

תכונות מכניות של קרקעות לס מדרום שפלת החוף, ישראל.

סיכום עבודת מאסטר



מאת : איתי אוריין

מנחה : פרופ' יוסי חצור

מטרת המחקר

הכרת התכונות וההתנהגות המכנית של טיפוסֵי הקרקע בחתך של אתר המחקר.

בדגש על:

- חוזק גזירה של הקרקע.
- פרמטרים אלסטיים דינמיים וסטטיים:
- מודול יאנג (E_d, E_p, E_u).
- מודול גזירה (G_d, G_p, G_{cs}).
- תגובת הקרקע למאמצי לחיצה.

מבוא



אזור המחקר

שפלת החוף הדרומית, מזרחית לרצועת עזה.

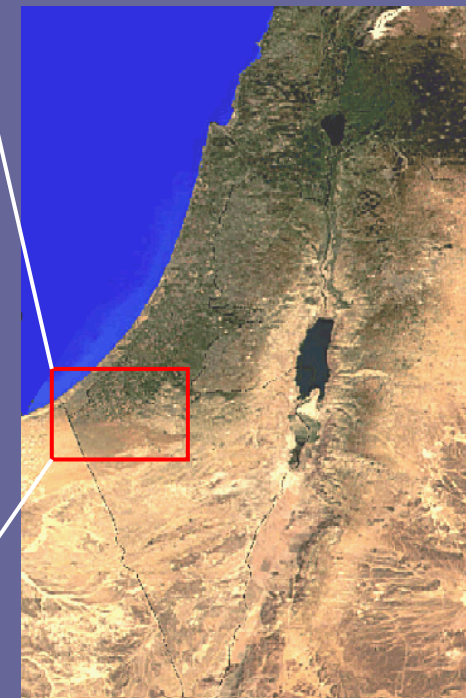
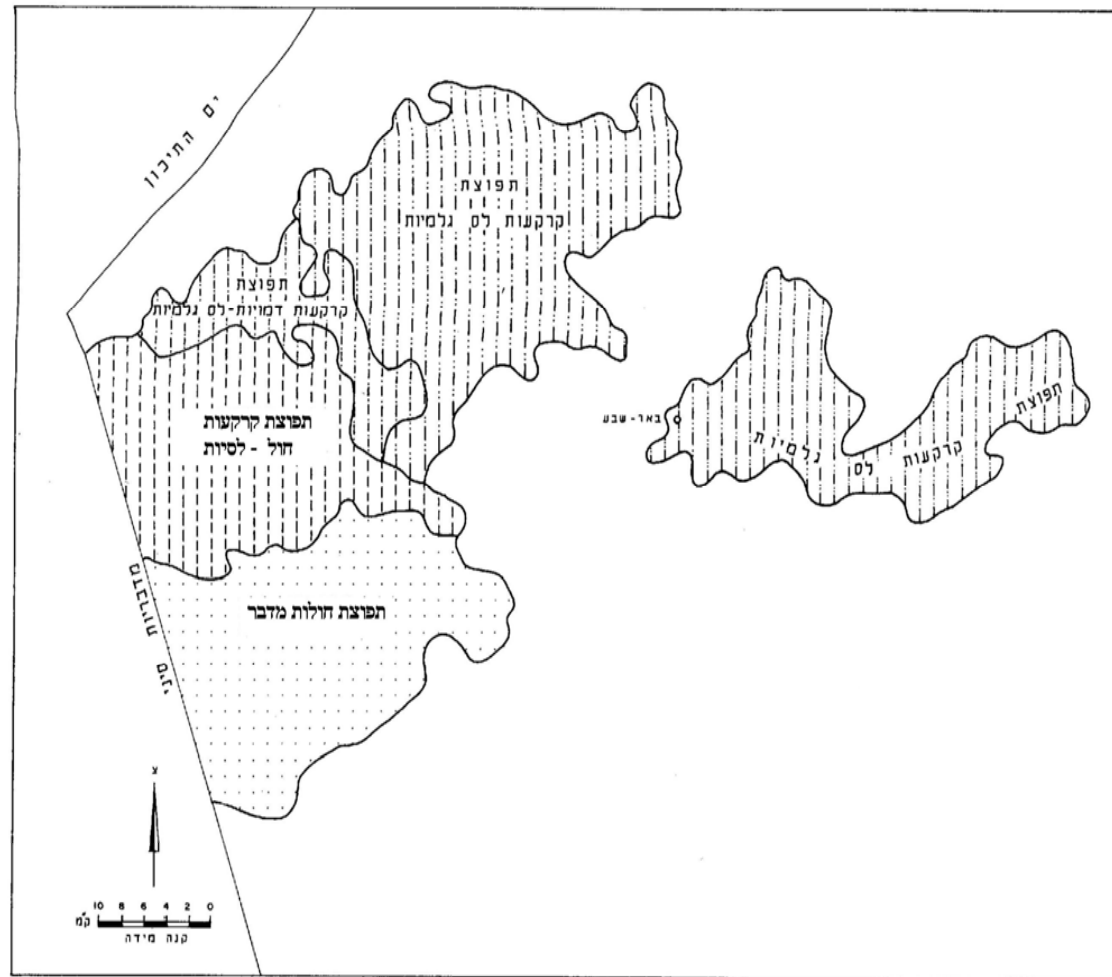
* אקלים לח למחצה, כ 500 מ"מ משקעים שנתי

מבוא



*הכיסוי של דרום שפלת החוף הוא של מרבצי חול ולס (רביקוביץ, 1981) מנגנון הסעה איאולי מניע חומרי בלייה מסיני אל תוך הנגב ובאזור זה שוקע מקטע מכני כבד.

*באזור המחקר קרקעות חול לסיות – החול משמש כמרכיב עיקרי והסילט מרכיב משני.



תרשים 1: תפוצת קרקעות במערב הנגב (רביקוביץ, 1981)

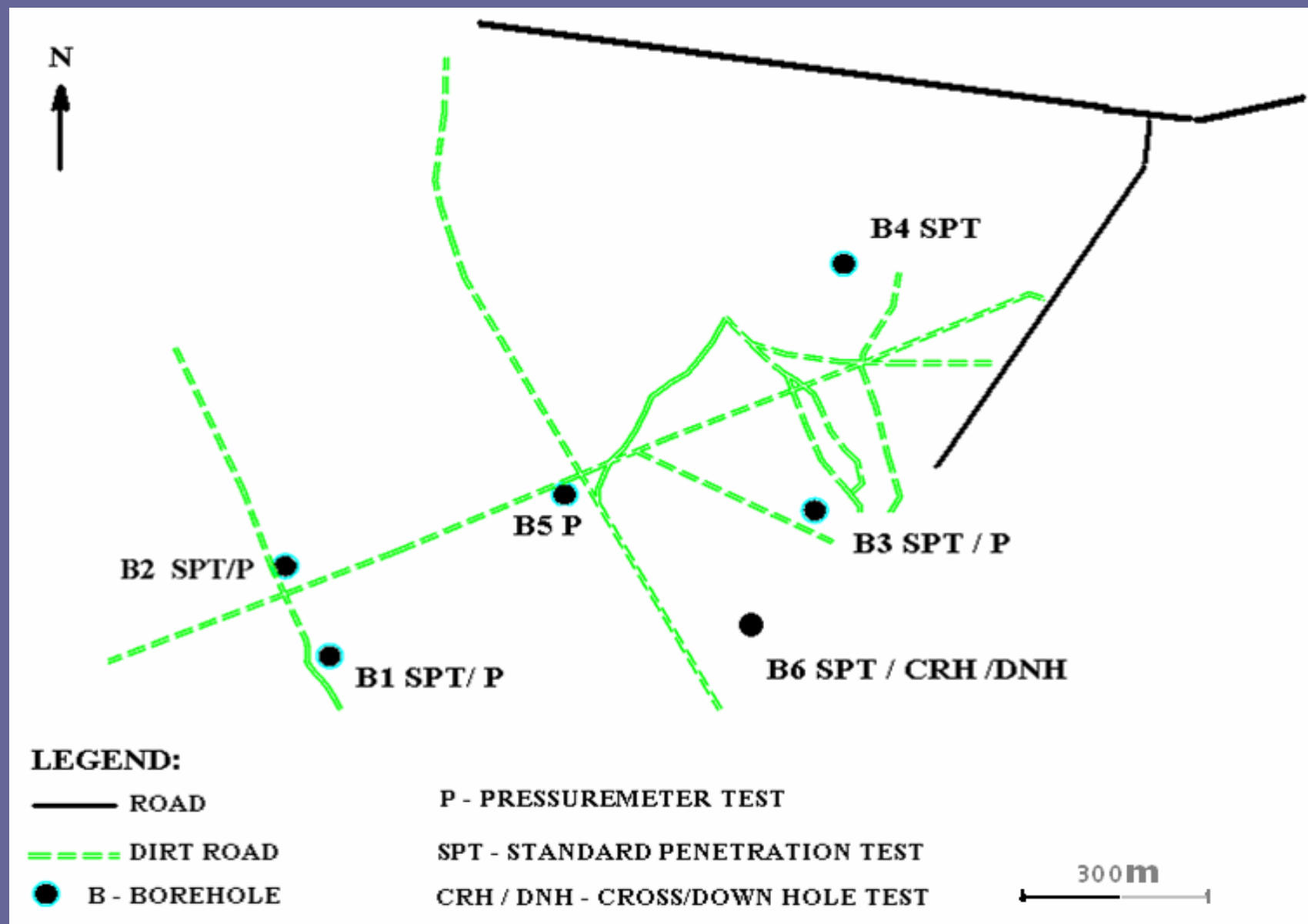
שיטות מחקר

בדיקות מעבדה

- הגדרת סוג קרקע וסמלה ע"י מיון מכני והגדרת גבולות אטרברג.
LL, PL, PI
- קביעת תכונות אינדקס של שני טיפוסים הקרקע. e_o , γ_d (kN/m^3), $w\%$
- מבחני גזירה ישירה וגזירה מחזורית באמצעות המערכת לבדיקות גזירה ישירה.

