

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

תכונות מכניות של קרקעות לס מדרום שפלת החוף, ישראל.

חיבור לשם קבלת תואר "מגיסטר" בפקולטה למדעי הטבע

מאת: אוריין איתי

תכונות מכניות של קרקעות לס מדרום שפלת החוף, ישראל.

חיבור לשם קבלת התואר "מגיסטר" בפקולטה למדעי הטבע

מאת: אוריין איתי

שם המנחה: פרופ' יוסף חודרה חצור

מעבדת הנגב למכניקת הסלע – המחלקה למדעי הגיאולוגיה והסביבה

הפקולטה למדעי הטבע, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

_____ תאריך	_____ חתימת המחבר
_____ תאריך	_____ אישור המנחה
_____ תאריך	_____ אישור יו"ר ועדה מחלקתית

תכונות מכניות של קרקעות לס מדרום שפלת החוף, ישראל.

מאת : אוריין איתי.

העבודה היא עבודת הגמר לתואר "מגיסטר".

אוניברסיטת בן גוריון בנגב.

2005.

תקציר.

במסגרת מחקר זה נבחנו באופן מעשי התכונות וההתנהגות המכנית של שני טיפוסים קרקע שנמצאו בחתך של אזור כרם שלום - אמיתי. טיפוסים אלו הוגדרו כחול סילטי SM וחול חרסיתי SC לפי שיטת המיון האחדה (USCS) ונמצאו לעיתים כבעלי דרוג חסר. השיטות לביצוע המחקר כללו בדיקות שדה ובדיקות מעבדה. בשטח המחקר נקדחו שישה קידוחים לעומק של 20 מ' בהם בוצעו בדיקות החדרה סטנדרטית SPT, בדיקות פרסיומטר PMT ובדיקות מהירויות סייסמיות בקרקע בשיטות Cross-hole ו Down-hole. בלוקים של קרקע נלקחו לצורך ביצוע הבדיקות המכניות מקירות מחפורות הקיימות באתר. במעבדה נקבעו בשלב הראשון תכונות האינדקס של טיפוסים קרקע שהוצאו מהקידוחים. בשלב שני נערכו בדיקות מכניות בטיפוסים קרקע תוך שימוש במערכת לביצוע בדיקות גזירה ישירה של TerraTek Inc. מערכת זו, הפועלת בבקרת סרוו במעל סגור, תוכננה לביצוע בדיקות בסלעים ובמחקר זה שימשה לראשונה לבדיקות בקרקע. בוכנת הלחיצה במסגרת ההעמסה של המערכת ניתנת לשליטה בשני מצבי הפעלה: בקרת עומס ובקרת תזוזה. בוכנת הגזירה כיום ניתנת לשליטה בבקרת תזוזה בלבד. הבדיקות המנוקזות שבוצעו באמצעות המערכת כללו מבחני גזירה ישירה, בדיקות גזירה מחזורית מונוטונית ובדיקות העמסה חד - צירית בודדות ומחזוריות. כל הבדיקות נערכו על דגמי קרקע רציפים עם תכולת רטיבות נמוכה מאד של 2-3%, תכולת הרטיבות הטבעית.

עקומות דחיסה של דגמי קרקע מראות כי הקרקע באתר המחקר טרום דחוסה עם ערך הטיפוס

$$OCR \approx 2 - 4.$$

מבחני גזירה ישירה שנערכו בבקרת תזוזה מראים הבדלים בחוזק הגזירה של שני טיפוסים קרקע. לקרקע מטיפוס SM מעטפת כשל לינארית מסוג קולומב - מוהר: $\sigma_n = 0.6024 \tau$ והפרמטרים המכניים הם $\phi' = 32^\circ$, $c = 0$. לטיפוס קרקע השני מסוג SC חוזק גזירה של כ- 400 kPa עבור טווח ערכים של מאמץ נורמלי בין 138 – 414 kPa.

מודול גזירה סטטי עבור קרקע מטיפוס SM התקבל בבדיקות גזירה מחזורית מונוטונית ומודול דינמי התקבל בבדיקות In-situ. השוואת פרמטרים אלסטיים של טיפוסים קרקע מבדיקות סטטיות ודינמיות מראה כי ערך מודול הגזירה הדינמי (G_d) נע בין 172 – 380 MPa והוא גדול בסדר גודל מערכי מודול הגזירה הראשוני (G'_o) שהתקבל בבדיקות הסטטיות עבור החול הסילטי 64 – 21 MPa. ערכי מודול האלסטיות הדינמי (E_d) נעים בין 323 – 793 MPa וגבוהים מאלו המתקבלים בבדיקות הסטטיות בהן עבור הטיפוסים SM ו SC נמצאו הערכים 90-164 MPa ו- 113MPa בהתאמה. ערכי מודול אלסטיות שנמצאו בבדיקות הפרסיומטר אף נמוכים מאלו שנמצאו במעבדה והם בתחום שבין 14 – 85 MPa כאשר מחושבים לפי יחס פואסון אשר התקבל מהבדיקות הדינמיות בשטח, ובתחום שבין 18 – 110 MPa עבור יחס פואסון קבוע $\nu = 0.33$, כמקובל בבדיקות פרסיומטר בקרקעות.

תודות.

ברצוני להודות על ההזדמנות שניתנה לי להתקדם בלימודי ולבצע עבודת מחקר זו. למנחה שלי, פרופ' יוסי חצור על האמון, הדלת הפתוחה, היחס החם, העזרה והדרישות הבלתי מתפשרות. להורי היקרים שנתנו לי את זכות הבחירה החופשית ועודדו אותי לאורך כל הדרך. לחברי לספסל הלימודים: איליה ווינשטיין, רוני קמאי לוי ושלומי מנור על האווירה הנעימה ושיתוף הפעולה.

לגב' רבקה עיני וגב' צהלה שרעבי על טיפולן המסור והמקצועי.

לד"ר אסיה שוורצמן ואינג' ויקטוריה אלקנברד מהמעבדה למכניקת קרקע של המכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון SCE.

לרם קפלן על עזרתו באיסוף החומר.

לאמנון עמיר.

תודתי נתונה גם לכל חברי הקרובים על היותם שם.

תוכן עניינים

i.....	תקציר
ii.....	תודות
iii - v.....	תוכן עניינים
v - xi.....	רשימת תרשימים, תמונות וטבלאות
xii.....	סמלים ומינוחים

1.....	פרק 1 – מבוא
2.....	1.2 מטרת המחקר
2.....	1.3 אזור המחקר
2.....	1.3.1 גיאוגרפיה
3.....	1.3.2 גיאולוגיה
4.....	1.3.3 סטרטיגרפיה

8.....	פרק 2 – רקע מדעי
8.....	2.1 המאפיינים של קרקעות לס
8.....	2.1.1 קרקעות לס בישראל
9.....	2.1.2 תכונות אינדקס
10.....	2.1.3 המבנה הפיזי של לס
15.....	2.1.4 תכונות מכניות של לס – דוגמאות מהעולם
21.....	2.2 קרקעות גרנולריות מאזורי החוף של ישראל – עבודות קודמות
16.....	2.2.1 חולות מלוכדים חלקית
17.....	2.3 עומס דינמי וגזירה מחזורית
19.....	2.3.1 שיטות לבחינת התנהגות הקרקע תחת עומס מחזורי
19.....	בדיקות שדה דינמיות
19.....	בדיקות מעבדה דינמיות
19.....	בדיקות גזירה במעבדה
25.....	2.4 תכונות דינמיות של קרקע
31.....	2.4.1 קורלציות אמפיריות

33.....	פרק 3 – שיטות מחקר
33.....	3.1 עבודת שדה ובדיקות in situ באתר

33.....	קידוחים בקרקע	3.1.1
34.....	בדיקות SPT	3.1.2
39.....	בדיקות פרסיומטר	3.1.3
44	בדיקות מהירות גלים סיסמיים בשיטת Cross hole ו- Down hole	3.1.4
47.....	דיגום קרקע מהמחשוף בחתך	3.1.5
47.....	מיון קרקעות	3.2
48.....	התפלגות גודל גרגר	3.2.1
49.....	קביעת גבולות אטרברג LL, PI,PP	3.2.2
51.....	משקל מרחבי	3.2.3
52.....	הגדרת סוג הקרקע וסמלה	3.2.4
53.....	ציוד לבדיקת תכונות מכניות	3.3
53.....	מפרט טכני	3.3.1
53.....	ממשק תפעול ובקרה	
54.....	מכבש הגזירה	
56.....	מדי תזוזה LVDT's	
57.....	הכנת דגם לבדיקת גזירה ישירה	3.3.2
60.....	התקנת דגם במכבש הגזירה	3.3.3
61.....	כתיבת בדיקה	3.3.4
62.....	שיטת בקרה	3.3.5
62.....	כיול	3.3.6
62.....	בקרת איכות	3.3.7
64.....	רזולוציה	3.3.8
65.....	תכונות מכניות של הקרקע	3.4
65.....	העמסה חד צירית	3.4.1
66.....	דרגת הדחיסה של הקרקע	
68.....	בדיקות גזירה ישירה	3.4.2
70.....	פרמטרים מכניים של הקרקע	
71.....	בעיות וקשיים הקשורים בביצוע בדיקות גזירה ישירה של קרקע	
72.....	מודול אלסטיות של הקרקע	3.4.3
74	מודול גזירה של הקרקע	3.4.4
77.....	תיקון תוצאות	

79.....	פרק 4 - אפיון גיאומכני של חתך הקרקע.
79.....	4.1 החתך באזור כרם שלום.....
85.....	4.2 חתך המחשוף.....
89.....	4.3 מדידת מהירויות סייסמיות.....
91.....	4.3.1 פרמטרים אלסטיים.....
93.....	פרק 5 – תוצאות
94.....	נתוני הבדיקות שנערכו בקרקעות מטיפוסים SP-SM ו SP-SC.....
95.....	5.1 תוצאות של בדיקות גזירה ישירה.....
95.....	5.1.1 חוזק גזירה של קרקע מטיפוס SP-SM.....
98.....	5.1.2 חוזק גזירה של קרקע מטיפוס SP-SC.....
101.....	5.2 תוצאות של בדיקות גזירה מחזורית מונוטונית בקרקע מטיפוס SP-SM.....
106.....	5.3 מודול גזירה (G^* , G'_0) של קרקע מטיפוס SP-SM.....
117.....	5.4 התנהגות הקרקע תחת מאמצים נורמלים.....
117.....	5.4.1 דרגת הדחיסה של קרקע מטיפוס SP-SM.....
119.....	5.4.2 דרגת הדחיסה של קרקע מטיפוס SP-SC.....
122.....	5.4.3 מודול אלסטיות של הקרקע.....
126.....	פרק 6 – דיון
126.....	6.1 איכות התוצאות.....
126.....	6.2 מאפייני הקרקע באתר המחקר.....
127.....	6.2.1 מאמצים בקרקע.....
128.....	6.2.2 ערכי חוזק גזירה.....
129.....	6.2.3 התעייפות החומר בגזירה מחזורית.....
131.....	6.3 השוואת פרמטרים אלסטיים מבדיקות דינמיות וסטטיות.....
134.....	6.4 קורלציות.....
135.....	פרק 7 - סיכום ומסקנות
136.....	מקורות ספרותיים

סמלים ומינוחים

יחידות

סמל

cm^2	A - שטח חתך.
kPa	c - קוהזיה.
	Cc - אינדקס הלחיצה של הקרקע.
	Cr - אינדקס הפריקה (Recompression) של הקרקע.
mil , mm	Δu - תזוזה אופקית.
mil , mm	Δv - תזוזה אנכית.
	e - מנת חללים.
	ε - מעוות צירי.
MPa	E_d - מודול אלסטיות דינמי.
MPa	E_p - מודול אלסטיות מבדיקת פרסיומטר.
MPa	E_u - מודול אלסטיות מסגמנט פריקה (unload).
	ϕ - זווית חיכוך פנימית.
	ϕ' - זווית חיכוך פנימית אפקטיבית.
MPa	G - מודול גזירה.
MPa	G_d - מודול גזירה דינמי.
MPa	G_{eq} - מודול גזירה אקוויולנטי.
MPa	G_{max} - מודול גזירה מכסימלי.
MPa	G_p - מודול גזירה מבדיקת פרסיומטר.
MPa	G'_o - מודול גזירה ראשוני מתוקן של הקרקע בבדיקות גזירה מחזורית.
MPa	G^* - מודול גזירה אקוויולנטי מתוקן בבדיקות גזירה מחזורית.
	γ - מעוות גזירה.
	γ' - מעוות גזירה מתוקן עבור דילטציה בבדיקות גזירה מחזורית.
Sec^{-1}	$\dot{\gamma}$ - קצב המעוות.
kN/m^3	γ_d - משקל מרחבי יבש
	K_o - מקדם לחץ עפר במנוחה.
%	LL - גבול הנזילות של הקרקע.
	LVDT - מד תזוזה אלקטרומכני.
	λ - מקדם ריסון של החומר.
	v - יחס פואסון של קרקע.
	v_d - יחס פואסון דינמי ממהירויות סיסמיות בקרקע.
	N_{field} - מספר הקשות בבדיקת החדרה סטנדרטית (SPT).
	N_{60} - תוצאת SPT מנורמלת לפטיש בעל יעילות של 60%.
	$N_{1,60}$ - תוצאת SPT מנורמלת ללחץ השכבות ולפטיש בעל יעילות של 60%.
	OCR - יחס טרום דחיסה של הקרקע.
%	PI - אינדקס הפלסטיות של הקרקע.
%	PL - גבול הפלסטיות של הקרקע.
kPa , MPa	P'_p - לחץ טרום דחיסה.
gr/cm^3	ρ - צפיפות החומר.
kPa , MPa	σ_n - מאמץ נורמלי הפועל על הדגם בבדיקות גזירה ישירה.
kPa , MPa	σ'_v - מאמץ אנכי אפקטיבי בשדה.
kPa , MPa	σ'_h - מאמץ אופקי אפקטיבי בשדה.
kPa , MPa	σ_3 - לחץ כליאה בבדיקה טריאקסיאלית.
kPa	τ - מאמץ גזירה הפועל על הדגם בבדיקות גזירה ישירה וגזירה מחזורית.
kPa	τ_{max} - מאמץ גזירה מכסימלי.
m/sec	V_p - מהירות גלי לחיצה.
m/sec	V_s - מהירות גלי גזירה.
%	w - תכולת רטיבות.
m	z - עומק.

פרק 1 – מבוא.

קרקעות מכסות אזורים נרחבים בישראל ובעולם. קרקעות משמשות כבסיס להתפתחות חברתית – כלכלית ומשום כך בעלות חשיבות גבוהה לצרכי תכנון, תחיקה, בעלות ושימוש. שימושים רבים שנעשים בקרקע לצרכי הקמת תשתיות, מבנים ציבוריים ופרטיים, מבני תעשייה ומתקנים ביטחוניים נקבעים על פי מאפייניה. על כן קיים צורך בידע וביכולת לאפיין קרקעות ואת תכונותיהן בצורה איכותית וכמותית. הבנת התנהגות הקרקע ותכונותיה הגיאוטכניות והגיאומכניות היא דרישה ותנאי בסיסי לכל הליך של תכנון לצרכי הנדסה אזרחית. נושא זה מפותח מאד וכיום שיטות חקירת קרקעות במעבדה ובשדה מבוססות היטב ונעשה בהן שימוש יומיומי מקיף עבור מתכננים ומבצעים.

מישור החוף של ישראל באגן המזרחי של הים התיכון מכוסה במגוון רחב של קרקעות. מרבית הקרקעות בעלות אופי גרנולרי עם תכולת מרכיבים קרבונטים כגון כורכר או דיונות חול דל בצמנט. הכרת התכונות הגיאומכניות והדינמיות של הקרקעות באזור זה תאפשר הערכת הסיכון הסיסמי בעיקר כתוצאה מהתנזלות (liquefaction) שכבות חול במצב רווי. כמו כן תתאפשר הערכת יציבות חללים תת קרקעיים בקרקעות אלו, נושא שכיום הוא בעל חשיבות רבה בעבודות התשתית בארץ.

המחקר הנוכחי עוסק בתכונות המכניות של שני טיפויי הקרקע המופיעים בחתך של אזור המחקר, תוך ניסיון להעמיק את הידע על התכונות הדינמיות של קרקעות אלה. שטח המחקר נמצא בדרום מישור החוף, באזור כרם שלום. אזור זה מכוסה בקרקע לס וקרקע חול דלת צמנט. היחסים בין שני טיפויי הקרקע מאופיינים בהופעה לסירוגין של שכבות החול והלס. עוביין של שכבות אלו משתנה במרחב ובעומק. קרקעות אלו מהוות את הבסיס ומספקות את החומר למחקר זה.

במסגרת חקירת הקרקע באתר המחקר נקדחו חמישה קידוחים לעומק 20 מטר ובוצעו בדיקות בשדה שכללו מבחני החדרה תקנית SPT ובדיקות פרסיומטר PMT. בשלב מאוחר יותר נקדח בסמוך קידוח שישי לצורך בדיקת מהירויות גלים סיסמיים בשיטת Crosshole ו- Downhole במצב יבש ובמצב רטוב. כל הבדיקות בוצעו בהתאם לתקני ASTM הרלוונטיים, על ידי מבצעים חיצוניים תחת פיקוח של צוות המחקר. החתך של תת הקרקע נחשף בקירות שתי מחפורות הקיימות באתר ומייצג את קרקע הלס וכן את הקרקע החולית. החומר שהוצא מהקידוחים נדגם בכל מטר והובא למעבדה למכניקת הסלע באוניברסיטת בן גוריון לצורך קביעת סוג הקרקע ותכונות האינדקס שלה. גושי קרקע גדולים נדגמו משני טיפויי הקרקע שמופיעים בחתך שנחשף במחפורות. במעבדה עובדו גושי הקרקע לדגמים לצורך התאמתם לקופסאות הגזירה של מכשיר הגזירה. התכונות המכניות והפרמטרים האלסטיים של הקרקע נחקרו תוך שימוש במערכת לביצוע בדיקות גזירה ישירה של חברת TerraTek Systems Inc. מערכת מתקדמת זו הנשלטת בבקרת סרוו במעגל סגור תוכננה לביצוע בדיקות גזירה ישירה בסלעים. במחקר זה נעשה ניסיון ראשון מסוגו לערוך בדיקות בקרקע באמצעות המערכת זו. במסגרת העבודה בוצעו באמצעות המערכת 20 בדיקות שונות בדגמי הקרקע שהותאמו לקופסאות הגזירה במעבדה. בדיקות אלו כללו: תשעה מבחני גזירה ישירה בשני טיפויי הקרקע תחת עומסים נורמלים משתנים, שבע בדיקות גזירה מחזורית מונוטונית בקרקע מטיפוס SP-SM וכן העמסה ופריקה נורמלית על חלק מהדגמים. כל הבדיקות נערכו על דגמים רציפים עם תכולת רטיבות נמוכה מאד ($w\% = 1.57 - 3.44$) ובתנאים מנוקזים. הניסיון שנצבר מוכיח כי באמצעות המערכת ההידראולית של Terratek Systems המתוכננת לסלעים ניתן לבצע בהצלחה רבה בדיקות מכניות בקרקעות מהסוג הנחקר, תוך שימוש בעומסים נמוכים מאד.

1.2 מטרת המחקר.

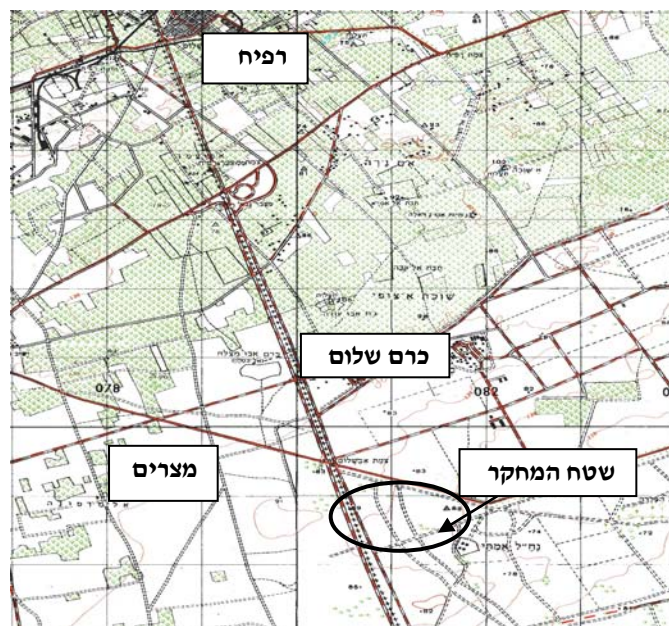
חקר התכונות המכניות וההתנהגות המכנית של שני טיפוסים הקרקע בחתך של אזור כרם שלום תוך שימת דגש על התנהגות הקרקע תחת העמסה מונוטונית ומחזורית ובדיקת מאפייני הקרקע הבאים:

- קביעת תכונות האינדקס ואפיון סוגי הקרקע.
- קביעת ערך מודול האלסטיות של הקרקע.
- בדיקת דרגת הדחיסה של הקרקע וקביעת ערך ה OCR.
- ביצוע מבחני גזירה ישירה לקביעת הפרמטרים המכניים של הקרקע:
- ערך הקוהזיה c וזווית החיכוך הפנימית ϕ .
- ביצוע בדיקות גזירה מחזורית מונוטונית תחת עומסים נורמלים שונים לצורך קביעת ערך מודול הגזירה הראשוני G'_0 והאקוויוולנטי G^* של הקרקע.
- קביעת מידת ההתאמה ואו היכולת של המערכת לבדיקות גזירה ישירה בסלעים לבצע בדיקות בקרקע מהסוג שנחקר.

1.3 אזור המחקר.

1.3.1 גיאוגרפיה.

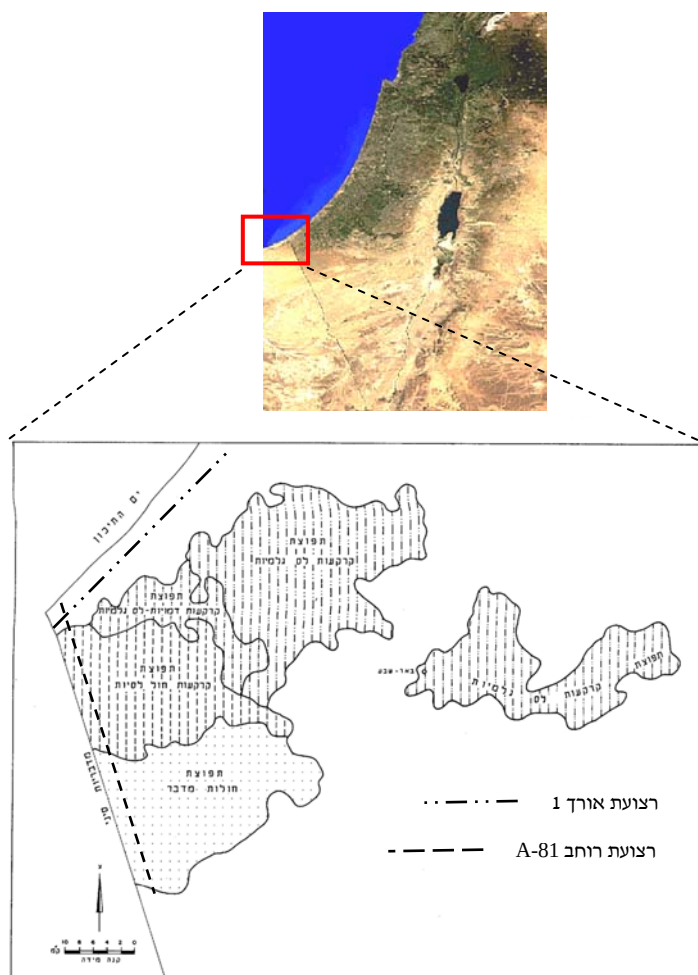
שטח המחקר נמצא בסמוך לישוב כרם שלום שבנגב המערבי צפונית לגבול עם מצרים (תרשים 1.1). מערבית לו שוכנת העיר רפיח. פני השטח באזור מישוריים ובעלי גובה ממוצע של 80-100 מטר מעל פני הים. אקלים האזור מושפע מקרבתו של הים התיכון והוא לח למחצה. הצמחייה באזור מעטה ומבוססת על עשבים בלבד. ממוצע משקעים שנתי באזור עומד על 520 מ"מ. טמפרטורה מכסימלית ממוצעת בחודש ינואר היא 18° ובאוגוסט מגיעה ל 32° צלזיוס.



תרשים 1.1: שטח המחקר מזרחית לכרם שלום (מפה טופוגרפית 1:50,000).

1.3.2 גיאולוגיה.

החתך הגיאולוגי של רצועת עזה ושפלת החוף הדרומית של ישראל מבוסס על משטר של פעילות טרנסגרסיבית ורגרסיבית מחזורית שהתרחשה במהלך הרביעון. החל מהפליסטוקן התחתון בו שקעו חרסיות של חבורת הסקיה ועד לסיומו, שינויים בגובה פני הים יצרו תנאי השקעה שונים ומגוונים, בחלקם יבשתיים בחלקם חופיים או ימיים רדודים ובחלקם תנאי השקעה של ים עמוק. הליטולוגיות המיוצגות בחתך שמעל לחבורת סקיה מבטאות את השינויים בתנאי ההשקעה. מראשית ההולוקן ועד היום שוררים באזור תנאים חופיים ויבשתיים. תנאים אלו התאימו ליצירת משקעים יבשתיים והתהוות קרקעות. תוצרי בליית סלעים באזור מדבריות סיני הובלו כאבק אאולי לתוך תחומי הנגב על ידי מנגנון הסעה של רוחות דרום מערביות (רביקוביץ, 1981). לאורך מסלול התנועה שקעו באזור מערב הנגב חלקיקי האבק הגדולים יותר (חול וסילט) והחלה התהוות קרקעות לס חוליות בעומק רדוד של החתך. כיסוי של חול דק מכסה כיום את פני הקרקע באזור זה. תפוצת הקרקעות באזור מערב הנגב ודרום רצועת עזה נראית בתרשים 1.2. בסוף שנות ה-60 בוצע מחקר מקיף של תת הקרקע ברצועת עזה על ידי תה"ל למטרות מיפוי הידרולוגי (פינק, 1970), קידוחים רבים נעשו בכל המרחב ונתקבלה אינפורמציה רבה לגבי החתך הגיאולוגי. הקווים לאורכם התבצעו קידוחים לאורך ולרוחב הרצועה מסומנים בתרשים 1.2.



תרשים 1.2: תפוצת קרקעות במערב הנגב (רביקוביץ, 1981) וסימון רצועות הידרולוגיות במרחב (טולמץ, 1991).

1.3.3 סטריגרפיה.

תיאור של היחידות בחתך הסטריגרפי מבסיסו ומעלה מובא כאן בקצרה (פינק, 1970):

סקיה.

יחידה זו בעלת הרכב ליטולוגי של חרסית אפורה שעובייה מגיע לכמה מאות מטרים. גיל היחידה הוא קלברייך – סיציליין מהפליסטוקן התחתון, עם תנאי השקעה של ים עמוק. יחידה זו מהווה את בסיס החתך של אזור החוף ברצועת עזה. בדרום מערב הרצועה ובמספר אזורים בחלקה הצפוני, מתקבל גיל עתיק יותר. הבדל הגילים קשור בהרמה של אזור היבשה וברגרסיה של הים שהתרחשו בסוף הפליוקן ובתחילת הפליסטוקן. כתוצאה מכך באזורי הים העמוק המשיכו לשקוע חרסיות (כיום אזורים אלו סמוכים לחוף) ובאזורים הרדודים שקעו אבני חול גיריות (כיום אזורים אלו מרוחקים מהחוף). גיל היחידה באזור החוף נמצא בעומק של כ 100 מטר מתחת לפני הים ומתוכם לפנים היבשה בשיפוע מתון של כ 1%.

חול וקרטון.

יחידה זו מונחת מעל יחידת החרסית שבג חבורת הסקיה בכל רצועת עזה. הרכבה הליטולוגי מגוון ומאופיין בחילופין של חול לבנבן, אבן חול גירית חרסיתית אפורה, קרטון לבן וחואר וחרסית אפורים בהירים. סוגים אלה מופיעים כרבדים מתחלפים. גיל היחידה הוא קלברייך – סיציליין. מאפייני ההשקעה הם של תנאים ימיים רדודים. הרגרסיה של ים חרסית הסקיה לוותה ככל הנראה באוסילציות שגרמו לשינויים הליטולוגיים. עובי היחידה נע בין 20-40 מטר ובדרום מערב הרצועה יחידה זו מצטמצמת כלפי פנים היבשה.

חואר וחרסית.

יחידה זו מונחת על גבי יחידת החול והקרטון. הרכבה הליטולוגי מבוסס על חואר וחרסית אפורים ולעיתים משתנה לקרטון חוארי אפרפר. גיל היחידה הוא טריניין עם תנאי השקעה ימיים המייצגים את הטרנסגרסיה של הים בתקופה זו. יחידה זו משתרעת לאורך חוף רצועת עזה ועובייה משתנה בין 10-20 מטר. השתרעותה של היחידה לפנים היבשה מאופיינת בהצטמצמות העובי ומרחק של מספר קילומטרים מהחוף היא נעלמת.

אבן חול גירית מיקרוקונגלומרטית.

יחידה זו מונחת על גבי החרסיות של יחידה 3 באזור החוף ועל גבי יחידה 2 בפנים היבשה. ההרכב הליטולוגי העיקרי של היחידה הוא אבן חול גירית מיקרוקונגלומרטית אפורה לבנבנה המכילה חלוקים קטנים של אבן גיר וצור. עובייה הכולל של יחידת אבן החול הגירית נע בין 10 מטר בדרום הרצועה ל 25 מטר בצפונה. ביחידה זו מופיעים באופן מפוזר אופקים של חרסיות בעוביים שונים. חרסיות ביניים אלה משתרעות למרחק די ניכר בקצה הדרום מערבי של רצועת עזה. גיל היחידה הוא טריניין. תנאי היווצרות ימיים רדודים או חופיים. היחידה מייצגת את ירידת גובה פני הים והרגרסיה שלאחר שלב ההשקעה של יחידה 3. אוסילציות שהתרחשו בפאזה זו גרמו ככל הנראה לחילופין בין אבני החול והחרסיות.

חרסית ואבן חול גירית מיקרוקונגלומרטית.

יחידה זו מונחת מעל יחידת אבן החול הגירית המיקרוקונגלומרטית והרכבה הליטולוגי של משתנה מצפון לדרום. בצפון הרצועה היחידה מורכבת משלוש שכבות של חרסית וחואר כשביניהן שתי שכבות של אבן חול גירית מיקרוקונגלומרטית ועובייה מגיע ל 30-35 מטר. באזור החוף הדרומי של הרצועה יחידה זו מורכבת משכבה אחת שההרכב הליטולוגי שלה הוא חרסית חוארית עם אינטרקלציות חוליות. באזור זה עובי השכבה הוא כ 15-20 מטר. גיל היחידה הוא פוסט-טריניין פרט לחלק הדרום מערבי שם הגיל הוא סוף טריניין. הבדל הגילים מצביע על טרנסגרסיה שהחלה באזור הדרומי מוקדם יותר מאשר

באזור הצפוני שם לוותה הטרנסגרסיה באוסילציות. בהשתרעותן לתוך היבשה מצטמצמות שכבות אבני החול וכל היחידה הופכת להיות חרסיתית.

אבן חול גירית.

יחידה זו יושבת מעל יחידת החרסית ואבן החול. ההרכב הליטולוגי הוא אבן חול גירית אפרפרה. גיל היחידה פוסט – טריניין ומייצג את השלב של הרדדת הים שלאחר השקעת החרסית ואבן החול הגירית של יחידה 5. בתוך היבשה יחידה זו מתאחדת כנרה עם אבני חול צעירות יותר שמקורן ביחידה 4. עובי היחידה הולך וקטן מצפון הרצועה 35-40 מטר ל 15 מטר בדרומה.

חרסית טינית.

יחידה זו מונחת מעל אבן החול הגירית. הרכבה הליטולוגי של השכבה הוא חרסית חומה המשתנה לטרלית לחרסית טינית וחרסית חולית. גיל היחידה הוא פוסט – טריניין עם תנאי השקעה יבשתיים או ימיים רדודים מאד ובקרבת החוף. בדרום מערב הרצועה הגנוזה של יחידה זו דומה לזו של לס וייתכן שחלקה ממקור יבשתי אאולי. יחידה זו משתרעת למרחק של 8-10 ק"מ מהחוף ובאזורים הדרום מערביים היא מתאחדת עם יחידת הלס שהושקע מאוחר יותר.

אבן חול גירית.

יחידה זו מונחת על יחידת החרסית טינית ובאזור הצפוני היא מונחת באי התאמה מעל אבן החול הגירית של יחידה 6. הרכבה הליטולוגי הוא אבן חול גירית אפרפרה- חומה. גיל היחידה פוסט טריניין עם תנאי השקעה חופיים או יבשתיים. באזור הדרום מערבי חסרה יחידה זו, עובדה המעידה על תהליך אירוויזיבי שנגרם כתוצאה מהתרוממות היבשה. השתרעותה הפנים יבשתית של היחידה מגיע למרחק של מספר קילומטרים ועובייה כ 30-40 מטר.

חרסית.

יחידה זו מונחת באי התאמה על גבי יחידות קדומות יותר החל ביחידה 2 ועד ליחידה 8. הרכבה הליטולוגי הוא חרסית חומה. גיל היחידה הוא פוסט טריניין עם תנאי שקיעה יבשתיים. תנאים אלו נוצרו לאחר הרגרסיה שאפיינה את שלב ההשקעה הקודם של אבן החול הגירית. במהלך הרגרסיה חלה גם הרמה שהייתה אינטנסיבית יותר בפנים היבשה. לאחר ההרמה פעלה אירוויזיה שגרמה להרס של מרבית היחידות הפליסטוקניות. בסיום הפעילות האירוויזבית נוצר מישור נרחב בפני השטח עליו הושקעה יחידה זו. העובי המקסימלי של יחידה זו הוא 25 מטר.

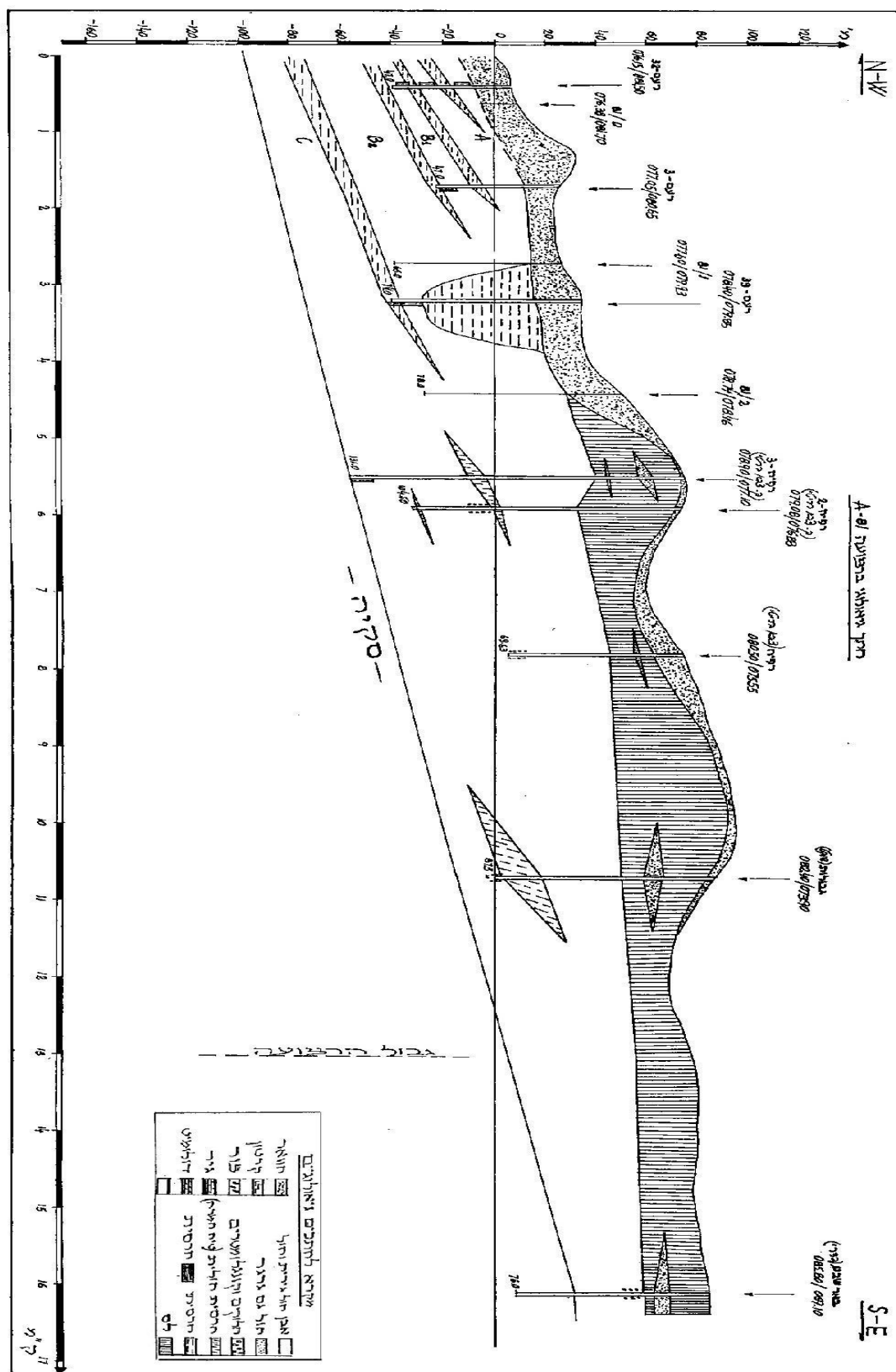
חול דיונות.

יחידה זו מונחת על גבי החרסית הטינית בדרום מערב רצועת עזה. גיל היחידה רצנטי. היווצרות הדיונות קשורה לזרמי הים שהביאו את החול לחוף ולרוחות שהובילו את החול לפנים היבשה. הדיונות משתרעות לאורך החוף של רצועת עזה וכניסתן אל היבשה היא של מספר מאות מטרים ועד שישה קילומטרים בצפון מזרח הרצועה.

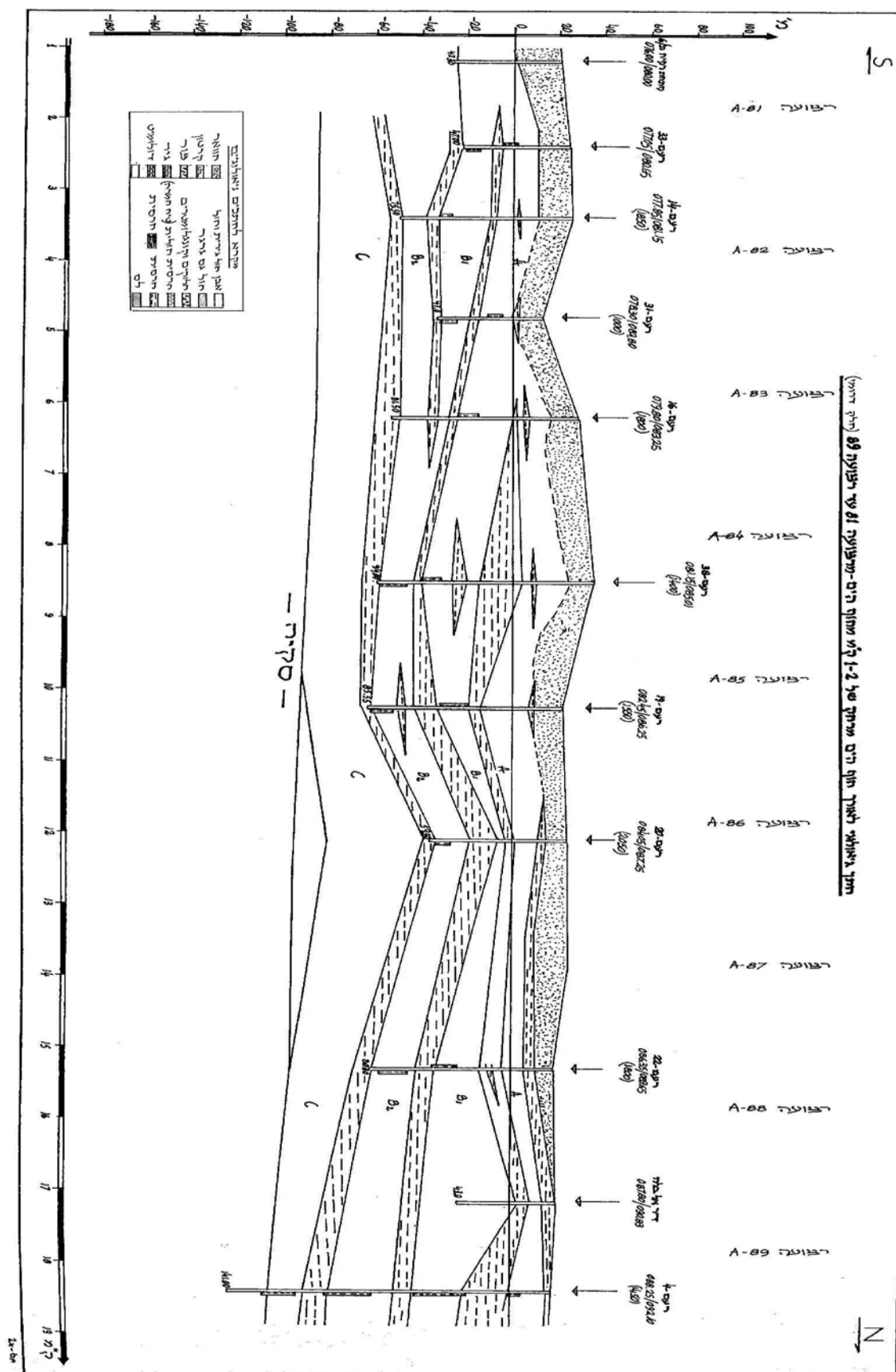
קרקעות ולס.

יחידה זו היא העליונה ביותר בחתך של רצועת עזה. בצפון מזרח הרצועה היחידה מורכבת מקרקעות חרסיתיות ואילו במרכזה ומזרחה ממנה הקרקע הופכת ללסית. בדרום מערב הרצועה הקרקעות חוליות.

חתכים גיאולוגיים של דרום רצועת עזה ומערב הנגב ברצועת רוחב A-81 ואורך 1 מופיעים בתרשימים 1.3 ו- 1.4 להלן:



תרשים 1.3: חתך גיאולוגי בכיוון מזרח – מערב של רצועה הידרולוגית A-81 באזור רפיח (טולמץ, 1991).



תרשים 1.4: חתך גיאולוגי בכיוון צפון - דרום של רצועת החוף מס' 1 באזור רפיח (טולמץ, 1991).

פרק 2 - רקע מדעי.

2.1 המאפיינים של קרקעות לס.

לס (Loess) הוא משקע סילטי בעל נקבוביות גבוהה המובל למקומו בדרך איאולית (Jefferson et al., 2004). קרקעות לס (סילט איאולי) מאפיינות אזורים של מישורים, רמות קלות או בקעות והן מכסות על פי הערכות כ-10% משטחי היבשות בעולם (Mush et al., 2004). תפוצת קרקעות אלה בצפון אמריקה במרכז ארה"ב ובאלסקה (Matanuska valley) קשורה גם בהצטברות סילט השוקע מקרחונים הנמסים לאורך מסלול תנועתם. בדרום אמריקה מצויות קרקעות לס בארגנטינה. ביבשת אסיה קיימים אזורים נרחבים המכוסים בלס. מישורי ה-Lanzhuo בצפון מרכז סין מכוסים בלס המוכר כמשקע סילט איאולי שעבר צמנטציה (Dijkstra, 2001). בשטחי ברית המועצות לשעבר קרקעות לס מצויות באזורים שונים שנחקרו על ידי חוקרים רבים (Jefferson et al., 2003 ; Jefferson et al 2004). מחקרים שנערכו בקרקעות לס ממרכז ארה"ב מראים שדרגת ההתפתחות של קרקעות לס מודרניות או קרקעות קבורות עולה בהתאמה לכיוון הרוח ולמרחק ממקור לס קיים (Ruhe, 1969). יחס דומה הוצע גם עבור קרקעות לס הנמצאות באזורים ארידיים וסמי-ארידיים (Pye and Tsoar, 1987). כך למשל באזור Al-Dalam שבמרכז ערב הסעודית (Alawaji, 2001) ובחלקים מאזור הנגב בישראל (ראה תרשים 1.2 בפרק המבוא). בלוב מוכרים Tripoli loess ממישורי Jefara ו-Ghat loess (Assallay et al., 1994).

ברחבי העולם נערכו מחקרים רבים בקרקעות לס מבחינת ההרכב המינרלוגי, הכימי, התכונות הפיזיקליות והטקסטורליות, התכונות המיכניות וההתנהגות הגיאו-הנדסית (Rogers et al., 1994). הסקירה הנוכחית מתמקדת במספר מחקרים בהם נמצאו קרקעות לס (בעיקר מאזורים ארידיים) המתאימות לתכונות האינדקס וסמלי הקרקע שנמצאו בחתך הקרקע של אזור המחקר בכרם שלום.

2.1.1 קרקעות לס בישראל.

בין קרקעות הלס בישראל ניתן למצוא את קרקעות הלס הגולמיות בנגב הצפוני, קרקעות דמויות לס גלמיות באזור המדברי והמדברי-ערבתי של הנגב וקרקעות חול לסיות באזורי אקלים מדברי (רביקוביץ, 1981).

קרקעות אלו עשויות מצירוף של מקטעים מכניים (גודל גרגר) שונים השוקעים מהאבק המדברי האיאולי לאורך מסלול תנועתו. מקור האבק מבלית סלעים באזורי המדבר של סיני. רוחות דרום מערביות מניעות את האבק האיאולי לתוך הנגב שם הוא שוקע בכמויות עצומות ממערב הנגב באזור השפלה הדרומית ועד למרכז הנגב וצפונו. באזורים מסוימים חומר זה נשטף בשיטפונות ומושקע שנית בשטחים פתוחים סמוך לנחלים. מנגנון הסעת החומר הנשען על אנרגיית הרוח משפיע על היחס הכמותי של המקטעים המכניים. בחלק מקרקעות הלס ניתן למצוא התגבשויות וכתמי גיר. תופעה זו נפוצה בעיקר באזורים בהם כמות המשקעים עולה על 200 מ"מ בשנה.

לפי רביקוביץ (1981) בראשית תהליך ההסעה שקעו גרגרי החול הכבדים ונערכו לחולות מדבר עניים בתכולת חרסית וסילט. חולות אלו נעו עם הזמן לתוך מרחב מערב הנגב. לאחר השקעת החול המשיך האבק במסעו לכיוון צפון מזרח ואחוזי הסילט והחרסית בו עלו. צירופי המקטעים השונים באבק שימשו חומר גלם ליצירת שלשה טיפוסי קרקע הנבדלים זה מזה בתכונותיהם המורפולוגיות –

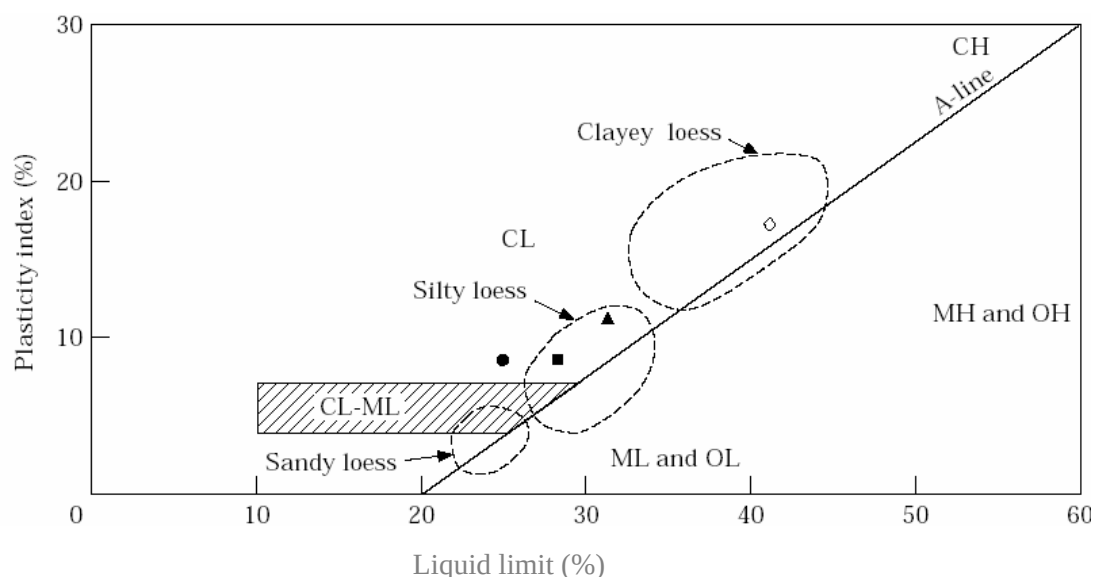
פיסיקליות – כימיות. מתערובות עם מרקם חמרתי וחמרתי – חרסיתי נוצרו קרקעות לס גולמיות. מצירוף של מקטעי אבק עם מרקם של חמרתי – חולי נוצרו קרקעות דמויות לס גלמיות, וממקטעים שמרקמם הוא חולי נוצרו קרקעות חול לסיות. צבען של קרקעות לס בישראל הוא לרוב צהוב שחום או חום בהיר עד צהבהב. מבחינה גיאומורפולוגית קרקעות לס מהוות כיסוי של הנוף. המבנה המורפולוגי שלהן מאפשר ליצור חתך תלול בגובה מטרים רבים ולעיתים מצוקים בעלי שיפוע שלילי כפי שניתן לראות בגדות נחלים.

2.1.2 תכונות אינדקס.

מרכיבים הבונים את הלס הם גרגירי קוורץ דק, חלקיקי סילט וחרסית בכמויות שונות וכן צמנט קרבונטי. ההרכב הכימי של הלס מבוסס על תחמוצות מינרלים סילקטיים, מינרלי חרסית וקלציום קרבונט המצוי כמטחן דק בתכולה של כ 20-25% (רביקוביץ, 1981).

לקרקעות לס פלסטיות נמוכה עד בינונית העולה עם העלייה בתכולת החרסית בקרקע. בעבודתם של Assallay et al., (1994) בלוב, נבדקו שני טיפוסים לס ממקומות שונים. עבור הלס של Tripoli גבול הנזילות נע בין 25-31% ואינדקס הפלסטיות נע בין 8-11% בהתאמה. עבור הלס של Ghat $LL = 41\%$ ו- $PI = 17\%$. המאפיינים הפלסטיים של קרקעות אלה הם גבול פלסטיות נמוך ואינדקס פלסטיות נמוך גם כן הנע בין 6-8% (Dijkstra, 2001).

לפי Gibbs and Holland (1960) ערכי גבול הנזילות של לס סילטי נמצאים בטווח שבין 25-35% ועבור לס חרסיתי ערך זה יכול להגיע עד 45%. הם הגדירו שלוש קבוצות בין קרקעות הלס: sandy loess, silty loess ו clayey loess. קבוצות אלו מאפיינות את היחס בין אינדקס הפלסטיות וגבול הנזילות לכל סוג קרקע (תרשים 2.1).



תרשים 2.1: התפלגות קרקעות לס בהתאם למאפיינים פלסטיים לפי Gibbs and Holland (1960).

לפי רביקוביץ (1981) תכולת החרסית בקרקעות לס (בצפון הנגב) מהסוג הקל נעה בטווח שבין 19-23% ותכולת הסילט הנפוצה ביותר נעה בין 15-20%. בקרקעות לס מהסוג הכבד יותר תכולת החרסית על פי רוב היא בתחום שבין 25-35% ותכולת הסילט היא בין 15-30%. חול המצוי בקרקעות

לס שייך ברובו לסוג הדק עם קוטר גרגר שבין 0.074 - 0.02 מילימטר כאשר חול גס תופס כ 1-3% עם גודל גרגר שאינו עולה על 2 מילימטר. לשם השוואה, דוגמאות קרקע שנלקחו מחתך של מצוק ה Matanuska river באלסקה הכילו 33-71% של חול ותכולת הסילט נעה בין 17-58% Mush et al., (2003). משקעי הלס בצפון סין בנויים בעיקר מגרגרי קוורץ השייכים לתחום גודל גרגר המאפיין סילט (Dijkstra, 2001). לפי Rogers et al. (1994), שני מאפיינים ברורים מגדירים את החומר ממנו בנויות קרקעות לס: התפלגות גודל הגרגר והפוטנציאל של התמוטטות מבנה הקרקע כאשר החומר נרטב ונושא מאמצים. טבלה 2.1 מסכמת את המאפיינים של קרקעות לס מאזורים שונים בלוב:

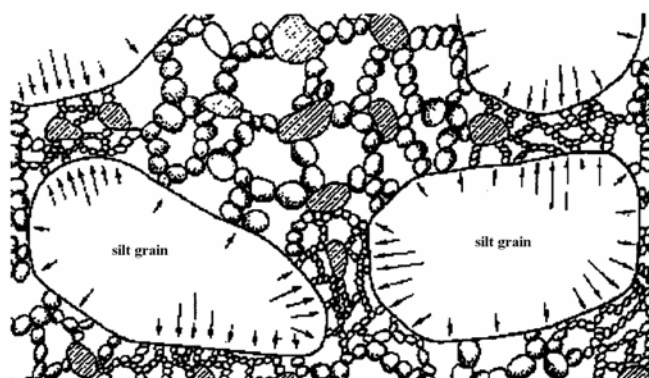
Property	Sample locations			
	T.S	G.S	K.S	GB.S
Natural moisture content (%)	3	6	3	2
Specific gravity (SG)	2.73	2.66	2.68	2.67
Dry density (Mg/m^3)	–	1.36–1.42	1.40–1.46	–
Void ratio	–	0.87–0.96	0.84–0.92	–
Porosity (%)	–	0.46–0.49	0.45–0.48	–
Grain size distribution				
Sand (%)	10	38	18	39
Silt (%)	77	51	69	53
Clay (%)	13	11	13	8
Atterberg limits				
Liquid limit (%)	41	27	31	25
Plastic limit (%)	24	19	20	17
Plasticity index (%)	17	8	11	8

T.S = Tahala Soil; G.S = Gharyan Soil; K.S = Khoms Soil; GB.S = Garabolli Soil.

טבלה 2.1: תכונות אינדקס של קרקעות לס בלוב (Assallay et al., 1994).

2.1.3 המבנה הפיזי של לס.

לקרקעות הלס מבנה פיזי פנימי בעל אריזה פתוחה דמוית כוורת. Casagrande (1932) תאר את מבנה הלס כגרגרי סילט המוקפים בטבעות של דקים (חרסיות) שעברו צמנטציה כמתואר בתרשים 2.2:

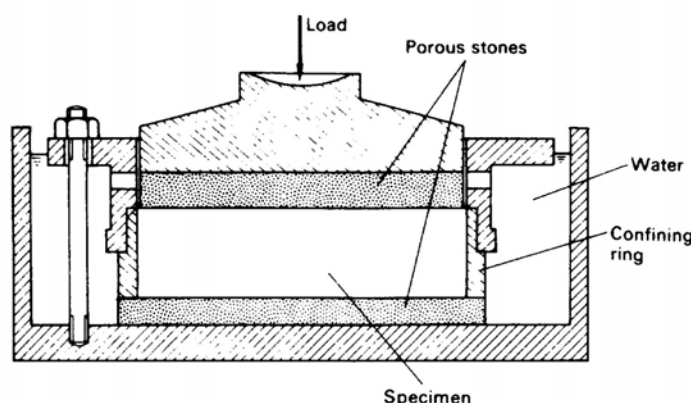


תרשים 2.2: המבנה הפנימי של לס לפי Casagrande, 1932 (Dijkstra, 2001).

מבנה פיזי יציב זה מאפשר לקרקע לשאת מאמצי קבורה (אנכיים) גבוהים בתנאים טבעיים בשדה כאשר היא במצב יבש. עם זאת לקרקעות לס פלסטיות נמוכה והן רגישות מאד לשינויים בתכולת הרטיבות

(Assallay et al., 1996). הלס מסווג כחומר המתרכך במגע עם מים כיוון שעם ההרטבה המבנה נחלש במהירות ומתפורר או קורס (Dijkstra et al., 1994). מבחינה גיאוטכנית לס היא קרקע סילט נקבובית, בלתי רוויה, מטהסטבילית, המושפעת מתהליכי דחיסה בהם המבנה הפנימי קורס ברוויה (Jefferson et al., 2004). המבנה הפנימי של לס מטהסטבילי עשוי להפוך במהירות מאריזה פתוחה לאריזה צפופה. תופעה זו מוגברת במידה רבה עקב דגרדציה של קשרי הצמנטציה כתוצאה ממגע עם מים (Dijkstra, 2001).

Lutenegger and Hallberg (1988) מציינים כי שיטה נפוצה הנהוגה לשם זיהוי של קרקעות הנוטות לקרוס היא לחיצה חד ממדית המבוצעת באמצעות מתקן אודומטר (Oedometer device). שיטה זו מיושמת באופן נרחב בגיאוטכניקה. המאפיינים של קרקע הנתונה ללחיצה חד ממדית נקבעים בדרך כלל באמצעות בדיקה זו לפי תקן BS 1377 (5) או על ידי בדיקת קונסולידציה בהתאם לתקן ASTM D-2435. בבדיקה זו דגם קרקע עם תכולת רטיבות טבעית (או במצב יבש) בצורת דיסקית נתון בטבעת מתכתית המונחת במתקן האודומטר. הדגם נמצא בין שתי אבנים פורוזיביות (תרשים 2.3). מפעילים על הדגם מאמצי לחיצה הגדלים עד שמגיעים ללחץ הרצוי ואז מרטיבים את הדגם במים. ירידה בנפח הדגם תחת לחץ קבוע מהווה אינדיקציה לפוטנציאל הקריסה של הקרקע. לפי Allawaji (2000) שיטה זו מדמה בקירוב טוב מחזורי הרטבה וייבוש טבעיים בקרקע.



תרשים 2.3: מתקן לבדיקת אודומטר (Craig, 1997).

לפי Lutenegger and Hallberg (1988) מקדם הקריסה i הוגדר לראשונה על ידי Abelev (1948) ונקבע בדרך כלל תחת מאמץ של 3 kg/cm^2 (300 kPa) לפי:

$$i = \frac{\Delta e}{1 + e'} = \frac{e' - e''}{1 + e'} \quad [2.1]$$

כאשר,

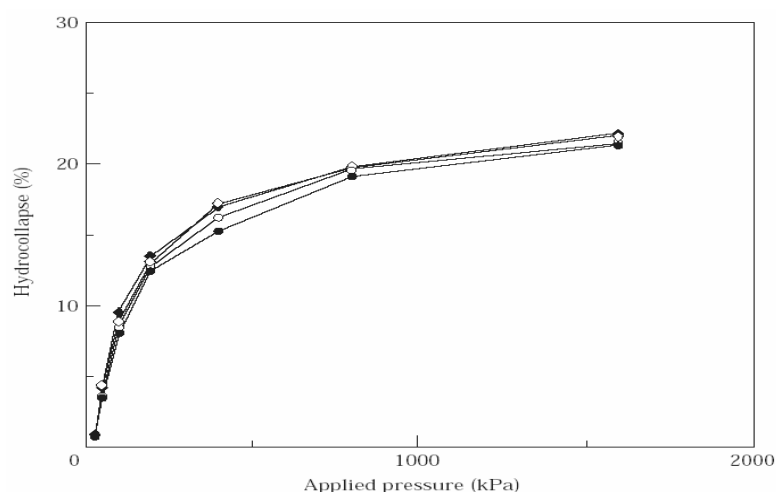
i – מקדם הקריסה.

Δe – שינוי במנת החללים הנגרם כתוצאה מהרטבה.

e' – מנת חללים לפני הרטבה.

e'' – מנת חללים אחרי הרטבה.

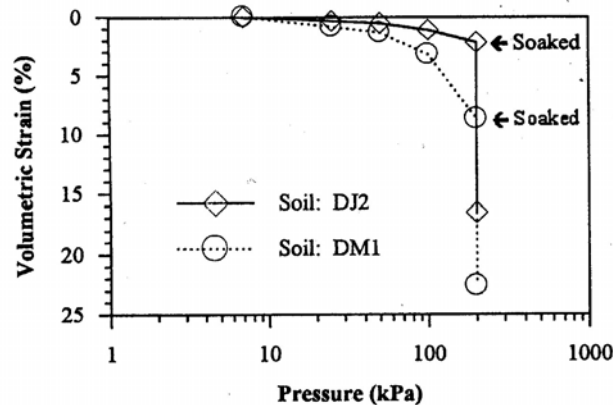
הערכה של פוטנציאל הקריסה בצורה זו נותנת אינדיקציה להתנהגות השינוי הנפחי תחת עומסים שונים ללא השפעת מימד הזמן. קרקעות עבורן נמצא ערך $i > 0.02$ נחשבות מסוכנות ובעלות נטייה לקרוס. לפי Cui and Delage (1996) לתכולת הרטיבות יש השפעה דומיננטית על ערך המאמץ הנורמלי הדרוש לצורך דחיסה סטטית של סילט ממקור איאולי. לטענתם הפרש של 0.3% בתכולת הרטיבות דורש הגברה של המאמץ האנכי ב 40 kPa בדחיסה סטטית של המדגם כדי לקבל את אותה הצפיפות. Assallay et al. (1994) ערכו בדיקות אודומטר על דגמים של קרקעות לס מאזורים שונים בלוב. הם הגדירו קריסה ברוויה (Hydrocollaps %) כשינוי במנת החללים הראשונית של הדגם המבוטא באחוזים. תוצאות הבדיקות עבור הדגמים שנבדקו מראות שקריסה ברוויה נעה בטווח שבין 1-22%. תרשים 2.4 מדגים את השפעת הלחיצה במצב רווי על הקריסה של קרקעות לס. דרגת הקריסה עולה עם העלייה במאמץ הלחיצה הפועל על הדגם כאשר בטווח מאמצים נמוך קצב הקריסה מהיר יותר מאשר בטווח מאמצים גבוה.



תרשים 2.4: התנהגות דגמים בלתי מופרים של קרקעות לס מלוב תחת לחיצה ברוויה (Assallay et al., 1994).

במאמרו טוען El –Sohby (1994) כי מאמץ אנכי של 100 kPa מתאים להערכה של פוטנציאל הקריסה של קרקעות ארידיות. Alawaji (2000) מגדיר את פוטנציאל הקריסה (-) Collapse Potential (CP) כשינוי במעוות הנגרם כתוצאה מהרוויה של דגם קרקע תחת מאמץ נורמלי קבוע. הוא ערך בדיקות Oedometer לדגמים משני טיפוסים קרקע SM ו CL-ML תחת העומסים הבאים: 7, 25, 50, 100, 200 kPa. כאשר העומס הוגדל בצורה מדורגת. לאחר לחיצה במצב יבש והגעה לשווי משקל הדגמים הרוו במים ונמדד המעוות הנפחי לאחר 24 שעות. תוצאות הבדיקות מובאות בתרשים 2.5 ומראות כי הקרקעות המייצגות בשתי הקבוצות DM1 ו DJ2 מתנהגות באופן שונה על אף ערך CP דומה. דגם במצב יבש של קרקע מטיפוס DM1 נכנע תחת 25 kPa כאשר דגם של קרקע מטיפוס DJ2 נשאר בתחום האלסטי עד כ 200 kPa. הבדלי ההתנהגות פונקציונליים לשינויים במבנה הפנימי של החומר כגון תכולת הדקים או התפלגות גודל הגרגר. תחת מאמץ אנכי של 200 kPa פוטנציאל הקריסה של שני טיפוסים הקרקע הוא כ

14 %. Jennings and Knight (1975) מציינים כי ערך CP כזה עשוי לגרום לנזקים חמורים עבור יסודות בקרקע (טבלה 2.2).

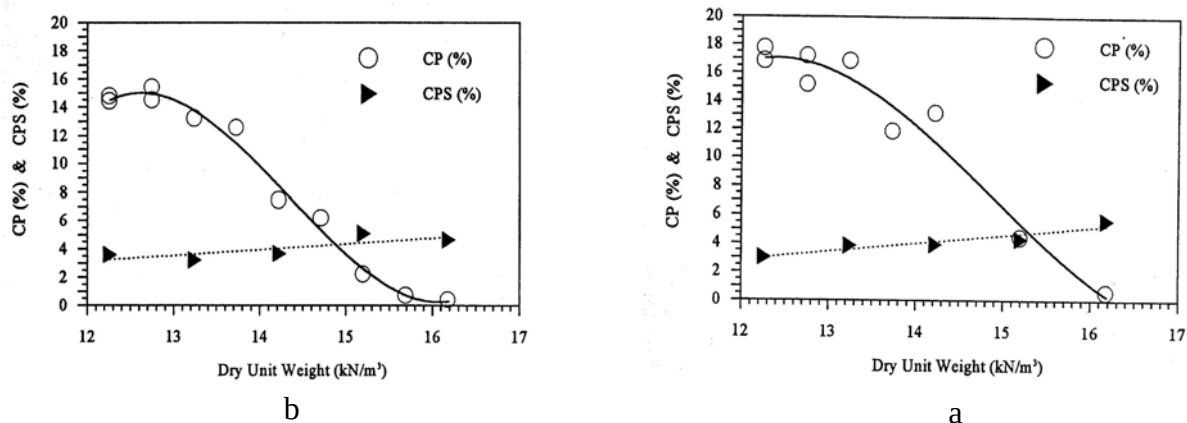


תרשים 2.5: מעוות נפחי אופייני של שני טיפוסים לס מאזור Al-dalam בתנאי לחיצה חד צירית (Alawaji, 2000).

Collapse potential (CP)	Severity of problem
0%–1%	No problem
1%–5%	Moderate problem
5%–10%	Trouble
10%–20%	Severe trouble
>20%	Very severe trouble

טבלה 2.2: הערכת נזקים בעקבות קריסה ברוויה (Jennings and Knight, 1975).

לפי Alawaji (2000) קיימת השפעה הדדית בין מאמצים נורמלים ומאמצי גזירה כמנגנון המשפיע על פוטנציאל הקריסה. פוטנציאל הקריסה בגזירה (shear induced collapse potential – CPS) מוגדר כמעוות הנפחי הנוסף בעקבות גזירה שחל בדגם לאחר הגיעו לשווי משקל תחת מאמץ אנכי קבוע ובתנאי רוויה. היחסים בין CP ו CPS (תרשים 2.6) מראים כי ערכו של CP יורד עם עלייה במשקל המרחבי היבש של הדגם, כלומר מבנה פנימי יציב של החומר מקטין את פוטנציאל הקריסה של קרקע צפופה. עקומת CPS מתנהגת באופן לינארי. עבור קרקע צפופה פוטנציאל הקריסה מגזירה עולה מכיוון שהגזירה גורמת לנזקים קשים למבנה של החומר וארגון הגרגירים מחדש מוביל לקריסה נוספת.

