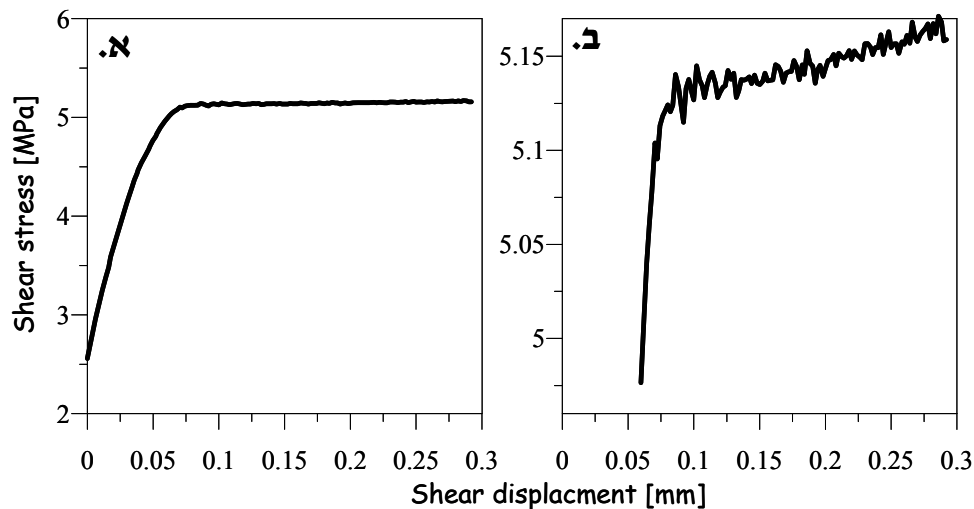
טבלה 1. פרוט הנתונים המחושבים והנמדדים הנמצאים בפלט הנתונים

סימון	ערוץ	
Time	זמן רץ מתחילת הבדיקה	
Fx	מד עומס אנכי	נמדד
Fy	מד עומס גזירה	
Sy	מד תזוזה על בוכנת הגזירה	מחושב
Sx	מד תזוזה על בוכנה האנכית	
Ya	מד תזוזה – גזירה	
Yb	מד תזוזה – גזירה	
Xa	מד תזוזה – אנכי	
Xb	מד תזוזה – אנכי	
Xc	מד תזוזה – אנכי	
Xd	מד תזוזה – אנכי	
Yave	ממוצע מדי תזוזה אופקיים	
Xave	ממוצע מדי תזוזה אנכיים	
Ty	מאמץ גזירה	
SigX	מאמץ נורמאלי	

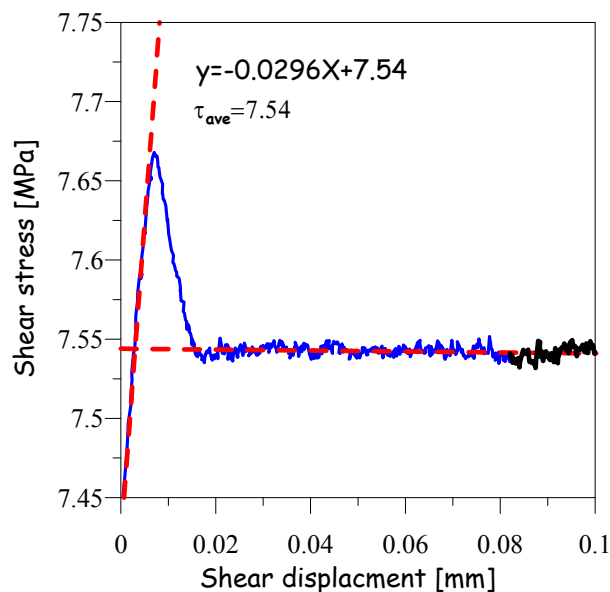
הגדרת מצב עמיד

ברוב בדיקות הגזירה המשתנה הנבדק הינו מקדם החיכוך או מאמץ הגזירה במצב עמיד. במצב עמיד המשתנה הנבדק קרי מקדם החיכוך קבוע בזמן. כאשר בוחנים אם מקדם החיכוך או מאמץ הגזירה נמצאים במצב עמיד נראה כי הגדרה זו תלויה ברזולוציה בה בוחנים את הנתונים ובמרחק ההחלקה (תרשים 28). בעיה נוספת בעיבוד הנתונים היא חישוב ערכו של מאמץ הגזירה (במידה והוא עומד בקריטריון של הגעה למצב עמיד). בעיתיות זו, בקביעה מהו מצב עמיד וערכו, נפתרה על ידי הגדרת קריטריונים והליך ביצוע אחיד לכל הניסויים. מצב עמיד עבור מהירות הקטנה מ- $1 \mu\text{m}/\text{S}$ נבדק על מרחק החלקה הגדול מ- 1 mm (100 שניות של החלקה). בכדי לבדוק האם זהו מצב עמיד בוצע התאמת קו ישר לשני חלקי הבדיקה (חלק בו יש מצב עמיד, וחלק בו ישנה עליה במאמץ הגזירה). שיפוע הקו המותאם לחלק של המצב העמיד הינו השינוי של מאמץ הגזירה ביחס לתזוזה (מאמץ/אורך). שיפוע זה הינו הממד לקביעת המצב העמיד. במידה והשיפוע גדול $\pm 0.07 \text{ MPa}/\text{mm}$ המקטע הוגדר שלא במצב עמיד. הערך של

מאמץ הגזירה במצב העמיד הינו הממוצע של נתוני מאמץ הגזירה מחלקו האחרון של המקטע (10% מסך כל החלקה) (תרשים 29).



תרשים 28. דוגמה לבעייתיות בקביעה האם מאמץ הגזירה הגיע למצב עמיד או לא. שני האיורים מציגים את אותו ניסוי. בתרשים א מוצג מאמץ הגזירה (ציר y) בסקאלה גדולה ובה נראה שמאמץ הגזירה הגיע למצב עמיד. בתרשים ב מוצגת התמקדות של מאמץ הגזירה בטווח מאמצי גזירה קטן ונראה שמאמץ הגזירה לא הגיע למצב עמיד.



תרשים 29. אופן בדיקת מצב עמיד של מאמץ הגזירה. הקווים המקווקווים הם התאמת קו ישר לשני חלקי הבדיקה. ערכו של מאמץ הגזירה במקטע זה הינו ממוצע של החלק המודגש.

3.2. בדיקות ואפיון רמת החספוס של הדוגמאות.

כפי שצוין בחלק 3.1.3 בהכנת המדגמים התקבלו רמות חספוס שונות על ידי מספר שיטות ליטוש. אפיון ובחינה כמותית של ההבדלים בין סוגי המשטחים השונים נעשה באמצעות מד חספוס (profilometer) Zygo-NewView 5000 באדיבות חברת "רותם תעשיות". מכשיר זה מודד את הטופוגרפיה של פני

השטח של הדוגמה על ידי סריקה באמצעות אור לבן ויצירה של אינטרפרומטריה - תמונה המייצגת את מהירות הגלים החוזרים מהדוגמה. האינטרפרוגרמה מצולמת על ידי מצלמת וידאו ועוברת עיבוד. עיבוד התמונה מאפשר לקבל הדמיה תלת-ממדית (תרשים 30) ואפיונים כמותיים וסטטיסטיים של פני שטח. ההשוואה בין רמות החספוס השונות נעשתה באמצעות שלושה פרמטרים:

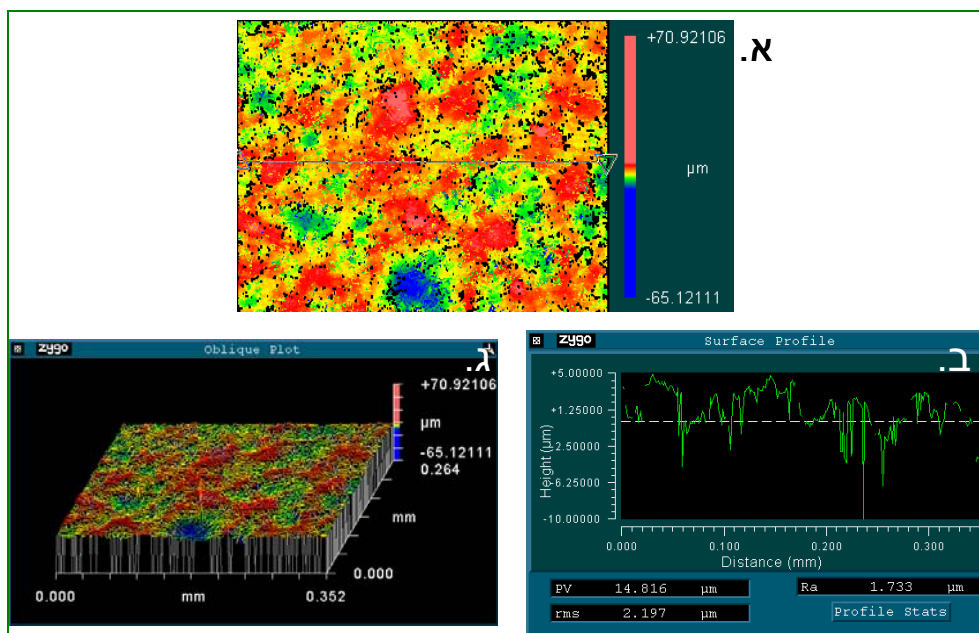
Ra - פרמטר סטטיסטי אשר מייצג את החספוס הממוצע של המשטח ומחושב על ידי מדידה של מרחק נקודות ממישור ייחוס וחלוקה במספר הנקודות (תרשים 31א)

$$R_a = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_N}{N} \quad .13$$

כאשר Y_N זהו המרחק של נקודה N ממישור הייחוס ו-N זהו מספר הנקודות הנמדדות.

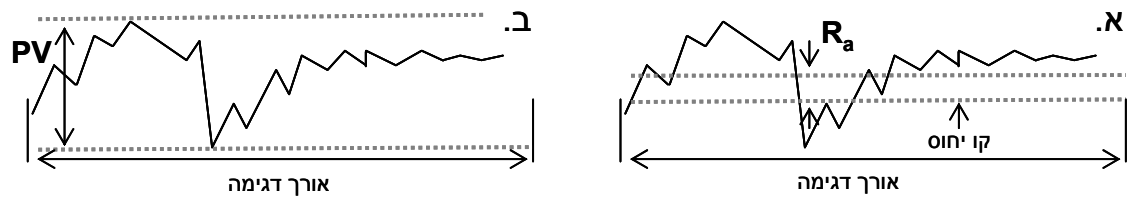
RMS (Root Mean Square) - פרמטר סטטיסטי השווה לשורש ריבועי של ממוצע המרחקים:

$$RMS = \sqrt{\frac{Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 + \dots + Y_N^2}{N}} \quad .14$$



תרשים 30. תוצאות אופייניות של מדידות חספוס באמצעות Zygo NewView 5000. א. הדמיה תלת-ממדית (תמונה במבט מפה). ב. פרופיל של הטופוגרפיה, מבוסס על חתך המוצג בתמונה א. ג. מבט אלכסוני על הדמיה תלת ממדית.

PV (Peak to Valley) - המרחק האבסולוטי בין הנקודה הנמוכה ביותר (עמק-valley) לבין לנקודה הגבוהה ביותר (שיא-peak) (תרשים 31ב)



תרשים 3.1. פרמטרים סטטיסטיים לאפיון רמת החספוס. (א) ממוצע החספוס (R_a). (ב) מרחק מרבי בין שיא לעמק (PV).

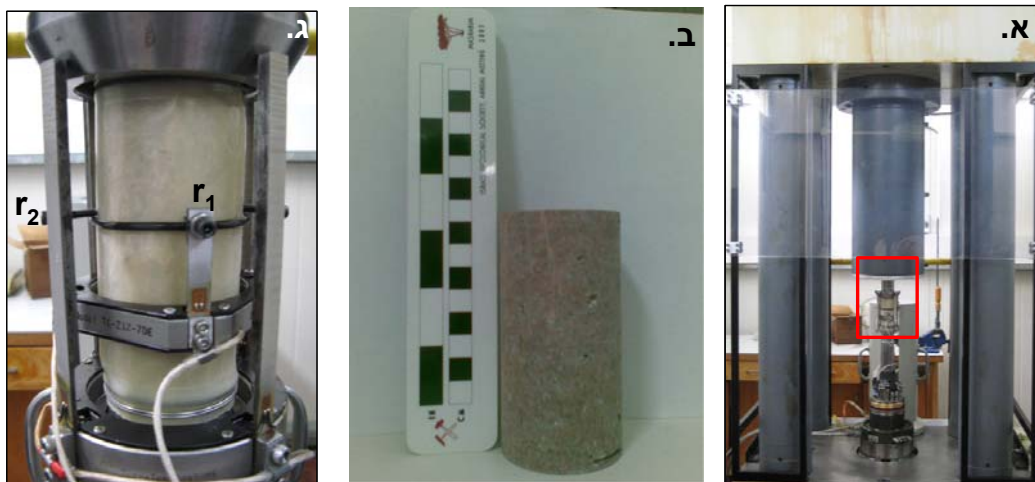
אפיון החספוס התבצע בכיוונים ניצבים על שני גדלים של דוגמאות: (א) דוגמאות קטנות בגודל 5×5 cm שהוכנו בשיטה זהה לדוגמאות שנבדקו במכשיר הגזירה הישירה. (ב) הדוגמאות אשר נבדקו במכשיר הגזירה. בדיקה של דוגמאות הקטנות מאפשרת לאפיין מספר רב של דוגמאות באותה רמת חספוס בכדי לבדוק עקביות ברמת החספוס המתקבלת. אפיון החספוס של הדוגמאות שנבדקו מאפשר לאפיין את החספוס של דוגמה מסוימת ולהשוות אותו לחספוס שמתקבל לאחר הגזירה. הבדיקה בשני כיוונים ניצבים בוחנת האם רמת החספוס אחידה בכל המשטח. לדוגמה, בדוגמאות SC התקבלה אנ-איזוטרופיה הנובעת מאופן ההכנה: בכיוון אחד רמת החספוס גבוהה יותר מאשר בכיוון הניצב. בדוגמאות אלו הוקפד שהכיוון בו החספוס גדול יותר יהיה מקביל לכיוון הגזירה.

3.3. בדיקות לחיצה חד ציריות

אפיון נוסף של התכונות המכאניות של גרניט תמנע בוצע באמצעות שלוש בדיקות לחיצה חד ציריות. בבדיקות אלו חושבו ונמצאו עבור גרניט תימנע קבועי האלסטיות, (מודול האלסטיות- E , ויחס פואסון- ν) חוזק הלחיצה החד צירי, והמאמץ בו מתחילים להיווצר מיקרו-סדקים (crack- σ_{cd}) initiation stress. מטרת האפיון היא לקבל מדדים להשוואה בין גרניט זה לסלעים אחרים וכן לקבוע את המאמץ האנכי המרבי שאפשר להפעיל על הדוגמה בבדיקות הגזירה הישירה מבלי שהסלע הרציף יכשל כתוצאה מהתכונות החוזק. מבחני הלחיצה התבצעו במכשיר לחיצה TerraTek FX-S-33090 (תרשים 3.2). מכשיר זה בנוי מבוכנת לחיצה המספקת כוח צירי מרבי של 1.4 MN ומתא לחץ המספק לחץ היקפי מרבי של 70 MPa. תא הלחץ והבוכנה האנכית מורכבים במסגרת העמסה בקשיחות של $5 \cdot 10^9$ N/m. מערכת הבקרה והשליטה הינה מערכת בקרת סרוו במעגל סגור, זהה למערכת הבקרה של מכשיר הגזירה, המאפשרת לשלוט על העיבורים והעומסים הצירים וההיקפיים הפועלים על הדוגמה. ניטור התזוזות הרדיאליות מתבצע באמצעות שני מדי תזוזה ליניאריים המורכבים בכיוונים ניצבים ישירות על הדגם (תרשים 3.2). התזוזות האנכיות נמדדות בעזרת מד תזוזה המורכב בכיוון הצירי. בעת הבדיקה, לא מופעל מאמץ היקפי ובוכנת הלחיצה מפעילה כוח אנכי בקצב מעוות קבוע של $1 \cdot 10^{-5} \text{ S}^{-1}$ עד להגעה לחוזק הלחיצה ($\sigma_3=0$)

המרבי ושבירתו של הדגם. מערכת הבקרה מתוכננת כך שכאשר הדגם מגיע למעוות גדול מאוד ($\epsilon > 0.001$) קרי שבירה, הבוכנה עולה במהירות באופן אוטומטי והמאמץ המרבי רגע לפני השבירה נשמר בקובץ הבדיקה. דגמי הסלע הוכנו בהתאם לתקן ASTM-D4553:

- דגם גלילי (תרשים 332) בקוטר 54 מ"מ ואורך של כ-108 מ"מ (יחס אורך קוטר של כ-2:1).
- פני השטח עליונים ותחתונים מלוטשים במלטשת שטח (SG) לדרגת חספוס של 0.025 מ"מ כאשר הסטייה מניצבות בין קצוות המשטח אינה עולה על 0.25° .
- יבוש הדגמים בטמפרטורה של 100°C למשך 24 שעות (בהתאם לתקן ASATM-D2216).



תרשים 332. מכבש לחיצה טריאקסיאלית. א) מסגרת העמסה והדגם מורכב במכבש. ב) דגם גלילי לפני הכנסה למכבש הלחיצה ג) הגדלה של הדגם (ריבוע בתמונה א) במכבש הלחיצה והמדידים הרדיאלים (r_1, r_2) על הדגם.

חישוב הפרמטרים האלסטיים בוצע באופן הבא:

מודול האלסטיות (E) - היחס בין המאמץ והעיבור הצירים:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon_{axial}} \quad .15$$

יחס פואסון (ν) - היחס בין העיבור הצירי לעיבור הרדיאלי:

$$\nu = \frac{\epsilon_{axial}}{0.5 \cdot (\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2})} \quad .16$$

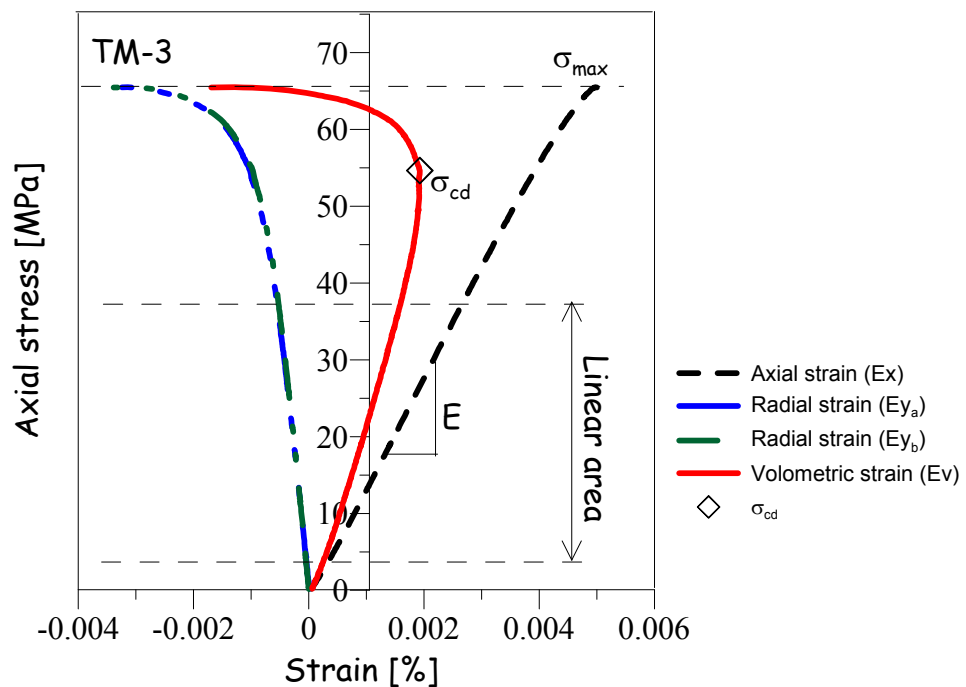
הפרמטרים האלסטיים מחושבים רק במקטע בבדיקה בו המעוות הינו אלסטי ליניארי (תרשים 33). בכדי לאתר את חלק זה, בוצע התאמת קו ישר וחישוב מקדם קורלציה עבור הנתונים. עבור מקדם הקורלציה, הוגדר ערך סף של 0.998, כאשר מתקבל מקדם קורלציה נמוך מערך סף זה, נקבע שהמעוות אינו אלסטי ליניארי. נקודת ההתחלה, עבורה בוצעו התאמת הקו הישר, הינה קבועה והיא 2 MPa.

חוזק לחיצה חד צירי (σ_c) - חוזק הלחיצה החד צירי :

$$\sigma_c = \frac{P_{peak}}{A} \quad .17$$

כאשר P_{peak} כוח הלחיצה המרבי ו- A השטח העליון של הדגם.

מאמץ בו מתחילים להיווצר מיקרו-סדקים (σ_{cd}) - בעת לחיצה חד צירית, לפני שמתרחש מעוות גדול מאוד אשר מגדיר את החוזק הלחיצה החד צירי, נוצרים מיקרו-סדקים. בעת ההעמסה הראשונית, לפני שמתפתחים הסדקים, המעוות הינו אלסטי ליניארי ונפח הדוגמה קטן. כאשר מתחילים להתפתח מיקרו-סדקים העיבור הנפחי (ε_v) משנה את סימנו ונפח הדוגמה גדל ($\varepsilon_v = \varepsilon_a + \varepsilon_{r1} + \varepsilon_{r2}$), עיבור צירי ו- $\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}$ עיבורים רדיאליים בכיוונים ניצבים) (Brace, 1978). **מכיוון שהמאמץ בו מתחילים להתפתח סדקים, לעיתים קטן בצורה משמעותית מחוזק הלחיצה החד צירי (σ_c)** (Martin & Chandler, 1995) זהו המאמץ המרבי שהופעל על הדוגמה בעת ניסויי גזירה ישירה. בכדי למצוא את σ_{cd} שורטט העיבור הנפחי כנגד מאמץ הלחיצה החד צירי ואותרה הנקודה בה שיפוע העקום משנה את סימנו (תרשים 33).



תרשים 33. דוגמה לתוצאות בדיקה חד צירית TM-3, האזור הליניארי ומציאת מודול האלסטיות של החומר.

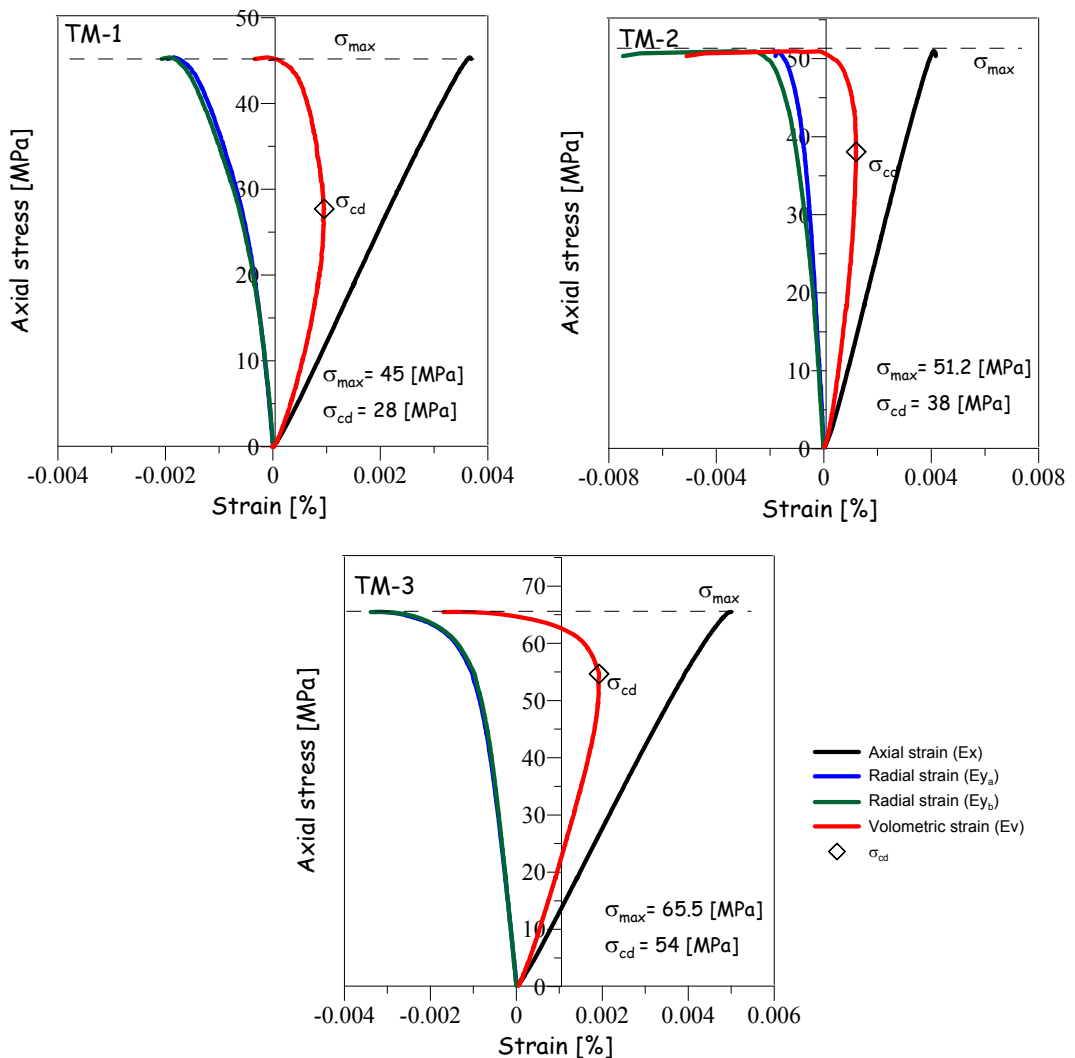
4. תוצאות

4.1. בדיקות מקדימות לניסויי גזירה ישירה

בחלק זה יוצגו תוצאות מניסויי לחיצה חד ציריים ואפיון סטטיסטי וכמותי של רמות החספוס השונות. תוצאות בדיקות אלו הינם שלב מקדים לבדיקות הגזירה המהוות את החלק העיקרי של מחקר זה.

4.1.1. בדיקות לחיצה חד צירית

שלוש בדיקות לחיצה חד צירית בוצעו על דגמים שהוכנו מחומר זהה לחומר שניבדק בבדיקות הגזירה (תרשים 34). הקבועים האלסטיים (E , ν), חוזק הלחיצה ומהמאמץ בו התחילו להתפתח סדקים (σ_{cd}) מוצגים בטבלה 2.



תרשים 34. תוצאות של שלוש בדיקות חד- ציריות של גרינט תימנע. פרוט של כל הערכים אשר חושבו מבדיקות אלו מפורטים בטבלה 2.

טבלה 2. הערכים האלסטיים שהתקבלו מבדיקות חד ציריות (TM-1,2,3):

E [GPa]	ν	σ_{cd} [MPa]	σ_{max} [MPa]	#
12.9	0.44	27.72	45.3	TM-1
13.14	0.4	38.03	51.2	TM-2
13.7	0.35	54	65.49	TM-3
13.24±0.41	0.41±0.02	39.91±13.2	54±10.38	ממוצע

למרות שכל הדוגמאות הוכנו מאותו בלוק טווח הערכים אשר התקבל עבור σ_{max} ו- σ_{cd} גדול (סטיית תקן של 20-30%). יתכן והתפלגות תוצאות זו נובעת מהמצאות סדקים סגורים שלא נראים בעין. יתכן ובדוגמאות TM-1,2 מספר הסדקים היה גדול והכשל התרחש עליהם. לעומת זאת בדוגמה TM-3 לא היו סדקים ולכן התקבל חוזק לחיצה גבוהה יחסית לשאר הדוגמאות. עבור הקבועים האלסטיים טווח הערכים שהתקבל קטן יותר, סטיית תקן של 4.8% ו 3% עבור יחס פואסון ומודול האלסטיות, בהתאמה. פיזור התוצאות הנמוך של הקבועים האלסטיים מתקבל מכיוון שהם נמדדים מהחלק בו היה מעוות אלסטי ליניארי, כלומר לפני שהייתה תזוזה על הסדקים קיימים. ניתן לראות כי היחס בין σ_{max} ו- σ_{cd} גדל ככול ש- σ_{max} גדל והוא 0.61 עבור TM-1 ו-0.82 עבור TM-3. המאמץ הנמוך ביותר מבין שלושת הבדיקות בו התחילו להופיע סדקים הוא 27 MPa, ולכן זהו המאמץ ממנו נגזר המאמץ המרבי שהופעל בבדיקות הגזירה הישירה. מאמץ הלחיצה המרבי שהופעל על סלע זה, בבדיקות גזירה ישירה הינו 15 MPa, וזאת בכדי להבטיח שלא יתפתחו סדקים בבלוקים היוצרים את הממשק עליו מתרחשת ההחלקה.