בדיקות שדה

- 6 בורות קידוח לעומק של 20 מ'.
- SPT- standard penetration test
- PMT – pressuremeter test
- Seismic wave velocity survey by cross-hole and down-hole methods



תרשים 2: פיזור מרחבי יחסי של הקידוחים באתר המחקר.

SPT – Standard Penetration Test

בדיקה נפוצה המשמשת לצרכים גיאוטכניים והנדסיים.

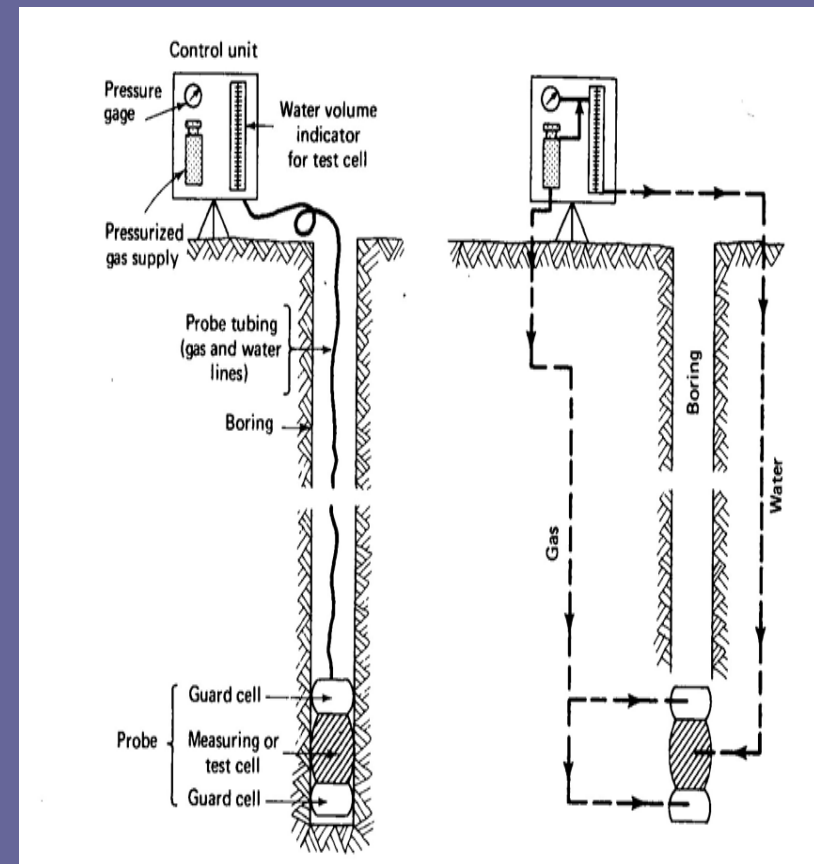
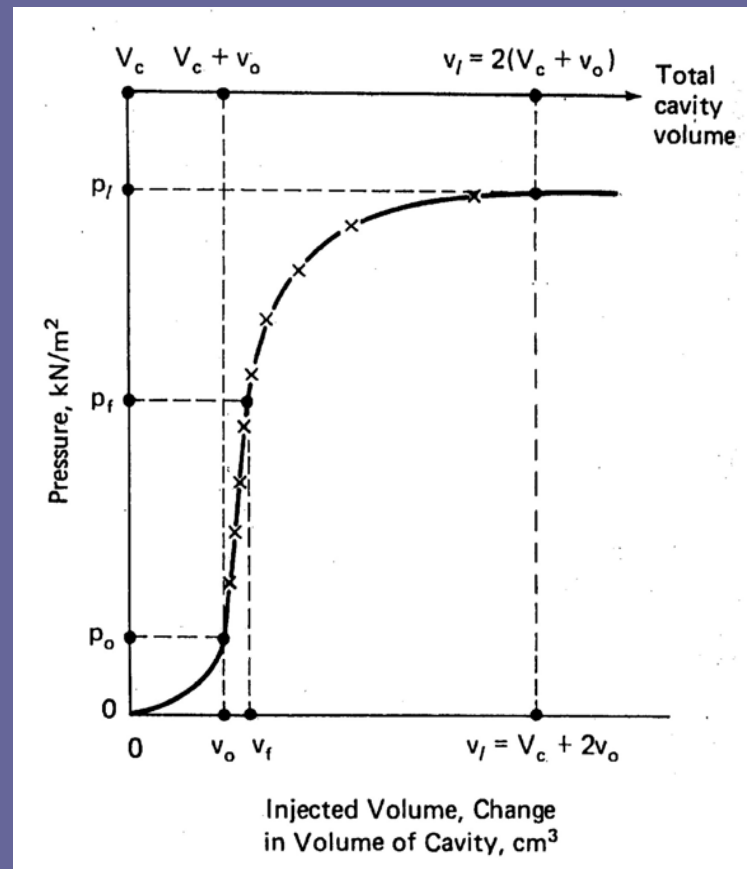
התוצאה (N) מהווה אינדקס לקשיחות הקרקע וחוזקה על פי קורלציות לפרמטרים מכניים ידועים .



תרשים 3: בדיקת החדרה תקנית באתר המחקר וציוד הבדיקה - פטיש וכף הדגימה.

PMT - Pressuremeter Test

הבדיקה מאפשרת קבלת פרמטרים אלסטיים (סטטיים) של הקרקע בשדה.
המכשיר פועל על עיקרון של התפשטות לטרלית של תאי לחץ גיליים בתוך הקרקע.



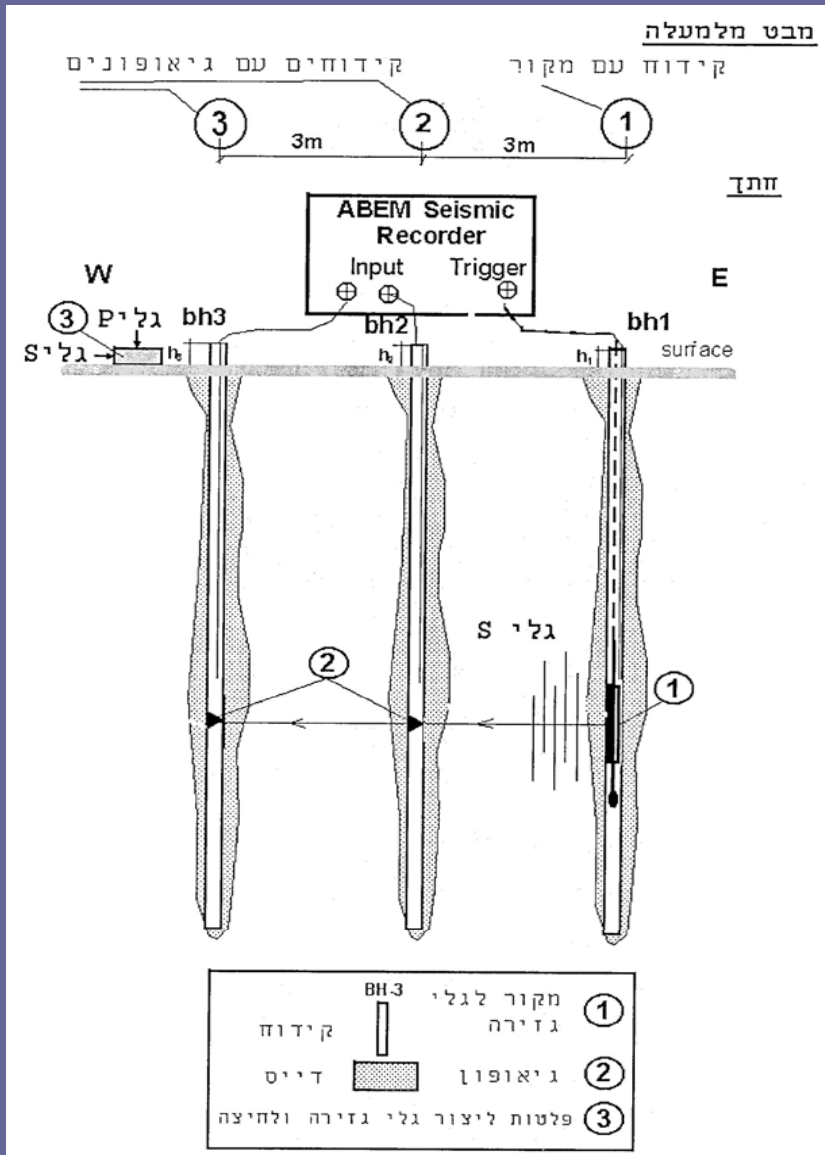
תרשים 4: פריסת מערכת הפרסיומטר והתנהגות הלחץ כתלות בנפח במהלך הבדיקה.

Seismic Wave Velocity Survey

- מהירויות של גלי לחיצה וגלי גזירה
- השוואה בין מהירויות אלו בתווך יבש \ רווי.
- פרמטרים אלסטיים דינמיים של הקרקע.