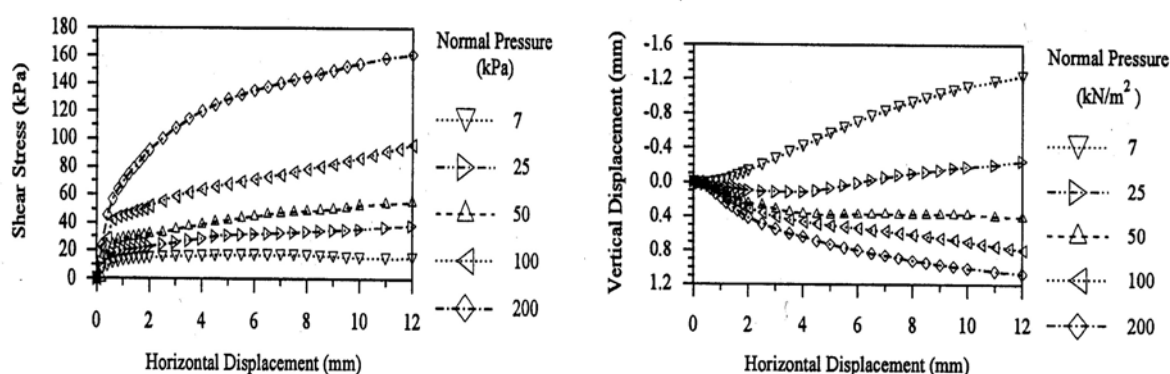


תרשים 2.6: פוטנציאל הקריסה בדחיסה וגזירה של קרקעות מטיפוס CL-ML (a) ו SM (b) (Alawaji, 2000).

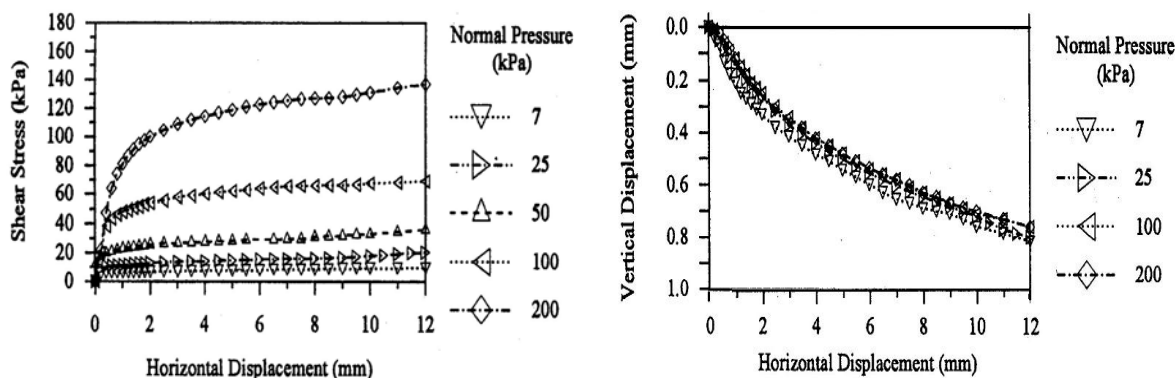
2.1.4 תכונות מכניות של לס.

המרכיבים הליטולוגיים המאפיינים את הלס משפיעים באופן ישיר על התכונות המכניות וההתנהגות המכנית של קרקע זו. קיים מגוון של טיפוסים קרקע (סמלי מיון) אותם ניתן לשייך לקבוצת הלס. לטיפוסי קרקע אלו התפלגות גודל גרגר ותכולת מרכיבים דקים שונים זה מזה. הרגישות של הלס למים צוינה כבר בסעיף הקודם ותכונה זו אף היא בעלת השפעה רבה על התנהגותה המכנית של קרקע זו.

Alawaji, 2000 חקר את ההתנהגות המכנית של קרקעות לס (Loess) המכסות את אזור Al-Dalam שבמרכז ערב הסעודית. בדיקות גזירה ישירה בטיפוסי קרקע שהוגדרו כ- SM ו- CL-ML מראות כי טיפוסים אלה מפתחים תגובת גזירה מוכרת למאמצי גזירה המתפתחים בחומר. הבדיקות נערכו על שתי סדרות של מדגמים מופרים עם תכולת רטיבות של 8.3% ומשקל מרחבי יבש (γ_d) הנע בין 12.16 – 16.19 kN/m^3 . התנהגות דגמי קרקע מטיפוס CL-ML בגזירה מתוארים בתרשים 2.7. מאמץ הגזירה בכשל עולה עם המאמץ הנורמלי. התפשטות נפחית של הדגם (דילטציה) מתרחשת במאמצים נורמלים נמוכים ודחיסה מתרחשת עם עליה במאמץ הנורמלי. תרשים 2.8 מראה את תוצאות מבחני גזירה ישירה שנערכו בדגמים במצב רווי של קרקע מטיפוס CL-ML. חוזק הגזירה של הדגמים במצב רווי עולה באופן טבעי עם העלייה במאמץ הנורמלי. כאן יש דגש על השפעת תכולת הרטיבות על התנהגות הדגם: הרווית המדגם מבטלת את נטייתו לדילטציה במהלך הגזירה והקשר לקריסה ברוויה ברור.

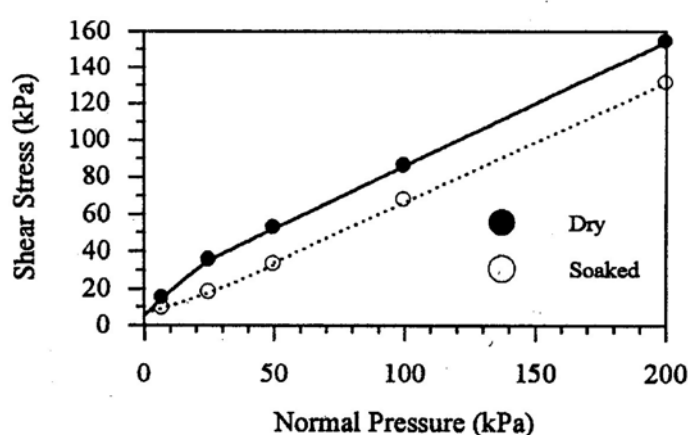


תרשים 2.7: חוזק גזירה ודילטציה של לס במצב יבש (Alawaji, 2000).



תרשים 2.8: חוזק גזירה ודילטציה של לס במצב רווי (Alawaji, 2000).

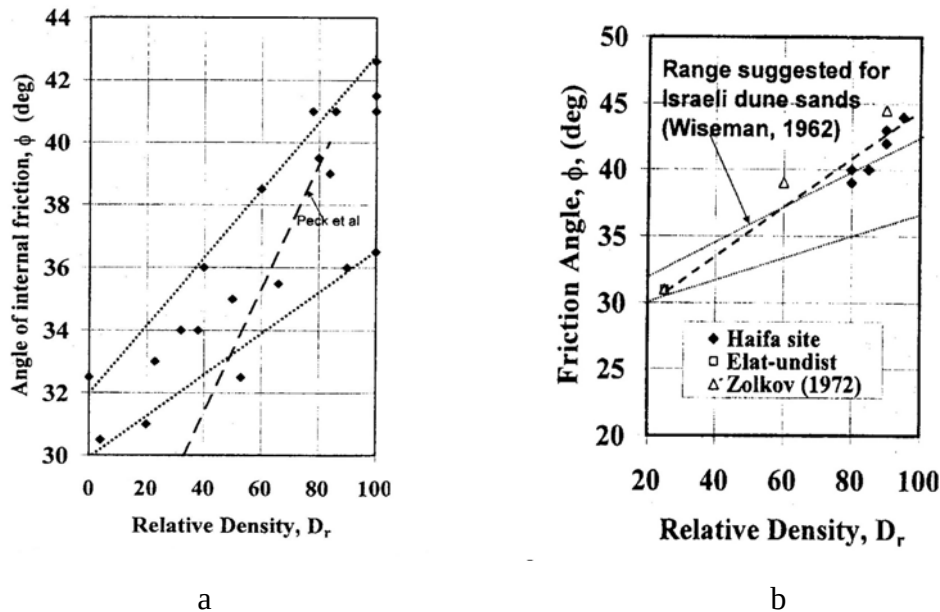
השוואה בין התנהגות דגמי הקרקע במצב יבש ובמצב רווי מראה כי חוזק הגזירה של קרקע מטיפוס CL-ML במצב רווי הוא כ- 75 – 85% מחוזק הגזירה של אותה הקרקע במצב יבש. Mitchell (1976) תיאר את מאפייני ההתנהגות של דגמים במצב יבש כדגמים בעלי מבנה רגיש ושל הדגמים הרוויים ככאלה בעלי מבנה בלתי רגיש. תרשים 2.9 מסכם את סדרת הבדיקות שנערכו בדגמים של הקרקע שהוגדרה CL-ML. תחת מאמצים נורמלים הקטנים מ- 50 kPa מעטפות הכשל מתנהגות באופן א – לינארי ועם העלייה במאמץ האנכי קריטריון הכשל עבור שני סוגי הבדיקות נעשה לינארי. הפרמטרים המכניים המתקבלים בקטע הלינארי של קריטריון זה הם: $\phi_d = 34^\circ$, $c_d = 18$ kPa, עבור הדגמים במצב יבש ו- $\phi_s = 33^\circ$, $c_s = 2$ kPa, עבור הדגמים הרוויים. דגמים השייכים לקרקע מטיפוס SM נבדקו באותו האופן והתנהגותם המכנית דומה להתנהגות הדגמים מטיפוס CL-ML.



תרשים 2.9: מעטפות כשל אופייניות לדגמי קרקע מטיפוס CL-ML במצב יבש ובמצב רווי (Alawaji, 2000).

2.2 קרקעות גרנולריות מאזורי החוף של ישראל – עבודות קודמות.

חלקים נרחבים של מישור החוף בישראל מכוסים בקרקעות גרנולריות מהן דיונות חול עני בצמנט או קרקעות שעברו צמנטציה על ידי קרבונט ונוצר סלע המכונה "כורכר". מאחר וההתפתחות העירונית באזור זה מואצת מאוד, הערכת חוזק הגזירה של הקרקע נחוצה למטרות הנדסיות ובמיוחד לביסוס וציבות מדרונות. התכונות המכניות של קרקעות חוליות ניתנות להערכה על בסיס בדיקות - In situ כגון בדיקת החדרה סטנדרטית SPT. תוצאת הבדיקה (מספר ההקשות - N) מותאמת על ידי קורלציה לצפיפות יחסית D_r (Gibbs and Holtz, 1957). בנוסף לכך קיימות הערכות לגבי מודול האלסטיות וחוזק הגזירה על פי הצפיפות היחסית. הקשר בין זווית החיכוך של חול ϕ וערך הצפיפות היחסית D_r הוצע על ידי Peck וחבריו כבר ב-1953. Wiseman (1962) הציג תוצאות של מבחני גזירה ישירה שבוצעו על דגמי קרקע מישראל כמוצג בתרשים 2.10a. פיזור התוצאות מצביע על תחום המאפיין את זווית החיכוך של קרקעות אלה. מידע נוסף שהתקבל מבדיקות טריאקסיאליות שביצע Zolkov, 1972 מוצג בתרשים 2.10 b. חלק מן התוצאות חורגות מן התחום של Wiseman אך עם זאת קו ההתאמה נמצא בסמוך לגבול העליון שמצא.

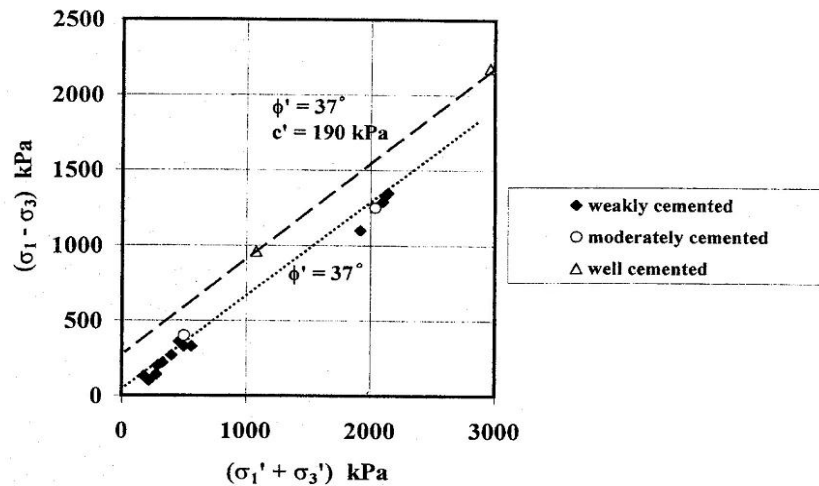


תרשים 2.10: זוויות חיכוך פנימית של חולות מישראל (a) תוצאות מבחני גזירה ישירה; ובדיקות טריאקסיאליות (Frydman, 2000)

בארץ ובעולם קיים ידע רב בנושא חוזק הגזירה של קרקעות גרנולריות וערכי זווית החיכוך הפנימית ϕ וקוהזיה c , כפרמטרים מקובלים לצרכי תכנון הנדסי. מספר עבודות מחקר התפרסמו בתחום גזירה ישירה של קרקעות ישראל ותכונותיהן המכניות. Frydman et al., 1980 הציגו עבודת מחקר העוסקת בהתנולות של חול מלוכד מאזור מישור החוף של ישראל. העבודה כללה בדיקות SPT בשדה ובדיקות טריאקסיאליות, בגלעינים שנקדחו בדוגמאות קרקע קפואות. Frydman, 2000 סיכם מחקרים שנערכו בין השנים 1980-2000 בתחום של חוזק הגזירה של קרקעות בישראל. העבודה מקיפה מספר רב של דוגמאות קרקע חוליות וחרסיתיות מאזורים שונים בארץ ומספקת בסיס נתונים המאפשר השוואת ערכים למבחנים נוספים הנערכים תדיר.

2.2.1 חולות מלוכדים חלקית.

במהלך סקר קרקע שבוצע באזור ניצנים בשנת 1976 לצורך בדיקת היתכנות של הקמת תחנת כוח נלקחו בלוקים של קרקע ממספר אתרי דגימה והוקפאו (Frydman, 1982). מן הבלוקים נקדחו גלעינים במצב רווי ($S = 100\%$) ונבדקו בלחיצה טריאקסיאלית בתנאים מנוקזים (Drained). בין הדגמים הובחנו שלוש קבוצות של חולות בעלי דרגות צמנטציה שונה: weakly cemented, moderately cemented and well cemented. התוצאות בתרשים 2.11 מראות שזווית החיכוך הפנימית של החומר היא 37° כאשר הקוהזיה תלויה בצמנטציה. החולות הלא מלוכדים והמלוכדים חלקית מציגים קוהזיה אפסית. מכאן שהכשל מתפתח במטריקס או באזור בו הצמנטציה החלשה נשברת במהלך הגזירה והכשל מתרחש באזור ללא צמנט. מסקנה נוספת היא שלצמנטציה החלקית אין משמעות אפקטיבית על מרכיב החוזק.

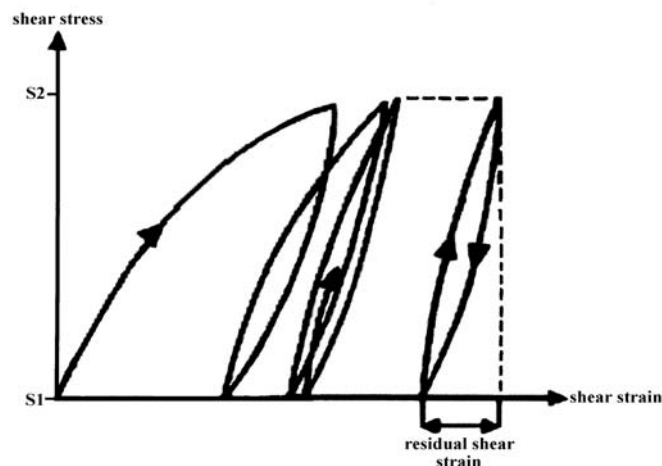


תרשים 2.11 : פרמטרים מכניים של קרקעות חוליות מדרגות צמנטציה שונות (Frydman 2000).

2.3 עומס דינמי וגזירה מחזורית.

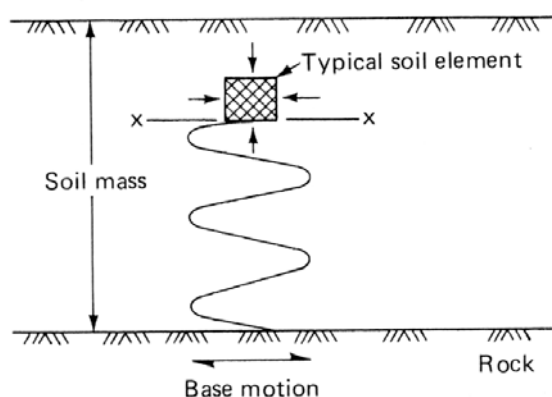
עומס דינמי עשוי לפעול על קרקע על ידי מספר מקורות אפשריים כגון עומס סיסמי (העמסה מחזורית הנגרמת על ידי רעידות אדמה), פעילות אדם ולאוו מכונה בעת בנייה או תנועה ותהליכים טבעיים כגון גלים ורוחות. עומסים אלו שונים באופיים מאחרים משום שהם מתנהגים באופן מחזורי. התנהגות קרקע תחת עומס מחזורי נבחנת באופנים שונים הניתנים לחלוקה לשלוש קטגוריות: (1) האפקט של מאמץ מחזורי, (2) תגובה תלויה קצב של הקרקע, (3) אפקטים דינמיים כאשר אנליזות סטטיות אינן ישימות (O'Reilly and Brown, 1991).

הגדרה פשוטה של מאמץ מחזורי הוא שינוי בסימן של קצב עליית המאמץ $(\pm \dot{\sigma}, \pm \dot{\tau})$ בין שני ערכי קצה של אותו מאמץ $(\pm \sigma, \pm \tau)$. תרשים 2.12 מדגים את היחס בין מאמץ הגזירה למעוות הגזירה בתנאי העמסה מחזורית מנוקזת. מערכו הראשוני S1, מאמץ הגזירה עולה בקצב $+\dot{\tau}$ עד לערך S2. בשלב זה מאמץ הגזירה יורד בקצב $-\dot{\tau}$ עד לערך S1. צירוף זה מהווה מחזור אחד. בין ערכי הקצה של מאמץ הגזירה S1 ו-S2 כמות המעוות האלסטי נשארת קבועה אך כמות המעוות הפלסטי נוטה לדעוך עם התקדמות המחזורים.

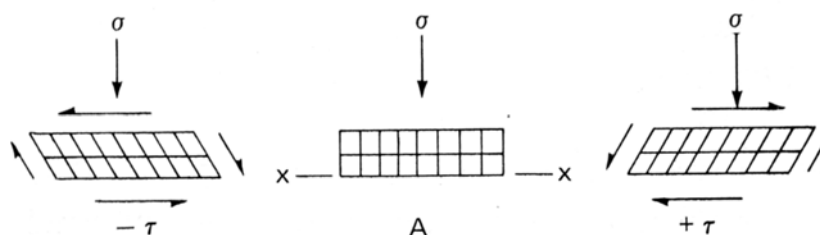


תרשים 2.12: העמסה מחזורית מנוקזת של חול (O'Reilly and Brown, 1991).

השפעת קצב המאמץ או המעוות על קרקע מבטא את התגובה תלוית הקצב של הקרקע. ניתן לייחס תלות זו לשני מקורות: האחד הוא צמיגות המגעים בין חלקיקי הקרקע, והשני הוא פיזור תלוי זמן של לחץ מי נקבים (O'Reilly and Brown, 1991). קרקעות חרסיות מגיבות באופן ויסקוזי ומציגות עלייה בחוזק הגזירה שלהן עם העלייה בקצב המעוות. תופעת ההתנזלות (liquefaction - במסגרת סקירה זו נדון בה באופן נקודתי בלבד) מציגה היטב את הקשר ההדוק שבין פיזור לחץ המים בקרקע לבין הזמן. במהלך התנזלות, העמסה בלתי מנוקזת (תאוצה דינמית פתאומית) של קרקע בלתי קוהזיבית גורמת להגברת לחץ המים בקרקע באופן רגעי וכתוצאה מכך לירידה במאמץ האפקטיבי (המאמץ בין גרגרי הקרקע). במקרה קיצוני המאמץ האפקטיבי יורד עד כדי ניתוק המגעים בין הגרגירים. במצב זה הקרקע מתנהגת כנוזל ויסקוזי. רעידות אדמה גורמות לתאוצה אנכית של פני הקרקע וכן לתאוצות אופקיות המגבירות את מאמצי הגזירה בגוף הקרקע (Lambe and Whitman, 1979). כיוונם של מאמצי גזירה מחזוריים במהלך רעידת אדמה חזקה זהים לכיוון התאוצות האופקיות (תרשים 2.13). התנאים בקרקע בזמן רעידת אדמה דומים לפיכך לתנאים הקיימים בזמן גזירה מחזורית של דגם קרקע הנערכת במספר חזרות (תרשים 2.14). במעבדה ניתן לדמות תנאי העמסה אלו באמצעות בדיקות Simple shear או גזירה טריאקסיאלית.



תרשים 2.13: אלמנט קרקע החשוף להשפעת גלי גזירה (Prakash, 1981).



תרשים 2.14: תיאור אידיאלי של מאמצים המתפתחים באלמנט קרקע בעת העמסה מחזורית כגון רעידת אדמה, (Prakash, 1981).

האפקט הדינמי של העמסה מחזורית כגון הגברת גלי גזירה (S) בקרקעות רכות או בסדימנטים עמוקים, גדל בעיקר כאשר תדירות התנודה גבוהה. אכן, ניתוח דינמי בהתייחס להגדרת תנאי שפה, ריסון (damping) וקשיחות של חומרים גיאולוגיים הנתונים למעוותים קטנים מאוד עשוי להיות מורכב (O'Reilly and Brown, 1991).

2.3.1 שיטות לבחינת התנהגות הקרקע תחת עומס מחזורי.

התגובה הדינמית של קרקע והתנהגותה תחת עומסים דינמיים ניתנת להערכה באמצעות מספר שיטות שדה ומעבדה המתבססות על העמסה מחזורית ומדידת מהירויות גלים. להלן סקירה קצרה של הבדיקות השונות.

בדיקות שדה דינמיות.

שיטות השדה הנפוצות לבדיקת פרמטרים אלסטיים דינמיים של קרקעות, עושות שימוש בסקרים סיסמיים באמצעותם ניתן לקבוע את מהירות גלי הלחיצה (V_p) וגלי הגזירה (V_s) בקרקע. הסקרים הסיסמיים המקובלים הם רפרקציה ורפלקציה (Das, 1993) וכן שיטות Cross-hole ו-Down-hole בהן נעשה שימוש במחקר זה והן מתוארות בהרחבה בסעיף 3.1.4 בפרק שיטות מחקר. Stokoe et al., (1988) מתארים את הציוד והשימוש בשיטת Spectral Analysis of Surface Waves – SASW. יש לציין כי בשיטות אלה קשה לעיתים לקבל פרמטרים התלויים במעוות כגון מקדם הריסון ולכן יש לבצע אותן בשילוב עם בדיקות המעבדה.

בדיקות מעבדה דינמיות.

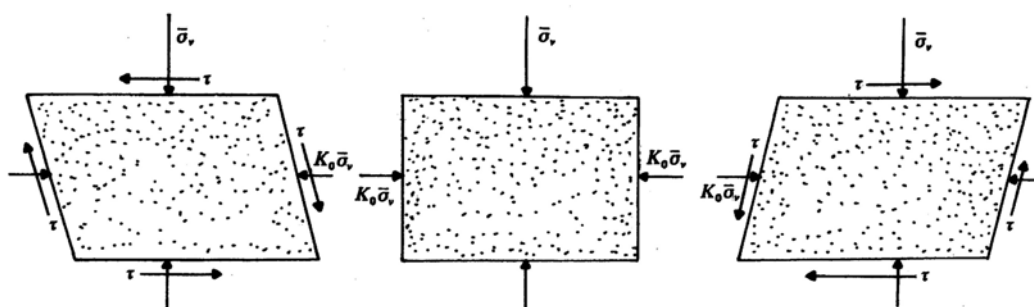
התפתחות מעוותים קטנים מאד בדגמי קרקע ומדידתם נעשית באמצעות מדידת מהירויות גלי גזירה (V_s) במעבדה. בדיקת המעבדה הותיקה ביותר העושה שימוש במדידת מהירויות נקראת Resonant Column Test ולפי (Das, 1993), נעשה בה שימוש לראשונה בין השנים 1937 – 1940 על ידי Ishimoto ו-Iida. במתקן ההרעדה (Resonant column apparatus), תדר ההרעדה מותאם לתדירות העצמית של דגם הקרקע (Prakash, 1981). המודול מחושב לפי תדר התהודה של הדגם ופרמטרים גיאומטריים של הדגם והמתקן. הריסון (Damping) נקבע לאחר הפסקת ההרעדה וחישוב דעיכה לוגריתמית של הגלים. בדיקה דינמית חדישה יותר שפותחה לצורך בדיקות קשיחות של קרקע בתחום מעוותים קטנים מכונה Bender Elements. הבדיקה מבוססת על העברת זרם חשמלי בדגם קרקע באמצעות שני אלמנטים קרמיים (Piezo-ceramic elements). אלמנטים אלו נוטים להתעוות או להתכווץ תחת שינוי במתח חשמלי. האלמנטים ננעצים כ-3 מילימטר בדגם הקרקע ועומדים זה כנגד זה. שינוי המתח באחד האלמנטים גורם למעבר גלי גזירה בדגם הנקלטים באלמנט האחר. האותות החשמליים נקלטים באופן רציף באמצעות אוסילוסקופ (oscilloscope) ומאפשרים את חישוב זמן המעבר של גלי הגזירה (מהירות הגלים). ממהירות הגלים ניתן לחשב מודול גזירה דינמי מכסימלי (G_{max}) עבור הקרקע. השימוש בבדיקה זו ויישומיה בתכנון גיאוטכני מתוארים על ידי Atkinson, 2000.

בדיקות גזירה במעבדה.

בין שיטות המעבדה ניתן למצוא מספר בדיקות גזירה ביניהן בדיקת גזירה (פשוטה או ישירה) מחזורית מונוטונית (Monotonic Cyclic Direct shear test / Cyclic Simple Shear test) וגזירה מחזורית בפיתול (Cyclic Torsional Simple Shear Test) המוכרת גם כ- גזירה מחזורית טבעתית (Cyclic Ring shear test). בדיקה שכזו נפוצה היא הבדיקה המחזורית הטריאקסיאלית. שיטות

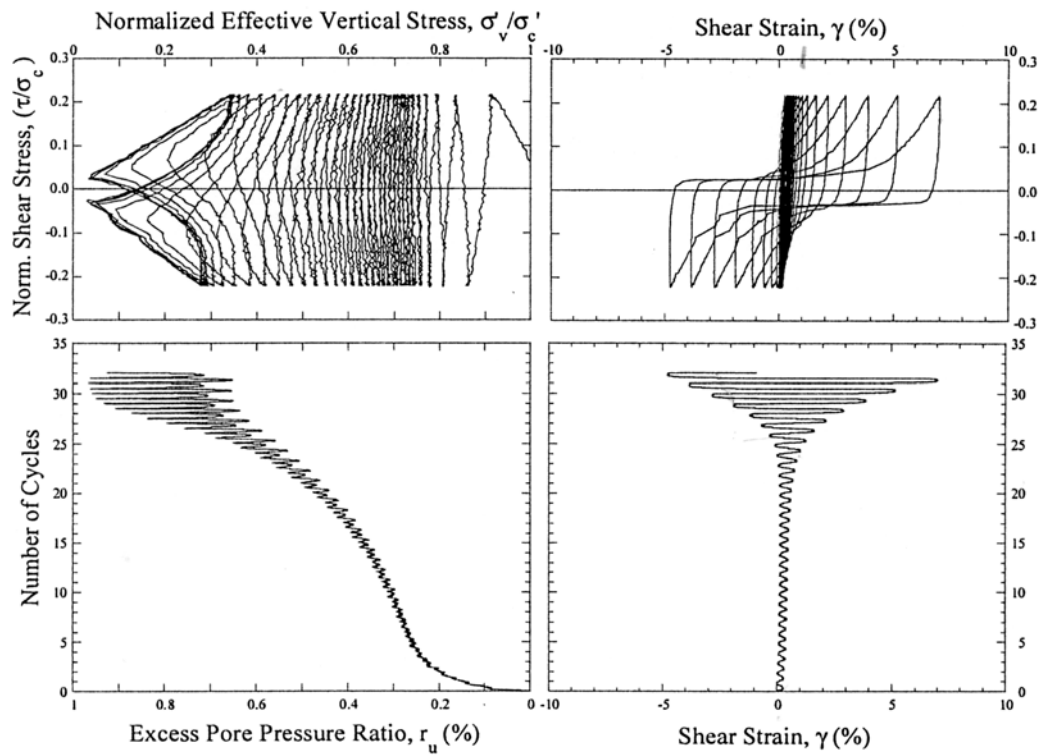
מעבדה אלו שימשו בעשורים האחרונים ללימוד אפקטיבי של נושא ההתנזלות בחול (Seed, 2003 ;Yasuhara, 2003 ; Frydman, 1980).

בדיקת גזירה מחזורית פשוטה (Simple shear) היא שיטה נוחה לקביעת מודול הגזירה ויחס הניחות של קרקעות. בדיקה זו מבוצעת על דגם קרקע הנתון בתא גזירה עליו מופעל מאמץ אפקטיבי אנכי קבוע $\bar{\sigma}_v$ ומאמץ גזירה מחזורי τ כמתואר בתרשים 2.15. באופן זה הדפנות מפעילות על הדגם עומס הנמדד באמצעות מדי עומס. דפורמציות בדגם נמדדות באמצעות מדי תזוזה. יתרונותיה של בדיקה זו טמונים בעובדה שהיא מדמה את תנאי השדה עבור דגם הקרקע. ניתן לבצע את הבדיקה בדגמים שעברו קונסולידציה למצב שבו היחס בין המאמץ האופקי והאנכי בקרקע (K_0) זהה לתנאי השדה. הבדיקה מאפשרת שליטה בתנאי השפה ולחץ המים וכן היא מבוצעת עבור אמפליטודת מעוותים רחבה יחסית לבדיקות אחרות. כבר ב Peacock and Seed 1968 ביצעו מחקר מעבדתי מקיף אודות התנזלות של חול Monterey באמצעות שימוש בציד לבדיקת גזירה מחזורית (Prakash, 1981). הם מצאו כי התנזלות מתרחשת בדגם כאשר לחץ מי הנקבים משתווה ללחץ המקיף ושהגברה של הלחץ המקיף מביאה להתנזלות במספר מחזורים גדול יותר. הגדלת מאמץ הגזירה המחזורי גורמת להתנזלות במספר קטן יותר של מחזורים.

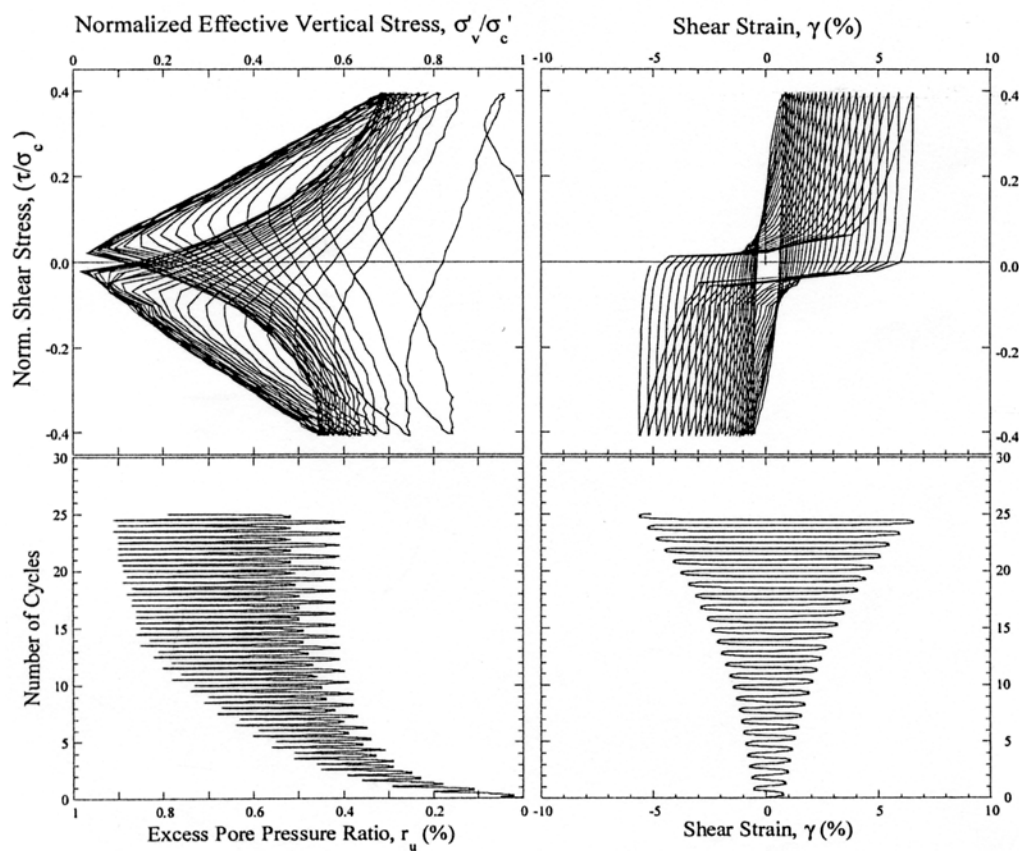


תרשים 2.15: דפורמציות של דגם קרקע בבדיקת גזירה מחזורית פשוטה (Das, 1993).

Seed et al., (2003) בדקו את השפעת תופעת ההתנזלות באמצעות מבחני גזירה מחזורית פשוטה על חולות Monterey עם ערכי צפיפות יחסית $D_r\%$ שונה. לטענתם מעוותים מחזוריים החלים בקרקע מושפעים ממגוון גדול של התנהגויות מכניות מורכבות. תוצאות המוצגות בתרשים 2.16 ממחישות את המאפיינים של בדיקות אלו. ערך המאמץ האנכי נשמר בזמן שמאמץ הגזירה המוכתב בבדיקה (בתרשים 2.16 מוצג כמאמץ גזירה מנורמל למאמץ אנכי קבוע τ/σ_c) משנה את כיוונו. מאמץ הגזירה שומר על ערך קבוע בעוד התנועה המחזורית גורמת להתפתחות מעוותי גזירה הגדלים לאחר 25 מחזורים. לחץ מי-נקבים גובר אף הוא עם העלייה במספר המחזורים במהלך הבדיקה.



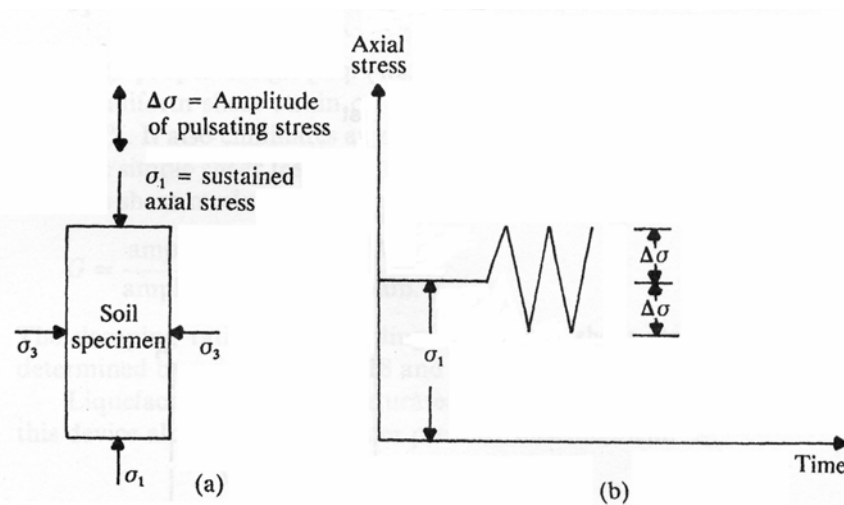
$D_r=50\%$, $\sigma_{v,i}'=85$ kPa, $CSR=0.22$, $\alpha=0$



$D_r=75\%$, $\sigma_{v,i}'=85$ kPa, $CSR=0.4$, $\alpha=0$

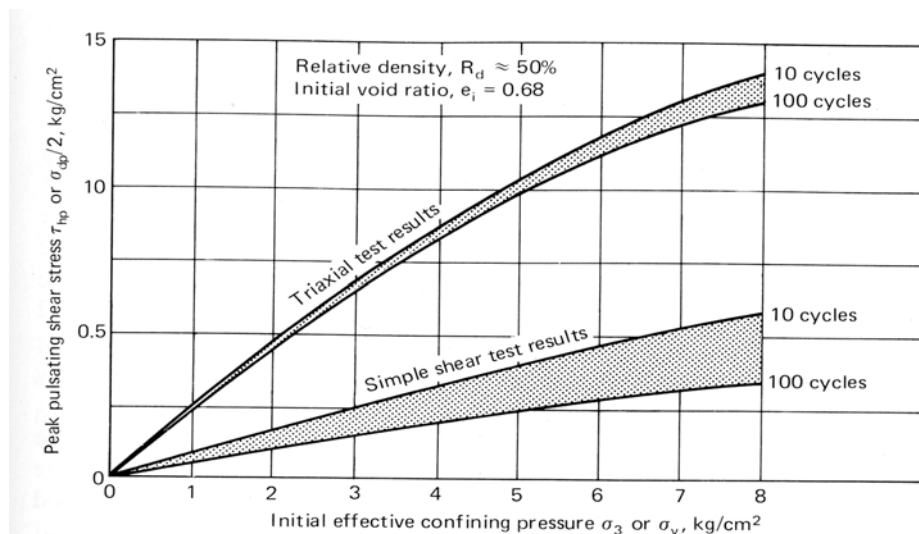
תרשים 2.16: תוצאות אופייניות לבדיקות גזירה מחזורית בחולות Monterey # 30 (Seed et al., 2003).

הבדיקה הטריאקסיאלית מאפשרת אף היא שליטה טובה במצב המאמצים, שינויי נפח של הדגם ולחץ מי נקבים. בבדיקה זו דגם קרקע גלילי ניצב בין אבנים נקבוביות ופני הגליל מכוסים במעטפת פלסטית דקה. לחץ הנוזל בתא מועלה בצורה מבוקרת עד להשגת תנאי הלחץ המקיף (σ_3) הרצוי על כל הדגם. לפי (Das, 1993), הדגם מועמס ראשית בעומס כליאה טוטאלי σ_3 (עבור בדיקה בלתי מנוקזת). בשלב הבא מופעל על הדגם מאמץ נורמלי קבוע σ_1 . לאחר מכן המאמץ הנורמלי משתנה על ידי העלאתו או הורדתו ב $\pm \Delta\sigma$. בכך למעשה מופעל על הדגם הפרש מאמצים $\Delta\sigma$ הפועל באופן מחזורי. הגברה והפחתה מונוטונית של הפרש המאמצים גורמת להתפתחות מאמץ גזירה מחזורי. תרשים 2.17a מראה דגם במצב התחלתי בבדיקה טריאקסיאלית כאשר σ_3 הוא הלחץ המקיף ו σ_1 הוא העומס הנורמלי. תרשים 2.17b ממחיש את הפרש המאמצים $\Delta\sigma$ המופעל באופן מחזורי.



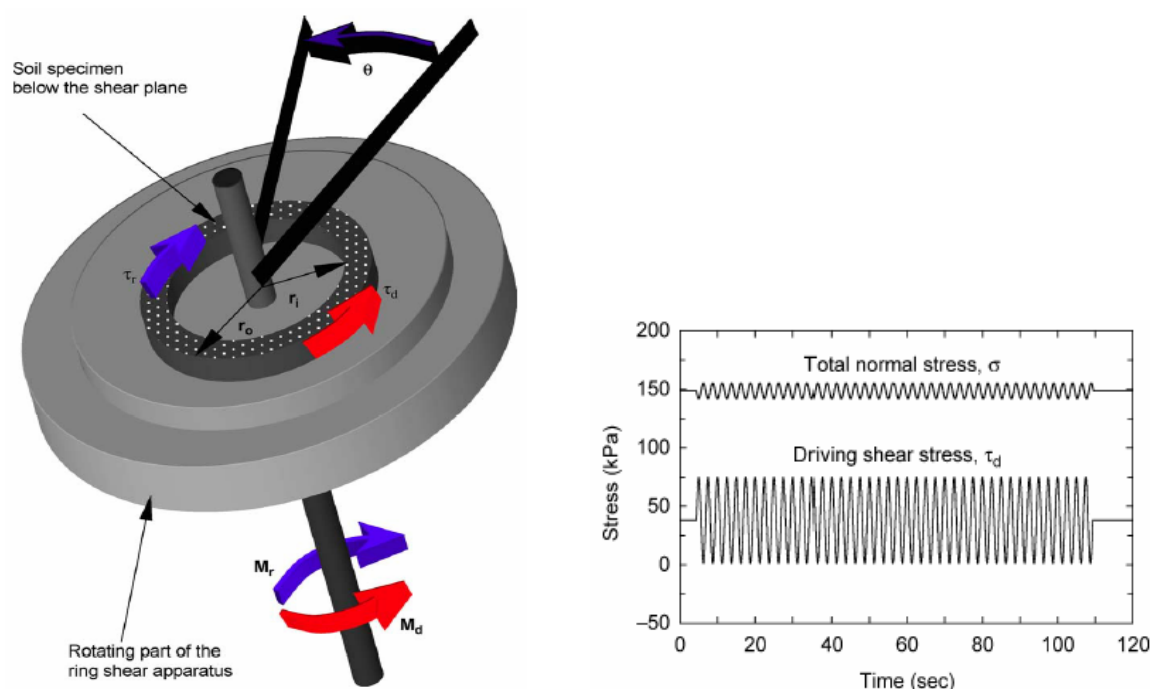
תרשים 2.17: (a) דגם קרקע ; (b) ומאמצי לחיצה מחזוריים בעת בדיקה טריאקסיאלית (Das, 1993).

יש לציין כי המאמץ המחזורי הדרוש על מנת לגרום להתנולות בתנאי גזירה מחזורית פשוטה נמוך מזה הדרוש בתנאי בדיקה מחזורית טריאקסיאלית, לעיתים עד כדי הבדל של 35% כפי שנמצא על ידי Peacock and Seed (1968) מהשוואה של תוצאות בדיקות שנערכו בשיטות אלה הנראית בתרשים 2.18.



תרשים 2.18: תוצאות בדיקת גזירה מחזורית ובדיקה טריאקסיאלית (Prakash, 1981).

שיטה חדישה יותר באמצעותה ניתן לבצע העמסה דינמית של קרקע היא גזירה טבעתית מחזורית (Cyclic Ring Shear Test). הבדיקה מבוססת על הנעה מחזורית של גלגל תנופה (תרשים 2.19a) ויצירת מאמצים נורמלים ומאמצי גזירה מחזוריים (תרשים 2.19b). גלגל התנופה מחובר לקופסת גזירה גלילית בה נתון דגם קרקע. מומנט מופעל באמצעות מערכת תמסורות לצורך הנעת הגלגל (M_d). ההתנגדות לגזירה של דגם הקרקע מבוטאת כמומנט התנגדות (M_r). תיאור רחב ומקיף של מערכת זו ניתן על ידי Sassa, 1997 ו Sassa et al., 2003.



תרשים 2.19: (a) תיאור כללי של גלגל תנופה המחובר לקופסת הגזירה התחתונה והמומנטים במערכת לגזירה מחזורית טבעתית; (b) התנהגות מאמץ אנכי ומאמץ גזירה כתלות בזמן במהלך בדיקת גזירה מחזורית טבעתית בלתי מנוקזת בתדירות של 0.4 Hz (Trafandir and Sassa, 2004).

בספרות מדווחות תוצאות של בדיקות מסוג זה מהשנים האחרונות. מבחני גזירה טבעתית מונוטונית ומחזורית שבוצעו בקרקעות בלתי קוהזיביות במצב רווי נערכו על ידי Sassa, 1996 ; Wang, 1998 ; Wang and Sassa, 2002 ; Wang et. al., 2000 ומחקרים ניסיוניים אלה הראו שקרקעות חול במצב רווי המפתחות דילטציה תחת גזירה טרם כשל עשויות להתנזל לאחר הגעה למצב כשל כאשר לחץ המים בקרקע מתפתח עם התקדמות חד כיוונית של תזוזת הגזירה. (Trafandir and Sassa (2004) העריכו בשיטה זו תגובת גזירה מחזורית של קרקע חול בתנאים בלתי מנוקזים. האפקט של מחזורי העמסה והרפיה מהירים, יחד עם הגברת לחץ המים בקרקע המתפתחים תחת תנאים דינמיים ומחזוריים מביאים להפחתה ביכולת ההתנגדות של הקרקע לגזירה לאחר כשל כפי שמראה תרשים 2.20. יש לשים לב לכך שבמערכת זו תזוזת הגזירה (S) מבוטאת כפונקציה של הזווית θ :

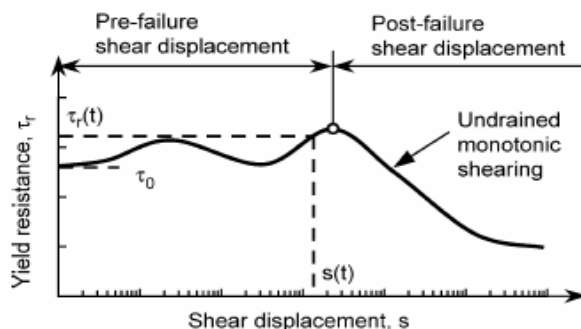
$$s = \frac{r_i + r_o}{2} \times \theta \quad [2.2]$$

כאשר,

θ - זווית הסיבוב של גלגל התנופה. (ראה תרשים 2.20)

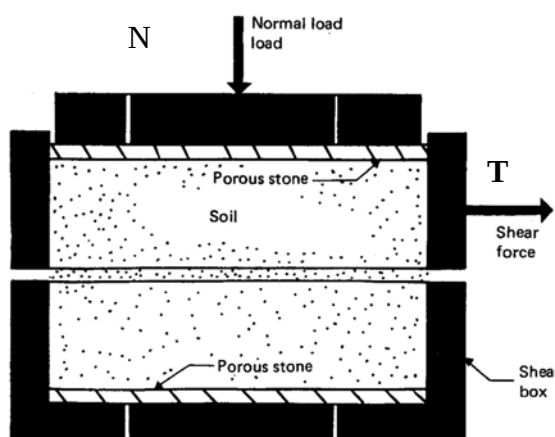
r_i – רדיוס פנימי.

r_0 – רדיוס חיצוני.



תרשים 2.20: דוגמה לתוצאת מבחן גזירה טבעית מונוטונית בתנאים בלתי מנוקזים (Trafandir and Sassa, 2004).

בדיקת גזירה ישירה מחזורית מונוטונית הינה הבדיקה הוותיקה והפשוטה ביותר בבדיקות של תכונות מכניות ודינמיות של קרקעות (Prakash, 1981) והיא מתבצעת באותו ציוד המשמש לבדיקת גזירה ישירה. בבדיקה זו דגם קרקע רציף ששטח החתך שלו A , נתון בצמד קופסאות גזירה המונחות זו על גבי זו כמוצג בתרשים 2.21. הבדיקה מבוססת על עקרון של הפעלת כוח אופקי T על קופסת הגזירה העליונה או התחתונה שגורם לתזוזתה ביחס לקופסת הגזירה האחרת. התזוזה היחסית גורמת להתפתחות מאמצי גזירה ($\tau = T/A$) על מישור אופקי בדגם ששטח החתך שלו הוא A . את הבדיקה מבצעים כאשר דגם הקרקע נמצא תחת מאמץ אנכי ($\sigma_n = N/A$) המועבר לדגם באמצעות כוח N . הגזירה המחזורית נוצרת כאשר מניעים בקצב קבוע ובכיוונים מנוגדים את קופסת הגזירה העליונה.



תרשים 2.21: הפעלת כוח אנכי N וכוח גזירה T על קופסאות הגזירה ומישור כשל אופקי בדגם (Das, 1983).

האינפורמציה הנרכשת בבדיקות אלה מושפעת מהבדלים הנובעים מאופן הביצוע והמכשור המאפיין כל בדיקה. בטבלה 2.3 קיימת השוואה בין השיטות השונות ותחום המעוותים הנמדד באותה שיטה למעט בבדיקת גזירה מחזורית ישירה.

<u>Test</u>	<u>Strain Range</u>	<u>Remarks</u>
Bender Elements	10 ⁻⁴ %	small strain only
Resonant Column	10 ⁻⁴ % to 10 ⁻² %	load at high frequency nonuniform shear strain
Cyclic Triaxial	10 ⁻² % to 1%	principal stress rotation σ_2 varies between σ_1 & σ_3 stress concentrations & necking isotropic initial stress state
Cyclic Simple Shear	10 ⁻² % to 5%	stress concentrations no τ on sides
Cyclic Torsional Shear	10 ⁻³ % to 20%	nonuniform shear strain

טבלה 2.3: תחום המעוות הנמדד בבדיקות דינמיות וסטטיות מחזוריות המבוצעות מעבדה.

2.4 תכונות דינמיות של קרקע.

באופן מעשי מתעוררות בעיות רבות הקשורות בהתנהגות הקרקע תחת עומס דינמי. שיקולים הנדסיים בעת תכנון וביצוע כוללים את חוזק הגזירה הדינמי של יסודות, תגובת יסודות להעמסה מחזורית, אינטראקציית קרקע מבנה ויציבות מדרונות בזמן רעידת אדמה (Das, 1993). אלה מחייבים הכרת התכונות הדינמיות של הקרקע באמצעות בדיקות שדה, בדיקות מעבדה וקורלציות אמפיריות שנקבעות על סמך בדיקות אלו. מספר תכונות מאפיינות את התנהגות הקרקע תחת העמסה מחזורית:

- התנהגות מחזורית.
 - יחס מאמץ – מעוות לא ליניארי.
 - הקשיית מעוותים (strain hardening) בבדיקה מנוקזת.
 - דגרדציה מחזורית (cyclic degradation) בהעמסה בלתי מנוקזת.
- פרמטרים חשובים המשפיעים על התכונות הדינמיות וההתנהגות הדינמית של הקרקע הם מודול גזירה דינמי, מקדם הריסון וחוזק גזירה דינמי.

מודול גזירה דינמי - G_d (Dynamic Shear Modulus) מהווה אינדיקציה לקשיחות הקרקע בזמן הרעדה ומחושב מתוך מהירות גלי הגזירה בחומר. מדידת מהירויות גלי גזירה אפשרית במעבדה או בשדה בשיטות דינמיות שונות כמתואר בסעיף 2.3.1. חישוב מודול גזירה דינמי על סמך מהירויות גלי גזירה בקרקע ובדיקות שדה דינמיות בהן נעשה שימוש במחקר זה בוצעו בשיטות Down-hole / Cross-hole ומתוארות בהרחבה בסעיף 3.1.4 בפרק שיטות מחקר.

ניתן לקבוע מודול גזירה של חומר באמצעות בדיקות גזירה במעבדה והוא נקבע כיחס בין מאמץ הגזירה למעוות הגזירה:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad [2.3]$$

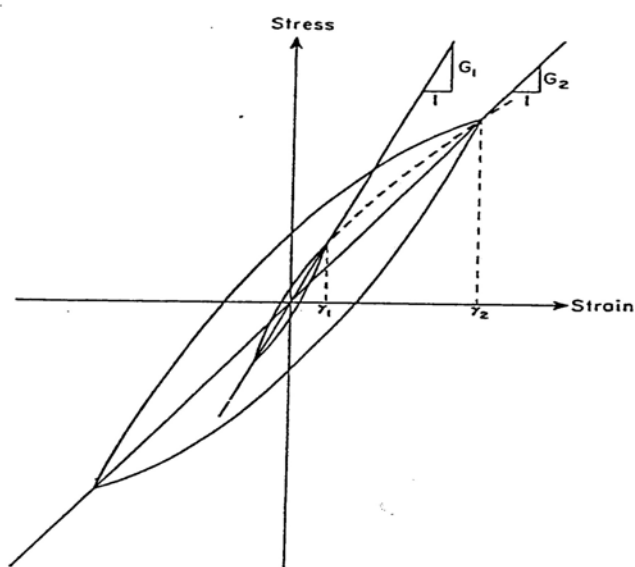
כאשר,

G_d – מודול גזירה.

τ_c – אמפליטודת מאמץ הגזירה המחזורי.

γ_c – אמפליטודת מעוות הגזירה.

מבחינים בין מודול גזירה מכסימלי G_{max} המתקבל בעת התפתחות מעוותי גזירה קטנים לבין מודול גזירה אקוויולנטי G_{eq} המבטא קירוב אקוויולנטי לינארי ליחס בין מאמץ הגזירה למעוות הגזירה תחת עומס מחזורי או דינמי. השינוי במודול הגזירה מ G_{max} ל G_{eq} עם התפתחות מעוות הגזירה מציג התנהגות לא לינארית של העקום בעת מחזור ההעמסה הראשוני (תרשימים 2.22 - 2.23). היחס בין מודול הגזירה המכסימלי למודול הגזירה האקוויולנטי ילך לפיכך וידעך עם התקדמות (במספר) מחזורי הגזירה (תרשים 2.23).



תרשים 2.22: יחס מאמץ – מעוות באמפליטודות מעוות שונות (Seed and Idris, 1970).

מקדם הריסון של החומר (Material Damping Ratio) מהווה אינדיקציה לדעיכת האנרגיה בקרקע בזמן הרעדה ומבוטא באמצעות :

$$\lambda = \frac{1}{2\pi} \times \frac{\Delta E}{G \gamma_c^2} \quad [2.4]$$

כאשר,

λ – מקדם הריסון של החומר.

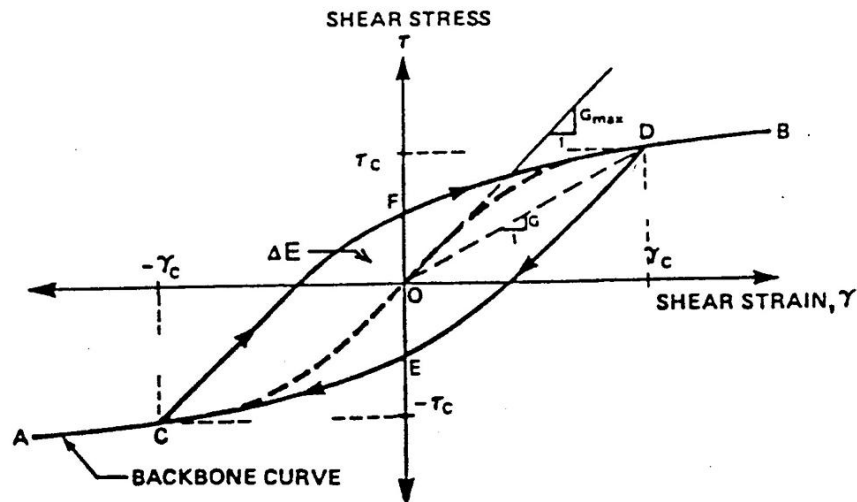
G – מודול גזירה דינמי.

γ_c – אמפליטודת מעוות הגזירה.

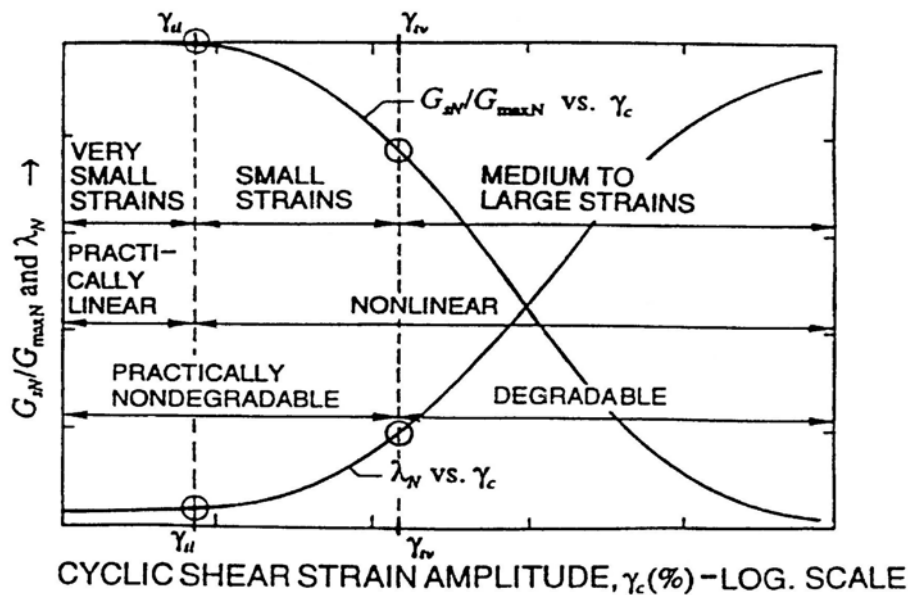
ΔE – האזור התחום על ידי עקומה היסטרטית סגורה במרחב מאמץ גזירה – מעוות גזירה.

תיאור של עקומה היסטרטית המאפיינת התנהגות מחזורית של עקומת מאמץ – מעוות ניתנת בתרשים 2.23. התלות של מודול הגזירה (G) ומקדם הריסון (λ) במידת מעוות הגזירה (γ) מוצגת

בתרשים 2.24. מאפייני הדפורמציה של קרקעות הם לא לינאריים ומודול הגזירה ומקדם הריסון משתנים בצורה משמעותית עם השינוי באמפליטודה של מעוות הגזירה תחת העמסה מחזורית (Wang and Kuwano, 1999). בניתוח התגובה הדינמית של קרקע נעשה שימוש נרחב במודל אקווילנטי לינארי כגון זה של Kelvin – Voigt (Bardet et al., 2000) כאשר מודול הגזירה ומקדם הריסון התלויים במידת המעוות מייצגים את מאפייני המעוותים הבלתי לינאריים של הקרקע.



תרשים 2.23: דיאגרמת מאמץ – מעוות בעת העמסה מחזורית (Vucetic and Dobry, 1991).



תרשים 2.24: התנהגות עקומת מודול גזירה ועקומת ריסון בהשפעת אמפליטודת מעוות משתנה עבור קרקעות במצב רווי (Vucetic, 1994).

מודול הגזירה ומקדם הריסון מושפעים ממספר פרמטרים הנגזרים מתכונות הקרקע והעומסים הפועלים עליה. לפי Seed and Idriss (1970) הגורמים האפקטיביים הם:

- (1) זווית החיכוך הפנימית של הקרקע (ϕ'); (2) מאמץ אפקטיבי אנכי הפועל על הקרקע (σ'_v);
- (3) מנת החללים הראשונית של הקרקע (e_0) וכן (4) מקדם לחץ העפר במנוחה (K_0) הנתון על ידי היחס:

$$K_o = \frac{\sigma'_o}{\sigma'_v} \quad [2.5]$$

כאשר,

σ'_v – מאמץ אפקטיבי אנכי בקרקע.

σ'_o – מאמץ אפקטיבי אופקי בקרקע.

תרשימים 2.25 ו- 2.26 מתארים כיצד פרמטרים אלו משפיעים על התנהגות מודול הגזירה המנומל (Secant modulus) ומקדם הריסון. בתרשים 2.25 K_2 (ציר Y) מבטא את היחס בין מודול הגזירה האקוויולנטי למודול הגזירה המכסימלי $G/G_{\max}$ באחוזים. משוואות ההתאמה שפותחו מאוחר יותר על ידי Hardin and Drnevich (1972) ו Hardin (1978) מתייחסות אף הן לפרמטרים אלה. עבור מודול גזירה ניתנו המשוואות:

$$G = \frac{G_{\max}}{1 + \gamma/\gamma_r} \quad [2.6]$$

$$G_{\max} = \frac{625}{(0.3 + 0.7e_0^2)} \times (P_a \sigma'_m)^{0.5} \times OCR^k \quad [2.7]$$

כאשר $G_{\max}$ תלוי בלחץ האטמוספרי (P_a) השווה ל 2116.2 psf ויחס טרום הדחיסה (OCR). ערכו של k תלוי באינדקס הפלסטיות (PI) של הקרקע ונתון לפי:

$$k \approx \frac{PI^{0.72}}{50} \leq 0.5 \quad [2.8]$$

היחס בין מאמץ הגזירה המכסימלי ומודול הגזירה המכסימלי נתון לפי

$$\gamma_r = \frac{\tau_{\max}}{G_{\max}} \quad [2.9]$$

וערכו של חוזק הגזירה המכסימלי נתון בביטוי:

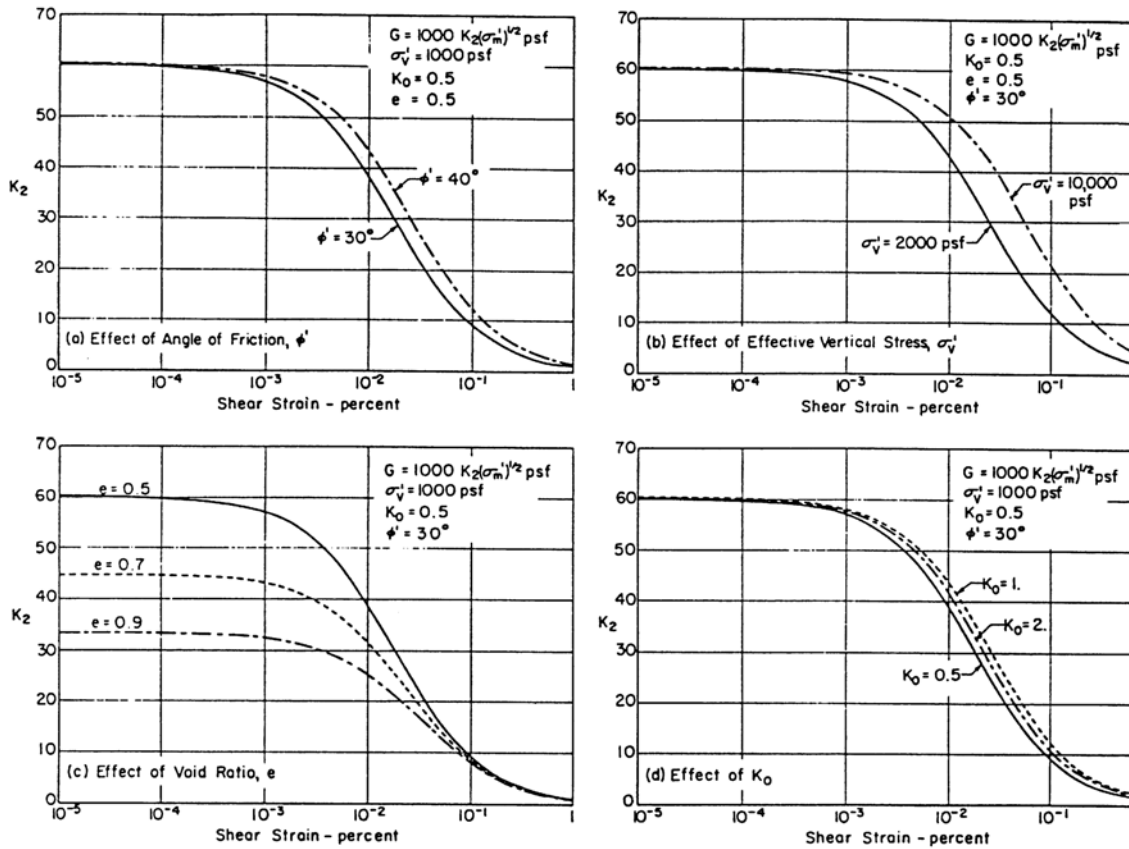
$$\tau_{\max} = \left[\left(\frac{1+K_0}{2} \sigma'_v \sin \phi' + c' \cos \phi' \right)^2 - \left(\frac{1-K_0}{2} \sigma'_v \right)^2 \right]^{0.5} \quad [2.10]$$

כאשר,

K_0 – מקדם לחץ עפר במנוחה.

σ'_v – מאמץ אפקטיבי אנכי.

c' – קוהזיה ו ϕ' – זווית חיכוך פנימית.



תרשים 2.25: השפעת פרמטרים שונים על מודול הגזירה של חול (Seed and Idriss, 1970).

עבור מקדם הריסון λ מקובל להתייחס לפרמטר נוסף והוא אפקט הרוויה .

(Hardin and Drnevich (1972) הציעו את הקשר :

$$\lambda = \frac{\lambda_{\max} \frac{\gamma}{\gamma_r}}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad [2.11]$$

כאשר,

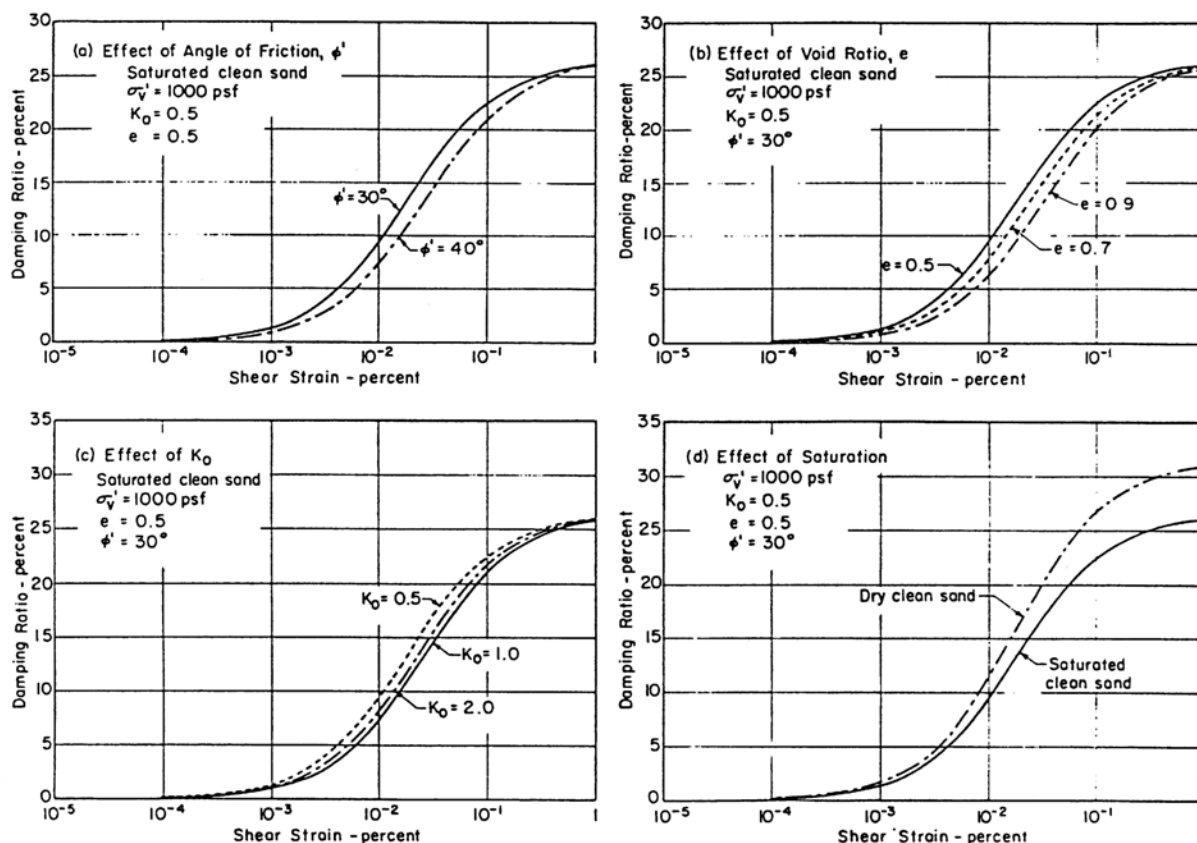
$\lambda_{\max}$ – מקדם ריסון מקסימלי עבור מעוותים גדולים.