4.1.2 אפיון החספוס של משורי הגזירה.

אפיון רמת החספוס התבצע באמצעות פרופילומטר Zygo NewView-5000 המצוי במעבדות חברת רותם, על שני גדלים של דוגמאות כמתואר בפרק 3.2. האפיון הסטטיסטי והכמותי בכיוונים ניצבים של הדוגמאות הקטנות והדוגמאות אשר נגזרו, מוצג בטבלאות 3 ו-4 ומסוכם תרשים 35. מהתוצאות עולה כי קיים הבדל משמעותי, בכל שלושת הפרמטרים, בין רמות החספוס השונות כאשר סדר החספוס מהחלק למחוספס הינו $SC, \#180, \#220$. רמת החספוס שתקבלה בדוגמאות הקטנות ובדוגמאות הגדולות חזרה על עצמה ולכן ניתן להסיק שתהליך הכנת רמות החספוס השונות עקבי ואינו מושפע מגודל הדוגמה. הדוגמאות אשר לוטשו באמצעות אבקת SiC הינן איזוטרופיות, כלומר רמת החספוס זהה בכיוונים שונים. לעומת זאת בדוגמאות SC, ישנה אנ-איזוטרופיה הנובעת מהניסור, כיוון אחד מחוספס בכ-40% מהכיוון

הניצב לו. השוני מתבטא בעיקר בפרמטרים הסטטיסטיים Ra ו-RMS. בבדיקות הגזירה, הוקפד שהכיוון המחוספס יהיה המקביל לכיוון הגזירה.

טבלה 3. נתוני אפיון החספוס של הדוגמאות המייצגות

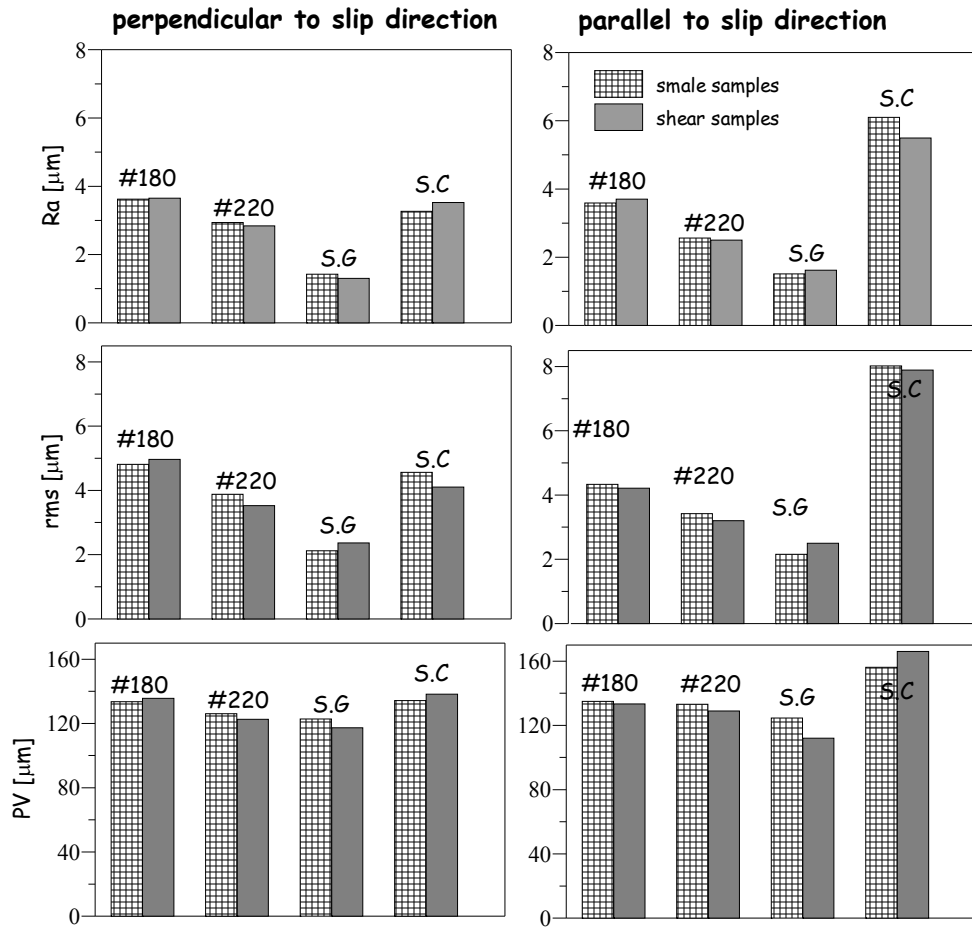
#	רמת חספוס	Ra		Rms		PV	
		ניצב	מקביל	ניצב	מקביל	ניצב	מקביל
1	S.C	3.341	5.344	3.465	5.829	137.743	227.415
2		3.376	7.25	6.695	5.453	138.978	142.926
3		4.316	4.593	3.179	4.385	137.699	184.56
	ממוצע	3.68	5.72	4.44	5.22	138.14	184.97
1	#180	3.39	4.08	4.30	5.25	132.29	135.02
2		3.48	3.98	4.46	5.28	131.10	131.93
3		3.42	3.95	4.46	5.00	134.25	130.87
	ממוצע	3.44	4.01	4.45	5.18	132.55	132.6
1	#220	2.08	2.27	3.15	3.07	119.19	124.82
2		2.73	2.80	3.15	2.95	124.64	124.82
3		2.34	2.45	2.74	3.00	120.52	115.25
	ממוצע	2.38	2.66	3.02	3.01	121.45	121.63
1	S.G	1.13	1.246	1.931	1.916	120.921	111.202
2		1.173	1.351	1.33	1.556	110.559	117.028
3		1.397	1.376	1.923	1.947	123.025	123.59
	ממוצע	1.23	1.33	1.728	1.81	118.17	117.27

טבלה 4. נתוני אפיון החספוס של הדוגמאות אשר נגזרו.

רמת חספוס	Ra		Rms		PV	
	ניצב	מקביל	ניצב	מקביל	ניצב	מקביל
S.C	3.52	5.49	166	7.89	138.26	135.69
#180	3.65	3.7	133.01	4.21	135.69	133.53
#220	2.84	2.5	128.96	3.42	122.56	126.07
S.G	1.3	1.51	112	2.5	117.26	122.794

השוואה בין רמת החספוס לפני גזירה ולאחרי גזירה מוצגת בתרשים 36. ההשוואה בוצעה על דוגמאות שעברו החלקה ראשונית וגזירה תחת עומס של 15 MP במהירות של $1 \mu\text{m/S}$ לאורך 5 mm. השוואה זו מראה כמצופה, ירידה ברמת החספוס בין הבדיקות. ההבדלים נכרים יותר בפרמטרים הסטטיסטיים (RMS ו-Ra) מאשר בפרמטר הכמותי (PV). חוסר ההבדל בפרמטר PV נובע מכך שפרמטר זה אינו מייצג

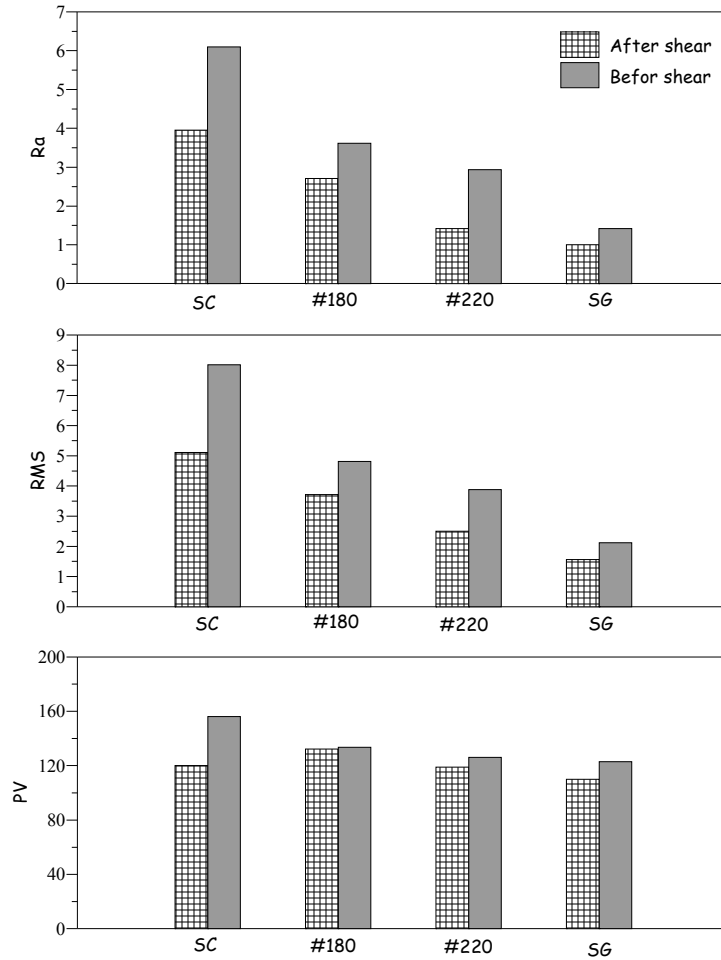
את כל המשטח אלה רק חלקים ממנו. בדוגמת SC המחוספסת, השינויים הינם בשיעור של כ-40%, לעומת משטחים שעברו ליטוש בהם ההבדלים היו בשיעור של 30%.



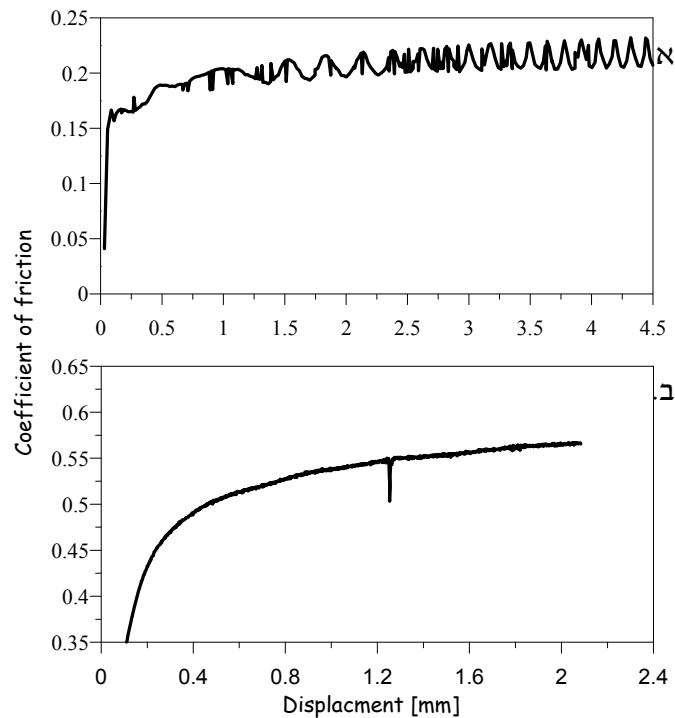
תרשים 35. מאפייני החספוס השונים של הדוגמאות המייצגות (small samples) (ממוצע של שלוש דוגמאות) ושל הדוגמאות שנגזרו (Shear samples) אשר הוגדרו עבור משטחי ההחלקה בשני כיוונים ניצבים.

יתכן ותצפית זו מסבירה תופעות של החלקה לא יציבה (stick-slip) שהתקבלה בעיקר במשטחים החלקים (תרשים 37א) ואת הצורך בהחלקה ראשונית של המשטחים. הירידה ברמת החספוס הינה שחיקה של הגבשושיות המלווה ביצירת חומר מרוסק (gouge) המצטבר בין הממשקים. יתכן והצטברות החומר גורמת לריסונה ולביטולה של ההחלקה הלא יציבה. במשטחים מחוספסים מצטבר יותר חומר מאשר במשטחים החלקים ולכן מתקבלת החלקה יציבה, גם ללא החלקה ראשונית. במשטחים החלקים ביותר (SG) אין מספיק גבשושיות שיכולו להיגזר ולייצר חומר בין הממשקים ולכן קשה להגיע למצב של החלקה יציבה בממשקים אלו. בכדי לאשש הנחה זו בוצעו שני ניסויי גזירה זהים (תרשים 37) על משטח SG. בניסוי אחד הונח חומר מרוסק בעובי של 2 mm על ממשק ההחלקה ובניסוי האחר ללא חומר מרוסק. בניסוי בו הוכנסה שכבה של חומר מרוסק לא התקבלה התופעה של stick-slip. לעומת זאת, במשטח בו לא

הוכנס חומר התקבלה החלקה לא יציבה. תצפית זו מסבירה מדוע נדרש לבצע החלקה ראשונית וכן מדוע התקבלה החלקה מסוג stick-slip בניסויים רבים בעיקר במשטחים חלקים, שלא אפשרה למדוד את מקדם החיכוך במצב עמיד.



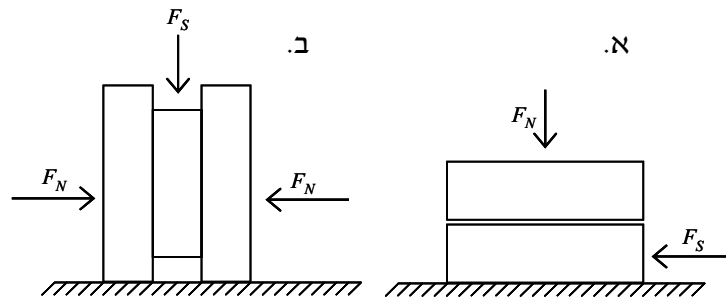
תרשים 36. השוואה בין מאפייני החספוס לפני הגזירה (עמודות אפורות) ואחריה (עמודות משובצות).



תרשים 37. ניסוי גזירה תחת מאמץ נורמאלי של 15 MPa ומהירות החלקה של $10 \mu\text{m/S}$. א. ללא חומר מרוסק (gouge), ב. עם חומר מרוסק (gouge) בעובי 2 mm בין הממשקים.

4.2. שחזור ניסויי קצב מצב (Rate & State) במערכת גזירה ישירה על מישור בודד.

ניסויי קצב-מצב, שבודקים את התלות של מקדם החיכוך במהירות ההחלקה ובגיל אוכלוסיית המגעיים, התבצעו עד כה במערכת גזירה כפולה (Double direct shear apparatus) (תרשים 38) (Dieterich, 1972;) (תרשים 38). במערכת מסוג זה הדוגמה מחליקה בין שני מישורים המפעילים מאמץ אנכי שווה. מכיוון שמאמץ הגזירה מופעל על שתי פאות הדוגמה באופן זהה, ניתן להניח כי הדוגמה הנמצאת באמצע זהה בצורה מקבילה לחלוטין ולא נוצרים מומנטי סיבוב על הדוגמה. כמו כן, ניתן להניח, במערכת מסוג זה, שפיזור מאמצי הגזירה הוא בקירוב סימטרי (לפחות בכיוון אחד). לעומת זאת, במערכת גזירה ישירה בודדת (Single direct shear apparatus) (תרשים 38) מופעל כוח אנכי בודד, מבוכנה יחידה, כאשר המישור התחתון חופשי לנוע באמצעות גלילים המונחים מתחתיו. מבנה מכבש מסוג זה אינו מבטיח שהתנועה היחסית בין שתי חלקי הדוגמה תהיה מקבילה לחלוטין כמו כן אין סימטריה בפיזור מאמצי הגזירה. יתרונותיה של מערכת זו על מערכת הגזירה הכפולה היא יכולת הבקרה הגבוהה על תזוזת הבוכנות והדוגמה.

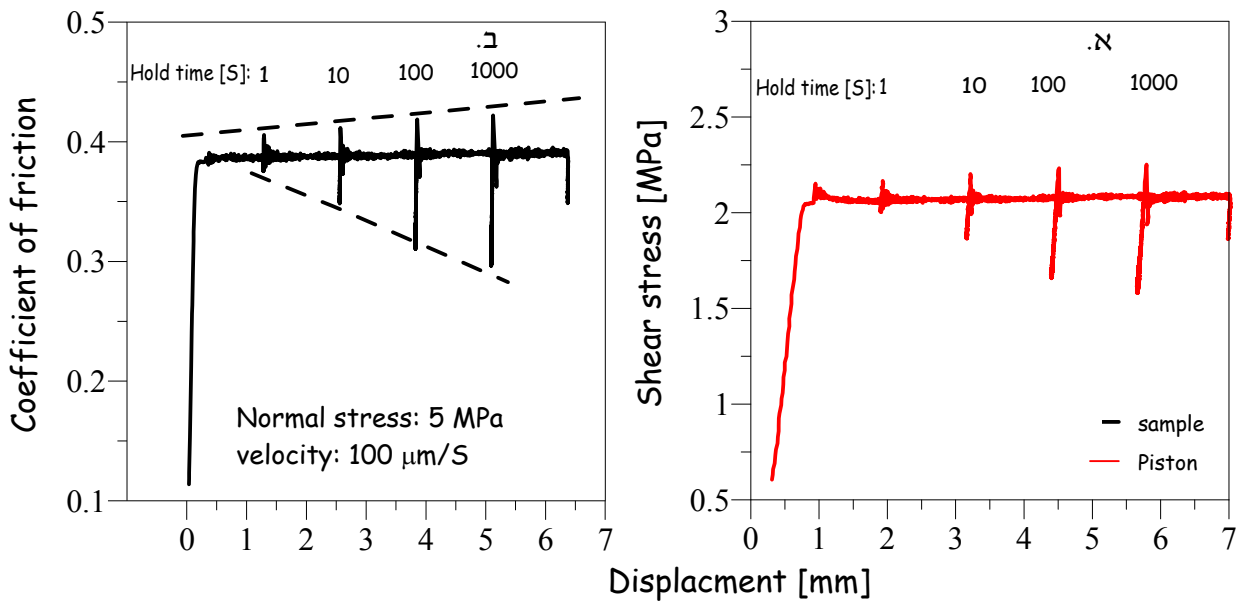


תרשים 38. מערכות גזירה ישירה א. מערכת גזירה ישירה בודדת. ב. מערכת גזירה ישירה כפולה.

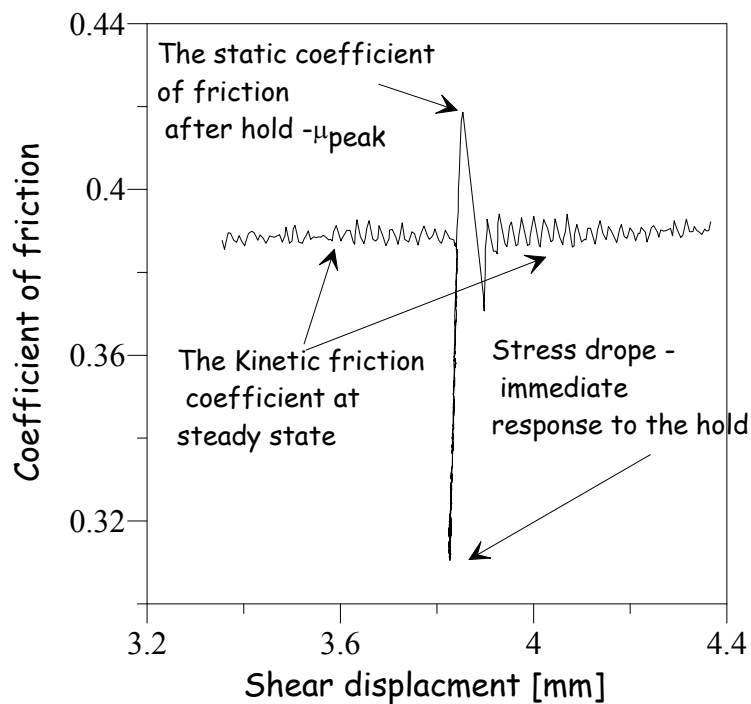
שלב ראשוני במחקר זה הוא חזרה על ניסויי קצב-מצב שנעשו במערכת גזירה כפולה. מטרת שלב ראשוני זה, היא לבחון את היכולות של מערכת הגזירה הישירה על מישור בודד בהשוואה למערכת הגזירה הכפולה. בחלק זה יוצגו תוצאות של שלושה סוגי ניסויים אשר שוחזרו בהצלחה ואפשרו את המשך המחקר.

4.2.1. עצירות קצובות - Slide-Hold-Slide (SHS)

בניסויים אלו נבחנה ההשפעה של זמן העצירה על מקדם החיכוך הסטטי. מהלך הניסוי בוצע בצורה זהה לניסויים קודמים (Dieterich, 1972; Dieterich & Kilgore, 1994). על הדוגמה מופעל מאמץ נורמאלי קבוע, בבקרת עומס (SigX). לאחר שהמאמץ הנורמאלי מגיע למאמץ המטרה שנקבע, מוכתבת מהירות גזירה קבועה, בבקרת תזוזה על מדי התזוזה האופקיים (Y_{ave}). כאשר מקדם החיכוך מגיע למצב עמיד, מוכתב למדי התזוזה האופקיים, לעצור לפרק זמן קצוב וידוע מראש. בתום זמן העצירה, מחודשת ההחלקה במהירות הראשונית. בכל ניסוי התבצעו מספר עצירות כאשר זמני העצירות שונים (תרשים 39). בכדי לראות בברור את התלות של מקדם החיכוך הסטטי בזמן העצירה, ההבדלים בין זמני העצירה הם בהבדלים של סדר גודל אחד לפחות. ניסויים אלו בוצעו מספר פעמים במהירויות החלקה של $50 \mu\text{m}/\text{S}$ ו- $100 \mu\text{m}/\text{S}$ על גרניט תימנע ועל קירטון. פירוט מהלכי הניסויים מוצג בטבלה 5. כתוצאה מעצירת הבוכנה ישנה תגובה מיידית של נפילת מאמץ הגזירה (ולכן ישנה גם ירידה במקדם החיכוך) (תרשים 39, 40). בסיום העצירה ולאחר חידוש ההחלקה, עולה מקדם החיכוך לערך הגבוה מערכו טרם העצירה. לבסוף, מתייצב מקדם החיכוך במצב עמיד חדש במרחק החלקה אופייני (תרשים 40). מתוצאות הניסויים עולה כי נפילת המאמץ המיידית והערך של מקדם החיכוך, בתום העצירה, תלויים בזמן העצירה. התלות של שתי תופעות אלו בזמן העצירה נובעת משני מנגנונים שונים. נפילת המאמץ הראשונית הינה תוצאה של מהלך בוכנת הגזירה ואלו מקדם החיכוך בתום העצירה הינו תוצאה של תופעה פיזיקאלית. במהלך הניסוי ערוץ הבקרה על התזוזה האופקית הוא על מדי התזוזה האופקיים.



תרשים 39. תוצאה אופיינית של ניסויי עצירות קצובות במהירות החלקה של $100 \mu\text{m/S}$ ומאמץ נורמאלי קבוע של 5MPa , זמני העצירה מצוינים באיור. א. מקדם החיכוך כתלות במרחק החלקה. הקווים המקווקווים מציינים את מגמת העלייה והירידה במקדם החיכוך כתוצאה מהעצירה וחיכוך המהירות אחריה. ב. תנועת בוכנת הגזירה כתלות במרחק החלקה. בזמן העצירות הבוכנה נעה אחורה במטרה שהדוגמה לא תזוז.



תרשים 40. התמקדות על מקטע בו ישנה החלקה, עצירה קצובה וחיכוך ההחלקה. לפני העצירה, מקדם החיכוך במצב עמיד, כתוצאה מעצירה ישנה נפילת מאמץ מיידית. בעת חידוש החלקה, מקדם החיכוך הסטטי גבוהה יותר ממקדם החיכוך במצב עמיד. לאחר מכאן מתייצב מקדם החיכוך למצב עמיד חדש.

כאשר מכתיבים למדידים לעצור בוכנת הגזירה נעה אחורה במטרה לעצור את תנועת הדוגמה (תרשים 39א). תנועה זו מתבטאת בירידת מאמץ הגזירה בזמן העצירה. ירידה זו נמשכת כל עוד בוכנת הגזירה נעה אחורה. בנוסף, נפילת מאמץ זו תלויה במהירות החלקה הראשונית, כאשר המהירות גבוהה, בוכנת

הגזירה נעה אחורה מהר יותר, בכדי שהדוגמה תעצור, ולכן נפילת המאמץ גדולה במהירות גבוהה מאשר במהירות נמוכה (תרשים 42). השינוי בגודלו של מקדם החיכוך בתום העצירה הינו תופעה פיזיקאלית בה שטח המגע האמיתי בין המשטחים משתנה בזמן כתוצאה מכניעה פלסטית של המגעים. תצפית זו נבחנה על ידי Dieterich ו Kilgore (Dieterich & Kilgore, 1994) באמצעות מדידת שטח המגע האמיתי בזמן העצירה. בניסויים אלו נראה בבירור ששטח המגע האמיתי ומקדם החיכוך תלויים בלוגריתם של זמן העצירה. ניתוח כמותי של הניסויים מראה, בדומה לתוצאות ניסויים קודמים שהוזכרו, שמקדם החיכוך הסטטי (μ_{peak}) וההפרש בין מקדם החיכוך במצב דינאמי (μ_d) למקדם החיכוך הסטטי, $\Delta\mu$ ($\mu_d - \mu_s$) תלויים בלוגריתם של זמן העצירה (תרשים 41). שיפוע העקומה המוצגת בתרשים 41 מייצג את שיעור ריפוי המגעים (B) ותלוי בתכונות החומר. קבועי החומר וקבועי ההתאמה (קורלציה) עבור כל ניסוי וניסוי מוצגים בטבלה 5.

טבלה 5. סיכום מהלך ותוצאות של ניסויי עצירות קצובות

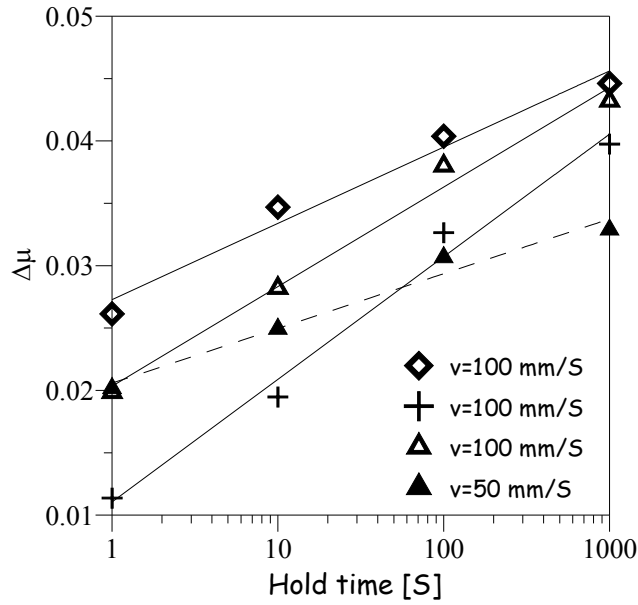
ניסוי	רמת חספוס	מאמץ נורמאלי [MPa]	מהירות החלקה [$\mu\text{m}/\text{S}$]	זמני עצירה [S]	B	R^2
Shs1_a	#180	5	50	1,10,100,1000	0.002	0.973
Shs2	#180	5	100	1,10,100,1000	0.004	0.988
Shs3	#180	5	100	1,10,100,1000	0.004	0.986
Shs3	#180	5	100	1,10,100,1000	0.003	0.975
Shs5_c	סדק טבעי	5	100	1,10,100,1000	0.008	0.986

במספר ניסויים על גרניט תימנע במהירות החלקה של $100 \mu\text{m}/\text{S}$ התקבלו ערכי B דומים (0.003-0.004) במקדמי התאמה גבוהים המצביעים על עקביות ואמינות של בדיקות אלו. ערכי הקבוע B שהתקבלו עבור הגרניט תימנע דומים לערכים אשר התקבלו בניסויים קודמים עבור Westerly Granite (טבלה 6).