שיטות:

Down hole / Cross hole



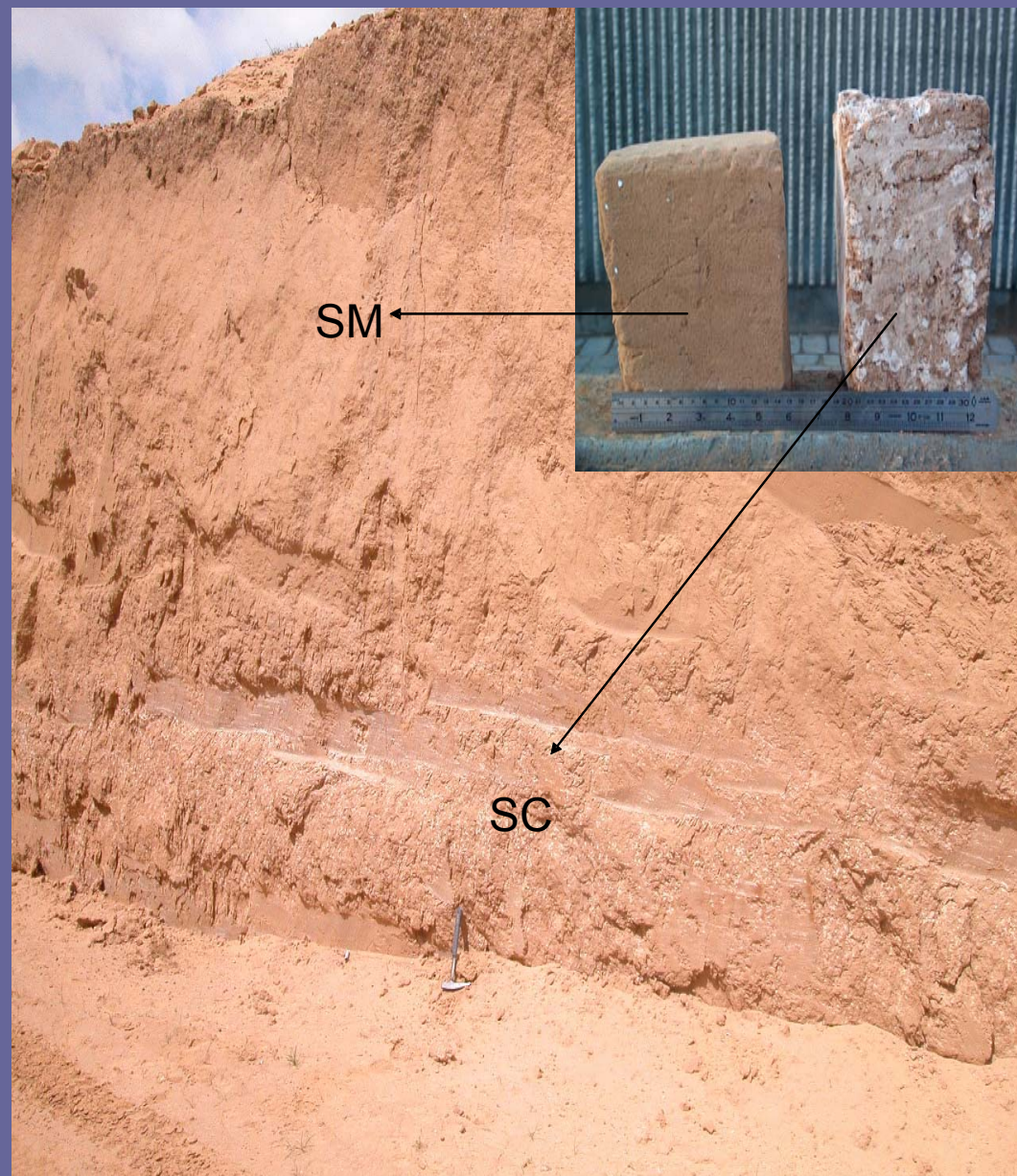
תרשים 5: מערך הגיאופונים והכנות לבדיקות סייסמיות באתר המחקר (יזרסקי, 2004).

שיטות מחקר

1. חציבת גושי קרקע משני הטיפוסים מקיר המחשוף בעומקים של 3 – 8 מ'.
2. סיתות גושי הקרקע לבלוקים ושינועם למעבדה.
3. ניסור הבלוקים והתאמתם לקופסאות הגזירה במעבדה (הכנת דגם).



דיגום קרקע מהמחשוף לצורך בדיקות מעבדה



תרשים 6: חתך קרקע אופייני באתר המחקר ודוגמאות של מדגמי קרקע משכבות שונות.

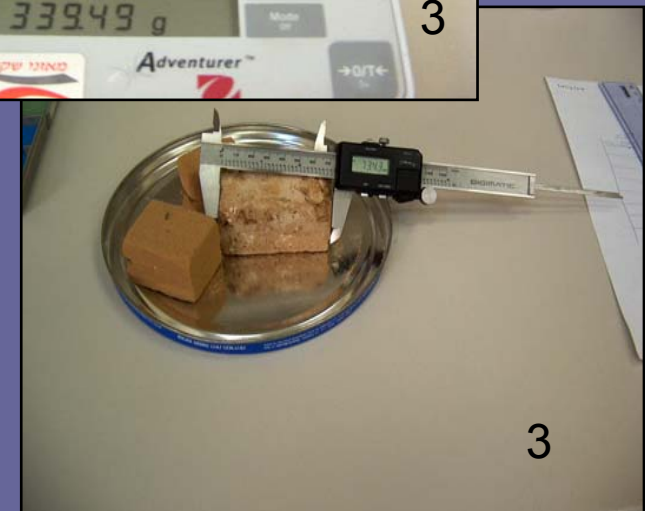
בדיקות מעבדה

מיון קרקעות - הגדרת טיפוסי וסמלי הקרקע.

1. התפלגות גודל גרגר ותכולת הדקים בקרקע.

2. גבולות אטרברג : גבול נזילות , גבול הפלסטיות , אינדקס הפלסטיות.

3. קביעת תכונות אינדקס של שני טיפוסי הקרקע: e_o , γ_d (kN/m^3), $w\%$.

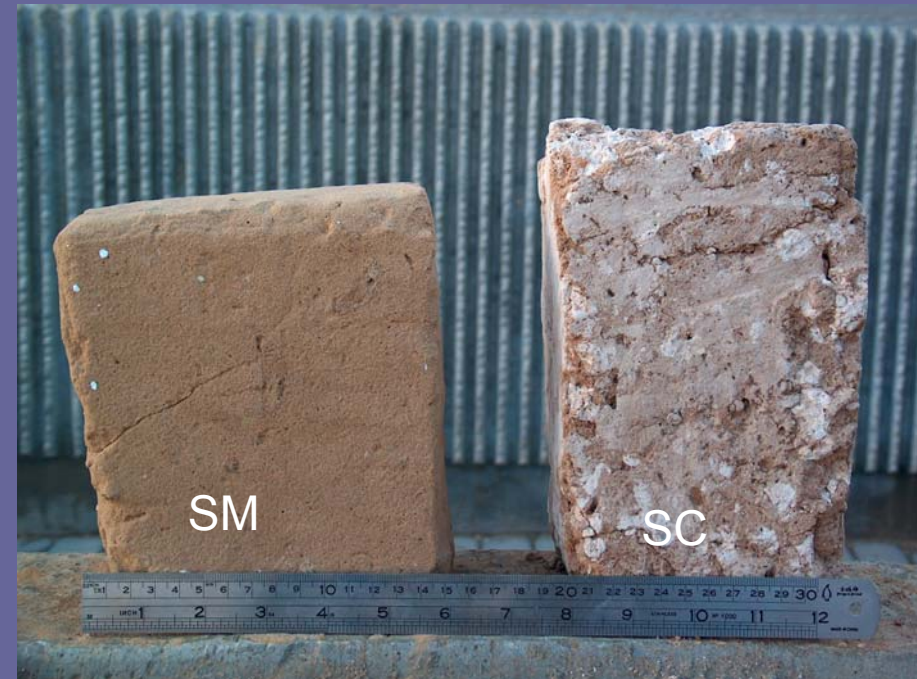
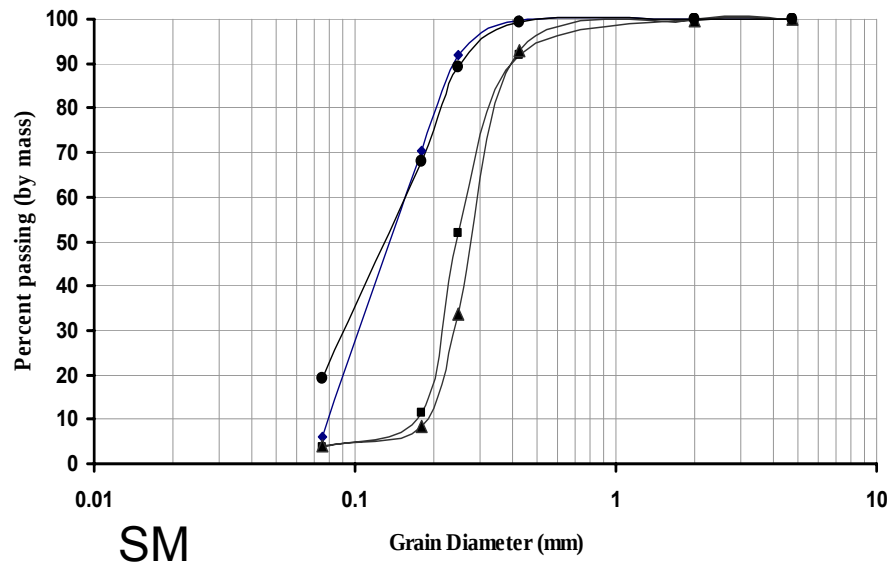
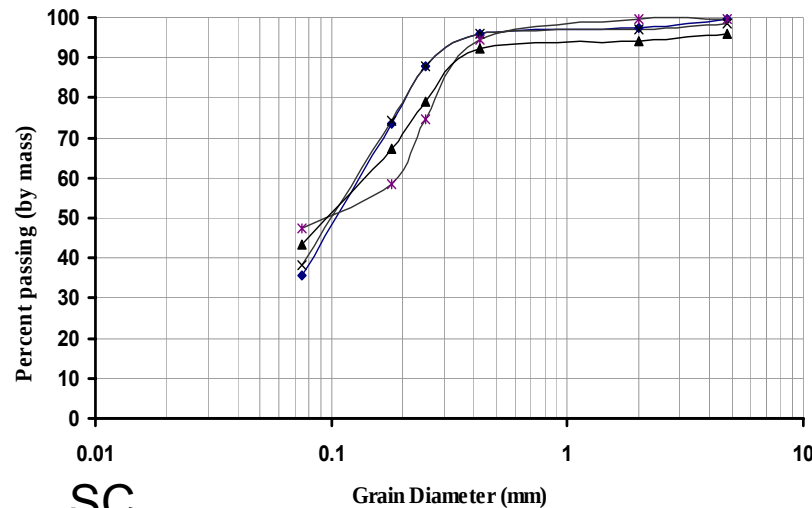