עבור חול נקי במצב יבש : $\lambda_{\max} = 33 - 1.5 \log N$

עבור חול נקי במצב רווי : $\lambda_{\max} = 28 - 1.5 \log N$

כאשר,

N – מספר מחזורים.



תרשים 2.26: השפעת פרמטרים שונים על מקדם הריסון עבור חול (Seed and Idriss, 1970).

(Dobry and Vucetic, 1987), אפיינו מספר פרמטרים נוספים העשויים להשפיע על השתנות של מודול הגזירה המכסימלי (G_{max}), מודול גזירה אקוויוולנטי מנורמל למכסימלי (G/G_{max}) ומקדם הריסון (λ) עבור קרקעות חרסיות או סילט בעל פלסטיות גבוהה כמתואר בטבלה 2.4. לפי Hardin and Black (1968) הפרמטרים G ו λ תלויים בסוג הקרקע, מגניטודת המאמץ הדינמי, גודל המעוות הדינמי, התדירות ומספר המחזורים של העומס הדינמי.

מספר גדול של עבודות מחקר בנושא התנהגות תלוית מעוות של קרקעות קיימות בספרות ביניהן מחקרים שנערכו בחול (Iwasaki et al., 1978; Kokusho, 1980), חרסיות (Anderson and Richat, 1982; Kokusho et al., 1976) ואף בקרקעות גסות גרגר (Studer et al., 1980; Tanaka et al., 1987). עבודתו של Ishihara (1996) מסכמת עבודות אלו. Wang and Kuwano (1999) הציעו מודל עבור הקשר בין מעוות למודול גזירה ומקדם ריסון בקרקעות עם תכולת דקים משתנה.

חוזק גזירה דינמי שונה מחוזק גזירה סטטי ומאפייני התנהגות החומר מושפעים מתכונותיו ומתנאי העמסה סטטיים או מחזוריים (Boulon et al., 2003). העמסה מהירה של הקרקע גורמת לשני אפקטים עיקריים שהם ניקוז (בעיית ההתנזלות) ותגובה תלוית קצב של הקרקע. אפקטים אלה והשפעתם על חוזק הגזירה מתוארים בסעיף 2.3. בנוסף לכך העמסה מחזורית מאופיינת בדגרדציה מחזורית ובנייה מחזורית של לחץ מי – נקבים. השפעת יחס טרום הדחיסה (OCR) על דגרדציית חוזק הגזירה הדינמי של סילט עם פלסטיות נמוכה נבחנה בהרחבה בעבודתם של Yashuhara et al. (2003).

Increasing factor (1)	G_{max} (2)	G/G_{max} (3)	λ (4)
Confining pressure, $\bar{\sigma}_0$ (or $\bar{\sigma}_v$)	Increases with $\bar{\sigma}_0$	Stays constant or increases with $\bar{\sigma}_0$	Stays constant or decreases with $\bar{\sigma}_0$
Void ratio, e	Decreases with e	Increases with e	Decreases with e
Geologic age, t_g	Increases with t_g	May increase with t_g	Decreases with t_g
Cementation, c	Increases with c	May increase with c	May decrease with c
Overconsolidation, OCR	Increases with OCR	Not affected	Not affected
Plasticity index, PI	Increases with PI if OCR > 1; Stays about constant if OCR = 1	Increases with PI	Decreases with PI
Cyclic strain, γ_c	—	Decreases with γ_c	Increases with γ_c
Strain rate, $\dot{\gamma}$ (frequency of cyclic loading)	Increases with $\dot{\gamma}$	G increases with $\dot{\gamma}$; G/G_{max} probably not affected if G and G_{max} are measured at same $\dot{\gamma}$	Stays constant or may increase with $\dot{\gamma}$
Number of loading cycles, N	Decreases after N cycles of large γ_c but recovers later with time	Decreases after N cycles of large γ_c (G_{max} measured before N cycles)	Not significant for moderate γ_c and N

טבלה 2.4: הגברת פקטורים שונים והשפעתם על התכונות הדינמיות של קרקעות חרסיות עם OCR > 1 (Dobry and Vucetic, 1987).

2.4.1 קורלציות אמפיריות.

קורלציות אמפיריות הקושרות בין מודול הגזירה הדינמי לבין ערכי בדיקת החדרה סטנדרטית המשמשים לתכנון יסודות בקרקע ניתנו על ידי מספר חוקרים: לפי Das, (1993) קורלציות אלו הותאמו עבור חול, חרסיות וקרקעות גסות גרגר (Gravel). משוואות התאמה עבור קרקעות בלתי קוהזיביות ניתנו על ידי Seed (1986):

$$G_{max} \approx 35 \times 1000 N_{60}^{0.34} (\sigma_v)^{0.4} \quad [2.12]$$

כאשר,

σ_v – מאמץ אפקטיבי אנכי (lb/ft^2).

N_{60} – מספר הקשות בבדיקת SPT עבור פטיש בעל יעילות של 60%.

ו- Seed et al., (1984):

$$(K_2)_{max} \cong 20(N_1)_{60}^{1/3} \quad [2.13]$$

כאשר,

N_1 – מספר הקשות מתוקן ללחץ השכבות.

K_2 – היחס G/G_{max} .

G ביחידות lb/ft^2

לפי Imai and Tonouchi (1982):

$$G_{max} \approx 325 N_{60}^{0.68} \quad [2.14]$$

כאשר,

N_{60} – מספר הקשות עבור פטיש עם יעילות 60% .

G_{max} – מודול גזירה מכסימלי ביחידות ksf.

עבור קורלציות בין מהירות גלי גזירה V_s וערכי SPT Imai and Tonouchi (1982) הציעו את הקשר הבא:

$$V_s = 350 N_{60}^{0.314} \quad [2.15]$$

ובאופן דומה Sykora and Stokoe (1983) הציעו,

$$V_s = 350 N_{60}^{0.27} \quad [2.16]$$

כאשר,

N_{60} – מספר הקשות עבור פטיש עם יעילות 60% .

V_s - מהירות גלי גזירה ביחידות fps .

קורלציות נוספות הקושרות בין מודול הגזירה המכסימלי ויחס טרום הדחיסה OCR ניתנו על ידי Hardin and Drenvich (1972) (ראה משוואה 2.7) ו-Jamiolkowski (1991) :

$$G_{max} = \frac{625}{e_0^{1.3}} \times (P_a \sigma'_m)^{0.5} \times OCR^k \quad [2.17]$$

כאשר,

Pa – לחץ אטמוספרי.

k – קבוע התלוי באינדקס הפלסטיות של הקרקע.

פרק 3 – שיטות מחקר.

3.1 עבודת שדה ובדיקות in situ באתר המחקר.

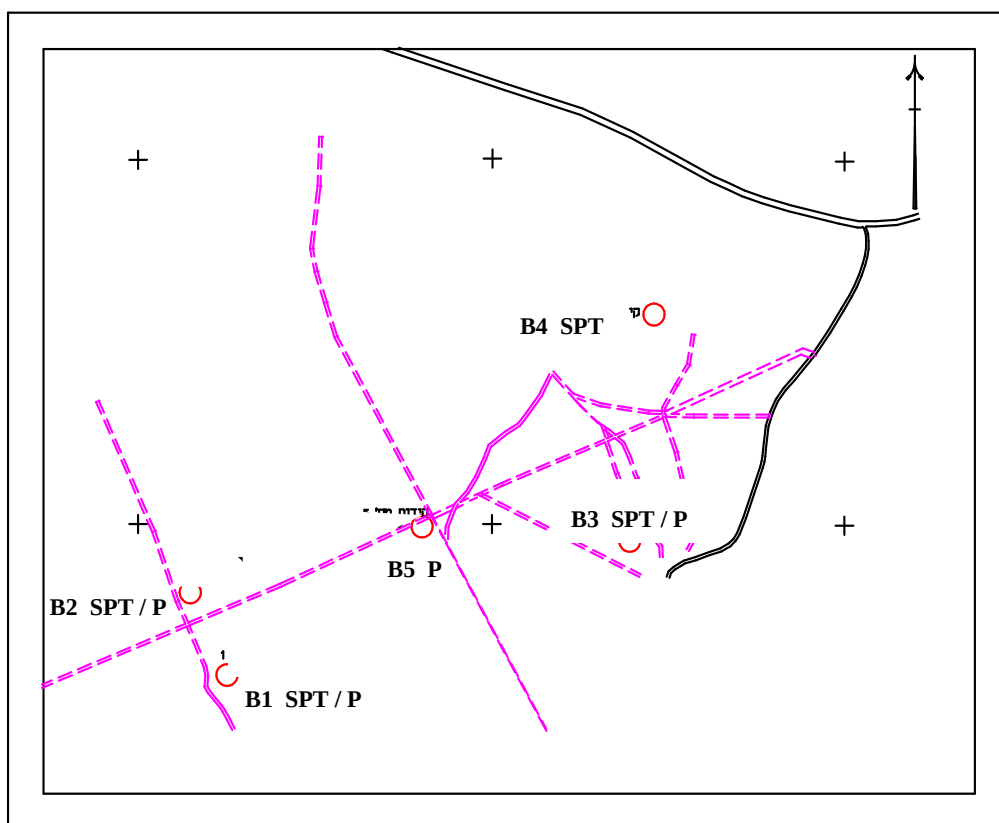
3.1.1 קידוחים בקרקע.

בשטח המחקר נקדחו חמישה קידוחים לעומק של 20 מטר על ידי "י.סלומון – עבודות קידוח". הקידוחים נערכו במטרה לקבל אינפורמציה ראשונית על תת- הקרקע באתר ובמקביל לבצע בדיקות החדרה סטנדרטית ופרסיומטר. הקידוחים נערכו באותה שיטה ובמרחק של עשרות עד מאות מטרים זה מזה, תוך ימים ספורים כך שתנאי הקרקע היו דומים. החומר שהוצא מהקידוחים נדגם בכל מטר והובא למעבדה שבאוניברסיטת בן גוריון בנגב למטרות מיון ועריכת בדיקות לקביעת מאפייני הקרקע וסוגה.



תמונה 3.1 : בדיקות שדה בשטח המחקר- בחזית קידוח מכין לבדיקת SPT ומאחור בדיקת פרסיומטר.

קביעת מיקומם המדויק של הקידוחים 1-5 נעשה באמצעות מכשיר GPS. נקודות אלו הוזנו למערכת קואורדינטות ארצית והותאמו למפת ישראל החדשה. את פריסת הקידוחים בשטח המחקר ניתן לראות בתרשים 3.1 :



תרשים 3.1: פיזור מרחבי יחסי של הקידוחים ובדיקות SPT ופרסיומטר P בהתאמה (ללא קנ"מ).

3.1.2 בדיקות החדרה תקנית - SPT.

Standard Penetration Test (SPT) הינה בדיקת שדה שכיחה מאד לצרכים גיאוטכניים - הנדסיים

ונמצאת בשימוש נרחב בעולם משנת 1958 אז הוכנסה לתקן ASTM.

תוצאת הבדיקה (N) מהווה אינדקס להתנהגות הקרקע באמצעותו ניתן להעריך את קשיחות הקרקע וחוזקה. עבור קרקע קוהזיבית ניתן לקבל קורלציה לערכים של חוזק הגזירה של הקרקע. עבור קרקע חולית וואו סילטית (silt) המבחן מאפשר לבצע הערכה של פוטנציאל התנזלות הקרקע על סמך קורלציות קיימות.

החיסרון העיקרי של בדיקה זו בא לידי ביטוי בתלות של התוצאה במספר גורמים הקשורים בשיטת הבדיקה. עם זאת לבדיקה זו מספר יתרונות על פני בדיקות אחרות הנערכות בשדה:

- דגימה של הקרקע הנבדקת נותרת בסוף הבדיקה ומאפשרת סיווג מדויק של הקרקע.
- הבדיקה מהירה וזולה משום שהיא מתבצעת תוך כדי התקדמות הקידוח.
- הציוד לביצוע הבדיקה נמצא על מכונת הקידוח והיא יכולה להתבצע בזמן הקידוח.

בשטח המחקר נעשו ארבע בדיקות החדרה תקנית בקידוחים 1, 2, 3 ו 4 בכל 2 מטר לעומק בור הקידוח. על פי תקן ASTM D-1586 כף דגימה בצורת גליל מתכתי חצוי ל 2 (split spoon sampler) מוחדרת לקרקע באמצעות פטיש בעל מסה אחידה של 63.5 kg. הפטיש מופל נפילה חופשית גובה קבוע של 0.76 m עד לפגיעה בכף. על הצד החיצוני של הכף מסמנים שלושה קווים במרווח קבוע של 15cm זה מזה. את כף הדגימה מניחים בקרקעית בור הקידוח ומבצעים שלושה מחזורי החדרה. בכל מחזור נמדד אורך

החדרה של 15 cm. מספר המכות N הדרושות על מנת לחדור את שני מחזורי ההחדרה האחרונים (30 cm) משמש כתוצאת הבדיקה.



תמונה 3.2 : גליל קרקע בכף הדגימה לאחר בדיקת החדרה סטנדרטית .

קיימים מספר גורמים המשפיעים על איכות התוצאה של בדיקת SPT. בכל בדיקה מרחשים אובדני אנרגיה הנובעים מסוג הפטיש וכף הדגימה, תדירות נפילת הפטיש, אורך מוטות הקידוח ותכונותיהם הדינמיות. בנוסף קיימים פרמטרים חיצוניים הקשורים לקרקע הנבדקת כגון לחץ שכבות הקרקע מסביב לבור הקידוח, קוטר הקידוח ואיכותו המשפיעים על מאזני אנרגיה במערכת. אנרגיית ההחדרה המועברת בפועל מהפטיש אל כף הדגימה איננה שווה בערכה לאנרגיית הנפילה החופשית של הפטיש אותה ניתן לבטא באמצעות:

$$E = W \times h = 63.5 \times 9.8 \times 0.76 = 473J \quad [3.1]$$

כאשר,

E-אנרגיית הנפילה.

W – משקל הפטיש.

h – גובה הנפילה

לפי Kovacs and Salomone, 1982 אנרגיית ההחדרה נעה בטווח שבין 30%-80% ולפי Riggs et al., 1983 טווח זה משתנה בין 70%-100%. Bowles (1996) מציע לנרמל את אנרגיית ההחדרה לפי היחס הבא:

$$E_r = \frac{E_a}{E_{in}} \times 100 \quad [3.2]$$

כאשר,

Er –אנרגיה אפקטיבית של הפטיש.

E_a -האנרגיה המועברת בפועל מהפטיש לכף הדגימה.

E_{in} - אנרגיית הנפילה התיאורטית.

שני סוגי פטישים נמצאים בשימוש נפוץ בעולם לצורך בדיקות SPT. הראשון מוכר כ Safety hammer והאנרגיה האפקטיבית המנוצלת בו עומדת על 60 % מערך אנרגיית הנפילה התיאורטית. הפטיש בו נעשה שימוש בבדיקות הקרקע באתר המחקר הוא מסוג Donut hammer עם ערך E_r של 45% בלבד. פרמטרים של הקרקע הנקבעים בבדיקות SPT עוברים התאמה לאנרגיה אפקטיבית של 60%.

נרמול התוצאות.

תוצאות הבדיקה מושפעות מלחץ שכבות הקרקע הנמצאות מעליה. עבור אותה קרקע ההתנגדות לחדירה תהיה גבוהה יותר בעומק מאשר בסמוך לפני הקרקע. את מספר ההקשות שנמדדו בבדיקה בשדה (N_{field}) מתקנים ביחס ללחץ השכבות באמצעות פקטור תיקון C_N . לפי McCarthy 1993:

$$C_N = \frac{1}{\sqrt{\sigma'_v}} \quad [3.3]$$

כאשר,

σ'_v - מאמץ אנכי אפקטיבי בעומק הבדיקה.

לפי Liao and Withman, 1986

$$C_N = \sqrt{\frac{95.76}{p_o}} \quad [3.4]$$

כאשר,

p_o - מאמץ אנכי אפקטיבי (kPa) בעומק הבדיקה.

ולפי Skempton, 1986

$$C_N = \sqrt{\frac{100}{\sigma'_z}} \quad [3.5]$$

כאשר,

σ'_z - מאמץ אנכי אפקטיבי (kPa) בעומק הבדיקה.

ומספר ההקשות לאחר תיקון הוא:

$$N_{corrected} = C_N \times N_{field} \quad [3.6]$$

את האנרגיה האפקטיבית E_r מנרמלים ליחס אנרגיה סטנדרטי E_{rb} על מנת ליצור בסיס משותף למערכות בעלות אנרגיה אפקטיבית שונה. באופן כזה ניתן לקבל מספר הקשות N (מחושב) זהה עבור פטישים עם אנרגיה אפקטיבית שונה. לפי Bowles (1996) בספרות מופיעים מספר ערכים של E_{rb} והם

נעים בטווח שבין 50-55 (Schmertmann, 1983), 60 (Skempton, 1986) ו 70-80 (Riggs, 1986). תיקון זה של מספר הקשות עבור יחס אנרגיה סטנדרטי של $E_{rb} = 60$, מחושב לפי:

$$N'_{60} = C_N \times N \times \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \eta_4 \quad [3.7]$$

כאשר,

N'_{60} – מספר הקשות מנורמל ומותאם לערך אנרגיה סטנדרטית (במקרה זה 60).

N – מספר הקשות בשדה.

C_N – מקדם תיקון ללחץ השכבות לפי [3.4].

η_1 – מקדם התאמה ליחס E_r/E_{rb} .

η_2 – מקדם התאמה לאורך המוטות לפי הערכים הבאים:

אורך המוטות (מ')	$10 <$	6 - 10	4 - 6	0 - 4
ערך η_2	1.00	0.95	0.85	0.75

η_3 – מקדם התאמה לכף הדגימה.

η_4 – מקדם התאמה לקוטר בור הקידוח.

הערכים המשמשים לנרמול תוצאות בדיקות ה SPT במחקר זה נבחרו בהתאם ל Bowles, 1996:

$$E_r / E_{rb} = 0.45 / 0.6 = 0.75 \quad \eta_1 -$$

η_2 - בהתאם לאורך מוטות ההארכה לפי עומק הדגימה בבור הקידוח.

η_3 - 1.00 עבור כף הדגימה (Without liner).

η_4 - 1.00 עבור בור קידוח בקוטר שבין 60-120 מ"מ.

קורלציות.

קיימות קורלציות רבות הקושרות בין תוצאת הבדיקה (ערך N) לפרמטרים הנדסיים ומכניים של הקרקע כגון משקל מרחבי (γ), צפיפות יחסית (D_r), זווית חיכוך פנימית של הקרקע (ϕ) וחוזק לחיצה q_u . קורלציות אלה הותאמו באופן אמפירי אך בחלקן אינן מדויקות בשל אמינות הנתונים ואיכות התוצאות לפני ואחרי תיקון. לפי Yoshida, 1988 הקשר בין הצפיפות היחסית לערך N_{60} :

$$D_r = 25(p_o')^{-0.12} \times (N_{60})^{0.46} \quad [3.8]$$

כאשר,

P_o' – מאמץ אנכי אפקטיבי (kPa) בעומק הבדיקה.

צפיפות יחסית לפי Kulhawy and Mayne, 1990 :

$$D_r = \sqrt{\frac{(N_1)_{60}}{C_P C_A C_{OCR}}} \quad [3.9]$$

$$C_P = 60 + 25 \log D_{50} \quad [3.10]$$

$$C_A = 1.2 + 0.05 \log \left(\frac{t}{100} \right) \quad [3.11]$$

$$C_{OCR} = OCR^{0.18} \quad [3.12]$$

כאשר,

$(N_1)_{60}$ - ערך SPT מתוקן ללחץ השכבות ומהלך הבדיקה.

C_P - מקדם תיקון לגודל גרגר.

C_A - מקדם תיקון לצמנטציה.

C_{OCR} - מקדם תיקון ליחס טרום הדחיסה.

D_{50} - גודל הגרגר בו 50 אחוז מהקרקע דקה יותר.

t - גיל הקרקע כאשר ערך מקובל הוא 1000 שנים.

OCR - יחס טרום דחיסה.

לפי Meyerhof, 1959 זווית החיכוך הפנימית (ϕ) מוערכת כ:

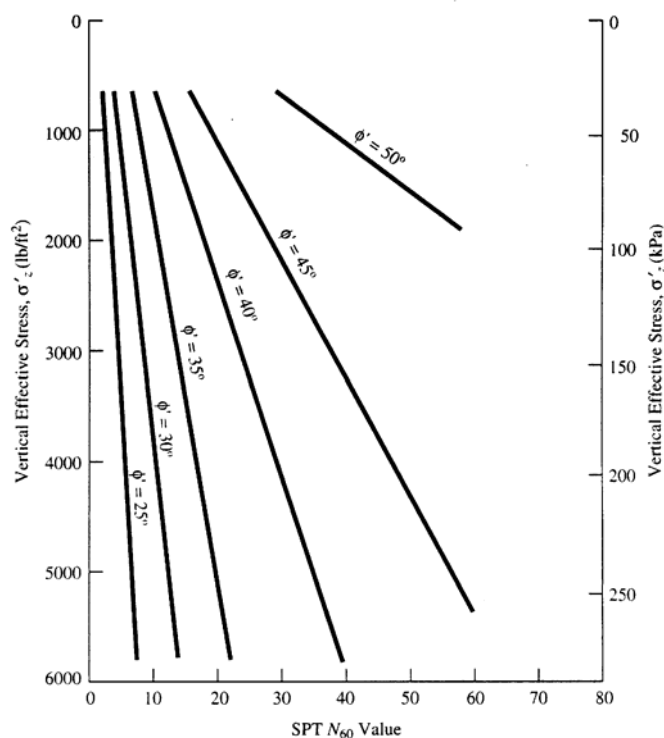
$$\phi = 28 + 0.15 D_r \quad [3.13]$$

כאשר,

D_r צפיפות יחסית באחוזים.

DeMello, 1971 הציע קורלציה בין תוצאות מנורמלות של בדיקת החדרה סטנדרטית וזווית

חיכוך אפקטיבית (ϕ') עבור חולות בלתי מלוכדים בעומקים העולים על שני מטר :

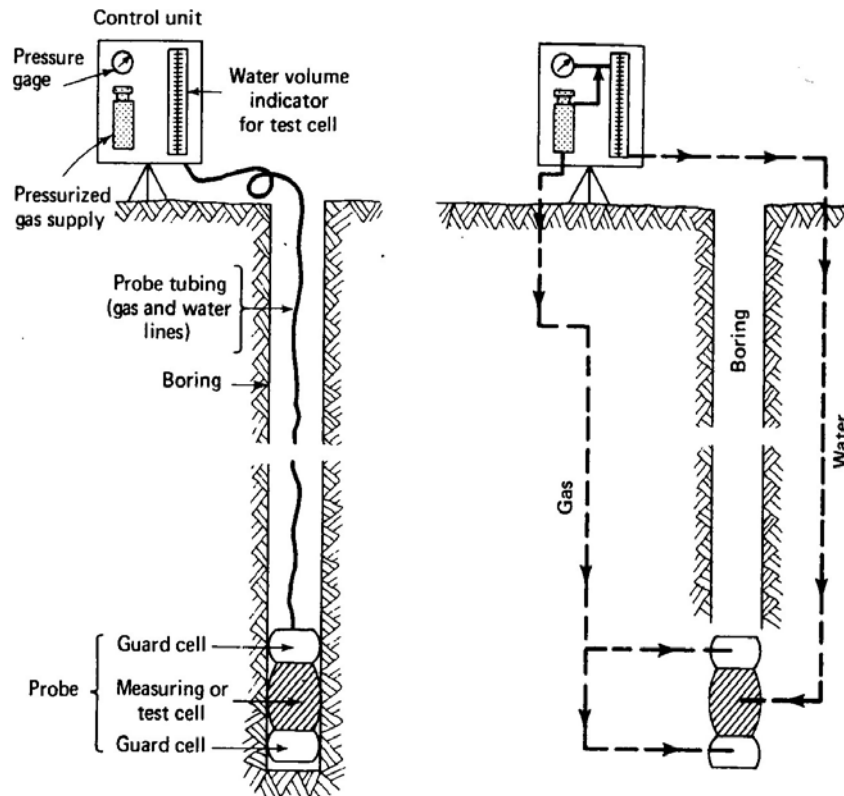


תרשים 3.2: קורלציה אמפירית בין N_{60} ו- ϕ' בחולות בלתי מלוכדים (De Mello, 1971).

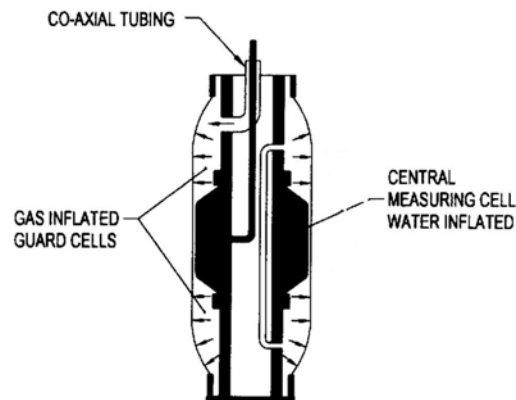
3.1.3 בדיקות פרסיומטר - PMT.

בדיקת פרסיומטר (Borhole Pressuremeter Test) – PMT מספקת אינפורמציה על הפרמטרים האלסטיים של הקרקע in-situ. הבדיקה פותחה על ידי Mennard ב-1956 וכיום מבוצעת בהתאם לתקן ASTM D - 4719. בשטח המחקר נערכו 25 בדיקות PMT (כולן במכשיר מסוג Mennard) על ידי המבדקה לבניין ותשתית של הטכניון. בקידוח מס' 2 בוצעו 5 מדידות ובקידוחים 3 ו-5 בוצעו 10 מדידות בכל קידוח.

הפרסיומטר פועל על העיקרון של התפשטות לטרלית של תאי לחץ גליליים המנופחים בלחץ גז בתוך הקרקע. המערכת מורכבת משלושה חלקים (תרשים 3.3) וכוללת את יחידת ההפעלה – באמצעותה שולטים בניסוי ומקבלים את הנתונים, את מכשיר המדידה (Probe) המוכנס לקרקע ואת הצנרת (Co-Axial) המחוברת בין מכשיר המדידה ליחידת ההפעלה. על מנת לבצע את הבדיקה מורידים את מכשיר המדידה אל העומק הרצוי בבור הקידוח. מכשיר המדידה (תרשים 3.4) מורכב מגליל מתכתי מחורץ לאורכו המהווה מעטפת חיצונית שתפקידה להגן על שלושה תאים פנימיים. התאים מסודרים בטור לאורך הגליל כאשר התאים הקיצוניים נועדו למתן את השפעות הקצה של הקרקע בזמן הבדיקה ואילו מהתא האמצעי נלקחות תוצאות המדידות. התפשטות לטרלית של התאים בגליל נעשית על ידי הזרמת גז לתאים הקיצוניים והזרמת מים בלחץ הגז לתא המדידה האמצעי. הגז מגיע ממכל גז דחוס המחובר למערכת. במהלך המבחן מעלים את הלחץ במערכת ביחידות מדודות ובהתאם להגברת הלחץ נמדד השינוי בנפח. הגברת הלחץ נמשכת עד לקבלת אינדיקציה לכשל בקרקע (כשל נחשב גם כאשר נפח תא המדידה גדל פי שניים) או השגת מקסימום הלחץ האפשרי במכשיר.

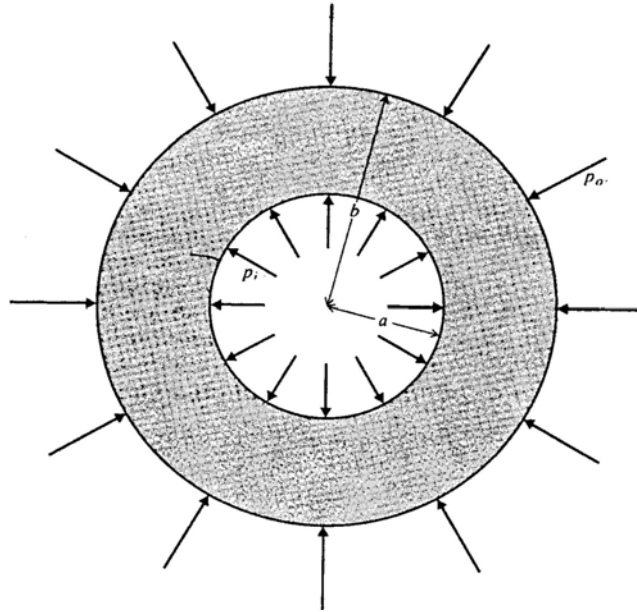


תרשים 3.3: תיאור סכמתי של פרישת פרסיומטר בפני השטח ובבור קידוח (McCarthy, 1993).



תרשים 3.4: תיאור סכמתי של מכשיר המדידה המוכנס לבור הקידוח (www.roctest.com).

הפיתוח והשימוש במכשיר הפרסיומטר מבוססים על ניתוח דו מימדי של מאמצים ותזוזות כפי שתוארו על ידי פונקציית המאמץ של Airy ב 1862 עבור חומר איזוטרופי אלסטי. Timoshenko and Goodier (1970) תיארו את פונקציית המאמץ של Airy במערכת של קוראודינטות צילינדריות פולריות. הפיתוח שלהם ניתן עבור פיזור אקסי-סימטרי של מאמצים הפועלים על גליל בעל דופן עבה. המאמצים פועלים זה כנגד זה על הדופן החיצוני של הגליל p_0 ועל הדופן הפנימי של הגליל p_i כמתואר בתרשים 3.5 :



תרשים 3.5: גליל בעל דופן עבה תחת מאמצי לחיצה פנימיים וחיצוניים (Brady and Brown, 1993).

תחת מצב מאמצים זה ניתן לתאר תזוזה רדיאלית בדופן הגליל לפי:

$$u_r = \frac{1-\nu}{E} \times \frac{a^2 P_i - b^2 P_0}{b^2 - a^2} r + \frac{1+\nu}{E} \times \frac{a^2 b^2 (P_i - P_0)}{(b^2 - a^2)} \frac{1}{r} \quad [3.14]$$

כאשר,

u_r – תזוזה רדיאלית.

ν – יחס פואסון.

E – מודול אלסטיות.

a, b – רדיוס פנימי וחיצוני של הגליל.

P_i, P_0 – לחץ פנימי וחיצוני הפועל על הגליל.

r – מרחק ממרכז הגליל.

עבור גליל עם דופן עבה מאוד ורדיוס חיצוני גדול מאוד ביחס לפנימי ($b \gg a$)

משוואה [3.14] ניתנת לתיאור על ידי:

$$u_r = \frac{r}{2G} \left\{ P_i \left(\frac{a}{r} \right)^2 - P_0 \left[\frac{1-\nu}{1+\nu} + \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right] \right\} \quad [3.15]$$

כאשר,

G – מודול גזירה.

עבור תנאי שפה שבהם מתקיימים $P_0 = 0$ ו $r = a$ התזוזה על הדופן הפנימי של הגליל היא:

$$u_r = \frac{aP_i}{2G} \quad [3.16]$$

ולכן המעוות הרדיאלי ε_r הוא:

$$\varepsilon_r = \frac{u_r}{a} = \frac{P_i}{2G} \quad [3.17]$$

בניסוי הפרסיומטר תא המדידה המרכזי עובר מעוות נפחי השווה בגודלו למעוות רדיאלי המתואר במשוואה:

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta V}{V} = \frac{P_i}{2G} \quad [3.18]$$

כאשר,

V – נפח ראשוני בתא המדידה.

ΔV – השינוי בנפח תא המדידה בסוף הבדיקה.

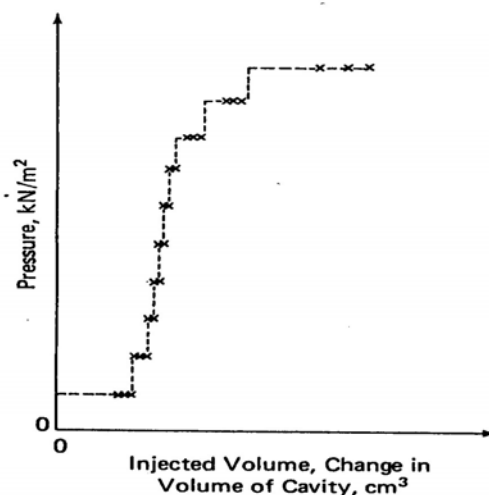
ומודול הגזירה של החומר:

$$G = \frac{V}{2} \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad [3.19]$$

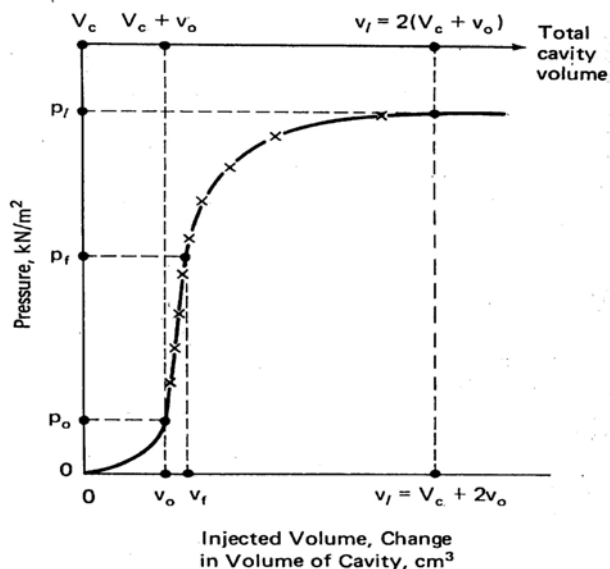
כאשר,

ΔP – השינוי בלחץ של תא המדידה.

התוצאות המתקבלות מתוארות במרחב של לחץ כנגד התפשטות נפחית כפי שמוצג בתרשים 3.6. כיוון שמהלך הבדיקה ודגימת התוצאות מתבצעת באופן בלתי רציף, מקובל להציג את התוצאות לאחר תיקון כך שמתקבל עקום של לחץ מתוקן לנפח מתוקן כמוצג בתרשים 3.7:



תרשים 3.6: תוצאות בלתי מתוקנות של ניסוי פרסיומטר (McCarthy, 1993).



תרשים 3.7: עקום לחץ מתוקן כנגד נפח מתוקן של ניסוי פרסיומטר (McCarthy, 1993).

ניתן לחלק את התרשים הנ"ל לשלושה אזורים:

אזור I - 0 עד V_0 . הערך P_0 הוא הלחץ הדרוש לתא המדידה על מנת להחזיר את הקרקע למצבה טרם הקידוח ומתאר את לחץ העפר הטרלי (σ_h) במנוחה. V_0 הוא ערך מתוקן של נפח החלל ו V_c הוא נפח הנוזל בתא המדידה לפני הבדיקה. אזור II - V_0 עד V_f . באזור צר זה היחס בין העלייה בלחץ לעלייה בנפח משתנה באופן ליניארי. זהו מצב פסאודו אלסטי של הקרקע. P_f מייצג את הלחץ הכניעה של הקרקע ונקודת הכשל של הקרקע מתוארת על ידי (P_f, V_0+V_f).

אזור III - V_f עד V_1 אזור זה מתאר מצב פלסטי של הקרקע והתפשטותה הלטורלית גדלה מאוד עם כל עלייה הדרגתית בלחץ. P_1 מתאר את הלחץ הגבולי והנפח בנקודה זו הוא V_1 .

הערכים המתקבלים בניסוי הפרסיומטר מבוטאים על ידי מודול האלסטיות E באמצעות הקשר:

$$E_p = 2(1 + \nu) \times G_p \quad [3.20]$$

כאשר,

E_p - מודול אלסטיות של הקרקע מתוך בדיקות פרסיומטר.

G_p . מודול גזירה של הקרקע מתוך בדיקות פרסיומטר.

v - יחס פואסון, עבור קרקע מקובל הערך 0.33.

בהתבסס על משוואה [3.19] ניתן לחשב את ערך מודול הגזירה של הקרקע בבדיקת פרסיומטר באופן הבא :

$$G_p = \left(V_c + \frac{v_0 + v_f}{2} \right) \times \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad [3.21]$$

נציב את משוואה [3.19] ויחס פואסון של 0.33 במשוואה [3.20] ונקבל:

$$E_p = 2.66 \left(V_c + V_p \right) \times \left(\frac{P_f - p_0}{V_f - V_0} \right) \quad [3.22]$$

כאשר,

V_c - נפח ראשוני של תא המדידה.

$$V_m - \text{נפח ממוצע המתווסף בקטע הלינארי של הבדיקה כאשר, } V_p = \frac{V_o + V_f}{2}$$

ΔP - שינוי הלחץ בתא המדידה בקטע הלינארי.

ΔV - שינוי הנפח בתא המדידה בקטע הלינארי.

מכאן שערכי E_p ו G_p קשורים באופן הבא :

$$E_p = 2.66 G_p \quad [3.23]$$

3.1.4 בדיקות מהירות גלים סיסמיים בשיטת Crosshole ו Downhole.

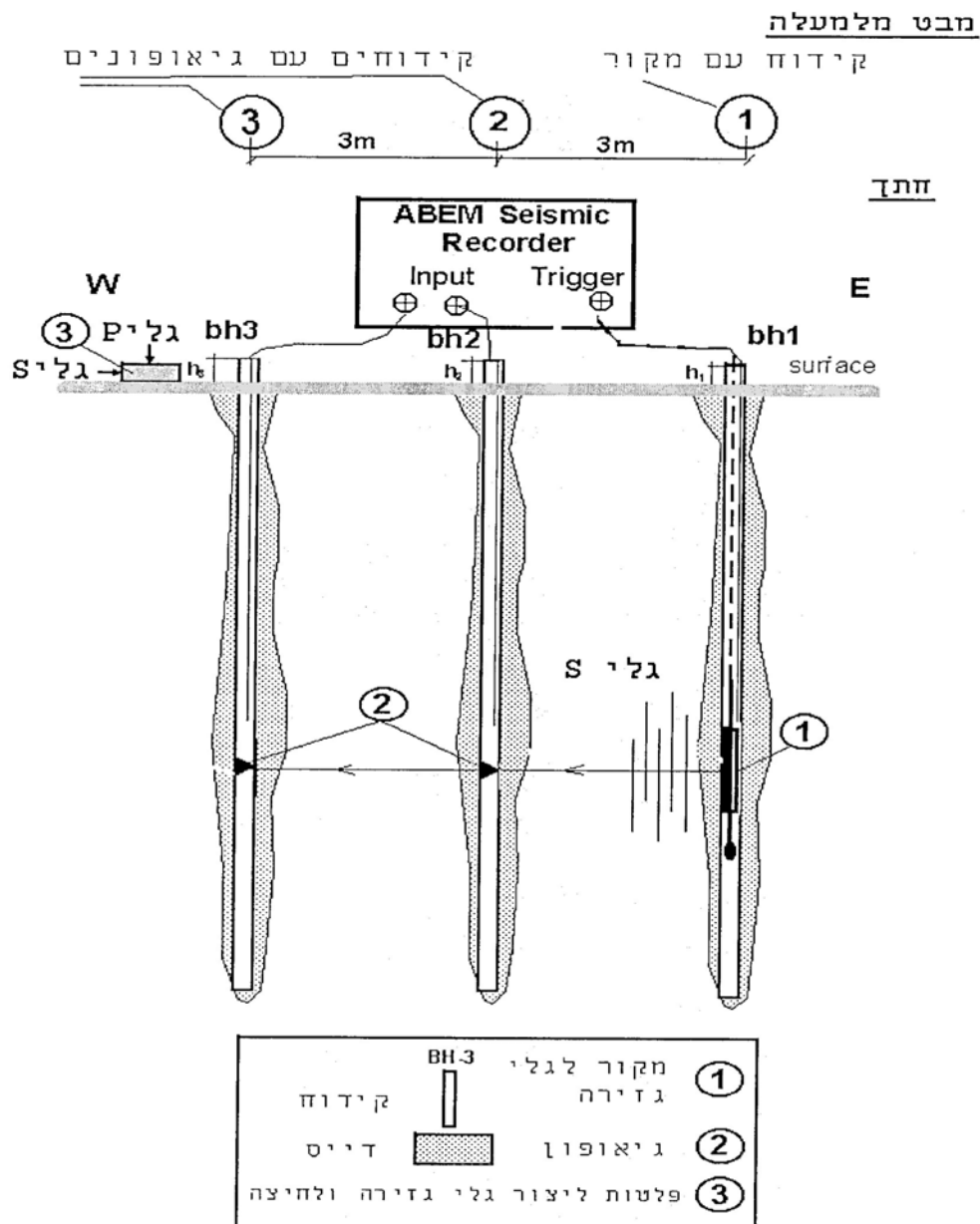
המכון הגיאופיסי לישראל ביצע באתר המחקר סקר סיסמי (יזרסקי, 2004). מטרת הסקר לצורך מחקר זה הן : (1) הגדרת מהירות גלי לחיצה וגלי גזירה בשכבות בתת-הקרקע עד לעומק של 20 מטר, (2) השוואה בין מהירויות גלי הגזירה וגלי הלחיצה בתווך יבש ובתווך רווי. קידוח שישי בוצע באתר המחקר לצורך הגדרת החתך ומבצעי הסקר עשו שימוש במערך קידוחים נפרד שהוצב בתוך תעלה שנחפרה באתר לעומק של כ 2 מטר. אורכה של התעלה כ 10 מטר ורוחבה כ 3 מטר. שלושת הקידוחים מוקמו על ציר האורך של התעלה והמרחק בין אחד לשני כ 3 מטר (תרשים 3.8). הקידוחים בוצעו בטכניקת Wireline המבטיחה ניצבות של הקידוח עם סטייה של עד 2% הגיעו לעומק 22 מטר.

מדידת מהירויות סייסמיות בשיטת Crosshole.

מדידה זו בוצעה על פי תקן ASTM-D4428. מקור האנרגיה בו נעשה שימוש לעירור של גלי גזירה הוא SV type מתוצרת Soil Engineering and Geophysics Inc. USA. בניסוי זה מקור האנרגיה מוקם בקידוח מספר 1. קליטת הגלים הסיסמיים בוצעה באמצעות גיאופון ייעודי תלת רכיבי מסוג BHG-2 מתוצרת Geostuff, USA. ה BHG-2 כולל גיאופון אנכי ושני גיאופונים אופקיים הניצבים אחד לשני. שני גיאופונים מוקמו בקידוחים 2 ו 3. המדידה עצמה מתבצעת באופן הבא : מקור האנרגיה מייצר גלי גזירה המתפשטים בקרקע ומגיעים בהפרשי זמן לקולטים. האות מגיע ראשית לקידוח 2 ובהפרש זמן מסוים לקידוח 3. זמני ההגעה נרשמים במכשיר ההקלטה וניתן לבצע חישוב של המהירויות הסיסמיות בהתאם. המדידה בוצעה במרווחים של 1 מטר מפני השטח ועד לעומק של 20 מטר, כך שבסופו של תהליך זה מתקבל לוג מהירויות של גלי גזירה SV בתווך שבין קידוח 2 ל 3.

מדידת מהירויות סייסמיות בשיטת Downhole.

מדידה זו בוצעה על פי תקן ISRM 1988. בשיטת Downhole המדידה מתבצעת בכל אחד מהקידוחים. גיאופן ממוקם בקידוח כך שהוא מוצמד לקירו על ידי קפיץ. מקור האנרגיה הוא פטיש יד בעל מסה של 9 ק"ג. גלי לחיצה (P) מיוצרים ע"י מכות פטיש על פלטה מתכתית בכיוון אנכי. גלי גזירה (S) מיוצרים באופן דומה כאשר כיוון המכות הוא אופקי. הפלטה ממוקמת על יד הקידוח בפני השטח. אחרי מדידת מהירויות בעומק מסוים משחררים את הגיאופן ומורידים אותו לעומק הבא עם מרווח קבוע של 1 מטר. בניסוי זה מכשיר ההקלטה הסיסמית היה מסוג Abeam Terraloc מתוצרת Atlas Copco Abeam AB, שבדיה בעל 24 ערוצי הקלטה. במהלך העבודה נעשה שימוש בשישה ערוצים בזמן ה Crosshole ושלושה ערוצים ל Downhole.



תרשים 3.8: מערך הקידוחים, הגיאופונים ומקור האנרגיה בתיאור סכימתי של מדידת מהירויות בשיטת Crosshole ו Downhole (יזרסקי, 2004).

מהירות גלי לחיצה וגזירה מחושבים לפי זמני ההגעה שנמדדו ב Downhole

וב Crosshole , באופן הבא :

$$V_{p,s} = \frac{s}{t_{p,s}} \quad [3.24]$$

כאשר,

V_p – מהירות גלי לחיצה (m/sec).

V_s – מהירות גלי גזירה (m/sec).

S – מרחק בין קידוחים ב Crosshole או מרחק בין מפלסי הגיאופון ב Downhole.

$t_{p,s}$ – זמן הגעה של גלי לחיצה וגזירה בהתאם לשיטה.

אם ידועות המהירויות הסיסמיות, ניתן לקבל את הפרמטרים האלסטיים של החומר.

יחס פואסון במקרה זה נתון על ידי :

$$\nu_d = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2(V_p/V_s)^2 - 2} \quad [3.25]$$

כאשר,

ν_d – יחס פואסון דינמי.

V_p – מהירות גלי לחיצה (m/sec).

V_s – מהירות גלי גזירה (m/sec).

מודול הגזירה של החומר נתון לפי :

$$G_d = \rho V_s^2 = \frac{E_d}{(2 + 2\nu_d)} \quad [3.26]$$

כאשר,

G_d – מודול גזירה דינמי.

ρ – צפיפות הקרקע (kg/m^3).

V_s – מהירות גלי גזירה (m/sec).

E_d – מודול אלסטיות דינמי.

ν_d – יחס פואסון דינמי.

והקשר בין מודול הגזירה ומודול האלסטיות הדינמיים נתון לפי :

$$E_d = 2G_d(1 + \nu_d) \quad [3.27]$$

כל הפרמטרים ידועים.

3.1.5 דיגום קרקע מהמחשוף.

חתך הקרקע באתר המחקר מיוצג באופן ברור במחשוף שנוצר בקירות המחפורות שנפתחו באתר לעומק של 7 מטר (מחפורת I) ו 14 מטר (מחפורת II). שכבות הקרקע המזוהות בחתך תואמות את הקרקע שנדגמה בקידוחים אם כי לא באופן אחיד מבחינת עומק. שני טיפוסים הקרקע (SP-SM) חול דק בצבע חום צהוב ו SP-SC חול חרסיתי בצבע חום אפור עם תלכיד קרבונט מפוזרים באופן בלתי אחיד) מופיעים במחשופים אלו. מדגמים משני טיפוסים הקרקע הוצאו מהמחשוף לצורך ביצוע בדיקות גזירה ישירה במעבדה. שיטת הדיגום התבססה על חציבת גושי קרקע בסדר גודל של $0.5m \times 0.3m \times 0.3m$ מקירות המחשוף או הוצאת גושים בגודל דומה מהתמוטטויות קרקע שהצטברו בבסיס המחפורת. גושים אלו סותתו לבלוקים מטעמי נוחות הובלה ועיבוד במעבדה. כל המדגמים נלקחו מקרקע רציפה או במצב רציף. דגמים S_1-S_5 נלקחו ממחפורת I ודגמים S_6-S_{12} ו C_1-C_7 (ראה טבלאות 5.1-5.2). נלקחו ממחפורת II.



תמונה 3.3: סיתות בלוק של קרקע מטיפוס SP-SC שהוצא מהמחשוף בחתך של מחפורת II.

3.2 מיון קרקעות.

קיימות מספר שיטות מיון וסיווג קרקע לצרכים גיאוטכניים - הנדסיים. עבודת המעבדה שנערכה לצורך הגדרת הקרקע התבססה על התקנים של ASTM (American Society for Testing and Material) ושל שיטת המיון האחידה (USCS (Unified Soil Classification System)). שיטת המיון של תקן ישראל 253 מתאימה לשיטת USCS.

תהליך מיון הקרקע דורש שימוש במספר בדיקות המתוארות בהמשך. בחלק מן הבדיקות התקן דורש ייבוש של מדגמי הקרקע. תקן ASTM-D2216 מגדיר ייבוש בתנור, למשך 24 שעות בטמפרטורה של 110 מעלות צלזיוס כייבוש תקני. מדגמי הקרקע בכל הבדיקות שדרשו זאת עברו ייבוש בתנור מסוג Temperature Controller Type 201 מתוצרת Carbolite.

3.2.1 אנליזת התפלגות גודל גרגר.

למטרות מיון והגדרת קרקע יש חשיבות לגודלי הגרגר והתפלגותם בקרקע נתונה. תקן – ASTM D422 קובע את מהלך ניפוי הקרקע. בבדיקה זו מסת חומר יבשה (ייבוש תקני) מנוערת מכנית בתוך מכשיר הרעדה תקני הכולל סדרת נפות, בעלות עינות הקטנות עם העלייה במספר הנפה. הטבלה הבאה מציגה את סדרת הנפות בהן נעשה שימוש במהלך הניפוי:

U.S. Standard sieve No	Sieve opening (mm)
#4	4.75
#10	2.00
#40	0.425
#60	0.25
#80	0.18
#200	0.075

טבלה 3.1 : סדרת נפות עבור ניפוי מכני לפי ASTM-D422.

גרגרי הקרקע שעוברים נפה #80 נאספים בסיר ולאחר מכן מנופים בשטיפה דרך נפה #200, על מנת לקבוע את תכולת המרכיבים הדקים. קביעת תכולת המרכיבים הדקים חשוב לצורך אפיון והגדרה מדויקת של הקרקע וסמלה. לאחר ניפוי בשטיפה החומר המשתיר על נפה #200 עובר ייבוש תקני ונמדדת מסתו.

החישוב נתון בנוסחה :

$$fines \% = \frac{M_{\#200}}{M_t} \quad [3.28]$$

כאשר,

M_t - מסת המדגם לפני הניפוי ולאחר ייבוש.

$M_{\#200}$ - מסת הדקים שעברה נפה #200 לאחר ייבוש.

כיוון שמסת המדגם M_t ידועה ניתן לקבוע את אחוז החומר המשתיר על כל נפה. התפלגות גודל הגרגר ניתנת לביטוי בעקומת הצטברות (תרשים 3.9) במרחב של גודל הגרגר (סקלה לוגריתמית) כנגד אחוז משקלי מהחומר הכללי שעבר או השתייר על מספר נפה מסוימת (סקלה אריתמטית).

קיימים שני פרמטרים נוספים הקשורים בעקומת התפלגות גודל הגרגר, שמסייעים בהגדרת סוג הקרקע וסמלה. מקדם האחידות – C_u המתואר לפי :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad [3.29]$$

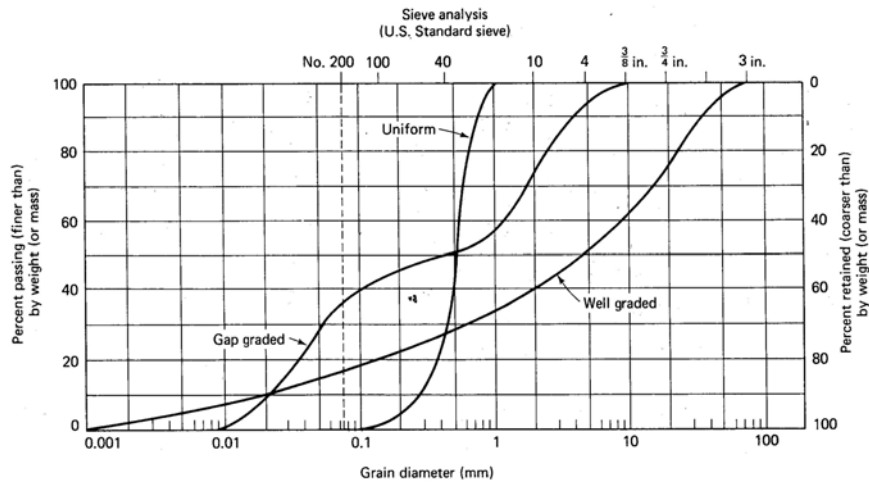
ומקדם העקמומיות המתואר בצורה הבאה :

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10})(D_{60})} \quad [3.30]$$

כאשר,

C_u – מקדם האחידות (coefficient of uniformity).

- C_c – מקדם העקמומיות (coefficient of curvature).
- D_{30} – קוטר הגרגר (מ"מ), המתאים ל 30% מעבר משקלי של החומר.
- D_{10} – קוטר הגרגר (מ"מ), המתאים ל 10% מעבר משקלי של החומר.
- D_{60} – קוטר הגרגר (מ"מ), המתאים ל 60% מעבר משקלי של החומר.



תרשים 3.9: עקומות התפלגות גודל גרגר אופייניות בקרקעות (Holtz and Kovacs, 1981).

3.2.2 קביעת גבולות אטרברג.

גבולות סומך מוגדרים כתכולות הרטיבות בהן הקרקע משנה את התנהגותה המכנית. בקרקעות דקות גרגר ובקרקעות עם תכולת מרכיבים דקים, לתכולת הרטיבות השפעה משמעותית על הפלסטיות של הקרקע ולכן גם על תכונותיה ההנדסיות. תקן ASTM-D4318 מגדיר שלושה פרמטרים אותם יש לקבוע במהלך הבדיקה והם :

LL- גבול הנזילות : תכולת הרטיבות בו עוברת הקרקע ממצב נוזלי למצב פלסטי.

PL – גבול הפלסטיות : תכולת הרטיבות בו עוברת הקרקע מצב פלסטי למצב מוצק.

PI - אינדקס הפלסטיות: טווח תכולות הרטיבות שבהן הקרקע פלסטית. פרמטר זה אינו נקבע בניסוי מעשי והוא מחושב בסיום תהליך קביעת ה LL וה PL. לצורך ביצוע הבדיקות משתמשים רק בחלק של מדגם הקרקע, שעבר את נפה #40. את תכולת הרטיבות מחשבים באופן הבא :

$$W\% = \frac{M_w}{M_s} \quad [3.31]$$

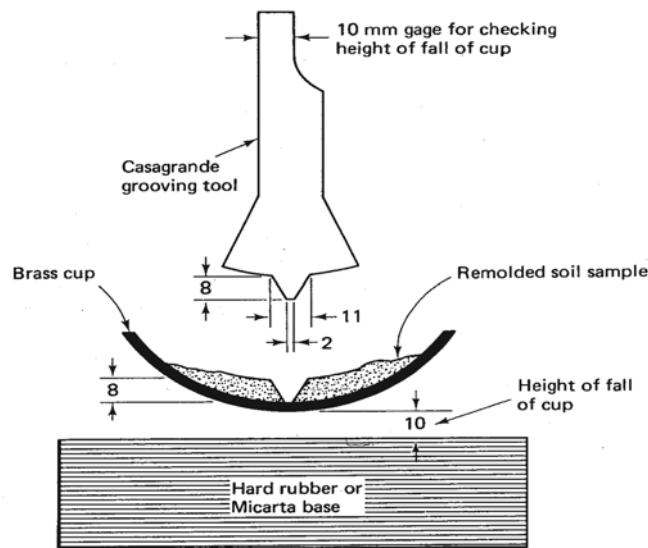
כאשר,

$W\%$ - תכולת הרטיבות באחוזים.

M_w – מסת המים במדגם.

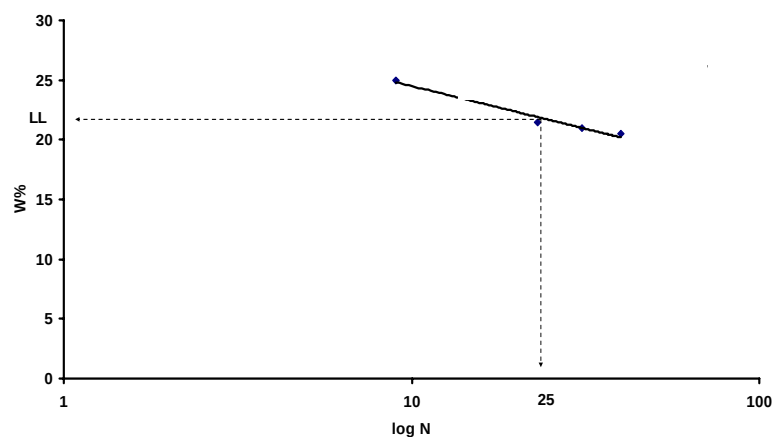
M_s – מסת המוצקים לאחר ייבוש תקני.

גבול הנזילות LL נקבע כתכולת הרטיבות הדרושה לסגירת חריץ ברוחב של 2 מ"מ ובאורך של 13 מ"מ, הקיים בתוך מדגם קרקע שנתון במתקן תקני (מכשיר קסגרנדה), תוך ביצוע 25 הקשות.



תרשים 3.10: חתך של מכשיר קסגרנדה תקני לביצוע בדיקות גבול נזילות (Craig 1997).

בדיקה תקנית דורשת ביצוע של לפחות שלושה ניסיונות מאותו מדגם לסגירה של חריץ כזה. כל ניסיון נערך עם תכולת רטיבות שונה. עקום נזילות הוא פונקציה לוגריתמית המתוארת על ידי קו ישר. הישר מתאר את היחס בין תכולת הרטיבות $W\%$ למספר ההקשות המתאים N . תכולת הרטיבות מוצגת בקנה מידה אריתמטי ואילו מספר ההקשות בקנה מידה לוגריתמי כמתואר בתרשים 3.11:



תרשים 3.11: דוגמה לעקום נזילות של קרקע מסוג SP-SM.

גבול הפלסטיות PL נקבע כתכולת הרטיבות שבה דוגמת קרקע המגולגלת בין היד למשטח זכוכית לצורה גלילית בקוטר של 3 מ"מ, מתחילה להתפורר. החלקים המפוררים הם באורך של 3-10 מ"מ. את החלקים המפוררים מיבשים ייבוש תקני ותכולת הרטיבות מחושבת לפי משוואה 3.31. התוצאה ניתנת כממוצע של תכולת הרטיבות משתי דגימות.



תמונה 3.4: דגימות קרקע לאחר בדיקות גבול נזילות וגבול פלסטיות ולאחר ייבוש בתנור.

אינדקס הפלסטיות הוא ההפרש בין גבול הנזילות לגבול הפלסטיות ומחושב באופן הבא :

$$PI = LL - PL \quad [3.32]$$

כל הפרמטרים ידועים.

3.2.3 משקל מרחבי.

המשקל המרחבי הוא היחס בין משקל החומר לנפחו ומתואר על ידי :

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad [3.33]$$

כאשר,

γ - המשקל המרחבי ביחידות kN/m^3 .

W - משקל המדגם.

V - יחידת נפח של החומר.

נהוג להתייחס למשקל המרחבי היבש של החומר אולם ניתן לקבוע נתון זה גם עבור חומר בעל תכולת רטיבות כלשהי. תכולת הרטיבות נקבעת לאחר ייבוש תקני ולפי נוסחה 3.2.4. עבור הקרקע מטיפוס SP-SM הבדיקה נערכה על מספר דגמים קטנים שנוסרו לצורות פריזמתיות כך שמידות האורך הרוחב והגובה היו ברות מדידה (באמצעות קליבר) וניתן לחשב את נפחן. עבור הקרקע מטיפוס SP-SC מלבד שימוש בצורות גיאומטריות מרובעות נעשה גם שימוש בגלילים שנלקחו מבדיקות ה SPT. קוטרן ואורכן נמדדו באמצעות קליבר ובוצע חישוב של נפחן לפי נפח של גליל. טרם השקילה הדגמים עברו ייבוש תקני. שקילת המדגם בוצעה על מאזניים אלקטרוני של OHAUS עם דיוק מדידה של 0.01 גרם.

עבור קרקע במצב רווי ניתן לתאר את המשקל המרחבי לפי :

$$\gamma_{sat} = \frac{Gs + e}{1 + e} \times \gamma_w \quad [3.34]$$

כאשר,

Gs – משקל יחסי מוצקים (specific gravity) עבור טיפוזי הקרקע שנדגמו בעבודה זו מקובל הערך 2.7.
e – מנת החללים.

γ_w – משקל מרחבי של מים 1000 kg/m^3 .

3.2.4 הגדרת סוג הקרקע וסמלה.

שיטת המיון האחידה USCS משתמשת בקבוצת אותיות לתיאור סוג הקרקע (טבלה 3.2).

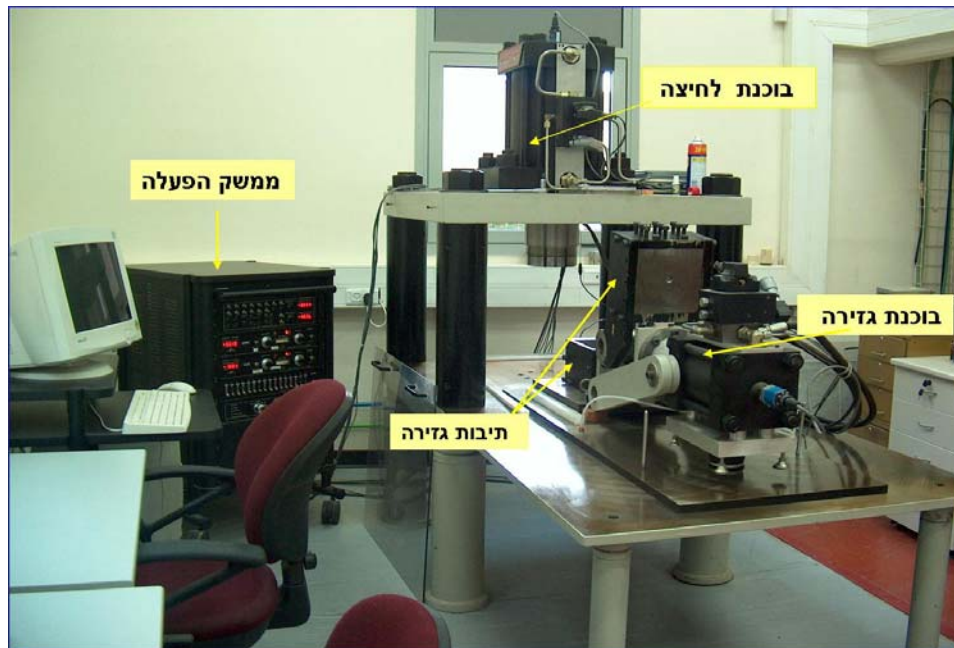
אות ראשית	אות משנית
G : צרורות (חלוקים)	W : דרוג אחיד
S : חול	P : דרוג חסר
M : סילט	M : עם דקים לא פלסטיים
C : חרסית	C : דקים בעלי פלסטיות גבוהה
O : קרקע אורגנית	L : פלסטיות נמוכה
Pt : כבול	H : פלסטיות גבוהה

טבלה 3.2 : סמלי הקרקע על פי שיטת המיון האחידה (Holtz and Kovacs, 1981).

האות הראשית מתארת את ששת טיפוזי הקרקע ואילו האות המשנית את התכונות המתאימות לכל טיפוס. בשיטה זו המיון מתבסס על תוצאות של בדיקות מעבדה שנערכו בחומר (דרוג וגבולות אטרברג) אך מאפשר גם לבצע אפיון מהיר בשדה.

3.3 ציוד לבדיקת תכונות מכניות.

המערכת לביצוע בדיקות גזירה ישירה תוכננה ויוצרה על ידי **Terratek Systems Inc.** יוטה, ארה"ב והיא נמצאת במעבדה למכניקת הסלע של אוניברסיטת בן גוריון בנגב (תמונה 3.5). אופי המערכת ויכולותיה הוגדרו בעת בנייתה בהתאם לדרישות המעבדה. הייעוד המקורי של המערכת הוא לבצע בדיקות מכניות בסלעים. טווח המאמצים הפועלים בבדיקות של סלעים גבוה מאד ביחס לטווח המאמצים הדרוש בביצוע של בדיקות בקרקע. עם זאת, רגישות המערכת לשינויים בכוחות והתזוזות הפועלים בבוכנות מאפשרת שימוש בעומסים נמוכים מאד יחסית לעומסים הדרושים בבדיקות של סלעים. את הבדיקות המכניות בקרקע היה ניתן לבצע בהתבסס על יכולת זו.



תמונה 3.5: המערכת לבדיקות גזירה ישירה של TerraTek Inc.

3.3.1 מפרט טכני.

המערכת מתוכננת לשימוש ביחידות של השיטה האינצ'ית כך שיחידות אורך נתונות ב mil (אלפית האינץ') ואילו יחידות כוח נתונות ב lb. להלן תיאור היחידות הבונות את המערכת:

ממשק תפעול ובקרה:

1. **Computer Interface Panel** - רכיב זה מאפשר שליטה ומעבר בין 16 ערוצים הקיימים במערכת ונותן חיווי של ערכים חשמליים (Volt), המתקבלים בכל אחד מן הערוצים בזמן אמת.
2. לוח שליטה בבוכנה הנורמלית - רכיב זה מאפשר להפעיל ידנית את הבוכנה הנורמלית במערכת ולקבוע את מעגל שליטה (load/ position) בה תופעל.
3. לוח שליטה בבוכנת הגזירה - רכיב זה מאפשר להפעיל ידנית את בוכנת הגזירה במערכת ולקבוע את מעגל השליטה (load/ position) בה תופעל.
4. **Signal Conditioner Model 1600** – רכיב זה מאפשר את התקשורת בין תכנת השליטה וההפעלה (**TerraTest**) המותקנת במחשב, לבין המערכת עצמה. תפקידו של ה **Signal Conditioner**, להמיר אות חשמלי מסוג אחד לאות חשמלי מסוג אחר. המרת האות במערכת זו היא **Analog To Digital**. במערכת

מותקן ממיר אותות רב-ערוצי המספק 16 ערוצי העברת מידע בזמן נתון. לערוצים אלו מתאימים מתמרים (Transducers) הכוללים: מדי תזוזה (LVDT's) ומדי עומס (Load cell) על לוח האם מותקן Master Oscillator המאפשר הפעלה סינכרונית של כל 16 המודולים. סכמה זו מונעת מצב של ערבוב תדרים (Crosstalk) כיוון שכל הערוצים עושים שימוש באותו תדר ובאותה הפאזה (AC).