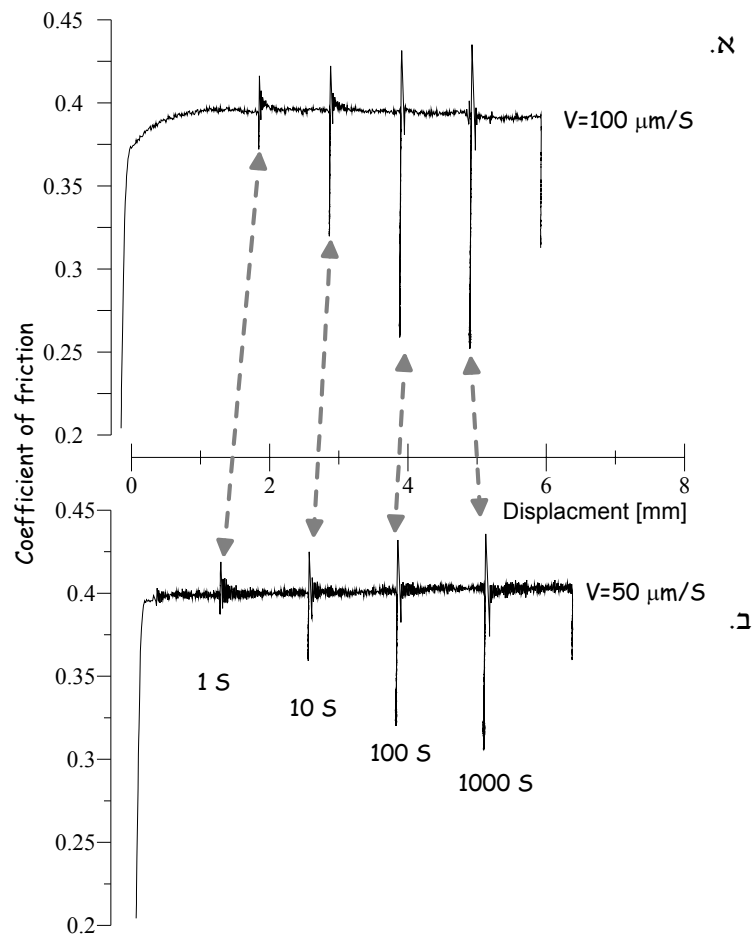
טבלה 6. ערכי קבוע הריפוי (B) מניסויים קודמים

מקור	B	סוג חומר
מחקר נוכחי	0.036 (ממוצע)	גרניט תימנע
Nakatani and Mochizuki 1996	0.004-0.011	Westerly Granite
Dieterich 1981	0.004-0.003	Westerly Granite
Dieterich 1972	0.004-0.003	Westerly Granite

פיזור התוצאות והשוני בין הניסויים השונים (נקודת החיתוך עם ציר ה-Y נגרם, כפי הנראה, עקב שוני בתנאי ההתחלה וההחלקה עליהם קשה לשלוט, כגון כמות החומר המצטבר בין המשטחים, שינויים מקומיים בטופוגרפיה של המשטחים, טמפרטורה ולחות. במהירות $50 \mu\text{m}/\text{S}$, השינויים במקדם החיכוך, הן נפילת המאמץ והן מקדם החיכוך הסטטי קטנים ביחס זהה להבדל בין המהירויות (תרשים 42, טבלה 5).



תרשים 4.1. הפרש בין מקדם החיכוך הסטטי לבין מקדם החיכוך במצב עמיד ($\mu\Delta$) כתלות בזמן העצירה. הקווים הרציפים מציינים ניסויים בהם מהירות ההחלקה היא $100 \mu\text{m/S}$, הקו המקווקו מציינ מהירות החלקה של $50 \mu\text{m/S}$.

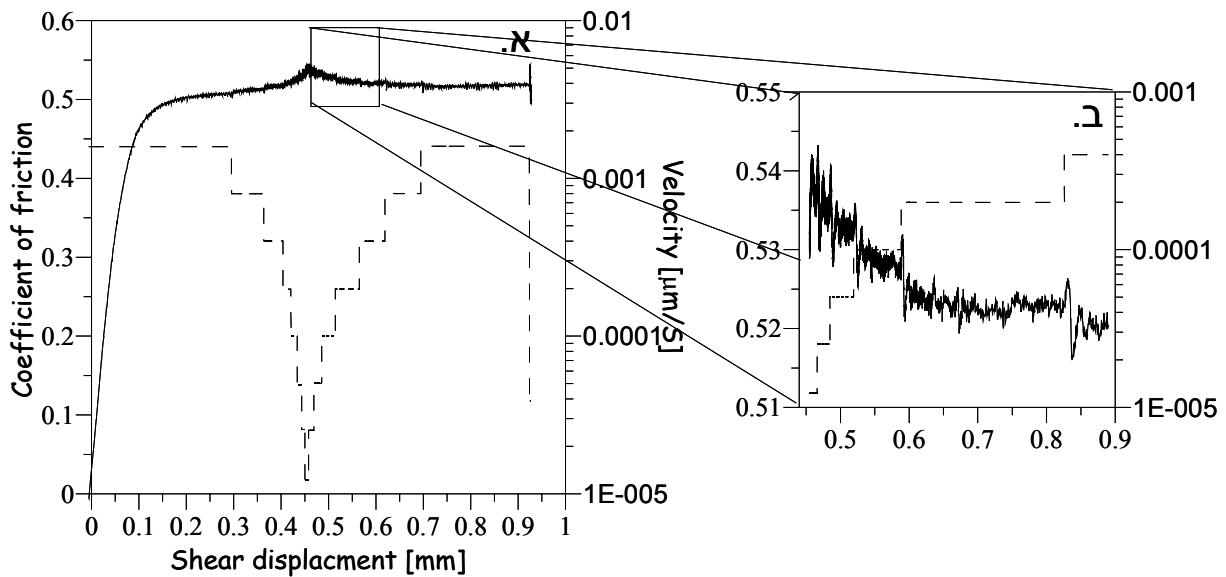


תרשים 4.2. מקדם החיכוך כנגד מרחק ההחלקה בניסויי עצירות קצובות תחת מאמץ נורמאלי קבוע של 5 MPa . (א) מהירות החלקה של $100 \mu\text{m/S}$ (ב) מהירות החלקה של $50 \mu\text{m/S}$. ניתן לראות כי במהירות הגבוהה נפילות המאמץ והשינוי מקדם החיכוך גדולים יותר מאשר במהירות הנמוכה.

תצפית זו נבחנה בעבר ומשמעותה היא שהתחזקות שברים גיאולוגים, בזמן שהם לא מחליקים, כתוצאה מריפוי המגעים תלויה במהירות ההחלקה של השבר לפני העצירה ולכן יתכן שקצב הריפוי של שברים אינו קבוע במהלך המעגל הסיסימי (Marone, 1998a). בדוגמת הקרטון, התקבל קבוע ריפוי הגבוהה ביותר (0.008). ערך זה תלוי בסוג החומר וברמת החספוס הראשונית ולכן לא ניתן להשוותו לערכים שתקבלו עבור הגרניט. בחינה של ההבדלים בערכי מקדם החיכוך בעת ההחלקה בין שתי המהירויות, מראה את תלותו במהירות: במהירות של $100 \mu\text{m/S}$ מקדם החיכוך במצב עמיד (ממוצע) הינו 0.39 בעוד שבמהירות $50 \mu\text{m/S}$ מקדם החיכוך במצב עמיד הוא 0.4. תצפית זו נבחנה בפירוט רב יותר במערך הניסויים שיתואר בחלק הבא.

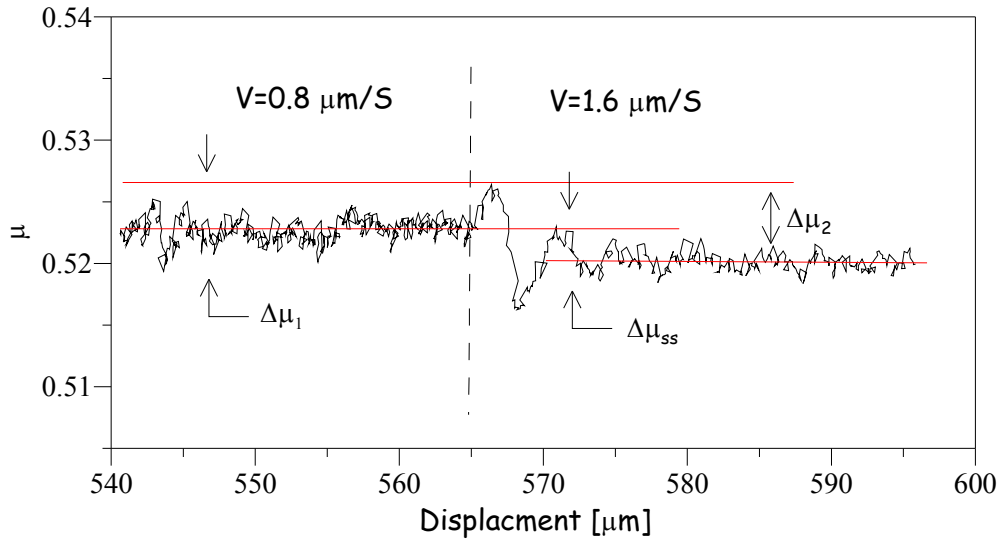
4.2.2. שינויי מהירות תוך כדי החלקה (Velocity stepping)

בדומה לניסויים אשר בוצעו בעבר (Dieterich, 1979; Kilgore, Blanpied, & Dieterich, 1993; T. E.) (Tullis & Weeks, 1986) התבצעו ניסויי שינוי מהירות במהלך ההחלקה. מטרת ניסויים אלו היא לבחון את התלות של מקדם החיכוך במהירות. כל הניסויים בוצעו על רמת חספוס אחידה שהתקבלה על ידי ליטוש ידני באמצעות אבקת $\text{SiC} \#180$. במהלך הניסוי הופעל מאמץ נורמאלי קבוע, בבקרת עומס (SigX), לאורך כל הבדיקה. לאחר שמהמאמץ הנורמאלי הגיע לערך היעד, הוכתבה מהירות גזירה קבועה בבקרת תזוזה על המדידים האופקיים (Y_{ave}). כאשר מאמץ הגזירה הגיע למצב עמיד, אותו ניתן לאפיין בצורה טובה, שונתה מהירות ההחלקה בצורה מיידיית. הליך זה, של שינוי מהירות לאחר הגעה למצב עמיד, בוצע מספר פעמים בכל ניסוי. טווח מהירויות ההחלקה שניבדק הינו $0.0125 - 100 \mu\text{m/S}$. המאמצים הנורמאליים וגודל השינוי של המהירות תלוי בטווח המהירויות. במהירויות החלקה $10 - 0.0125 \mu\text{m/S}$ שינויי המהירות היו בפקטור 2 תחת מאמץ נורמאלי של 7.5 MPa . בטווח מהירויות $100 - 1 \mu\text{m/S}$ שינויי המהירות היו בפקטור 10 תחת מאמץ נורמאלי של 5 MPa . ניסויי אופייניים של שינויי מהירות מוצג בתרשים 4.3. בניסוי זה, הוכתבה מהירות גזירה של $0.2 \mu\text{m/S}$ (קו מקוקו, ציר אנכי ימני) עד לקבלת מצב עמיד (0.3 mm). לאחר מכן, הורדה המהירות ל- $0.1 \mu\text{m/S}$ (פי 2) עד שהתקבל מצב עמיד חדש במרחק ההחלקה האופייני. הורדת המהירות התבצעה עד למהירות של $0.0125 \mu\text{m/S}$. לאחר מכאן בוצעו שינויי מהירות זהים במגמה הפוכה. פירוט מהלך הניסויים מוצג בטבלה 7.

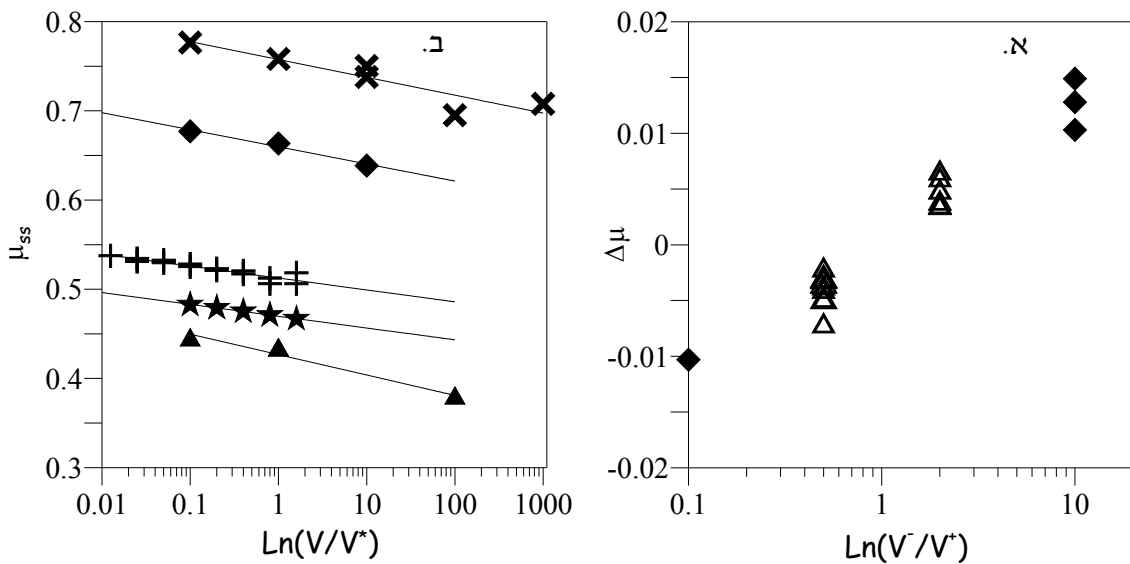


תרשים 4.3. תוצאות אופייניות של ניסויי שינוי מהירות במהלך ההחלקה תחת עומס נורמאלי של 5 MPa. מקדם החיכוך (ציר אנכי שמאלי) כתלות בתזוזת הגזירה. הקו המקווקו מציין את המהירויות המחושבות בכל מקטע (ציר אנכי ימני). א. הצגה של מהלך הניסויי הכולל: הורדה של המהירויות מ-0.001 $\mu\text{m}/\text{S}$ ועד 0.00001 $\mu\text{m}/\text{S}$. ב. התמקדות בקטעים של עלייה במהירות ההחלקה.

בדומה לניסויים של עצירות קצובות שינוי בתנאי ההחלקה גורם לשינוי מיידי ($\Delta\mu_i$) ולאחר מכן התייצבות למצב עמיד חדש ($\Delta\mu_{ss}$) של מקדם החיכוך (תרשים 4.3, 4.4). ההתייצבות למצב עמיד חדש הינה במרחק ההחלקה האופייני, D_c שנוע בין 1.5-1 μm . אופייה של התגובה המיידית תלוי בשינוי המהירות והפוך למגמת השינוי של מקדם החיכוך במצב עמיד: בעת העלאת המהירות התגובה המיידית הינה חיובית ואלו ערכו של מקדם החיכוך במצב עמיד יורד (תרשים 4.4), בהורדת המהירות התגובה המיידית הינה שלילית ואלו ערכו של מקדם החיכוך במצב עמיד עולה. ההבדלים במקדם החיכוך כתוצאה משינויי המהירות הינם מסדר שני (0.02-0.05) ותלויים ביחס בין המהירויות. ההבדל בין מקדם החיכוך במהירות הנמוכה ביותר (0.0125 $\mu\text{m}/\text{S}$) לבין המהירות הגבוהה ביותר (0.2 $\mu\text{m}/\text{S}$) בניסוי המוצג הינו כ-0.2. השינויים במקדם החיכוך, כתוצאה משינויי המהירות כמעט זהים כאשר מורידים ומעלים את המהירות. התלות של מקדם החיכוך במצב עמיד בלוגריתם המהירות מוצג בתרשים 4.5. גודל השינוי כפונקציה של לוגריתם יחס המהירויות מוצג בתרשים 4.5. התלות המתקבלת הינה בהתאמה גבוהה. באמצעות משוואות הקצב-מצב (משוואות 6, 7, 8) והצגה גראפית זו ניתן להעריך את הקבוע A והביטוי A-B (טבלה 7).



תרשים 44. התגובה המיידית כתוצאה מעלייה במהירות החלקה פי 2. מקדם החיכוך עולה לנקודת מקסימום (μ_1) ולאחר מכן מתייצב בערך נמוך יותר (μ_2) במרחק החלקה אופייני.

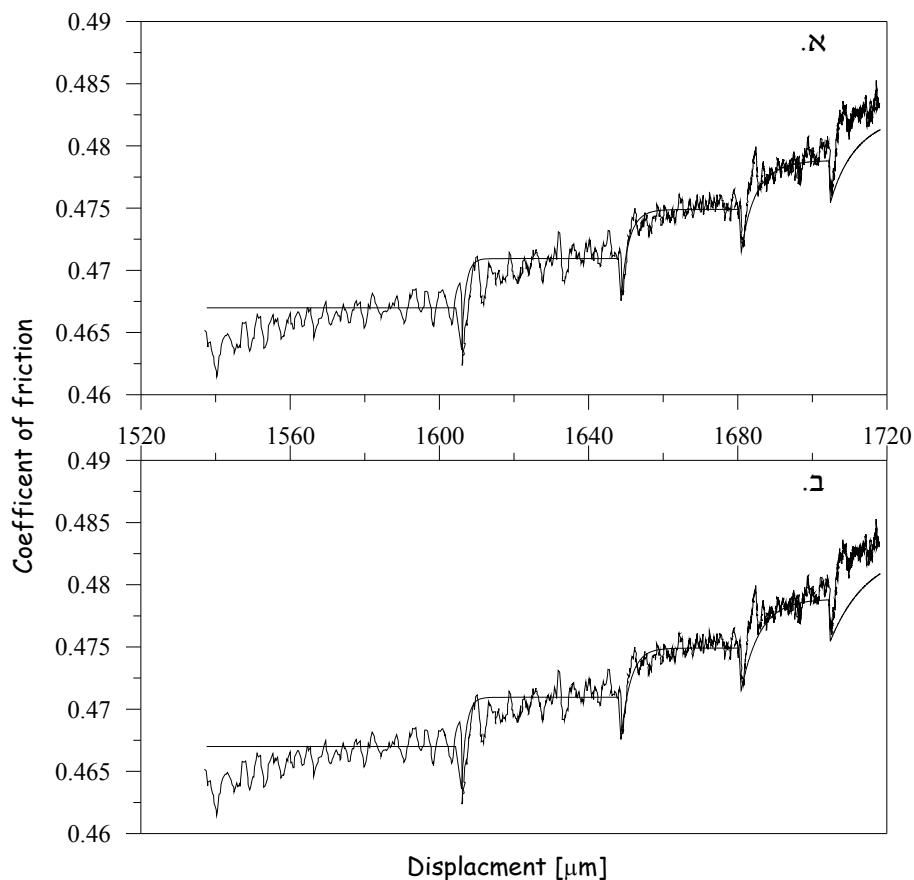


תרשים 45. מציאת קבועי ה- "קצב-מצב" באופן גראפי מניסויי שינוי מהירות. א. מציאת הקבוע A, יש לציין כי מכיוון שהקפצת המהירות הייתה בערכים קבועים פיזור הנקודות הוא קטן וחישוב הקבוע A בשיטה זו הוא מיצוע ע בור כל הניסויים. ב. מציאת הביטוי A-B.

טבלה 7. נתוני קבועי קצב מצב כפי שחושבו מניסויי שינוי במהירות

ניסוי	מאמץ נורמאלי [MPa]	טווח מהירויות	גודל שינוי	A	A-B	R ²
vs6g1	7.5	0.6-0.0125	2	0.006	-0.006	0.984
vs4g1	7.5	10-0.2	2	0.005	-0.006	0.991
vs3g1	5	100-0.1	10	0.005	-0.01	0.959
vs4bg1	2.5	100-0.1	10	0.005	-0.008	0.865
vs5bg1	5	100-0.1	10	0.008	-0.009	0.839

בכדי לאמת את תוצאות ניסויים אלו ולבדוק את רמת החיזוי של משוואות הקצב מצב באמצעות הקבועים שנמצאו עבור גרניט תימנע, בוצע פיתרון נומרי בשיטת רונגה קוטה (Runge Kutta) (Press,) (Flannery, Teukolsky, & Vetterling, 1986) למשוואות הקצב מצב עבור מאמץ נורמאלי קבוע (משוואות 5,6,7). בפיתרון, הוצבו הקבועים שחושבו ומהירויות ההחלקה שבוצעו בניסויים. בשיטת הפיתרון זו פלט הנתונים עבור מרחק ההחלקה מוכנס ישירות למשוואה. מקדם החיכוך מחושב עבור כל נקודה ונקודה תוך התחשבות במרווח בין הנתונים שנקבע בזמן הבדיקה. יש לציין כי בשונה מפתרונות משוואות הקצב-מצב אחרים (Beeler, Tullis, & Weeks, 1994; Linker & Dieterich, 1992; Marone,) (1998a) (Boettcher & Marone, 2004) בהם קשיחות המערכת מחושבת בכל רגע נתון או כבעיה הפוכה (inverse problem) בפיתרון המוצג אין התחשבות בקשיחות מכבש הגזירה. חוסר התחשבות זה מפשט את הליך הפתרון אך עלול לגרום לשגיאה גדולה יותר בין התוצאות המחשבות לבין תוצאות הניסוי שכן יתכן ותכונות מכבש הגזירה משפיעות על התוצאה. פתרון לדוגמה של משוואות קצב-מצב עבור ניסויים בהם הורדה מהירות ההחלקה בטווח מהירויות $0.2-6.4 \mu\text{m}/\text{S}$ מוצג בתרשים 46.



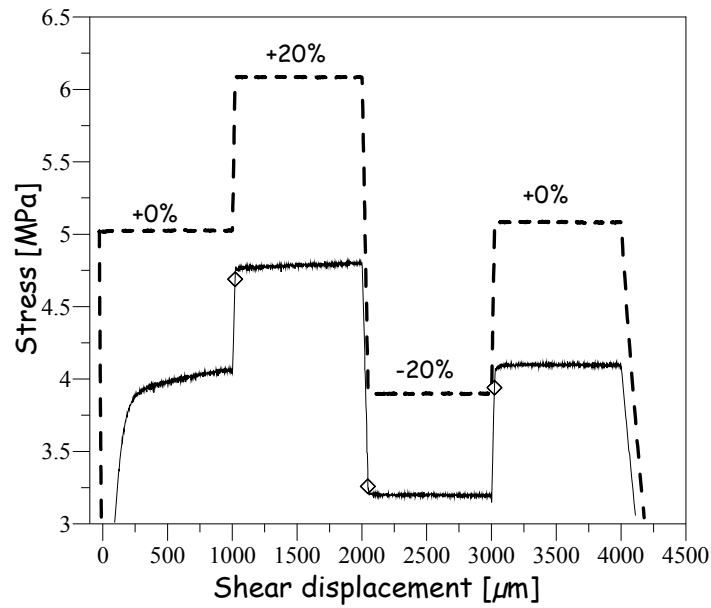
תרשים 46. מקדם החיכוך כנגד תזוזת הגזירה בניסויי שינוי מהירות (עלייה במהירות) ופתרון משוואות הקצב מצב. (א) חוק האטה (Dieterich) (ב) חוק ההחלקה (Ruina)

חיזוי מקדם החיכוך במצב עמיד בשני חוקי קצב מצב הינו טוב, למעט מהמהירות הנמוכה ביותר ($\mu\text{m}/\text{S}$) (0.2) בה הפתרון חוזה שהמרחק הדרוש להתייצבות למצב עמיד גדול יותר מאשר במציאות. חיזוי התגובה המיידית להורדת המהירות אינו מדויק ובד"כ התגובה המיידית המחושבת גדולה יותר מהמציאות. יתכן ושגיאה זו, נובעת מטעות בהערכה של הקבוע A, שהוא הפרמטר המשפיע על התגובה המיידית, וחוסר התחשבות בקשיחות המכשיר. הטעות בהערכת הקבוע A, נובעת מכך שאופן חישובו תלוי ביחס המהירויות (לפני ואחרי השינוי). מכיוון שיחס המהירויות בו השתמשנו בניסויים היה קבוע (10 או 2) בהערכה הגראפית, עבור כל ניסוי התקבל מקבץ אחד שלא מאפשר להעריך את הקבוע בצורה טובה. בכדי להעריך את הקבוע, כל נתוני הניסויים נלקחו בחשבון (תרשים 43) דבר שיכול להוביל לשגיאה מסוג זה.

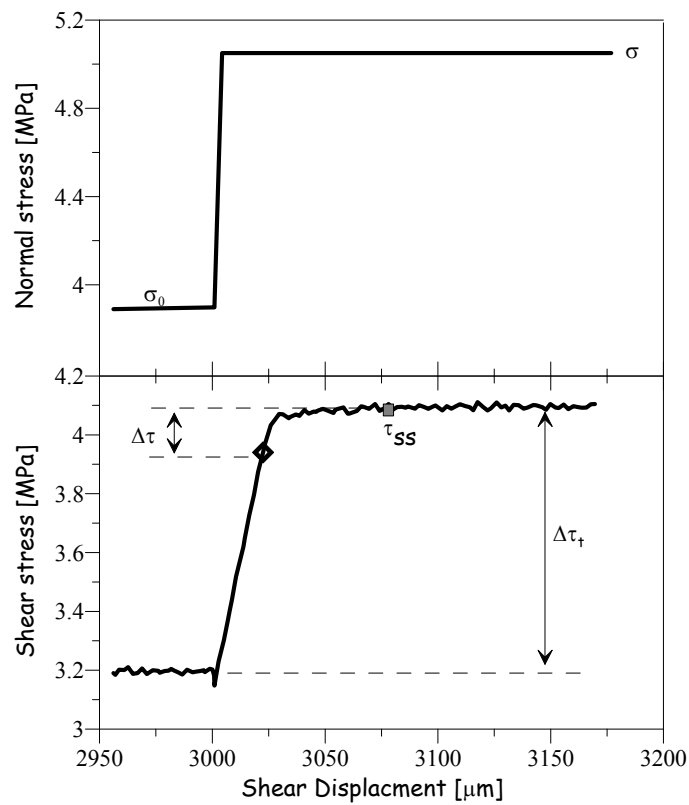
4.2.3. שינוי מיידני במאמץ הנורמאלי במהלך ההחלקה

ניסויי בהם שונה המאמץ הנורמאלי במהלך ההחלקה התבצעו בהליך זהה לניסויים קודמים (Hong & Marone, 2005; Linker & Dieterich, 1992). מטרת ניסויים אלו היא לדמות בצורה טובה יותר את התנאים השוררים בטבע על שברים גיאולוגיים ולבחון כיצד שינויים מידיים במאמץ הנורמאלי משפיעים על מאמץ הגזירה בנוסף ליחס הידוע בין מאמץ הגזירה והמאמץ הנורמאלי. בניסויים אלו הוכתב מאמץ נורמאלי של 5 MPa בבקרת עומס (SigX) ומהירות גזירה קבועה של $10 \mu\text{m}/\text{S}$ בבקרת תזוזה על המדידים האופקיים (Y_{ave}). לאחר שמקדם החיכוך הגיע למצב עמיד, שונה המאמץ הנורמאלי ב $\pm 20\%$ מהמאמץ הראשוני (תרשים 47). שינוי המאמץ הנורמאלי התבצע בקצב של $100 \text{ MPa}/\text{S}$. השינוי במאמץ הנורמאלי ארך 0.01 שניות כלומר החלקה של $0.1 \mu\text{m}$ בזמן השינוי. מכיוון שסך כל ההחלקה, בכל מאמץ נורמאלי, היא כ- $1000 \mu\text{m}$ ניתן להניח כי שינוי זה במאמץ הנורמאלי הינו מיידני. לכל מקטע של הניסוי, בו בוצע שינוי במאמץ הנורמאלי, נמצא השינוי הכללי במאמץ הגזירה- $\Delta\tau_t$, והנקודה $\Delta\tau$ בה השינוי במאמץ הנורמאלי הופך משינוי ליניארי לשינוי שאינו ליניארי (תרשים 48).

הנקודה $\Delta\tau$, בה יש שינוי בסוג המעוות נקבעה בהליך דומה שבוצע על ידי Richardson and Marone (Richardson & Marone, 1999). בשיטה זו מבוצעת התאמת קו ישר במקטעים החל מהנקודה בה המאמץ הנורמאלי הגיע למאמץ המטרה שהוכתב. עבור כל מקטע חושב מקדם קורלציה. הנקודה $\Delta\tau$ הינה בה מקדם הקורלציה נמוך מערך סף שהוגדר מראש.