טיפוסי הקרקע באתר המחקר

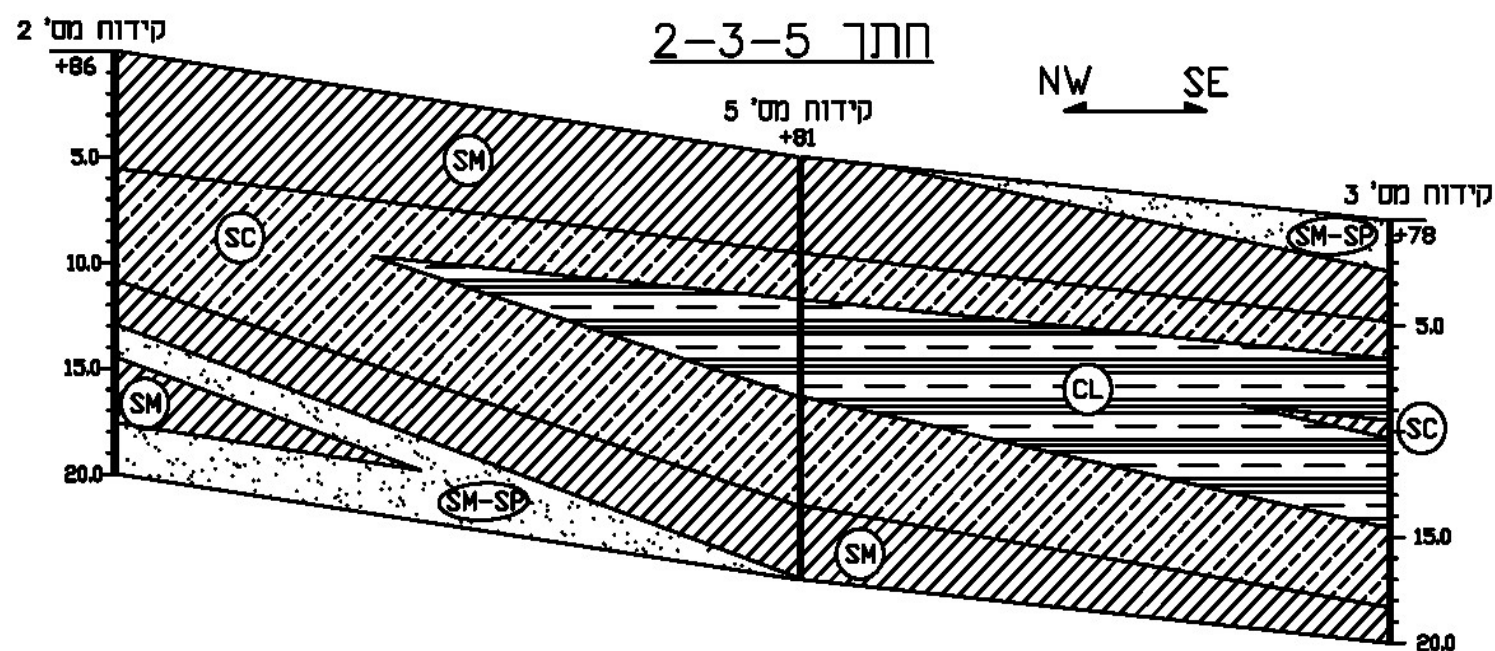
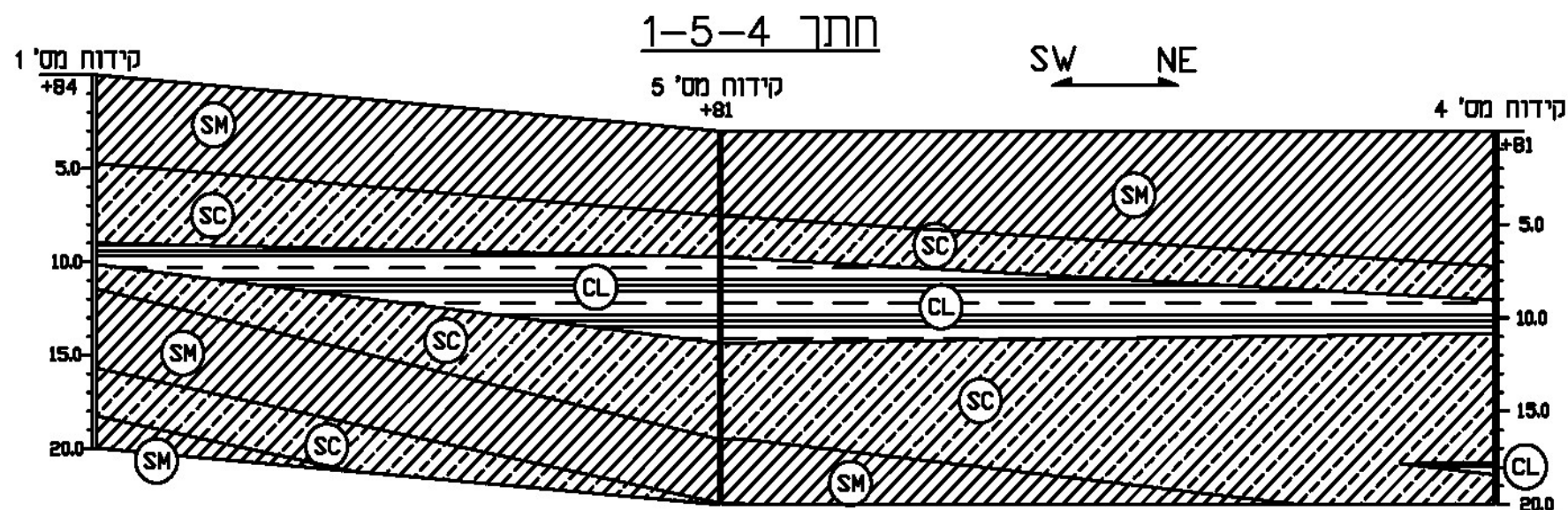
SM חול סילטי, עד 20% דקים, לא פלסטי

SC חול חרסיתי עם קרבונט, 33-50% דקים, פלסטיות נמוכה

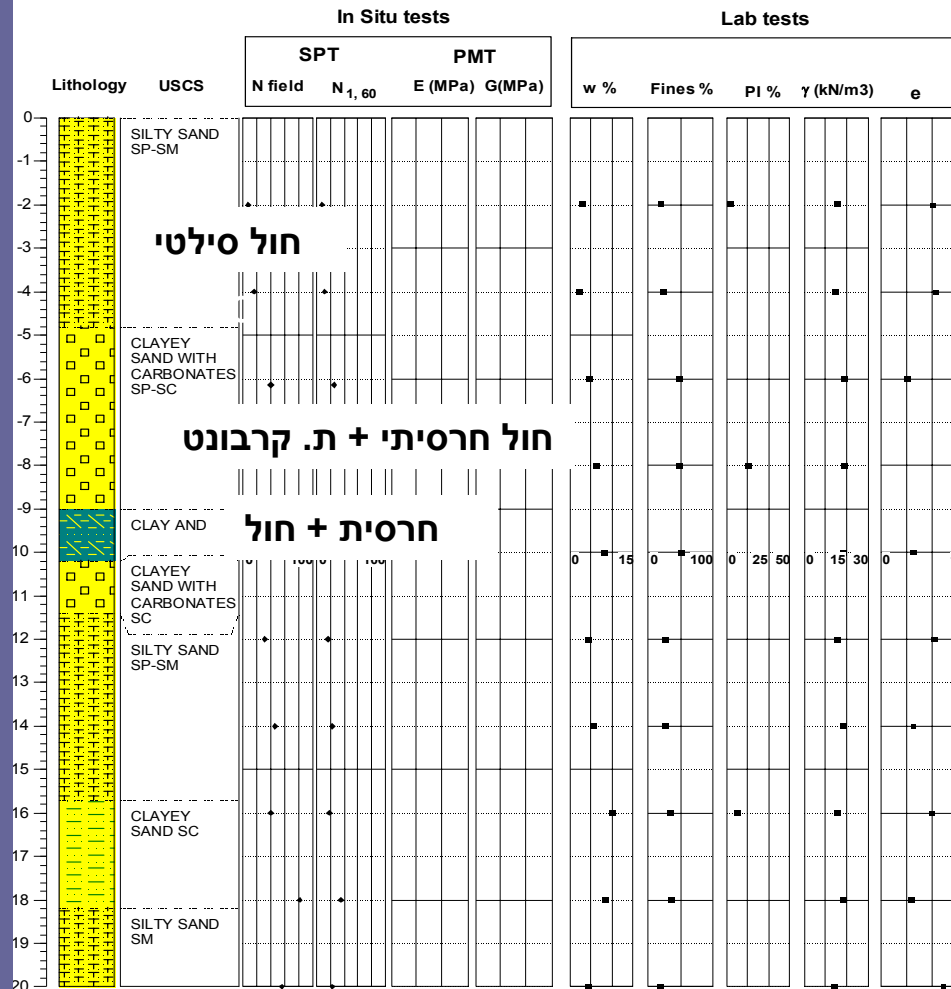
CL* חרסית עם חול, פלסטיות נמוכה



תרשים 7: טיפוסי הקרקע והתפלגות גודל גרגר אופיינית.