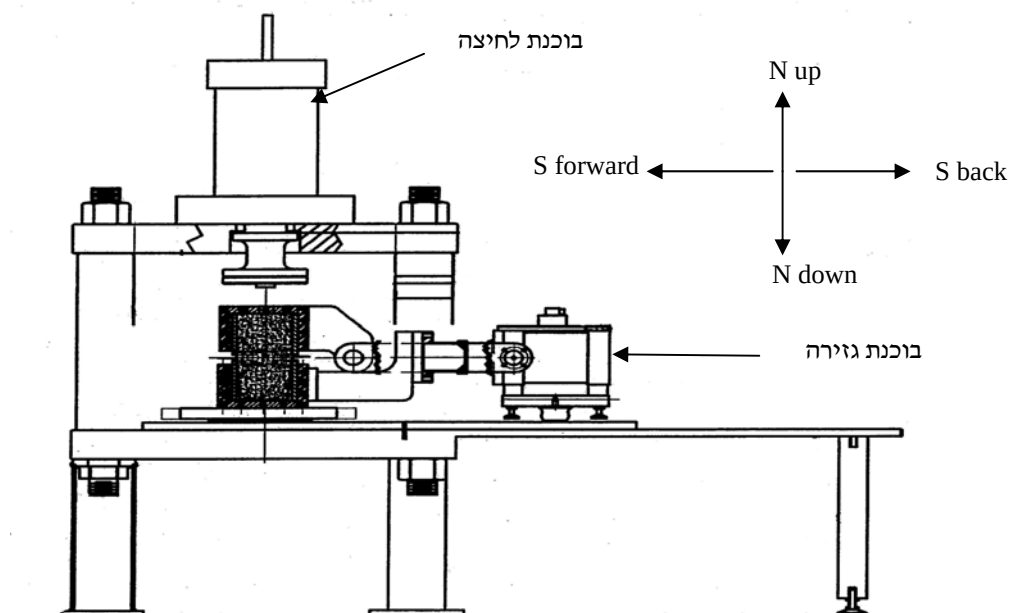
5. Hydraulic Controller - לוח הפעלה ראשי של המערכת בו ניתן לבצע הדלקה וכיבוי של המערכת, לקבוע לחץ עבודה (גבוה \ נמוך), ולקבל חייוי לגבי כמות השמן במערכת, פילטרים, לחץ וטמפרטורה.

מכש גזירה.

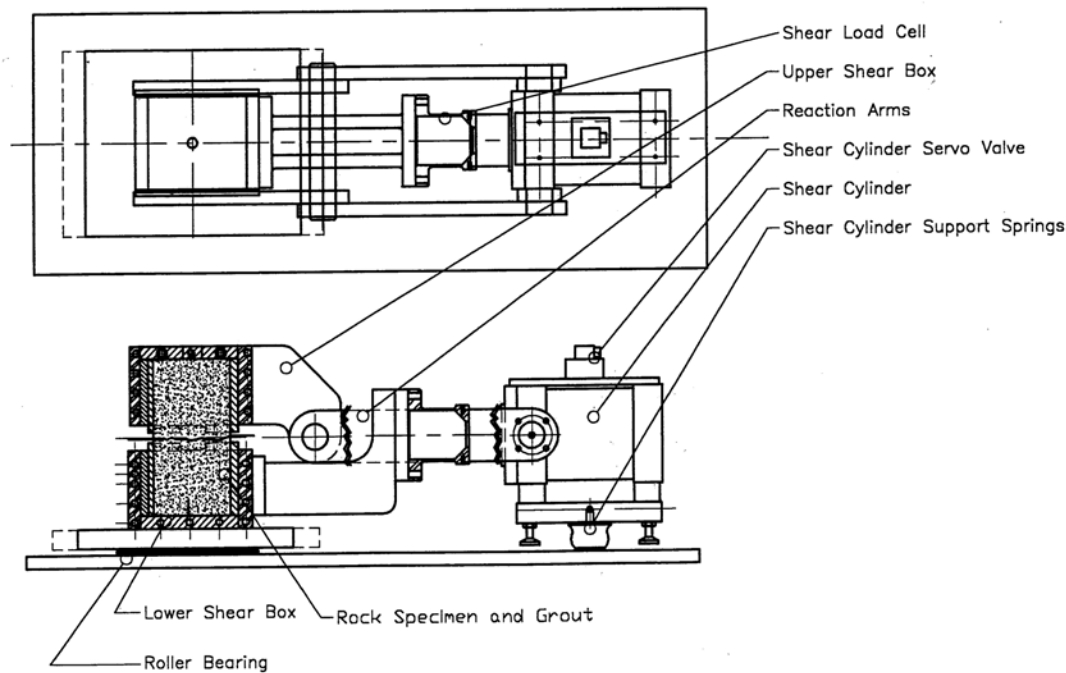
המכש לגזירה ישירה נתון בתוך מסגרת העמסה מפלדה. שתי בוכנות מרכיבות את מכש הגזירה: בוכנת לחיצה (נורמלית) בעלת כוח של 102,060 ק"ג הפועלת בציר אנכי ובוכנת גזירה בעלת כוח של 30,391 ק"ג הפועלת בציר אופקי (תרשים 3.12). משאבת שמן הידראולית יוצרת את הלחץ המפעיל את הבוכנות והוא ניתן לוויסות באמצעות בורר בין שני מצבי עבודה: $\text{low/high} = 1500/3000 \text{ psi}$. ניתן להפעיל כל בוכנה באופן עצמאי בו זמנית או בנפרד למעט במצב של מבחן המוצא לפועל על ידי המחשב (ראה סעיף 3.3.4). הטבלה הבאה מפרטת את ההגדרות עבור הבוכנות:

Axial Piston	Stroke	10,000 mil
	Capacity	225,000 lb
Shear Piston	Stroke	4,000 mil
	Capacity	67,000 lb

טבלה 3.3: הגדרות טכניות עבור הבוכנה הנורמלית ובוכנת הגזירה.

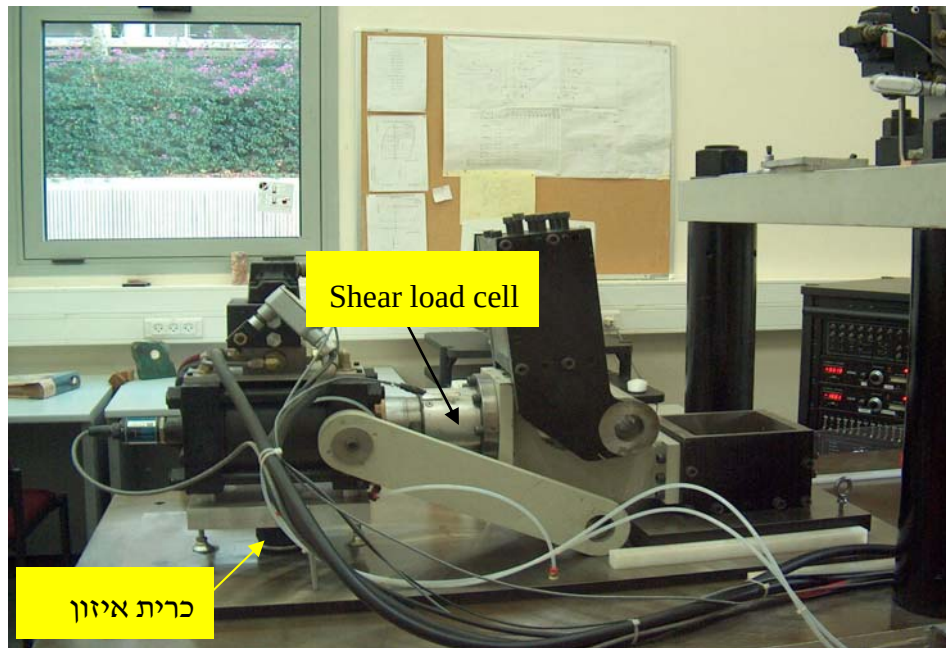


תרשים 3.12: תיאור כללי של בוכנת הלחיצה ובוכנת הגזירה במסגרת ההעמסה והגדרת כיווני תזוזה של הבוכנות N – normal, S – shear.



תרשים 3.13: חתך על וחתך צד של בוכנת הגזירה.

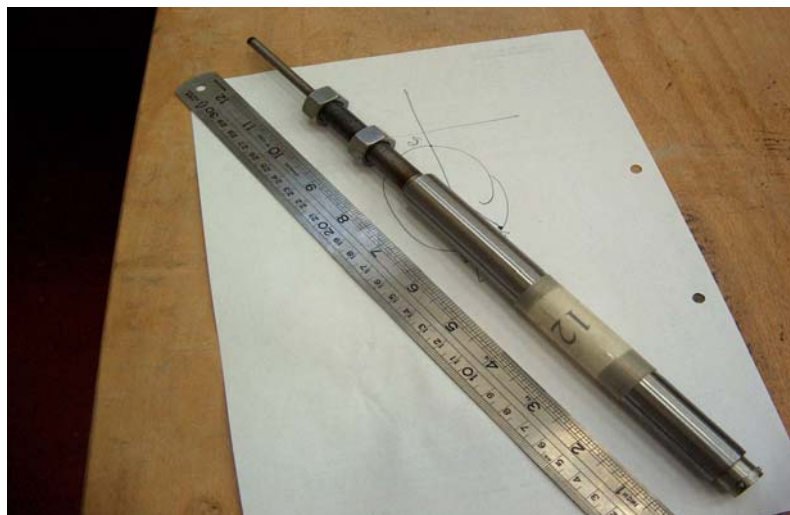
הבוכנות פועלות בבקרת סרוו במעגל סגור. את בוכנת הלחיצה ניתן להפעיל בשליטה של מעגל תזוזה או בשליטה של מעגל עומס. את בוכנת הגזירה ניתן להפעיל בשליטה של מעגל תזוזה בלבד (ראה סעיף 3.3.5). הכוחות המועברים מבוכנת הלחיצה ומבוכנת הגזירה אל קופסאות הגזירה נמדדים כל העת על ידי שני מדי עומס (Load cells) המחוברים אל הבוכנות. בוכנת הגזירה עומדת על שולחן הגזירה באמצעות כרית אוויר המשמשת כקפיץ. את הכרית ניתן לנפח ולרוקן מאוויר על מנת לאזן את בוכנת הגזירה בציר אופקי. בקצה בוכנת הגזירה ממוקם מד עומס (Shear Load Cell) המחובר לזרוע המקובעת אל תיבת הגזירה התחתונה (תמונה 3.6). בצידה התחתון של תיבת הגזירה התחתונה מצוי פין השקוע בחריץ עגול הנתון בפלטת פלדה ששוכבת על סדרת מוטות גליליים חלקים. בעת שבוכנת הגזירה מבצעת תזוזה קופסת הגזירה התחתונה נעה על אותם מוטות גליליים חלקים ללא ריאקציה בין הפין ופלטת הפלדה בה הוא שקוע ועם חיכוך נמוך מאד בין המוטות הגליליים ושולחן הגזירה עצמו. את מישור המגע בין המוטות הגליליים לשולחן הגזירה משמנים בשמן סיכה. ניתן להניח כי הסיכוך והחלקת הפלטה על המוטות הגליליים מונעות כל ריאקציה חיצונית שעשויה להשפיע על פעולת הגזירה, והריאקציה היחידה שמתפתחת מקורה בדגם הקרקע וחוזק הקרקע הנתונה לגזירה. אל המסגרת החיצונית של בוכנת הגזירה מחוברות שתי זרועות ריאקציה (עליונות) מקבילות שתפקידן להחזיק את תיבת קופסת הגזירה העליונה. לתוך מגרעת הנתונה בגג תיבה זו נכנס פין המרכז של הבוכנה הנורמלית. פעולת הגזירה מתאפשרת במצב בו הבוכנה הנורמלית מפעילה עומס על קופסת הגזירה העליונה (התיבה מוחזקת במקומה הודות לפין המרכזי) ואילו התיבה התחתונה נדחפת או נמשכת (בהתאם למוכתב בטסט) על ידי בוכנת הגזירה. קופסאות הגזירה ניתנות לפרוק, הסרה ושימוש חוזר.



תמונה 3.6: מבט צד על המכלול של בוכנת הגזירה ותיבות הגזירה.

מדי תזוזה – LVDT's.

Linear Variable Differential Transformer - הוא סוג נפוץ של מתמר אלקטרומכני המסוגל למדוד תזוזות קטנות ביותר של מיליונית האינץ ועד עשרות אינצ'ים. מדי התזוזה המותקנים על קופסאות הגזירה בזמן בדיקה במערכת הם מדגם GHSA-750-1000 ומיוצרים ע"י Macro Sensors (USA). במערכת של TerraTek Inc. המדידים נדרשים לחוש בתזוזה של 10^{-4} של האינץ או 0.1 mil (0.00254 mm) משום שזוהי יחידת התזוזה הקטנה ביותר שהבוכנות מסוגלת לבצע. פעולת הרכיב מבוססת על עיקרון של המרת תנועה של עצם לאות חשמלי מתאים. אות זה מבוטא במערכת ביחידות של Volt. לכל LVDT מתבצע כיוול ועל פי הגדרת היצרן מתקיים הערך $\text{Linearity} = 0.219\%$ לכל אורך הטווח (Full Scale). ה LVDT בנוי מזרוע מתכת הנתונה בתוך גליל מתכתי והוא מותאם אל קופסאות הגזירה באמצעות תושבות מתאימות. התקנת המדידים במערכת מתוארת בהרחבה בסעיף 3.3.



תמונה 3.7: LVDT מדגם GHSA-750-1000 של Macro Sensors.

3.3.2 הכנת דגם קרקע לבדיקה במכשיר הגזירה.

כפי שצוין בסעיף 3.2.4 קיימים שני טיפוסים קרקע מהם נלקחו המדגמים. מדגמים אלה הוצאו מקירות המחפורות שייצגו את חתך הקרקע בשטח המחקר והובלו למעבדה כגושים אמורפיים. אופן הטיפול במדגמים ותהליך הכנת הדגם זהה עבור שני הטיפוסים אך קיימים הבדלים הקשורים בסוגי הקרקע והתכונות הנגזרות ממנה. בתמונה 3.8 מוצג תהליך הכנת הדגם ויציקתו בקופסאות הגזירה טרם בדיקה.



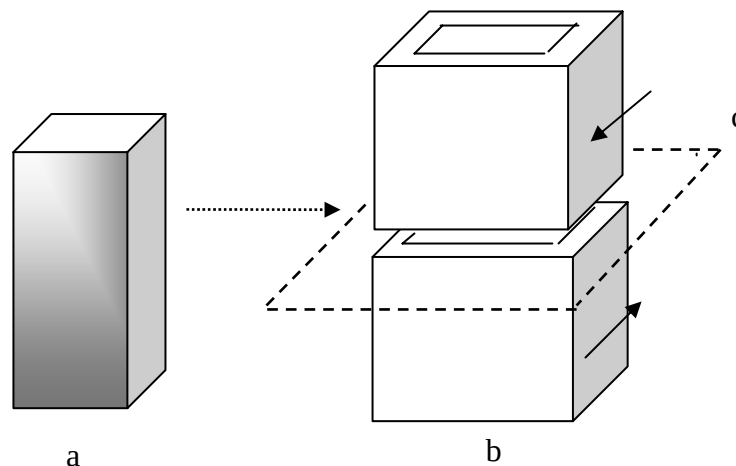
תמונה 3.8 : שלבים בהכנת דגם קרקע לבדיקה במכשיר הגזירה.

- (a) ניסור הדגם לצורה פריזמתית מוארכת;
- (b) יציקת צמנט מסביב לדגם בקופסת הגזירה התחתונה;
- (c) התקנת קופסת הגזירה העליונה מעל לקופסת הגזירה התחתונה ויצירת חלל למילוי של צמנט;
- (d) פילוס קופסאות הגזירה ויציקת צמנט מסביב לדגם בקופסת הגזירה העליונה.

הטיפול מסוג SP-SM רך וניתן לניסור ולכן הטיפול בו פשוט ומהיר. הטיפול מסוג SP-SC קשה יותר לניסור כיוון שהוא מכיל תלכיד קרבונט (קשים) באופן מפוזר וכן תכולת הדקים בו גבוהה יותר. בתוך מדגם הקרקע מטיפוס זה מופיעים לעיתים סדקי מתיחה כתוצאה מהתייבשות ולכן בזמן ניסור הדגם חלקים ממנו עשויים להתנתק.

העיקרון המנחה בשלב ההכנה הוא שמירה על הדגם במצב רציף עד לביצוע הבדיקה. להצלחת הבדיקה, איכות הנתונים והמידע שמתקבל תלות רבה ביכולת זו. במהלך העבודה במעבדה נצבר ניסיון בהכנת הדגמים ובהתקנתם באופן המתאים על מנת לשמור אותם במצב רציף. על סמך ניסיון זה מובאים כאן מספר דגשים בעלי חשיבות:

1. קופסאות הגזירה עשויות מפרופיל פלדה בעל חתך ריבועי (17 cm X 17cm בקירוב) עם פינות מעוגלות. מסביב לדגם יש לצקת צמנט שתפקידו להחזיק את הדגם במקומו. צמנט בעובי של 1-2 cm מספיק בהחלט.
 2. רצוי ששטח החתך של הדגם יהיה הגדול ביותר האפשרי בהתאם למידות של קופסאות הגזירה. ראשית משום שדגם הקרקע עשוי להתפרק בקלות והעומסים הפועלים בקופסאות הגזירה ובמערכת בשלב ההכנה וההתקנה, מספיקים להרס הדגם. שנית, שטח חתך גדול מאפשר להפעיל כוח בבוכנה הנורמלית שמזוהה על ידי המערכת תוך שמירה על תחום מאמצים נמוך יחסית, כפי שדרוש בבדיקות קרקע מסוג זה.
 3. חתך הדגם יכול להיות ריבועי, מלבני או גליל (בחומר זה התקשינו ליצור חתך כזה) ובלבד ששטחו יהיה ניתן לחישוב. השטח נחוץ כנתון בשלב כתיבת הבדיקה לחישוב המאמץ הפועל על הדגם. המדידות לחישוב השטח ייעשו על ידי קליבר כדי להשיג דיוק מרבי.
 4. בשלב הכנת הצמנט ליציקה רצוי להגיע ליחס מים וצמנט נמוך ככל האפשר. הסיבה לכך היא שהדגם סופח אליו את המים מהתערובת ונחלש או מתפורר. אין חשיבות הנדסית לחוזק הבטון במהלך ניסויים אלו משום שחוזק הקרקע קטן במספר סדרי גודל מחוזק הבטון ובכל מקרה מאמצי הלחיצה המוכתבים בבדיקות שנערכו ($\sigma_n < 1.4 \text{ MPa}$) אינם משיגים את חוזק הלחיצה של הבטון (25 - 40 MPa).
- להלן מתואר מהלך הכנת הדגם באופן מעשי: על קופסאות הגזירה להיות נקיות משאריות בטון, קרקע וסלע, גריז, שמן ומים. יש לוודא שחורי הברגים בקופסאות הגזירה אינם סתומים כדי למנוע בעיות בהתקנת המדידים. האתגר הראשון הוא להעריך באיזה כיוון רצוי לנסר את מדגם הקרקע על מנת לקבל צורה רצויה שתאפשר שימוש בדגם. יש לתת דגש רב על הכיוון האנכי (הדגם עומד) ולהבטיח שמידותיו מספיקות כדי לתפוס מקום בשתי קופסאות הגזירה (תרשים 3.14).



תרשים 3.14: (a) תיאור מרחבי של גיאומטריית הדגם, (b) קופסאות הגזירה, (c) מישור תיאורטי משוער עליו תתבצע הגזירה. בתרשים 3.14 החץ המרוסק מתאר את הכנסת הדגם לקופסאות הגזירה. החצים המלאים מדגימים את כיווני כוחות הגזירה.

חשוב לאתר סדקים או התפוררויות מוקדמות במדגם כדי למנוע השפעות של מישורי חולשה או שטח חתך קטן מהמחושב בשלב הבדיקה. הניסור חייב להתבצע באופן איכותי על מנת ליצור חתך מושלם ככל האפשר עם ניצבות גבוהה בין הפאות של הדגם.

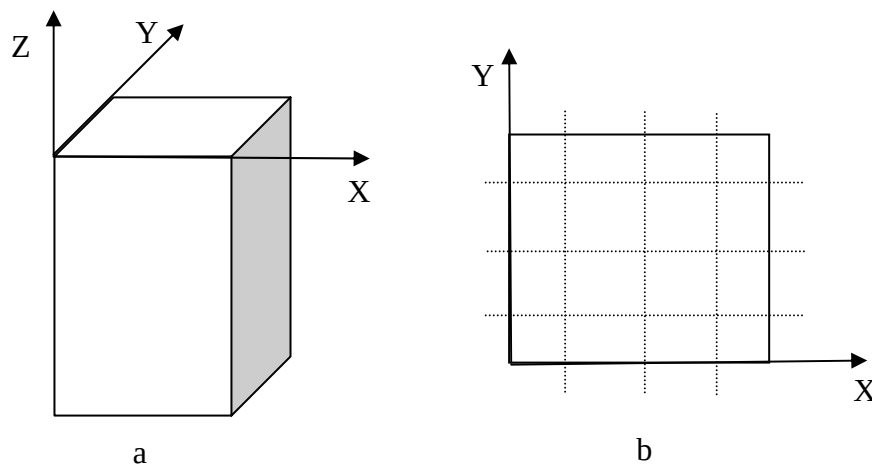
יש למקם את קופסת הגזירה התחתונה על משטח חלק ונקי ולוודא שחורי הברגים פונים למעלה. הכנת הצמנט צריכה להיעשות סמוך למועד היציקה כדי להבטיח עבירות טובה ואיכות צמנט גבוהה עם מרקם אחיד ללא גושים. ככלל ניתן להשתמש בצמנט פורטלנד רגיל (צ.פ. 250), צמנט פורטלנד לבן או בצמנט אחר המתאים לדרישות הבדיקה או לדרישות הדגם. הצמנט מסביב לדגמי הקרקע שהוכנו מגיע

כתערובת מוכנה הנקראת MAPEFILL. יתרונה של תערובת זו טמון בעובדה שהיא מכילה אגרגטים דקים ועדינים וכן סיליקה ומשום כך תכולת המים הדרושה ליצירת תערובת עבירה נמוכה משמעותית משמוש בצמנט רגיל. היחס מים: צמנט נשאר נמוך 1: 3.5 - 4 (ליטר), הדגם אינו סופח מים ולכן אינו מתפורר. התערובת מתקשה בזמן קצר יחסית ומייצבת מהר את הדגם. יתרון נוסף הוא שניתן לבצע בדיקה תוך 48 - 72 שעות מזמן היציקה.

נפחן הכולל של שתי קופסאות גזירה הוא כ- 16 ליטר. ניתן לחשב את נפח הדגם וכך להעריך מהי כמות הצמנט הדרושה למילוי הקופסאות לאחר הכנסת הדגם. כעקרון עדיף שיישאר עודף מהצמנט המוכן ושלא ייווצר חוסר משום שאז יציקת הצמנט נעשית בהבדלי זמן ומתקבלת יציקה לא רציפה.

יוצקים את התערובת אל קופסת הגזירה התחתונה (ממלאים כחצי מגובהה). מניחים את הדגם בתוך התערובת ומאפשרים לו לשקוע לתוכה. חלק מן התערובת יעלה ויקיף את הדגם. בשלב זה יש להשגיח שהדגם ניצב ואינו נוטה לכיוון כלשהו. במידה ויש צורך מוסיפים צמנט מסביב לדגם עד לשפת הקופסה ומחליקים אותו. כעת חציו התחתון של הדגם נמצא בקופסה התחתונה ואילו חציו העליון חשוף ובולט כלפי מעלה (תמונה b 3.8). בהתאם למיומנות וללחץ הזמן ניתן לגשת ישירות לשלב הבא או להמתין לייבוש חלקי (16-24 שעות).

על מנת להגדיר במערכת את רמת המאמצים שיופעלו על הדגם בשעת הבדיקה יש צורך לחשב את שטח החתך של הדגם. במבט על הדגם הוא דו מימדי (תרשים b 3.3.4). רצוי לחשב ממוצע של שלוש מידות עבור כל מימד (באמצעות קליבר). ניתן לבצע מדידה וחישוב גם לחתכים משולשים או עגולים במידה וקיימים.



תרשים 3.15: (a) תרשים תלת מימדי סכמתי של הדגם, (b) חתכי אורך ורוחב לצורך מדידות בדגם לשם חישוב שטח החתך.

כאשר מכינים דגם רציף לגזירה יש ליצור חציצה בין קופסאות הגזירה (תרשים 3.14). מטרת החציצה למנוע זליגה והתמצקות של צמנט מקופסת הגזירה העליונה עם הצמנט בקופסת הגזירה התחתונה. לשם כך מכינים מקלקר או קרטון פרופיל (בהתאם לחתך של קופסאות הגזירה) המהווה חציצה בין קופסאות הגזירה. מידותיו החיצוניות של הפרופיל הן כשל מידותיה החיצוניות של קופסת הגזירה. המידות הפנימיות משתנות בהתאם לחתך של הדגם.

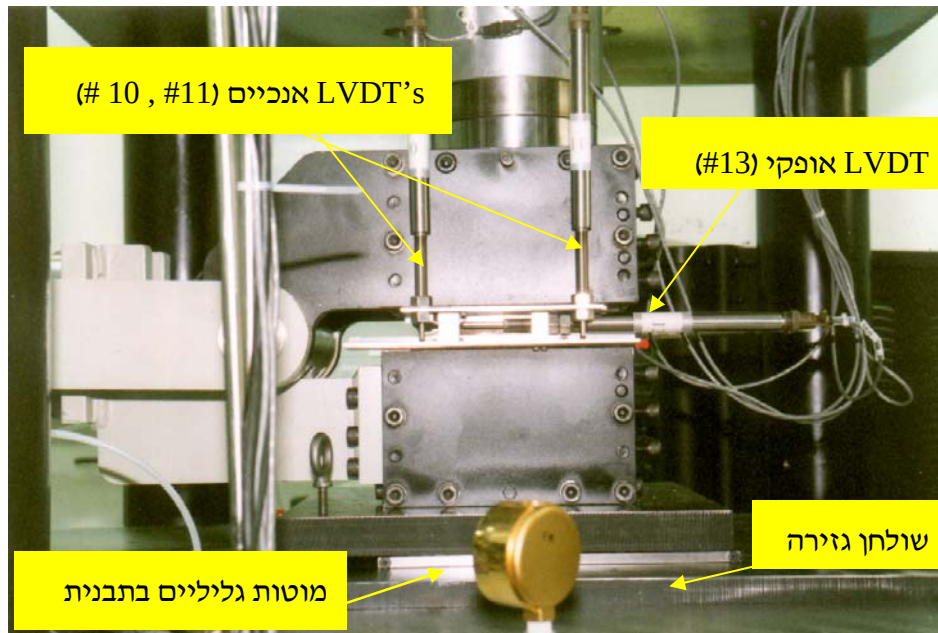
בקופסאות הגזירה ישנם חורי ברגים שתפקידם להחזיק פלטות מייצבות בזמן ההתקנה ואת תושבות המדידים בשעת הבדיקה. המרחק האנכי (h_i) בין חורי הברגים של שתי קופסאות הגזירה

משמעותי כיוון שהוא קובע את גובהן הכללי הסופי של קופסאות הגזירה. בין שולחן הגזירה לתחתית הבוכנה הנורמלית ישנו מרחק קבוע (H). גובהן של קופסאות הגזירה לפני התקנתן במערכת חייב להיות קצר מהמרחק בין שולחן הגזירה לתחתית הבוכנה הנורמלית ($h_i < H$) כדי לאפשר את הכנסת קופסאות הגזירה כך יעמדו במקומן מתחת לבוכנה הנורמלית. על מידת הגובה של הפרופיל החוצץ להיות בטווח שיאפשר שימוש בפלטה המייצבת ובמדידים תוך שמירה על מידת המקסימום: 18 mm. מתאימים את הפרופיל אל הדגם ומניחים עליו את קופסת הגזירה העליונה כך שחורי הברגים פונים כלפי מטה ונמצאים סמוך לחורי הברגים של קופסת הגזירה התחתונה. מהדקים את פלטת הייצוב אל חורי הברגים בשתי הקופסאות ומוודאים שאין תזוזה (תמונה 3.8 c). בעזרת פלס מוודאים שהקופסאות עומדות בקו אחד וקו אופקי ישר (תמונה 3.8 d). יוצקים את הצמנט על הדגם ומסביבו תוך דחיסה עדינה כדי לוודא אחיזה מושלמת וללא השארת חללים. היציקה עד שפת הקופסה והגימור הוא בהחלקה. יש לאפשר זמן ייבוש מינימלי של 48-72 שעות, באוויר.

3.3.3 התקנת דגם במכש הגזירה.

לאחר ייבוש של הצמנט ניתן להעביר את הדגם המוכן אל מכש הגזירה. בשלב זה הדגם יציב אך רגיש מאד למכות חיצוניות העשויות לסדוק או לשבור אותו. את הפלטות המייצבות משאירים מהודקות למקומן עד לשלב התקנת מדי התזוזה בו חייבים להסיר אותן ובכך להקטין את הסיכוי להרס של הדגם טרם הבדיקה. מכניסים את קופסת הגזירה התחתונה אל תיבת הגזירה התחתונה. יש להקפיד שכיוון חורי הברגים או הפלטה המייצבת במקביל לזרוע הריאקציה. מניחים את תיבת הגזירה העליונה על קופסת הגזירה העליונה ומכניסים את הפין המחבר בין זרועות הריאקציה אל תיבת הגזירה העליונה. נועלים את הפין במקומו באמצעות הדסקיות והברגים. בשלב זה יש להחליף את פלטות הייצוב בתושבות מדי התזוזה (LVDT's). קיימים שני זוגות של תושבות – זוג לכל צד של קופסאות הגזירה. הסימול עליון \ תחתון ושמאל \ ימין מהותי לצורך ההתקנה ודרוש גם לצורך הקפדה על פן בטיחותי בעבודה. בזמן בדיקה זרוע הגזירה התחתונה נעה קדימה ומאפשרת פתיחה של מד תזוזה ודגימת קריאה חיובית באשר למיקומו וטווח התנועה שביצע מתחילת הבדיקה. אם מד התזוזה מותקן הפוך המחשב מקבל קריאה שלילית ומתרחשת בריחה של הבוכנה. בניסיון לתקן זאת המחשב מעביר פקודה לבוכנה לנוע מהר יותר וגורם להכנסת זרוע מד התזוזה עד הסוף ובעצם להרס של ה LVDT.

שישה מדידים מותקנים על קופסאות הגזירה לפי הקונפיגורציה הבאה (תמונה 3.9): ארבעה מדידים הממוספרים 8,9,10 ו 11 הינם מדי תזוזה נורמלית המותקנים בציר אנכי. המדידים שמספריהם 12 ו 13 הם מדי תזוזה אופקית – גזירה (תמונה 3.9). לכל מדיד טווח תנועה המכויל ומוגדר בנפרד. רצוי למקם את המדיד באמצע הטווח אף על פי שהגעה לגבולות הטווח המוגדר איננה מושגת בעיקר משום שזהו טווח תנועה גדול מידי לתנועות גזירה (תקן ASTM-D3080-90 קובע שתזוזה של 5 מ"מ נחשבת כסיום משביע רצון של בדיקת גזירה ישירה) או לביצוע העמסה והרפיה נורמלית. חיווי באשר למיקומו היחסי של המדיד ניתן לראות ערוצים בממשק ההפעלה (Interface Panel) של המערכת. המדידים מחוויים אל ממשק ההפעלה באמצעות כבלים בעלי מחברים ייעודיים. חשוב להקפיד על חיבור נכון וטוב בין המדיד לכבל המתאים שלו.



תמונה 3.9 : קונפיגורציית התקנה של מדי תזוזה LVDT's עבור בדיקת גזירה ישירה.

בשלב זה יש להחליק את שולחן הגזירה אל מתחת לבוכנה הנורמלית. את קופסאות הגזירה יש למקם ביחס לפין המרכזי של בוכנת הלחיצה. הנמכת בוכנת הלחיצה והחדרת פין המרכזי אל המגרעת בתיבת הגזירה העליונה נעשית בשליטה של מעגל התזוזה. יש להגיע למצב של יצירת מגע ראשוני בין הבוכנה הנורמלית לקופסת הגזירה העליונה. רצוי לשחרר (unc clamp) את בוכנת הגזירה טרם הורדת הבוכנה הנורמלית כדי להימנע מבניית כוחות מתיחה בזרועות הריאקציה כך שבבוכנת הגזירה יתפתח כוח שעשוי לגרום גזירה בלתי נשלטת של הדגם. בסיום תהליך זה יש לנעול את הבוכנות (clamp).

3.3.4 כתיבת בדיקה.

מהלך הבדיקה נקבע באמצעות כתיבת מספר שלבים (segments) המופרדים זה מזה. כתיבת השלבים ועריכתם מתבצעת באמצעות תכנת TerraTest™ version 6.03. פעולות המתאפשרות באמצעות כתיבת כל שלב מתייחסות לכל אחת מן הבוכנות: האנכית - נורמלית או אופקית - גזירה. טבלה 3.4 מציגה את מרחב הפעולות הניתנות לכתיבה וביצוע באמצעות המערכת. כמצוין בטבלה מספר השלבים (Segments) אינו מוגבל. סדר השלבים נקבע ע"י מתכנן הבדיקה בהתאם לדרישות הבדיקה. באופן מעשי לאחר כל סגמנט ניתן להמשיך לסגמנט הבא באופן מיידי ואוטומטי (proceed) או לעצור ולהכתיב המשך באישור המפעיל (pause).

להלן מספר דוגמאות לכתיבת סגמנטים באמצעות תכנת ההפעלה עבור כל בוכנה:

1. סגמנט העמסה או פריקה אנכית בבקרת עומס: $\sigma_n = 100 \text{ psi} \rightarrow \pm 1 \text{ psi/sec}$
2. סגמנט העמסה או פריקה אנכית בבקרת תזוזה: $\Delta V = 100 \text{ mil} \rightarrow \pm 1 \text{ mil/sec}$
3. סגמנט גזירה (קדימה או אחורה) בבקרת תזוזה: $\Delta u = 200 \text{ mil} \rightarrow \pm 1 \text{ mil/sec}$

מעגל שליטה	בוכנה		מספר סגמנטים
	גזירה	נורמלית	
עומס	לא פעיל	הגברה או הפחתה עד לערך σ_n קבוע, על ידי תזוזות קטנות של psi/sec	בלתי מוגבל
תזוזה	קדימה או אחורה עד לערך Δu קבוע, על ידי תזוזות קטנות של mil/sec	למעלה או למטה עד לערך Δv קבוע, על ידי תזוזות קטנות של mil/sec	בלתי מוגבל

טבלה מס' 3.4: קשרי הגומלין בין מעגלי הבקרה, הבוכנה הנורמלית ובוכנת הגזירה.

3.3.5 שיטת בקרה.

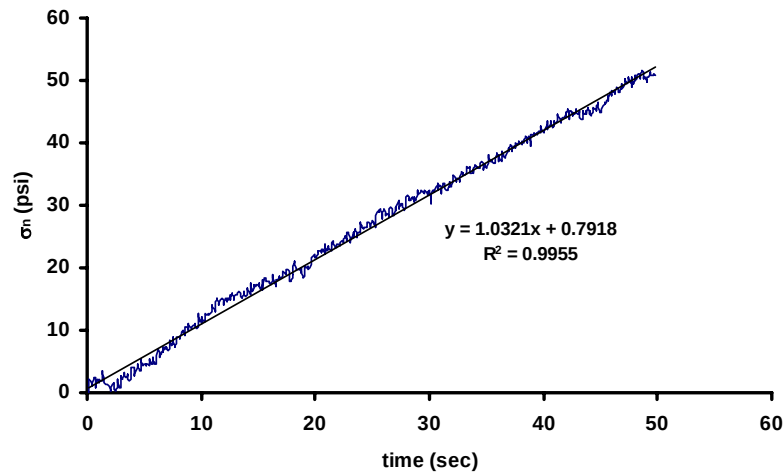
השליטה בבוכנות הפועלות במערכת יכולה להיעשות בשני מעגלים נפרדים. הבוכנה הנורמלית יכולה לפעול בבקרת תזוזה או בקרת עומס. בוכנת הגזירה יכולה לפעול (כרגע) בבקרת תזוזה בלבד. המשמעות של פעולת בוכנה בשליטת מעגל עומס היא שהבוכנה יכולה להעלות או להוריד כוח בקצב קבוע או לשמור על ערך קבוע של כוח למשך זמן מוגדר. המשמעות של פעולת בוכנה בשליטת מעגל תזוזה היא שהבוכנה יכולה לנוע בקצב קבוע או לשמור על מיקום קבוע למשך זמן מוגדר. פעולת הבוכנות מבוקרת כל העת באמצעות מערכת בקרת סרוו במעגל סגור. בקצות בוכנת הלחיצה ובוכנת הגזירה במערכת לבדיקות גזירה ישירה, מותקנים מדי עומס מסוג Strain-gage load cells. מדי מעוות אלו משמשים כמתמרים (Transducers) הממירים את העומס הפועל עליהם לאותות חשמליים (יחידות חשמליות ברות מדידה). כאשר מופעל עומס בבוכנה המעוות משנה את התנגדותו החשמלית של ה-strain gage באופן פרופורציונאלי לכוח. מידע זה עובר במערכת בצורה מחזורית ומאפשר לבוכנות לתקן את השגיאה שנוצרה בעקבות הוספת או גריעת כוח. כאשר הבוכנה נתונה לשליטה של מעגל עומס. כאשר בוכנה נתונה לשליטה של מעגל התזוזה מיקום זרוע הבוכנה בתוך גוף הבוכנה מנוטר כל העת על ידי סיב אופטי שמותקן בתוכה.

3.3.6 כיול.

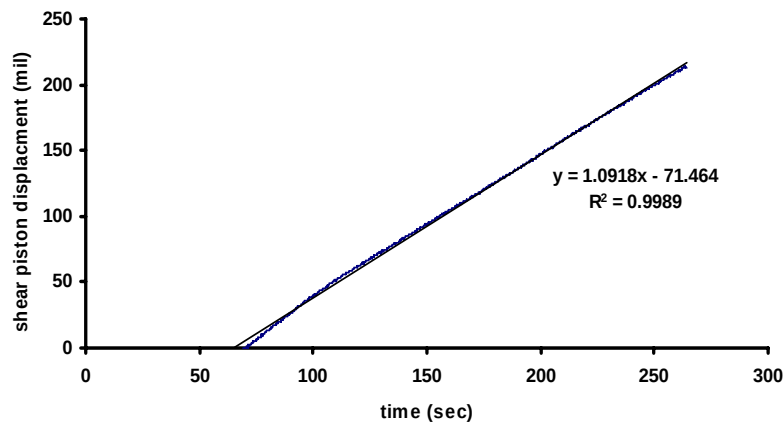
על פי הגדרות היצרן במהלך בניית המערכת בוצע כיול של מינימום 2 נקודות (point calibration) עבור מדי העומס (normal / shear load cell). עבור מדי התזוזה בוצע כיול על כל הטווח (full scale). הכיול מבוסס על היחס בין כוח ליחידת וולט $[\text{lb/volt}]$ או על היחס בין יחידת אורך ליחידת וולט $[\text{mil/volt}]$ לפני כל בדיקה נתוני הכיול נבדקים כדי לוודא התאמה מלאה בין כל רכיב (Load cell / LVDT's) לכיול המתאים לו. במהלך העבודה בוצע כיול נוסף של המדידים האנכיים ובוכנת הלחיצה. תוצאות הכיול תאמו את הכיול של היצרן.

3.3.7 בקרת איכות.

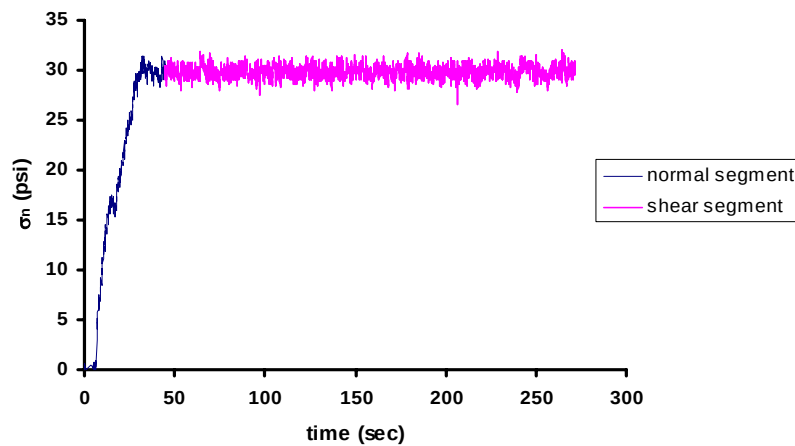
התנהגות הבוכנות תלויה בהגדרות שניתנו בשלב כתיבת הבדיקה ובניית ה segments השונים כמתואר בסעיף 3.3.4. ניתן לבחון את דיוק ואיכות פעולת המערכת על ידי תיאור גרפי של מהלך סגמנט גזירה או לחיצה ביחס לזמן :



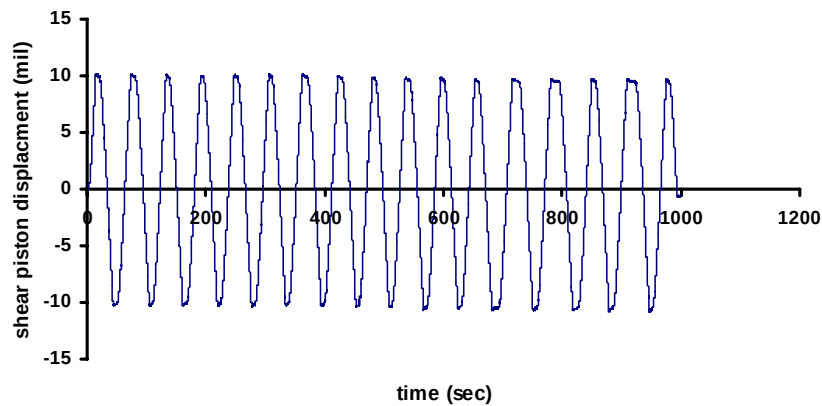
תרשים 3.16 : עלייה במאמץ הנורמלי כפונקציה של הזמן, עבור segment 1 : 1 psi/sec (בדיקה AT14).



תרשים 3.17 : התקדמות בוכנת הגזירה כפונקציה של הזמן עבור segment 2 (בדיקה AT14).



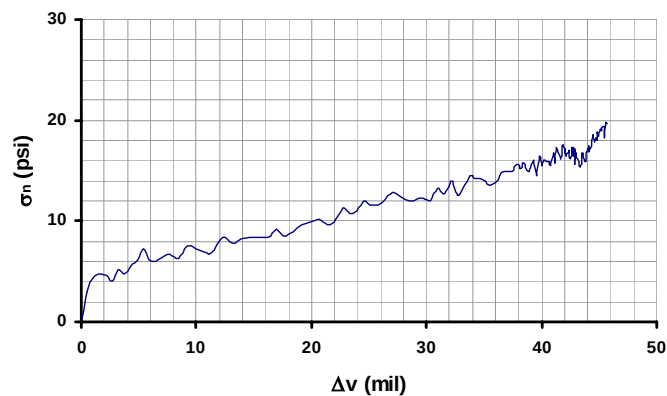
תרשים 3.18 : מאמץ נורמלי קבוע בבוכנה הנורמלית במהלך סגמנט גזירה (בדיקה AT15).



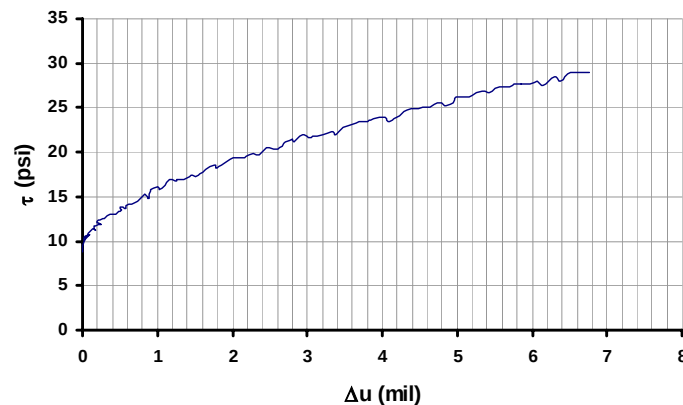
תרשים 3.19: תדירות התנועה של בוכנת הגזירה בעת בדיקת גזירה מחזורית מונוטונית (בדיקה AT7).

3.3.8 רזולוציה.

כרטיס הדגימה המותקן במערכת הוא של 16-bit ותדירות הדגימה (Effective sampling frequency) 10 Hz. להלן תרשימים המתארים את הרזולוציה הגבוהה המתקבלת במהלך סגמנטים המתרחשים בזמן בדיקה:



תרשים 3.20: רזולוציית דגימה עבור Normal Segment 150 נקודות דגימה (בדיקה AT15).



תרשים 3.21: רזולוציית דגימה עבור Shear Segment 100 נקודות דגימה (בדיקה AT17).

3.4 תכונות מכניות של הקרקע.

חקר התכונות המכניות של קרקע מתבסס על הפעלת מאמצים על דגם קרקע וניטור התזוזות והדפורמציות המתפתחות בדגם בתגובה למאמצים הפועלים עליו. ניתוח התנהגות הדגם בעת הפעלת המאמצים והתפתחות הדפורמציות מאפשר הערכה כמותית של הפרמטרים האלסטיים של הקרקע על ידי שימוש במספר קשרים מתורת החוזק ותורת האלסטיות. קשרים אלו מבוססים על חוק הוק המוכלל המתייחס לרוב לחומרים שהינם רציפים, הומוגניים, איזוטרופיים, לינאריים ואלסטיים. קרקעות לעומת זאת שונות מאד באופיין מחומרים אלו. מטבעה הקרקע היא חומר הטרונגי, לא רציף ואנאיזוטרופי. מאפיינים אלו מקשים על הגדרת תחום בו הקרקע מתנהגת באופן אלסטי ואו פלסטי. עם זאת, ברקע תהליך תכנון הבדיקות, היישום שלהן ועיבוד הנתונים קיימת ההנחה שהקרקע הנבדקת הינה איזוטרופית, הומוגנית, אלסטית ומתנהגת באופן לינארי. הנחה זו נעשית לצורך טיפול בקשרי מאמץ – מעוות המתפתחים בחומר בעת ביצוע הבדיקות שיתוארו בהמשך. התכונות המכניות וההתנהגות המכנית של שני טיפוסים הקרקע SP-SM ו SP-SC נחקרו באמצעות שימוש במערכת לבדיקות גזירה ישירה שתוארה בסעיף 3.3. להלן אפיון הבדיקות שבוצעו במכשיר הגזירה והגדרת הפרמטרים עבור בדיקות אלו.

3.4.1 העמסה חד צירית.

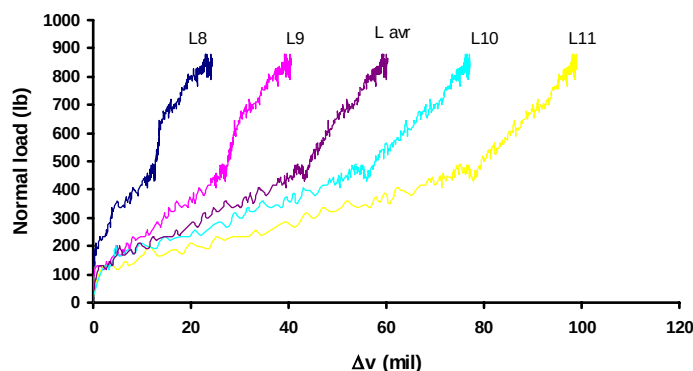
התנהגות הקרקע תחת מאמצי לחיצה ניתנת להערכה באמצעות העמסה חד צירית. החשיבות של הערכת חוזק הלחיצה קשורה להגדרת תחום מאמצים נורמלים בהם הקרקע אינה נכשלת כיוון שבדיקות גזירה ישירה תלויות באופן ישיר בעוצמת המאמץ הנורמלי הפועל על הדגם בעת הגזירה. הלחיצה מתבצעת באמצעות הבוכנה האנכית כאשר היא נתונה לשליטת מעגל עומס. מפעילים מאמץ נורמלי (σ_n) על דגם הקרקע הנתון בקופסאות הגזירה על ידי הכתבת סגמנט העמסה נורמלית עד לערך המטרה של המאמץ הנורמלי: $x \text{ psi (constant)} \rightarrow 1 \text{ psi/sec}; \sigma_n$. במהלך ההעמסה הנורמלית ארבעה מדי תזוזה אנכיים (LVDT's 8,9,10,11) מנטרים את התזוזה האנכית המתארת את התקצרות או התארכות הדגם בציר האנכי (Δv). ערך התזוזה הממוצעת של ארבעת המדידים האנכיים נתון על ידי:

$$\Delta v = \frac{\sum LVDT_{8,9,10,11}}{4} \quad [3.35]$$

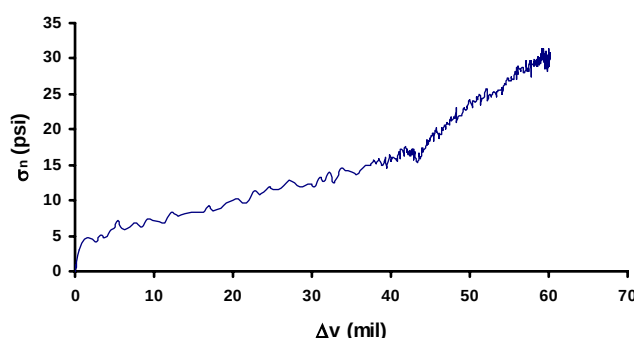
כאשר,

$\sum LVDT_{8,9,10,11}$ - סכום התזוזות הנרשמות במדי התזוזה האנכיים.

תרשים 3.22 מציג תגובה של ארבעה מדי תזוזה נורמלית המוצמדים לדגם מסוים של קרקע. השוני עשוי לנבוע מחוסר אחידות של המישור העליון בדגם או בשל הבדלים בדחיסה של הדגם באזורים שונים. את מהלך ההעמסה הנורמלית ניתן להציג במרחב של מאמץ נורמלי (σ_n) כנגד תזוזה אנכית (Δv) ממוצעת (משוואה 3.35) כמוצג בתרשים 3.23.



תרשים 3.22: התנהגות מדי התזוזה האנכיים בעת עלייה בכוח הנורמלי.



תרשים 3.23: תזוזה אנכית ממוצעת כנגד מאמץ נורמלי בעת העמסה חד צירית.

דרגת הדחיסה של הקרקע.

קרקע נחשבת כדחוסה נורמלית (Normally Consolidated, NC) אם העומס הנוכחי הפועל עליה הוא הגבוה ביותר שקרקע זו חוותה אי פעם. כאשר היסטוריית המאמצים מצביעה על כך שהקרקע חוותה בעבר עומס גבוה מהעומס הנוכחי אזי הקרקע נחשבת טרום - דחוסה (Over Consolidated, OC). יחס טרום – הדחיסה, OCR – Over Consolidation Ratio מוגדר כך:

$$OCR = \frac{p'_c}{p'_0} \quad [3.36]$$

כאשר,

P'_c – לחץ אפקטיבי מקסימלי שפעל על הקרקע בעבר.

P'_0 – לחץ אפקטיבי נוכחי.

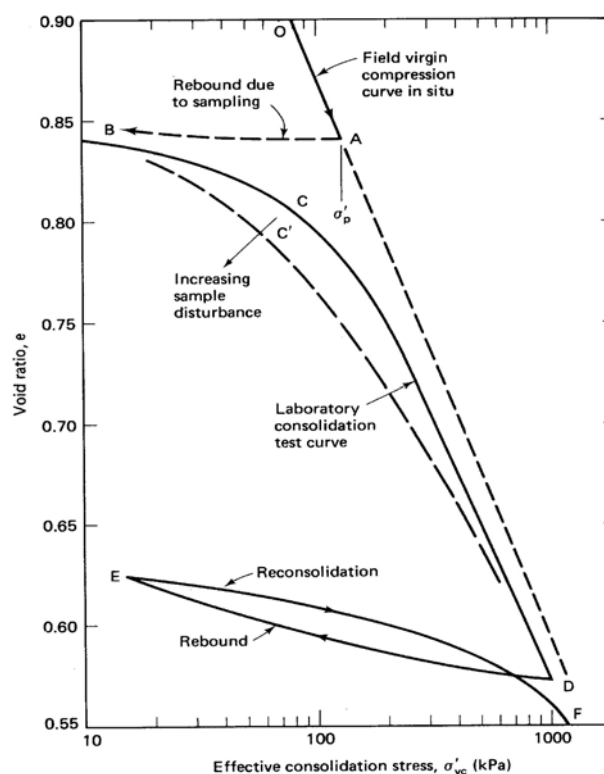
לקרקע דחוסה נורמלית יש כמובן ערך $OCR = 1$.

קרקעות שערך ה $OCR > 1$, ונע בין 1-3, נחשבות ככאלה שעברו טרום –דחיסה קלה.

קרקעות שערך ה $OCR > 1$, ונע בין 6-8, נחשבות ככאלה שעברו טרום –דחיסה משמעותית מאד.

$OCR < 1$, מאפיין קרקעות שאינן דחוסות או תת –דחוסות (Underconsolidated) למשל קרקעות צעירות מבחינת גיל ההשקעה שלהן. דוגמה לעקומת קונסולידציה המתארת באופן גרפי את השינוי במנת

החללים (בסקלה אריתמטית) כתלות במאמץ הנורמלי האפקטיבי (בסקלה לוגריתמית) מובאת בתרשים 3.24 להלן:



תרשים 3.24: עקומת קונסולידציה המתקבלת בבדיקת מעבדה בהשוואה לעקומת דחיסת הקרקע בשדה (Holtz and Kovacs, 1981).

באמצעות המערכת של TerraTek Inc. ניתן להעריך את מהלך דחיסת הקרקע בהתבסס על סגמנט לחיצה המתבצע כסגמנט העמסה חד צירית. יש לציין מספר הבדלים משמעותיים בין בדיקת קונסולידציה לבדיקת לחיצה המתבצעת במערכת לבדיקות גזירה ישירה:

- אין ניקוז של מי נקבים (הדגם אינו טבול במים ותכולת הרטיבות שלו כ-2%)
- משך הפעלת המאמץ הנורמלי קצר מאד ביחס לבדיקת קונסולידציה
- המאמץ הנורמלי עולה בקצב קבוע ונשאר על ערך קבוע אחד במשך הבדיקה

במהלך ההעמסה הנורמלית חלה התקצרות של דגם הקרקע בציר האנכי. באמצעות מספר משוואות מעקרוניות הקונסולידציה ניתן לבטא את המאמץ הנורמלי הפועל על הדגם ואת התקצרות הדגם במונחים של לחץ אפקטיבי (σ'_n) ומנת חללים (e). ההתקצרות נמדדת באמצעות מדי התזוזה האנכיים ביחס לגובה התחלתי של הדגם הנמדד לפני תחילת הלחיצה בין שני תושבות ה LVDT's כמתואר בתרשים 3.30 בהמשך. השינוי במנת החללים קשור בשינוי הגובה של הדגם באופן הבא:

$$\frac{\Delta h}{H_0} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad [3.37]$$

כאשר,

Δh - מידת התקצרות הדגם בציר האנכי .

H_0 - המרחק בין תושבות מדי התזוזה האנכיים טרם הפעלת המאמץ הנורמלי.

Δe - השינוי במנת החללים של הדגם.

e_0 – מנת החללים של הקרקע.

וערכו של e_0 מחושב עבור קרקע במצב יבש באמצעות המשוואה הבאה :

$$e_0 = \frac{G_s \times \gamma_w}{\gamma_d} - 1 \quad [3.38]$$

כאשר,

G_s - משקל יחסי מוצקים (נלקח הערך 2.7).

γ_w - משקל מרחבי של מים (1000 kg/m^3).

γ_d - משקל מרחבי של הדגם במצב יבש.

כדי לעקוב באופן רציף אחר מהלך התקצרות הדגם וסגירת החללים ניתן לחשב את השינוי בגובה הדגם ברגע נתון לפי :

$$\Delta h = H_0 - \Delta V \quad [3.39]$$

כאשר,

Δh - התקצרות הדגם בציר האנכי.

H_0 - המרחק בין תושבות מדי התזוזה האנכיים טרם הפעלת המאמץ הנורמלי.

ΔV - ממוצע ההתקצרות של מדי תזוזה אנכיים.

השינוי במנת החללים ניתן לפי :

$$\Delta e = \frac{(H_0 - \Delta V) \times (1 + e_0)}{H_0} \quad [3.40]$$

כל הפרמטרים ידועים.

3.4.2 בדיקות גזירה ישירה.

בדיקות גזירה ישירה הן דרך נפוצה לקביעת חוזק הגזירה של הקרקע. חוזק הגזירה של קרקע מוגדר כהתנגדות הקרקע לכשל בגזירה. כאשר מאמץ הגזירה בנקודה על מישור מסוים במסת קרקע שווה לחוזק הגזירה של אותה קרקע יתרחש כשל באותה הנקודה. מאמץ גזירה הפועל על מישור מסוים בחומר מוגדר לפי :

$$\tau = \frac{T}{A} \quad [3.41]$$

כאשר,

τ - מאמץ גזירה.

T- כוח אופקי.

A- שטח החתך עליו פועל הכוח T.

והמאמץ הנורמלי הפועל על המישור עליו מתרחשת הגזירה מתואר כ:

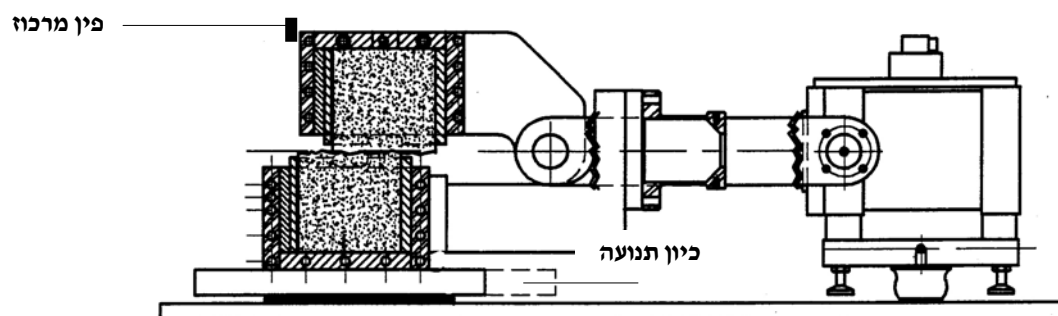
$$\sigma_n = \frac{N}{A} \quad [3.42]$$

כאשר,

σ_n - מאמץ נורמלי.

N- כוח אנכי.

במכש הגזירה בו בוצעו בדיקות הגזירה הישירה הכוח הנורמלי מועבר לקופסת הגזירה העליונה באמצעות הבוכנה הנורמלית. קופסת הגזירה העליונה מוחזקת במקומה על ידי פין המרכז של הבוכנה הנורמלית (תרשים 3.25). בוכנת הגזירה מניעה את קופסת הגזירה התחתונה ביחס לקופסת הגזירה העליונה הקבועה במקומה.



תרשים 3.25: מבט צד על בוכנת הגזירה וקופסאות הגזירה. קופסת הגזירה העליונה מקובעת למקומה וקופסת הגזירה התחתונה מקובעת אל פלטה המונחת על גלילים קשיחים ונעה על גביהם.

טרם ביצוע הבדיקה הבוכנה הנורמלית מופעלת בשליטה של מעגל התזוזה על מנת להביא למגע בין הבוכנה לקופסת הגזירה העליונה. לאחר הגעה למגע ובזמן הבדיקה, בוכנת הלחיצה מופעלת תחת שליטה של מעגל העומס ובוכנת הגזירה מופעלת בשליטת מעגל התזוזה. באופן זה ניתן לשמור על ערך מאמץ נורמלי קבוע בזמן שקצב תזוזת הגזירה נשאר קבוע גם הוא. מבחן גזירה ישירה מתבצע בשני סגמנטים המתוארים להלן:

1. סגמנט העמסה נורמלית עד לערך מאמץ נורמלי קבוע: σ_n (pause) $\rightarrow$ target σ_n ; 1 psi/sec

2. סגמנט גזירה המתבצע תחת מאמץ נורמלי קבוע: Δu (pause) $\rightarrow$ target Δu ; 1 mil/sec

מאמץ הגזירה מתפתח עם תזוזת הגזירה המתבצעת על מישור הגזירה שנוצר בדגם. תזוזת הגזירה

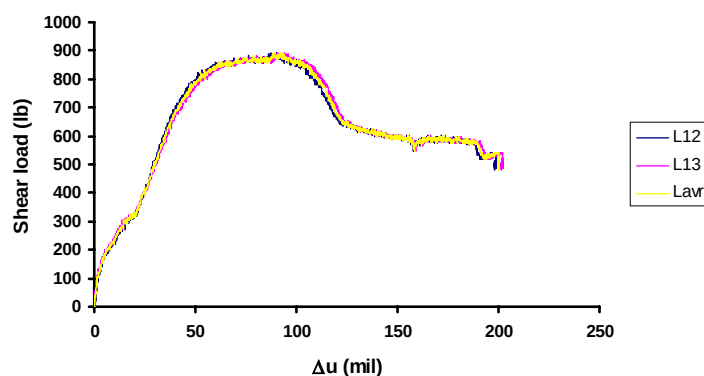
מנוטרת באמצעות שני מדי תזוזה אופקיים LVDT 12, 13 כנראה בתרשים 3.26.

ערך השינוי הממוצע של שני המדידים האופקיים נתון על ידי:

$$\Delta u = \frac{\sum LVDT_{12,13}}{2} \quad [3.43]$$

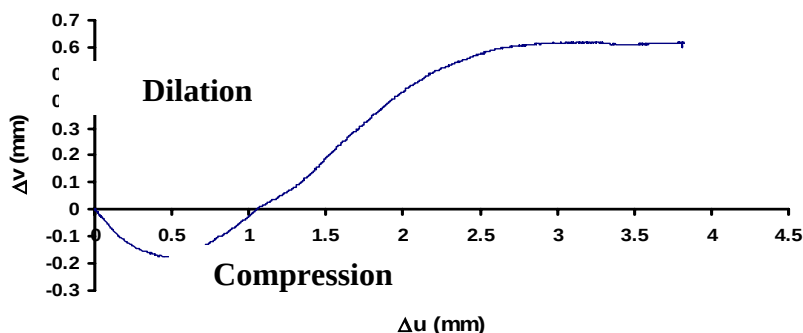
כאשר,

$\Sigma LVD T_{12,13}$ - סכום התזוזות הנרשמות במדי התזוזה האופקיים.



תרשים 3.26: התנהגות מדי תזוזה אופקיים עם התפתחות כוח הגזירה.

ניתן להציג את ההתנהגות הממוצעת של מדי התזוזה האנכיים ביחס להתנהגות ממוצעת של מדי התזוזה האופקיים במהלך סגמנט הגזירה. באופן כזה ניתן לתאר את התפיחה (דילטציה) המתרחשת במישור הנגזר בדגם. תפיחה זו נוצרת כתוצאה מסגירה או פתיחה של חללים בין גרגרי הקרקע כאשר הם נעים ומטפסים זה מעל לזה או נצמדים זה לזה בעת תנועת הגזירה. תופעה זו מתבטאת בשינויי אורך החלים בדגם בציר האנכי עם התזוזה בציר האופקי. התפיחה מתוארת במרחב של תזוזה אנכית ממוצעת (Δv) כנגד תזוזת גזירה ממוצעת (Δu) בתרשים 3.27.



תרשים 3.27: אזורי דחיסה ותפיחה המאפיינים את מישור הכשל בדגם בזמן גזירה.

בכל מבחני הגזירה הישירה שבוצעו נשמרו התנאים הבאים:

- בתחילת הבדיקות דגמי הקרקע היו רציפים.
- הבדיקות התבצעו במצב מנוקז והדגמים היו במצב יבש או עם תכולת רטיבות של עד 2-3 % עקב ספיחת המים בעת יציקת הצמנט סביבם.
- הגזירה התבצעה בקצב קבוע של 1 mil/sec.

פרמטרים מכניים של הקרקע.

ביצוע סדרת מבחני גזירה ישירה בטיפוס קרקע תחת רמות שונות של מאמץ נורמלי (σ_n) מאפשר לחזות את מעטפת הכשל של אותה קרקע. את המאמצים (σ_n, τ) שהתפתחו בבדיקות שבוצעו במערכת

לבדיקות הגזירה הישירה ניתן לתאר במונחים של מאמצים אפקטיביים שכן הבדיקות נערכו על דגמים יבשים ובמצב מנוקז. חוזק הגזירה של קרקע בכשל עבור מאמצים אפקטיביים ניתן לביטוי על ידי קריטריון הכשל של מוהר – קולומב (Mohr - Coulomb):

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \tan \phi' \quad [3.44]$$

כאשר,

c' - ערך הקוהזיה.

ϕ' - זווית החיכוך הפנימי.

σ'_n - מאמץ נורמלי אפקטיבי.

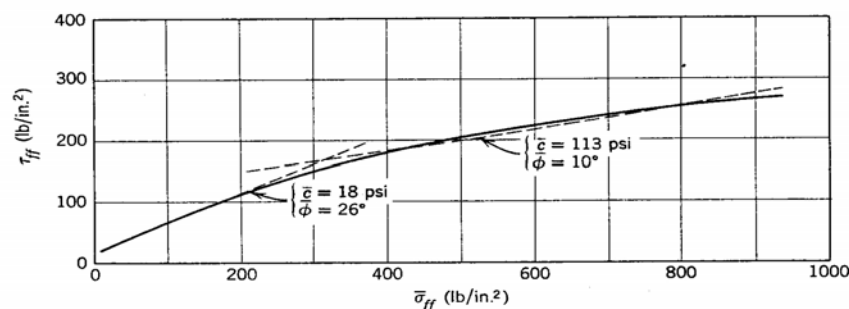
תיאור גרפי של חוזק הגזירה המקסימלי של הקרקע תחת המאמץ הנורמלי בו התבצעה הבדיקה נעשה במרחב של מאמץ גזירה ($\tau_{\max}$) כנגד מאמץ נורמלי (σ_n) עבור כל בדיקה. כל צמד $\sigma_{n1}, \tau_1, \dots, \sigma_{nn}, \tau_n$ מייצג בדיקה גזירה ישירה אחת. בקרקעות בלתי קוהזיביות כדוגמת חול ערך הקוהזיה $c'=0$ או נמוך מאד משוואה [3.44] מקבלת את הצורה:

$$\tau_f = \sigma'_n \tan \phi' \quad [3.45]$$

וערך זווית החיכוך הפנימית נתון בביטוי:

$$\phi' = \tan^{-1} \left(\frac{\tau_f}{\sigma'_n} \right) \quad [3.46]$$

ערך הקוהזיה המתקבל בבדיקות גזירה ישירה של קרקעות קוהזיביות מתואר על ידי נקודת החיתוך של קריטריון הכשל עם ציר מאמץ הגזירה (τ). ראוי לציין שתחת מאמצים נורמלים גדלים העקום עשוי לשנות את שיפועו במקטעים שונים ולכן קריטריון הכשל אינו ליניארי.