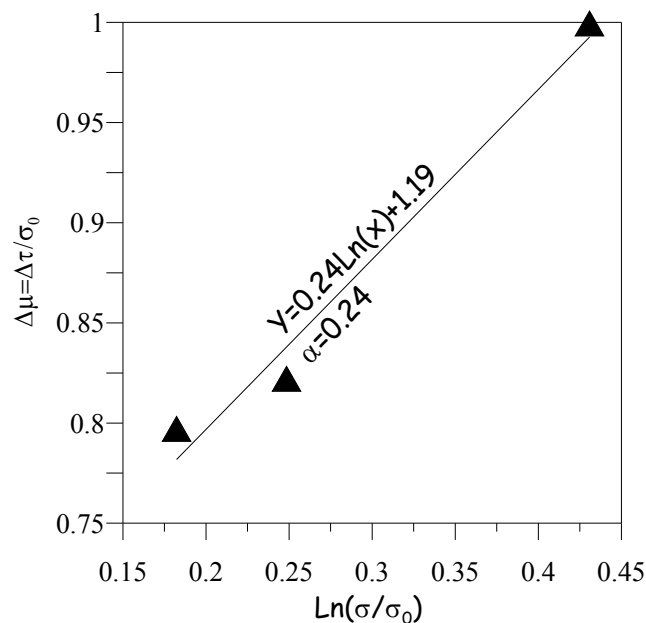


תרשים 47. מאמץ נורמאלי (מקוקו) ומאמץ גזירה (רציף) כנגד התזוזה האופקית במהלך ניסוי בו שונה המאמץ הנורמאלי במהלך ההחלקה. המעוינים מציינים את התגובה המיידית לשינוי במאמץ הגזירה.

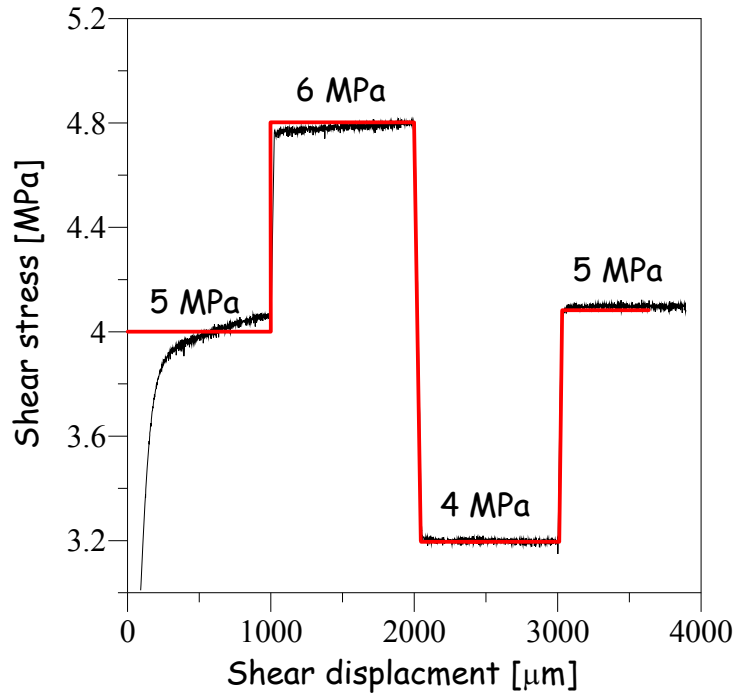


תרשים 48. המעבר בין המעוות הליניארי למעוות פלסטי כתוצאה משינוי במאמץ נורמאלי (הגדלה מקטע מהניסוי המוצג בתרשים 47). באיור העליון מוצג השינוי במאמץ הנורמאלי ובתחתון השינוי במאמץ הגזירה. השינוי במאמץ הגזירה כתוצאה ממעוות פלסטי מסומן ב- $\Delta\tau$.

הפרמטר α אשר מתאר את השינוי במקדם החיכוך, שלא מתקבל מהיחס בין מאמץ הגזירה והנורמאלי, במשוואות הקצב-מצב הוערך בעזרת התאמת קו ישר למדידות של $\Delta\tau/\sigma_0$ כנגד $\ln(\sigma/\sigma_0)$ (משוואה 8) (תרשים 49). הערך שהוערך עבור ממשק ברמת חספוס SC במהירות החלקה של $10 \mu\text{m/S}$ הינו $\alpha=0.24$, כשליש ממקדם החיכוך, בהתאמה לניסויים שבוצעו בעבר בהם הוערך $\alpha=0.2$ עבור חומר דומה ללא מילוי בין הממשקים (Linker & Dieterich, 1992; Richardson & Marone, 1999). פתרון משוואות הקצב-מצב המורחבות לשינויים במאמץ נורמאלי (משוואות 5,8) בוצע, עבור חוק האטה, עם קבועים אשר נמצאו מניסויי שינוי מהירות (זהים לאלו שהשתמשנו בפתרון של המשוואות עבור ניסויי שינוי מהירות). פתרון המשוואות (תרשים 50) חוזה בצורה טובה את השינויים במקדם החיכוך כתוצאה משינוי במאמץ הנורמאלי במקטעים בהם מאמץ הגזירה הגיע למצב עמיד. במקרים בהם מאמץ הגזירה לא הגיע למצב עמיד, כמו במקטע לאחר השינוי הראשון, פתרון המשוואות מתכנס לתוצאות הניסוי רק לאחר שמאמץ הגזירה הגיע למצב עמיד. הסיבה שבחלק מהמקרים מקדם מאמץ הגזירה מגיע מייד למצב עמיד ובחלק לא אינה ברורה ויתכן שהיא טמונה בתופעות הקשורות למערכת המכאנית. יתכן והתחשבות בקשיחות מכבש הגזירה יגרום לדיוק גבוהה יותר בין פתרון המשוואות לתוצאות הניסוי.



תרשים 49. מציאת הקבוע α מניסויי שינוי מאמץ נורמאלי תוך כדי החלקה.



תרשים 50. חיזוי השינוי בערכי מקדם החיכוך כתוצאה משינוי מהיר במאמץ הנורמאלי באמצעות פתרון משוואות קצב מצב (קו אדום). הקו שחור מציג את תוצאות הניסוי. ערכי המאמץ הנורמאלי מצוינים באיור. מקדמי הקצב מצב – $\alpha=0.24$, $B=0.0016, D_c=0.001$ mm

ביצוע ניסויי "קצב-מצב" אשר תוארו ותוצאותיהם מוצגות בחלק זה, מוכיח כי ניתן לבצע ניסויי קצב-מצב במכש גזירה ישירה על מישור בודד הנמצא בראשותנו ולקבל תוצאות דומות ללא תלות בגיאומטריה ובסוג מערכת הבדיקה. שחזור התוצאות המוצלח אפשר לבצע ניסויים נוספים חדשים הבוחנים את התלות של מקדם החיכוך.

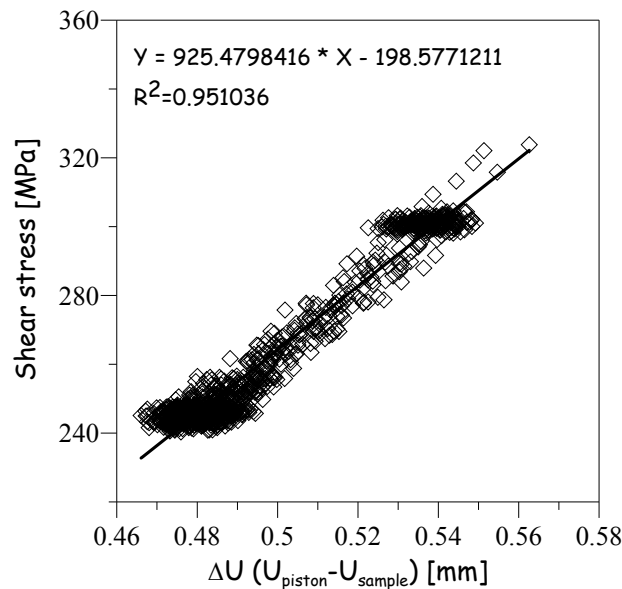
4.2.4. חישוב קשיחות הגזירה של מכש גזירה.

בכדי לפתור את משוואות הקצב מצב ולחזות שינויים בכוח החיכוך בצורה מדויקת יש להתחשב, בנוסף לשינויי הקצב מצב המתוארים במשוואות, באינטראקציה בין המערכת לממשק הנבדק. בכדי להתחשב תכונות המערכת ניתן להשוות את מערכת הגזירה למערכת פיזיקאלית פשוטה יותר כדוגמת קפיץ המחובר למסה. במערכת זו, התנועה של המדידים שעל הדוגמה (U_{sample}) מושפעת מתנועת הבוכנה (U_{piston}), תכונות הקפיץ וחיבורו לדוגמה. בהנחה שמזניחים את השפעת התאוצות ושהמשטח עליו מתרחשת ההחלקה קשיח לחלוטין, מאמץ הגזירה מתואר באופן הבא:

$$\tau = K(U_{piston} - U_{sample}) \quad .18$$

כאשר (U_{sample}) ו- (U_{piston}) הנם תזוזות הדוגמה והבוכנה בהתאמה ו- K קשיחות המערכת. באמצעות משוואה 18 ניתן לחשב את קשיחות המערכת (תרשים 51). הקשיחות חושבה בניסויי עצירות קצובות בזמן

העצירה וערכה הינו כ- $0.925 \text{ MPa}/\mu\text{m}$ (77 N/mm). חישוב הקשיחות בוצע בזמן העצירה מכיוון שבמקטע זה ההפרש בין תזוזת הבוכנה לדוגמה הוא הגדול ביותר (לעומת החלקה במהירות קבועה). יש לציין כי פתרון המשוואות הקצב מצב התחשבות בקשיחות זו אינו משפר את התאמת פתרון המשוואה לתוצאות.

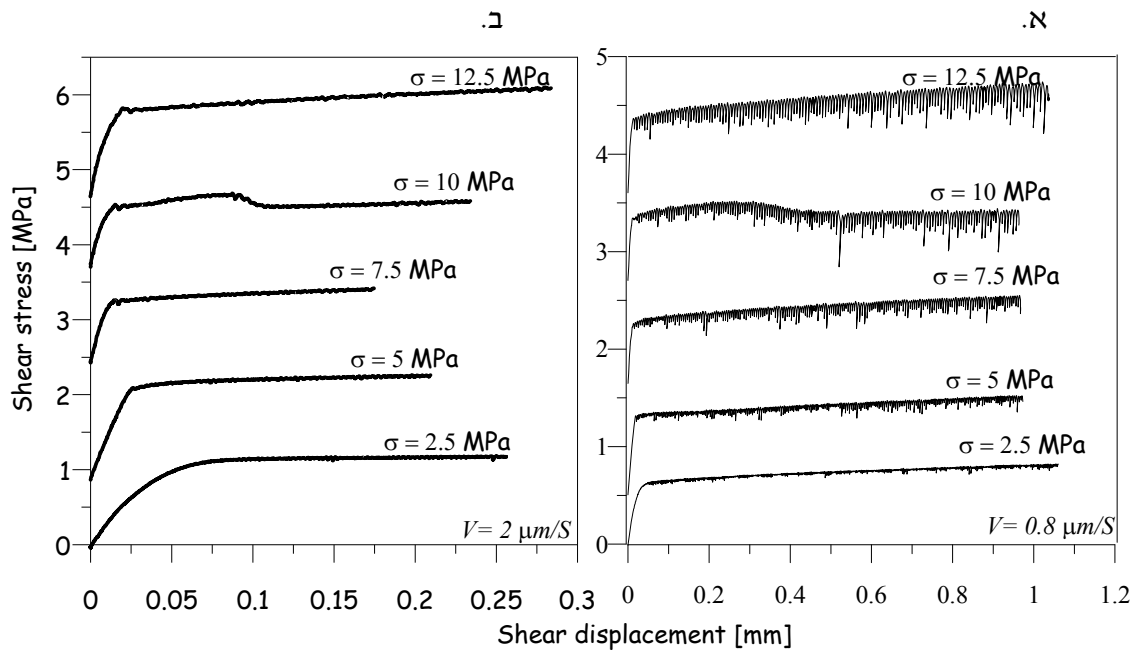


תרשים 51. חישוב קשיחות המערכת בניסוי עצירות קצובות. שיפוע הקו הישר מייצג את קשיחות המערכת.

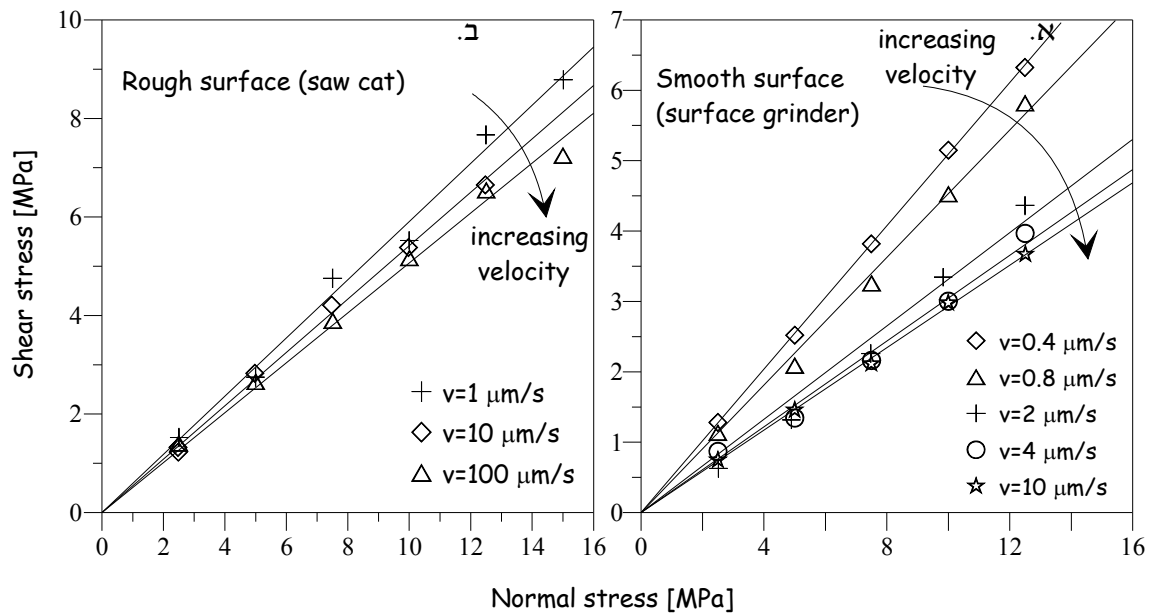
4.3. השפעת החספוס על מקדם החיכוך במצב עמיד במהירויות החלקה שונות

חספוס מישורי הגזירה משפיע על גודל הגבשושיות (asperities) ושטח המגע האמיתי בין הממשקים. השפעת החספוס (גם בסקאלות קטנות) הינה גורם משמעותי בהתנגדות להחלקה ונבחנה בעבר על ידי חוקרים רבים (Barton & Choubey, 1977; Biegel, Wang, Scholz, Boitnott, & Yoshioka, 1992; Engelder, 1978; Tse & Cruden, 1979) אך ללא קשר למהירות החלקה. בכדי לבחון כיצד המיקרו-חספוס משפיע על מקדם החיכוך והאם תלות זו מושפעת ממהירות החלקה, בוצעה סידרת הניסויים הבאה. בניסויים אלו חושב מקדם החיכוך באמצעות קריטריון קולומב בשתי רמות חספוס SC (המחוספס ביותר) ו-SG (החלק ביותר), כאשר בכל רמת חספוס נבחנו מספר מהירויות החלקה. מדידה של מקדם החיכוך במצב עמיד, במהירויות שונות, מאפשר לבדוק את התלות של מקדם החיכוך במהירות בדומה לניסויים שתוארו בחלק 4.2.2. השוואה בין רמות החספוס מאפשר לבחון האם גודל השינוי של מקדם החיכוך כתוצאה משינוי מהירות תלוי ברמת החספוס של הממשקים. חישוב מקדם החיכוך באמצעות קריטריון קולומב מגדיל את אמינות הבדיקות והתוצאות המחושבות מפני שערך מקדם החיכוך המחושב הינו ערך ממוצע של מספר בדיקות. ניתן לבחון את הפיזור וסטיית התקן של הנתונים. בחינת קריטריון

קולומב מאפשרת לראות את התלות של מאמץ הגזירה בפרמטרים אמפרים שונים (זווית החיכוך וקוהזיה) מאילו של תיאורית הקצב מצב. יתכן וניתן יהיה לקשור בין הפרמטרים האמפרים השונים. בכדי לחשב את קריטריון קולומב, עבור מהירות מסוימת, הופעל מאמץ נורמאלי בבקרת עומס על הדוגמה (SigX). לאחר שמאמץ היעד הושג, הוכתבה מהירות גזירה קבועה בבקרת תזוזה על המדידים האופקיים (Y_{ave}). כאשר מאמץ הגזירה הגיע למצב עמיד והתרחשה החלקה של לפחות 0.25 mm הופסקה ההחלקה, הוכתב יעד חדש למאמץ נורמאלי ובוצעה שוב החלקה במהירות הראשונית עד למצב עמיד. בכל מהירות נבדקו שישה מאמצים נורמאליים: 2.5, 5, 7.5, 10, 12 ו-15 MPa (תרשים 52). מאמץ הגזירה, במצב עמיד בכל מאמץ נורמאלי, שורטט כנגד המאמץ הנורמאלי (תרשים 53). משוואת קו ישר של נתונים אלו הינו קריטריון הכשל ממנו ניתן לאפיין את מקדם החיכוך והחוזק (קוהזיה) של הממשק. על פי תיאורית הקצב מצב והניסויים שהוצגו, ניתן לצפות שלכל מהירות החלקה תתקבל מעטפת כשל שונה: במהירויות החלקה גבוהות מקדם החיכוך יהיה נמוך יותר מאשר במהירויות נמוכות. מהירויות ההחלקה, מקדמי החיכוך המחושבים ומקדמי הקורלציה של הניסויים מוצגים בטבלה 8.



תרשים 52. מאמץ גזירה כנגד תזוזת גזירה בניסויים על ממשקים מחוספסים (SC) תחת מאמצים נורמאליים שונים. א. מהירות החלקה של $0.8 \mu\text{m/S}$. ב. מהירות החלקה של $2 \mu\text{m/S}$.



תרשים 53. קריטריון קולומב עבור מצב עמיד מהירויות החלקה שונות ובשתי רמות חספוס: א. משטח מחוספס (SC) ב. משטח חלק (SG). ערכי מקדמי החיכוך והקורלציה עבור כל מהירות החלקה מצוינים בטבלה 8. טבלה 8. ערכי מקדם החיכוך שהתקבלו מקריטריון קולומב במהירויות ורמות חספוס שונות.

R^2	מקדם חיכוך	רמת חספוס	מהירות החלקה [$\mu\text{m}/\text{S}$]
0.998	0.591	SC	1
0.999	0.542	SC	10
0.999	0.495	SC	100
0.999	0.509	SG	0.4
0.999	0.453	SG	0.8
0.994	0.331	SG	2
0.997	0.305	SG	4
0.999	0.293	SG	10

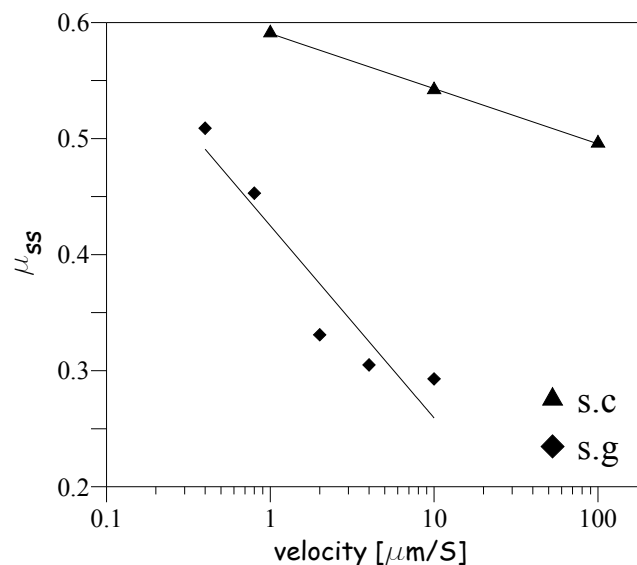
בחינה של תוצאות סדרת ניסויים אלו מעלה מספר תוצאות:

1. תיקופו של קריטריון קולומב מסדר ראשון - עבור כל מהירות ברמת חספוס מסוימת, מעטפות הכשל שהתקבלו ליניאריות במקדמי קורלציה גבוהים (>0.994). קוהזיית הממשקים שהתקבלה הינה בקירוב 0, כמצופה. הקוהזיה הנמוכה ומקדמי הקורלציה הגבוהים שהתקבלו עבור כל מהירות החלקה מחד מעידים על אמינות הבדיקה ומאידך מראים את תיקופו של הקריטריון עבור כל מהירות ורמת חספוס.
2. השפעת רמת החספוס על ערכי מקדם החספוס - השוואה של טווח ערכי מקדם החיכוך שהתקבלו במשטחים החלקים (0.293-0.509) ובמשטחים המחוספסים (0.495-0.591) מראה שהשוני ברמת החספוס משפיע מאוד על ערכי מקדם החיכוך. במהירות $10 \mu\text{m}/\text{S}$ על משטח SG מקדם החיכוך הוא 0.293 לעומת מקדם חיכוך 0.542 שהתקבל במהירות זהה על משטח SC (הבדל של כ- 50%). במהירויות נמוכות יותר, רמת החספוס משפיעה פחות על מקדם החיכוך, במהירות $1 \mu\text{m}/\text{S}$ במשטח SC התקבל מקדם חיכוך של

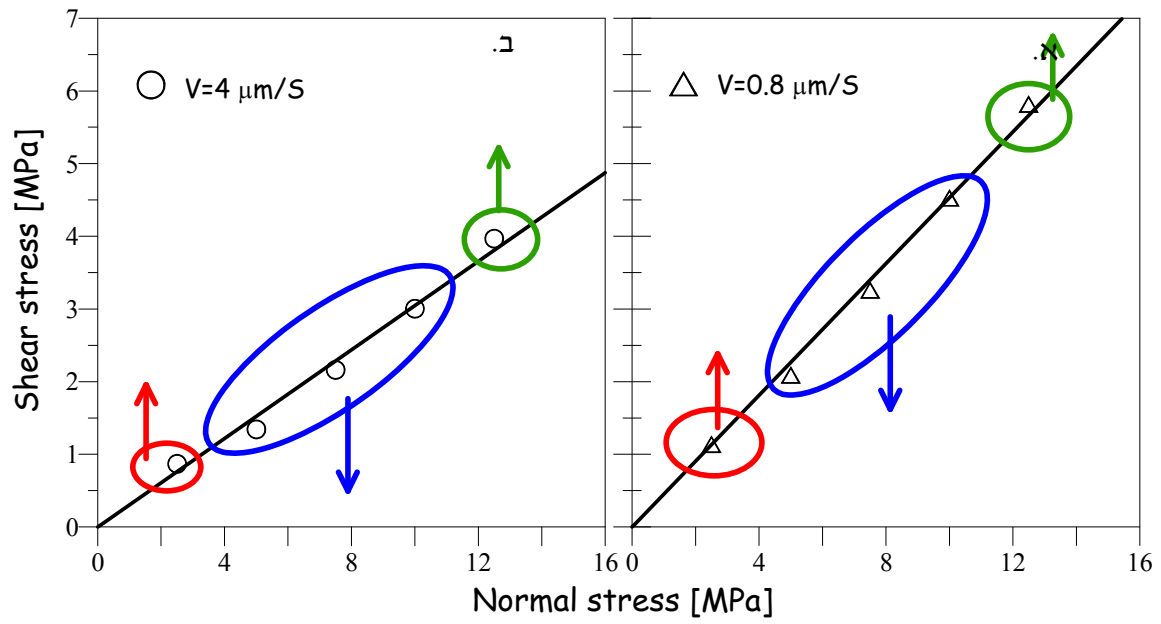
0.591 לעומת 0.453 במשטח SG במהירות של $0.8 \mu\text{m/S}$ (הבדל של כ-15%). יש לציין שמכיוון שלא נערכו מספיק מהירויות החלקה ומהירויות ההחלקה אינן זהות לחלוטין, בין שתי רמות החספוס, לא ניתן לקבוע בצורה חד משמעית כי רמת החספוס משפיעה פחות במהירות נמוכה מאשר במהירות גבוהה.

3. תלות מקדם החיכוך במהירות ההחלקה - בשתי רמות החספוס התקבלה התנהגות של החלשות עם עלייה במהירות (velocity weakening) כלומר מקדם החיכוך גבוה יותר במהירויות הנמוכות מאשר במהירויות הגבוהות (תרשים 53). כמות ההחלשות תלויה בחספוס המשטחים (תרשים 54). לפי תיאורית קצב-מצב, כמות ההחלשות עם העלייה במהירות, תלויה בביטוי (A-B). ביטוי זה תלוי בקבועי חומר. מהתוצאות עולה שכמות ההחלשות תלויה גם ברמת החספוס הראשונית של המשטחים. במשטחים המחוספסים A-B=-0.02 לעומת A-B=-0.07 במשטחים החלקים. יש לציין כי בדוגמאות החלקות ערכי ה-A-B שהתקבלו דומים בגודלם לערכים שתקבלו בניסויי שינויי מהירות המפורטים בחלק 4.2.2 שהתבצעו על משטחים ברמת חספוס #180.

4. תלות מאמץ הגזירה בגודלו של המאמץ הנורמאלי – בקריטריוני הכשל ששורטטו עבור כל ניסוי וניסוי הובחנה חזרה בהתנהגות מאמץ בגזירה כתלות במאמץ הגזירה: במאמץ הנורמאלי הנמוך ביותר (2.5 MPa), ערכי מקדם החיכוך גבוהים במעט (מעל הקו הישר). במאמצים הבינוניים (5, 7.5, 10 MPa) ערכי מקדם החיכוך נמוכים (מתחת לקו הישר) ובמאמצים הגבוהים (12.5, 15 MPa) מקדם החיכוך גבוה יותר (מעל הקו הישר) (תרשים 55). מגמה זו, שחזרה על עצמה במספר ניסויים, הביאה למחשבה כי ישנה תלות מסדר שני, בין מקדם החיכוך במצב עמיד לבין המאמץ הנורמאלי. סדרת ניסויים, שמטרתה לבדוק את תלות זו ברמות חספוס שונות תפורט בפרק 4.4.



תרשים 54. מקדם החיכוך במצב עמיד כנגד מהירות ההחלקה עבור שתי רמות חספוס.



תרשים 55. קריטריון הכשל של קולומב עבור משטחים חלקים במהירויות החלקה שונות: א) מהירות $4 \mu\text{m/S}$. ב) מהירות $0.8 \mu\text{m/S}$. ניתן לראות, בשני הניסויים, שבמאמץ נורמאלי של 2.5 MPa מתקבל מקדם חיכוך גבוהה (מעל הקו) לאחר מכאן מתקבלים ערכים נמוכים ולבסוף שוב עלייה במקדם החיכוך.

4.4. שינויים במקדם החיכוך במצב עמיד כתוצאה משינויים במאמץ הנורמאלי

תוצאות הניסויים בחלק 4.3 מעלות אפשרות כי ישנה תלות, מסדר שני, של חוזק הגזירה במאמץ הנורמאלי. מכיוון שמטרת ניסויים אלו הייתה ליצור את מעטפת הכשל של קולומב לא הושם דגש על מספר פרטים שעלולים להיות בעייתיים בקביעה האם יש תלות של מקדם החיכוך במאמץ הנורמאלי:

- זמן העצירות בין המקטעים השונים אינו קבוע. יתכן וזמן העצירה (ולכן פרמטר המצב) משפיע על גודלו של מקדם החיכוך.

- מספר המאמצים הנורמאליים שנבדקו בטווח שבין 2.5 MPa ל-15MPa מצומצם (5). מספר מועט זה של מאמצים נורמאליים, אינו יכול להעיד על מגמת שינוי ברורה בערכי מאמץ הגזירה.

- הניסויים בוצעו על שתי רמות חספוס בלבד.