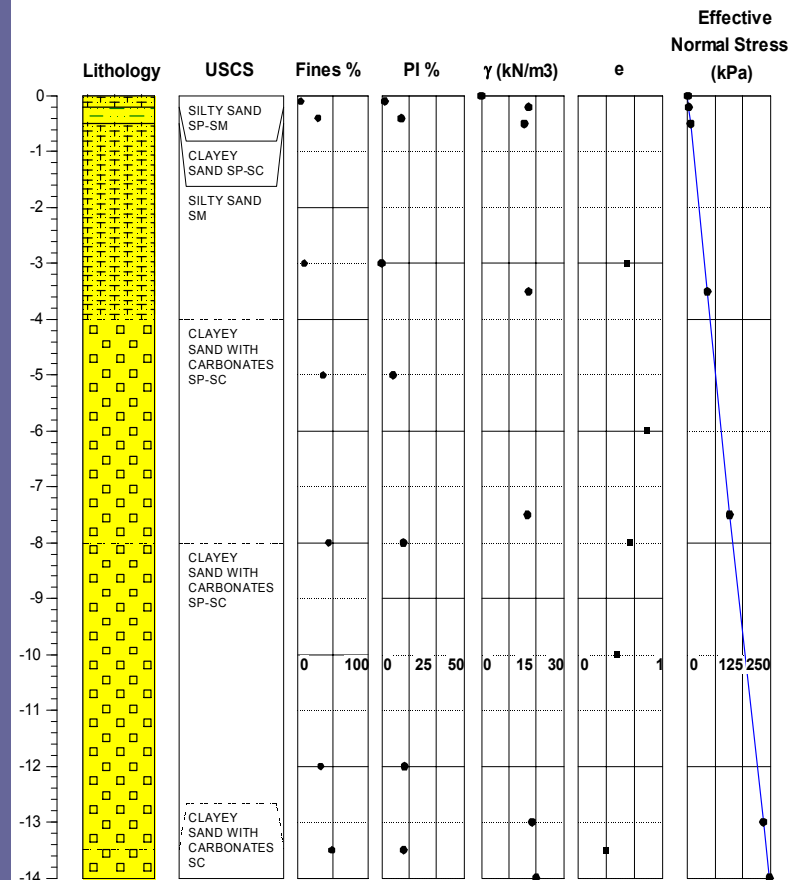
אתר כרם שלום: קידוח #1



מקרא:
 - PMT - בדיקת פרסיומטר
 - E (MPa) - מודול אלסטי של הקרקע לפי v_d
 - G (MPa) - מודול גזירה של הקרקע לפי v_d
 - PI% - אינדקס הפלסטיות - γ - משקל מרחבי יבש
 - e - מנת חללים

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

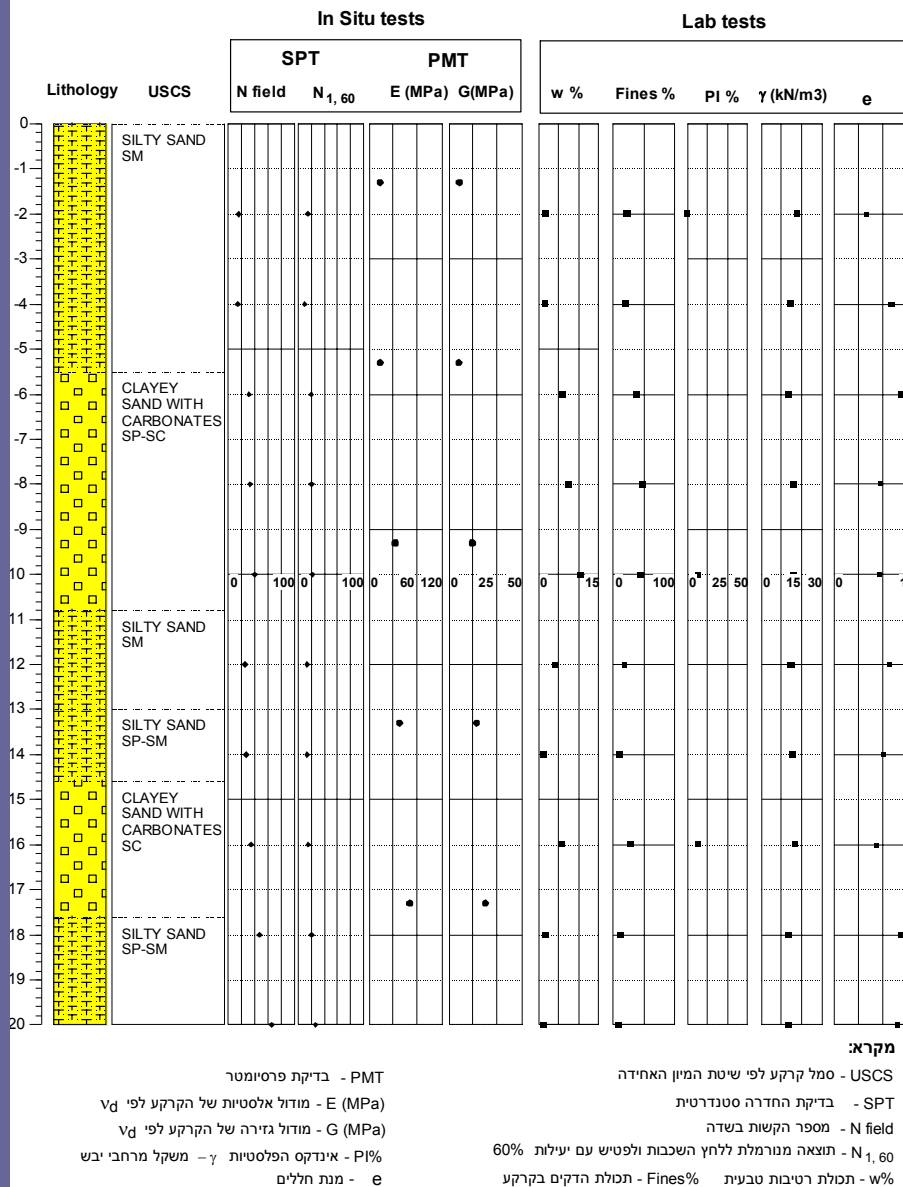
אתר כרם שלום: מחפורת II קיר מערבי



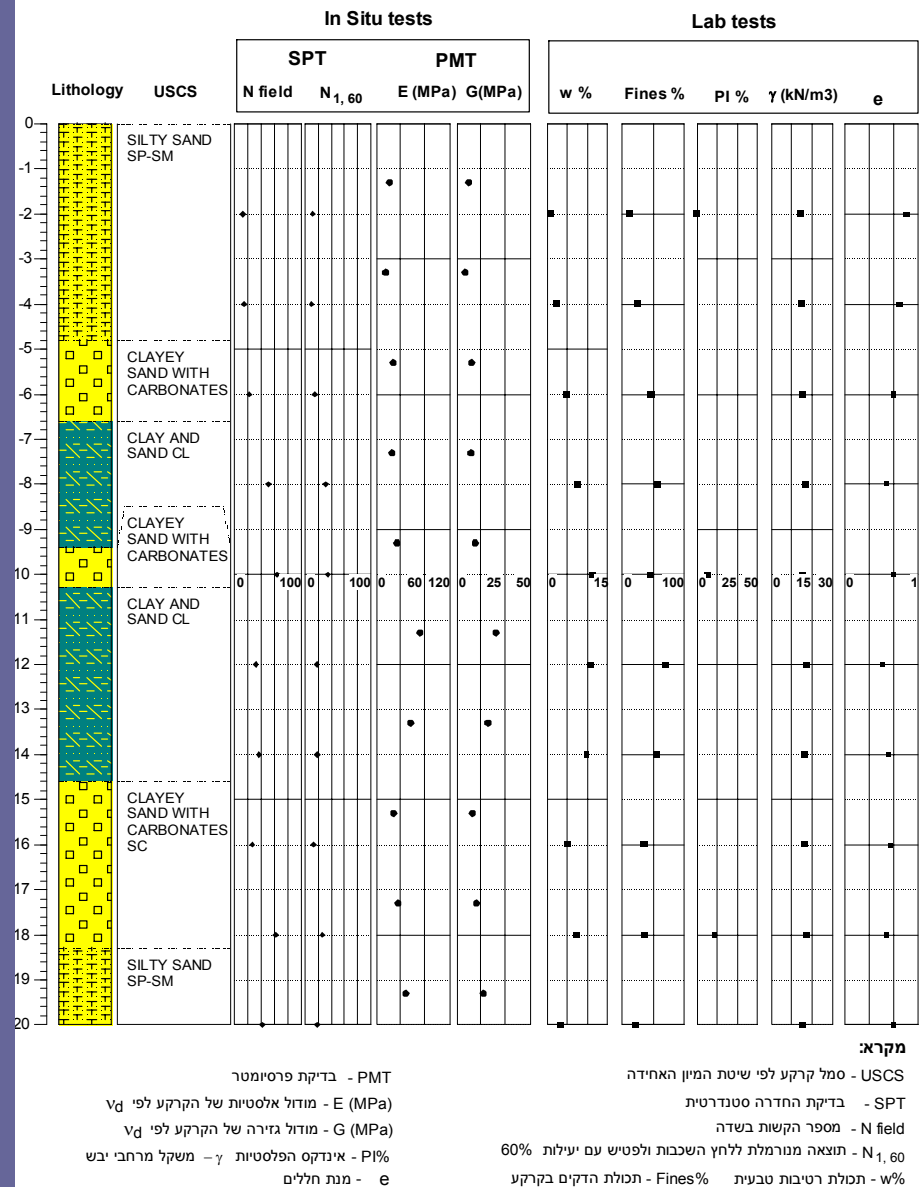
מקרא:
 - USCS - סמל קרקע לפי שיטת מיון אחידה
 - Fines % - תכולת הדקים בקרקע
 - PI % - אינדקס פלסטיות
 - e - מנת חללים
 - γ - משקל מרחבי יבש
 - Effective Normal Stress - השתנות מאמץ אפקטיבי אנכי עם העומק לפי $\sigma_v = \gamma z$
 פונקציית המאמץ: $\gamma = -0.0569 X$