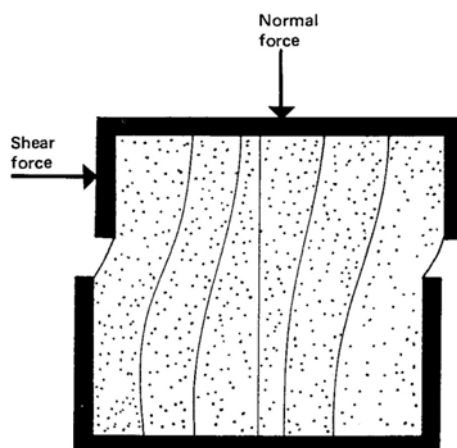
תרשים 3.28: ערכי הקוהזיה c' וזווית החיכוך הפנימית ϕ' עבור קריטריון כשל א – לינארי, (Lambe & Whitman, 1979).

בעיות וקשיים הנובעים מביצוע בדיקות גזירה ישירה במדגמי קרקע רציפים.

מספר בעיות הנובעות משיטת הביצוע וציוד הבדיקה ומאפייניה קשורות בסוג בדיקות זה:

- קושי בשליטה על ניקוז המדגם.

- התפשטות מאמצים בלתי אחידים בדגם.
- מישור הגזירה מוכתב ועלול להיות לא החלש ביותר או שאינו המישור הקריטי בשדה.
- מאמצים ראשיים עוברים רוטציה תוך כדי הגזירה ללא שליטה בכך.



תרשים 3.29: קווי מאמץ המתפשטים בדגם באופן בלתי אחיד בעת תנועת גזירה (Lambe & Whitman, 1979).

יש לציין כי המערכת לבדיקות גזירה ישירה אינה מתוכננת לבצע בדיקות במצב רווי או לאפשר בקרת ניקוז והתפתחות לחץ מי – נקבים במהלך הגזירה.

3.4.3. מודול אלסטיות של הקרקע.

את מצב המאמצים והמעוותים הפועלים על אלמנט של חומר הומוגני ואיזוטרופי ניתן לבטא באמצעות המשוואות של חוק הוק (Hooke's law) המוכלל:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad [3.47]$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$$

כאשר,

E - מודול אלסטיות של החומר.

ν - יחס פואסון של החומר.

$\sigma_{x,y,z}$ - מאמצים נורמלים בכיוונים x, y, z בהתאמה.

$\varepsilon_{x,y,z}$ - מעוותים ציריים בכיוונים x, y, z בהתאמה.

ומודול האלסטיות של החומר הוא היחס בין המאמץ הצירי למעוות הצירי (בכל כיוון):

$$E = \frac{\sigma_y}{\varepsilon_y} \quad [3.48]$$

כאשר,

σ_y - מאמץ בכיוון y.

$-\varepsilon_y$ - מעוות בכיוון y.

מודול האלסטיות של הקרקע נחקר תוך שימוש במשוואה [3.48]. מאמץ צירי (נורמלי) מופעל על דגם קרקע שנתון בקופסאות הגזירה (ראה תרשים 3.30) כאשר בוכנת הלחיצה פועלת בשליטה של מעגל העומס. במצב זה ניתן להעלות את המאמץ הצירי (σ_n) באופן הדרגתי ומבוקר. קצב עליית המאמץ הצירי נקבע ל 1 mil/sec עד לערך שהוגדר מראש. העלייה במאמץ הלחיצה גורמת להתקצרות הדגם בציר האנכי. ההתקצרות נמדדת באמצעות מדי התזוזה (LVDT's) האנכיים והמעוות בציר האנכי מחושב לפי:

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta h}{H_0} \quad [3.49]$$

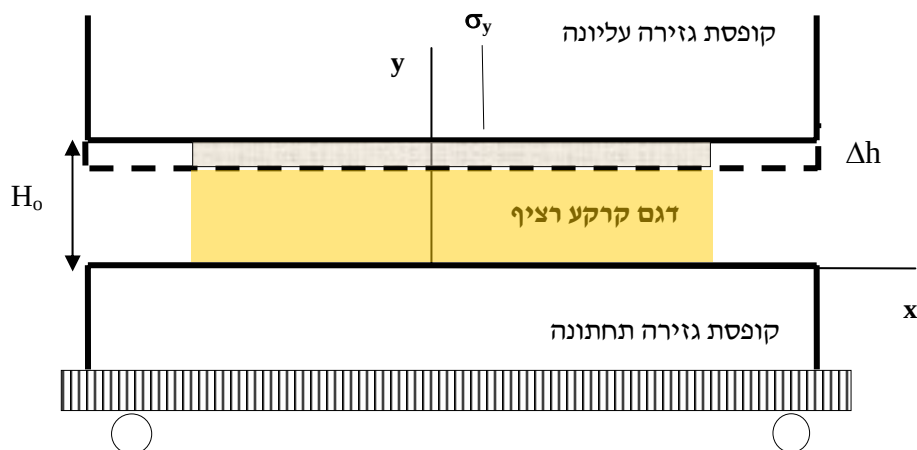
כאשר,

$-\varepsilon_y$ - מעוות צירי בכיוון y.

$-\Delta h$ - גודל ההתקצרות של הדגם בכיוון y.

H_0 - מרחק בין תושבות מדי התזוזה לפני הפעלת מאמץ צירי על הדגם.

השימוש במשוואה [3.49] בלבד לחישוב המעוות הצירי בכיוון y נובע מהעובדה שהמעוותים הציריים ($\varepsilon_x, \varepsilon_z$) בכיוונים x ו z אינם מדידים בבדיקה זו ולא מופעלים מאמצים נורמלים במרחב התלת מימדי ($\sigma_x, \sigma_z = 0$) כך שמשוואה [3.47] מבוטאת צורה חד ממדית.



תרשים 3.30 : התקצרות הדגם בציר האנכי (Δh) כתוצאה מהפעלת מאמץ נורמלי σ_y (ללא קנ"מ).

קיימת כאן ההנחה שבראשית הפעלת מאמץ הלחיצה (σ_n) על דגם הקרקע, מרבית ההתקצרות שהדגם עובר בציר האנכי קשורה בסגירת חללים והתארגנות מחודשת של חלקיקי החומר הבונים את הקרקע. בשלב זה ניתן לצפות להתנהגות לא אלסטית ולא לינארית של דגם הקרקע. על מנת להעריך באופן

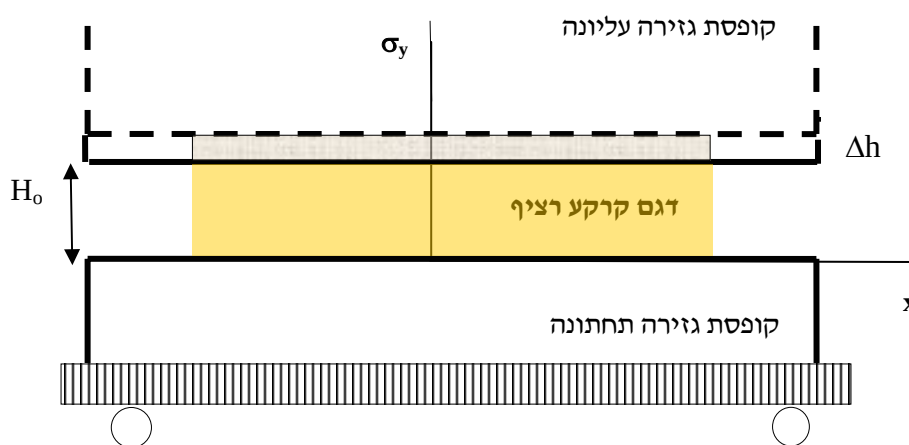
מבוקר יותר את תגובת הקרקע למאמץ לחיצה, העומס הצירי הוסר בהדרגה ובקצב דומה לזה שהועמס. סגמנט זה בוצע בשליטה של מעגל עומס. את מחזור ההעמסה וההרפיה אפשר לתאר באופן הבא:

1. סגמנט העמסה עד לערך מאמץ נורמלי קבוע: σ_n ; 1 psi/sec $\rightarrow x_1$ psi (pause)

2. סגמנט פריקה עד לערך מאמץ נורמלי קבוע: σ_n ; -1 psi/sec $\rightarrow x_2$ psi (pause)

כאשר $x_1 > x_2$.

המעוות הצירי בעת הפריקה מחושב לפי משוואה [3.49] כאשר ערכו של H_0 הוא המרחק בין תושבות מדי התזוזה האנכיים בסיום סגמנט הלחיצה ו Δh נמדד באמצעות מדי התזוזה ומבטא את התארכות הדגם בציר האנכי בתגובה להסרת העומס מן הדגם (תרשים 3.31).



תרשים 3.31 : מצב הדגם בסיום סגמנט הלחיצה והתארכותו (Δh) בציר האנכי כתוצאה מפריקת המאמץ הנורמלי σ_y (ללא קנה מידה).

3.4.4 מודול גזירה של הקרקע.

חוק הוק (Hooke's law) מגדיר את מודול הגזירה של חומרים אלסטיים, ליניאריים ורציפים באמצעות היחס בין מאמץ הגזירה למעוות הגזירה:

$$G = \frac{\tau_{xy}}{\gamma_{xy}}; \quad G = \frac{\tau_{yz}}{\gamma_{yz}}; \quad G = \frac{\tau_{zx}}{\gamma_{zx}} \quad [3.50]$$

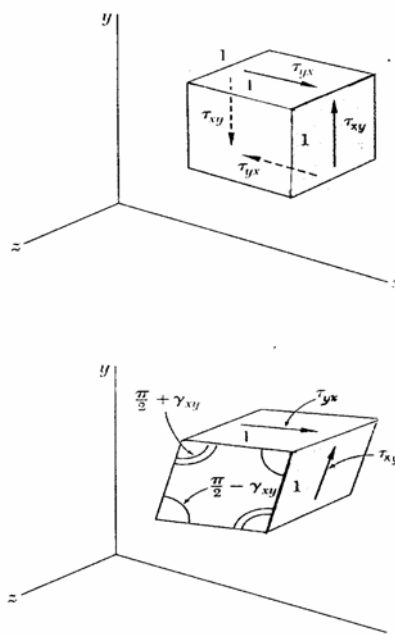
כאשר,

G - מודול הגזירה של החומר.

τ - מאמץ הגזירה הפועל בחומר.

γ - מעוות הגזירה (רדיאנים).

תרשים 3.32 ממחיש כיצד מאמצי גזירה הפועלים על חומר מביאים להתפתחות מעוות גזירה המשנה את צורתו של החומר:



תרשים 3.32: דגם קובייתי הנתון למאמצי גזירה ומעוותים המתפתחים בחומר (Beer et al., 2002).

מודול הגזירה של הקרקע מטיפוס SP-SM נחקר באמצעות מספר בדיקות גזירה מחזורית מונוטונית. בבדיקה מסוג זה בוכנת הלחיצה מופעלת בשליטה של מעגל העומס כך שדגם הקרקע נמצא תחת מאמץ נורמלי קבוע. במהלך הבדיקה בוכנת הגזירה מופעלת בשליטה של מעגל תזוזה ומכתיבים תזוזה אופקית בעלת גודל קבוע וכיוונים מנוגדים. התזוזה של בוכנת הגזירה מתרחשת בקצב קבוע (מונוטוני). כדי למנוע גזירה בלתי רצויה של דגם הקרקע, ערך התזוזה Δu המוכתב בבדיקה נקבע על מספר mils בודדים. תזוזת גזירה קטנה בדגם יוצרת מאמצי גזירה (τ) שאינם גבוהים מספיק ליצירת כשל בדגם. בתגובה למאמצים אלו הדגם משנה את צורתו כנראה בתרשים 3.34 ומתפתח מעוות גזירה אותו ניתן לחשב מהתזוזות הנמדדות במדי התזוזה האופקיים LVDT_{12,13}.

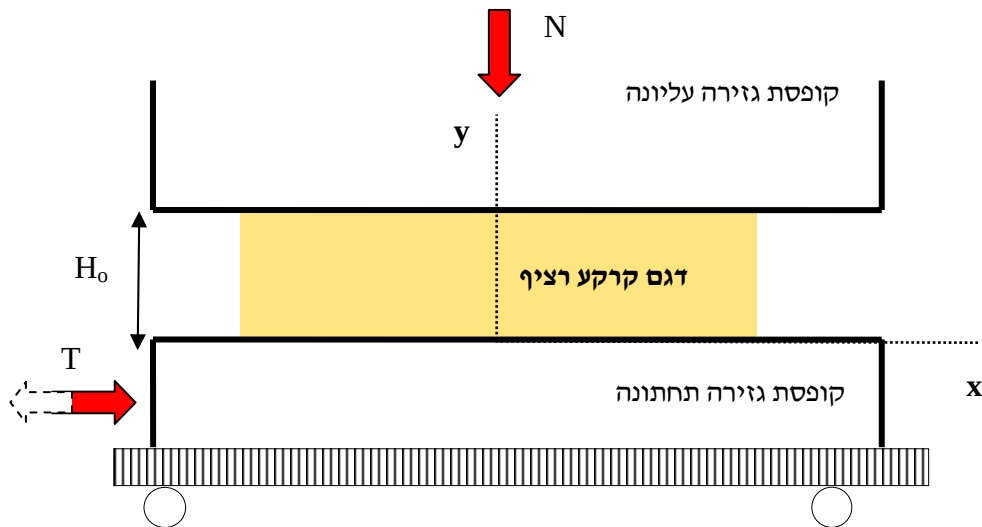
בדיקת גזירה מחזורית מונוטונית במכבש לגזירה ישירה מתבצעת במספר סגמנטים:

1. סגמנט העמסה נורמלית עד לערך מאמץ נורמלי קבוע: $x \text{ psi (pause)} \rightarrow x \text{ psi/sec}$; σ_n
2. סגמנט גזירה המתבצע תחת מאמץ נורמלי קבוע: $x \text{ mil (proceed)} \rightarrow x \text{ mil/sec}$; Δu
3. סגמנט גזירה המתבצע תחת מאמץ נורמלי קבוע: $x \text{ mil (proceed)} \rightarrow x \text{ mil/sec}$; $\Delta u \cdot -1$
4. סגמנט גזירה המתבצע תחת מאמץ נורמלי קבוע: $x \text{ mil (proceed)} \rightarrow x \text{ mil/sec}$; Δu
5. סגמנט גזירה המתבצע תחת מאמץ נורמלי קבוע: $x \text{ mil (proceed)} \rightarrow x \text{ mil/sec}$; $\Delta u \cdot -1$
- ...
- ...
- n. סגמנט גזירה המתבצע תחת מאמץ נורמלי קבוע: $x \text{ mil (pause)} \rightarrow x \text{ mil/sec}$; Δu

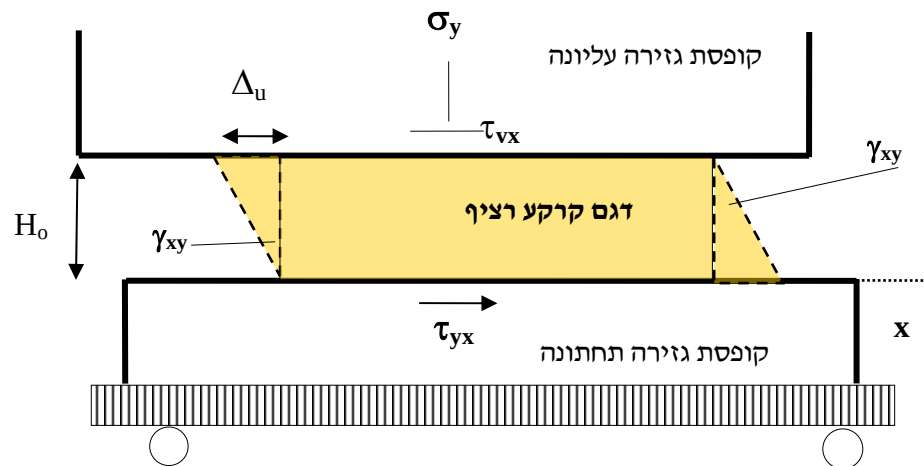
כאשר המאמץ הנורמלי מתייצב על ערך קבוע (סגמנט 1), בוכנת הגזירה דוחפת קדימה את קופסת הגזירה התחתונה ובדגם מתפתחים מאמצי גזירה (סגמנט 2). בסיומו של סגמנט 2 המערכת נותנת

פקודה לבוכנת הגזירה לשנות כיוון ולנוע בכיוון פעולה הפוך מזה של סגמנט 2, לפיכך בסגמנט 3 בוכנת הגזירה מושכת את קופסת הגזירה התחתונה. הסימן (-) המוצב לפני קצב התזוזה המוכתב בסגמנט 3 וסגמנט 5 מתאר את השינוי בכיוון הפעולה של בוכנת הגזירה. סגמנט 4 מתאר שוב היפוך במגמת התנועה של בוכנת הגזירה (+) ולפיכך היא דוחפת את קופסת הגזירה התחתונה. סגמנטים 2, 3 ו 4 מתארים מחזור גזירה שלם. בהמשך כל שני סגמנטים בעלי סימנים הפוכים מתארים מחזור שלם. מספר המחזורים המבוצעים בבדיקה נקבע על ידי מספר הסגמנטים הבונים את הטסט. סגמנט הגזירה האחרון בבדיקה מיוצג על ידי n שהוא מספר הסגמנטים המצטבר.

התרשימים הבאים מתארים את מצב הדגם והמערכת עם תחילת הבדיקה ובמהלכה:



תרשים 3.33: תיאור סכמתי של דגם קרקע רציף הנתון בקופסאות הגזירה והכוחות הפועלים במערכת בעת בדיקת גזירה מחזורית מונוטונית (ללא קנה מידה).



תרשים 3.34: מצב דגם קרקע בסיום סגמנט הגזירה הראשון בעת בדיקת גזירה מחזורית מונוטונית (ללא קנה מידה).

בתרשים 3.33 ו N ו T מתארים את הכוח הנורמלי ואת כוח הגזירה הפועלים על הדגם בהתאמה.

H_0 מתאר את הגובה הראשוני בין התושבות של מדי התזוזה לאחר סגמנט 1 ולפני סגמנט 2.

x, y הם צירים מרחביים דמיוניים לצורך קביעת כיוונים. בתרשים 3.34 ניתן לראות כי בעקבות התזוזה Δu קופסת הגזירה התחתונה נעה ימינה ובדגם מתפתח מעוות גזירה אותו ניתן לתאר על ידי הזווית γ באמצעות היחס :

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta u}{H_o} \right) \quad [3.51]$$

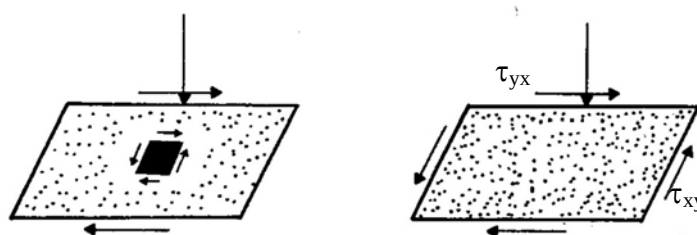
כאשר,

γ - מעוות הגזירה (רדיאנים).

Δu - גודל תזוזת הגזירה.

H_o - המרחק בין התושבות של מדי התזוזה האנכיים (LVDT's) לפני סגמנט הגזירה הראשון.

חשוב לציין כי בעת בדיקת גזירה מחזורית מונוטונית מאמצי גזירה אינם מתפתחים על פני המישור החופשי האנכי שבין קופסאות הגזירה ($\tau_{xy} = 0$). עם זאת על פני מישורים מקבילים לחיצוניים בתוך החומר מתפתחים מאמצי גזירה כמודגם בתרשים 3.35 ולפיכך ניתן להשתמש בקשר שבין מאמץ הגזירה למעוות הגזירה.



תרשים 3.35: מודל סכמתי המתאר מאמצי גזירה על מישורים חיצוניים ופנימיים בדגם (Das, 1983).

בהתבסס על משוואה [3.50] נתאר את מודול הגזירה האקוויוולנטי של הקרקע באמצעות :

$$G^* = \frac{\tau_{yx}}{\gamma_{xy}} \quad [3.52]$$

כאשר,

G^* - מודול גזירה אקוויוולנטי של הקרקע, בהתחשב במגבלות תנאי השפה ($\tau_{yx} = 0$)

τ - מאמץ הגזירה הפועל בדגם בעת הגזירה המחזורית.

γ - מעוות הגזירה (רדיאנים) המתפתח בדגם בעת הגזירה המחזורית.

תיקון התוצאות.

המאמץ הנורמלי הפועל על הדגם ותנועת הגזירה המחזורית מביאים לסגירת הדגם והתקצרותו בציר האנכי במהלך הבדיקה כולה. תופעה זו מודגשת מאד עם התפתחות הדילטציה. ערך מעוות הגזירה γ עשוי להיות מושפע מהתקצרות זו משום שמידת האורך של האזור הנתון לתנועות הגזירה דומיננטית

מאד בקביעת הזווית γ כפי שהיא מחושבת במשוואה [3.52]. את התיקון עושים ביחס לאורך H_0 כאשר ערכו נקבע באופן רצוף בהתאם להתקצרות מדי התזוזה האנכיים :

$$H'_0 = H_0 - \Delta V \quad [3.53]$$

כאשר,

H'_0 – אורך מתוקן ביחס להתקצרות הדגם.

H_0 – מידת האורך בין תושבות מדי התזוזה האנכיים לפני סגמנט הגזירה הראשון.

ΔV – התקצרות ממוצעת של מדי התזוזה האנכיים בכל רגע נתון במהלך הבדיקה.

מעוות הגזירה לאחר תיקון ניתן בביטוי :

$$\gamma' = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta u}{H_0 - \Delta v} \right) \quad [3.54]$$

ומודול הגזירה מתוקן בהתאם לפי γ' :

$$G' = \frac{\tau_{yx}}{\gamma'_{xy}} \quad [3.55]$$

כל הפרמטרים ידועים.

פרק 4 – אפיון גיאומכני של חתך הקרקע.

4.1 החתך באזור כרם שלום.

חלקו העליון של החתך בשטח המחקר מאופיין בהופעה של שכבות קרקע חול ולס לסירוגין. יחידות הקרקע הנחקרות חשופות בפני השטח באזור כרם שלום ונחשפות גם בקירות המחפורות שנוצרו לצורך הכרת חתך הקרקע בשטח המחקר. עובי השכבות אינו אחיד ובאופן כללי אינו עולה על מספר מטרים לשכבה. לוגים של קידוחים 1-5 המגיעים לעומק 20 מטר מתחת לפני הקרקע בשטח המחקר, מראים שינויים בעובי ובהשתרעות השכבות במרחב של תת – הקרקע, הן בכיוון אופקי והן בכיוון אנכי. חתכים גיאולוגיים המבוססים על לוגים של קידוחים רבים שנקדחו בכל דרום רצועת עזה כגון קידוחי רעם (טולמץ, 1991), מוצגים בתרשימים 1.3 ו 1.4 בפרק המבוא ומראים את השינויים הללו במרחב גדול יותר. אפיון טיפוסי הקרקע השונים שנמצאו בחתך מבוסס על בדיקות מעבדה שבוצעו בחומר שהוצא מן הקידוחים וכללו: אנליזת התפלגות גודל גרגר, גבולות הסומך (בחתכים מצוין ערך אינדקס הפלסטיות בלבד), משקל מרחבי יבש ותכולת רטיבות. בדיקות In-situ שנערכו בשטח המחקר ובהן בדיקות החדרה סטנדרטית SPT ובדיקות פרסיומטר PMT, מאפיינות את החומר מבחינה מכנית ונותנות אינדיקציה לגבי התכונות האלסטיות. יש לציין שערכי מודול האלסטיות (E_p) של הקרקע שנתקבלו בבדיקת הפרסיומטר מבוססים על ההנחה שיחס פואסון עבור הקרקע הוא 0.33 (גורוצקי, 2002). חישוב מעודכן בהסתמך על יחס פואסון דינמי (ν_d) אשר התקבל בבדיקות מהירות גלים in-situ משנה במעט את ערכי E_p . תוצאות סקר מהירויות סיסמיות מפורטות בסעיף 4.3. תוצאות הבדיקות שנערכו בשדה ובמעבדה מוצגות בצמוד לחתכים ולמאפיינים הליטולוגיים של הקרקע בבורות הקידוחים. לוגים של בורות הקידוחים באזור כרם שלום מופיעים בתרשימים 4.1 – 4.5. מיקום מרחבי של הקידוחים מופיע בתרשים 3.1.

מבחינת הגדרת סמלי קרקע נמצאו בחתך מספר טיפוסים שלעיתים מופיעים כבעלי דרוג חסר (בעלי הסימן SP):

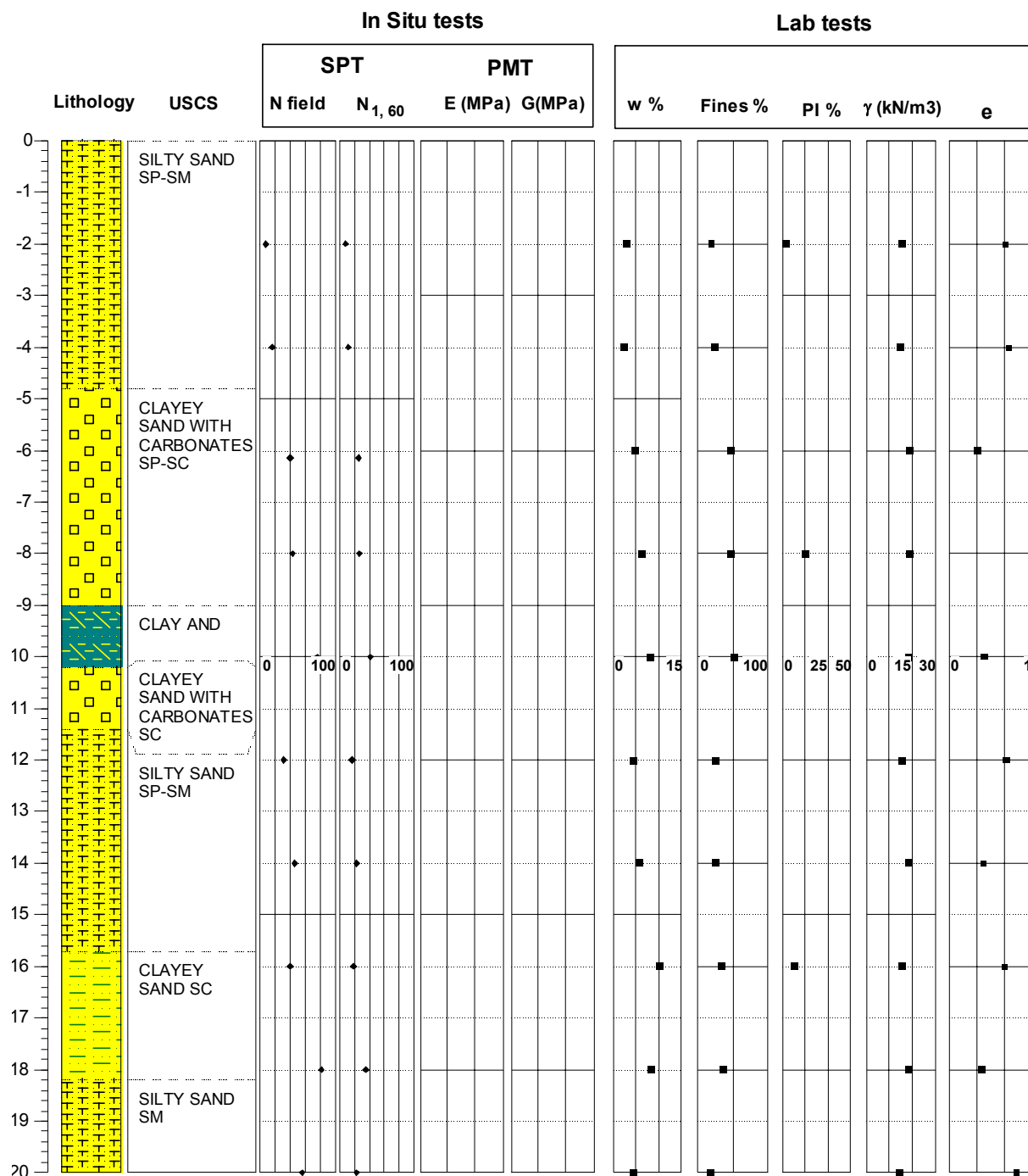
SM - חול סילטי ($Fines \leq 20\%$), לא פלסטי.

SC - חול חרסיתי ($Fines \geq 33\%$), פלסטיות נמוכה.

CL - חרסית עם אחוז מסוים של חול, פלסטיות נמוכה.

הניפוי המכני מראה כי שני הטיפוסים האחרונים (CL ו SC) מכילים כ 3-5% של תלכדי קרבונט מזוותים מהמקטע שבין 2.0 – 4.25 מילמטר. תלכידים אלה מפוררים בקרקע באופן אקראי ללא קשר לגודל הגרגר או מאפייני התדקקות בחתך. שלושת טיפוסי הקרקע והמאפיינים הליטולוגיים נמצאו גם בסקר קרקע שנערך סמוך יותר לעיר רפיח (הרשער, 1997) ולפיכך קיים דמיון בין חתכי הקרקע שנערכו בקידוחי רפיח לבין החתכים המוצגים בעבודה זו.

אתר כרם שלום; קידוח #1

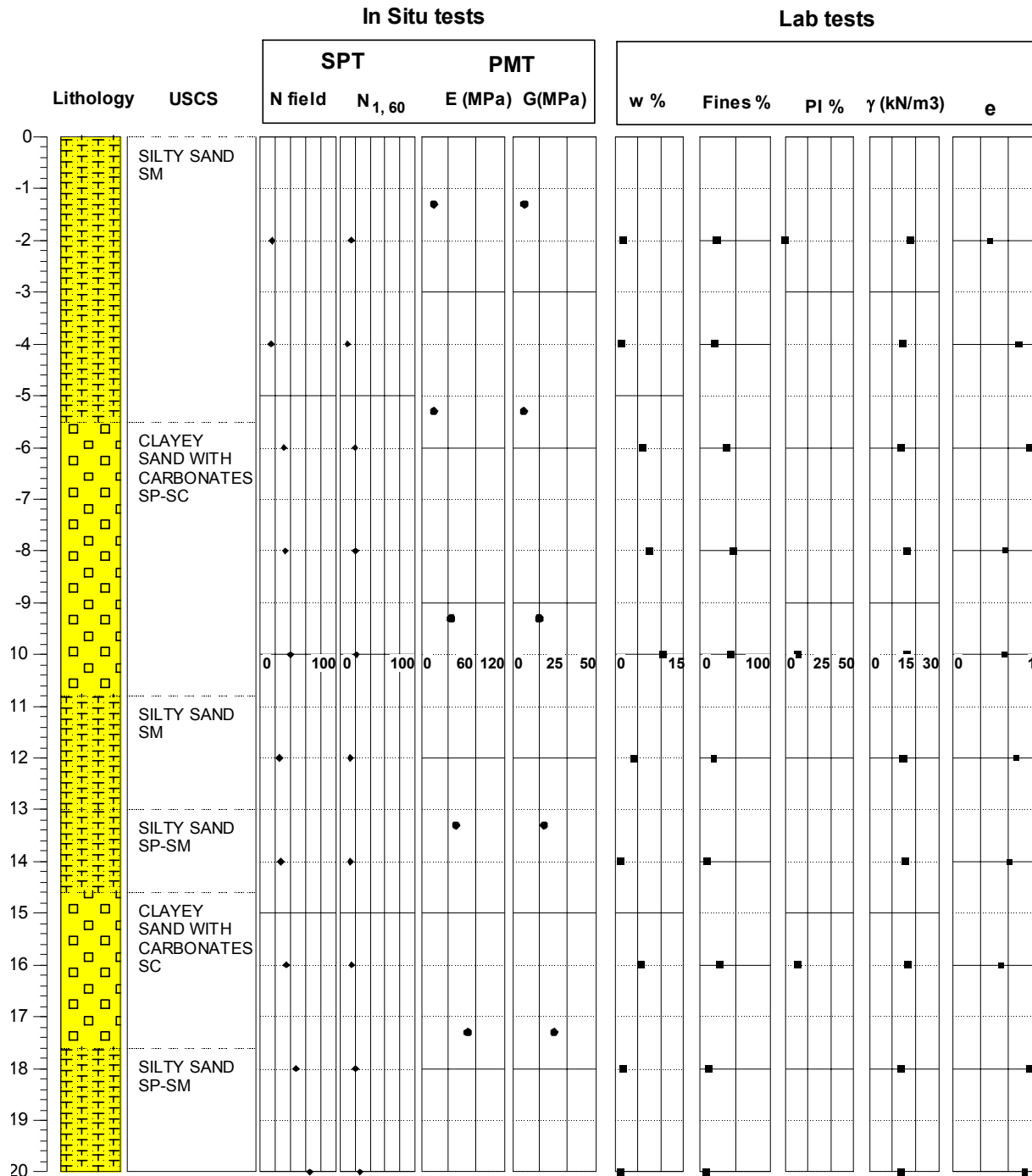


מקרא:

PMT - בדיקת פרסיומטר E (MPa) - מודול אלסטיות של הקרקע לפי v_d G (MPa) - מודול גזירה של הקרקע לפי v_d PI% - אינדקס הפלסטיות γ - משקל מרחבי יבש e - מנת חללים	USCS - סמל קרקע לפי שיטת המיון האחידה SPT - בדיקת החדרה סטנדרטית N field - מספר הקשות בשדה N_{1,60} - תוצאה מנורמלת ללחץ השכבות ולפטיש עם יעילות 60% w% - תכולת רטיבות טבעית Fines% - תכולת הדקים בקרקע
--	---

תרשים 4.1: מאפיינים גיאומכניים של הקרקע בקידוח #1, תוצאות מבדיקות שדה ומעבדה.

אתר כרם שלום; קידוח #2

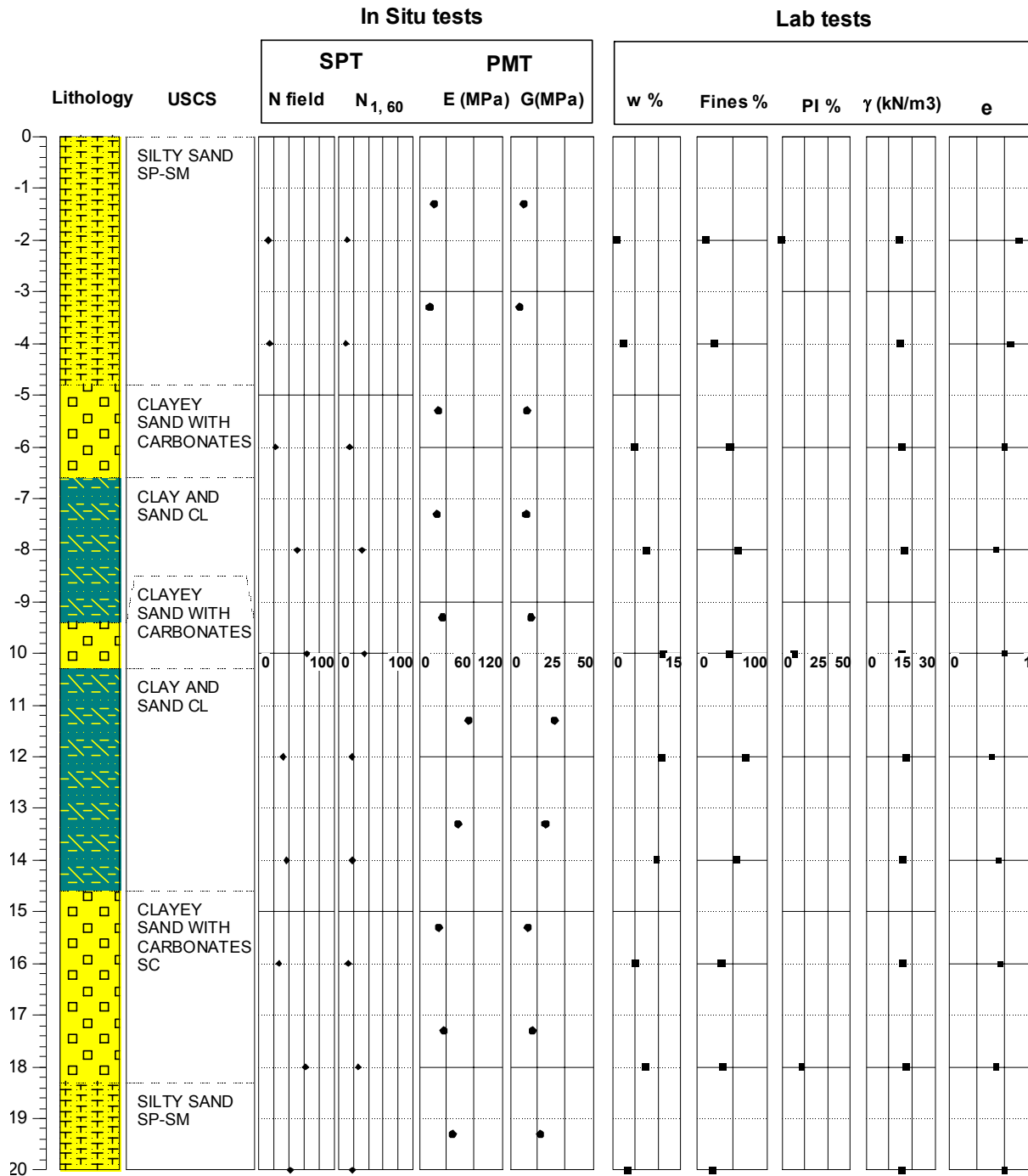


מקרא:

PMT - בדיקת פרסיומטר	USCS - סמל קרקע לפי שיטת המיון האחידה
E (MPa) - מודול אלסטיות של הקרקע לפי v_d	SPT - בדיקת החדרה סטנדרטית
G (MPa) - מודול גזירה של הקרקע לפי v_d	N field - מספר הקשות בשדה
PI% - אינדקס הפלסטיות γ - משקל מרחבי יבש	N _{1, 60} - תוצאה מנורמלת ללחץ השכבות ולפטיש עם יעילות 60%
e - מנת חללים	w% - תכולת רטיבות טבעית
	Fines% - תכולת הדקים בקרקע

תרשים 4.2: מאפיינים גיאומכניים של הקרקע בקידוח #2, תוצאות מבדיקות שדה ומעבדה.

אתר כרם שלום; קידוח #3

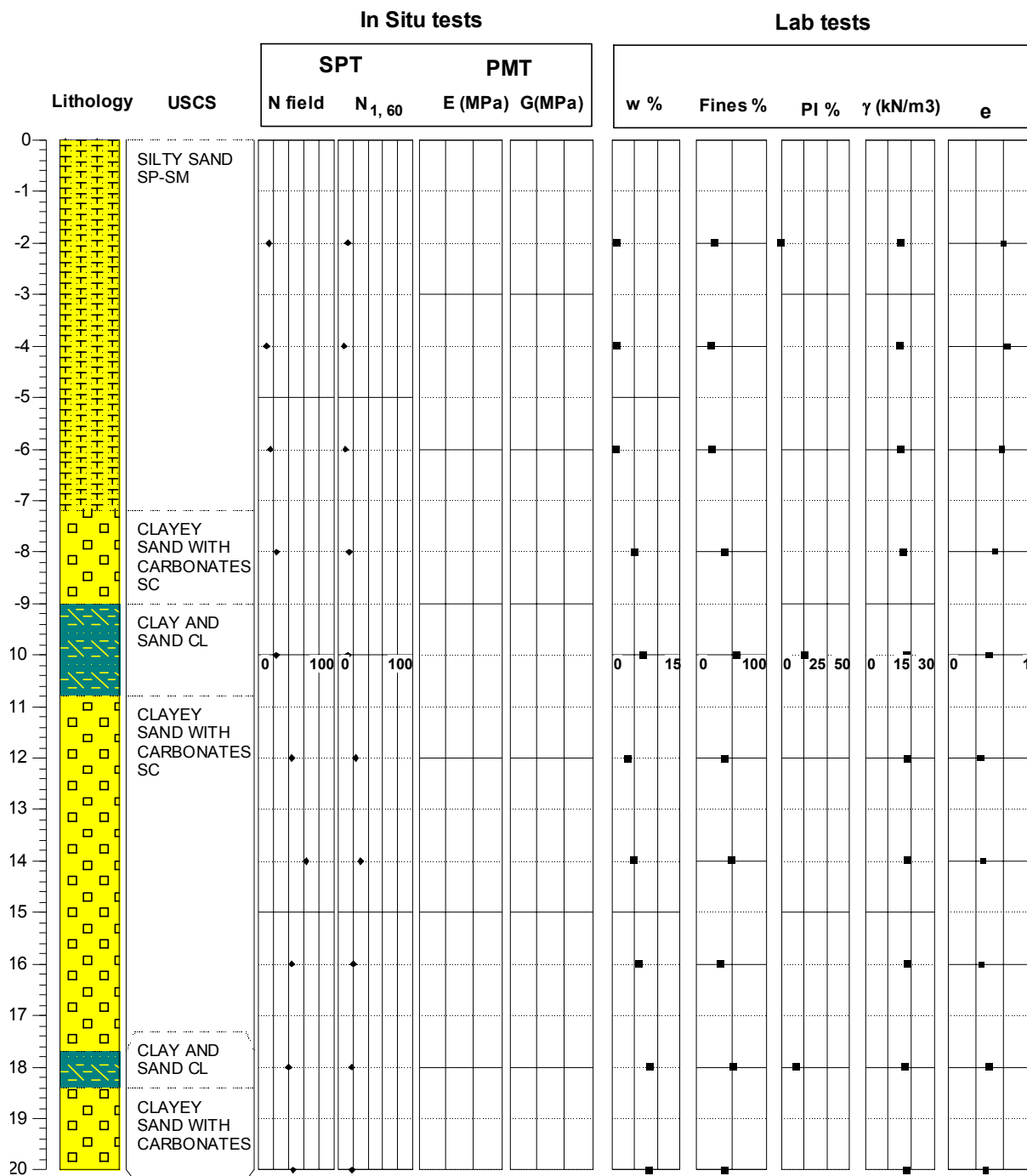


מקרא:

USCS - סמל קרקע לפי שיטת המיון האחידה
SPT - בדיקת החדרה סטנדרטית
N field - מספר הקשות בשדה
N_{1,60} - תוצאה מנורמלת ללחץ השכבות ולפטיש עם יעילות 60%
w% - תכולת רטיבות טבעית
Fines% - תכולת הדקים בקרקע
PMT - בדיקת פרסיומטר
E (MPa) - מודול אלסטיות של הקרקע לפי v_d
G (MPa) - מודול גזירה של הקרקע לפי v_d
PI% - אינדקס הפלסטיות γ - משקל מרחבי יבש
e - מנת חללים

תרשים 4.3: מאפיינים גיאומכניים של הקרקע בקידוח 3, תוצאות מבדיקות שדה ומעבדה.

אתר כרם שלום; קידוח #4

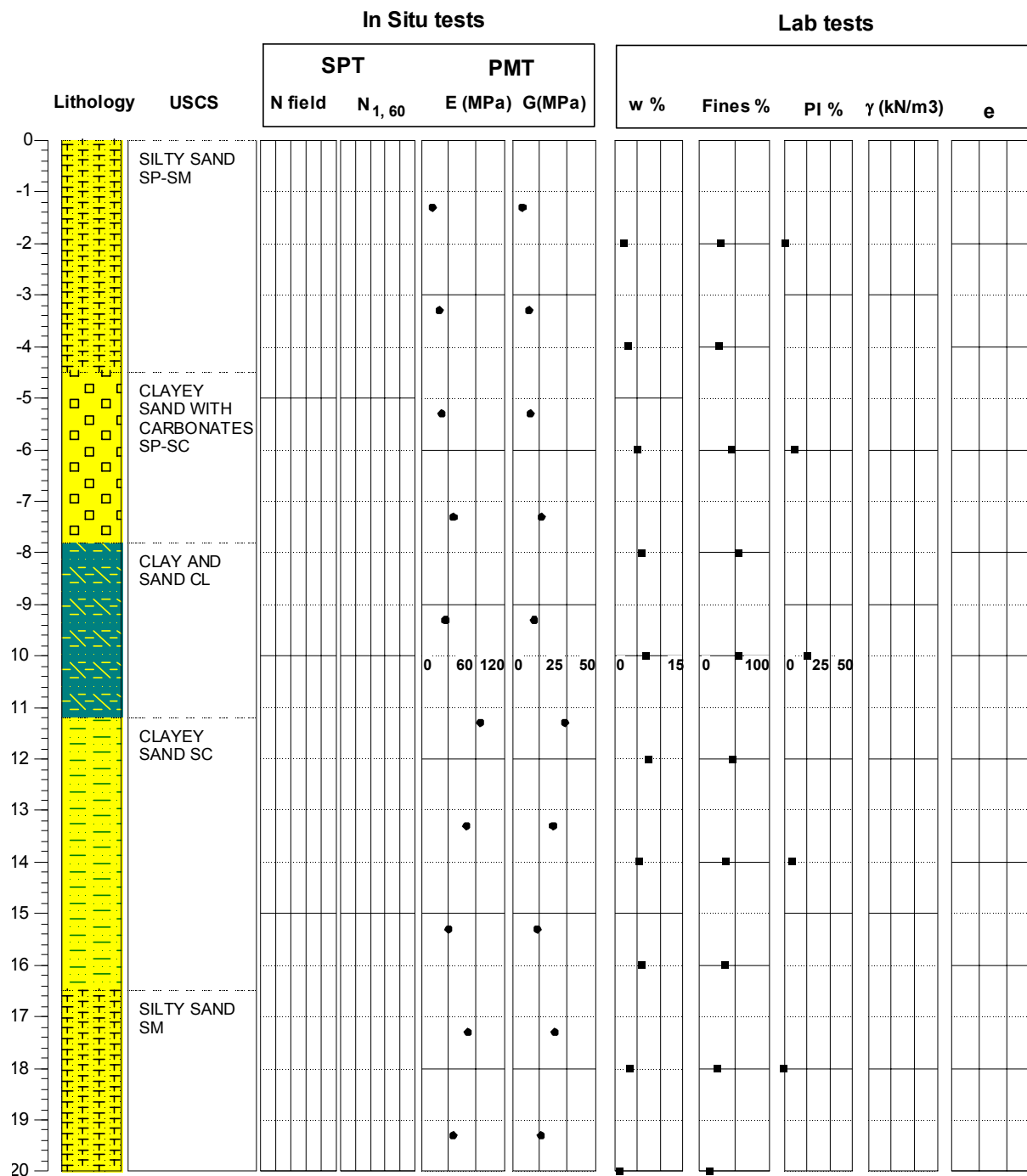


מקרא:

PMT - בדיקת פרסיומטר	USCS - סמל קרקע לפי שיטת המיון האחידה
E (MPa) - מודול אלסטיות של הקרקע לפי v_d	SPT - בדיקת החדרה סטנדרטית
G (MPa) - מודול גזירה של הקרקע לפי v_d	N field - מספר הקשות בשדה
PI% - אינדקס הפלסטיות γ - משקל מרחבי יבש	N _{1,60} - תוצאה מנורמלת ללחץ השכבות ולפטיש עם יעילות 60%
e - מנת חללים	w% - תכולת רטיבות טבעית
	Fines% - תכולת הדקים בקרקע

תרשים 4.4: מאפיינים גיאומכניים של הקרקע בקידוח 4, תוצאות מבדיקות שדה ומעבדה.

אתר כרם שלום; קידוח #5



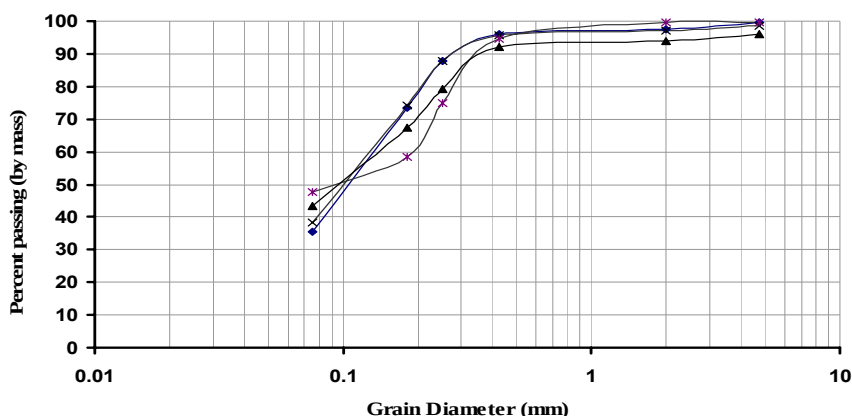
מקרא:

USCS - סמל הקרקע לפי שיטת המיון האחידה	PMT - בדיקת פרסיומטר
SPT - בדיקת החדרה סטנדרטית	E (MPa) - מודול אלסטיות של הקרקע לפי v_d
N field - מספר הקשות בשדה	G (MPa) - מודול גזירה של הקרקע לפי v_d
N _{1,60} - תוצאה מנורמלת ללחץ השכבות ולפטיש עם יעילות 60%	PI% - אינדקס הפלסטיות γ - משקל מרחבי יבש
w% - תכולת רטיבות טבעית	e - מנת חללים
Fines% - תכולת הדקים בקרקע	

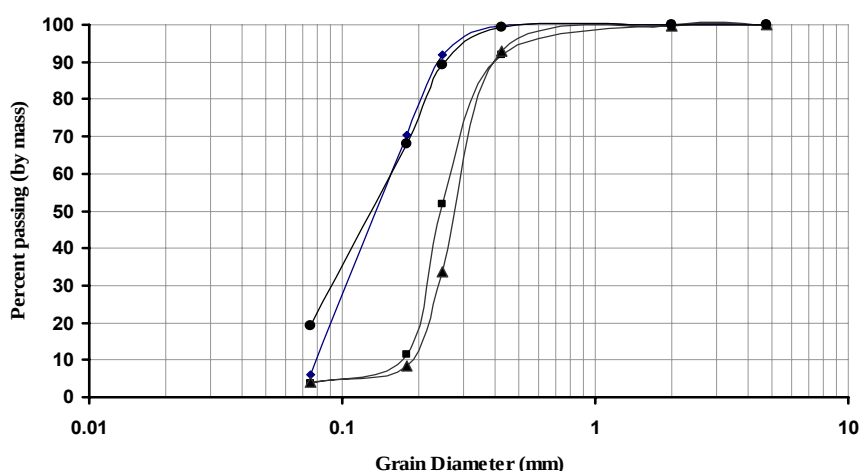
תרשים 4.5: מאפיינים גיאומכניים של הקרקע בקידוח 5, תוצאות מבדיקות שדה ומעבדה.

4.2 חתך המחשוף.

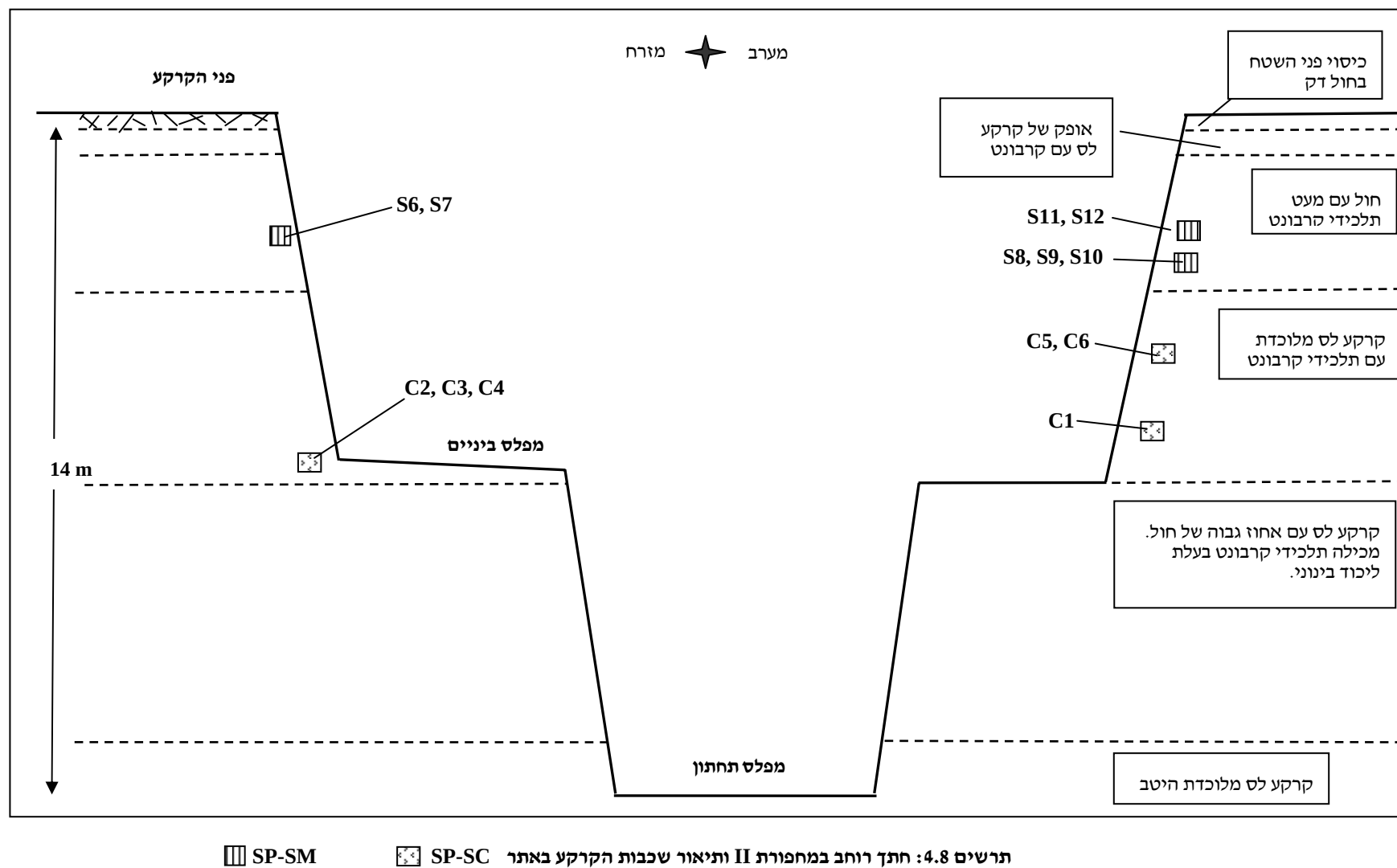
מחפורת II הקיימת באתר המחקר פתוחה בצורה מדורגת עד לעומק של 14 מטר כפי שניתן לראות בתרשים 4.8. קירות המצוק תת-אנכיים תלולים בגובה של 8 - 6 מטר ויציבים ברובם למעט התמוטטויות ארעיות במספר מקומות. בתקופה עם כמויות משקעים גדולות נצפו מספר גלישות קרקע ואזורי קריסה בחתך המאפיינים התנהגות של קרקע לס בזמן רוויה. מבחינה חזותית המחשוף מגלה שכבות חול ולס עם מאפיינים הדומים לחומר שהוצא מקידוחים 6-1. המקומות מהם נלקחו מדגמי קרקע (בלוקים) מהחתך לצורך בדיקות מכניות במעבדה מצוינים אף הם בתרשים 4.8. למעט הטיפוס החרסיתי (CL) הוגדרו במחשוף שני טיפוסים קרקע SP-SM ו SP-SC אותם ניתן לראות בתמונות 4.1 ו 4.2. התפלגות גודל גרגר אופיינית לטיפוסי קרקע אלו מוצגת בתרשימים 4.6 ו 4.7. מאפיינים ליטולוגיים ותכונות האינדקס של טיפוסים קרקע בחתך מוצגים זה לצד זה בתרשים 4.9.



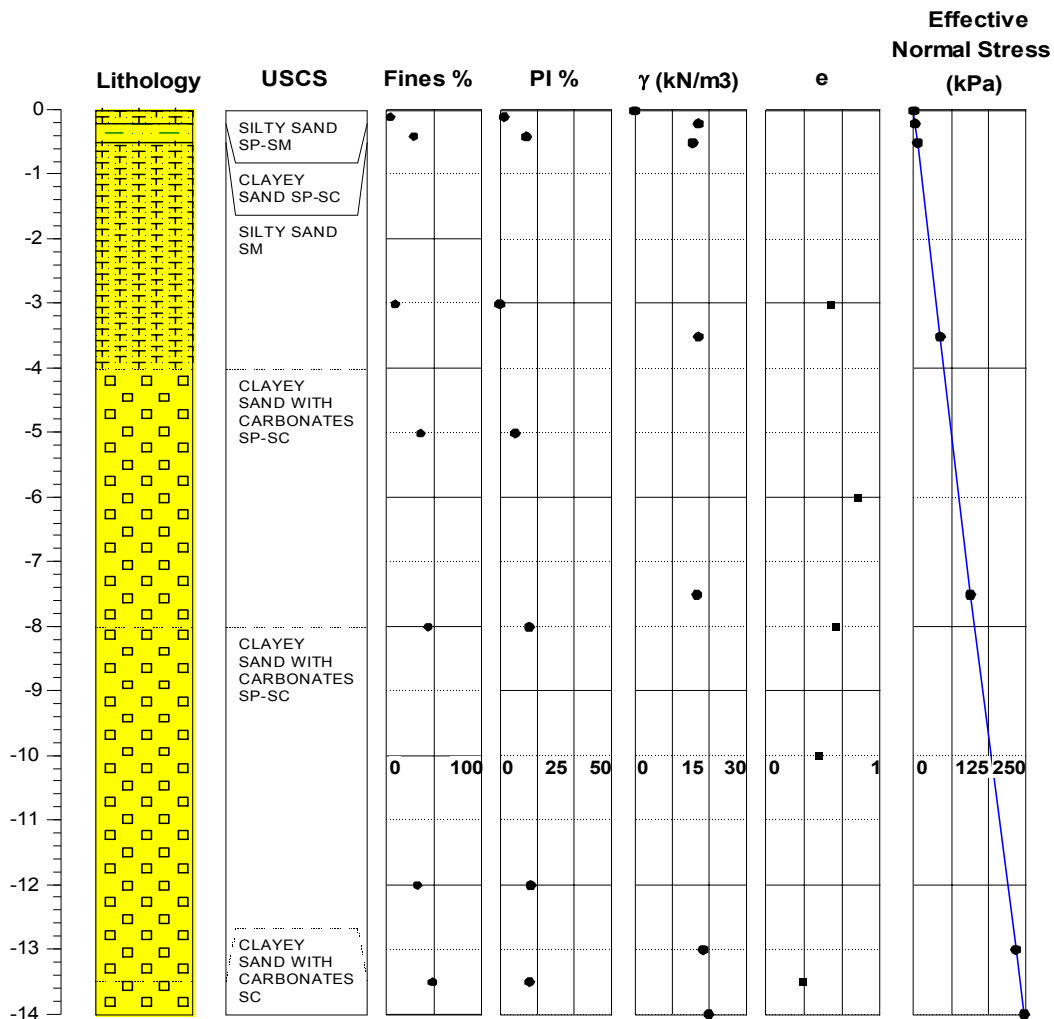
תרשים 4.6: התפלגות גודל גרגר אופיינית לקרקע מטיפוס SC עם דרוג אחיד או חסר.



תרשים 4.7: התפלגות גודל גרגר אופיינית לקרקע מטיפוס SM עם דרוג אחיד או חסר.



אתר כרם שלום : מחפורת II קיר מערבי



מקרא :

USCS - סמל קרקע לפי שיטת מיון אחידה

Fines % - תכולת הדקים בקרקע

PI % - אינדקס פלסטיות

γ - משקל מרחבי יבש

e - מנת חללים

Effective Normal Stress - השתנות מאמץ אפקטיבי אנכי עם העומק לפי $\sigma_v = \gamma z$

פונקציית המאמץ: $Y = -0.0569 X$

תרשים 4.9 : חתך אנכי בקטע הצפוני של הקיר המערבי במחפורת II בשטח המחקר.



תמונה 4.1: קו המגע בין שכבת החול הסיילטי SM (למעלה) והחול החרסיתי SC (למטה) בדופן החתך של מחפורת II.

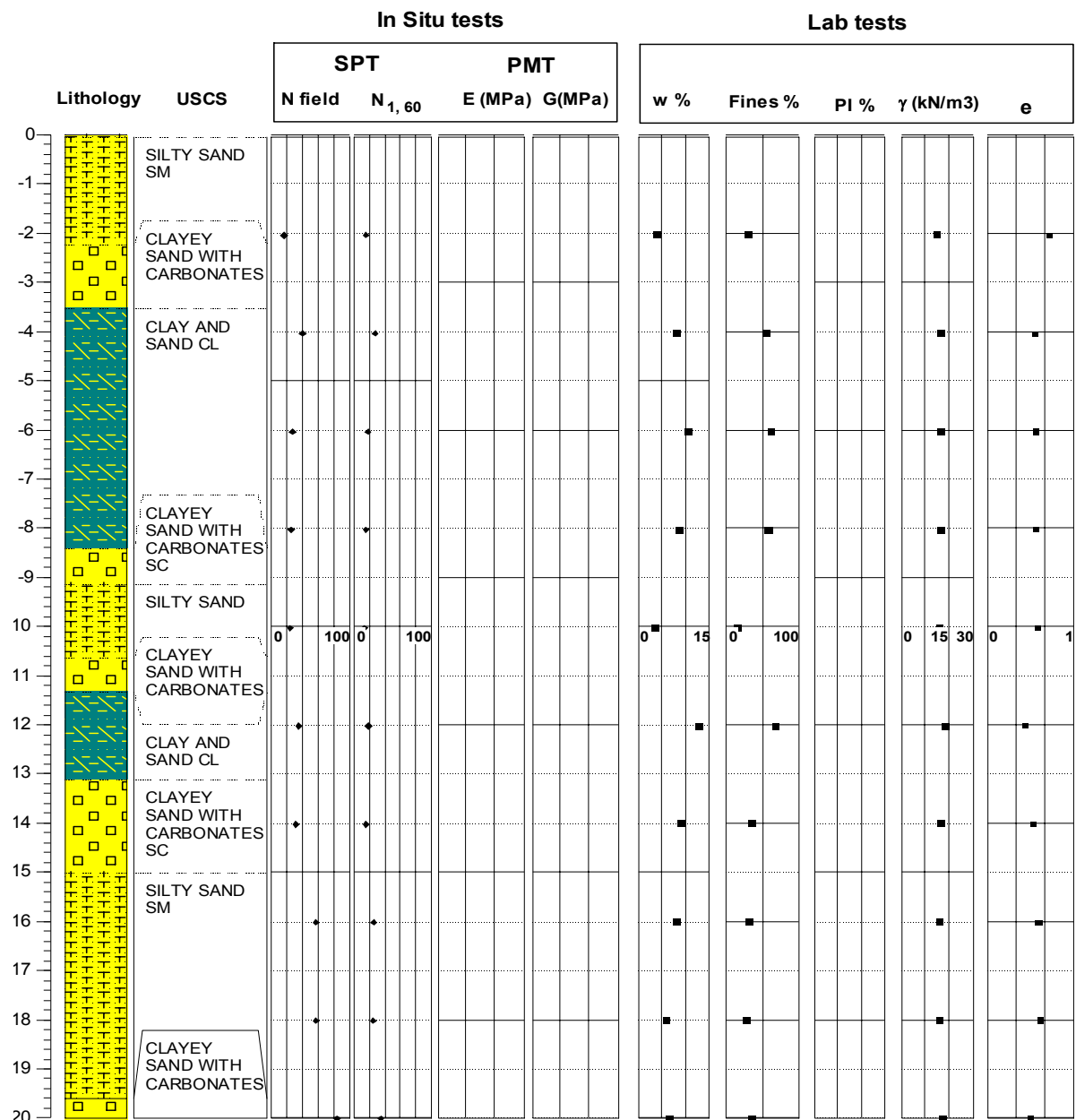


תמונה 4.2: מיקום טיפוס הקרקע בחלק העליון של החתך של מחפורת II.

4.3 מדידת מהירויות סייסמיות.

הקבועים האלסטיים הדינמיים של הקרקע: מודול גזירה (G_d), יחס פואסון (ν_d) ומודול אלסטיות (E_d) חושבו מתוך נתוני מדידת מהירויות סייסמיות כפי שבוצעו על ידי יורסקי (2004) בסמוך לקידוח מס' 6 (ראה סעיף 3.1.4). חתך קידוח 6 מופיע בתרשים 4.10, המהירויות הסיסמיות מופיעות בתרשימים 4.12 - 4.11 להלן.

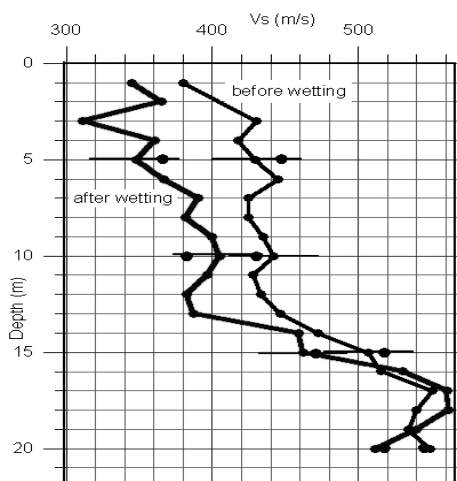
אתר כרם שלום; קידוח #6



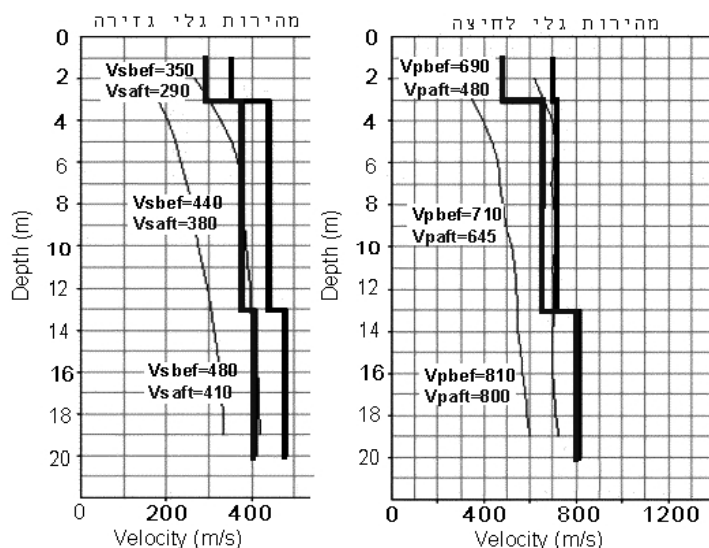
מקרא:

USCS - סמל קרקע לפי שיטת המיון האחידה
 SPT - בדיקת החדרה סטנדרטית
 N field - מספר הקשות בשדה
 N_{1,60} - תוצאה מנורמלת לחץ השכבות ולפטיש עם יעילות 60%
 w% - תכולת רטיבות טבעית
 Fines% - תכולת הדקים בקרקע
 PI% - אינדקס הפלסטיות
 γ - משקל מרחבי יבש
 e - מנת חללים
 PMT - בדיקת פרסיומטר
 E (MPa) - מודול אלסטיות של הקרקע לפי ν_d
 G (MPa) - מודול גזירה של הקרקע לפי ν_d

תרשים 4.10: מאפיינים גיאומכניים של הקרקע בקידוח 6, תוצאות מבדיקות שדה ומעבדה.