בכדי לבחון בצורה טובה יותר את האם מקדם החיכוך תלוי במאמץ נורמאלי וכיצד רמת החספוס משפיעה, בוצעה סידרת ניסויים בה אין עצירה בין המאמצים הנורמאליים השונים ומספר המאמצים הנורמאליים בטווח זהה גדול בהרבה מהניסויים הקודמים. בניסויים אלו, הופעל מאמץ נורמאלי ראשוני בבקרת עומס (SigX). לאחר שהמאמץ הגיע ליעדו הוכתבה מהירות גזירה של $1 \mu\text{m}/\text{S}$ המבוקרת באמצעות ערוץ תזוזת המדידים (Y_{ave}). כאשר מאמץ הגזירה הגיע למצב עמיד, הוכתב מאמץ נורמאלי חדש, המשתנה בקצב של $0.05 \text{ MPa}/\text{S}$, תוך כדי החלקה. לאחר שמאמץ הגזירה הגיע שוב למצב עמיד חדש והתרחשה החלקה של לפחות 0.1 mm במאמץ נורמאלי קבוע, שונה שוב המאמץ הנורמאלי. השינויים שבוצעו בכל פעם הינם שינויים יחסיים וגודלם (הורדה או העלאה) הוא 10% מערך המאמץ הנורמאלי מהמקטע הקודם. טווח המאמצים הנורמאליים שנבדקו זהה לניסויים שתוארו בפרק 3.3 והינו 2.5-15 MPa. שיטת שינוי זו נבחרה בכדי למנוע הורדה יחסית גדולה בעיקר במאמצים הנמוכים העלולה לגרום לבעיות בקרה ולפרוש לא נכון של התוצאות. שינוי המאמץ בוצע בשתי אופנים: ניסויי פריקה (Unload) בהם המאמץ הראשוני הוא 15 MPa והורדה ל 2.5 MPa וניסויי העמסה (Load) בהם המאמץ הראשוני הוא 2.5 MPa והעלאה ל-15 MPa. פירוט המאמצים הנורמאליים שהופעלו במהלך ניסויים אלו מוצג בטבלה 9. השינוי ההדרגתי במאמץ הנורמאלי בוצע בכדי לשפר את איכות הבקרה על תנועת הבוכנה האופקית ולמנוע שנויי מהירות פתאומיים ולא רצויים כתוצאה משינוי פתאומי של העומס הנורמאלי על הדוגמה. אופי שינוי זה מאפשר לבדוק את סך כל השינוי במאמץ הגזירה ($\Delta\tau$), אך אינו מאפשר למצוא את הנקודה בה סוג המעוות משתנה ($\Delta\tau$) כפי שבוצע בניסויים המתוארים בחלק 4.2.3. ניסיונות ההעמסה

והפריקה בוצעו על ארבע רמות חספוס שונות: מכונת שיוף (SG), #220 #180, ושיני מסור (SC). כל רמת

חספוס אופיינה טרם הניסוי בצורה כמותית כמתואר בפרק 3.2 ותוצאתו מוצגות בפרק 4.1.2

טבלה 9. פירוט המאמצים הנורמאליים ומהלך של ניסויי "שינוי הדרגתי במאמץ הנורמאלי תוך כדי החלקה

#	מאמץ נורמאלי [MPa]
1	15
2	13.5
3	12.15
4	10.93
5	9.84
6	8.85
7	7.97
8	7.17
9	6.45
10	5.81
11	5.23
12	4.71
13	4.23
14	3.81
15	3.43
16	3.08
17	2.77
18	2.50

ניסויי העמסה ↑

↓ ניסויי פריקה

מתוצאות הניסויים עולה שמקדם החיכוך במצב עמיד אינו קבוע ומשתנה עם השינוי במאמץ הנורמאלי. אופי השינוי תלוי בגודל המאמץ הנורמאלי וברמת החספוס של המשטחים. את השינויים במקדם החיכוך אשר נצפו בניסויים אלו ניתן לחלק לשלוש מגמות:

מגמה A- החלשות של מקדם החיכוך עם העלייה במאמץ הנורמאלי.

מגמה B- התחזקות של מקדם החיכוך עם העלייה במאמץ הנורמאלי.

מגמה C- החלשות של מקדם החיכוך במאמצים הנורמאליים הגבוהים.

סוג המגמות וגודל השינויים במקדם החיכוך שונה בין ניסויים ברמות חספוס שונות. בנוסף, נראה הבדל בין ניסויי פריקה והעמסה.

4.4.1. ניסויי פריקה והעמסה על משטחי SC.

בכל ניסויי הפריקה והעמסה על המשטחים המחוּספסים הופיעו המגמות A, B ו-C, כאשר כל מגמה מאופיינת בטווח מאמצים נורמאליים (תרשים 56):

מגמה A- בטווח מאמצים שבין 2.5-5.22 MPa

מגמה B- בטווח המאמצים 10.9-5.22 MPa

מגמה C- בטווח המאמצים 10.9-15 MPa

ניסויי פריקה (תרשים 56א)

מגמה C (15-10.9 MPa) - מקדם חיכוך גדל עם הורדה של המאמץ הנורמאלי. גודל השינויים של מקדם החיכוך בכל מקטע, דומה ובשיעור של כ- 1%. בטווח מאמצים זה התקבלו ערכי מקדם החיכוך הנמוכים ביותר לאורך הניסוי אך הם אינם הגיעו למצב עמיד ולא ניתן לקבוע ערך מייצג עבור מאמצים אלו (תרשים 59ג). חוסר ההגעה למצב עמיד בטווח מאמצים זה חזר על עצמו בכל שלושת ניסויי הפריקה אשר בוצעו וכן בניסויים זהים אשר בוצעו על רמות חספוס נוספות (תרשים 62א). יש לציין שבמקטעים אלו, בנוסף להחלקה הראשונית של המשטח, מרחק ההחלקה היה גדול פי שתיים ($0.2 \mu\text{m}$) ממרחק החלקה במקטעים המאוחרים יותר בהם מקדם החיכוך הגיע למצב עמיד ($0.1 \mu\text{m}$).

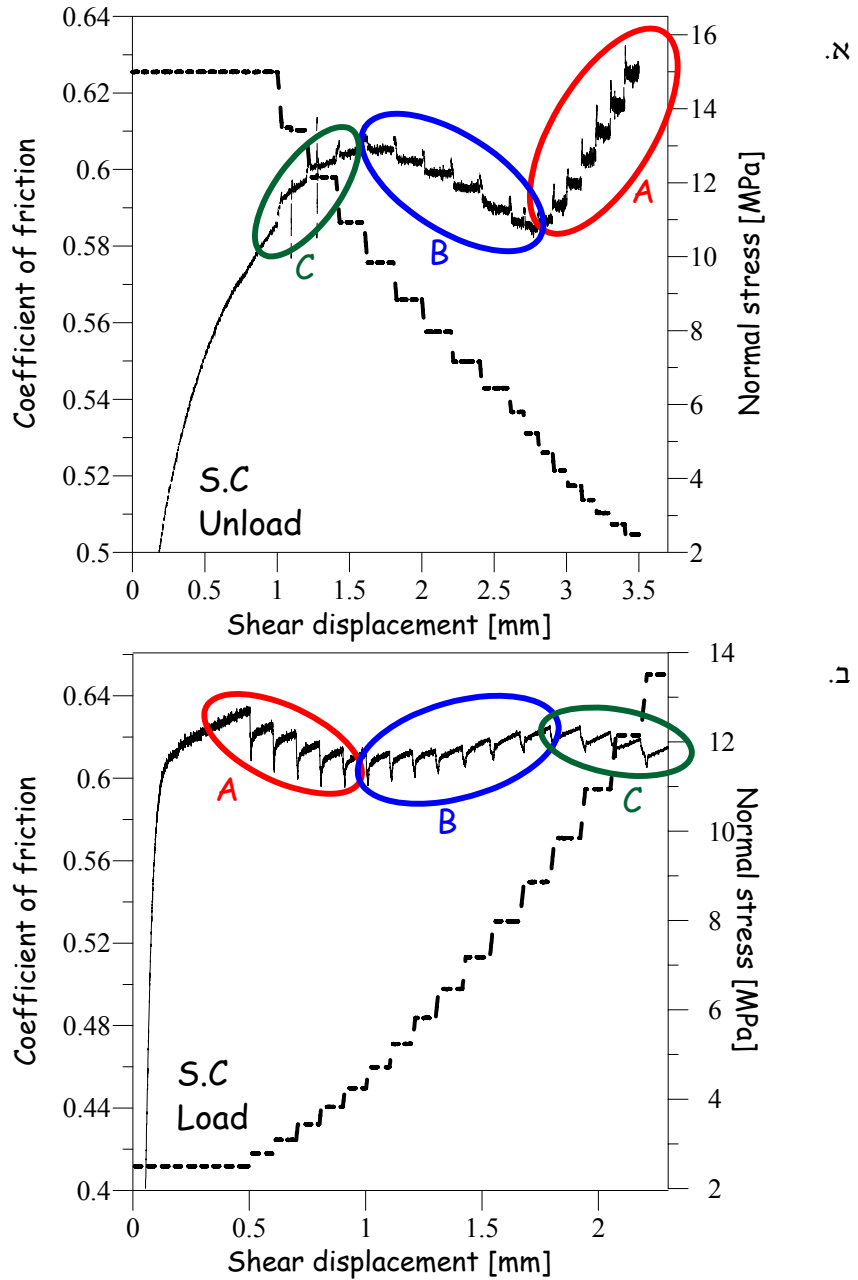
מגמה B (5.22-10.9 MPa) - עם הסרת המאמץ נורמאלי מקדם החיכוך קטן עד להגעה לערך מינימאלי של $\mu=0.585$ ב-5.22 MPa. בטווח מאמצים זה, השינויים במקדם החיכוך קבועים ובשיעור של כ- 0.5% מהערך הקודם.

מגמה A (5.22-2.5 MPa) - התקבלה התחזקות עם הירידה במאמץ הנורמאלי כאשר במאמץ הנורמאלי הנמוך ביותר (2.5 MPa) התקבל מקדם החיכוך הגבוהה ביותר לאורך כל הניסוי ($\mu=0.625$). בטווח מאמצים זה, השינויים במקדם החיכוך אינם קבועים - קרוב לנקודת המינימום ההבדלים קטנים (0-0.5%) וככל שהמאמץ הנורמאלי נמוך יותר ההפרשים גדלים עד כ-1.5% (תרשים 59).

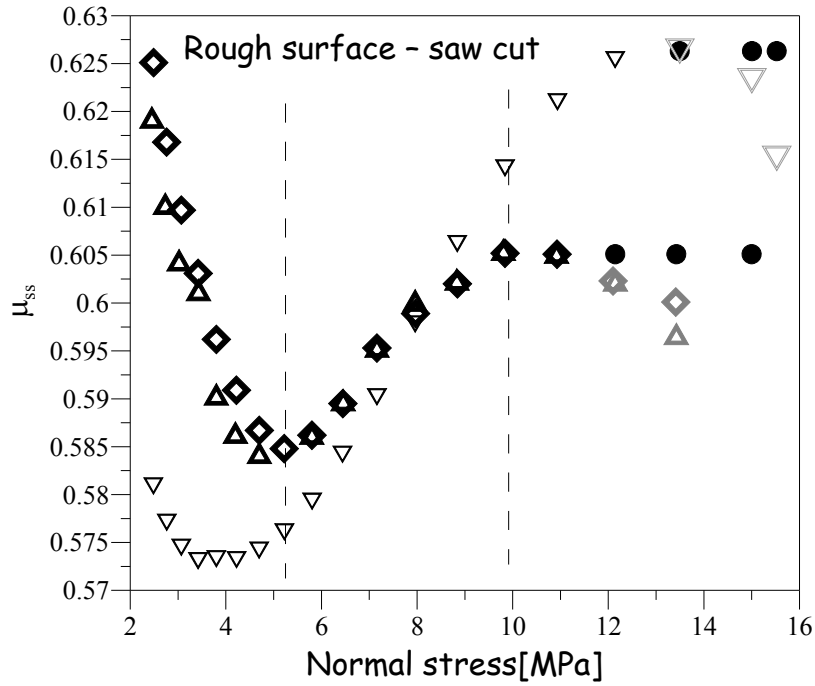
במגמות A ו-B מקדם החיכוך הגיע למצב עמיד בצורה טובה וההבדלים בערכי מקדמי החיכוך, ברורים וחד משמעיים (תרשים 59 א ו-ב). תופעה נוספת שהתקבלה, בשלושת המגמות, היא הופעת נקודת מקסימום של מקדם החיכוך והתייצבות למצב עמיד נמוך יותר אחרי שהמאמץ הנורמאלי הגיע למאמץ היעד (תרשים 59). למראית עין התנהגות זו הינה התנהגות אופיינית לעקומות מעוות-מאמץ של ניסוי גזירה. בחינה של מהירות החלקה, בנקודת זמן זו, העלתה כי ישנה אי יציבות רגעית במהירות החלקה. יתכן וחוסר יציבות זו, הנגרמת כתוצאה מהחלקת בוכנת הגזירה מתבטאת בנקודת מקסימום זו. ערכי מקדם החיכוך, שהתקבלו משלושה ניסויי פריקה שונים, כתלות במאמץ הנורמאלי מוצגים בתרשים 57. באמצעות הצגה זו ניתן את התלות של מקדם החיכוך במאמץ הנורמאלי וכי התוצאות חוזרות על עצמן בשלושה ניסויים בלתי תלויים. הסימנים האפורים החלולים מיצגים מקטעים בהם מקדם החיכוך לא הגיע למצב עמיד והסימנים השחורים המלאים מסמנים את ערכי מקדם החיכוך המשוערים.

ניסויי העמסה (תרשים 56ב)

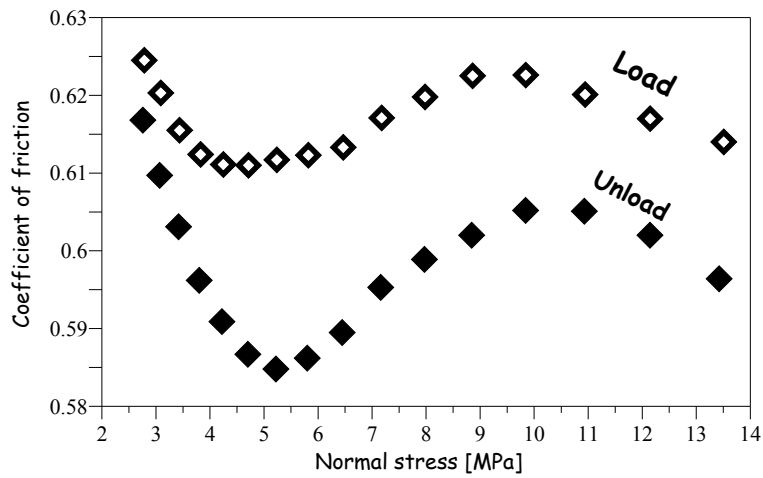
בדומה לניסויי הפריקה הופיעו שלושת המגמות בטווחי מאמץ נורמאלי זהים (תרשים 56ב, 58). נקודת המינימום של מקדם החיכוך ($\mu=0.611$) התקבלה במאמץ נורמאלי של 5.22 MPa (תרשים 56ב, 58, 60). במאמץ הנורמאלי הנמוך ביותר, 2.5 MP, התקבל מקדם חיכוך הגבוהה ביותר בערך דומה למקדם החיכוך בניסויי פריקה ($\mu=0.625$ לעומת $\mu=0.618$). השינויים במקדם החיכוך בין נקודת המקסימום למינימום, בניסויי העמסה, קטנים יותר מאשר בניסויי הפריקה (הבדל של 0.007 בניסויי העמסה לעומת 0.04 ניסויי פריקה (תרשים 60). למרות הדמיון הרב במגמות ובמאמצים הנורמאליים בהם התקבלו נקודות הקיצון, בניסויי העמסה לא התקבל מצב עמיד של מקדם החיכוך באף אחד מהמקטעים (תרשים 60). מחד, הדמיון הרב במגמות בין שני סוגי הניסוי (תרשים 58) מחזק אמינות התוצאות, מאידך לא ניתן להתחשב בתוצאות אילו ובניסויי ההמשך על משטחים מלוטשים בוצעו ניסויי פריקה בלבד.



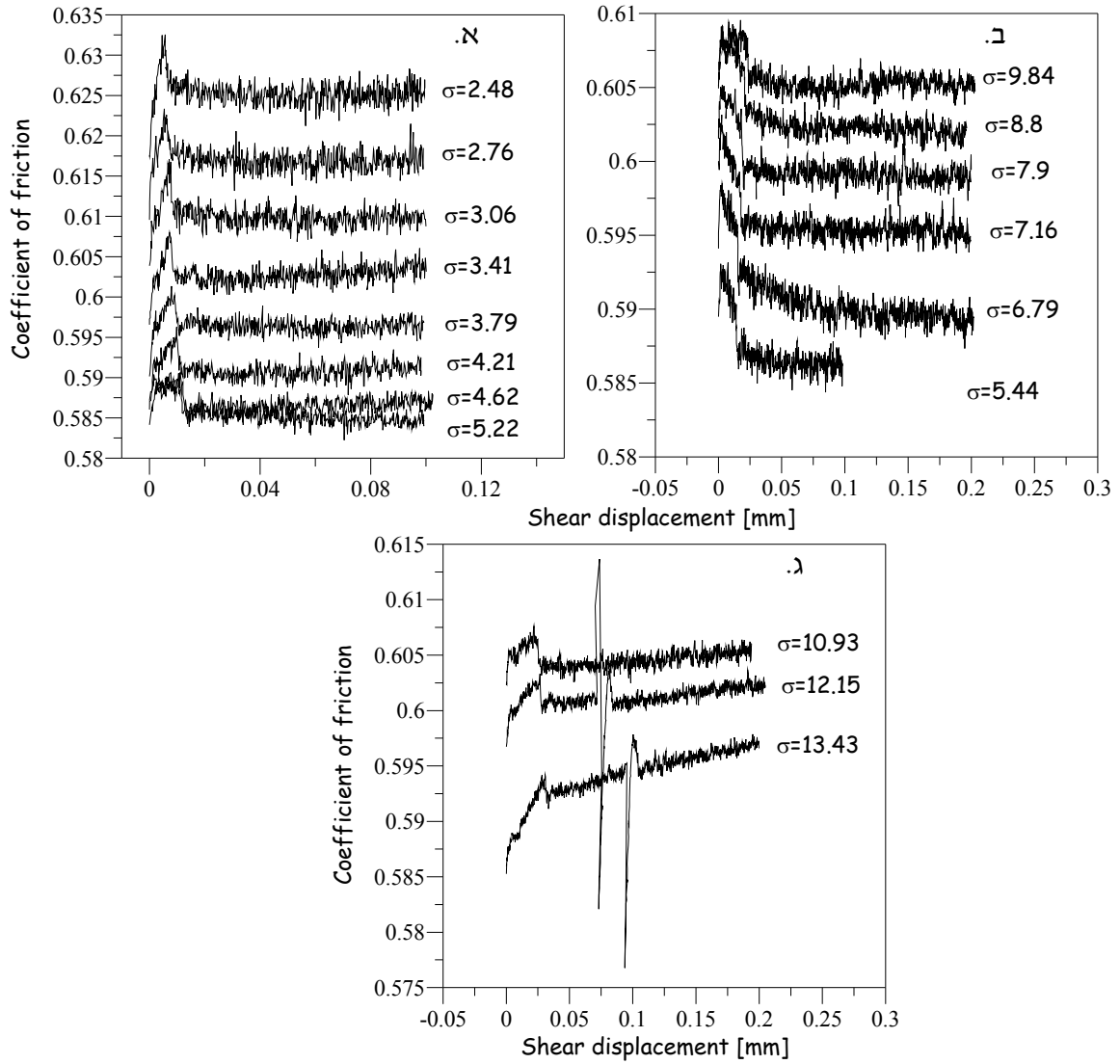
תרשים 56. מקדם החיכוך (קו רציף שחור- ציר אנכי שמאלי) ומאמץ הנורמאלי (קו מקוקו- ציר אנכי ימני) כנגד תזוזת הגזירה. א) ניסויי העמסה (Load) על משטח SC ב) ניסויי פריקה (Unload) על משטח SC.



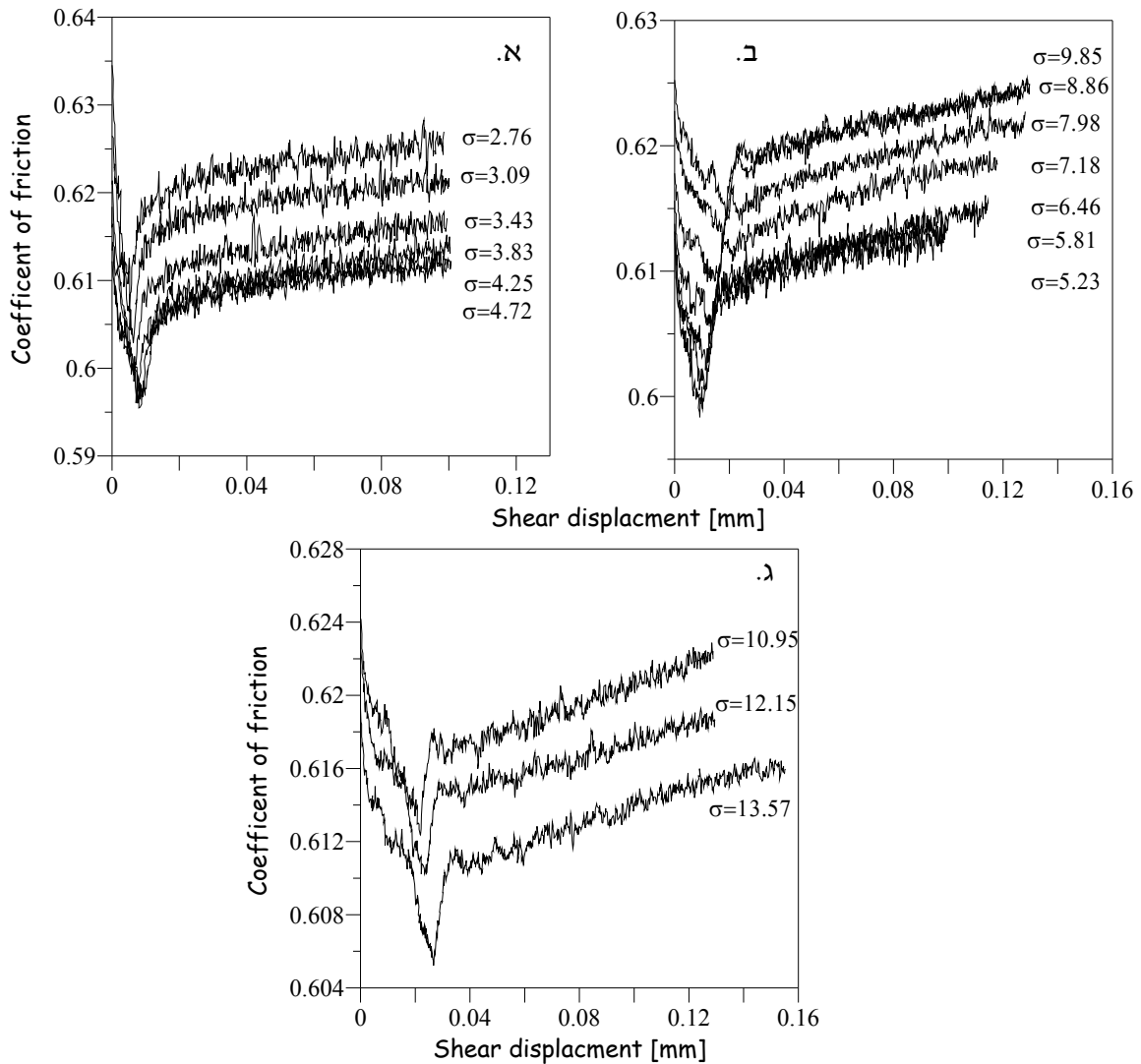
תרשים 57. מקדם החיכוך במצב עמיד כתלות במאמץ הנורמאלי במשטחים מחוספסים. ירדה בערכי מקדם החיכוך עד לנקודת מינימום במאמץ נורמאלי של 5.22 MPa ולאחר מכאן עליה בערכי מקדם החיכוך עם העלייה במאמץ הנורמאלי. במאמצים שמעל 12.5 MPa ישנה ירידה בערכי מקדם החיכוך (סימנים חלולים), יתכן והירידה נובעת מכך שמאמץ הגזירה לא הגיע למצב עמיד. הסימנים המלאים ערכים משוערים של מקדם החיכוך.



תרשים 58. מקדם החיכוך במצב עמיד כנגד המאמץ הנורמאלי בניסויי פריקה (Unload) והעמסה (Load).



תרשים 59. מאמץ גזירה כנגד תזוזת החלקה בניסוי הפריקה על משטח מחוספס המוצג בתרשים 56. א) מגמה A ירידה בערכי מקדם החיכוך עם העלייה במאמץ הנורמאלי. ב) מגמה B -עליה במקדם החיכוך עם העלייה במאמץ הנורמאלי. ג) מגמה C – ירידה בערכי מקדם החיכוך עם העלייה במאמץ הנורמאלי. ניתן לראות כי מקדם החיכוך הגיע למצב עמיד במגמות A ו-B. בכל המגמות ההבדלים במקדמי החיכוך ברורים וחד משמעיים.

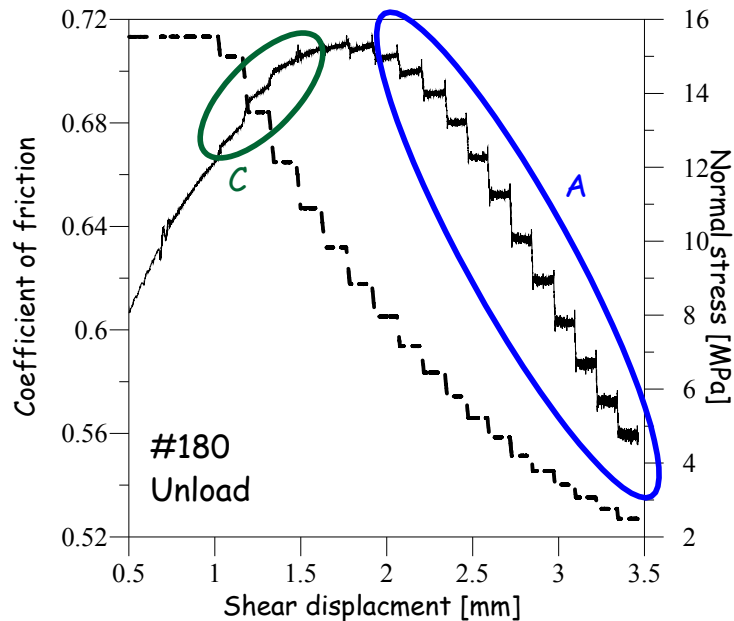


תרשים 60. מאמץ גזירה כנגד תזוזת החלקה בניסוי העמסה על משטח בחספוס SC המוצג בתרשים 56. גם בניסוי זה מופיעים שלושת המגמות: A (א) בו ישנה החלשות עם העלייה במאמץ הנורמאלי, B (ב) בו יש התחזקות עם העלייה במאמץ הנורמאלי ו-C (ג) החלשות נוספת עם העלייה במאמץ הנורמאלי. בניסוי זה באף אחד מהמקטעים מקדם החיכוך לא הגיע למצב עמיד. ניתן לראות כי המגמות זהות אך גודל השינויים קטן יותר מניסוי פריקה. גם בניסויים אלו ככל שמתקרבים לנקודות הקיצון ההבדלים בין מקדמי החיכוך קטנים.

4.4.2. ניסויי פריקה על משטחים מלוטשים

ניסויי פריקה זהים לניסויים שבוצעו על משטחי SC בוצעו על שלוש רמות חספוס #220, SG ו-#180. מכיוון שבניסויי העמסה מקדם החיכוך לא הגיע למצב עמיד, על משטחים אלו בוצעו ניסויי פריקה בלבד. בכל רמות החספוס שצוינו התקבלה התנהגות זהה של מקדם החיכוך (תרשים 61): במאמצים הנורמאליים הגבוהים (11-15 MPa) התקבלו ערכים נמוכים אך הם לא הגיעו למצב עמיד (תרשים 62א). במאמץ 9.91 MPa התקבל מצב עמיד לראשונה. ממאמץ זה, ככל שהמאמץ הנורמאלי הוסר, ערכי מקדם החיכוך ירדו גם כאן כאשר במאמץ הנורמאלי הנמוך ביותר (2.5 MPa) התקבל מקדם החיכוך הנמוך ביותר. בדומה

לניסויים על משטחים מחוספסים מקדם החיכוך הגיע למצב עמיד וההבדלים בערכים ברורים (תרשים 62). בתרשים 65 ניתן לראות כי קיימת התאמה בין רמת החספוס לבין ערכי מקדם החיכוך: במשטח החלק ביותר טווח הערכים שהתקבל 0.22-0.267 לעומת 0.559-0.707 במשטח #180. בנוסף, ישנו הבדל בשיעור ההתחזקות: בחספוס #180 שיעור ההתחזקות הינו הגבוה ביותר – 20% לעומת 10% במשטחים החלקים ביותר (SG) (טבלה 10).



תרשים 61. מקדם החיכוך (קו רציף שחור-ציר אנכי שמאלי) ומאמץ הנורמאלי (קו מקוקו- ציר אנכי ימני) כנגד תזוזת הגזירה בניסויי פריקה על משטח שלוטש באבקת #180.