אפיון גיאומכני של הקרקע

#2 אתר כרם שלום: קידוח #2



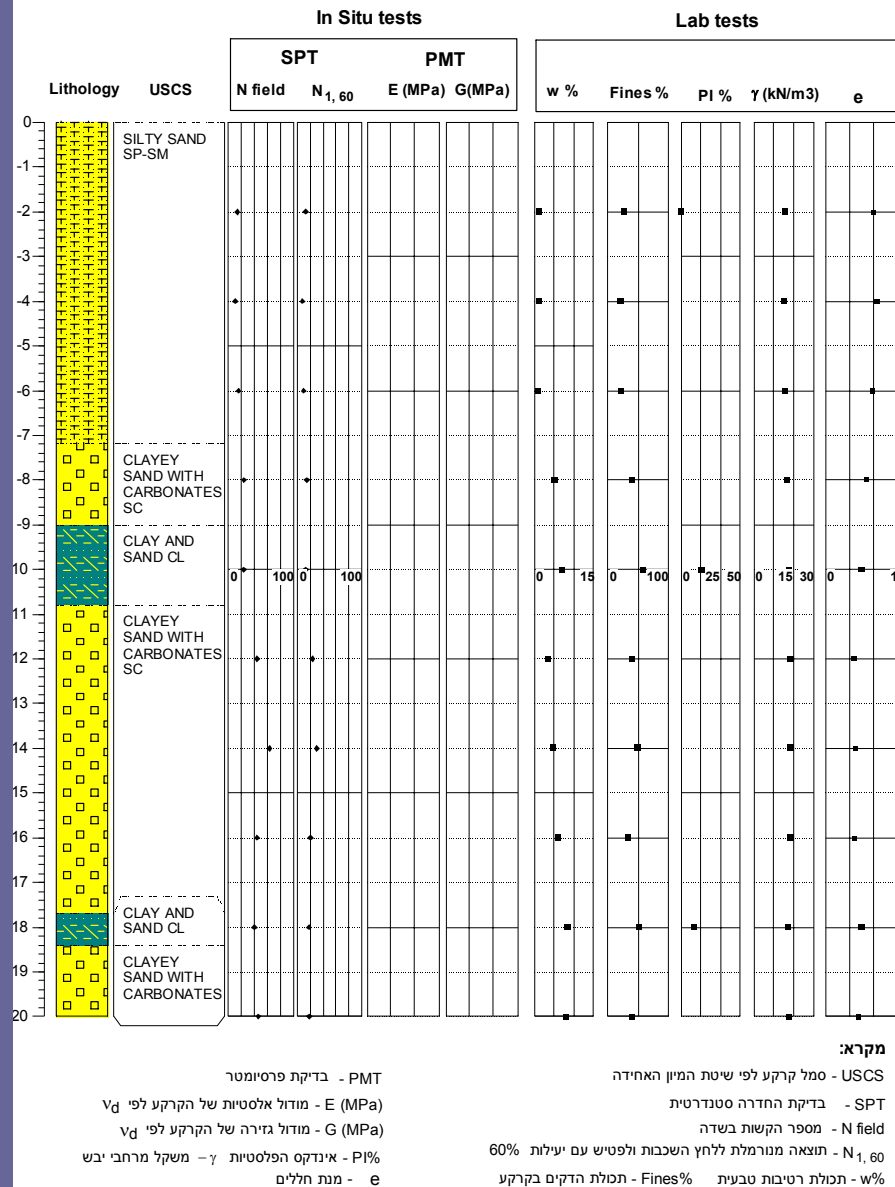
#3 אתר כרם שלום: קידוח #3



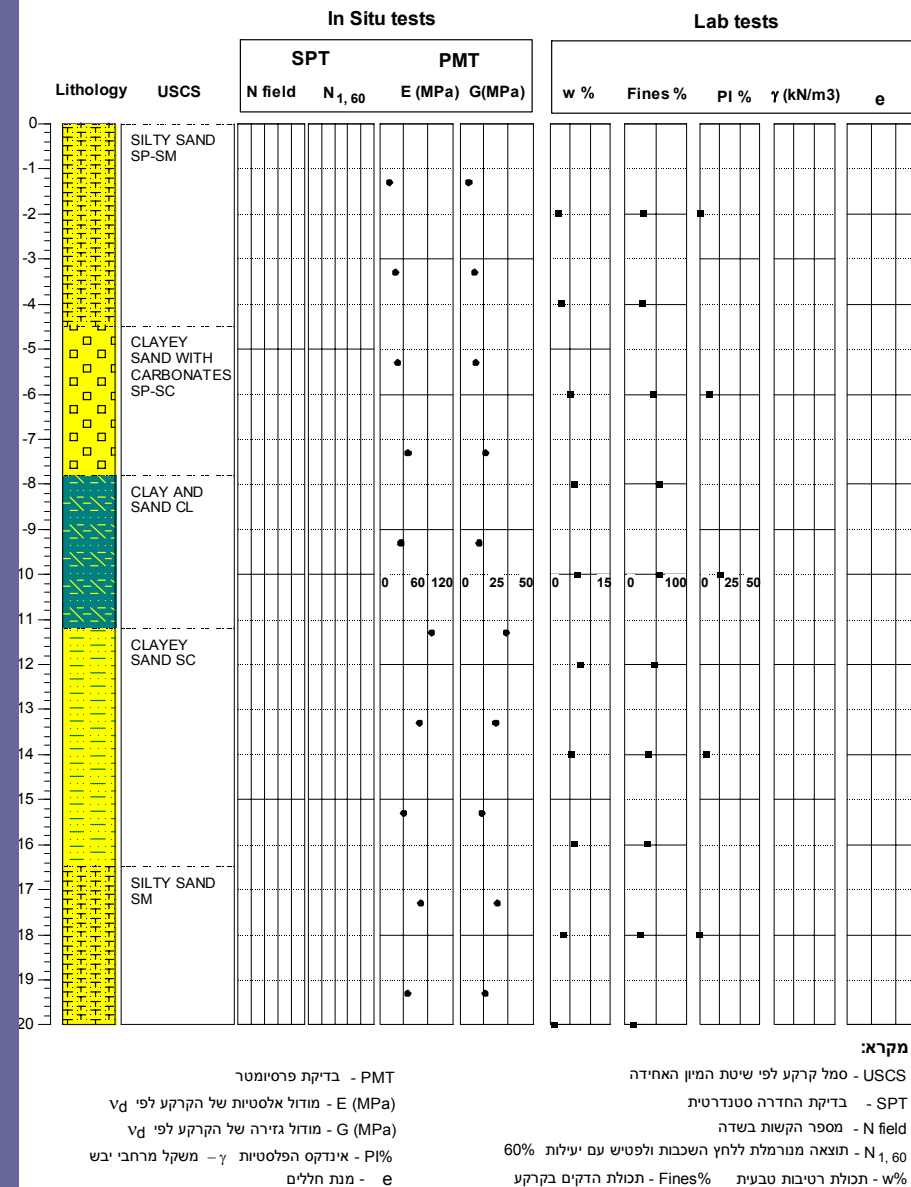
תרשים 9: לוג קידוח בקרקע של אתר המחקר : ליתולוגיה ומאפיינים גיאומכניים.