תרשים 4.11: מהירות גלי גזירה בין קידוחים 2 ו 3 בשיטת Crosshole בתווך יבש ובתווך רווי (יזרסקי, 2004).



תרשים 4.12: מהירויות גלי לחיצה וגזירה בין קידוחים 2 ו 3 בשיטת Downhole בתווך יבש ובתווך רווי (יזרסקי, 2004).

לפי יזרסקי, מהירויות גלי הגזירה עולות עם העומק ללא קשר לליטולוגיה או לתכולת הרטיבות בקרקע. בתווך יבש מהירויות אלה נעות בין 330 – 540 m/sec ובתווך רווי התחום הוא 290-550 m/sec. עם זאת ההבדל במהירויות גלי הגזירה לפני ואחרי ההרטבה משמעותי ומגיע עד כדי 30%. הירידה במהירות גלי הגזירה בתווך רווי קשורה בתכונות של קרקע הלס שהיא פורוזיבית מאד ($n > 40\%$) ובעלת צפיפות נמוכה ($1.0 - 1.4 \text{ gr/cm}^3$). כתוצאה מהרטבה הקרקע מאבדת את חוזקה (קריסה ברוויה) ויש הפחתה בערכי הפרמטרים האלסטיים. גלי הגזירה אינם רגישים לרוויות מים אך השפעת המים על חוזק הקרקע גורמת לירידה במהירויות של גלי הגזירה. תופעה מעניינת מאפיינת את התנהגות גלי הלחיצה. גלים אלו רגישים לרוויות מים ומהירותם עולה פי 2 – 3 בתווך רווי מאשר בתווך יבש. לכן ניתן היה לצפות שבעקבות ההרטבה מהירויות סייסמיות של גלי לחיצה בקרקע יעלו. בפועל מהירויות אלו ירדו כתוצאה מההרטבה באזור הסקר. תופעה זו מדגישה כי איבוד החוזק של הקרקע משמעותי יותר ופועל במגמה הפוכה מהצפוי בגין ההרטבה והרוויות החתך.

פרמטרים אלסטיים.

להלן תוצאות חישוב פרמטרים אלסטיים דינמיים (טבלה 4.1):

Layer	Parameter	Borehole 3		Borehole 2	
		Wet	Dry	Wet	Dry
L1 1 - 3 m	Vp (m/sec)	480	690	480	***
	Vs (m/sec)	290	350	290	330
	v_d	0.21	0.32	0.21	***
	ρ (kg/m ³)	1587	1587	1587	1587
	E _d (Mpa)	323.0	513.2	323.0	***
	G _d (Mpa)	133.5	194.4	133.5	172.8
L2 3 - 13 m	Vp (m/sec)	645	710	530	680
	Vs (m/sec)	380	440	380	420
	v_d	0.23	0.19	0.1	0.19
	ρ (kg/m ³)	1684	1684	1684	1684
	E _d (Mpa)	598.2	775.9	535.0	707.0
	G _d (Mpa)	243.2	326.0	243.2	297.1
L3 13-20 m	Vp (m/sec)	800	810	780	806
	Vs (m/sec)	410	480	435	450
	v_d	0.32	0.23	0.27	0.27
	ρ (kg/m ³)	1650	1650	1650	1650
	E _d (Mpa)	732.2	935.2	793.0	848.7
	G _d (Mpa)	277.4	380.2	312.2	334.1

טבלה 4.1: פרמטרים אלסטיים של שכבות הקרקע בחתך לפי מדידת מהירויות סיסמיות בבור קידוח 6.

מקרא:

L1,2,3 – חלוקה לשכבות לפי השתנות מהירויות סיסמיות בבור הקידוח.

Vs – מהירות גלי גזירה לפי מדידת מהירות בשיטת Downhole.

Vp – מהירות גלי לחיצה לפי מדידת מהירויות בשיטת Downhole.

v_d – יחס פואסון.

E_d – מודול אלסטי דינמי לפי $E = 2G(1+v)$. G_d – מודול גזירה דינמי לפי $G = \rho Vs^2$.

ρ – צפיפות הקרקע בעומקים שונים בחתך (ערכים מתוך בדיקות מעבדה).

ערכי יחס פואסון דינמי ממדידת מהירויות סיסמיות בעומקים שונים בקרקע הותאמו לנתונים של בדיקות פרסיומטר שבוצעו בקידוחים 2, 3, ו-5 באתר המחקר. ערכי פרמטרים אלסטיים של הקרקע מבדיקת פרסיומטר חושבו פעמיים: ראשית לפי ערך v קבוע (0.33) בהתאם להנחה שבוצעה על ידי מפעיל הבדיקה (גורוצקי, 2002). בפעם השנייה בהתאם לשינוי ביחס פואסון הדינמי לפי החלוקה לשכבות הקרקע מתוך ההבדלים במהירויות הסיסמיות (יזרסקי, 2004). היחסים בין ערכי הפרמטרים האלסטיים שנתקבלו בשתי הדרכים מובאים בתרשימים 4.13 ו-4.14. להלן תוצאות חישוב פרמטרים אלסטיים מבדיקת פרסיומטר (טבלה 4.2):

Depth m	Ep (c) MPa	Gp (c) MPa	ν_d	Ep (d) MPa	Gp (d) MPa	
1.3	18.9	7.1	0.32	18.8	7.1	קידוח 2
5.3	20.2	7.6	0.19	18.0	6.8	
9.3	48.2	18.1	0.19	43.1	16.2	
13.3	54.3	20.4	0.23	50.2	18.9	
17.3	72.6	27.3	0.23	67.1	25.2	
1.3	28	10.5	0.32	27.8	10.5	קידוח 3
3.3	19.7	7.4	0.19	17.6	6.6	
5.3	35.9	13.5	0.19	32.1	12.1	
7.3	33.6	12.6	0.19	30.1	11.3	
9.3	43.6	16.4	0.19	38.8	14.6	
11.3	93.4	35.1	0.19	83.5	31.4	
13.3	74.1	27.9	0.23	68.5	25.8	
15.3	38.2	14.4	0.23	35.4	13.3	
17.3	47.9	18.0	0.23	44.3	16.7	
19.3	63.7	23.9	0.23	58.9	22.1	
1.3	21.2	8.0	0.32	21.1	7.9	קידוח 5
3.3	34.7	13.0	0.19	31.1	11.7	
5.3	38.1	14.3	0.19	34.1	12.8	
7.3	61.1	23.0	0.19	54.7	20.6	
9.3	46	17.3	0.19	41.2	15.5	
11.3	110.8	41.7	0.19	99.1	37.3	
13.3	85.5	32.1	0.23	79.1	29.7	
15.3	52.8	19.8	0.23	48.8	18.4	
17.3	89.1	33.5	0.23	56.9	21.4	
19.3	61.5	23.1	0.23	82.4	31.0	

טבלה 4.2: השוואת ערכי מודול אלסטיות ומודול גזירה מבדיקות פרסיומטר בקידוחים 2, 3 ו-5 בקרקע.

מקרא:

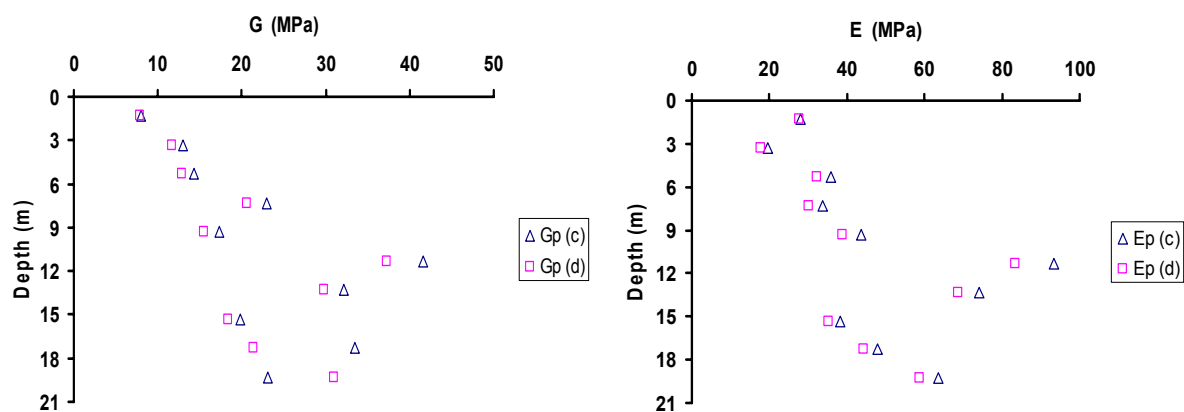
Ep (c) – מודול אלסטיות של הקרקע עבור $\nu = 0.33$.

Gp (c) – מודול גזירה של הקרקע עבור $\nu = 0.33$.

Ep (d) – מודול אלסטיות של הקרקע עבור יחס פואסון דינמי משתנה ν_d .

Gp (d) – מודול גזירה של הקרקע עבור יחס פואסון דינמי משתנה ν_d .

ν_d – יחס פואסון דינמי של קרקע במצב יבש בשכבות L1,2,3 לפי מהירויות סיסמיות (טבלה 4.1).



תרשים 4.13: השוואת ערכי מודול אלסטיות (קידוח 3) ומודול גזירה (קידוח 5) עבור $\nu = 0.33$ ו- ν_d .

פרק 5 – תוצאות.

פרק זה מסכם את תוצאות הבדיקות המכניות שנערכו בשני טיפוסים הקרקע שנמצאו בשטח המחקר והוגדרו במעבדה כ SP-SM (חול סילטי מדורג חסר) ו SP-SC (חול סילטי חרסיתי מדורג חסר עם תלכיד קרבונט).

התוצאות מוצגות בטבלה ובתרשימים כאשר התרשימים מחולקים לתת – פרקים בהתאם לסוג הבדיקה או סוג הקרקע. טבלה 5.1 מסכמת את הנתונים שהתקבלו עבור כל דגם שעבר בדיקה במעבדה באמצעות המכשיר לגזירה ישירה.

תרשימים של בדיקות הגזירה הישירה מציגים את חוזק הגזירה של הדגמים שנבדקו ובמקביל את הדילטציה שעובר הדגם בזמן הגזירה. מעטפת כשל עבור טיפוס הקרקע SP-SM נותנת את הפרמטרים המכניים שלה ומהווה סיכום של תוצאות בדיקות גזירה ישירה בחומר זה.

תרשימים של בדיקות גזירה מחזורית מונוטונית מתארים את מאמץ הגזירה המתפתח בדגם עם התזוזה המחזורית בעת הבדיקה ואת התפתחות הדילטציה בדגם במקביל לתנועת גזירה זו. בהתבסס על מספר הנחות (סעיף 3.4.4), ניטור הדפורמציות החלות בדגם בזמן הגזירה המחזורית מאפשר להעריך כמותית את מודול הגזירה הראשוני G_0 והאקוויולנטי G^* של הקרקע מטיפוס SP-SM.

תרשימים של העמסה חד- צירית של דגמי הקרקע מתארים את סגמנט הלחיצה הראשון של בדיקות הגזירה הישירה. באמצעות תרשימים ונתונים אלו ניתן לקבוע את דרגת הדחיסה של שני הטיפוסים בהתייחס למספר הבדלים בולטים בין הבדיקה שבוצעה במחקר זה לבין קונסולידציה תקנית. בבדיקות העמסה חד צירית בהן נערכה גם פריקה (Unload) ניתנת הערכה כמותית של מודול האלסטיות של הקרקע.

בכל תרשים מופיע מספר הדגם הנבדק המאפשר איתור מהיר שלו בטבלת סיכום התוצאות 5.1. בכל התרשימים המתארים שינויי אורך (Δv) בציר האנכי, התקצרות הדגם (contraction) היא בכיוון השלילי והתארכות או פתיחה (dilation) היא בכיוון החיובי. עיבוד נתוני הבדיקות כולל המרה של יחידות מהשיטה האינצית: אורך (inch) וכוח (lb) בהן נעשה שימוש במכשיר הגזירה ליחידות של שיטת SI : אורך (מילימטר) ומאמץ (Pa).

נתוני הבדיקות שנערכו בקרקעות מטיפוסים SP-SM ו SP-SC.

Test ID	Sample ID	USCS	Depth (m)	A (cm ²)	σ_n (kPa)	σ'_v (kPa)	Test Type	τ_{max} (kPa)	E (MPa)	G'o (MPa)	Note
IO1	S1	SP-SM	5	125.17	689.50	87.87	DST	446			1
IO2	S2	SP-SM	5	226.70	2068.50	87.87	DST				2
IO3	S3	SP-SM	5	106.14	1379.00	87.87	MCS	460			3
IO4	S4	SP-SM	5	165.24	999.78	87.87					4
IO5	S5	SP-SM	5	174.20	999.78	87.87					5
AT4	S6	SP-SM	3	159.17	344.75	52.72	MCS	175	90*	63.14	6
AT5	S7 ₁	SP-SM	3	179.56	344.75	52.72	MCS	174		28.6	7
AT6	S7 ₂	SP-SM	3	179.56	344.75	52.72	MCS	176			
AT7	S7 ₃	SP-SM	3	179.56	344.75	52.72	MCS	212			
AT8	S8	SP-SM	3.5	133.30	344.75	61.51	MCS	204	164*	21.3	8
AT9	S9	SP-SM	3.5	135.04	689.50	61.51	MCS	300	131*	23.8	9
AT10	C1	SP-SC	7	170.53	137.90	123.02	NLUR		113		10
AT10	C1	SP-SC	7	170.53	275.80	123.02	NLUR		290		
AT10	C1	SP-SC	7	170.53	413.70	123.02	NLUR		319		
AT11	C1	SP-SC	7	170.53	689.50	123.02	NLUR		579		
AT11	C1	SP-SC	7	169.95	999.78	123.02	NLUR		592		
AT12	C1	SP-SC	7	170.53	275.80	123.02	NLUR		704		10
AT13	C2	SP-SC	8	155.62	137.90	140.60	DST	478.5			
AT14	S10	SP-SM	3.5	175.26	270.00	61.51	DST	114			11
AT15	C3	SP-SC	8	180.66	206.85	140.60	DST	230			12
AT16	C4	SP-SC	8	174.35	344.75	140.60	DST	394			
AT17	S11	SP-SM	3	177.43	517.13	52.72	DST	327.3			13
AT18	S12	SP-SM	3	180.83	206.85	52.72	DST	121			
AT19	C5	SP-SC	5	173.11	172.38	87.87	DST	413			
AT20	C6	SP-SC	5	214.01	413.70	87.87	DST	388			

טבלה 5.1 : סיכום תוצאות הבדיקות המכניות שנערכו בדגמי הקרקע באמצעות המערכת של TerraTek Inc.

מקרא:

DST – בדיקת גזירה ישירה, MCS – בדיקת גזירה מחזורית מונוטונית, NLUR – בדיקת לחיצה ופריקה נורמלית. USCS – סמלי הקרקע לפי שיטת המיון האחידה.

σ'_v – מאמץ אפקטיבי אנכי בשדה בעומק ממנו הוצא הדגם.
A – שטח החתך של הדגם.

σ_n – מאמץ אנכי תחתיו נערכת הבדיקה.

E – מודול אלסטיות של הקרקע. (*) – מודול אלסטיות של הקרקע לאחר מספר מחזורי גזירה.
G'o – מודול גזירה ראשוני מתוקן של הקרקע.

τ_{max} – מאמץ גזירה מכסימלי המתפתח בדגם בעת הבדיקה.

הערות מתוך הטבלה:

1. אין מדידה של H_0 שהוא הגובה בין התושבות של מדי התזווה האנכיים.
2. תחת מאמץ נורמלי של 415 kPa התרחשה תקלה ונגזר בורג של תושבת מד תזווה.
3. תחת מאמץ נורמלי של 690 kPa התרחשה תקלה ונגזר בורג של תושבת מד תזווה.

4. תקלה בדיקה הופסקה.
5. תקלה בדיקה הופסקה.
6. שלושה מחזורי גזירה.
7. סדרת בדיקות גזירה מחזורית מונוטונית של דגם S7 כאשר מספר מחזורי הגזירה בכל בדיקה הוא , $S7_{15};(4)$, $S7_{25};(6)$, $S7_{35};(17)$ בסך הכל 27 מחזורים.
8. 40 מחזורי גזירה רצופים.
9. 40 מחזורי גזירה רצופים.
10. סדרת העמסה ופריקה נורמלית עם הורדת עומס ל 35 kPa בכל שלב.
11. גזירה התבצעה תחת 270 kPa ולא תחת σ_n tr.
12. ייתכן שהדגם אינו רציף.
13. אין מדידה של H_o .

5.1 תוצאות בדיקות גזירה ישירה בקרקע.

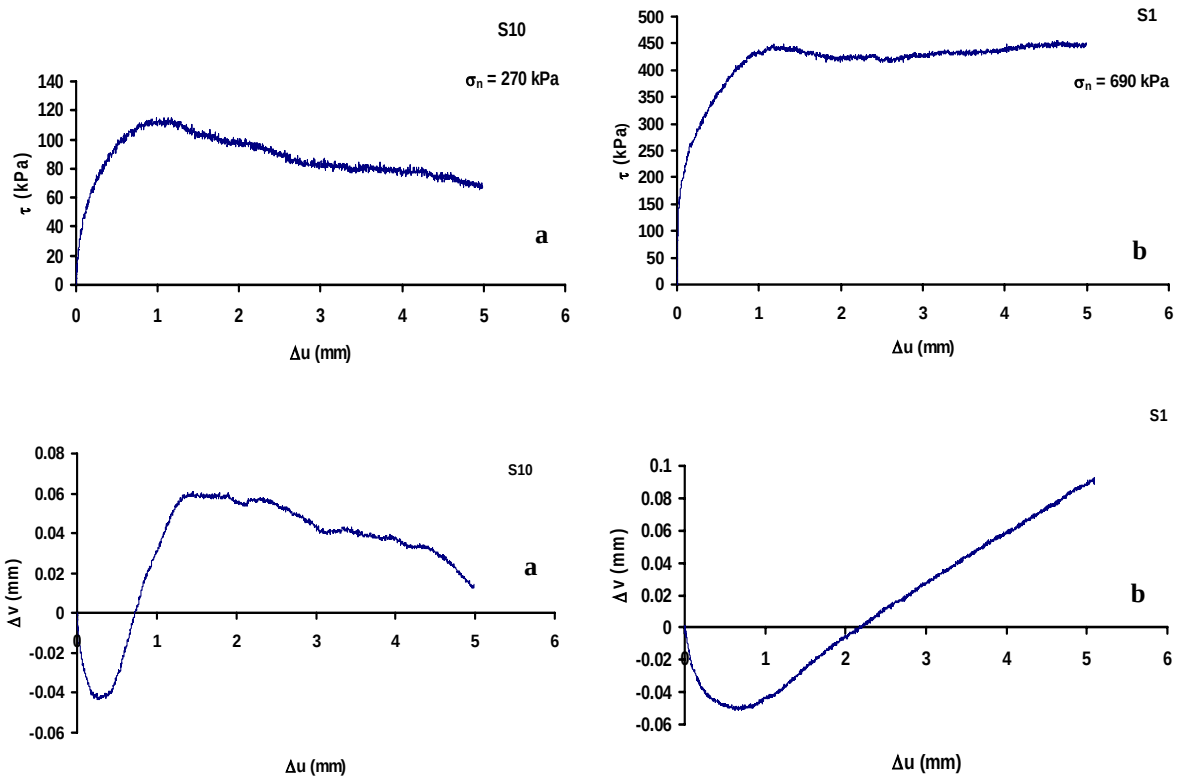
5.1.1 חוזק גזירה של קרקע מטיפוס SP-SM.

ארבעה מבחני גזירה ישירה בוצעו תחת רמות שונות של מאמץ נורמלי קבוע בדגמים של קרקע מטיפוס SP – SM : $S1, \sigma_n = 690$; $S12, \sigma_n = 206$ kPa ; $S11, \sigma_n = 517$ kPa ; $S10, \sigma_n = 270$ kPa . ערך המאמץ הנורמלי שהופעל על כל דגם השיג את ערך המאמץ האנכי האפקטיבי שפועל בעומק ממנו נלקח המדגם. ניתוח התנהגות הדגם בזמן סגמנט הלחיצה מראה כי הדגמים לא עברו כשל בלחיצה. כמו כן אין עדות לכך שתנועות גזירה בזמן סגמנט הלחיצה גרמו לכשל בדגמים, למעט דגם S10 שבו קיים חשש לכך שהדגם לא היה רציף בזמן הגזירה עצמה, ולכן נתן ערך נמוך יחסית של חוזק גזירה. מכאן שערכי מאמץ הגזירה המתפתח בבדיקות של דגמים S1, S11 ו-S12 הם ערכים אמינים של חוזק הגזירה של הקרקע. התרשימים מציגים התפתחות של מאמץ גזירה העולה עד לערך חוזק מקסימלי τ_{max} המושג לאחר תזוזה אופקית של כמילימטר אחד ולאחריו חלה ירידה מסוימת והתייצבות על ערך חוזק שיורי קבוע למדי. ניתוח של התנהגות הדילטציה בקרקע זו בזמן הגזירה מראה כי השינויים באורך הדגם בציר האנכי מתרחשים במסלולים שונים עם התזוזה האופקית.

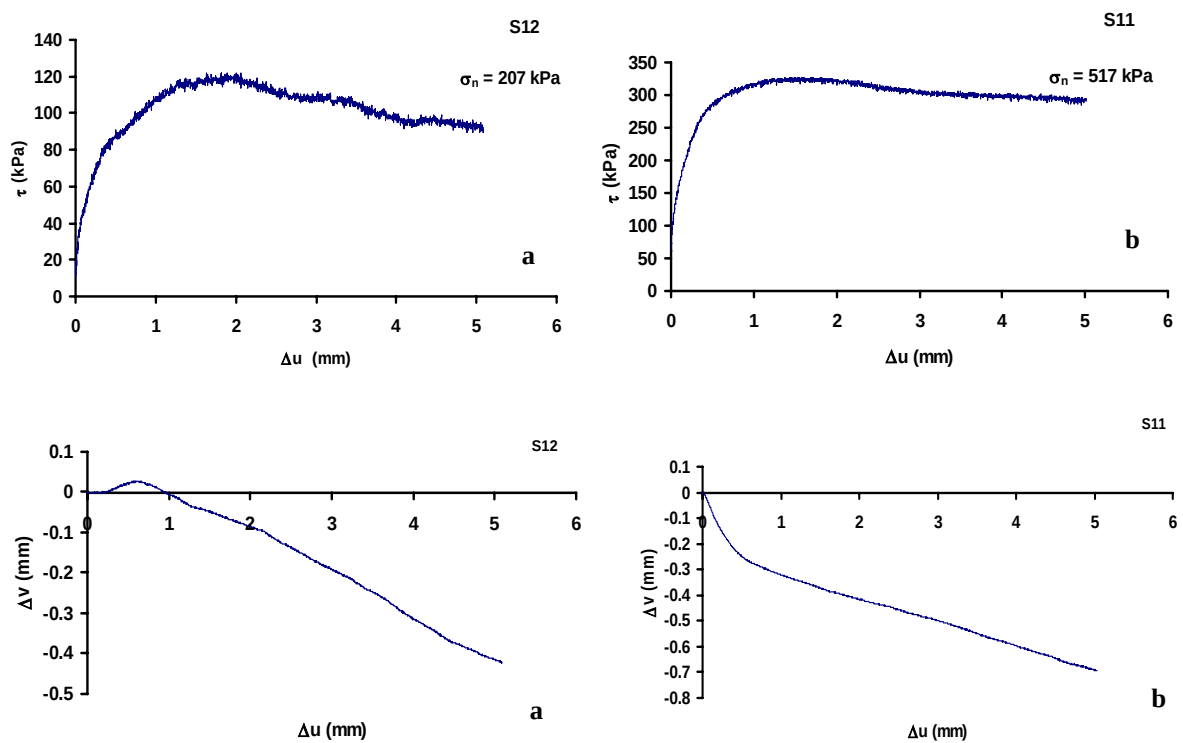


תמונה 5.1: פרופיל מישור הגזירה של דגם קרקע (S12) מטיפוס SP-SM מיד בתום בדיקת גזירה ישירה

תרשימים 5.1 ו- 5.2 להלן, מתארים את התפתחות מאמץ הגזירה והדילטציה הנלווית בעת הגזירה.

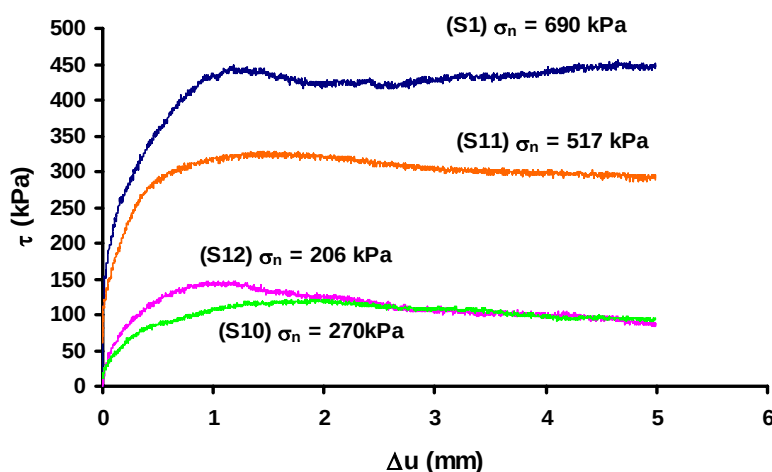


תרשים 5.1: התנהגות מאמץ הגזירה והדילטציה של דגם קרקע מטיפוס SP-SM בגזירה ישירה תחת מאמץ נורמלי קבוע, בדיקה (a) AT14 ; בדיקה (b) IO1.

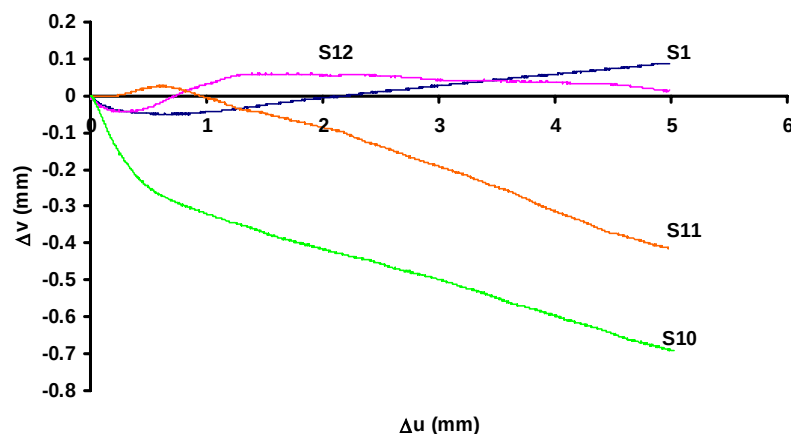


תרשים 5.2: התנהגות מאמץ הגזירה והדילטציה של דגם קרקע מטיפוס SP-SM בגזירה ישירה תחת מאמץ נורמלי קבוע, בדיקה (a) AT18 ; בדיקה (b) AT17.

תרשימים 5.3 ו- 5.4 מספקים השוואה בין מאמצי הגזירה שהתפתחו בבדיקות הגזירה הישירה וסגנונות הדילטציה הנלווים בהתאמה. מאמצי הגזירה עולים באופן טבעי עם העלייה במאמץ הנורמלי למעט בדגם S10 שכאמור ייתכן וכשל בזמן סגמנט הלחיצה. ניתוח התנהגות הדילטציה מראה כי עם תחילת תנועת הגזירה יש התקצרות או דחיסה של הדגם בציר האנכי אך בהמשך ההתנהגות אינה אחידה. דגמים S1 ו-S12 מצביעים על מגמת תפיחה לאחר גזירה של כ- 0.5 מילימטר ואילו דגמים S10 ו-S11 ממשיכים להידחס במשך תזוזת הגזירה כולה.

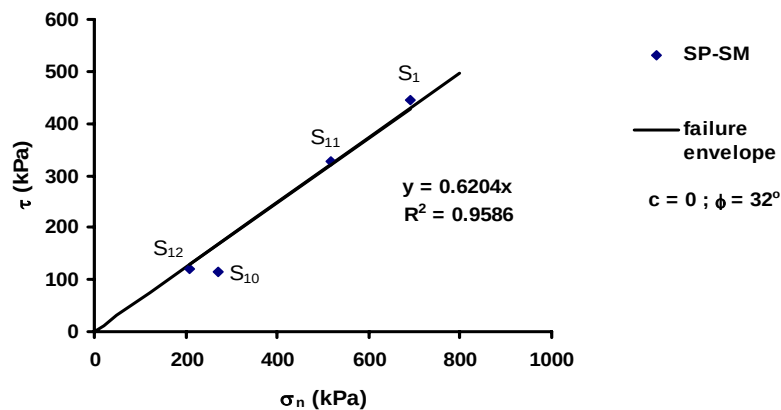


תרשים 5.3 : התפתחות מאמץ הגזירה כנגד תזוזת גזירה בעת בדיקות גזירה ישירה בקרקע SP-SM.



תרשים 5.4 : סגנונות דילטציה אופייניים בעת בדיקות גזירה ישירה בקרקע מטיפוס SP-SM.

היחס בין מאמץ הגזירה למאמץ הנורמלי (τ/σ_n) המתפתח בבדיקות אלו בחול הסילטי נע בטווח שבין 0.4 – 0.6 עבור מאמץ גזירה מקסימלי τ_{max} . ערכים אלו מצביעים על זווית חיכוך של 21.8 – 32 מעלות כאשר הערך הגבוה יותר זהה לזווית החיכוך הפנימית ϕ' המתקבלת ממעטפת הכשל של קרקע זו (תרשים 5.5). $\tau = 0.6204\sigma_n$



תרשים 5.5: מעטפת כשל של קרקע מטיפוס SP-SM.

5.1.2 חוזק גזירה של קרקע מטיפוס SP-SC.

חמישה דגמים של קרקע מטיפוס SP - SC עברו מבחני גזירה ישירה תחת רמות שונות של מאמץ נורמלי קבוע: C2, $\sigma_n = 140 \text{ kPa}$; C3, $\sigma_n = 207 \text{ kPa}$; C4, $\sigma_n = 345 \text{ kPa}$; C5, $\sigma_n = 172 \text{ kPa}$; C6, $\sigma_n = 414 \text{ kPa}$. מאמצים אלה גבוהים מהמאמצים האנכים שפעלו על דגמי הקרקע בעומק ממנו נלקחו בחתך הקרקע בשדה. מאמצי הגזירה שהתפתחו בדגמי הקרקע תחת טווח מאמצים זה גבוהים ברוב הבדיקות מהמאמץ הנורמלי שהופעל על הדגם. ניתוח אפשרות כשל בדגמים אלו בזמן סגמנט הלחיצה מראה כי כל הדגמים נותרו במצב רציף ושלם עד לסגמנט הגזירה. חוזק הגזירה המכסימלי ($\tau_{\max}$) של הדגמים הושג לאחר תזוזה אופקית של כמילימטר וחצי (תרשימים 5.6- 5.8). לאחר תזוזה זו בדגמים C3 ו C6 נשמר הערך של $\tau_{\max}$ במהלך תזוזה של עוד מילימטר עד מילימטר וחצי ובדגמים האחרים חוזק הגזירה המכסימלי ברור ולאחריו מתרחשת ירידה קבועה של ערך החוזק השיורי. ניתוח התנהגות הדילטציה בחול החרסיתי בזמן הגזירה מראה כי השינויים באורך הדגם בציר האנכי מתרחשים במסלולים דומים מאד עם התזוזה האופקית (תרשימים 5.10 - 5.9). תוצאות כל הבדיקות במרחב σ_n , τ מובאות בתרשים 5.15. תמונה 5.2 מראה מישור גזירה אופייני לדגמי הקרקע שעברו בדיקה זו. פני המישור מחוספסים ואינם אחידים והגזירה מתרחשת גם בתלכדי הקרבונט שמהווים מרכיב חשוב בקרקע הטרוגנית זו.

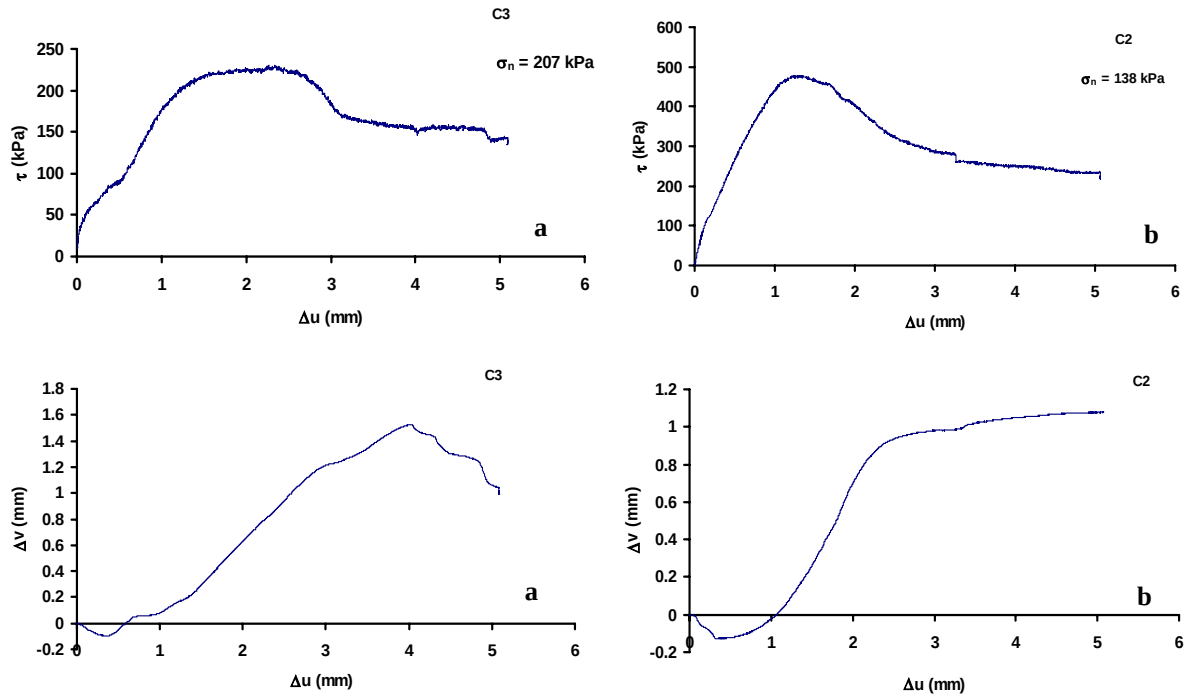


a

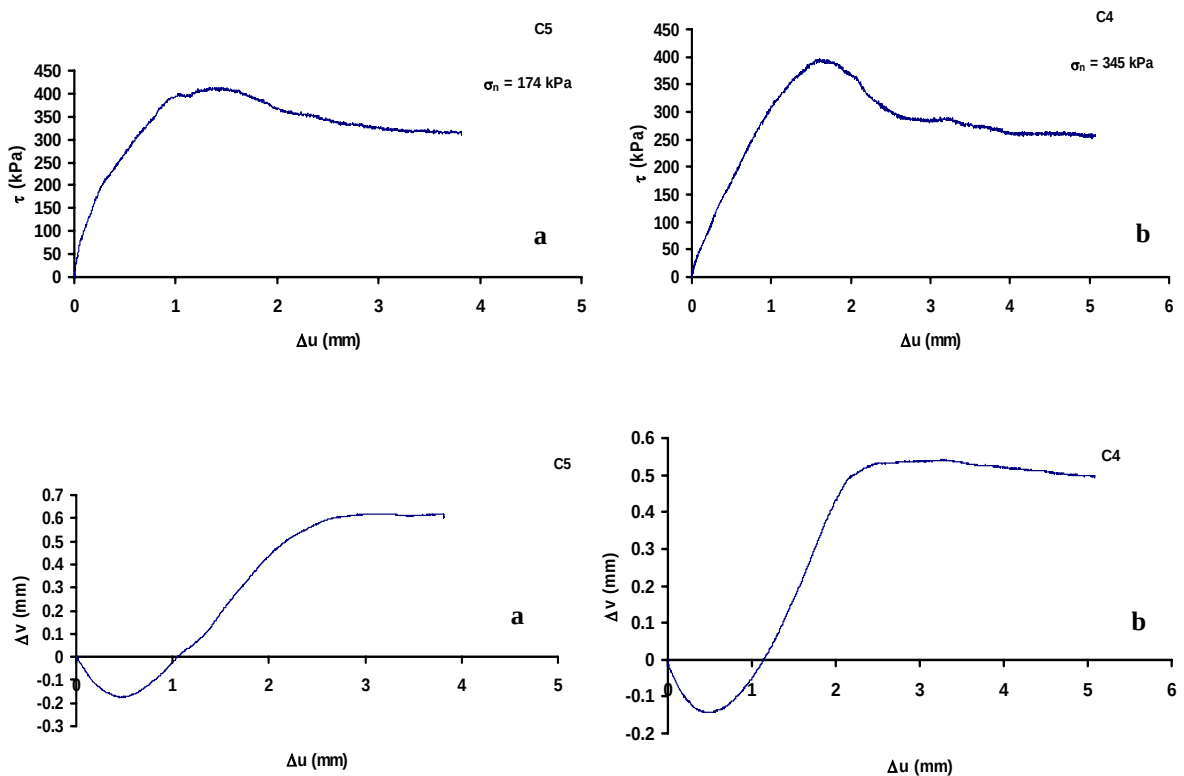


b

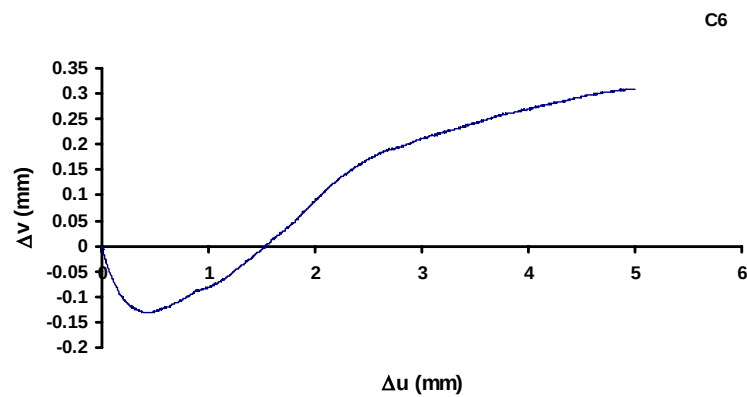
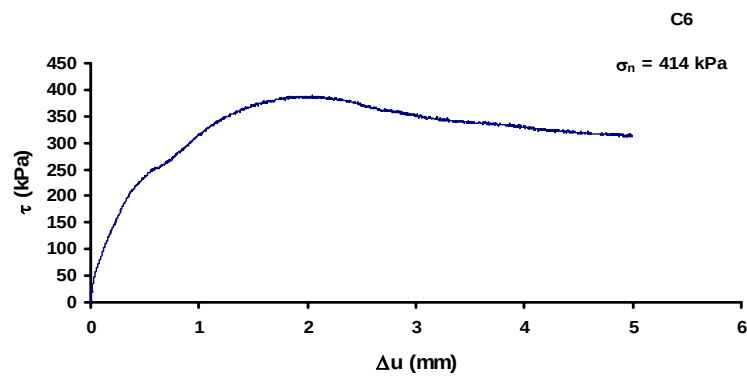
תמונה 5.2: דגם קרקע (C6) מטיפוס SP-SC מיד בתום בדיקת גזירה ישירה, (a) מבט על; (b) פרופיל מישור הגזירה.



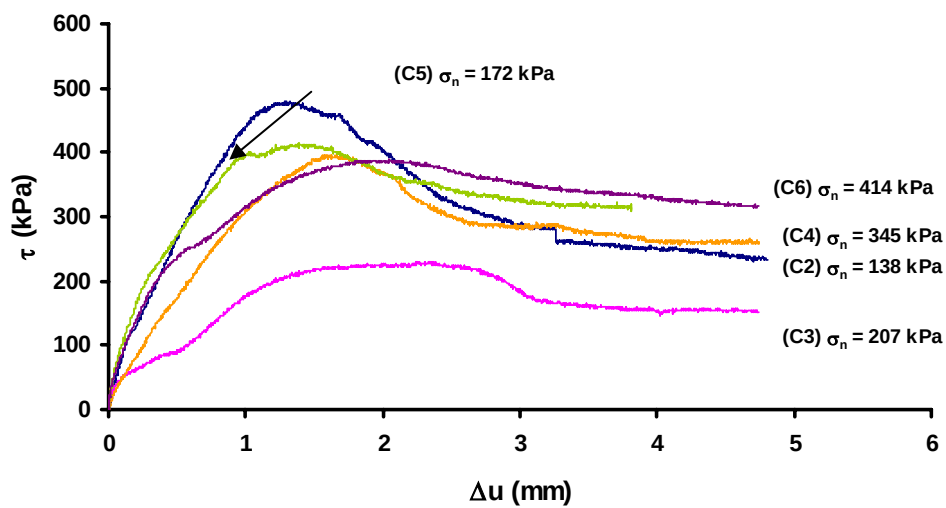
תרשים 5.6: התנהגות מאמץ הגזירה והדילטציה של דגם קרקע מטיפוס SP-SC בגזירה ישירה תחת מאמץ נורמלי קבוע, (a) בדיקה AT15 ; (b) בדיקה AT13 .



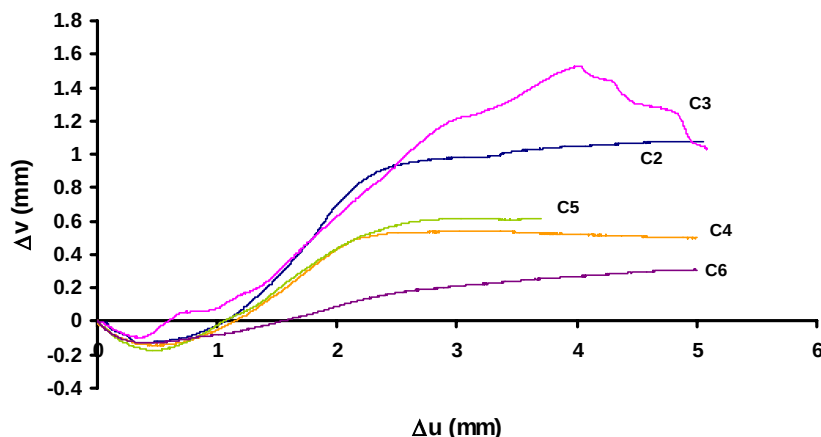
תרשים 5.7: התנהגות מאמץ הגזירה והדילטציה של דגם קרקע מטיפוס SP-SC בגזירה ישירה תחת מאמץ נורמלי קבוע, (a) בדיקה AT19 ; (b) בדיקה AT16 .



תרשים 5.8: התנהגות מאמץ הגזירה והדילטציה של דגם קרקע מטיפוס SP-SC בגזירה ישירה תחת מאמץ נורמלי קבוע, בדיקה AT20.

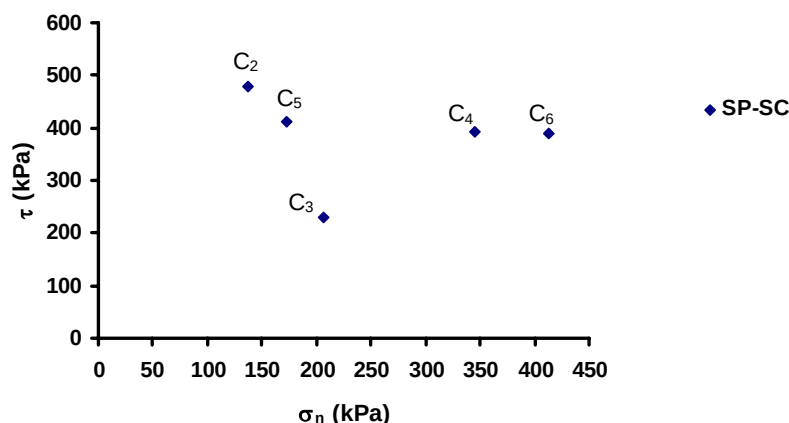


תרשים 5.9: התפתחות מאמץ הגזירה כנגד תזוזת גזירה בעת בדיקות גזירה ישירה בקרקע מטיפוס SP-SC.



תרשים 5.10: סגנונות דילטציה אופייניים בעת בדיקות גזירה ישירה בקרקע מטיפוס SP-SC.

- תרשים 5.11 מסכם את התוצאות של מבחני הגזירה הישירה שנערכו בדגמי קרקע מטיפוס SP-SC שנמצאו בחתך של אזור כרם שלום. מהתרשים עולות העובדות הבאות:
- מאמץ הגזירה המתפתח בדגמי הקרקע מטיפוס SP – SC עולה או שווה בערכו למאמץ הנורמלי הפועל על הדגם בזמן הגזירה.
 - פיזור תוצאות הבדיקות שנערכו בקרקע מטיפוס SP – SC במרחב τ, σ_n אינו מאפשר הגדרת קריטריון כשל לינארי ברור מסוג מוהר - קולומב עבור קרקע זו.
 - טווח מאמצי הגזירה המכסימליים שהתקבלו בבדיקות הגזירה הישירה של הקרקע מטיפוס SP-SC נע בין 230 kPa – 480 kPa.
 - חוזק הגזירה של קרקע מטיפוס SP-SC במצב יבש הוא כ-400 kPa.



תרשים 5.11: טווח מאמצי גזירה מכסימליים במבחני גזירה ישירה של דגמי קרקע מטיפוס SP-SC.

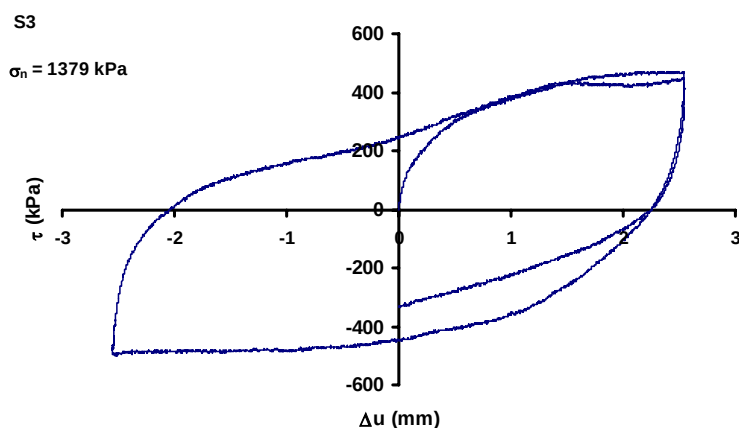
5.2 תוצאות בדיקות גזירה מחזורית מונוטונית בקרקע מטיפוס SP-SM

שבע בדיקות (AT4 – AT9 ו IO3) בהן בוצעה גזירה מחזורית מונוטונית על דגמי קרקע מטיפוס SP-SM מבטאות אבולוציה של מהלך הבדיקה ומספר מחזורי גזירה הגדל מ 1.5 מחזורים בבדיקה IO3 ועד ל 40

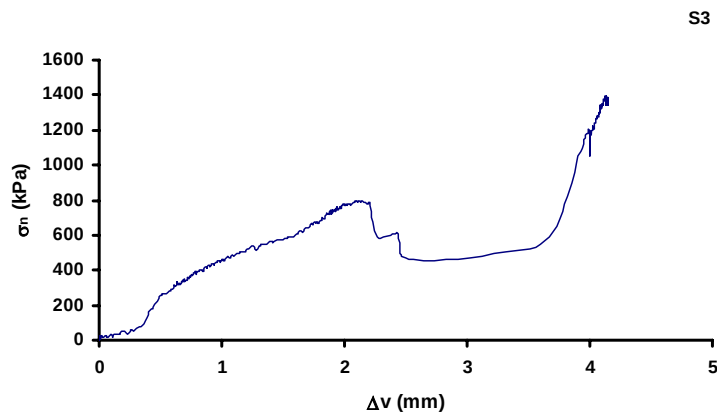
מחזוריים בבדיקות AT8 ו AT9. התנהגות מחזורית של עקומת מאמץ – מעוות של הקרקע בעת גזירה מחזורית מונוטונית מתוארת בתרשימים 5.12 – 5.17.

קווים מרוסקים המוצגים בתרשימים אלה מייצגים את התחום בו מקדם החיכוך של הקרקע מטיפוס זה $\mu \geq 0.6$. כל עוד רמת המאמץ המופעל $\tau / \sigma_n < 0.6$ אין חשש לכשל בקרקע בגזירה בהתאם למעטפת הכשל שנמצאה עבור קרקע זו (תרשים 5.5). מאמץ גזירה שלילי המתואר בתרשימים אלו הוא המאמץ המתפתח בדגם כאשר בוכנת הגזירה נעה אחורה (לפי הגדרות הכיוונים במערכת בסעיף 3.4.4). כזכור מסעיף 3.3.1 בוכנת הגזירה מוגבלת לתנועה בבקרת תזוזה בלבד. דבר זה אומר שבדיקות הגזירה המחזורית בוצעו תחת הכתבה של $\pm \Delta u$ ולא של $\pm \Delta \tau$, לכן מאמץ הגזירה איננו קבוע בכל מחזור. לעומת זאת תזוזת הגזירה נשארת קבועה בגודלה.

בדיקה IO3 שנערכה על דגם S3 היא הראשונה שנערכה בסדרת בדיקות הגזירה המחזורית. תזוזת הגזירה Δu בדגם היא של 2 מילימטר וכפולה בערכה מהתזוזה האופקית שנדרשה בבדיקות הגזירה הישירה של קרקע מאותו טיפוס על מנת להגיע לכשל (תרשים 5.12). ניתוח של סגמנט הלחיצה מראה כי הדגם כנראה כשל בזמן העלאת המאמץ הנורמלי (תרשים 5.13). דבר זה מצביע על כך שחוזק הלחיצה החד – צירי של דגם זה הוא כ 800 kPa. ערך מאמץ הגזירה המכסימלי $\tau_{\max} = 420 \text{ kPa}$ נמוך בהשוואה לקריטריון הכשל המאפיין את הקרקע מטיפוס זה ומצביע על כך כי זהו חוזק גזירה של קרקע במצב לא רציף.

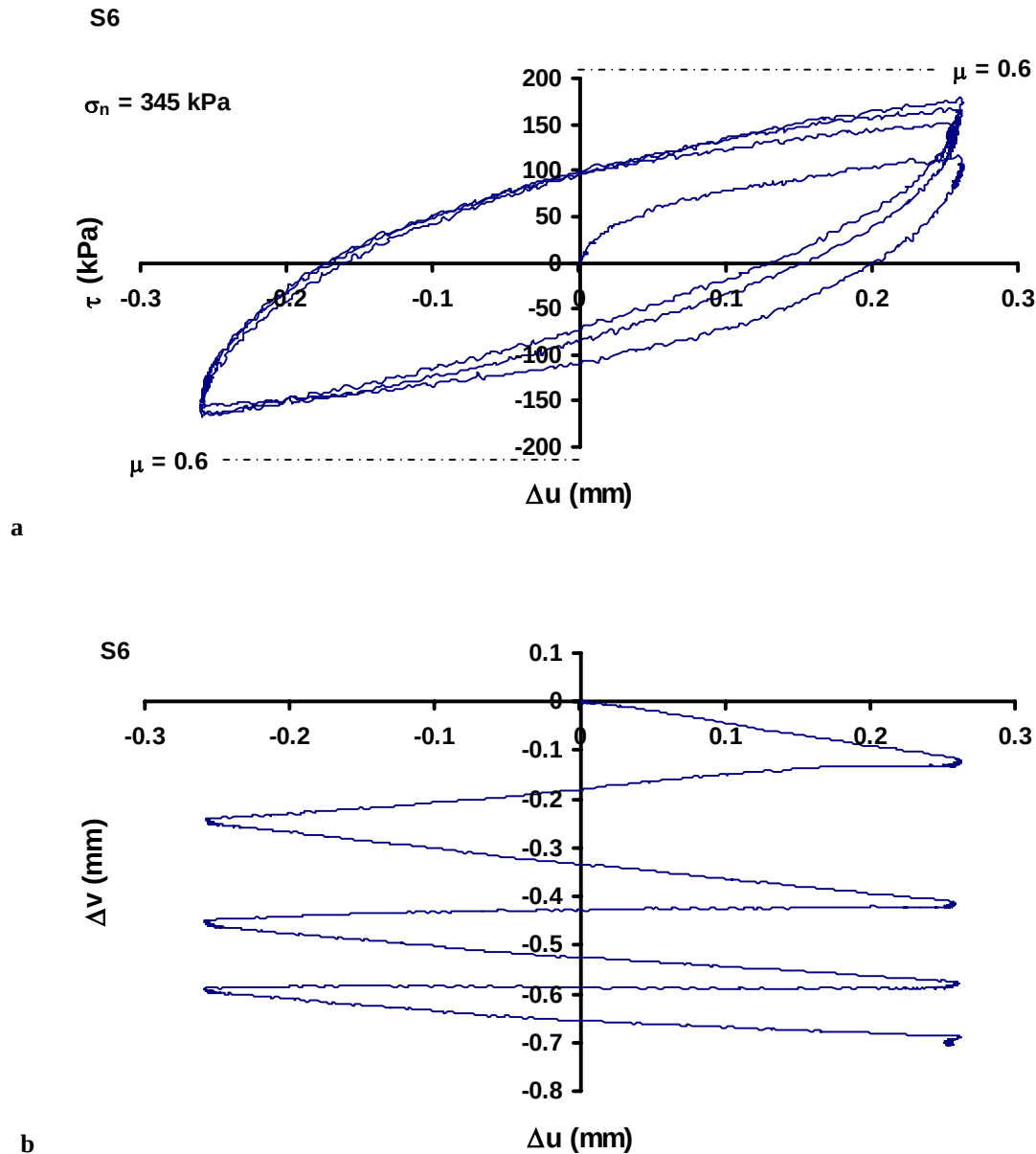


תרשים 5.12: מאמץ גזירה כנגד תזוזת גזירה תחת מאמץ נורמלי קבוע במהלך מחזור וחצי (בדיקה IO3).



תרשים 5.13: מאמץ נורמלי כנגד התקצרות אנכית בסגמנט לחיצה חד – צירית (בדיקה IO3).

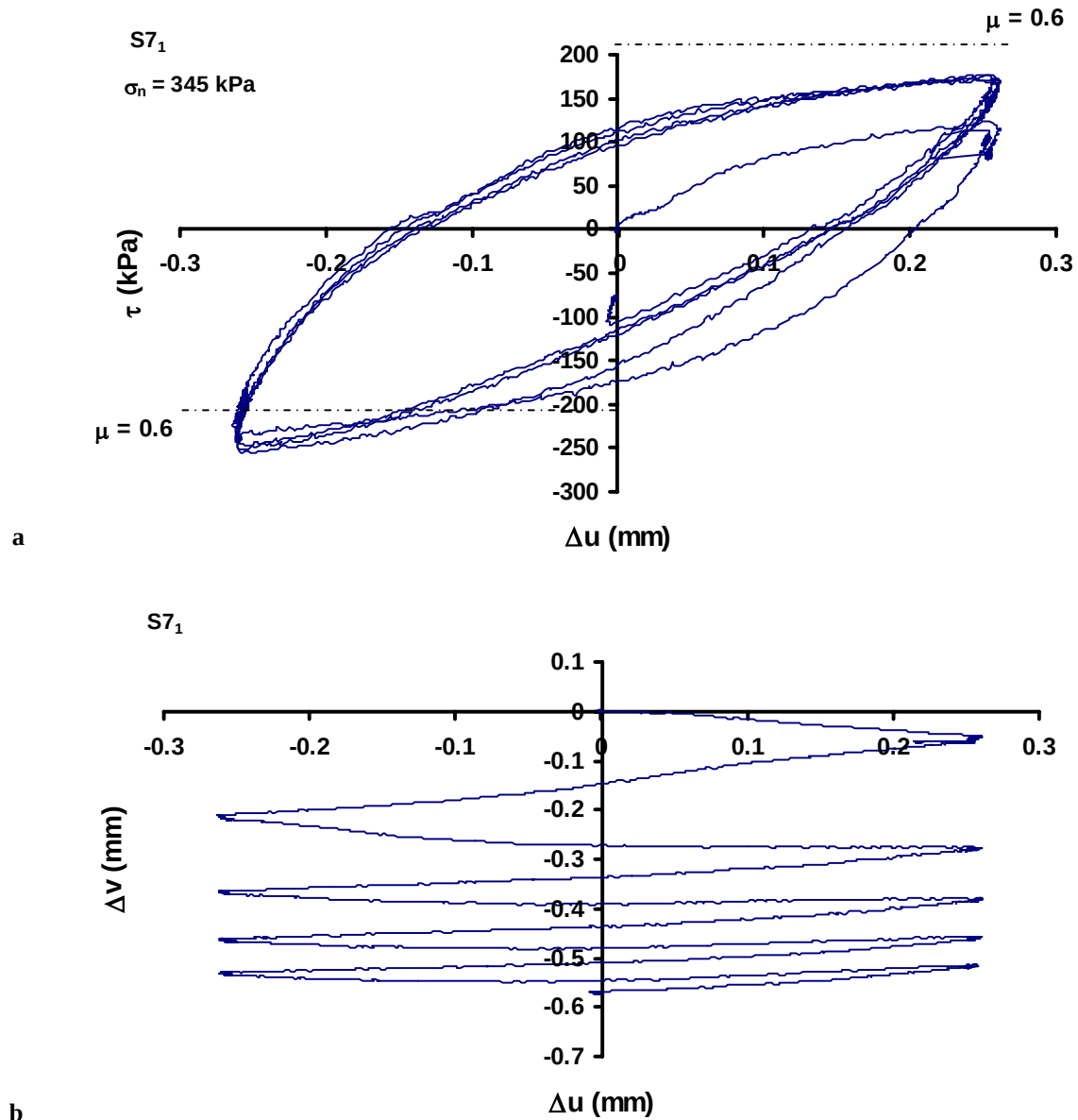
דגם S6 נבדק בשלושה מחזורי גזירה כאשר מאמץ הגזירה עולה עם התקדמות המחזוריים (תרשים 5.14a). התפתחות הדילטציה סימטרית מאד. סגירת הדגם בציר האנכי הולכת ומצטמצמת עם התקדמות מחזורי הגזירה (תרשים 5.14b). שדה המאמצים הפועל על הדגם ($\sigma_n = 345 \text{ kPa}$; $\tau = \pm 175 \text{ kPa}$) נמצא מתחת לחוזק הגזירה של קרקע זו.



תרשים 5.14: (a) מאמץ גזירה כנגד תזוזת גזירה תחת מאמץ נורמלי קבוע במהלך 3 מחזוריים ; (b) התנהגות התפיחה במהלך סגמנטים של גזירה מחזורית מונוטונית (בדיקה AT4).

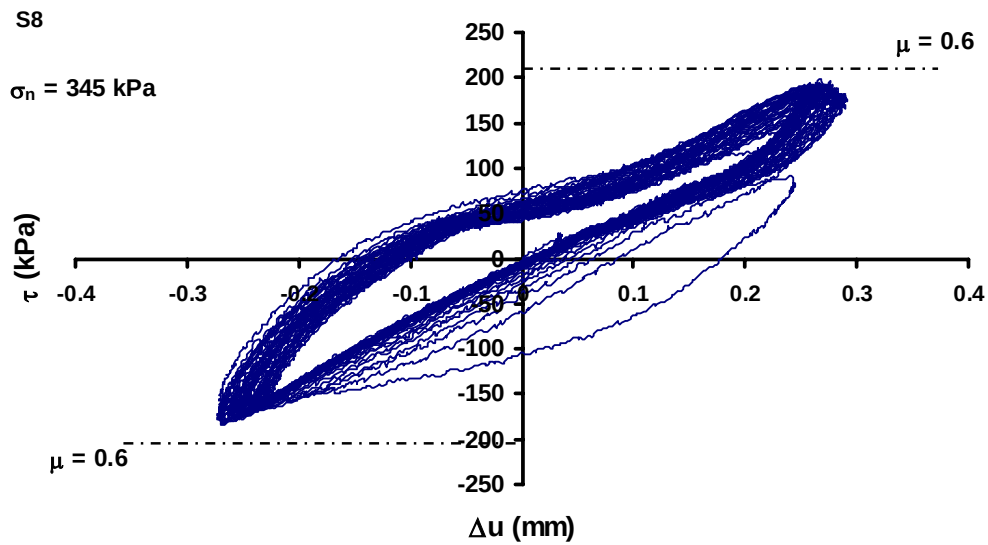
דגם S7 נבדק בגזירה מונוטונית בשלושה שלבים ולכן קיבל את הספרור $S7_1, S7_2, S7_3$. $S7_1$ נתון לארבעה מחזורי גזירה כאשר במהלך סגמנטים של גזירה שלילית מאמץ הגזירה עולה על חוזק הקרקע וניתן להניח שדגם זה כשל כבר במחזור הגזירה הראשון (תרשים 5.15a). עם זאת מאמץ הגזירה עולה עם התקדמות המחזוריים והעקומה מתנהגת באופן מחזורי. התפתחות הדילטציה אינה סימטרית

(תרשים 5.15b). סגירת הדגם בציר האנכי היא בסדר גודל של עשיריות המילימטר והיא הולכת ומצטמצמת עם התקדמות מחזורי הגזירה. כיוון שדגם זה כשל, עקומות מאמץ – תזוזה של בדיקות AT6 ו AT7 (שבוצעו על אותו דגם – ראה טבלה 5.1) אינן מוצגות כאן.

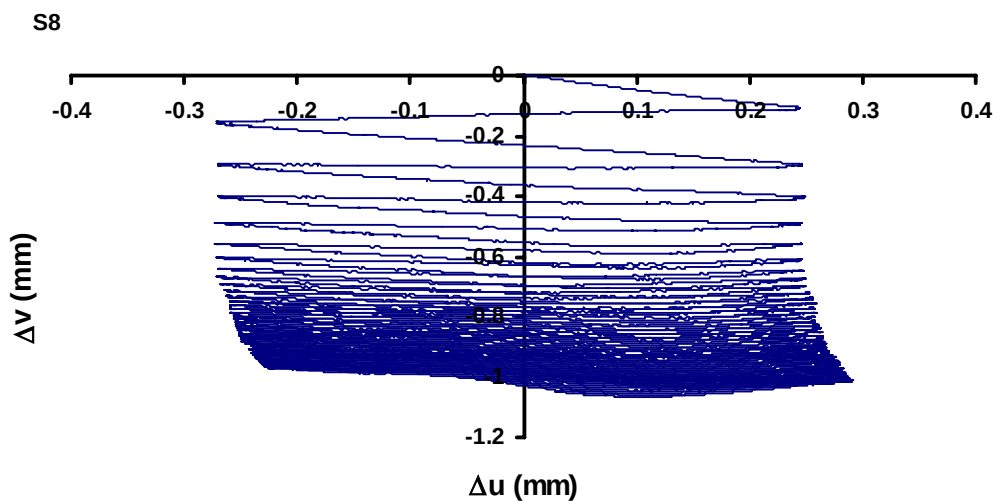


תרשים 5.15: (a) מאמץ גזירה כנגד תזוזת גזירה תחת מאמץ נורמלי קבוע במהלך 4 מחזורים; (b) התנהגות התפיחה במהלך סגמנטים של גזירה מחזורית מונוטונית (בדיקה AT5).

דגם S8 נבדק בארבעים מחזורי גזירה (תרשים 5.16a). הדגם מציג התנהגות מחזורית א - סימטרית. מאמץ הגזירה המתפתח בדגם בסיום סגמנט גזירה חיובי גבוה מזה המתפתח בסיום סגמנט גזירה שלילי. סגירת הדגם בציר האנכי סימטרית ומגיעה למילימטר אחד במהלך מחזורי הגזירה (תרשים 5.16b).



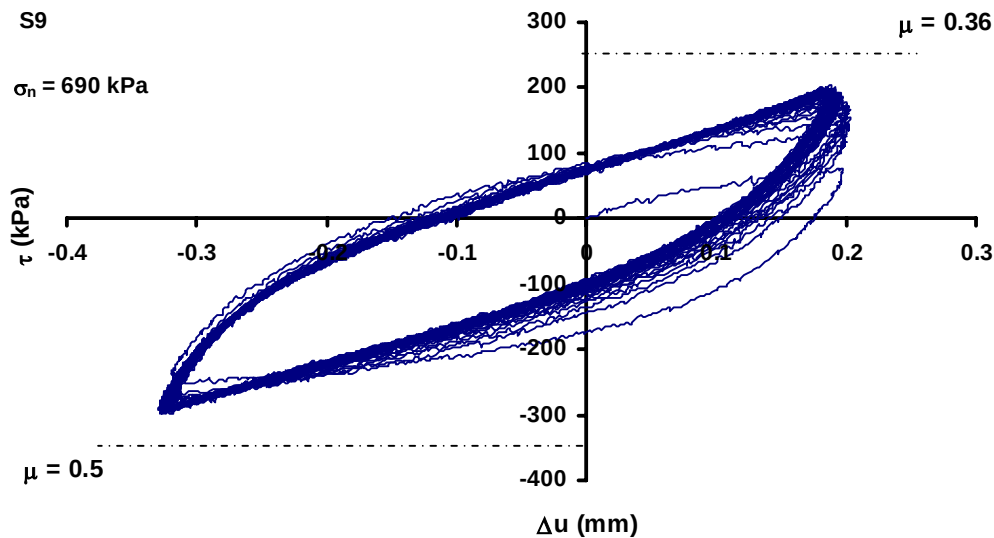
a



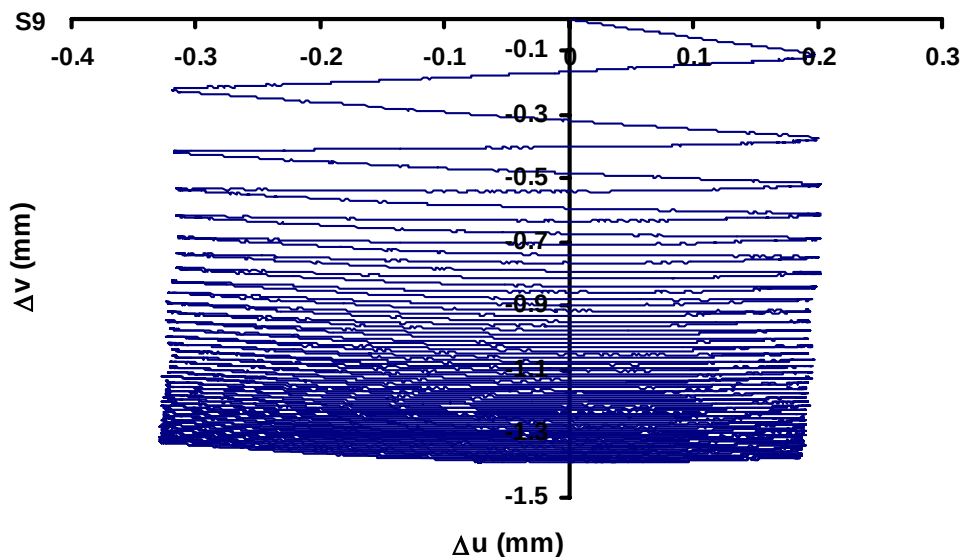
b

תרשים 5.16: (a) מאמץ גזירה כנגד תזוזת גזירה תחת מאמץ נורמלי קבוע במהלך 40 מחזורים; (b) התנהגות התפיחה במהלך סגמנטים של גזירה מחזורית מונוטונית, בדיקה AT8.