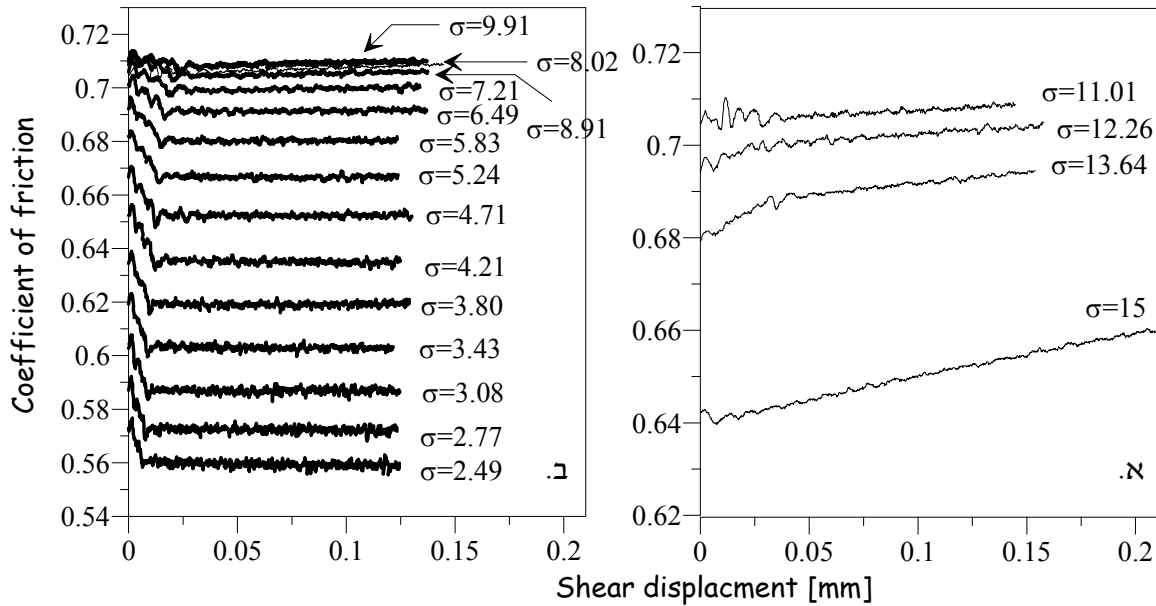
טבלה 10. מקדמי החיכוך המקסימאליים והמינימאליים במשטחים שעברו ליטוש.

רמת ליטוש	מקדם חיכוך מינימאלי (2.5 MPa)	מקדם חיכוך מקסימאלי (10 MPa)	שיעור התחזקות
#180	0.559	0.707	20%
#220	0.53	0.587	10%
SG	0.220	0.267	18%

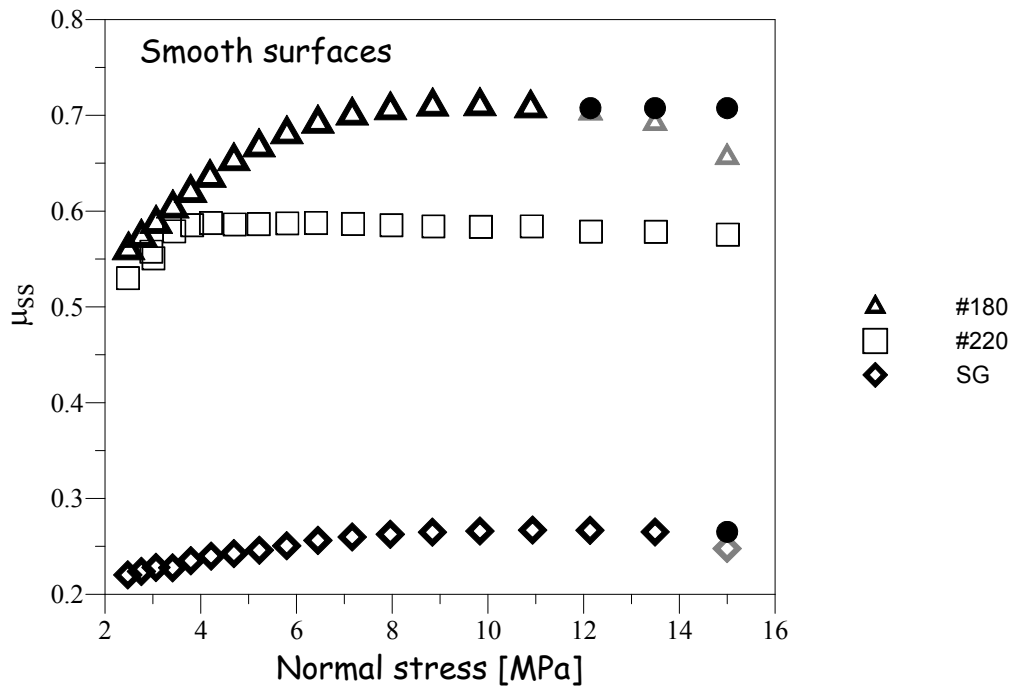
בחינה של ערכי מקדם החיכוך מסדר ראשון במצב עמיד אשר חושבו באמצעות קריטריון קולומב (תרשים 64, טבלה 11) מראה בצורה ברורה את השינויים בערכי מקדם החיכוך ברמות חספוס שונות: ככל שהמשטח מחוספס יותר מקדם החיכוך גבוה יותר (תרשים 63): בחספוס SG, החלק ביותר התקבלו ערכים של $\mu \approx 0.2$, בחספוס של #220 ערכים של $\mu \approx 0.57$ ובחספוס #180 $\mu \approx 0.68$. יש לציין כי מקדם

החספוס שהתקבל ברמת חספוס #180 גבוהה יותר ממקדם החיכוך שהתקבל בחספוס גס יותר (SC) 0.6

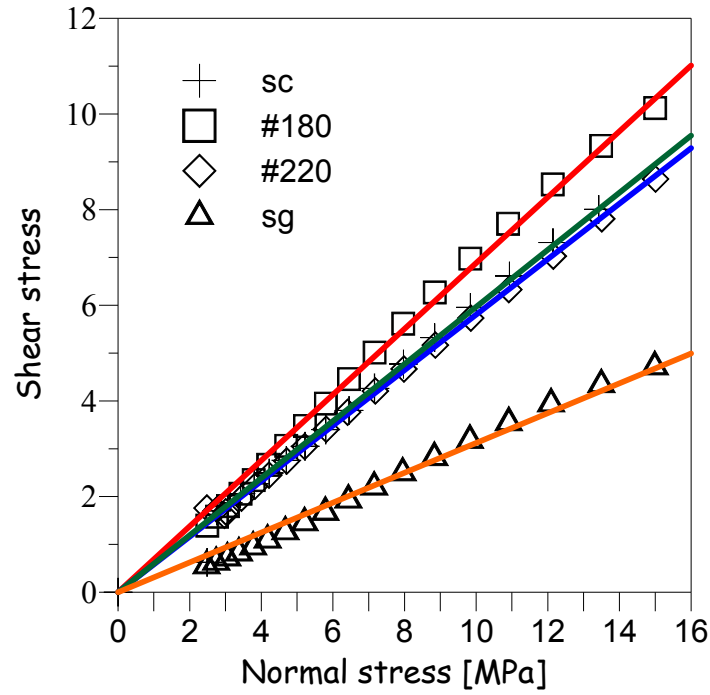
μ (תרשים 65).



תרשים 62. מאמץ גזירה כנגד תזוזת החלקה בניסוי הפריקה על משטח בחספוס #180 המוצג בתרשים 61. בניסוי זה מתקבלות מגמות A ו-C בלבד. א) מגמה C, עליה בערכי מקדם החיכוך עם ההורדה בעומס במגמה זו מקדם החיכוך לא הגיע למצב עמיד באף אחד מהמאמצים הנורמאליים. ב) מגמה A, ירידה בערכי מקדם החיכוך עם הורדת העומס. בטווח מאמצים זה ההבדלים במקדמי החיכוך ברורים ולא שווים.



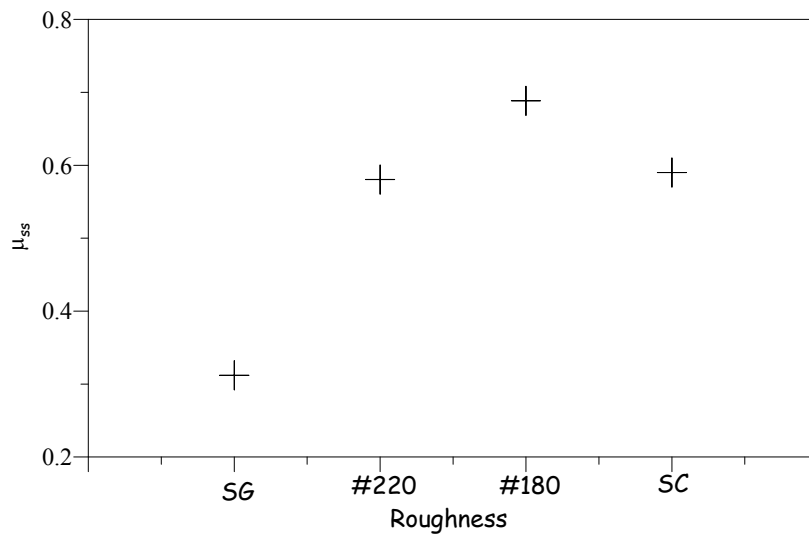
תרשים 63. מקדם החיכוך כפונקציה של מאמץ הנורמאלי במשטחים חלקים. סימנים אפורים מציינים ערכים בהם מקדם החיכוך לא הגיע למצב עמיד, סימנים מלאים מציינים ערכים משוערים.



תרשים 64. קריטריון קולומב עבור ניסויי גזירה ברמות חספוס שונות במהירות $1 \mu\text{m/S}$. ערכי מקדם החיכוך המחושבים וקבועי קורלציה מוצגים בטבלה 11.

טבלה 11. ערכי מקדם החיכוך וקבועי הקורלציה אשר התקבלו באמצעות קריטריון קולומב.

R^2	מקדם חיכוך	רמת חספוס
0.991	0.60	SC
0.943	0.68	#180
0.998	0.58	#220
0.999	0.31	SG



תרשים 65. מקדם החיכוך במצב עמיד (כפי שהתקבל מקריטריון קולומב) כתלות ברמת החספוס. רמות החספוס מצוינות בציר האופקי, המרווחים בציר אינם מייצגים את ההפרש בחספוס

5. דיון

ניסויי הגזירה שהוצגו במחקר זה בחנו שינויים קטנים (סדר שני) של מקדם החיכוך. בנוסף לגורמים הרבים שהוזכרו המשפעים על ערכי מקדם החיכוך ישנם גורמים נוספים ידועים ולא ידועים המשפעים על תוצאות הבדיקה. מתוצאות הניסויים שהוצגו לעיל עולה שישנו קשר בין תלותו של מקדם החיכוך במשתנים השונים, כפי שעולה מתיאורית הקצב-מצב ובין רמת החספוס של הממשק. קשר זה עולה משני מערכי ניסוי שבוצעו במחקר זה – ניסויים בהם אופיין מקדם החיכוך באמצעות קריטריון קולומב במהירויות החלקה שונות בשתי רמות חספוס (פרק 4.3) ובניסויים בהם שונה המאמץ הנורמאלי תוך כדי החלקה (פרק 4.4). יתכן, וקשר זה נובע מהשפעת החספוס על שטח המגע האמיתי ומצב המגעים בנקודת זמן נתונה המתואר על ידי פרמטר המצב.

השפעת החספוס על מקדם החיכוך כפי שעולה ממחקר זה בשילוב עם חוקי הקצב מצב, משמעותית יותר ביישומים הנדסיים ופחות ביישומים גיאופיזיים. בנייתוח תנועה על שברים גיאולוגיים, חספוס הממשק אינו גורם משמעותי מכיוון שמישורי השבר אינם באים במגע ישיר אחד עם השני וישנו חומר מרוסק החוצץ בין הממשקים (gouge). לעומת זאת, בנייתוח בעיות הנדסיות רמת החספוס הינה גורם משמעותי יותר ויתכן ושילוב חוקי הקצב מצב והחספוס יסבירו תופעות שלא הצליחו להסבירם עד כה.

5.1 תלות מקדם החיכוך במהירות ההחלקה דרך קריטריון קולומב.

מקריטריון קולומב שחושב עבור שתי רמות חספוס במהירויות החלקה שונות עולה כי מקדם החיכוך תלוי במהירות ההחלקה: במהירויות ההחלקה הגבוהות ערכי מקדם החיכוך קטנים יותר מאשר ממהירויות ההחלקה הנמוכות כלומר $a-b < 0$ (velocity weakening). הביטוי $a-b$ הינו רכיב חשוב בתיאורית הקצב מצב מפני שהוא מתאר את התלות של מקדם החיכוך, במצב עמיד, במהירות ההחלקה:

$$a - b = \Delta\mu / \Delta \ln V \quad .19$$

כאשר $\Delta\mu$ הינו בין מקדם החיכוך במצב עמיד ו $\Delta \ln V$ הינו לוגריתם יחס המהירויות. אפיון פרמטר זה בצורה מדויקת במעבדה בעייתי, והוביל לדיווחים על מגוון ערכים רחב (עבור אותו חומר) (Blanpied, Tullis, & Weeks, 1989; Dieterich, 1981; T. E. Tullis, Blanpied, & Weeks, 1987). למרות מגוון הערכים הרחב, מקובל שעבור ממשקים מחוספסים (טבעיים) $a-b > 0$ ועבור ממשקים עם שכבת חומר החוצצת בין שני המשטחים (simulated fault gouge) $a-b < 0$ (Marone, Hobbs, & Ord, 1992). חומר המילוי בין הממשקים הינו תוצאה של גזירת הגבשושיות במהלך ההחלקה. ישנן תצפיות המעידות על כך

שנוכחות חומר המילוי והיווצרותו במהלך הגזירה משנות את תכונות הממשק מ-velocity weakening (a-) ל-velocity strengthening (b < 0) (Blanpied et al., 1987). מרחק ההחלקה הנדרש בכדי לשנות את תכונות החומר, מושפע מרמת החספוס והוא גדל ככל שהמשטח מחוספס יותר (Biegel, Sammis, & Dieterich, 1989). תוצאות הניסויים בהם נבחנה התלות של מקדם החיכוך במהירות ההחלקה דרך קריטריון קולומב תואמות תצפיות אילו. במשטחים החלקים (SG) התקבל $a-b=-0.0719$ ובמשטחים המחוספסים (SC) $a-b=-0.0206$ (תרשים 54), כלומר השינויים במקדם החיכוך כתוצאה מהעלאת מהירות ההחלקה יהיו גדולים יותר במשטחים המחוספסים מאשר במשטחים החלקים. יתכן שההבדל בין שתי רמות החספוס בערכי ה- $a-b$ מייצג את תהליך השינוי בתכונות החומר ממצב בו $a-b < 0$ למצב בו $a-b > 0$. כפי שהוזכר, תהליך השינוי בתכונות החומר מושפע מכמות וקצב היווצרות החומר המרוסק בין הממשקים. במשטחים המחוספסים, יש יותר גבשושיות שנגזרות, קצב הצטברות החומר גבוהה ולכן ערכי $a-b$ קרובים יותר לאפס. יתכן ובמרחק ההחלקה גדול יותר, יוצר יותר חומר מרוסק וערכי ה- $a-b$ יהפכו חיוביים. לעומת זאת, במשטחים החלקים כמות החומר המרוסק המצטבר במהלך ההחלקה קטנה יותר ולכן ערכי ה- $a-b$ נמוכים יותר מהערכים שהתקבלו במשטחים המחוספסים. יש לציין כי בניסויים אילו לא נמדדה בצורה כמותית כמות החומר המרוסק שנוצר כתוצאה מהגזירה. מדידה זו יכולה להסביר ולאפיין בצורה כמותית את הקשר בין הצטברות החומר המרוסק, לרמת החספוס ולשינויים בערכי ה- $a-b$ אך הינה מורכבת מאוד מבחינה טכנית. שינוי תכונות החומר כפי שהוצג, משמעותי בהקשר התנהגות שברים גיאולוגיים. לפי (Rice & Ruina, 1983; Ruina, 1983) תנאי הכרחי לפעילות סייסמית הוא $A-B < 0$. בהנחה שיש שינוי בתכונות החומר כתוצאה מהגזירה כפי שנצפה, אופי התנועה על שברים גיאולוגיים יכול להשתנות בזמן, מתנועה סייסמית לתנועה א-סייסמית. ישום מסקנה זו על שברים גיאולוגיים מבחינה מעשית בעייתי בגלל בעיית קנה מידה. בכדי להשליך את התוצאות המעבדה יש להגדיר מהו חספוס של שבר גיאולוגי, מהו חומר המילוי והעובי שלו ולהשליך לרמת החספוס שניתן לייצר במעבדה. התוצאות המוצגות מעידות על קיום תופעה פיסקאלית אך יישומם על שברים גיאולוגיים עדיין בעייתי. בנוסף לתלות במקדם החיכוך במהירות ההחלקה וערכי ה- $a-b$ ברמת החספוס ניתן לראות מתוצאות ניסויים אילו את התלות של מקדם החיכוך ברמת החספוס. טווחי ערכי מקדם החיכוך שהתקבלו במשטחים החלקים הוא (0.293-0.509) לעומת (0.495-0.591) במשטחים המחוספסים. ניתן להסביר שינויים אילו באופן פיזיקאלי כפי שצוין הפרק 2.3. תוצאה זו הינה משמעותית ליישומים הנדסיים שכן ניתן להשליך את רמות החספוס במעבדה לקנה מידה המתאים לחלק מיישומים אילו.

5.2. שינויים במקדם החיכוך כתוצאה משינוי במאמץ הנורמאלי

מתוצאות ניסויים אילו עולה כי מקדם החיכוך תלוי הן במאמץ הנורמאלי והן בחספוס. השינוי של מקדם החיכוך כתוצאה משינוי במאמץ הנורמאלי תלוי ברמת החספוס של הממשק. בממשקים המחוספסים ערכי מקדם החיכוך גדלים עם עליית המאמץ, לאחר מכן קטנים וגדלים שוב לעומת הממשקים החלקים בהם מתקבלות שתי המגמות האחרונות. בנוסף לתלות זו ממוצע הערכים של מקדם החיכוך גבוה יותר בממשקים מחוספסים מאשר בחלקים (טבלה 11). את ההבדלים בממוצע הערכים (גם בניסויים בהם נמצא מקדם החיכוך דרך קריטריון קולומב – מוהר), ניתן להסביר באופן פיזיקאלי לפי הניסויים של ממשקי השינויים (Patton, 1966): בנוסף לזווית החיכוך הפנימית המושפעת מתכונות החומר, מקדם החיכוך מושפע מהטופוגרפיה המקומית של פני השטח (המיוצגת באופן תיאורטי על ידי זווית החיכוך i). הגבשושיות יוצרות התנגדות נוספת להחלקה ולכן, מאמץ הגזירה הנדרש לגזור משטח מחוספס גדול יותר מהמאמץ שנדרש במשטח חלק יותר.

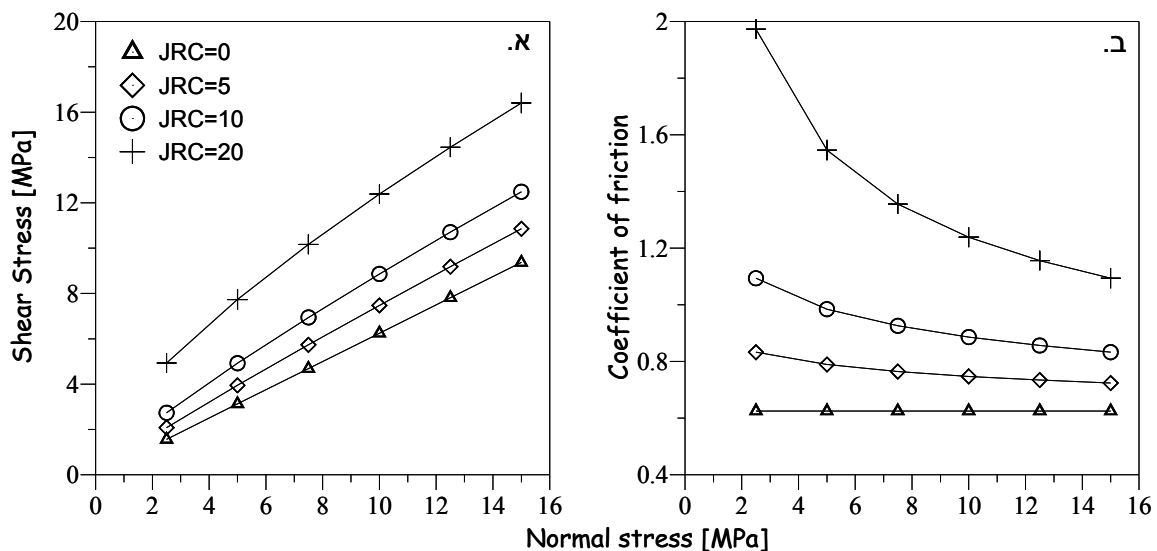
בבחינת השתנות מקדם החיכוך כתלות במאמץ הנורמאלי במשטחים המחוספסים (ללא ליטוש-SC), ניתן למצוא אנלוגיה לקריטריון הכשל של Barton (1971; Jaeger, 1977; Barton & Choubey, 1977) המתחשב ברמת החספוס של פני שטח של סדקים טבעיים. לפי קריטריון זה,

$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \cdot \log \left(\frac{jcs}{\sigma_n} \right) + \phi \right], \quad 20$$

כאשר τ ו- σ הם מאמצי הגזירה והנורמאלי בהתאמה, JRC משתנה המייצג את רמת החספוס, jcs חוזק הלחיצה החד צירי ו- ϕ זווית החיכוך הטהורה. JRC הינו משתנה שיכול לקבל ערכים מ-20-0. הערכת החספוס וקביעת ה-JRC מבוססת על מדידות פשוטות (ללא מכשור אופטי) והשוואתם לסקאלה ידועה. ככל שערכי ה-JRC גבוהים יותר הם מייצגים רמת חספוס גבוהה יותר. כאשר $JRC=0$ המשטח חלק לחלוטין, מקדם החיכוך קבוע ומושפע מזווית החיכוך השיורית בלבד. בתרשים 66 מוצג קריטריון חוזק הגזירה של Barton המחושב עבור מאמצי נורמאליים זהים למאמצי שהופעלו בניסויים הרלוונטיים. כפי שניתן לראות, לפי קריטריון זה מקדם החיכוך תלוי גם כן במאמץ הנורמאלי: במאמצי הנמוכים מתקבלים ערכים גבוהים של מקדם החיכוך וככל שהמאמץ הנורמאלי גדל, מקדם החיכוך קטן במגמה דומה לשנוי במקדם החיכוך בטווח מאמצי שבין 2.5MPa ל-5.22MPa בניסויים על המשטחים המחוספסים. לפי קריטריון Barton, שיעור השינוי של מקדם החיכוך כתלות במאמץ הנורמאלי תלוי

ברמת החספוס: במשטח החלק ביותר מקדם החיכוך קבוע ובמחוספס ביותר שיעור השינוי של מקדם החיכוך בין המאמץ הנורמאלי הגבוהה ביותר לבין המאמץ הנמוך ביותר מגיע ל 44% (לעומת שינוי של 6.5% בניסויים על משטחים מחוספסים בטווח מאמצים 5 MPa-2.5 MPa). יש לציין כי בשונה מתוצאות הניסויים שהוצגו, לפי קריטריון Barton, מקדם החיכוך יכול להיות גבוהה מ 1 וההבדלים בין רמות החספוס גדולים בצורה משמעותית. כמו כן לא ניתן להשליך מערכי ה-JRC לרמות החספוס בניסוי. בנוסף, בכל רמות החספוס, במאמצים נורמאליים גבוהים, מקדם החיכוך מגיע לערך שירי קבוע, ואין התחזקות של מקדם החיכוך כפי שנצפה הן במשטחים החלקים והן במשטחים המחוספסים.

הדמיון בין הקריטריונים בטווח המאמצים הנמוכים יכול לתת הסבר פיסקאלי אפשרי לשינוי במקדם החיכוך. במאמצים הנמוכים החספוס הינו גורם המשפיע על מקדם החיכוך. ככל שמעלים את המאמץ האנכי ישנה שחיקה גדולה יותר של החספוס ולכן מקדם החיכוך קטן. ניתן לראות כי בניסויים במשטחים המחוספסים הערכים הנמוכים ביותר התקבלו ב- 5.22 MPa, יתכן שמאמץ זה הינו חוזק הגזירה של הגבשושיות ולכן במאמץ זה מתקבלת זווית החיכוך השירית. מכיוון שמאמץ זה ואילך הגבשושיות נגזרות ושטח המגע משתנה כתוצאה מכניעה פלסטית של הגבשושיות מקדם החיכוך גדל. לפי ממצאים אילו, ניתן להגיע למסקנה כי לכל חומר ישנה זווית חספוס שירית התלויה הן בחוזק הגזירה של הגבשושיות והן ברמת החספוס ההתחלתית.



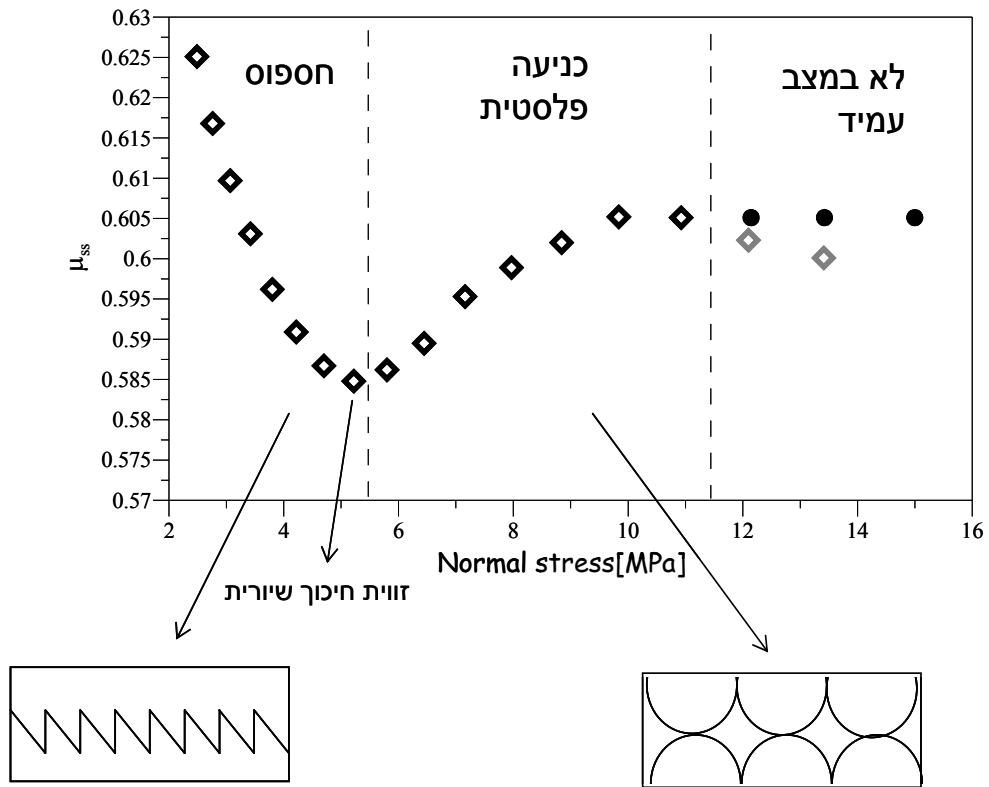
תרשים 66. קריטריון הכשל של Barton עבור מקדמי חספוס שונים, בטווח מאמצים נורמאליים של 2.5-15 MPa וזווית חיכוך שירית $\phi = 32^\circ$. א. חוזק הגזירה. ב. חישוב מקדם החיכוך מקריטריון זה.

הדמיון באופי השינוי במקדם החיכוך, במאמצים נורמאליים נמוכים בין קריטריוני כשל שמבאים בחשבון חספוס, וההבדל בהתחזקות בין המשטחים המלוטשים והלא מלוטשים יכולה להביא להסבר פיזיקאלי אפשרי לשינויים שהתקבלו במקדם החיכוך במאמצים הנורמאליים השונים.

בהתבסס על תיאורית הקצב מצב, הגורם המשפיע על מקדם החיכוך הינו שטח המגע האמיתי בין המשטחים, בנוסף נראה כי גם לחספוס השפעה רבה. על ידי שילוב שתי גישות אילו ניתן להסביר באופן איכותי את השינויים בערכי מקדם החיכוך כתוצאה משינויים במאמץ הנורמאלי. השינויים נובעים משלושה מנגנונים שונים (תרשים 67):

- חספוס
- חוזק גזירה של הגבשושיות
- כניעה פלסטית של הגבשושיות כתוצאה ממאמץ נורמאלי.