אפיון גיאומכני של הקרקע

אתר כרם שלום: קידוח #4



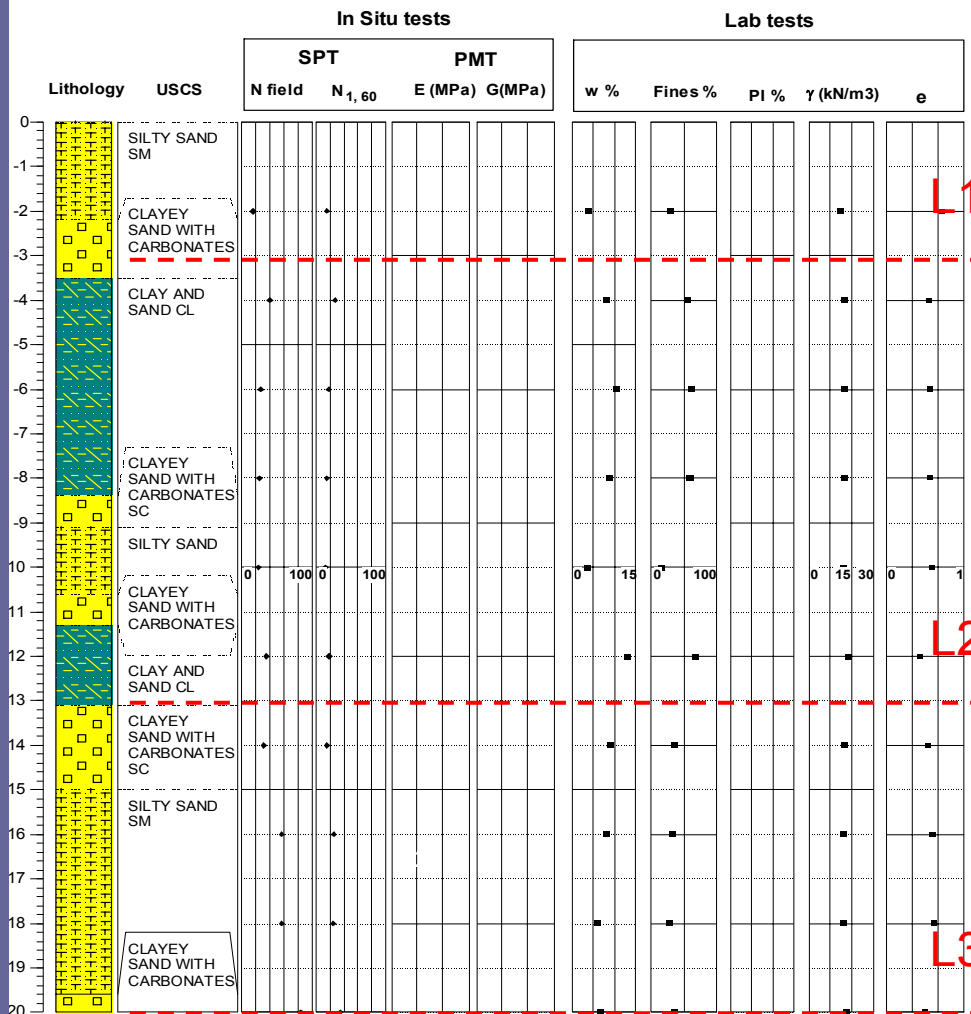
אתר כרם שלום: קידוח #5



תרשים 10: לוג קידוח בקרקע של אתר המחקר : ליתולוגיה ומאפיינים גיאומכניים.

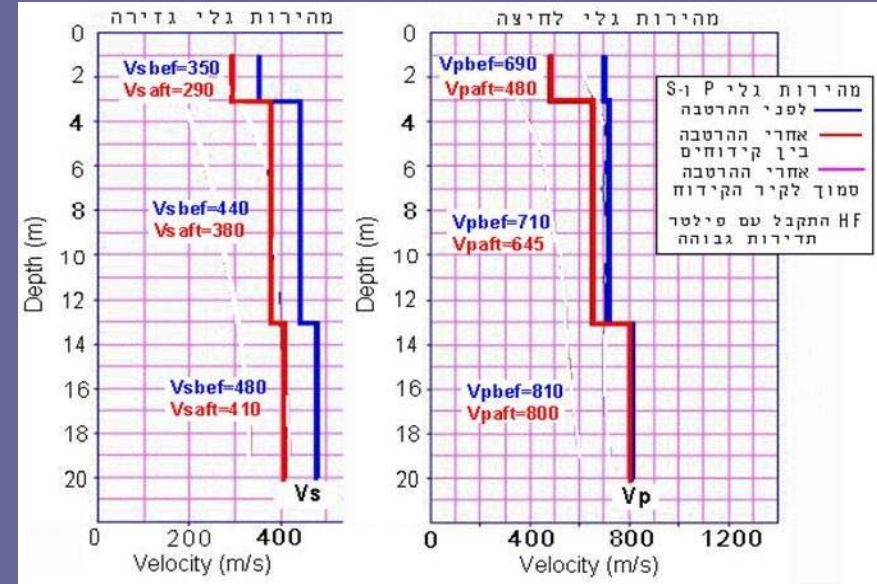
אפיון גיאומכני של הקרקע

אתר כרם שלום: קידוח #6



מקרא:
 - PMT בדיקת פרסיומטר
 E (MPa) - מודול אלסטי של הקרקע לפי v_d
 G (MPa) - מודול גזירה של הקרקע לפי v_d
 - SPT בדיקת החדרה סטנדרטית
 N field מספר הקשות בשדה
 N_{1,60} תוצאה מנורמלת ללחץ השכבות ולפטיש עם יעילות 60%
 - 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%
 Fines% תכולת רטיבות טבעית
 w% תכולת רטיבות טבעית



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

תרשים 11: השינוי במהירויות גלי לחיצה וגזירה לאחר הרטבת הקרקע (יזרסקי, 2004), טבלת פרמטרים אלסטיים דינמיים

וחלוקה לשכבות הקרקע לפי מהירויות סייסמיות.

המערכת לבדיקות גזירה ישירה (TerraTek systems Inc.)

מכשיר גזירה הידראולי הפועל בבקרת סרוו במעגל סגור



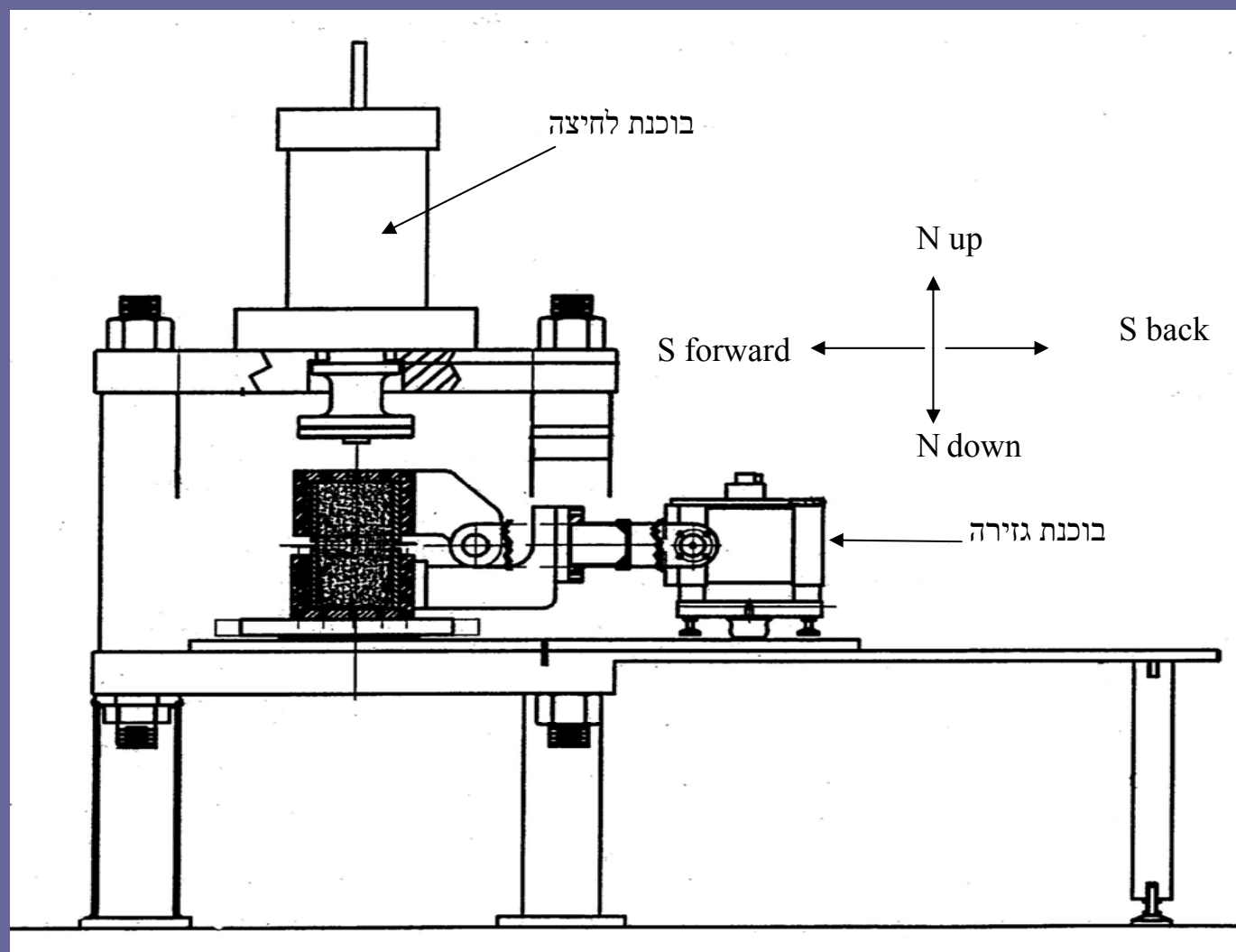
תרשים 12: רכיבי המערכת לבדיקות גזירה ישירה – המעבדה למכניקת הסלע אוניברסיטת בן גוריון בנגב.

המערכת מיועדת לבדיקות בסלעים ובמחקר זה שמשה לבדיקות בקרקע.

ניסיון ראשוני לבדיקות של דגמי קרקע ששטח החתך שלהן עולה על 100 סמ"ר,
כמקובל בבדיקות גזירה ישירה של קרקעות.
מאפשר להתייחס באופן איכותי יותר להטרוגניות הקרקע.

בוכנת לחיצה (100 טון) – פועלת בבקרת תזוזה \ עומס.

בוכנת גזירה (30 טון) – פועלת בבקרת תזוזה בלבד.



תרשים 13: המכשיר לגזירה ישירה – וכיווני תנועה במערכת.



תרשים 14: מכלול בוכנת הגזירה וקופסאות הגזירה הצמודות אליה.