דגם S9 נבדק בארבעים מחזורי גזירה (תרשים 5.17a). הדגם מציג התנהגות מחזורית שאינה סימטרית כאשר מאמץ הגזירה עולה עם התקדמות מחזורי הגזירה. מאמץ הגזירה המתפתח בדגם בסיום סגמנט גזירה שלילי גבוה מזה המתפתח בסיום סגמנט גזירה חיובי. סגירת הדגם בציר האנכי אינה סימטרית וגדולה ממילימטר (תרשים 5.17b).



a



b

תרשים 5.17: (a) מאמץ גזירה כנגד תזוזות גזירה תחת מאמץ נורמלי קבוע במהלך 40 מחזורים ; (b) התנהגות התפיחה במהלך סגמנטים של גזירה מחזורית מונוטונית (בדיקה AT9).

5.3 מודול גזירה ($G'_0, G^{*'}_{\text{SP}}$) מתוקן של קרקע מטיפוס SP-SM.

ניתוח התוצאות.

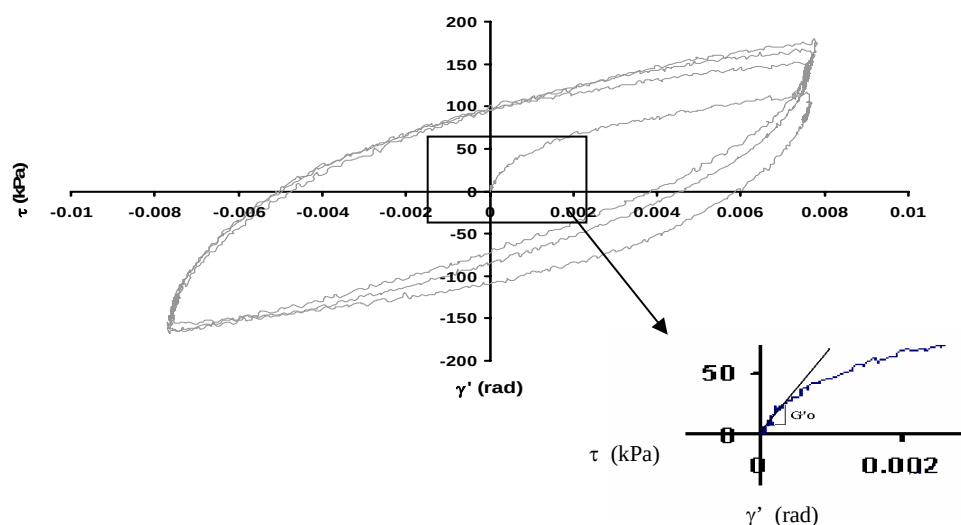
מחזורי גזירה הפועלים במהלך בדיקות גזירה מחזורית מונוטונית מביאים להתפתחות דפורמציות בדגמי הקרקע הנבדקים. מחזורים אלה מתוארים בתרשימים 5.12 – 5.17 בסעיף 5.2. הגדרת תחום תזוזות ומאמצים בו דגם קרקע מסוים (מהטיפוס הנ"ל) אינו נתון לכשל, חיוני לצורך דיון נוסף בתכונות החומר. בדיקות גזירה ישירה שנערכו בקרקע מטיפוס SP-SM מראות כי תזוזות הגזירה המתאימה לטווח המעוותים הנ"ל קטנה משמעותית מהתזוזה הדרושה על מנת להביא לכשל בחומר זה (תרשים 5.19a). מעטפת הכשל של קרקע זו מראה כי מקדם החיכוך בכשל הוא $\mu = 0.62$. בכל בדיקות הגזירה המחזורית (AT4 – AT9) ערך זה לא הושג למעט בדיקה AT7. לפיכך ההתנהגות המחזורית של

עקומות המאמץ – מעוות נתונה בתחום המקיים את תנאי הרציפות של החומר ומאפשר הגדרת מודול גזירה עבורו. באמצעות ניטור הדפורמציות החלות בדגם ניתן להעריך את מודול הגזירה הראשוני (G'_0) והאקוויולנטי ($G^{*'}$) של דגמי הקרקע. בפרק זה מוצגות התוצאות לאחר תיקון עבור דילטציה. תיקון זה הוא מלאכותי בעיקרו ומטפל בשינוי במעוות הגזירה כתוצאה מדילטציה המתרחשת בחומר עקב תנועות הגזירה. במספר מקרים כפי שמתואר בהמשך הדילטציה שלילית ולמעשה הדגם עובר התקצרות. השפעת התקצרות זו נבחנת במונחים של מעוות גזירה γ' מתוקן ומודול גזירה $G^{*'}$ מתוקן ביחס לפרמטרים אלה כאשר אינם מתוקנים. משמעות התיקון היא הצגת התוצאות בצורה איכותית יותר המאפיינת את מצב החומר ברגע נתון בתגובה לשינויים החלים בו תוך התקדמות הגזירה וכן הבנת מגמת התנהגות מעוות הגזירה של החומר בתגובה להתקצרות.

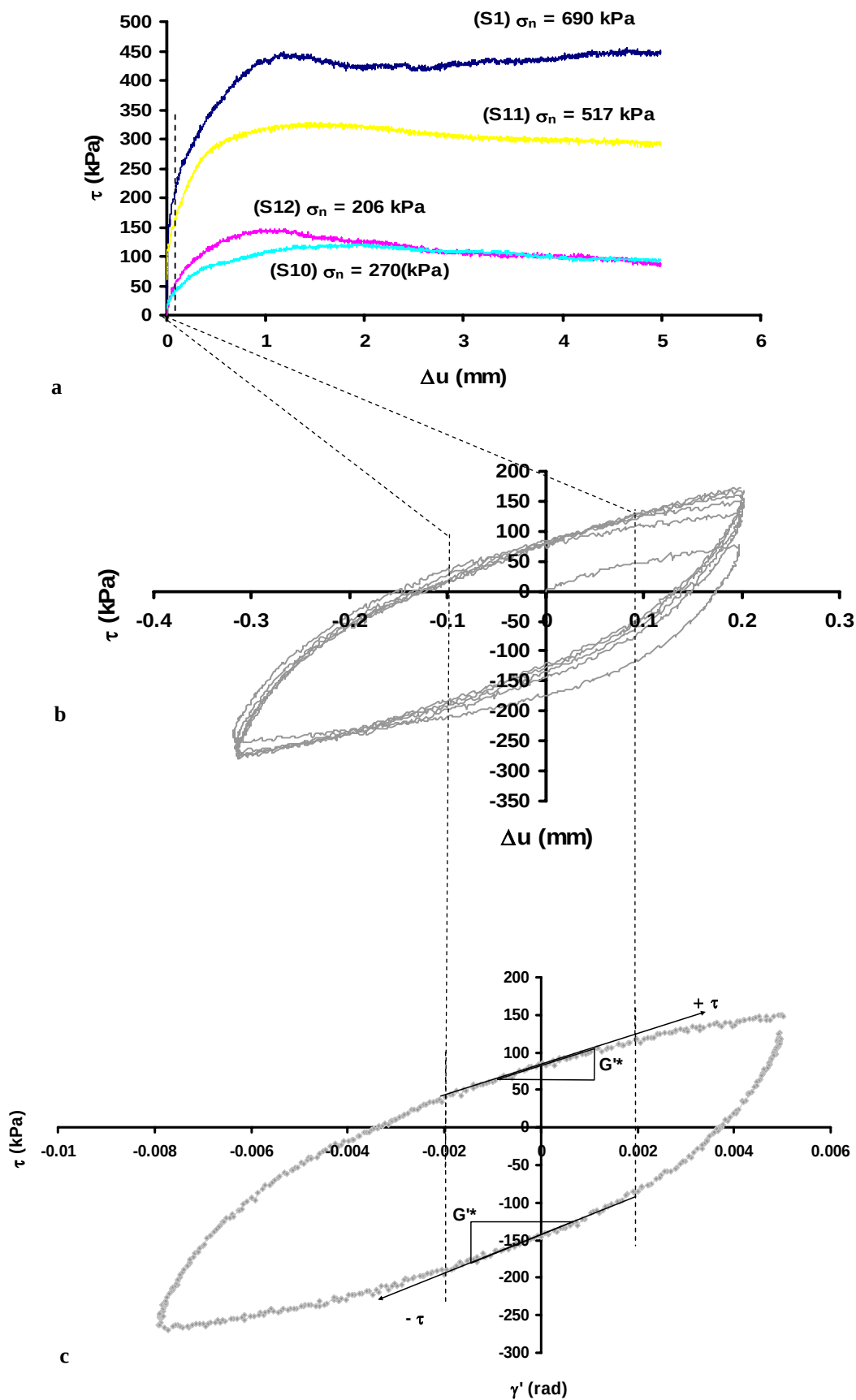
ניתוח מודול הגזירה הראשוני G'_0 עולה מתוך תחום המעוותים הקטנים המתפתחים בסגמנט הגזירה הראשון. היחס בין המאמץ למעוות τ/γ מחושב בקטע בו העקומה מתנהגת באופן לינארי (תרשים 5.18). מודול גזירה אקוויולנטי $G^{*'}$ מחושב כיחס בין מאמץ הגזירה (τ) למעוות גזירה מתוקן (γ') בקטע שבין $0.002 < \gamma' < 0.002$ – (תרשים 5.19 b – 5.19 c).

טבלאות 5.4 – 5.2 בסעיף זה מרכזות ערכים של מודול גזירה אקוויולנטי ומודול גזירה מנורמל עבור בדיקות הגזירה המחזורית. יש לשים לב לכך שמחזור גזירה ראשון מבוצע בסגמנט מס' 2 ומודול גזירה ראשוני מחושב עבור סגמנט זה. מודול גזירה אקוויולנטי מחושב עבור סגמנטים 3 ואילך. שני סגמנטים רצופים בעלי סימנים הפוכים מגדירים מחזור.

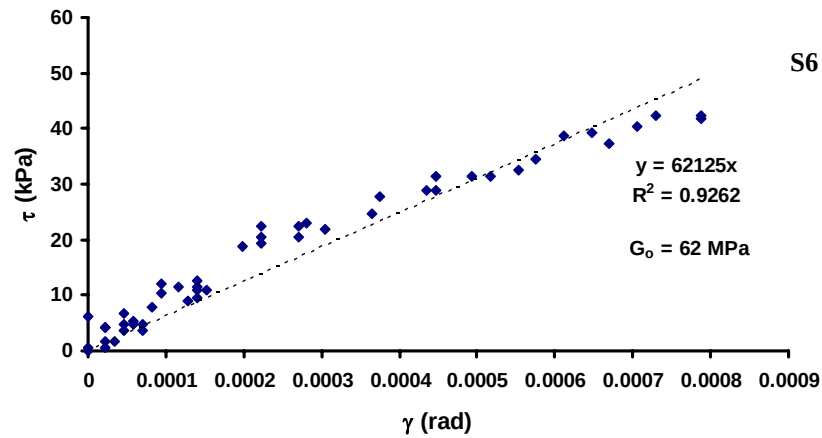
דגם S6 נבדק בבדיקה AT4. עבור דגם זה התחום בו המעוות לינארי הוא $\gamma < 0.001$. מאמץ גזירה המתפתח בתחילת סגמנט הגזירה הראשון (סגמנט מס' 2 בבדיקה) מראה כי מודול הגזירה הראשוני (ללא תיקון) של הדגם הוא 62 MPa (תרשים 5.20). ערך מודול הגזירה הראשוני של דגם זה לאחר תיקון עולה ל-64.3 MPa (תרשים 5.21). עקומת מאמץ – מעוות עבור גזירה מחזורית של דגם זה מתנהגת בצורה סימטרית ומראה כי מאמץ הגזירה עולה עם התקדמות המחזורים (תרשים 5.22). עליה זו מגדילה את ערכו של מודול הגזירה האקוויולנטי $G^{*'}$ ומצביעה על התחזקות הדגם עבור מספר מחזורים זה (טבלה 5.2).



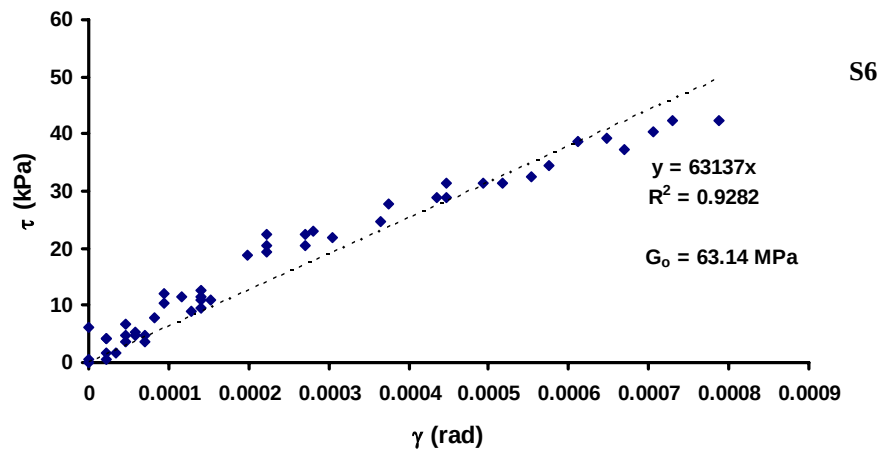
תרשים 5.18: הגדרת מודול גזירה ראשוני לאחר תיקון G'_0 מתוך סגמנט גזירה ראשון בבדיקת גזירה מחזורית.



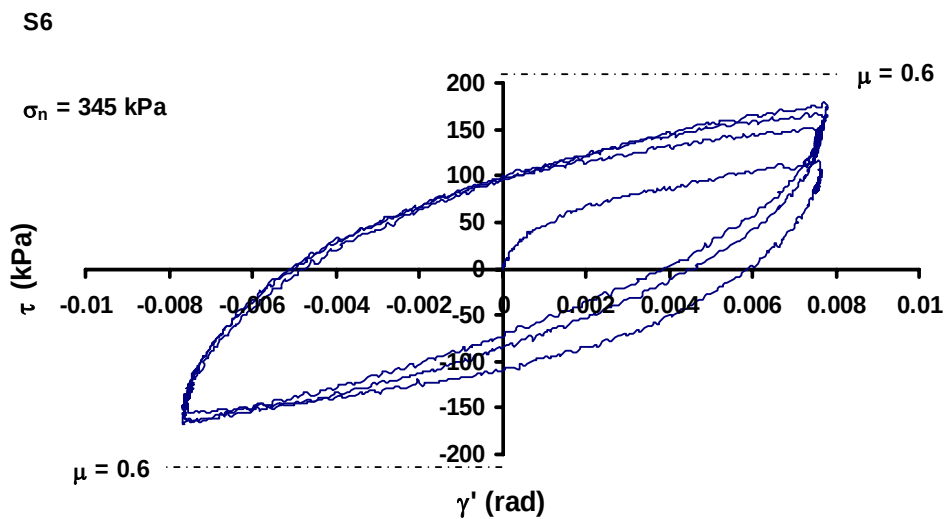
תרשים 5.19 a,b,c: תחום תזוזת הגזירה ומעוות הגזירה בקטע לינארי אלסטי בבדיקות גזירה מחזורית מנוטנית.



תרשים 5.20: מודול גזירה ראשוני (G_0) לא מתוקן של דגם S6 מתוך סגמנט גזירה ראשון.



תרשים 5.21: מודול גזירה ראשוני (G'_0) מתוקן של דגם S6 עבור סגמנט גזירה ראשון.

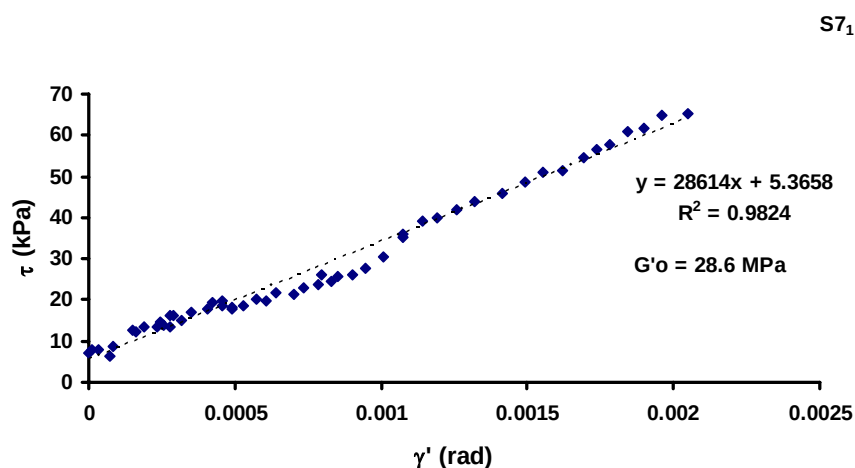


תרשים 5.22: עקומת מאמץ – מעוות בבדיקת גזירה מחזורית מונוטונית AT4.

seg +	G*	G*/Go	seg -	G*	G*/Go	ללא תיקון
2	62.000	2.908	3	10.013	0.470	
4	12.073	0.566	5	15.443	0.724	
6	13.310	0.624	7	16.558	0.776	
8	15.010	0.704				
seg +	G*	G*/G'o	seg -	G*	G*/G'o	מתוקן
2	64.300	3.015	3	9.950	0.467	
4	11.956	0.561	5	15.244	0.715	
6	13.629	0.639	7	16.275	0.763	
8	14.724	0.690				

טבלה 5.2: מודול גזירה אקוויולנטי ומנורמל עבור סגמנטים של גזירה מחזורית בבדיקה AT4.

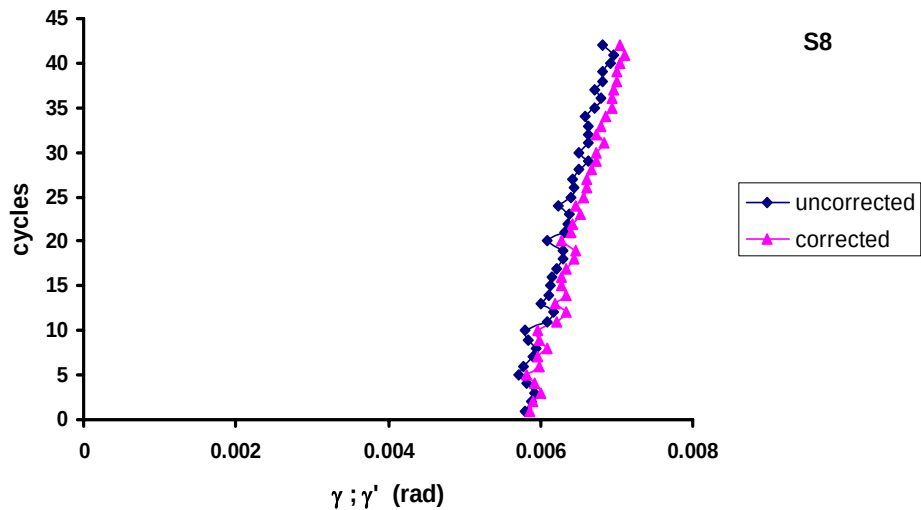
ערך מודול הגזירה הראשוני של דגם S7₁ הוא 28.6 MPa והתנהגות עקומת מאמץ – מעוות בתחום המעוותים הקטנים נראים בתרשים 5.23.



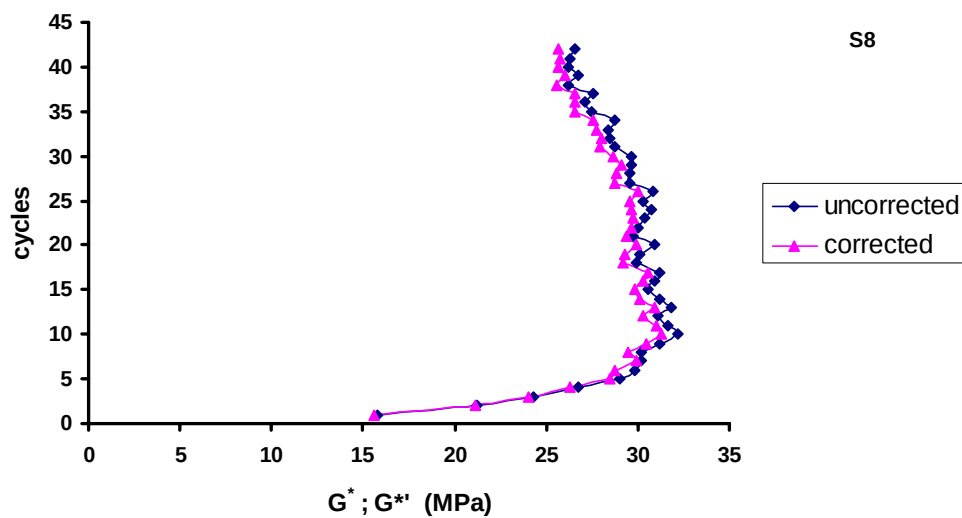
תרשים 5.23: מודול גזירה ראשוני ($G'o$) מתוקן של דגם S7₁ עבור סגמנט גזירה ראשון.

דיאגרמת מאמץ – תזוזה של דגם S7 (בדיקה AT7) מראה שבמהלך הגזירה המחזורית הושג ערך מקדם החיכוך בכשל ($\mu = 0.6$). בהנחה שדגם זה כשל, אין משמעות לתיאור מודול גזירה אקוויולנטי כאן כיוון שהדגם בלתי רציף. ההתנהגות המחזורית וצורתן הכללית של עקומות המאמץ – מעוות המחזוריות אינן מושפעות מהתיקון שנעשה עבור דילטציה. עם זאת השינוי בערכי מעוות הגזירה משפיע על היחס τ/γ . כזכור הדגם עובר התקצרות בציר האנכי בעת תנועות הגזירה. התקצרות זו מגדילה את מעוות הגזירה γ ולכן העקומה המתארת את ערכי המעוות נעה ימינה לאחר התיקון (γ'). תרשים 5.24 מדגים זאת עבור דגם S8. כתוצאה מהגידול במעוות הגזירה היחס בין מאמץ הגזירה למעוות קטן וערכו של מודול הגזירה קטן. הביטוי לכך הוא תזוזה של עקומת ערכי מודול הגזירה שמאלה (תרשים 5.25). שתי העקומות ממחישות בברור כי אין שינוי במגמתן עקב התיקון.

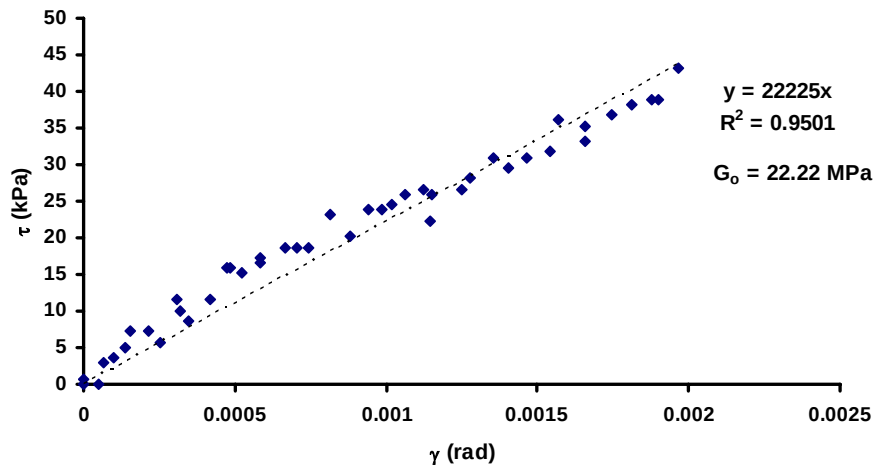
תיקון עבור דילטציה מראה כי ערך מודול הגזירה הראשוני המתקבל בבדיקת הגזירה המחזורית של דגם S8 אחרי תיקון (G'_0) משתנה לעומת מודול גזירה ראשוני לפני תיקון (G_0). תרשימים 5.26 – 5.27 מראים כי במקרה זה השינוי הוא של 0.9 MPa.



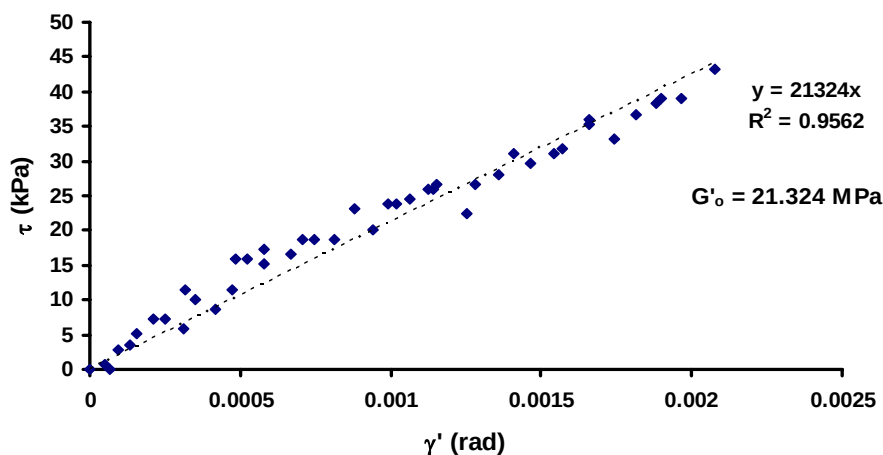
תרשים 5.24: ערכי מעוות גזירה נקודתיים בשיא מחזורי גזירה לפני (γ) ואחרי תיקון (γ').



תרשים 5.25: ערכי מודול גזירה נקודתיים בשיא מחזורי גזירה לפני (G^*) ואחרי תיקון (G'^*).



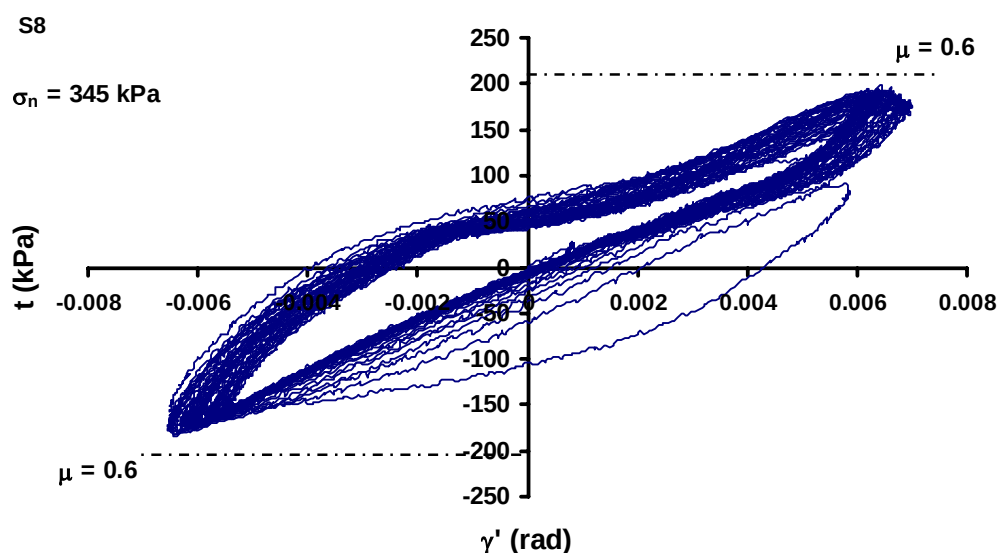
תרשים 5.26: מודול גזירה ראשוני (G'_0) לא מתוקן של דגם S8 מתוך סגמנט גזירה ראשון.



תרשים 5.27: מודול גזירה ראשוני (G'^0) מתוקן של דגם S8 מתוך סגמנט גזירה ראשון.

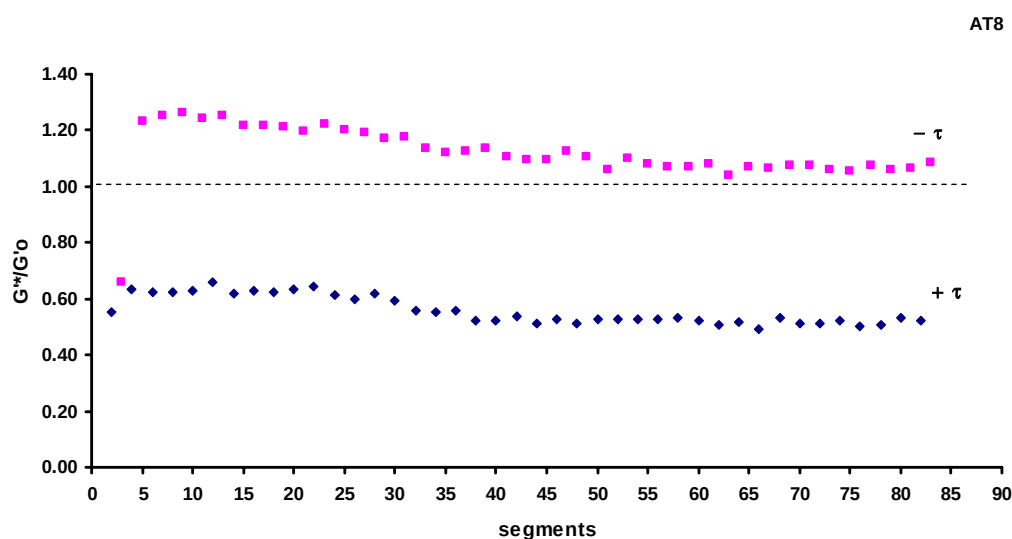
תרשים 5.28 מראה עקומת מאמץ – מעוות גזירה מחזורית של דגם S8. בבדיקה זו יחס המאמצים τ / σ_n קטן מ 0.6, מתחת למקדם החיכוך של החומר ולפיכך הבדיקה איננה גורמת לכשל בחומר. מעוות הגזירה המרבי (0.007 rad) מושג לאחר תזוזה של 0.27 מילימטר - כ 18 - 25% מתזוזת הגזירה הדרושה לגרימת כשל בקרקע מטיפוס זה כפי שנמצא בבדיקות הגזירה הישירה בהן $\Delta u_{\text{failure}} = 1 - 1.5$ מילימטר. מיד לאחר מחזור הגזירה הראשון ערך מאמץ הגזירה עולה. על אף התנהגות מחזורית העקומה אינה סימטרית. סגמנטים המתארים גזירה בכיוון החיובי (חציון עליון) מתונים יותר מאלה המתארים גזירה בכיוון השלילי (חציון תחתון). בקטע בו מעוות הגזירה מוגבל לתחום $0.002 < \gamma' < 0.002$ - תזוזת הגזירה (0.1 מילימטר) היא כ 10% - 6 מערך התזוזה הדרושה לכשל בקרקע מטיפוס זה. ערכים של מודול גזירה אקוויוולנטי המחושבים בתחום הלינארי נמוכים יותר עבור סגמנטים חיוביים מאשר עבור סגמנטים שליליים. ערכים אלו וערכים מנורמלים למודול גזירה ראשוני מוצגים גם בטבלה 5.3.

בהתבסס על ערכים מתוקנים של מודול הגזירה האקוויולנטי ומודול הגזירה הראשוני (21.324 MPa) עבור דגם S8 תרשים 5.29 מראה כי היחס G^*/G'_0 גדל במהירות בשני המחזורים הראשונים. לאחר מחזורים אלה יחס זה קטן בצורה מתונה מאוד. דבר זה מצביע על הקשחת הדגם בעקבות הגזירה המחזורית ומוכר בבדיקות מנוקזות כתופעה המכונה הקשיית מעוותים.



תרשים 5.28: עקומת מאמץ – מעוות בבדיקת גזירה מחזורית מונוטונית AT8.

הקו האופקי בתרשים 5.29 (וגם בתרשים 5.32) מתאר את היחס $G^*/G'_0 = 1$. קו זה מוצג כאן כדי להדגיש את העובדה שמודול הגזירה המנורמל של דגמים S8 ו S9 עולה תוך כדי התקדמות מחזורי הגזירה. דבר זה עומד בניגוד לבדיקות גזירה מחזורית רבות המוכרות מהספרות (ראה סעיף 2.3-2.4) בהן חלה דגרדציה של מודול הגזירה המנורמל וערכו יורד מ 1 לערך נמוך יותר (ראה תרשים 6.5). יש לציין עם זאת שבמחקר זה החומר נבדק במצב כמעט יבש ובתנאים מנוקזים, בשונה מהתנאים המקובלים בבדיקות גזירה מחזורית בספרות.



תרשים 5.29: השתנות מודול גזירה מנורמל (G^*/G'_0) בסגמנטים של גזירה חיובית ושלילית. $G'_0 = 21.324$ MPa. שני סגמנטים מציינים מחזור גזירה אחד.

seg +	G*	G*/G'o	seg -	G*	G*/G'o
2	21.324	1.000	3	14.066	0.660
4	11.826	0.555	5	26.243	1.231
6	13.523	0.634	7	26.750	1.254
8	13.294	0.623	9	26.902	1.262
10	13.277	0.623	11	26.482	1.242
12	13.370	0.627	13	26.767	1.255
14	14.033	0.658	15	25.977	1.218
16	13.177	0.618	17	25.970	1.218
18	13.452	0.631	19	25.859	1.213
20	13.279	0.623	21	25.564	1.199
22	13.539	0.635	23	26.026	1.221
24	13.710	0.643	25	25.613	1.201
26	13.068	0.613	27	25.439	1.193
28	12.777	0.599	29	24.966	1.171
30	13.234	0.621	31	25.090	1.177
32	12.644	0.593	33	24.259	1.138
34	11.910	0.559	35	23.905	1.121
36	11.783	0.553	37	24.052	1.128
38	11.895	0.558	39	24.203	1.135
40	11.168	0.524	41	23.555	1.105
42	11.111	0.521	43	23.395	1.097
44	11.464	0.538	45	23.367	1.096
46	10.892	0.511	47	23.980	1.125
48	11.298	0.530	49	23.528	1.103
50	10.895	0.511	51	22.615	1.061
52	11.201	0.525	53	23.422	1.098
54	11.208	0.526	55	23.030	1.080
56	11.226	0.526	57	22.787	1.069
58	11.196	0.525	59	22.820	1.070
60	11.348	0.532	61	23.000	1.079
62	11.153	0.523	63	22.147	1.039
64	10.830	0.508	65	22.867	1.072
66	11.066	0.519	67	22.691	1.064
68	10.521	0.493	69	22.963	1.077
70	11.316	0.531	71	22.976	1.077
72	10.897	0.511	73	22.588	1.059
74	10.894	0.511	75	22.490	1.055
76	11.170	0.524	77	22.931	1.075
78	10.721	0.503	79	22.567	1.058
80	10.813	0.507	81	22.752	1.067
82	11.320	0.531	83	23.189	1.087
84	11.174	0.524	85	***	***

מקרא:

מודול גזירה ראשוני (סגמנט 2): $G'o = 21.324 \text{ MPa}$

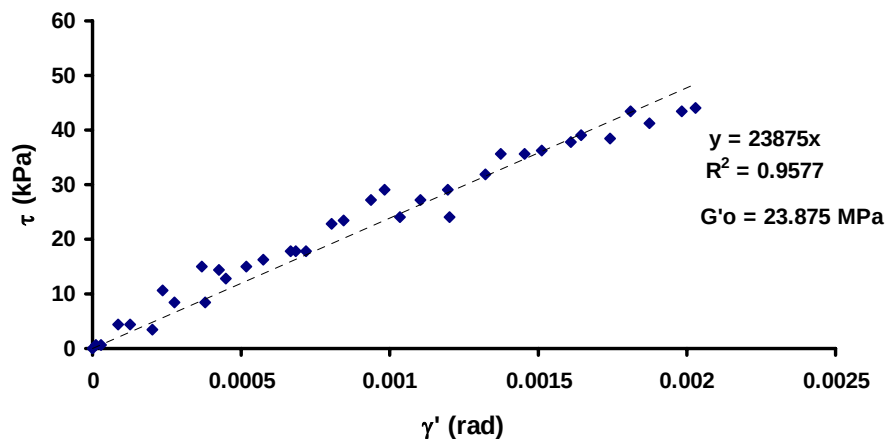
שני סגמנטים מגדירים מחזור גזירה: 3,4, 5,6, 9,10 וכו'.

seg + ; seg - סגמנט גזירה חיובי ושלילי בהתאמה.

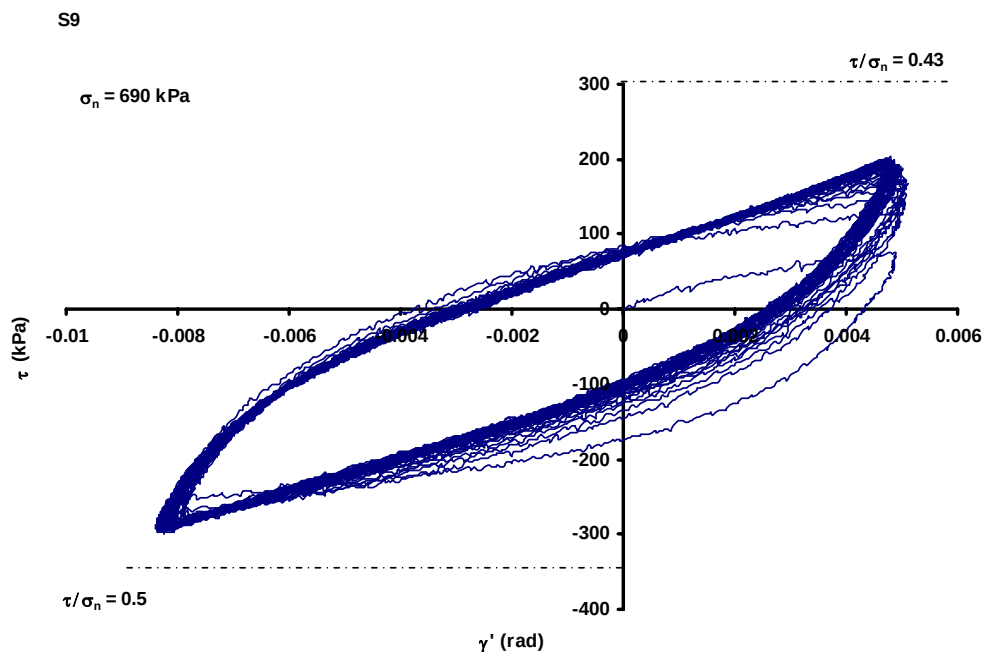
$G^*/G'o$ מודול גזירה אקוויולנטי מנורמל למודול גזירה ראשוני.

טבלה 5.3: מודול גזירה אקוויולנטי ומנורמל עבור סגמנטים של גזירה מחזורית בבדיקה AT8.

מודול גזירה ראשוני של דגם S9 אינו מושפע מתיקון שנערך עבור דילטציה כמוצג בתרשים 5.30 המתאר את G'_0 לאחר התיקון. עם זאת ניכר כי התיקון משפיע על ערכי מעוות הגזירה במהלך הבדיקה באופן דומה לדגם S8. לאחר התיקון הערך של מעוות הגזירה γ' עולה וכתוצאה מכך היחס בין מאמץ הגזירה למעוות הגזירה קטן וערכו של מודול הגזירה G^* קטן. מאמץ הגזירה המכסימלי הפועל על דגם זה הוא כ-300 kPa (בקטע השלילי) ותחת מאמץ אנכי של 690 kPa מאמץ גזירה זה אינו מספיק כדי לגרום לכשל בדגם. יחס המאמצים $(\tau/\sigma_n = 0.43)$ נמוך ממקדם החיכוך של קרקע זו ($\mu = 0.6$). עבור דגם זה ההתנהגות המחזורית אינה מושפעת מהתיקון והצורה של עקומת המאמץ – מעוות אינה משתנה. במקרה זה היא סימטרית והשיפוע בסגמנטים החיוביים נמוך במעט מבסגמנטים השליליים בקטע שבין $0.002 < \gamma' < 0.002$ (תרשים 5.31).



תרשים 5.30: מודול גזירה ראשוני (G'_0) מתוקן של דגם S9 מתוך סגמנט גזירה ראשון.



תרשים 5.31: עקומת מאמץ – מעוות בבדיקת גזירה מחזורית מונוטונית AT9.

טבלה 5.4 מציגה ערכים של היחס G^*/G'_0 בקטע הלינארי של מקטעי הגזירה (סגמנטים) החיוביים והשליליים. השינוי החד בערכו של מעוות הגזירה γ במחזורי הגזירה הראשונים, מביא להגדלת היחס G^*/G'_0 בקצב מהיר גם עבור דגם S9 (תרשים 5.32).

seg +	G*	G'/Go	seg -	G*	G'/Go
2	23.875	1	3	19.68	0.824
4	13.94	0.584	5	25.96	1.087
6	18.94	0.793	7	26.7	1.118
8	21.58	0.904	9	27.21	1.140
10	22.46	0.941	11	27.61	1.156
12	23.37	0.979	13	27.49	1.151
14	23.67	0.991	15	27.4	1.148
16	23.445	0.982	17	28.89	1.210
18	24.287	1.017	19	27.8	1.164
20	23.993	1.005	21	28.417	1.190
22	24.132	1.011	23	29.233	1.224
24	23.915	1.002	25	28.476	1.193
26	24.175	1.013	27	29.169	1.222
28	24.283	1.017	29	28.322	1.186
30	24.158	1.012	31	28.928	1.212
32	24.54	1.028	33	28.807	1.207
34	24.473	1.025	35	28.04	1.174
36	24.409	1.022	37	28.97	1.213
38	25.053	1.049	39	28.871	1.209
40	24.405	1.022	41	29.207	1.223
42	24.547	1.028	43	29.2	1.223
44	24.654	1.033	45	28.924	1.211
46	24.375	1.021	47	29.568	1.238
48	24.823	1.040	49	29.103	1.219
50	25.205	1.056	51	29.16	1.221
52	25.321	1.061	53	29.965	1.255
54	25.205	1.056	55	29.161	1.221
56	24.646	1.032	57	29.553	1.238
58	24.758	1.037	59	29.987	1.256
60	25.386	1.063	61	29.689	1.244
62	24.776	1.038	63	30.032	1.258
64	25.279	1.059	65	29.693	1.244
66	25.186	1.055	67	30.585	1.281
68	25.622	1.073	69	29.353	1.229
70	24.753	1.037	71	30.27	1.268
72	24.968	1.046	73	30.449	1.275
74	25.026	1.048	75	29.064	1.217
76	25.046	1.049	77	29.947	1.254
78	25.758	1.079	79	30.042	1.258
80	25.655	1.075	81	30.673	1.285
82	25.598	1.072	83	29.904	1.253
84	24.934	1.044	85	31.367	1.314

מקרא:

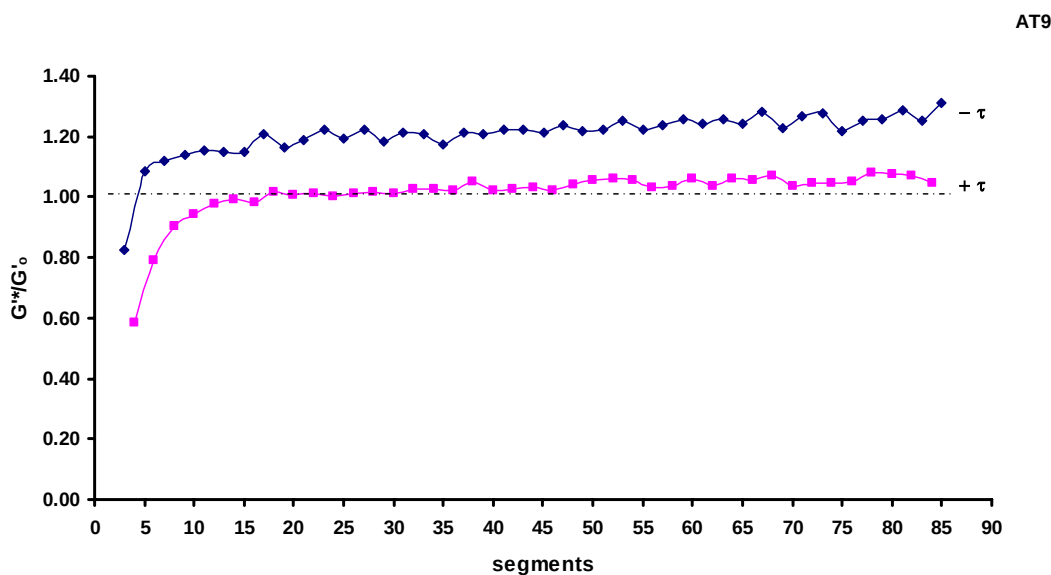
מודול גזירה ראשוני (סגמנט 2): $G'_0 = 23.875 \text{ MPa}$

שני סגמנטים מגדירים מחזור גזירה: 3,4 5,6 9,10 וכו'.

seg - ; seg + סגמנט גזירה חיובי ושלילי בהתאמה.

G^*/G'_0 מודול גזירה אקוויולנטי מנורמל למודול גזירה ראשוני.

טבלה 5.4: ערכי מודול גזירה אקוויולנטי ומנורמל עבור סגמנטים של גזירה מחזורית בבדיקה AT9.



תרשים 5.32: התנהגות מודול גזירה אקוויולנטי מתוקן ומנורמל כתלות במעוות הגזירה (בדיקה AT9).

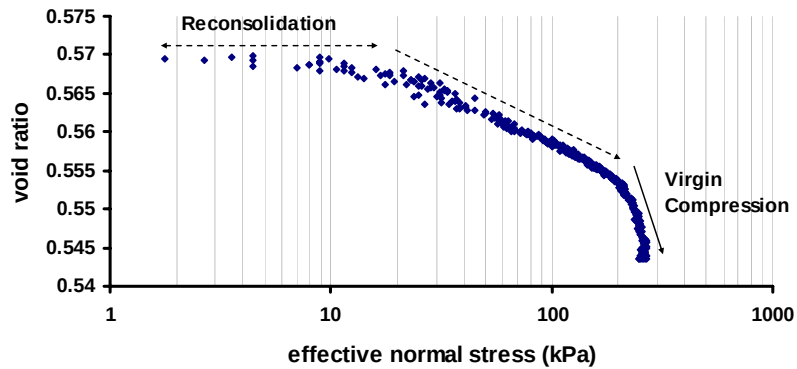
5.4 התנהגות הקרקע תחת מאמצים נורמלים.

5.4.1 דרגת הדחיסה של קרקע מטיפוס SP-SM.

סגמנט ההעמסה הנורמלית הוא הסגמנט הראשון של מבחני הגזירה שבוצעו על דגמי הקרקע משני הטיפוסים. בזמן בו מתרחשת ההעמסה הנורמלית מתפתח מאמץ לחיצה על הדגם. מאמץ הלחיצה (σ_n) מביא להתקצרות הדגם בציר האנכי ולסגירה של החללים הקיימים בדגם. במחקר זה סגמנט הלחיצה הופעל בקצב קבוע של 1psi/sec עד לערך מאמץ נורמלי קבוע (σ_n tr.). בכל הבדיקות ערך המאמץ הנורמלי שהופעל על דגמי הקרקע היה גבוה מערך המאמץ האנכי האפקטיבי בעומק ממנו הוצא הדגם כדי להשיג בוודאות את ערך הלחץ הטרם (P'_p Preconsolidation pressure) ולבחון את התנהגות הקרקע תחת עומסים גבוהים מהפועלים בשדה.

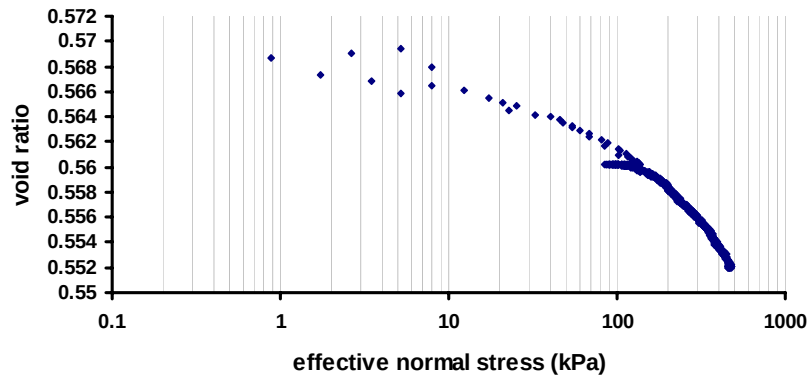
תרשימים 5.33 – 5.41 מתארים את השינוי במנת החללים של דגמי הקרקע תחת מאמצים נורמלים שונים. עבור דגמים S10-S12 המייצגים את הקרקע מטיפוס SP-SM חושבה מנת חללים ראשונית $e_0 = 0.57$. תרשים 5.33 ממחיש את התהליך העובר על דגם קרקע במהלך הדחיסה. ערך e_0 נשמר באזור ה Reconsolidation של עקומת הדחיסה (קו אופקי מרוסק) עד למאמץ אנכי של כ- 20 kPa. התחום בו המאמץ האנכי נע בין 20 – 200 kPa (קו משופע מרוסק) הוא אזור המושפע מהפרת המדגם. כאשר מאמץ הלחיצה עובר את ערך הלחץ הטרם, חלק העקומה המתאר את הדחיסה הבתולית (Virgin Compression – קו מלא) תלול יותר ומשתנה עד לערך מאמץ הלחיצה המכסימלי (σ_n) שנקבע עבור אותה בדיקה. התוצאות מראות כי הלחץ הטרם עבור קרקע זו הוא כ- 200 kPa. תיקון קסגרנדה (Casagrande) שבוצע באופן ידני על העקומות הנ"ל מראה שערכי P'_p נמצאים בין 190 – 240 kPa. בתרשימים מדווחים ערכים מתוקנים. ערך OCR נמצא בבדיקות אלה כגדול מ- 1 כלומר שהקרקע טרם דחוסה בשדה.

S10



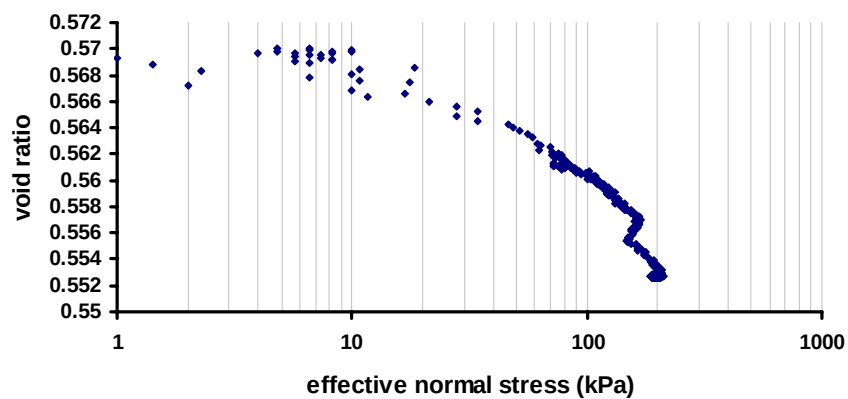
תרשים 5.33: השינוי במנת החללים של דגם קרקע מטיפוס SP-SM תחת מאמץ נורמלי אפקטיבי של 270 kPa ; OCR = 3.9 ; $P'_p = 240$ kPa (בדיקה AT14).

S11



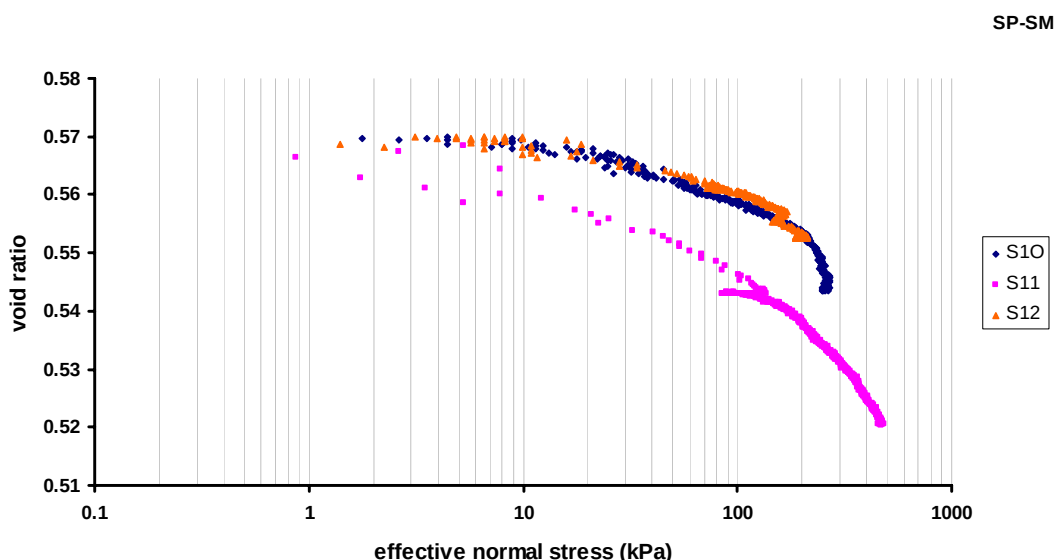
תרשים 5.34: השינוי במנת החללים של דגם קרקע מטיפוס SP-SM תחת מאמץ נורמלי אפקטיבי של 517 kPa ; OCR = 3.98 ; $P'_p = 210$ kPa (בדיקה AT17).

S12



תרשים 5.35: השינוי במנת החללים של דגם קרקע מטיפוס SP-SM תחת מאמץ נורמלי אפקטיבי של 207 kPa ; OCR = 3.6 ; $P'_p = 190$ kPa (בדיקה AT18).

תרשים 5.36 מציג את עקומות הדחיסה של דגמים S10-S12 במרחב של $e/\log p$. סופרפוזיציה זו מראה כי תחת מאמצי לחיצה שונים, התנהגות עקומות הדחיסה של הקרקע שומרת על מגמה אחידה. אזור ה Recompression אופקי מתון ושינוי השיפוע בין 20 – 100 kPa מהווה ביטוי להפרת המדגם. במאמץ אפקטיבי אנכי הגבוה מ- 200 kPa (לחץ טרום הדחיסה) העקומות מראות כי המדגמים נדחסים מעבר לדרגת דחיסתם בשדה.

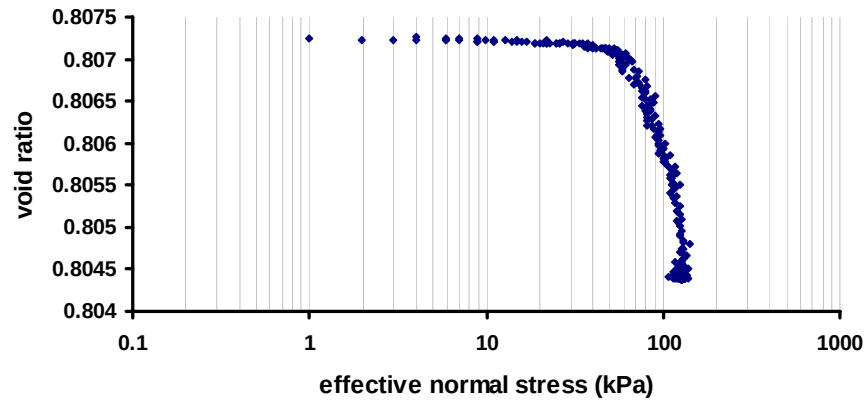


תרשים 5.36: עקומות דחיסה אופייניות בקרקע מטיפוס SP-SM תחת מאמצים נורמלים אפקטיביים משתנים.

5.4.2 דרגת הדחיסה של קרקע מטיפוס SP-SC.

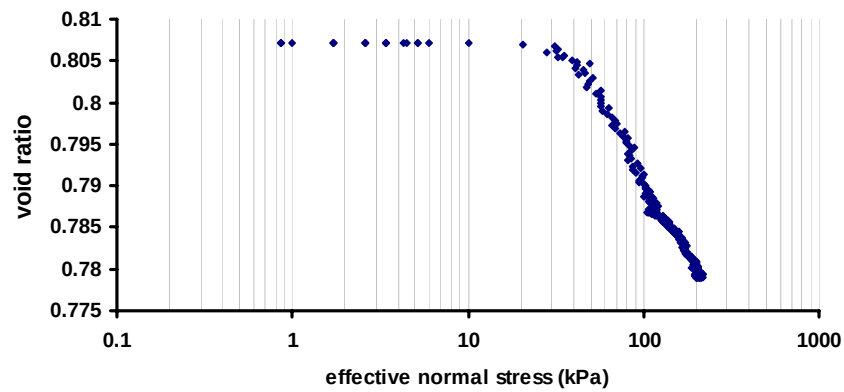
מנת החללים הראשונית המחושבת עבור קרקע זו היא $e_0 = 0.8072$. עקומות הדחיסה של דגמי הקרקע מטיפוס SP-SC מאופיינות בפיזור קטן מאד של ערכי מנת החללים באזור ה Reconsolidation של העקומה (תרשימים 5.40 – 5.37). ערכים של הלחץ הטרם (P'_p) לאחר תיקון קסגרנדה נעים בטווח שבין 35-80 kPa בדגמים C2, C3 ו C5. ערכים אלה מראים כי ערך ה OCR המתקבל בחישוב קטן מ- 1 כלומר הקרקע לא עברה דחיסה בשדה (למעשה תת-דחוסה). בניגוד לכך ערך P'_p של דגם C6 עומד על 200 kPa על אף שהוצא מעומק זהה לזה של דגם C5 בשדה ומגדיר את הקרקע כטרם דחוסה. חלק העקומה המתאר את הדחיסה הבתולית (Virgin Compression) מאופיין בשיפוע תלול ואחיד למעט בבדיקה AT19 שנערכה על דגם C5 (תרשים 5.39). במהלך הלחיצה כנראה התרחשה תגובה בלתי רצויה של הבוכנה הנורמלית. לאחר תקלה זו העקום שומר על צורתו וממשיך במקביל לעקום המקורי.

C2



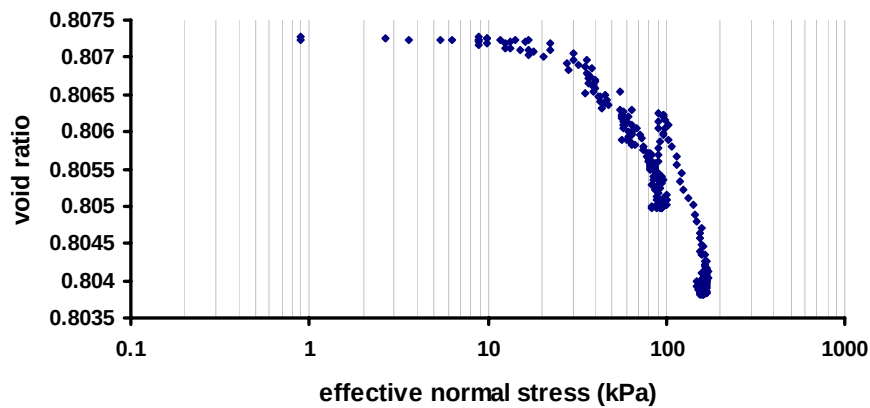
תרשים 5.37: השינוי במנת החללים של דגם קרקע מטיפוס SP-SC תחת מאמץ נורמלי אפקטיבי של 138 kPa : OCR = 0.56 , $P'_p = 80$ kPa (בדיקה AT13) .

C3



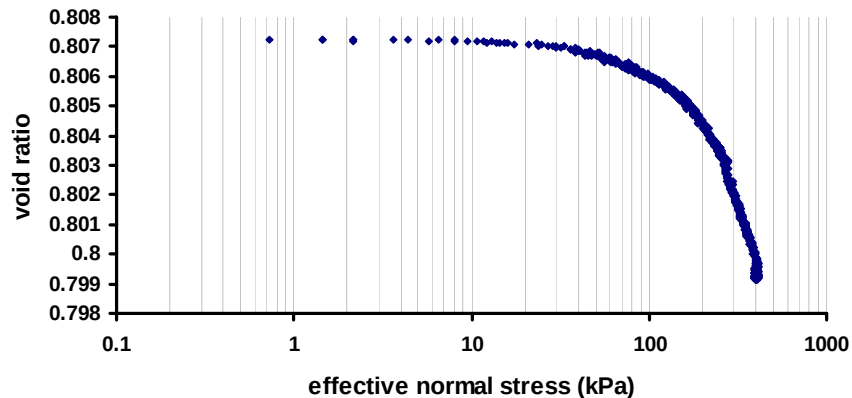
תרשים 5.38: השינוי במנת החללים של דגם קרקע מטיפוס SP-SC תחת מאמץ נורמלי אפקטיבי של 207 kPa : OCR = 0.35 , $P'_p = 50$ kPa (בדיקה AT15) .

C5



תרשים 5.39: השינוי במנת החללים של דגם קרקע מטיפוס SP-SC תחת מאמץ נורמלי אפקטיבי של 172 kPa : OCR = 0.4 , $P'_p = 35$ kPa (בדיקה AT19) .

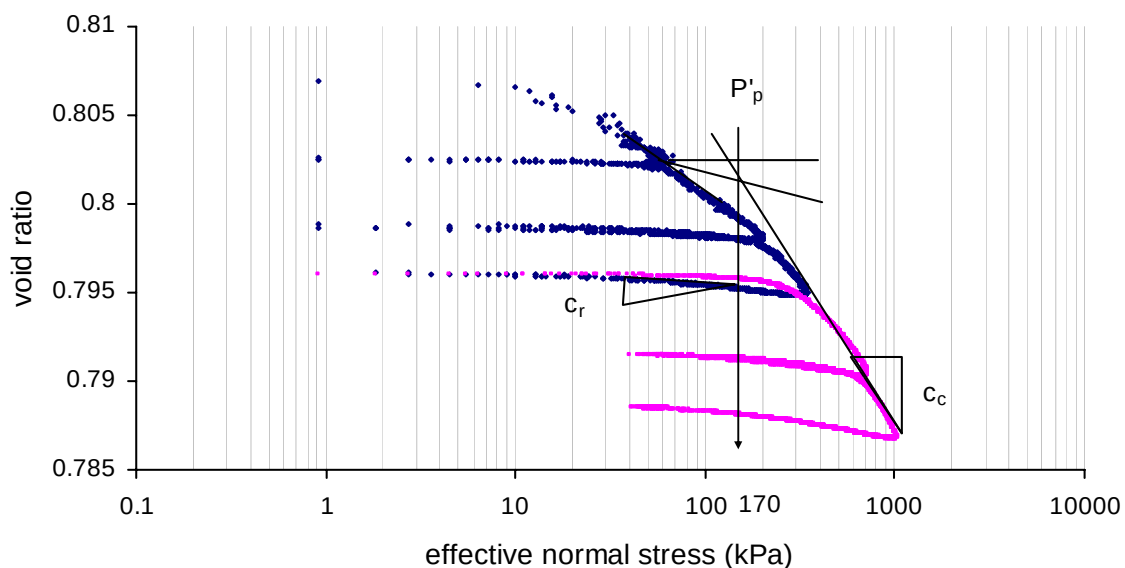
C6



תרשים 5.40: השינוי במנת החללים של דגם קרקע מטיפוס SP-SC תחת מאמץ נורמלי אפקטיבי של 414 KPa : OCR = 2.3 , $P'_p = 200$ kPa (בדיקה AT20).

תוצאת הבדיקה שנערכה על דגם C1 מתוארת בתרשים 5.41. על דגם זה הופעלו חמישה מחזורי לחיצה והרפיה כאשר המאמץ הנורמלי (σ_n) בכל מחזור גדל בהדרגה. ערך הלחץ הטרם (P'_p) נמצא עבור דגם זה באמצעות תיקון קסגרנדה ומתאים למאמץ אפקטיבי אנכי של כ- 170 kPa. הקרקע במקרה זה טרום דחוסה כאשר OCR = 1.4. בכל המחזורים נמצא ערך $c_r = 0.0015$ (Recompression index) ושיפוע ה Reconsolidation מקביל לקודם לו. לחלק העקומה המתאר את הדחיסה הבתולית יש שיפוע די אחיד עם ערך $c_c = 0.018$ (Compression index). השינוי בערך של P'_p בין מחזורי הלחיצה גורם לשינוי בערך ה OCR בין המחזורים. במחזור הראשון ה OCR > 1 במחזור השני OCR = 1. במחזור השלישי OCR < 1 ובין המחזור הרביעי לאחרון OCR שוב גדול מ- 1 ועבור מצב זה הקרקע טרום דחוסה.

C1

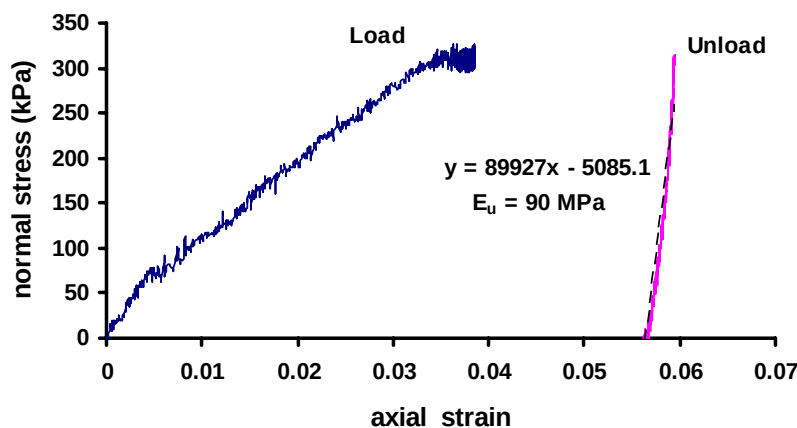


תרשים 5.41: עקומת דחיסה מחזורית של דגם קרקע מטיפוס SP-SC תחת מאמצים נורמלים אפקטיביים גדלים: מחזור ראשון 138 kPa, מחזור שני 276 kPa, מחזור שלישי 414 kPa, מחזור רביעי 690 kPa, מחזור חמישי ואחרון 1 MPa.

5.4.2 מודול אלסטיות של הקרקע.