ראשית, כפי שנראה בקריטריון הכשל של Barton, במאמצים נורמאליים נמוכים, החספוס הינו הגורם המשמעותי. במאמצים אלו הגבשושיות "מטפסות" אחת על השנייה שטח המגע גדול וישנה תרומה של החספוס להתנגדות להחלקה. ככל שהמאמץ הנורמאלי גדל, יותר גבשושיות נגזרות והתרומה של החספוס קטנה וכך גם מקדם החיכוך. יש לציין כי במערכת הניסוי בה בוצעו הניסויים לא ניתן למדוד את התזוזות האנכיות של הדוגמה במאמצים הנמוכים בשל רמת הדיוק של המדידים. מאמץ נורמאלי של 5.22 MPa הינו הנקודה בה מקדם החיכוך הגיע לערך הנמוך ביותר. מאמץ זה הינו חוזק הגזירה של הגבשושיות של החומר הנבדק ובמאמץ זה מתקבלת זווית החיכוך השירית והחספוס אינו משפיע על זווית החיכוך. לאחר מאמץ זה הגורם המשפיע על זווית החיכוך הינו שטח המגע האמיתי בין הממשקים. עם התגברות המאמץ הנורמאלי מתרחשת כניעה פלסטית של הגבשושיות. כניעה זו מגדילה את שטח המגע האמיתי בין המשטחים המתבטא בעליה של מקדם החיכוך. במשטחים שעברו ליטוש, נקודה זו הינה נקודת המוצא שכן תהליך הליטוש ביטל את החספוס של המשטח. יתכן שקצב הכניעה הפלסטית של הגבשושיות אינו קבוע בזמן ותלוי בגובה המאמץ הנורמאלי. ככל שהמאמץ גבוה יותר כך גם קצב הכניעה. השערה זו מבוססת על התצפית שמנקודת המינימום, במשטחים המחוספסים, וממאמץ של 5.83 MPa שיעור ההתחזקות אינו קבוע. בנוסף, כאשר מגיעים למאמץ נורמאלי גבוה מ-11 MPa לא מתקבל מצב עמיד. במאמצים הנורמאליים הגבוהים, הכניעה הפלסטית, המגדילה את שטח המגע, מהירה יותר מקצב ה"הריסה" של המגעים כתוצאה ממהירות ההחלקה ולכן מתקבלת התחזקות של הממשק ומרחק ההחלקה שבוצע בניסוי אינו מספיק דיו בכדי להגיע למצב עמיד.



תרשים 67. תרשים סכמטי המדגים את מצב הגבשושיות בטווחי המאמצים הנורמאליים השונים: במאמצים הנורמאליים הנמוכים הגבשושיות לא נגזרות, שטח המגע הינו הגדול וכך גם מקדם החיכוך. ב- 5.22 Mpa הגבשושיות נגזרות והשפעת החיכוך מתבטלת. לאחר מאמץ זה שטח המגע גדל עם העלייה במאמץ הנורמאלי כתוצאה מכניעה פלסטית ולכן מקדם החיכוך גם גדל.

6. סיכום ומסקנות

מטרת עבודה ניסיונית זו הינה לבחון גורמים שונים המשפיעים על מקדם החיכוך הן ליישומים גיאופיזיים והן ליישומים הנדסיים. תחילה, נבחנה מערכת הגזירה הישירה על ידי שחזור ניסויי קצב מצב. לאחר שיכולות המערכת הוכחו בוצעו ניסויים הבודקים את השינויים במקדם החיכוך כתוצאה משינויי מהירות והמאמץ הנורמאלי על ממשקים עם רמות חספוס שונות:

שחזור ניסויי קצב מצב

מטרת סידרת הניסויים זו הינה בחינת מערכת הניסוי שנמצאת בראשותנו. רוב הניסויים הבוחנים את מקדם החיכוך כפי שמתואר בתיאוריית הקצב מצב בוצעו במערכת גזירה כפולה. במערכת מסוג זה פיזור המאמצים סימטרי. מערכת הגזירה בה בוצעו הניסויים הינה מערכת גזירה על מישור בודד בה פיזור המאמצים אינו סימטרי. בכדי לבדוק שההבדלים במבנה המכבש לא משפיעים על התוצאות המתקבלות שוחזרו שלושה ניסויי קצב מצב: עצירות קצובות, שינוי מהירות ושינוי מהיר במאמץ הנורמאלי. מתוצאות הניסויים ניתן לראות כי מבנה המערכת לא משפיע על תוצאות ניסויים וניתן לשחזר תוצאות ניסויי קצב מצב במערכת זו.

השפעת החספוס על מקדם החיכוך במצב עמיד במהירויות החלקה שונות

בסדרת הניסויים זו בוצעו ניסויי גזירה במאמצים נורמאליים שונים בכדי ליצור את מעטפת קולומב עבור שתי רמות חספוס שונות. מתוצאות ניסויים אילו עולה:

קריטריון קולומב תקף עבור מהירות ורמת חספוס מסוימת (במקדמי קורלציה <0.994).

השוואה בין מקדמי החיכוך, כפי שהתקבלו מקריטריון קולומב עבור אותה רמת חספוס מראה כי ערכי מקדם החיכוך תלויים במהירות ההחלה בדומה לתוצאות ניסויי מהירות. יש לציין כי בחינה של התלות של מקדם החיכוך במהירות ההחלקה דרך קריטריון קולומב מקובלת פחות בניסויי קצב מצב. השוואה בין רמות שתי רמות החספוס מראה כי התלות של מקדם החיכוך במהירות משתנה בין שתי רמות החספוס. הביטוי A-B המשקף את התלות של מקדם החיכוך במצב עמיד, במהירות ההחלקה משתנה ברמות חספוס שונות. תחום ערכי מקדם החיכוך שונה בצורה משמעותית בין רמות החספוס: במשטחים המחוספסים (0.495-0.591) לעומת המשטחים החלקים (0.293-0.509).

שינויים במקדם החיכוך כתוצאה משינוי במאמץ הנורמאלי

בניסויים אילו שונה המאמץ הנורמאלי תוך כדי גזירה במהירות קבועה במשטחים בעלי רמות חספוס שונות. בשונה מהניסויי שינוי מאמץ נורמאלי שבוצעו, שינוי המאמץ בוצע באופן איטי ומבוקר וגודל השינויים היה יחסי למאמץ ההתחלתי. מתוצאות ניסויים אילו נראה הבדל משמעותי בין המשטחים החלקים למשטחים המחוספסים. במשטחים המחוספסים נראו שלוש מגמות שינוי, בערכי מקדם החיכוך,

בשלוש טווחי מאמץ נורמאלי שונים: בטווח מאמצים נורמאליים נמוכים (2.5 MPa- 5.22 MPa) ערכי מקדם החיכוך קטנו עם העלאת המאמץ הנורמאלי כאשר ב- 5.22 MPa המקדם בחיכוך הגיע לנקודת מינימום. בטווח מאמצים בינוניים (5.22-10.9 MPa) ערכי מקדם החיכוך עלו עם העלאת המאמץ ובטווח המאמצים הגבוהים (10.9-15 MPa), מקדם החיכוך לא הגיע למצב עמיד והתחזק עם ההחלקה. במשטחים החלקים, התקבלו שתי המגמות האחרונות הלבד: בטווח המאמצים הנורמאליים 2.5-10.9 MPa ערכי מקדם החיכוך עלו עם העלאת המאמץ הנורמאלי ובטווח הערכים 10.9-15 MPa מקדם החיכוך לא הגיע למצב עמיד והתקבלה התחזקות עם התקדמות הגזירה. מתוצאות אילו ניתן להניח כי במאמצים הנמוכים החספוס הינו הגורם המשפיע על ערכי מקדם החיכוך ואילו במאמצים הגבוהים מחוזק הגזירה של הגבשושיות, מקדם החיכוך מושפע משטח המגע האמיתי בין הממשקים שמשתנה בזמן כתוצאה ממהירות ההחלקה, המאמץ הנורמאלי והיסטוריית ההחלקה.

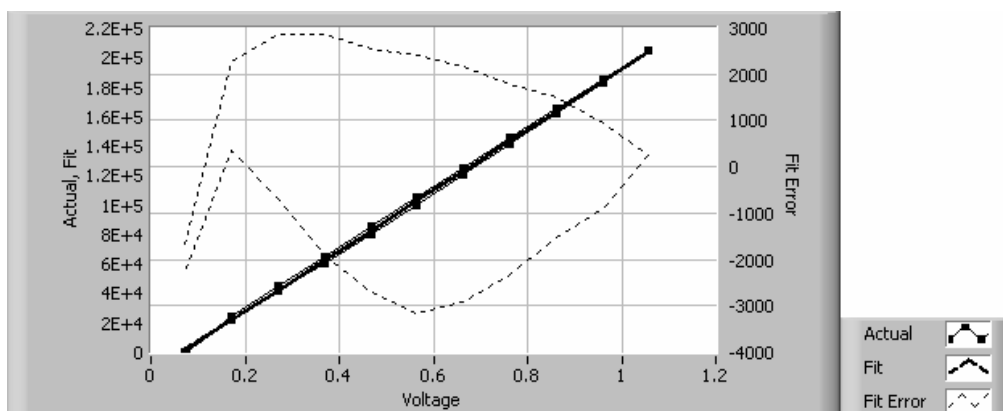
נספח א : ערכי הכיול וסימון של המדידים השונים במערכת הגזירה הישירה.

מדיד	סימון	כיוול	R ²
מד עומס אנכי	Fx	205428.234 N/V	0.9989
מד עומס גזירה	Fy	628803.7773 N/V	0.9992
מד תזוזה על בוכנת הגזירה	Sy	22.459 mm/V	0.9999
מד תזוזה על בוכנה האנכית	Sx	25.559 mm/V	0.9999
מד תזוזה – גזירה	Ya	2.7510 mm/V	0.9999
מד תזוזה – גזירה	Yb	2.7734 mm/V	0.9999
מד תזוזה – אנכי	Xa	2.807 mm/V	0.9999
מד תזוזה – אנכי	Xb	2.818 mm/V	0.9999
מד תזוזה – אנכי	Xc	2.7899 mm/V	0.9999
מד תזוזה – אנכי	Xd	2.5680 mm/V	0.9999

Date: 10.7.07

Channel: Normal Load Transducer (ch 1)

Actual	Voltage	Fit	Fit Error	Error %FS
0	0.0733	1669.6614	-1669.6614	-0.167
24050	0.1712	21767.353	2282.6463	0.228
44870	0.2697	42011.949	2858.051	0.286
65100	0.3682	62234.020	2865.9794	0.287
85100	0.4670	82537.254	2562.7452	0.256
105150	0.5654	102755.29	2394.7021	0.239
125200	0.6641	123031.44	2168.5588	0.217
145100	0.7628	143314.62	1785.3750	0.179
165000	0.8611	163493.85	1506.1469	0.151
184700	0.9597	183759.29	940.70537	0.094
204200	1.0580	203938.15	261.84452	0.026
182900	0.9599	183790.86	-890.86089	-0.089
162000	0.8612	163529.43	-1529.4359	-0.153
140900	0.7624	143225.98	-2325.9871	-0.233
120000	0.6635	122910.93	-2910.9309	-0.291
99600	0.5654	102762.10	-3162.1058	-0.316
79800	0.4668	82500.509	-2700.5090	-0.270
60300	0.3681	62227.702	-1927.7024	-0.193
41300	0.2696	41987.098	-687.09883	-0.069



Scale: 205428.234 N/V

Zero: -13395.550

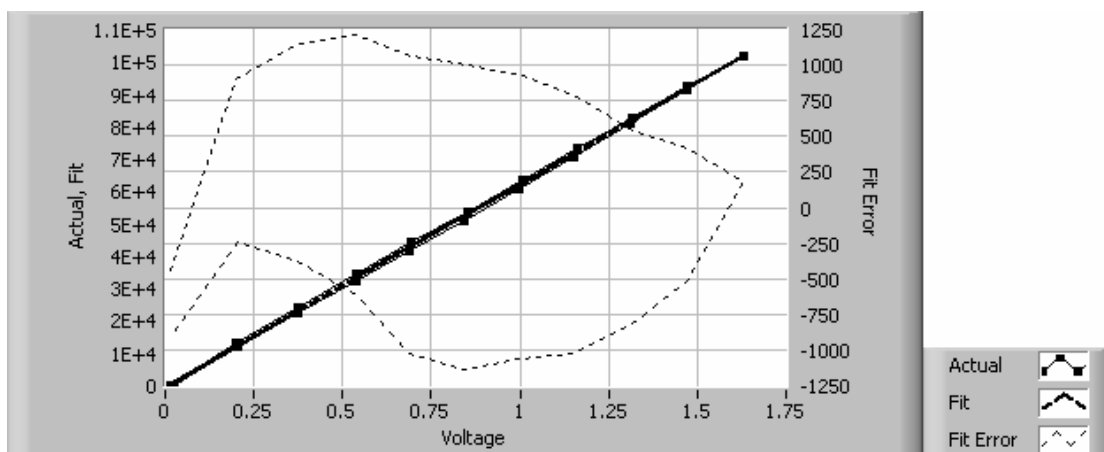
R-square:0.9988511

Calibration

Date: 10.7.07

Channel: Shear Load cell (ch 6)

Actual	Voltage	Fit	Fit Error	Error %FS
0	0.0158	447.69524	-447.69524	-0.448
12940	0.2004	12038.3380	901.66197	0.902
24000	0.3725	22849.0740	1150.9257	1.151
34520	0.5391	33310.2810	1209.7188	1.210
44100	0.6940	43040.7990	1059.2005	1.059
53840	0.8501	52840.5368	999.46316	0.999
63500	1.0051	62576.9880	923.0116	0.923
73070	1.1598	72291.1330	778.86695	0.779
82640	1.3159	82099.3490	540.65073	0.541
92300	1.4718	91888.8930	411.10658	0.411
101920	1.6286	101737.3880	182.61141	0.183
91450	1.4730	91965.7600	-515.76030	-0.516
81045	1.3123	81870.0210	-825.02129	-0.825
70840	1.1530	71863.2770	-1023.2770	-1.023
60900	0.9953	61964.3740	-1064.3740	-1.064
51150	0.8412	52286.3150	-1136.3150	-1.136
41680	0.6886	42700.9100	-1020.9100	-1.021
32510	0.5362	33126.2850	-616.28571	-0.616
22500	0.3731	22884.3200	-384.32020	-0.384



Scale: 62803.7773 N/V

Zero: -546.73651

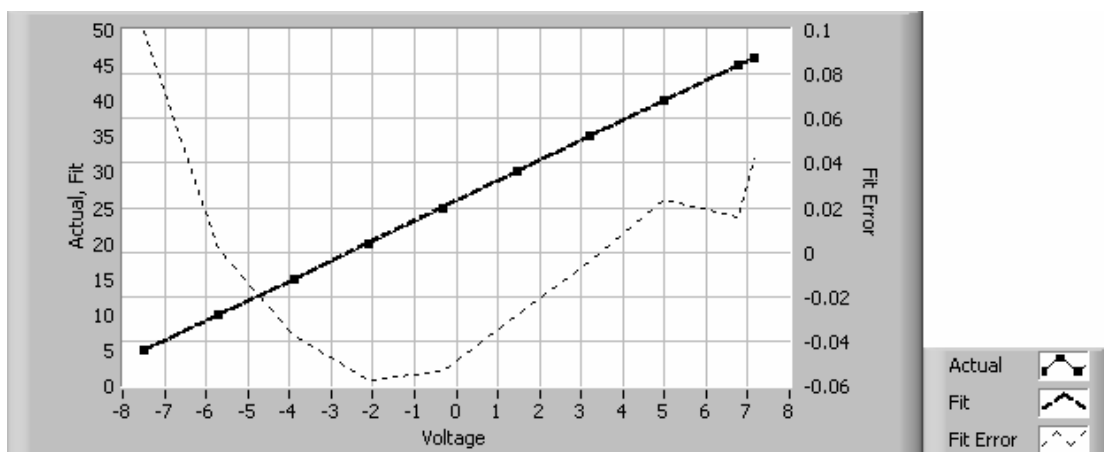
R-square: 0.9992434

Calibration

Date: 10.7.07

Channel: Normal Displacement A Transducer (Xa-ch 8)

Actual	Voltage	Fit	Fit Error	Error %FS
5	-7.5081	4.90103	0.09897	0.198
10	-5.6920	9.99861	0.00139	0.003
15	-3.8969	15.03759	-0.03759	-0.075
20	-2.1086	20.05722	-0.05722	-0.114
25	-0.3287	25.05351	-0.05351	-0.107
30	1.4436	30.02839	-0.02839	-0.057
35	3.2163	35.00442	-0.00442	-0.009
40	4.9877	39.97677	0.02323	0.046
45	6.7716	44.98421	0.01579	0.032
46.1	7.1543	46.05825	0.04175	0.084



Scale: 2.80700 N/V

Zero: 25.97618

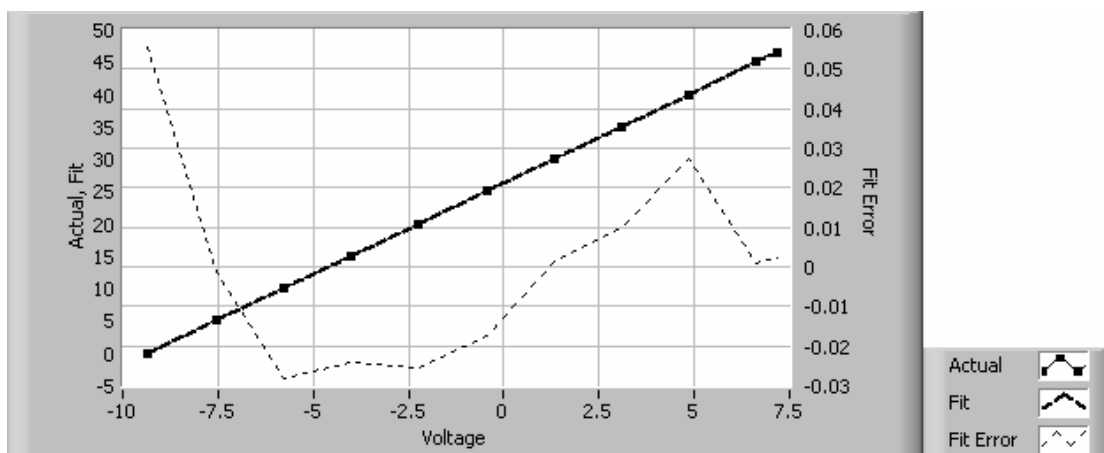
R-square: 0.999989

Calibration

Date: 10.7.07

Channel: Normal Displacement B Transducer (Xb-ch 9)

Actual	Voltage	Fit	Fit Error	Error %FS
0	-9.3533	-0.05568	0.05568	0.111
5	-7.5588	5.00156	-0.00156	-0.003
10	-5.7751	10.02821	-0.02821	-0.056
15	-4.0023	15.02429	-0.02429	-0.049
20	-2.2275	20.02565	-0.02565	-0.051
25	-0.4563	25.01731	-0.01731	-0.035
30	1.3113	29.99846	0.00154	0.003
35	3.0826	34.99033	0.00967	0.019
40	4.8506	39.97259	0.02741	0.055
45	6.6343	44.99931	0.00069	0.001
46.469	7.1551	46.46697	0.00203	0.004



Scale: 2.81811 N/V

Zero: 26.30309

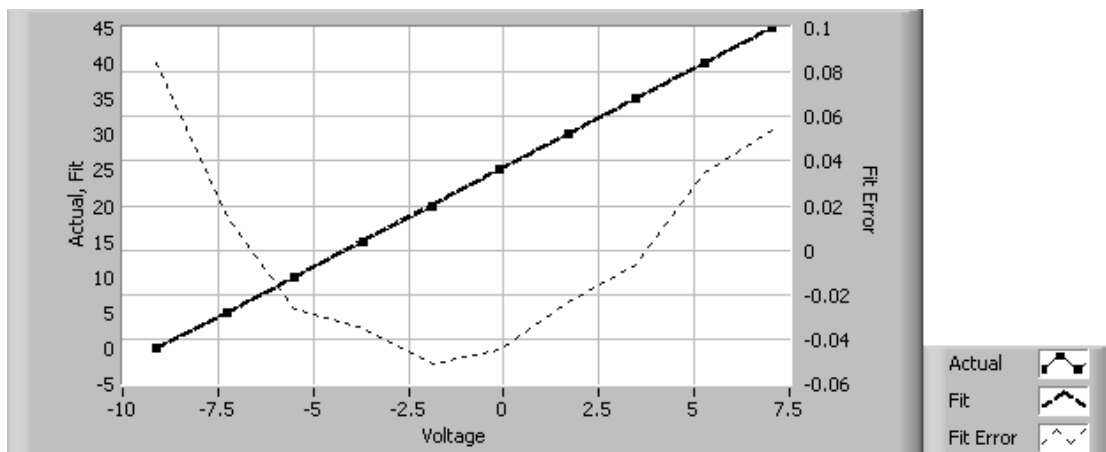
R-square: 0.9999976

Calibration

Date: 10.7.07

Channel: Normal Displacement C Transducer (Xc-ch 10)

Actual	Voltage	Fit	Fit Error	Error %FS
0	-9.1014	-0.08417	0.08417	Inf
5	-7.2844	4.98537	0.01463	Inf
10	-5.4776	10.02618	-0.02618	-Inf
15	-3.6823	15.03497	-0.03497	-Inf
20	-1.8842	20.05134	-0.05134	-Inf
25	-0.0945	25.04471	-0.04471	-Inf
30	1.6902	30.02378	-0.02378	-Inf
35	3.4762	35.00651	-0.00651	-Inf
40	5.2536	39.96538	0.03462	Inf
45	7.0388	44.94594	0.05406	Inf



Scale: 2.78993 N/V

Zero: 25.30823

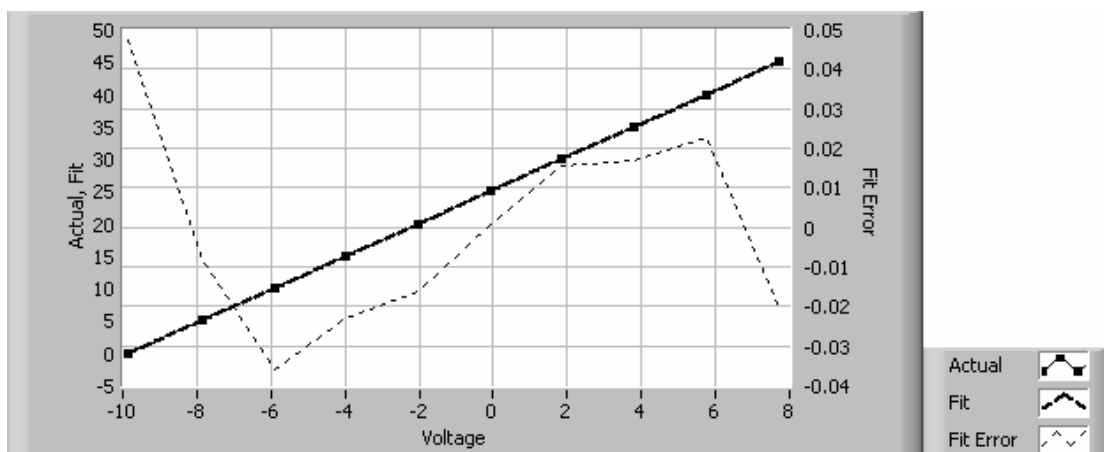
R-square: 0.9999910

Calibration

Date: 10.7.07

Channel: Normal Displacement D Transducer (Xd-ch 11)

Actual	Voltage	Fit	Fit Error	Error %FS
0	-9.8400	-0.04752	0.04752	0.095
5	-7.8713	5.00809	-0.00809	-0.016
10	-5.9135	10.03593	-0.03593	-0.072
15	-3.9715	15.02293	-0.02293	-0.046
20	-2.0271	20.01612	-0.01612	-0.032
25	-0.0866	24.99944	0.00056	0.001
30	1.8546	29.9844	0.0156	0.031
35	3.8011	34.98308	0.01692	0.034
40	5.7459	39.97738	0.02262	0.045
45	7.7095	45.02017	-0.02017	-0.040



Scale: 2.56803 N/V

Zero: 25.22185

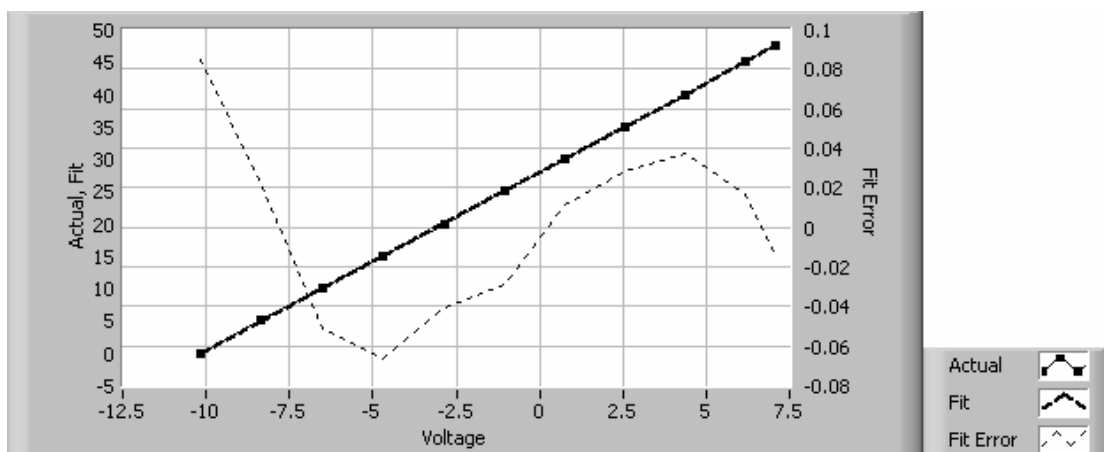
R-square: 0.9999972

Calibration

Date: 10.7.07

Channel: Shear Displacement A Transducer (Ya-Ch 12)

Actual	Voltage	Fit	Fit Error	Error %FS
0	-10.1837	-0.08477	0.08477	0.170
5	-8.3434	4.97787	0.02213	0.044
10	-6.4991	10.05167	-0.05167	-0.103
15	-4.6762	15.06638	-0.06638	-0.133
20	-2.8681	20.04037	-0.04037	-0.081
25	-1.0548	25.02902	-0.02902	-0.058
30	0.7482	29.98891	0.01109	0.022
35	2.5595	34.97173	0.02827	0.057
40	4.3736	39.96244	0.03756	0.075
45	6.1986	44.98289	0.01711	0.034
47.451	7.1006	47.46448	-0.01348	-0.027



Scale: 2.75100 N/V

Zero: 27.93066

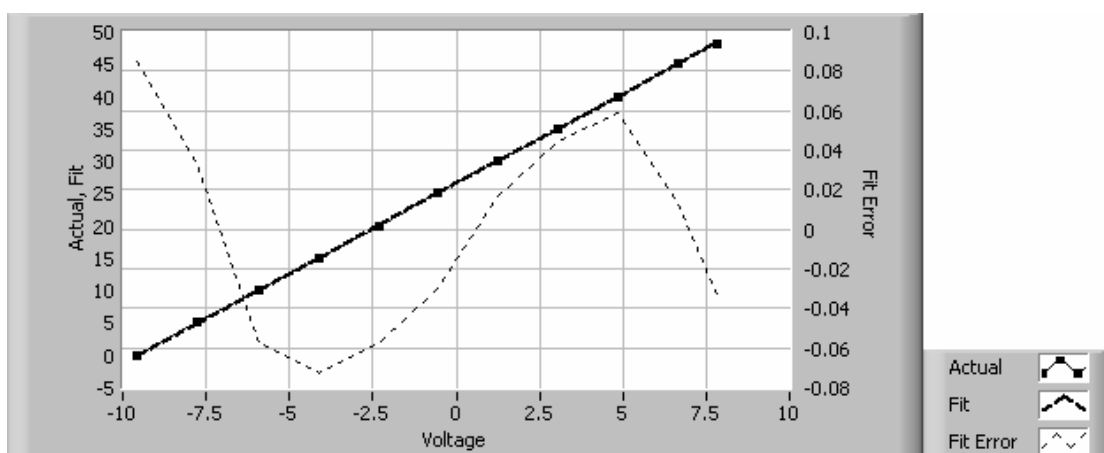
R-square: 0.9999924

Calibration

Date: 10.7.07

Channel: Shear Displacement B Transducer (Yb-Ch 13)

Actual	Voltage	Fit	Fit Error	Error %FS
0	-9.5929	-0.08433	0.08433	0.169
5.003	-7.7705	4.96997	0.03303	0.066
10.009	-5.9328	10.06677	-0.05777	-0.116
15	-4.1278	15.07276	-0.07276	-0.146
20.003	-2.3292	20.06091	-0.05791	-0.116
25.001	-0.5373	25.03078	-0.02978	-0.060
30.009	1.2515	29.99187	0.01713	0.034
35	3.0412	34.95547	0.04453	0.089
40	4.8388	39.94091	0.05909	0.118
45	6.6582	44.98676	0.01324	0.026
48.191	7.8255	48.22413	-0.03313	-0.066



Scale: 2.77342 N/V

Zero: 26.52081

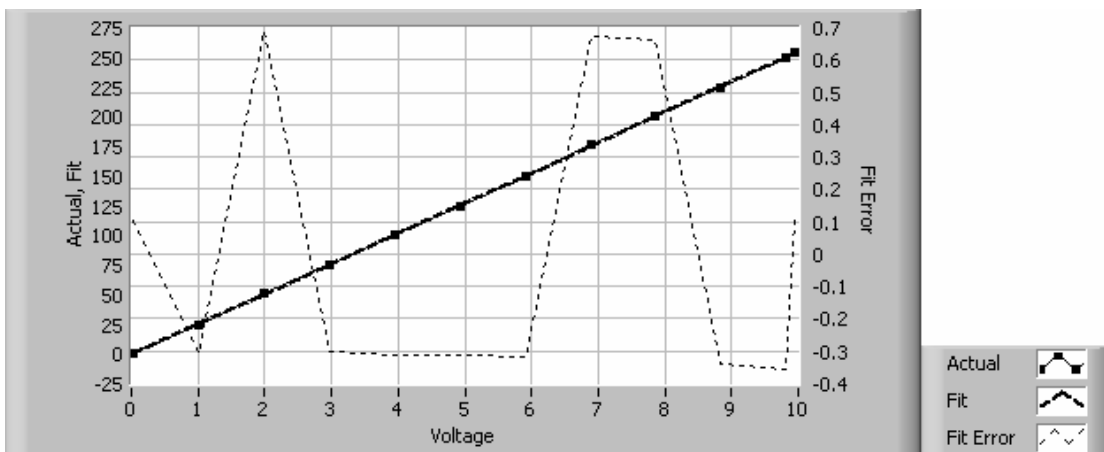
R-square: 0.9999894

Calibration

Date: 10.7.07

Channel: Normal Displacement Transducer (Sx-Ch 2)

Actual	Voltage	Fit	Fit Error	Error %FS
0	0.0203	-0.10352	0.10352	0.041
25	1.0145	25.30614	-0.30614	-0.122
51	1.9927	50.30842	0.69158	0.277
75	2.9706	75.30154	-0.30154	-0.121
100	3.9492	100.31318	-0.31318	-0.125
125	4.9272	125.31065	-0.31065	-0.124
150	5.9056	150.31723	-0.31723	-0.127
176	6.8841	175.32489	0.67511	0.270
201	7.8626	200.33593	0.66407	0.266
225	8.8409	225.33997	-0.33997	-0.136
250	9.8197	250.35627	-0.35627	-0.143
254	9.9580	253.88932	0.11068	0.044



Scale: 25.55861 N/V

Zero: -0.62211

R-square: 0.9999748

נספח ב: ממשק הבקרה ושימוש במכש הגזירה הישירה.

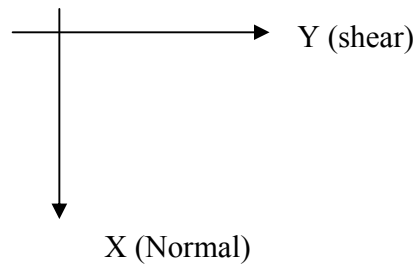
כללי

הוראות השימוש מבוססת על הניסיון המעבדתי שנצבר במהלך עבודה זו וכן מהדרכה ישירה של מתכנן מערכת זו מר בוב גריפין לאור שדרוג תוכנת הבקרה ב 9-15/2007. בנספח זה יפורטו אופן חיבור המדידים לדוגמה ותפעול תוכנת הבקרה.
רכיבי המערכת

TTRT - TerraTek real time computer – מחשב אליו מחוברים כל המדידים והבוכנות, ללא מסך.
TTUI - TerraTek user integrate computer – מחשב עליו נמצאת תוכנת באמצעותה שולטים על המכש
TTshear - תוכנת הבקרה – קיצור דרך מופיע על המסך הראשי (desktop) או c:\Program files\TerraTest
shear\TerraTest.exe
סימנים וכיוונים מסכמים של המכש

כיוון האופקי (גזירה) : y

כיוון אנכי (לחיצה) : x



נתוני פלט הנמדדים ישירות ומוצגים בתוכנת TTshear :

$$\begin{array}{l}
 \left. \begin{array}{l} \text{מדי תזוזה אופקיים} \end{array} \right\} \begin{array}{l} Y_a \\ Y_b \end{array} \\
 \left. \begin{array}{l} \text{מדי תזוזה אנכיים} \end{array} \right\} \begin{array}{l} X_a \\ X_b \\ X_c \\ X_d \end{array}
 \end{array}$$

S_y – תזוזת בוכנת הגזירה

S_x – תזוזת בוכנת הלחיצה

F_y – כוח גזירה

F_x – כוח לחיצה

נתוני פלט מחושבים בתוכנת TTshear :

SigX-מאמץ נורמאלי

Ty- מאמץ גזירה

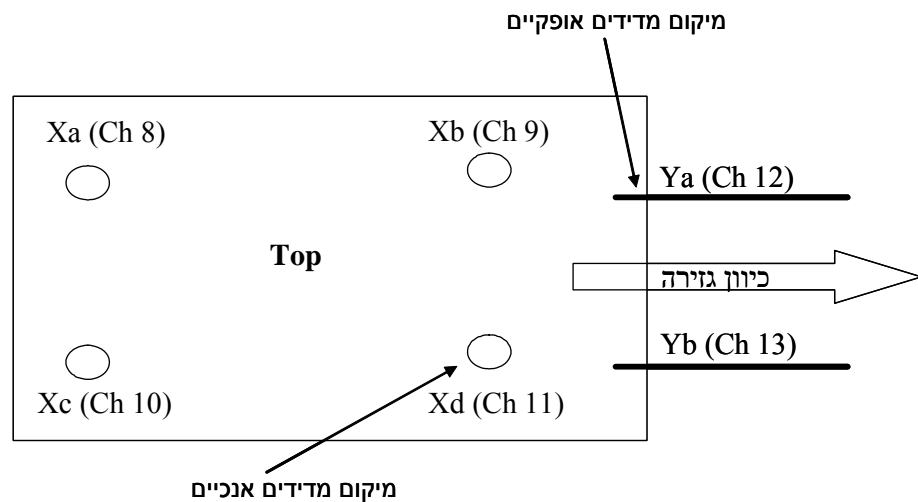
Xave- ממוצע המדידים האנכיים

Yave- ממוצע המדידים האופקיים

לעיתים הנתונים המחושבים (Xave, Yave) אינם נכונים ולכן יש לבדוק אותם לפני עיבוד הנתונים.

חיבור מדי התזוזה ואיפוסם

כל מדיד תזוזה מחובר לקופסת הבקרה בכבל ניפרד. לכל מד תזוזה ישנו ערוץ בקרה נפרד. כל כבל ומדיד מסומנים במספר הערוץ (תרשים 63) ויש להקפיד על חיבור תואם. בקופסת הבקרה האנלוגית ישנו בורר ערוצים, כאשר הוא מכוון על ערוץ מסוים הצג האדום מציג את פלט הנתונים מאותו ערוץ. בכדי להפיק את רמת הדיוק הגבוהה ביותר ממדי התזוזה יש לאפס כל מד תזוזה, כלומר שטווח הקפיץ (המוט שיוצא וזז) יהיה במרכז לפני הבדיקה. בכדי להגיע למצב זה מכוונים כל מדיד ומדי שהפלט החשמלי המוצג בקופסה האנלוגית יהיה ככול שניתן קרוב לאפס. כיוון המדידים נעשה בעזרת הברגים המחברים את המדידים לקופסאות הגזירה. לאחר שכל המדידים מחוברים ומאופסים לפי ההצגה האנלוגית יש לבדוק שהפלט של בהצגה האנלוגית זהה לפלט בתכנת TTshear. בכדי לעשות יש להפעיל את התוכנה, לוודא שהפלט הוא הוולט (לא ביחידות) ולהציג את פלט המדידים. ההצגה בתוכנה היא מדויקת יותר וניתן לכוון כיוון עדין יותר לפי פלט זה. הצגה גדולה של פלט הנתונים ניתן לקבל באמצעות כפתור window בסרגל הכלים העליון.



תרשים 68. מיקום המדידים על קופסאות הגזירה.

התחלת בדיקה

הדלקת שני המחשבים TTRT ו-TTUI, יש לשים לב שמחשב ה-TTRT מסיים לקרוא את כל הנתונים מהכונן הקשיח (כאשר הכונן מפסיק לעבוד).

הפעלת התוכנה TTshear באמצעות קישור בשלוחן העבודה. בעת הפעלת התוכנה מופיע שעון.

הפעלת המשאבה ההידראולית (יש לבדוק שלחץ השמן בשעון ליד קופסאות הגזירה עולה).

לוודא שבלוח הבקרה האנלוגי, בקרת הסרוו היא ידנית (loop 1), בשלב זה ניתן להזיז את הבוכנות בצורה ידנית מהלוח האנלוגי, ללא ניתור ובקרת מחשב.

נעילת הבוכנות (clamp) והעברה של לבקרה של המחשב (loop 2).

הפעלת מערכת הבקרה בסרגל הכלים העליון: start TTRT → Connections כאשר המספרים של הפרמטרים השונים משתנים התוכנה מקבלת נתונים.

הכנה מעגלי השליטה על ידי העברה למצב Hold בשליטה על תזוזת הבוכנות (תמונה), בתום ההכנה יש לבצע איפוס (null) של שני מעגלי השליטה בכפתור האיפוס הנמצא מתחת למעגלים. בטווח המטרה (G) יש לכתוב

את מיקום הבוכנות במצב הנתון קרי לקרוא את הפלט המתקבל עבור S_x ו- S_y .



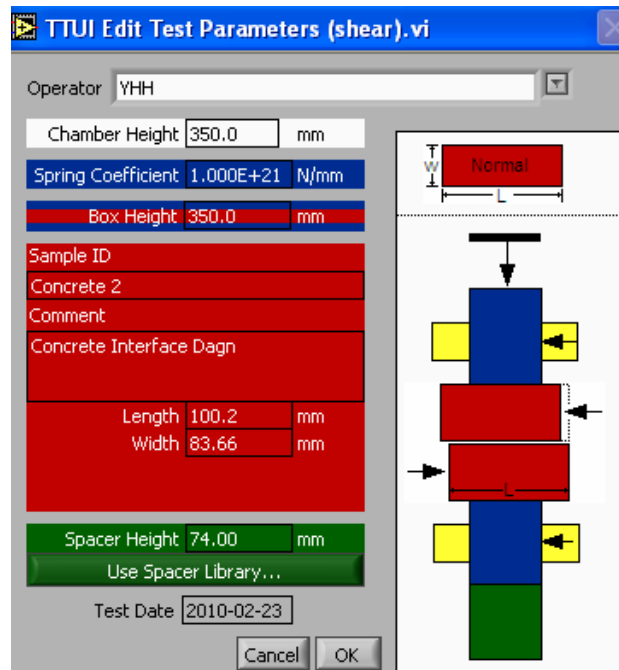
תרשים 69. הכנת מעגלי השליטה האופקי (Load & Shear Load) והמעגל האנכי (Upstream & Downstream).
בדיקה שהפרמטרים השונים זהים בין ההצגה האנלוגית להצגה בממשק הבקרה.

איפוס של כל מדי התזוזה למעט S_x ו S_y .

הורדת הבוכנה הנורמאלית בצורה ידנית (יש להעביר קודם ל loop 1) עד שמגיעים למגע מינימאלי בינה לבין קופסת הגזירה. בעת הורדת הבוכנה רצוי לראות בגרף בממשק הבקרה את תזוזת הבוכנות (S_x ו S_y). לפני שמעבירים את צורת השליטה (loop 1 ל loop 2) יש לבדוק שהבוכנות נעולות. לעיתים השעון האנלוגי מציג שגיאה, בעת המעבר לשליטת מחשב השגיאה מסתדרת, במידה ולא יש לתקנה באופן ידני.

לאחר שיש מגע בין הבוכנה לקופסת הגזירה יש להעביר חזרה את השליטה למחשב (loop 2).

לאחר ביצוע השלבים המערכת מוכנה לניסוי כאשר יש ניתור רציף של כל המדידים. הבקרה והשליטה היא באמצעות המחשב. בשלב זה יש להכניס את הפרמטרים של הדוגמה על ידי לחיצה על הכפתור Edit Test Parameters (תרשים 65). יש לשים לב שקשיחות הקפיץ (Spring Coefficient) הינו מספר גדול מאוד $(1.000E+21)$.

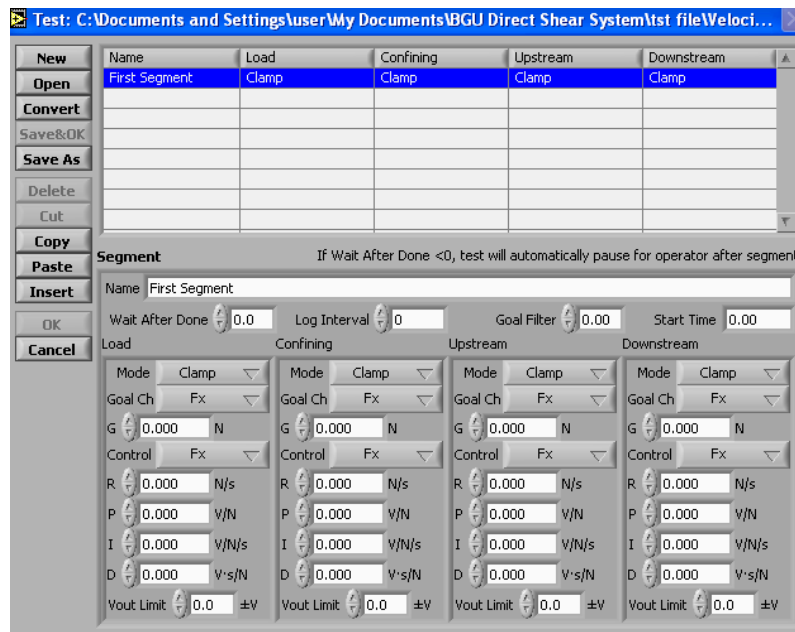


תרשים 70. הכנסת הפרמטרים השונים של הדוגמה.

את הבדיקות ניתן לבצע בשתי צורות :

1. תכנון מראש של המקטעים השונים ותכנותם. היתרון של ערכת ניסוי באופן זה הוא שניתן להגיע לדיוק רב בזמנים ובשינויים במהלך הבדיקה וכן שבממשק הבקרה ניתן להציג את התוצאות אחת כנגד השנייה (לדוגמה מאמץ גזירה כנגד תזוזת גזירה).

בכדי להתחיל בדיקה קיימת יש להיכנס לקרוא לבדיקה מסרגל הכלים העליון Start F_{est} . לאחר אישור (ok) הפרמטרים של הבדיקה, יופיע חלון תכנון הבדיקה (תרשים 66). בחלק התחתון מופעים ארבעת מעגלי שליטה. במערכת הגזירה הישירה רלוונטיים רק השניים השמאליים. בכדי לתכנת בדיקה יש לסדר את המעגלים בצורה הרצויה עבור כל מקטע. שם הסגמנט ורישום באופן מקוצר של הפעולות המבוצעות יהיה רשום בטבלה בחלק העליון. אופי המעבר בין סגמנט לסגמנט נקבע באמצעות מילוי הרובריקה Wait After Done. ניתן לכתוב ברובריקה זו זמן אשר יפריד בין הסגמנטים. כאשר לא רוצים שתהיה הפרדה בין הסגמנטים יש לכתוב 0. כאשר מעוניינים שאחרי כל סגמנט תהיה הפסקה והבדיקה תמשיך רק באישורו של המפעיל יש לכתוב 1-. בסוף תהליך התכנון, במידה ורוצים לבצע את הבדיקה באופן ישיר יש ללחוץ על save&ok, במידה ורק רוצים לשמור את התוכנית יש לשמור באמצעות save as.



תרשים 71. חלון תכנות המקטעים השונים.

בדיקת on the fly – בדיקה שבמהלכה משנים את הפרמטרים השונים. היתרון בבדיקה זו הוא שניתן לשנות את הבדיקה לאחר שרואים את התוצאות. החיסרון הוא שבמהירויות גבוהות קשה לשלוט וכן והתצוגה במהלך הבדיקה הינה רק פונקציה של זמן. בכדי להתחיל בדיקה בצורה זו יש ללחוץ על כפתור Start Undefined Test אשר נמצא בממשק הבקרה הראשי. לאחר הלחיצה על כפתור זה יופיע מסך של הפרמטרים של הבדיקה (תרשים 65), לאחר אישור מסך זה הבדיקה תתחיל והמחשב יקליט את הנתונים.

מקורות ספרותיים

- Barton, N. & Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 10(1), 1-54.
- Beeler, N. M., Tullis, T. E., & Weeks, J. D. (1994). The roles of time and displacement in the evolution effect in rock friction. *Geophysical Research Letters*, 21(18), 1987-1990.
- Biegel, R. L., Sammis, C. G., & Dieterich, J. H. (1989). The frictional properties of a simulated gouge having a fractal particle distribution. *Journal of Structural Geology*, 11(7), 827-846.
- Biegel, R. L., Wang, W., Scholz, C. H., Boitnott, G. N., & Yoshioka, N. (1992). Micromechanics of rock friction 1. effects of surface roughness on initial friction and slip hardening in westerly granite. *Journal of Geophysical Research*, 97(B6), 8951-8964.
- Blanpied, M. L., Tullis, T. E., & Weeks, J. D. (1987). Contrasting velocity dependence of granite friction: Initially bare surfaces vs. simulated gouge. *LOS, Trans.Am.Geophys.Un*, 68, 1478.
- Boettcher, M. S., & Marone, C. (2004). Effects of normal stress variation on the strength and stability of creeping faults. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 109(B3), B03406.1-B03406.15.
doi:10.1029/2003JB002824 ER
- Bowden, F. P., & Tabor, D. (2001). *The friction and lubrication of solids* Oxford University Press.
- Brace, W. F. (1978). Volume changes during fracture and frictional sliding: A review. *Pure and Applied Geophysics*, 116(4), 603-614.
- Brace, W. F., & Byerlee, J. D. (1966). Stick-slip as a mechanism for earthquakes. *Science*, 153(3739), 990-992.
- Byerlee, J. (1978). Friction of rocks. *Pure and Applied Geophysics*, 116(4), 615-626.
- Coulomb, C. A. (1776). Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemesde statique relatifs, a la architecture. *Mem. Acad. Roy. Div., Sav*, 7, 343-387.
- Dieterich, J. H. (1972). Time dependent friction in rocks. *Journal of Geophysical Research*, 77, 3690-3697.

- Dieterich, J. H. (1979). Modeling of rock friction 1. experimental results and constitutive equations. *Journal of Geophysical Research*, 84(B5), 2161-2168.
- Dieterich, J. H. (1981). Constitutive properties of faults with simulated gouge. *Mechanical Behavior of Crustal Rocks (AGU Monograph)*, 24, 103–120.
- Dieterich, J. H. (1992). Earthquake nucleation on faults with rate- and state dependent strength. *Tectonophysics*, 211, 115-134.
- Dieterich, J. H., & Conrad, G. (1984). Effect of humidity on time- and velocity-dependent friction in rocks. *Journal of Geophysical Research*, 89, 4196–4202.
- Dieterich, J. H., & Kilgore, B. D. (1994). Direct observation of frictional contacts: New insights for state-dependent properties. *Pure and Applied Geophysics*, 143(1), 283-302.
- Engelder, T. (1978). Aspects of asperity-surface interaction and surface damage of rocks during experimental frictional sliding. *Pure and Applied Geophysics*, 116(4-5), 705-716
- Gomberg, J. (1996). Stress/strain changes and triggered seismicity following the mw 7.3 landers, california, earthquake. *Journal of Geophysical Research*, 101(B1), 751-764.
- Hong, T. C., & Marone, C. (2005). Effects of normal stress perturbations on the frictional properties of simulated faults. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 6(3), Q03012DOI. doi:10.1029/2004GC000821
ER
- Jaeger, J. C. (1971). Friction of rocks and stability of rock slopes. *Geotechnique*, 21, 97-134.
- Jaeger, J. C., Cook, N. G. W., & Zimmerman, R. W. (2007). *Fundamentals of rock mechanics* Blackwell Pub.
- Kilgore, B. D., Blanpied, M. L., & Dieterich, J. H. (1993). Velocity dependent friction of granite over a wide range of conditions. *Geophysical Research Letters*, 20(10), 903-906.
- Linker, M. F., & Dieterich, J. H. (1992). Effects of variable normal stress on rock friction - observations and constitutive-equations. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 97(B4), 4923-4940.

- Marone, C. (1998a). The effect of loading rate on static friction and the rate of fault healing during the earthquake cycle. *Nature*, 391, 69-72.
- Marone, C. (1998b). Laboratory derived friction laws and their applications to seismic faulting. *Annual Reviews in Earth and Planetary Sciences*, 26(1), 643-696.
- Marone, C., Hobbs, B. E., & Ord, A. (1992). Coulomb constitutive laws for friction: Contrasts in frictional behavior for distributed and localized shear. *Pure and Applied Geophysics*, 139(2), 195-214.
- Martin, C. D., & Chandler, N. A. (1995). The progressive fracture of lac du bonnet granite. Paper presented at the *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, , 32(4) 156A-156A.
- Patton, F. D. (1966). Multiple modes of shear failure in rock. *Proc. 1st Congr. Int. Soc.*, , 509-513.
- Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A., & Vetterling, W. T. (1986). *Numerical recipes :The art of scientific computing* Cambridge University Press.
- Rice, J. R. (1993). Spatio-temporal complexity of slip on a fault. *Journal of Geophysical Research (ISSN 0148-0227)*, 98(B6), 9885-9907.
- Rice, J. R., & Ruina, A. (1983). Stability of steady frictional slipping. *Journal of Applied Mechanics*, 50(2), 343-349.
- Richardson, E., & Marone, C. (1999). Effects of normal stress vibrations on frictional healing. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 104(B12), 28859-28878.
- Ruina, A. (1983). Slip instability and state variable friction laws. *Journal of Geophysical Research*, 88(10), 10,359-10,370.
- Scholz, C. H. (2002). *The mechanics of earthquakes and faulting* Cambridge University Press.
- Tse, R., & Cruden, D. M. (1979). Estimating joint roughness coefficients. Paper presented at the *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, , 16(5) 303-307.

Tullis, T. E., & Weeks, J. D. (1986). Constitutive behavior and stability of frictional sliding of granite. *Pure and Applied Geophysics*, 124(3), 383-414.

Tullis, T. E., Blanpied, M. L., & Weeks, J. D. (1989). The velocity dependence of granite friction with and without simulated gouge. *Eos Trans.AGU*, 70, 1302.

Ziv, A., & Cochard, A. (2006). Quasi-dynamic modeling of seismicity on fault with depth variable rate- and state-dependent friction. *Journal of Geophysical Research*, 111, B08310.



Ben Gurion University of the Negev

Faculty of Natural Sciences

Department of Geological and Environmental Sciences

Rate and state friction experiments in direct shear

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements for
the M.Sc Degree in the Faculty of Natural Sciences

By Omer Biran

January 2011

Rate and state friction experiments in direct shear

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements for the M.Sc
Degree in the Department of Geological and Environmental Sciences

Faculty of Natural Sciences

Ben Gurion University of the Negev

By Omer Biran

Under Supervision of Prof. Yossef. H. Hatzor and Dr. Alon Ziv

Author _____

Date _____

Supervisor _____

Date _____

Supervisor _____

Date _____

Chairman of graduate

studies committee _____

Date _____

Table of contents

1. Introduction	1
2. Scientific Background	3
2.1 Classical friction laws	3
2.1.1 Coulomb criteria.....	5
2.1.2 Byerlee law.....	6
2.2 Rate and State friction law.....	7
2.2.1 Introduction.....	7
2.2.2 Rate and state equations.....	9
2.3 Roughness influence on friction coefficient.....	13
3. Research methods	15
3.1 Direct shear system.....	15
3.1.1 Technical data of the direct shear system.....	16
3.1.2 Sampling frequency influence on tests results.....	21
3.1.3 Sample preparation.....	22
3.1.4 Calibration and quality control of the LVDT and the pistons.....	24
3.1.5 Planning and producing experiments.....	27
3.1.6 Data processing.....	28
3.2 Roughness measurements of the samples.....	30
3.3 Uniaxial tests.....	32
4. Results	35
4.1 Preliminary test to direct shear tests.....	35
4.1.1 Uniaxial tests	35
4.1.2 Roughness measurements of the surface.....	36
4.2 Reproducing Rate and state experiments.....	40
4.2.1 Slide-Hold-Slide experiments.....	41
4.2.2 Velocity stepping experiments.....	45
4.2.3 Rapid Normal stress stepping.....	49
4.2.4 Stiffness calculation.....	52
4.3 Steady-state friction dependence on surface roughness.....	54
4.4 Second order normal stress effects on steady-state friction.....	58

4.4.1 Load and unload experiment on SC interfaces.....	59
4.4.2 Unload experiments on polished surface.....	65
5.Discussion.....	69
5.1 Steady-state friction dependence on velocity and surface roughens.....	69
5.2 Second order normal stress effects on steady-state friction.....	71
6. Summery and Conclusion.....	75
Appendix A: Calibration value of the LVDT.....	77
Appendix B:Using the direct shear system	87
Reference.....	93

Rate and state friction experiments in direct shear

Omer Biran

Abstract

The slip of solid materials on pre-existing planes is resisted by friction. Many geological and geophysical problems such as slip along faults, detachment of blocks along weakness planes and slope instabilities are governed by frictional resistance. Most of our understanding of friction behavior is based on laboratory experiments. According to the classical view of Amonton's law, the coefficient of friction is constant and is equal to the ratio between the shear and the normal stresses, i.e. it is independent of contact area. Recent friction experiments, however, show that the friction coefficient is not constant, but instead it depends on the logarithm of sliding velocity and contact age. This constitutive relation is commonly referred as the rate-and-state friction law.

At the current research we report results of three sets of experiments; all performed using the single direct shear apparatus at the Ben –Gurion University. The first set is rate and state experiments. While previous rate and state friction experiments were performed with a double direct shear apparatus where the net torque in the system can be shown to be zero, in the conventional direct shear assembly the net torque in the system may not be zero. Results of three types of rate and state experiments: 1) Slide-hold-slide 2) Velocity stepping and 3) Normal stress stepping, show that it is possible to reproduce the classic experimental results obtained with double shear systems, with a direct (single) shear system despite the differences between the boundary conditions of the two systems.

The second test set examines how the steady state friction depends on surface roughness and sliding velocity. To address this, results of direct shear tests performed on rough and smooth surfaces are compared. These tests were carried out at various sliding velocities and normal stresses. For each normal stress level the corresponding shear stress at steady state was determined graphically and the results were plotted on a τ - σ space in order to determine the Coulomb criteria. The experimental results show that the steady-state friction for all surfaces is velocity weakening, though the effect is more intense for the smooth surfaces rather than the rough ones.

The third set of tests was performed in order to determine the shear stress response to changes of the normal stress during sliding under constant rate. The initial normal stress was set to 15 MPa and has been decreased by 10% each time down to 2.5 MPa. Decreasing the normal stress was done at a rate of 0.05 MPa/S. Four types of surface finish were studied: 1) Saw Cut; 2) #180 grit of SiC; 3) #220 grit of SiC and 4) Surface grinder. For the rough surfaces we find that the steady-state friction coefficient decreases with increasing normal stresses for stresses between 2.5 and 5.22 MPa, but increases for normal stresses between 5.22 and 12.5 MPa. We are unable to draw conclusions for normal stresses greater than 12.5 MPa, since for these stress levels the system did not reach steady-state. Interestingly, the result for smooth surfaces differs radically from that for rough surfaces. Steady-state friction for smooth surfaces increases with increasing normal stresses. The differences in the friction coefficient that were obtained for each normal stress level are clear and significant.