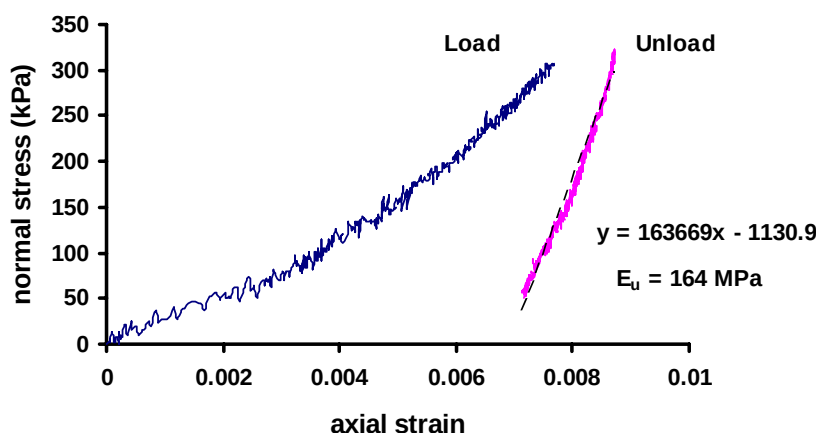
הסגמנט הראשון של בדיקות הגזירה המחזורית שנערכו בדגמי הקרקע S6, S8 ו S9 הוא סגמנט העמסה נורמלית (Load). הסגמנט האחרון בבדיקות אלה הוא סגמנט בו מוסר העומס הנורמלי (Unload). התרשימים בסעיף זה מציגים באופן גרפי את מהלך הסגמנטים האלה במרחב של מאמץ צירי (נורמלי) כנגד העיבור (מעוות) הצירי. בהנחה שלא התרחש כשל בדגם בשום שלב של הגזירה המחזורית והדגם נשאר רציף ניתן לתאר את מודול האלסטיות של הדגם מסגמנט הפריקה E_u בשלב בו העומס מוסר בקצב קבוע של 1 psi / sec. השיטה בה חושב העיבור הצירי (ϵ) מתוארת בסעיף 3.4.3 בפרק שיטות מחקר. כזכור דגם S7 כשל במהלך הגזירה המחזורית ולכן תוצאות לגבי דגם זה אינן רלוונטיות. תוצאות וערכים עבור הבדיקות האחרות מופיעים בתרשימים 5.42 – 5.49 להלן.

S6



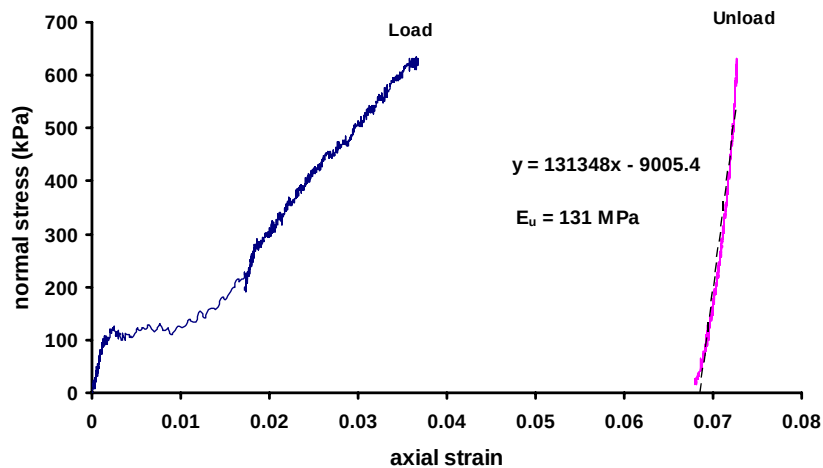
תרשים 5.42: מודול אלסטיות* של קרקע מטיפוס SP-SM מתוך סגמנט פריקה נורמלית, לאחר 3 מחזורי גזירה (בדיקה AT4).

S8



תרשים 5.43: מודול אלסטיות* של קרקע מטיפוס SP-SM מתוך סגמנט פריקה נורמלית, לאחר 40 מחזורי גזירה (בדיקה AT8).

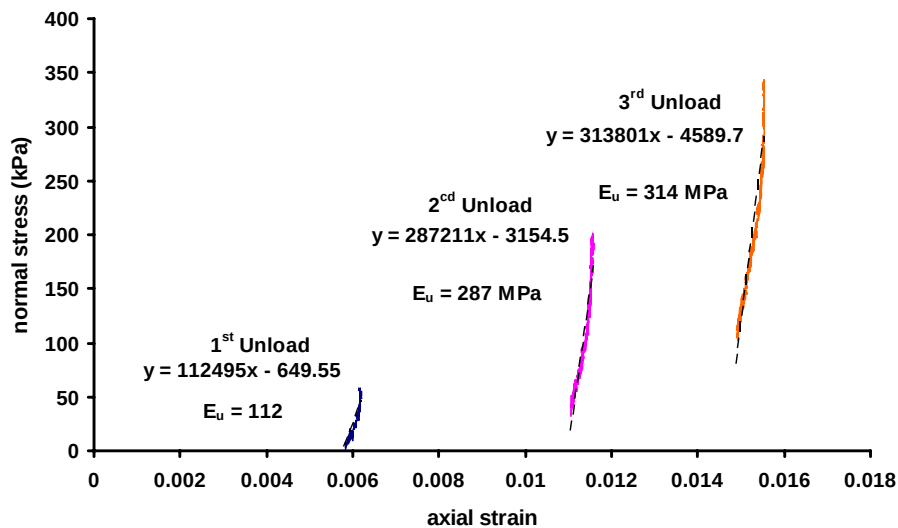
S9



תרשים 5.44: מודול אלסטיות* של קרקע מטיפוס SP-SM מתוך סגמנט פריקה נורמלית, לאחר 40 מחזורי גזירה (בדיקה AT9).

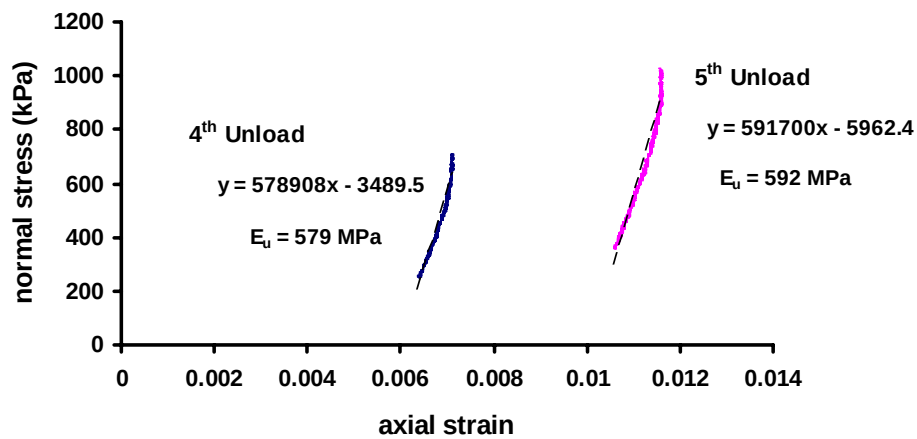
דגם C1 השייך לקרקע מטיפוס SP-SC עבר שישה מחזורי לחיצה והרפיה נורמלית בשלוש בדיקות שונות (AT10, 11, 12). ניתוח של סגמנט הסרת העומס מצביע על עלייה בערכו של מודול האלסטיות מ 112 MPa במחזור הראשון ועד 704 MPa במחזור השישי.

C1



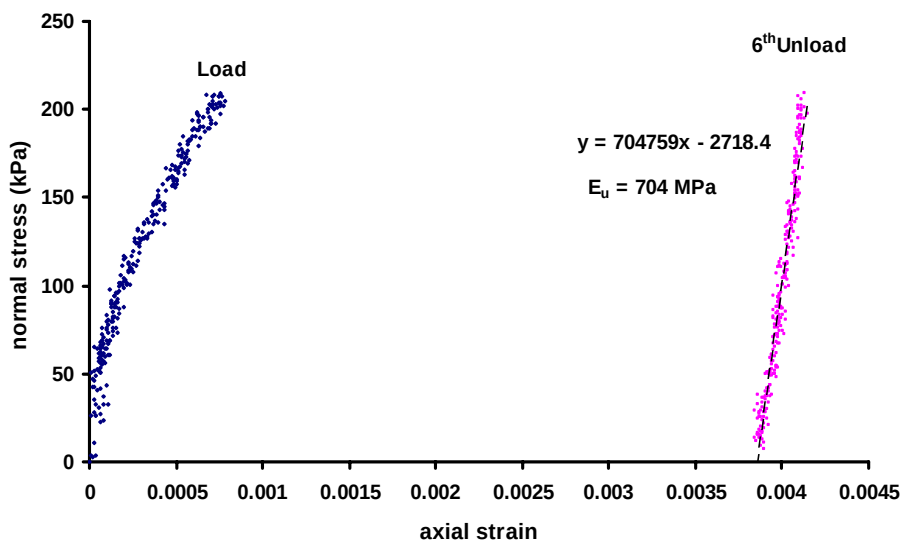
תרשים 5.45: מודול אלסטיות של דגם קרקע מטיפוס SP-SC, לאחר שלושה מחזורי לחיצה ופריקה נורמלית (בדיקה AT10).

C1



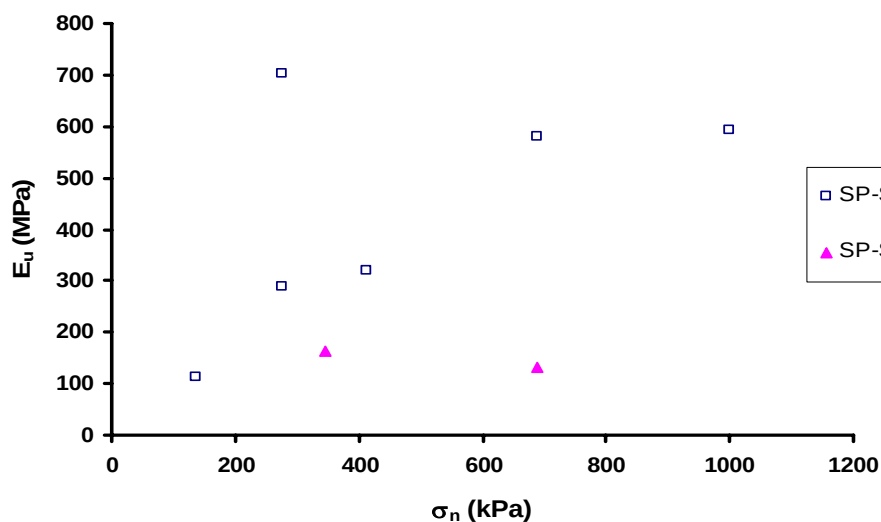
תרשים 5.46: מודול אלסטיות של דגם קרקע מטיפוס SP-SC לאחר חמישה מחזורי לחיצה ופריקה נורמלית (בדיקה AT11).

C1

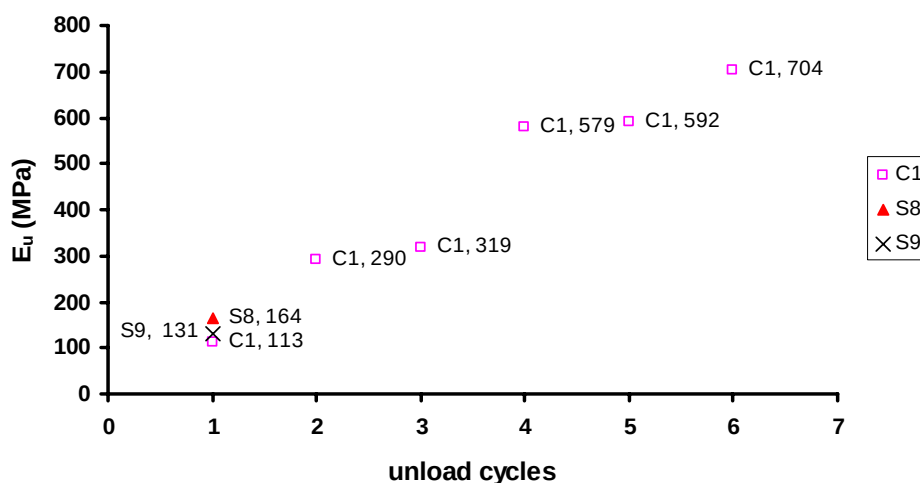


תרשים 5.47: מודול אלסטיות של דגם קרקע מטיפוס SP-SC לאחר שישה מחזורי לחיצה ופריקה נורמלית (בדיקה AT12).

סיכום התוצאות מוצג בתרשימים 5.48 – 5.49 :



תרשים 5.48 : פיזור ערכי מודול אלסטיות עבור שני טיפוסים הקרקע תחת מאמצים נורמלים שונים.



תרשים 5.49 : השינוי בערכי מודול אלסטיות של דגמי הקרקע לאחר מספר מחזורי פריקה (Unload).

תוצאות בדיקות הלחיצה באמצעותן ניתן לקבל את מודול האלסטיות של הקרקע מראות כי :

1. מודול האלסטיות של דגמי הקרקע מטיפוסים SP-SC ו SP-SM הוא מסדר גודל של מאות (MPa) - פסקל .
2. תחת מאמצים נורמלים שונים מתקבלים ערכי מודול אלסטיות שונים.
3. העמסה חוזרת של דגם הקרקע מביאה לעלייה בערך מודול האלסטיות שלו עם העלייה במספר מחזורי העמסה נורמלית.

פרק 6 – דיון.

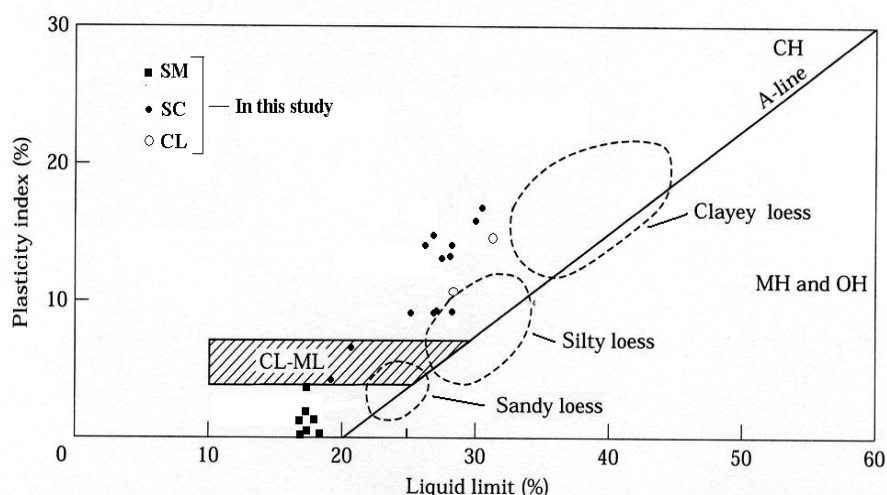
6.1 איכות התוצאות.

במסגרת מחקר זה נעשה לראשונה שימוש במערכת לבדיקות גזירה ישירה בסלעים לצורך בדיקות סטטיות ודינמיות בקרקע. הבדיקות בוצעו בגבול התחתון של הכוחות והתזוזות הניתנים ליישום באמצעות המערכת. כוח הלחיצה המכסימלי שהופעל בבוכנה הנורמלית היה כ- 10,000 lb שהם כ- 4% מהיכולת של הבוכנה. למעשה מרבית הבדיקות (AT4 – AT20) בוצעו בטווח שבין 1.6% - 0.4% מהכוח המרבי של הבוכנה הנורמלית.

היתרון בשימוש במערכת זו לבדיקות בקרקע טמון למעשה בגודל הדגם הנבדק. בעוד במערכות סטנדרטיות לבדיקות גזירה ישירה של קרקעות שטח החתך של הדגם אינו עולה על 100 cm^2 הרי שבמערכת בה נעשה שימוש במחקר זה שטח החתך של הדגמים נע בין $125 - 226 \text{ cm}^2$ (טבלה 5.1). דבר זה נותן מענה טוב יותר לצורך אפיון פרמטרים מכניים של קרקעות הטרוגניות שהינן נפוצות מאוד. התוצאות מראות כי ניתן לבצע בהצלחה בדיקות בקרקע מהסוג הנחקר באמצעות מערכת זו. עם זאת דרושה עבודה נוספת לאפיון טוב יותר של הפרמטרים האלסטיים (E ו G) של טיפוסי הקרקע שנבחנו במסגרת המחקר. עבור בדיקות גזירה מחזורית קיימת הגבלה זמנית של הפעלת בוכנת הגזירה בבקרת תזוזה בלבד ($\pm \Delta u$), ולכן כל עוד בוכנת הגזירה אינה פועלת בבקרת עומס רצוי להבין מהי כמות התזוזה של הדגם בתחום אלסטי לינארי ולהגביל את כמות התזוזה המחזורית של בוכנת הגזירה למספר mils בודדים בתחום זה. לפיכך דרושה היכרות ראשונית עם החומר בטרם נוכל להפעיל בדיקות גזירה מחזוריות בבקרת תזוזה.

6.2 מאפייני הקרקע באתר המחקר.

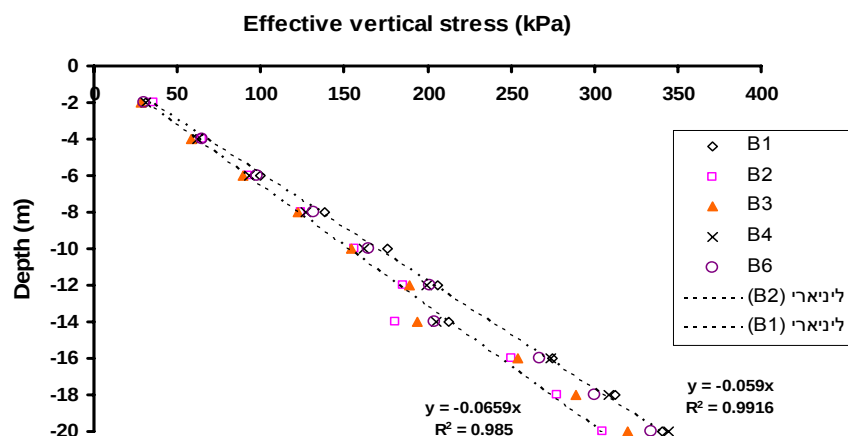
המרכיב הליטולוגי העיקרי של הקרקע באתר המחקר הוא חול דק. טיפוסי הקרקע שנמצאו והוגדרו בחתך, SM (חול סילטי), SP (חול חרסיתי) ו CL (חרסית חולית) מבוססים על המרכיב החולי והשפעתו ניכרת על המאפיינים וההתנהגות הפלסטית של הקרקע. שלושת טיפוסי הקרקע נמצאו כבעלי פלסטיות נמוכה. בדיקות הפלסטיות מראות כי ערכי אינדקס הפלסטיות של הקרקע מטיפוס SC נעים בין 4.6 – 16.5 % ונמצאים בתחום התחתון עבור לס חרסיתי. אינדקס הפלסטיות שנמצא עבור החול הסילטי נמוך מאד ונע בין 0 – 3%. גבול הנזילות של שלושת טיפוסי הקרקע נמוך ביחס לקרקעות לס טיפוסיות לפי Gibbs and Holland (1960) בהן המרכיב הסילטי והחרסיתי דומיננטי יותר (תרשים 6.1). ערכי LL ו-PI של הקרקע באזור המחקר דומים לאלו של קרקעות לס בלוב (Assallay et al., 1994).



תרשים 6.1: מאפיינים פלסטיים של טיפוסים הקרקע מאתר המחקר ביחס לקרקעות לס לפי הקלסיפיקציה של Gibbs and Holland (1960).

6.2.1 מאמצים בקרקע.

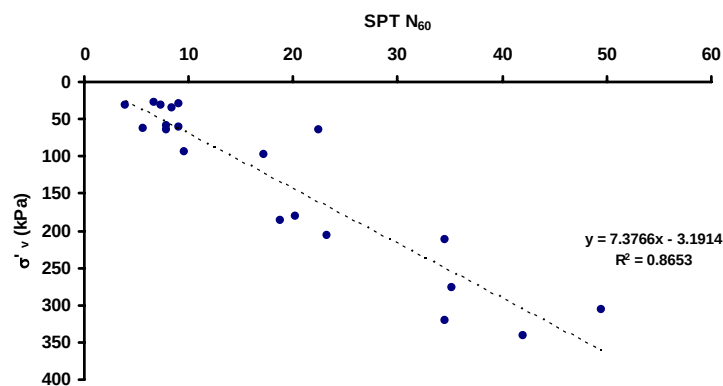
המשקל המרחבי היבש (γ_d) של הקרקעות באתר המחקר נע בין $13.6 - 17.9 \text{ kN/m}^3$ עבור הטיפוס SM ובין $15.6 - 19.3 \text{ kN/m}^3$ עבור הטיפוס SC. שינויי השכבות בחתך הקרקע באתר המחקר (תרשימים 4.1 - 4.5), אינם צפויים להשפיע לפיכך באופן משמעותי על שינוי במאמץ האפקטיבי האנכי בקרקע. פונקציית המאמץ האפקטיבי האנכי ($\sigma'_v = \gamma z$) המחושבת עבור חתכי הקרקע בבורות הקידוחים (מסומנים B1-B6), מצביעה על כך שהמאמץ האפקטיבי האנכי בקרקע באתר המחקר אינו משתנה באופן משמעותי. בתרשים 6.2 משורטטים ערכי σ'_v כנגד עומק החתך. קידוחים B1 ו-B2 נבחרו כמייצגים לצורך הגדרת תחום בו עשוי המאמץ האנכי להשתנות במרחב. בעומק של 20 מ' ערכו של σ'_v נע בין 310 – 340 kPa. המאמץ האנכי בקיר של מחפורת II נמצא מתאים לתחום זה (תרשים 4.9). מרבית בדיקות הגזירה הישירה ובדיקות הגזירה המחזורית נערכו תחת מאמצים נורמלים בתחום זה. מספר בדיקות נערכו בתחום מאמצים נורמלים גבוה יותר (414 - 700 kPa) המתאימים לעומקים של 27 – 46 מ'.



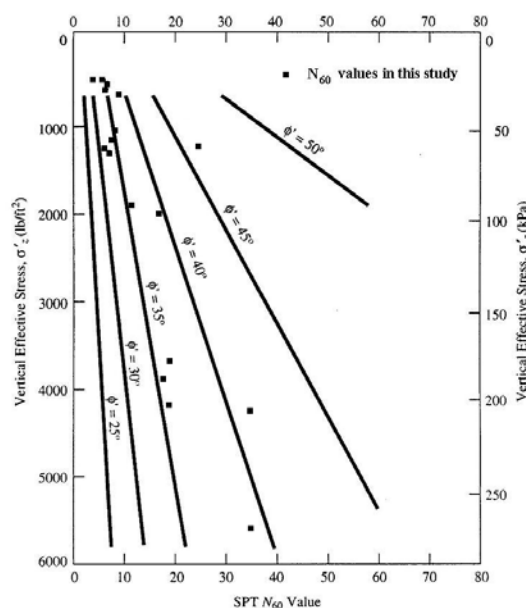
תרשים 6.2: תחום ההשתנות של המאמץ האפקטיבי האנכי בקרקע באתר המחקר (B = borehole).

6.2.2 ערכי חוזק גזירה.

הפרמטרים המכניים של הקרקע מטיפוס SM אופייניים לקרקעות גרנולריות. זווית החיכוך הפנימית שנמצאה ($\phi = 32^\circ$) טיפוסית עבור חולות מהסוג הנ"ל בישראל ובעולם (Wiseman, 1962 ; Zlokov, 1972). בתרשים 6.3 סומנו כל ערכי N_{60} שנדגמו בחול הסילטי בבדיקות ה SPT באתר המחקר. קיימת התאמה טובה בין ערכים אלו למאמץ האפקטיבי האנכי בקרקע. התאמה של ערכי N_{60} בחול הסילטי לקורלציה של DeMellow (1971) מוצגת בתרשים 6.4. רוב התוצאות מסתדרות בתחום שבו זווית החיכוך הפנימית (ϕ') היא בין 30° - 35° עבור ערכי N_{60} שבין 5-20. חלק קטן מהתוצאות נופל בתחום בו ערכי $N_{60} > 20$ המתאים לזווית חיכוך פנימית בתחום שבין 35° - 40° . התחום התחתון הגיוני עבור קרקע זו ומתאים לערך זווית החיכוך הפנימית שנמצאה במחקר זה. ראוי לציין שעל אף ערך קוהזיה נמוך מאד (אפסי) שנמצא עבור החול הסילטי, קיימים בחתך המחשוף באתר המחקר קירות אנכיים של מספר מטרים של קרקע זו העומדים יציבים ואינם מתמוטטים תחת משקלם העצמי (תרשים 4.5). ניתן לייחס דבר זה לתכולת הדקים ($\approx 10\%$) ולתכולת הרטיבות הטבעית הנמוכה ($w < 10\%$) של הקרקע באזור (תרשימים 4.1 – 4.5) הגורמת למתח קפילרי בחללים בקרקע.



תרשים 6.3: הקשר בין תוצאות SPT ומאמץ אפקטיבי אנכי בקרקע מטיפוס SM עם $\phi' = 32^\circ$.

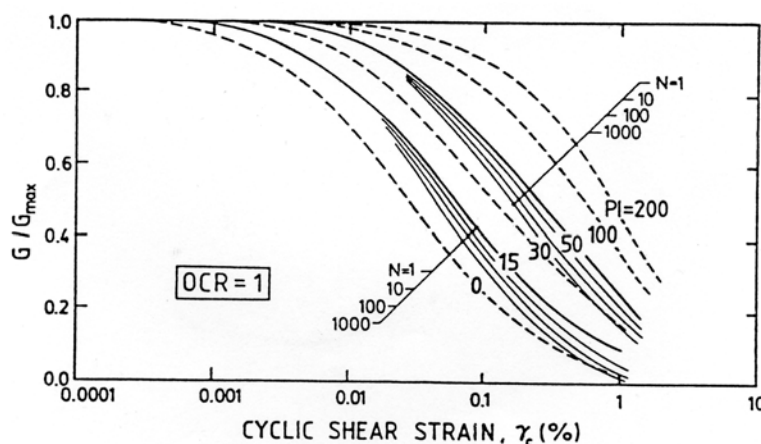


תרשים 6.4: התאמת ערכי N_{60} עבור קרקע חולית עם $\phi' = 32^\circ$ מאתר המחקר לקורלציה של DeMellow.

במבחני הגזירה הישירה של קרקע מטיפוס SP-SC במצב יבש נמצא כי חוזק הגזירה הוא כ- 400 kPa (תרשים 5.17). טווח המאמצים הנורמלים בהם נבדקה קרקע זו ($138 \text{ kPa} < \sigma_n < 414 \text{ kPa}$) מתאים לטווח המאמצים הנורמלים (σ'_v) הפועלים עליה בשדה אך זהו תחום מצומצם יחסית ומן הראוי לבצע בדיקות גזירה ישירה נוספות בתחום רחב יותר. יש להניח כי חוזק הגזירה של קרקע זו מושפע מנוכחות תלכדי הקרבונט המפוזרים בה באופן בלתי אחיד. חתכים בלתי אחידים של תלכידים אלו נמצאים במישורים שונים בדגם ולפיכך השפעתם על חוזק הגזירה משתנה מדגם לדגם. כמו כן אחוז הדקים בקרקע זו גבוה בכ- 50% מכמות הדקים בקרקע מטיפוס SP-SM. ייתכן שההטרונגיות של קרקע זו מקשה על מציאת קריטריון כשל ברור עבודה.

6.2.3 התעייפות החומר בגזירה מחזורית.

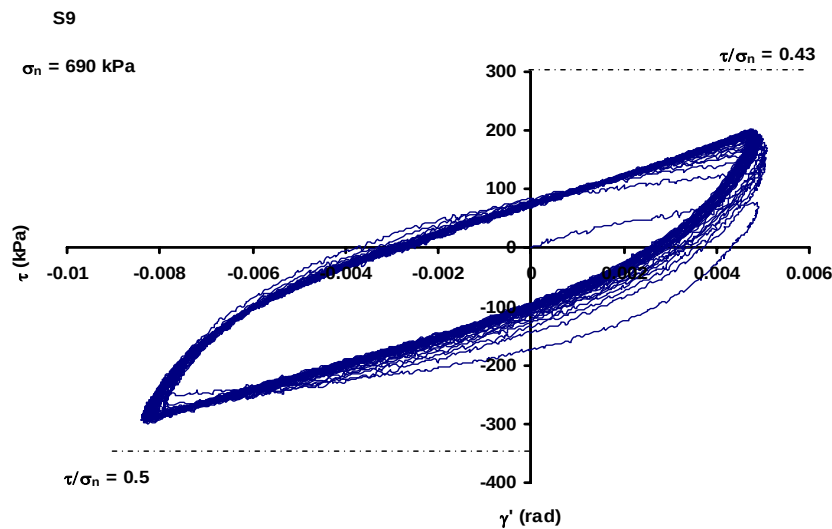
התוצאות של בדיקות הגזירה המחזורית בקרקע מטיפוס SP-SM (תרשימים 5.32 ו- 5.33) מראות כי היחס בין מודול גזירה אקוויוולנטי מתוקן למודול גזירה ראשוני מתוקן (G^*/G'_0) גדל עם העלייה במספר המחזורים ומתייצב על ערך קבוע למדי. דבר זה מצביע על כך שבמסגרת 40 מחזורי גזירה לא חלה דגרדציה של חוזק הגזירה של הדגם וואו של מודול הגזירה שלו. התנהגות זו מתאימה לבדיקות מנוקזות בהן מוכרת תופעה המכונה הקשיית מעוותים. בבדיקות גזירה בלתי מנוקזות מתקבלת בדרך כלל תופעה הפוכה בה נצפית ירידה בערך מודול הגזירה (G) ומודול הגזירה המנורמל (G_{eq}/G_{max}) כמוצג בתרשים 6.5 להלן.



תרשים 6.5: מודול גזירה אקוויוולנטי מנורמל כגד מעוות גזירה (Vucetic and Dobry, 1991).

במסגרת דיון זה יש להזכיר את תכונות החומר ותכונות הבדיקה. מודול גזירה הוגדר בסעיף 2.4 כתכונה של החומר ותלוי במעוות הגזירה. בבדיקות הגזירה המחזורית (AT4 – AT9) שנערכו במערכת לבדיקות גזירה ישירה, מעוות הגזירה הוכתב בבדיקה שכן סגמנטים של גזירה בבדיקות המחזוריות בוצעו בבקרת תזוזה ותחת הכתבה של $\pm \Delta u$. באופן זה תזוזת הגזירה ומעוות הגזירה (γ) נעו בתחום קבוע ($\pm 0.007 \text{ rad}$) והן גרמו להתפתחות מאמץ גזירה ($\pm \tau$) שכאמור השתנה בין מחזור למחזור בבדיקות אלו. כזכור מבדיקות הגזירה הישירה (סעיף 5.1) מקדם החיכוך של הקרקע מטיפוס SM הוא $\mu = 0.6$. בכל בדיקות הגזירה המחזורית למעט בדיקה אחת (AT5 בה נבדק דגם S7) ערכי הקצה של מאמץ הגזירה

$(\pm \tau)$ שהתפתח עקב תנועת הגזירה נמצאו נמוכים ויחס המאמצים בכשל לא השיג את ערך מקדם החיכוך של החול. תרשים 6.6 ממחיש זאת עבור דגם S9.



תרשים 6.6 : הגדרת תחום יחס מאמצים בכשל עבור קרקע מטיפוס SM בבדיקת גזירה מחזורית.

בדיקות גזירה מחזורית פשוטה (Simple shear) כגון זו שערכו Seed et al., (2003) ובדיקות טריאקסיאליות שביצעו Yashuhara et al., (2003), נערכו בתנאים בלתי מנוקזים (Undrained). לעומת זאת בבדיקות הגזירה המחזוריות שבוצעו במחקר זה נערכו על דגמי קרקע יבשים ובתנאים מנוקזים. כמו כן בבדיקות של Seed et al., (2003) הוכתב מאמץ גזירה $\pm \tau$ הנשמר באופן קבוע (ראה תרשים 2.16) ולפיכך השינוי שחל במעוות הגזירה. לעומת זאת בבדיקות המחזוריות במחקר זה הוכתבה תזוזת גזירה והשינוי התרחש במאמץ הגזירה.

ממחקר זה מתקבלת אם כן המסקנה שקרקעות לס תחת גזירה מחזורית בתנאים מנוקזים לא נוטות לפתח דגרדציה של מודול הגזירה כל עוד רמת מאמץ הגזירה המחזורי ביחס למאמץ האנכי האפקטיבי נמוכה ממקדם החיכוך של החומר. זמן המחזור שהוגדר עבור מחזור גזירה (שני סגמנטים) במחקר זה הוא 40 sec / cycle. התדירות לפיכך בבדיקות המחזוריות נמוכה מאד - 0.025 Hz. לעומת זאת מאמץ הגזירה המתפתח בבדיקות אלו גבוה ומתקרב (בחלק מהבדיקות) לגבול מקדם החיכוך של החומר ($\mu = 0.6$). עבור הקרקע באתר המחקר ניתן להעריך כי רעידת אדמה תחת תנאים אלו לא תביא ליציאה מתחום הלינאריות של חומר זה ולא יגרם כשל בקרקע.

6.3 השוואת פרמטרים אלסטיים מבדיקות דינמיות וסטטיות.

ערכי הקבועים האלסטיים הדינמיים: מודול גזירה (G_d), מודול אלסטיות (E_d) ויחס פואסון (ν_d), חושבו מתוך מדידת מהירויות סיסמיות בקרקע לפני הרווית החתך (הקרקע עם תכולת רטיבות טבעית). טבלה 6.1 עורכת השוואה בין פרמטרים אלסטיים דינמיים לפרמטרים האלסטיים הסטטיים שנתקבלו בבדיקות פרסיומטר (E_p, G_p) ובבדיקות מעבדה באמצעות המערכת לבדיקות גזירה ישירה (E_u, G'_o). ההשוואה מבוססת על ערכים שהתקבלו עבור היחידות שהוגדרו בחתכים של בורות הקידוחים (SM) ו- SC ועל החלוקה לשכבות לפי מהירויות סיסמיות ($L_{1,2,3}$). הפרמטרים האלסטיים הדינמיים נמצאו גבוהים

מהפרמטרים הסטטיים. לעומת זאת תוצאות הבדיקות הסטטיות בשדה ובמעבדה נעות בתחום ערכים קרוב זה לזה.

Soil Type	Parameter	Dynamic			Static		
		Seismic wave velocity			PMT (pressuremeter)		
		L_1	L_2	L_3	B_2	B_3	B_5
SP-SM	ν	0.32	-----	0.23	0.33	0.33	0.33
	E (MPa)	513	-----	848-935	72.6	28	61.5
	G (MPa)	194-173	-----	334-380	27.3	10.5	23
SP-SC	ν	-----	0.19	-----	0.33	0.33	0.33
	E (MPa)	-----	707-776	-----	48.2	93.4	110
	G (MPa)	-----	297-326	-----	18.1	35	41.6

מקרא:

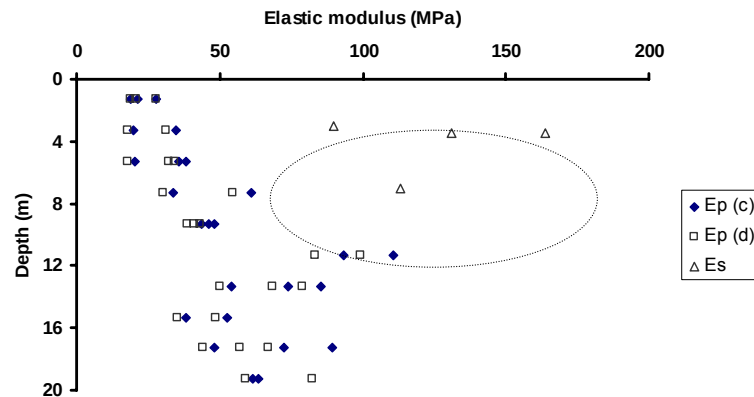
$L_{1,2,3}$ - שכבות הקרקע לפי חלוקה למהירויות סייסמיות (לפי יורסקי, 2004).

$B_{2,3,5}$ - קידוחים בהם נערכו בדיקות פרסיומטר.

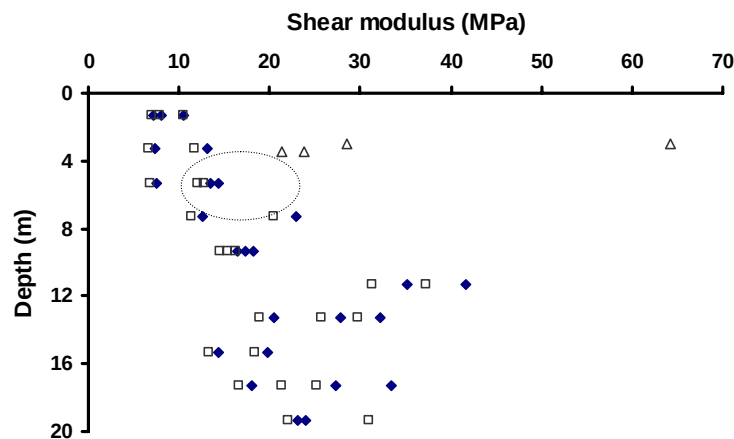
* בחישוב פרמטרים אלסטיים מבדיקות פרסיומטר הונח ערך $\nu = 0.33$ (לפי גורוצקי, 2002).

טבלה 6.1: השוואה בין פרמטרים אלסטיים דינמיים וסטטיים מבדיקות שדה ובדיקות מעבדה.

מודול האלסטיות (E_p) המחושב עבור ν_d או $\nu = 0.33$ אינו משתנה בהרבה משום שערכי ν_d די קרובים לערך יחס פואסון המקובל עבור קרקעות (0.33). תוצאות E_p נמצאות בתחום נמוך יותר מתחום התוצאות המתקבל עבור סגמנט הפריקה הנורמלית במעבדה (E_0). מודול גזירה ראשוני במעבדה (G'_0) נמצא באותו טווח ערכים של מודול גזירה מבדיקת פרסיומטר (G_p). תוצאות הבדיקות הסטטיות מוצגות בתרשימים 6.7 – 6.8. ערכי מודול גזירה ראשוני מתאימים לפי Bowles (1996) לערכי מודול גזירה דינמי בחול נקי ו-Berlin sand ($e = 0.53$) עד לתערובת חול דק-גס צפופות.



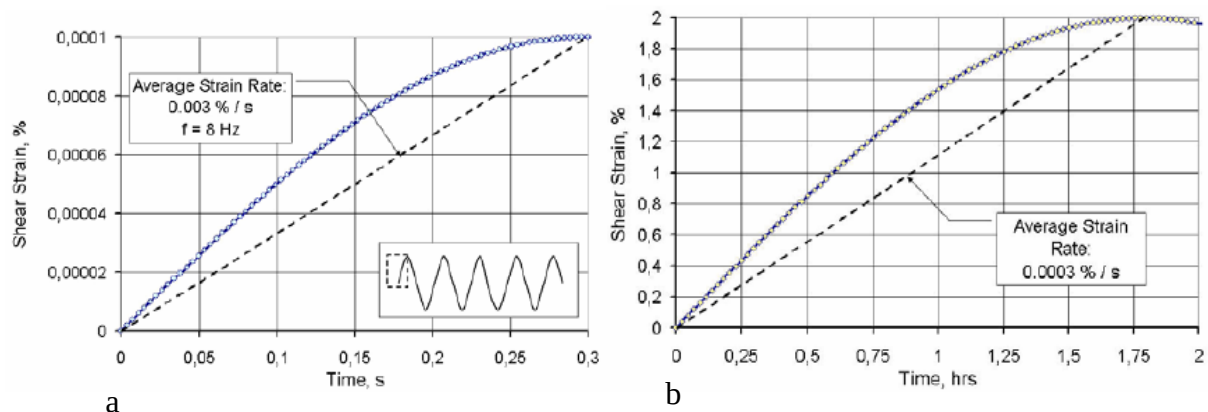
תרשים 6.7: פיזור ערכי מודול אלסטיות, תוצאות מבדיקות PMT בשדה ופריקה נורמלית במעבדה. $E_p(c)$ - מודול אלסטיות עבור $\nu = 0.33$, $E_p(d)$ - מודול אלסטיות עבור ν_d , E_s - מודול אלסטיות בבדיקת מעבדה סטטית.



תרשים 6.8: פיזור ערכי מודול גזירה, תוצאות מבדיקות PMT בשדה וגזירה מחזורית במעבדה. $G_p(c)$ - מודול גזירה עבור $\nu = 0.33$, $G_p(d)$ - מודול גזירה עבור ν_d , G'_s - מודול גזירה בבדיקת מעבדה סטטית.

ההבדל של סדר גודל בין הקבועים האלסטיים הדינמיים לקבועים האלסטיים הסטטיים, נובע בעיקר מהגדרת תחום מעוותים שונה עבור הבדיקות הנ"ל. בבדיקות דינמיות בשדה ובמעבדה תחום המעוותים עבורם נקבעים הפרמטרים האלסטיים קטן ביחס לתחום המעוותים בבדיקות הסטטיות (טבלה 2.3). לפי Das (1993) מעוות הגזירה בבדיקות Resonant column נע בתחום שבין $10^{-4}\%$ - $5 \times 10^{-2}\%$. המעוות בבדיקות גזירה דינמיות במעבדה (טריאקסיאלית, גזירה פשוטה וגזירה טבעתית) נע בתחום 1% - $10^{-2}\%$. בבדיקות הגזירה המחזורית שבוצעו במערכת לגזירה ישירה (במחקר זה) תחום המעוות המכסימלי היה $10^{-2}\%$. ערך זה דומה לתחום המעוות הנמדד בבדיקת גזירה מחזורית פשוטה אך גדול מתחום המעוות עבור בדיקת RC או Bender Elements ($10^{-4}\%$). Das (1993) מציין כי Larkin and Taylor (1979) ביצעו בדיקות דינמיות בשדה בשיטת Down – hole ומצאו שמעוותי הגזירה בעומקים 3 ו- 50 מטר הם מסדר גודל של 0.3×10^{-6} ו- 10^{-6} בהתאמה. לפי Dobry and Vucetic (1987) הגברת קצב המעוות ($\dot{\gamma}$)

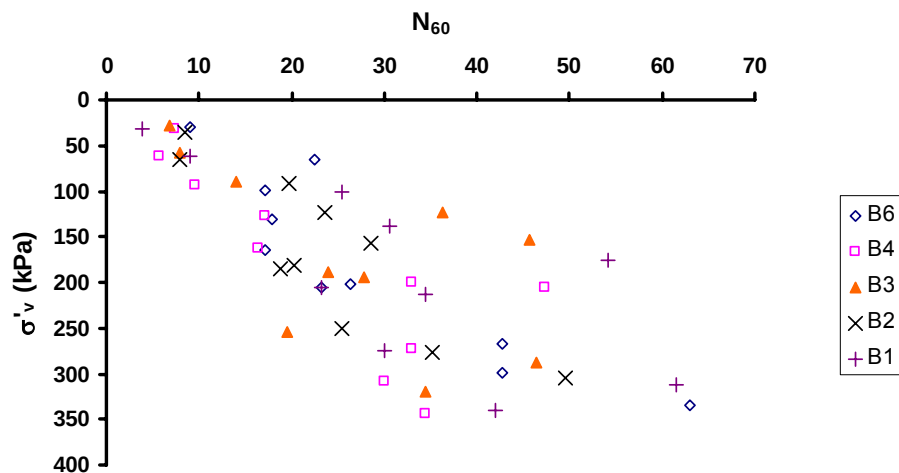
עשויה להגדיל את ערכו של מודול הגזירה (טבלה 2.4). Massarsch (2004) הראה שקצב המעוות בבדיקות דינמיות גבוה בסדר גודל מקצב המעוות בבדיקות סטטיות (תרשים 6.9).



תרשים 6.9: (a) קצב מעוות ממוצע בבדיקת Resonant Column דינמית ;
(b) קצב מעוות ממוצע בבדיקת גזירה ישירה סטטית (Massarsch 2004).

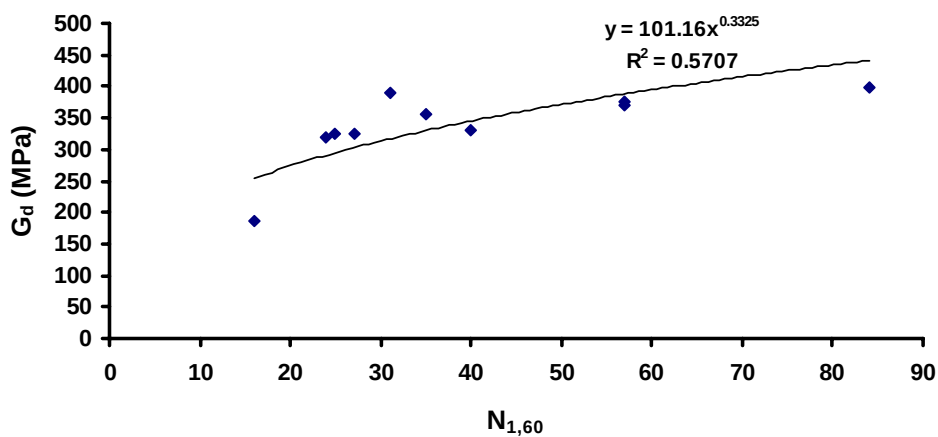
6.4 קורלציות.

תוצאות מנורמלות של בדיקת SPT עבור פטיש בעל יעילות של 60% נעות בין 5 - 50 (תרשים 6.10) ערכים אלו מתאימים לפי Bowles (1996) לקרקעות גרנולריות טרום דחוסות, תחוחות (בתחום הערכים הנמוך) עד צפופות מאד (בתחום הערכים הגבוה).



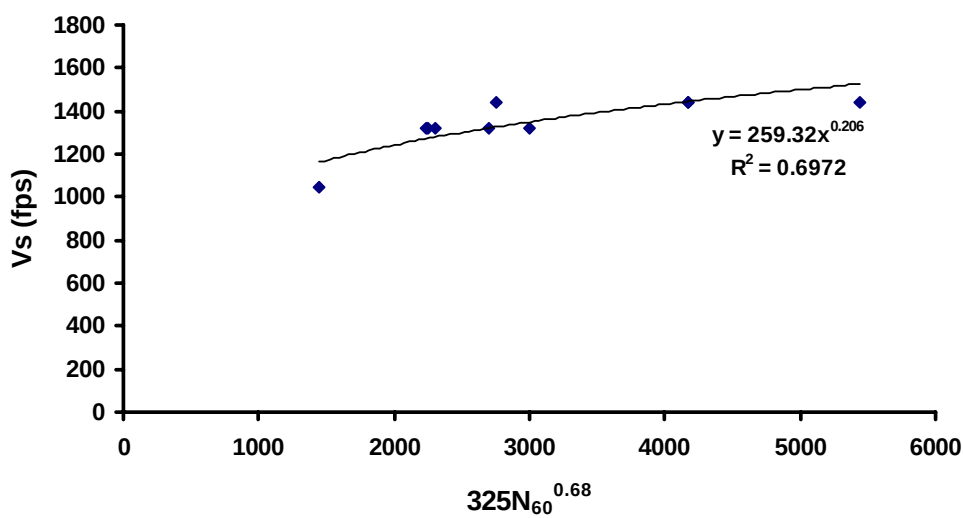
תרשים 6.10: פיזור תוצאות N_{60} מבדיקת החדרה סטנדרטית בקידוחים באתר המחקר.

התאמה קורלטיבית בין מהירות גלי גזירה ומודול גזירה דינמי לתוצאות בדיקות SPT, עשויה להיות לא מדויקת מכמה סיבות. ראשית, מהירות הגלים עולה עם העומק בשכבות L_1 - L_3 (תרשים 4.12) וללא קשר לסוג הקרקע בשכבה. כמו כן לא נמצאה התאמה מרחבית מלאה בין שכבות הקרקע בקידוח 6 לקידוחים אחרים בהם נערכו בדיקות SPT. ערכי מודול גזירה דינמי משורטטים כנגד ערכי $N_{1,60}$ מבדיקת SPT בקידוח 6 בתרשים 6.11. קו התאמה הטוב ביותר שנמצא הוא חזקה לפי $y = 101.16x^{0.3325}$.



תרשים 6.12: התאמה בין ערכי SPT מנורמלים ומודול גזירה דינמי בקידוח מס' 6.

על בסיס הקורלציה של Imai and Tonouchi (1982) (משוואה 2.14) ערכי N_{60} הותאמו לערכי מהירות גלי גזירה (תרשים 6.12).



תרשים 6.12: התאמת ערכי N_{60} למהירות גלי גזירה לפי Imai and Tonouchi (1982).

פרק 7 - סיכום ומסקנות.

במחקר זה נלמדו התכונות וההתנהגות המכנית של שני טיפוסים קרקע שנמצאו בחתך של אזור המחקר בכרם שלום באמצעות בדיקות שדה ובדיקות מעבדה. בדיקות השדה שנערכו אופייניות מאד לתחום הגיאוטכניקה: SPT ו-PMT ולתחום הבדיקות הדינמיות בקרקע: מהירויות סיימיות בשיטות Cross-hole ו-Down-hole. בדיקות המעבדה בוצעו באמצעות המערכת לבדיקות גזירה ישירה של TerraTek Inc. על דגמי קרקע במצב יבש ובתנאים מנוקזים. בבדיקות אלו אופיינה ההתנהגות המכנית של הקרקע תחת מאמצי לחיצה, גזירה וגזירה מחזורית מונוטנית. כמו כן אופיינו הפרמטרים האלסטיים של שני טיפוסים הקרקע הנחקרים ונערכה השוואה בין תוצאות הבדיקות השונות.

להלן המסקנות העולות ממחקר זה:

1. חתך הקרקע באזור המחקר (עד לעומק של 20 מ') בנוי משכבות של חול סילטי (SM), חול חרסיתי המכיל תלכיד קרבונט (SC) ועדשות חרסית חולית (CL).
2. הקרקע באזור המחקר דחוסה נורמלית עד טרום – דחוסה כנראה עקב שינויים בתכולת הרטיבות של הקרקע בשל מחזורי הרטבה וייבוש.
3. חוזק הגזירה של הקרקע מטיפוס SM מאופיין על ידי מעטפת כשל לינארית (מסוג קולומב – מוהר) $\tau = 0.6204\sigma_n$ כאשר זווית החיכוך הפנימית $\phi = 32^\circ$ והקוהזיה (c) אפסית. חוזק הגזירה של הקרקע מטיפוס SC הוא כ- 400 kPa עבור טווח ערכים של מאמץ נורמלי בין 138 – 414 kPa.
4. נמצא הבדל של סדר גודל בין הפרמטרים האלסטיים הדינמיים והפרמטרים האלסטיים הסטטיים.
5. מודול גזירה דינמי של הקרקע מטיפוס SM נע בין 173-380 MPa ומודול גזירה סטטי נע בין 7-40 MPa.
6. מודול אלסטיות דינמי של הקרקע מטיפוס SM נע בין 513-935 MPa ושל הקרקע מטיפוס SC נע בין 707-776 MPa. מודול אלסטיות סטטי של הקרקע מטיפוס SM נמצא בתחום שבין 90-164 MPa ושל הקרקע מטיפוס SC ערכו 113 MPa.
7. קרקעות הלס מאזור המחקר לא נוטות לפתח דגרדציה של מודול הגזירה תחת גזירה מחזורית בתנאים מנוקזים כל עוד יחס המאמצים המחזורי (τ/σ_n) קטן ממקדם החיכוך של קרקע זו (0.6).

מקורות ספרותיים

- Alawaji, H. A. (2001). Shear induced collapse settlement of arid soils, Geotechnical and Geological Engineering, vol. 19, no. 1, pp. 1-19.
- Abelev, Y.M. (1948). The essentials of designing and building on microporous soils. Storitel' naya Promyshlemast, no.10.
- American Society for Testing and Materials (1994). Designations: ASTM D4719 Test method for pressuremeter testing in soils; ASTM-D4428 Test method for crosshole seismic testing; ASTM-D2216 Test method for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock; ASTM-D3080-90 Method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions; ASTM – D422 Method for particle size analysis of soils; ASTM-D4318 Test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils. Annual Book of ASTM Standards, vol 04.08 soil and rock.
- Anderson, D.G. and Richart F.E.(1976). Effects of straining on shear modulus of clay. Proc ASCE ;102(GT9):975–987.
- Assallay, A.M., Rogers, C.D.F., Smalley, I.J. (1994). Engineering properties of loess in Libya, Journal of Arid Environments, vol. 32, pp. 373–386.
- Atkinson, J.H. (2000). Non-linear soil stiffness in routine design, Geotechnique, vol. 50, no.5, pp. 487 - 508.
- Baredt, J.P., Ichii, K., Lin, C.H. (2000). EERA-A computer program for equivalent linear earthquake site response analysis of layered soil deposits. Department of Civil Engineering, Uni. Of Southern California.
- Beer, F.P., Johnston, E.R., DeWolf, J.T. (2002). Mechanics of Materials (3rd edition), McGraw-Hill.
- Boulon, M., Ghionna, V.N. and Mortara G. (2003). A Strain-Hardening Elastoplastic Model for Sand-Structure Interface under Monotonic and Cyclic Loading. Mathematical and Computer Modelling, vol. 37, pp. 623-630.
- Bowles, J.E. (1996). Foundation analysis and design (4th edition), McGraw – Hill.
- Brady, B.H.G. and Brown, E.T. (1993). Rock Mechanics for Underground Mining, 2nd ed., Chapman and Hall, London.
- Casagrande, A.(1932).The structure of clay and its importance in foundation engineering, Contributions to Soil Mechanics, Boston Society of Civil Engineers, 1925-1940, pp. 72-112.
- Craig, R.f. (1997), Soil Mechanics (6th edition), Spon press
- Cui, Y.J. and Delage, P. (1996). Yielding and plastic behavior of an unsaturated compacted silt. Geotechnique, vol. 46, no.2, pp. 291-311.

- Das B.M. (1983). Advanced Soil Mechanics, Hemisphere Publishing Corporation, McGraw – Hill Book Company.
- Das B.M. (1993). Principles of Soil Dynamics, Brooks/Cole.
- De Mello, V.F. (1971). the Standard Penetration Test, 4th Pan-American Conf. on SMFE, San Juan, Puerto Rico (Published by the ASCE), vol. 1, pp. 1-86.
- Dijkstra, T.A. (2001). Geotechnical thresholds in the Lanzhou loess of China. Quaternary International 76/77 , pp.21-28.
- Dobry, R. and Vucetic, M. (1987). Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits. Proc., Int., Symp. On Geotechnical Engineering of Soft Soils, Mexican Geotechnical Society, Mexico, Vol.2, 49-85.
- El –sohby, M.A. (1994). Swelling and collapsible behavior of arid soils. In proceedings symposium on Developments in Geotechnical Engineering, A.S. Balasubramaniam et al. (eds), Bangkok, pp 193-200.
- Frydman, S., Hendron D., Horn, H., Steinbach, Y., Baker R., Shaal B. (1980). Liquefaction Study of Cemented Sand, Journal of Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the ASCE, vol. 106 no. GT3, pp. 275-297.
- Frydman, S. (1982). Calcareous Sands of the Israeli Costal Plain, Geotechnical Properties, Behavior and Performance of Calcareous Soils, ASTM STP 777, pp. 226-251.
- Frydman, S. (2000). Shear Strength of Israeli Soils, Israel Journal of Earth Sciences, vol. 49, no. 2, pp. 55-64.
- Gibbs, H.H., Holland, W.Y. (1960). Petrographic and engineering properties of loess, US Bureau of Reclamation, Engineering Monograph no. 28, pp. 37.
- Gibbs, H.J. and Holtz, W.G. (1957). Research on determining the density of sands by spoon penetration testing, Proc. 4th Int . Conf. on Soil Mechanics & Foundations Engineering. vol. 1, pp. 35-39.
- Hardin, B.O., and Black, W.L. (1968). Vibration modulus of normally consolidated clay, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, vol.94, no.2, pp. 353-369.
- Hardin, B.O., and Drnevich, V. (1972). Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves, Journal of the Soil Mechanics and the Foundations Division, ASCE, vol. 98, no.7, pp.667-691.
- Hardin, B.O. (1978). The Nature of Stress-Strain Behavior of Soils, Earthquake Engineering and Soil Dynamics, ASCE, vol. 1, pp.3-90.
- Holtz, R.D. and Covaks, D.K. (1981). An Introduction to Geotechnical Engineering, Prntice-Hall.

- Ishihara, K. (1996). Soil behaviour in earthquake geotechnics, Oxford University Press, UK, Chap. 7, pp. 127–151.
- Imai, T. and Tonouchi, K. (1982). Correlation of N-value with S-wave velocity and shear modulus, Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, The Netherlands, pp. 67-72.
- Iwasaki T, Tatsuoka F, Takagi Y.(1978). Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading. Soils and Foundations, vol.18, no.1, pp.39–56.
- Jamiolkowski, M. (1991). Theme Lecture: Design Parameters from Theory to Practice, Proceedings, Geo-Coast 91, Yokohama, Japan, pp. 1-41.
- Jefferson, I.F., Evstatiev, D., Karastanev, D., Mavlyanova, N.G., Smalley, I.J. (2003). Engineering geology of loess and loess-like deposits: a commentary on the Russian literature, Engineering Geology, vol.68, pp. 333–351.
- Jefferson, I.F., Mavlyanova, N., O'Hara-Dhand, K., Smalley, I.J. (2004). The engineering geology of loess ground: 15 tasks for investigators — the Mavlyanov programme of loess research, Engineering Geology, vol. 74, pp. 33–37.
- Jennings, J.E. and Knight, K. (1975). A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlements due to collapse of grain structure. In Proceeding of the 6th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 99-105.
- Kokusho T. (1980).Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range. Soils and Foundations,vol.20, no.2, pp.45–60.
- Kokusho, T., Yoshida, Y.,and Esashi Y.(1982). Dynamic properties of soft clays for wide strain range. Soils and Foundations, vol. 22, no.4, pp.1–18.
- Kovacs, W.D. and Salomone L.A. (1982). SPT Hammer Energy Measurement, JGDE, ASCE, GT4, April, pp. 599-620.
- Kulhawy, F.H., and Mayne, P.W. (1990). Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design, Report No. EL-6800, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.
- Lambe T.W. and Whitman R.V. (1979). Soil Mechanics, SI Version. Series In Soil Engineering. John Wiley & Sons.
- Larkin, T.J. and Taylor, P.W. (1979). Comparison of Down – Hole and Laboratory Shear Wave Velocities, Canadian Geotechnical Journal, vol.16, no.1, pp.152-162.
- Liao, S.S. and Withman, R.V. (1986). Overburden Correction Factors for Sand, JGED, vol. 112, no.3, March, pp. 373-377.
- Lutenegger, A.J. & Hallberg, G.R. (1988). Stability of loess, Engineering Geology, vol. 25, pp. 247–261.

- Massarsch, K.R. (2004). Deformation properties of fine-grained soils from seismic tests, Keynote Lecture, Intern. Conf. Site Characterization, Porto, September.
- McCarthy, D.F. (1993). Essentials of Soil Mechanics and Foundations, Basic Geotechnics (4th edition), Regents/Prentice Hall.
- Meyerhof, G. G. (1959). Compaction of Sands and the Bearing Capacity of Piles, JSMFD, ASCE, vol. 85, SM 6, Dec., pp.1-29.
- Mitchell, L.K., (1976). Fundamentals of Soil Behavior, Wiley.
- Mush D., McGeehin J., Beann J., Fisher E., (2004). Holocene loess deposition and soil formation as competing processes, Matanuska Valley, southern Alaska. Quaternary Research, vol. 61, pp. 265– 276.
- O'Reilly , M. P. and Brown, S.F. (1991). Cyclic Loading of Soils, Blackie and Son, Inc., NY.
- Peacock, W.H., and Seed, H.B. (1968). Sand Liquefaction Under Cyclic Loading Simple Shear Conditions, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol. 94, no. SM3, pp. 689-708.
- Peck, R.B., Hanson, W.E., Thornburn, T.H. (1953). Foundation Engineering, Wiley, New – York.
- Prakash, S. (1981). Soil Dynamics, McGraw-Hill, Inc.
- Pye, K., Tsoar, H., (1987). The mechanics and geological implications of dust transport and deposition in deserts with particular reference to loess formation and sand dune diagenesis in the northern Negev, Israel. In: Frostick, L., Reid, I., Eds. Desert Sediments: Ancient and Modern. Geological Society Special Publication, vol. 35, Unwin Hyman, London, pp. 139– 156.
- Riggs et. al., (1983). Reproducible SPT Hammer Impact Force with an Automatic Free Fall SPT Hammer System, GTJ, ASTM, Vol. 6, no. 4, Dec, pp. 201-209.
- Rogers, C.D.F., Dijkstra, T.A., Smalley, I.J. (1994). Hydro-consolidation and subsidence of loess: Studies from China, Russia, North America and Europe. Engineering Geology, vol. 37, pp. 83–113.
- Ruhe, R.V. (1969). Application of pedology to Quaternary research. In: Pawluk, S. Eds. Pedology and Quaternary Research. National Research Council of Canada and University of Alberta, Edmonton, pp. 1 –23.
- Sassa K. (1996). Prediction of earthquake induced landslides In: Proceedings of the Seventh International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway, vol. 1, Rotterdam, Balkema, pp. 115–32.
- Sassa K. (1997). A new intelligent type of dynamic loading ring shear. Landslide news, vol. 10. Tokyo, Japan: The Japan Landslide Society; pp. 33.

- Sassa K, Wang G, Fukuoka H. (2003). Performing undrained shear tests on saturated sands in a new intelligent type of ring shear apparatus. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM ; vol.26, no. 3, pp.257–265.
- Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1970). “Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses”. Univ. of California, Berkely, Earthquake Engineering Research Center , Report No. EERC 70-10 (reproduced in H. Bolton Seed, Vol.1 Selected Papers 1956-1987, BiTech Publishers, Vancouver, B.C.,1990).
- Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M., Tokimatsu, K. (1984). Moduli and Damping Factors for Dynamic Analysis of Cohesionless Soils, Univ. of California, Berkeley, Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC- 84/14.
- Seed, H.B. and DeAlba, P. (1986).Use of SPT and CPT tests for Evaluating the Liquefaction Resistance of Sands, Proc. In - situ 86', ASCE Specialty conference, Blacksburg, VA, June 23-25, pp. 281-302.
- Seed , R.B., Cetin,K.O., Moss,R.E.S., Kammerer,A.M., Wu,J., Pestana, J.M., Riemer, M.F., Sancio, R.B., Bray, J.D., Kayen, R.E., Faris, A. (2003). Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework. 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, Keynote Presentation, H.M.S. Queen Mary, Long Beach, California, April 30.
- Skempton, A.W. (1986). Standard Penetration Test Procedures, *Geotechnique*, vol. 36, no.3 pp.425-447.
- Stokoe, K.H., Nazrian, M., Rix, G.J., Sanches-Salinerio, I., Shen, J-C, Mok, Y-J, (1988). In Situ Seismic Testing of Hard To Sample Soils by Surface Wave Method. Earthquake Engineering and Soil Dynamics II – Recent Advances in Ground – Motion Evaluation, ASCE Geotechnical Special Publication No. 20, Von Thun, J.L., ed., Park City, Utah, June 27-30.
- Studer, J., Zingg. N., Prater, E.G. (1980). Investigation on cyclic stress–strain characteristics of gravel materials, *Proceedings of the 7th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 3, Istanbul, Turkey, pp. 355–362.
- Sykora, D.W., and Stokoe, D.H., II (1983). Correlations of In Situ Measurements in Sands with Shear Wave Velocity, *Geotechnical Engineering Report GR83-33*, The University of Texas at Austin, Austin TX.
- Tanaka, Y., Kudo, Y., Yoshida, Y., Ikemi, M. (1987). A study on the mechanical properties of sandy gravel-dynamic properties of reconstituted sample, Report U87019, Central Research Institute of Electric Power Industry.
- TerraTek Inc. Manual for the Direct Shear System: Direct Shear Test Machine Software TerraTEST™ version 6.03; 16 Channel Signal Conditioner Model 1600; Valve Driver Model 3100B; Hydraulic Power Supply; Computer Interface panel 3100.
- Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N. (1970). *Theory of Elasticity* (3rd edition), McGraw – Hill.

- Trandafir, A.C. and Sassa, K. (2004). Undrained cyclic shear response evaluation of sand based on undrained monotonic ring shear tests, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 24, pp. 781–787.
- Vucetic, M. and Dobry, R. (1991). Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 117, no.1 , pp. 89-107.
- Vucetic, M. (1994). Cyclic Treshhold Shear Strains in Soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 120, no. 12, pp 2208-2228.
- Wang, F.W. (1998). An experimental study on grain crushing and excess pore pressure generation during-shearing of sandy soils - a key factor for rapid landslide motion. PhD Thesis. Kyoto University.
- Wang, G.X., and Kuwano, J. (1999). Modeling of strain dependency of shear modulus and damping of clayey sand, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 18, pp. 463–471.
- Wang FW, Sassa K, Fukuoka H. (2000). Geotechnical simulation test for the Nikawa landslide induced by January 17, 1995 Hyogoken-Nambu earthquake. *Soils Foundations*, vol. 40, no.1, pp.35–46.
- Wang G and Sassa K. (2002). Post-failure mobility of saturated sands in undrained load-controlled ring shear tests. *Canada Geotechnical Journal*, vol. 39, pp.821–37.
- Wiseman, G. (1962). Laboratory Soil Engineering Studies on Dune Sand. Internal Report CV9, Soil Mechanics Laboratory, Faculty of Civil Engineering , Technion, Haifa.
- Yasuhara, K., Murakami, S., Song, B.W., Yokokawa, S., Hyde A.F.L. (2003). Post Cyclic Degradation of Strength and Stiffness for Low Plasticity Silt, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* , ASCE. Aug 2003, pp. 756-769
- Yoshida et al. (1988). Empirical Formulas of SPT Blow Count for Gravelly Soils,^{1st} *ISOPT* , vol. 1, pp. 381-387.
- Zolkov, E. (1972). Standrd Penetration Test and Foundation Practice in Fine Sands in Israel. *Journal of Materials*, ASTM, vol. 7, no. 3, pp. 336-344.
- גורוצקי, י. (2002). דו"ח סיכום בדיקות פרסיומטר באתר מחנה אמיתי-רפיה 461771, מוסד הטכניון למחקר ופיתוח בע"מ, המבדקה לבניין ותשתית.
- טולמץ, י. (1991). אטלס ההידרוגיאולוגי של ישראל , אגן החוף הדרומי חבל עזה : חתכי אורך ורוחב ברצועות 81-99. מדינת ישראל , משרד החקלאות – נציבות המים השירות ההידרולוגי.
- יזרסקי, מ. (2004). סקר סיסמי בקידוחים למדידת מהירויות של גלי גזירה וגלי לחיצה באזור אמיתי, דו"ח מס' 04/024/298, המכון הגיאופיסי לישראל.
- פינק, מ. (1970). ההידרוגיאולוגיה של רצועת עזה, דוח התקדמות מס' 3. תה"ל, האגף להידרולוגיה.
- רביקוביץ, ש. (1981). קרקעות ישראל – התהוותן טבען ותכונותיהן, הוצאת הקיבוץ המאוחד.