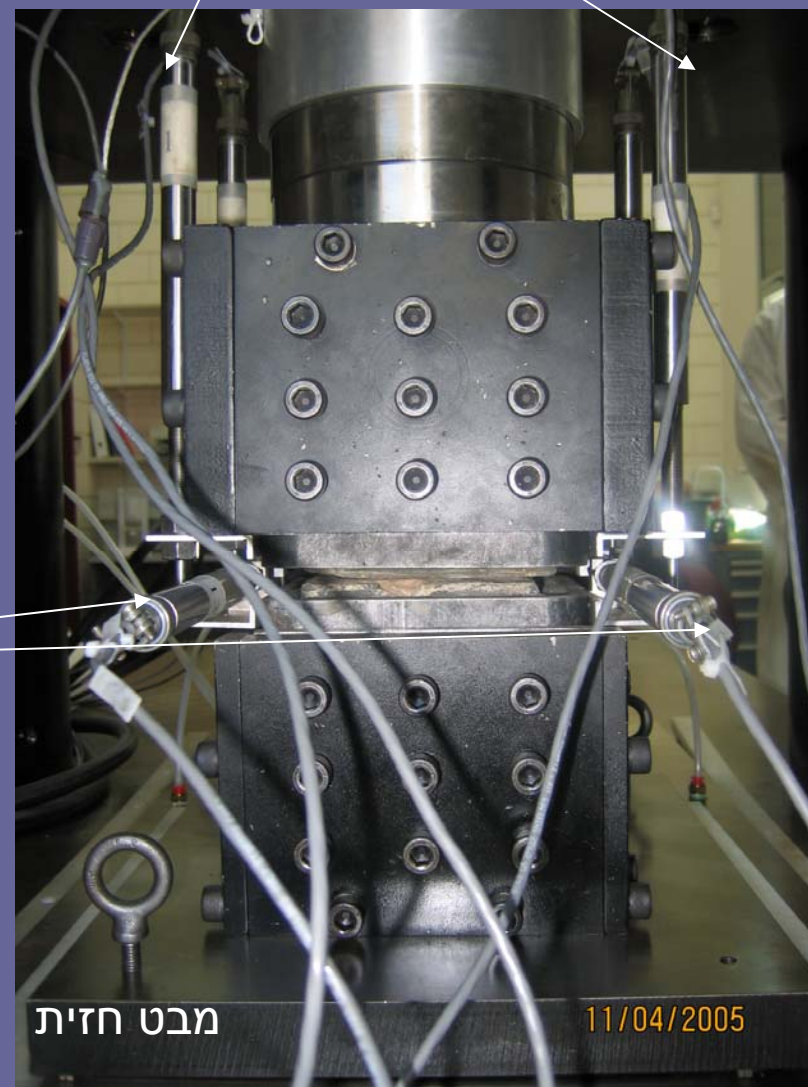
LVDT's

מדי תזוזה אנכיים

מבט צד

מדי תזוזה אופקיים

תרשים 15: מדי תזוזה המותקנים על קופסאות הגזירה בזמן בדיקה.



מבט חזית



תרשים 16: שלבים בהכנת דגם קרקע לבדיקה במכשיר הגזירה.

בדיקות מכניות שנערכו במערכת לבדיקות גזירה ישירה

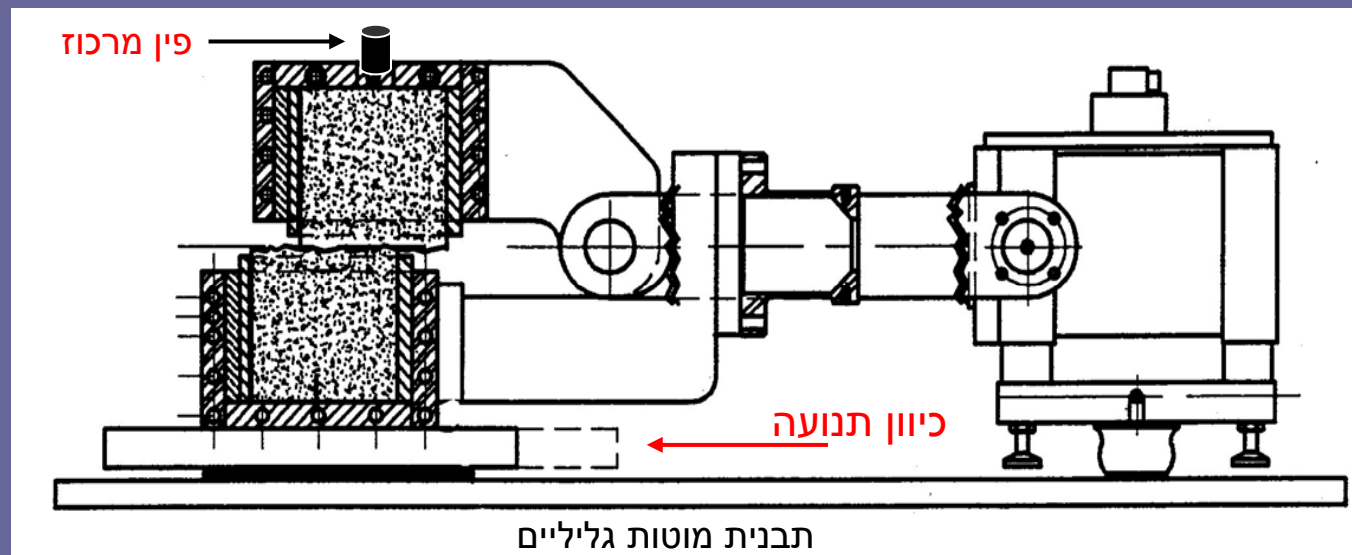
1. מבחני גזירה ישירה – חוזק הקרקע (קריטריון כשל).

- במצב מנוקז, דגמים רציפים ובמצב יבש

- גזירה בקצב קבוע של 1 mil/sec

- טווח תזוזה של 200 mil

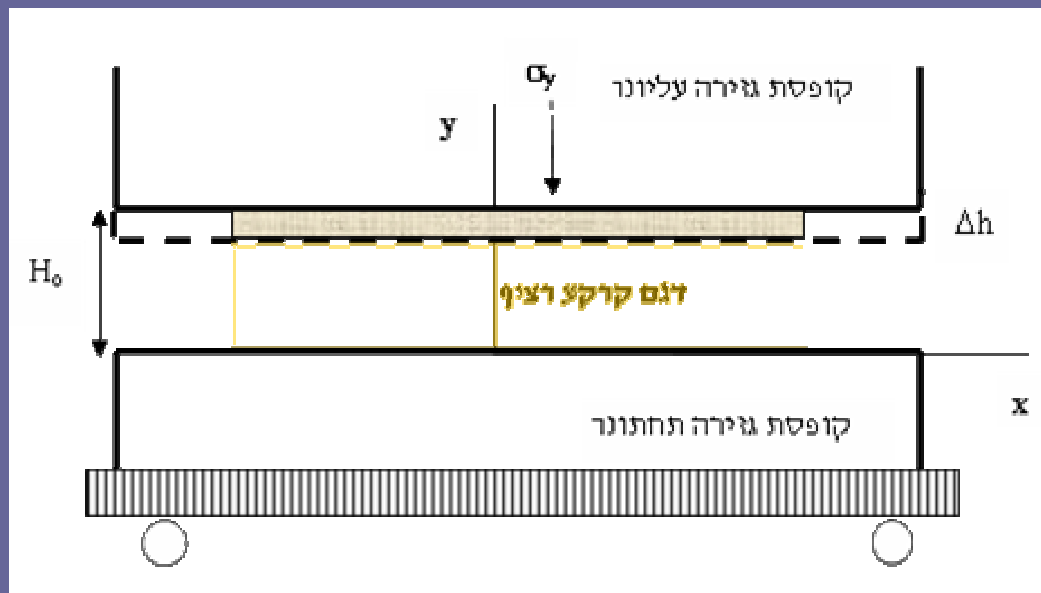
- בוכנה נורמלית בבקרת עומס, בוכנת גזירה בבקרת תזוזה



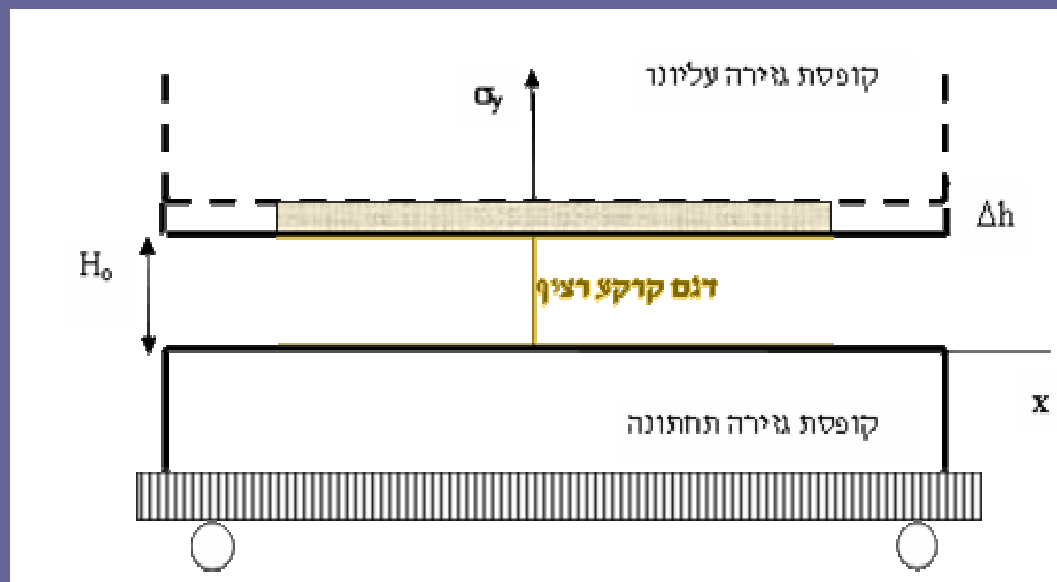
תרשים 17: מצב קופסאות הגזירה והדגם במהלך בדיקת גזירה ישירה.

2. העמסה חד צירית של דגמי קרקע

- מודול אלסטיות "יאנג" (E)

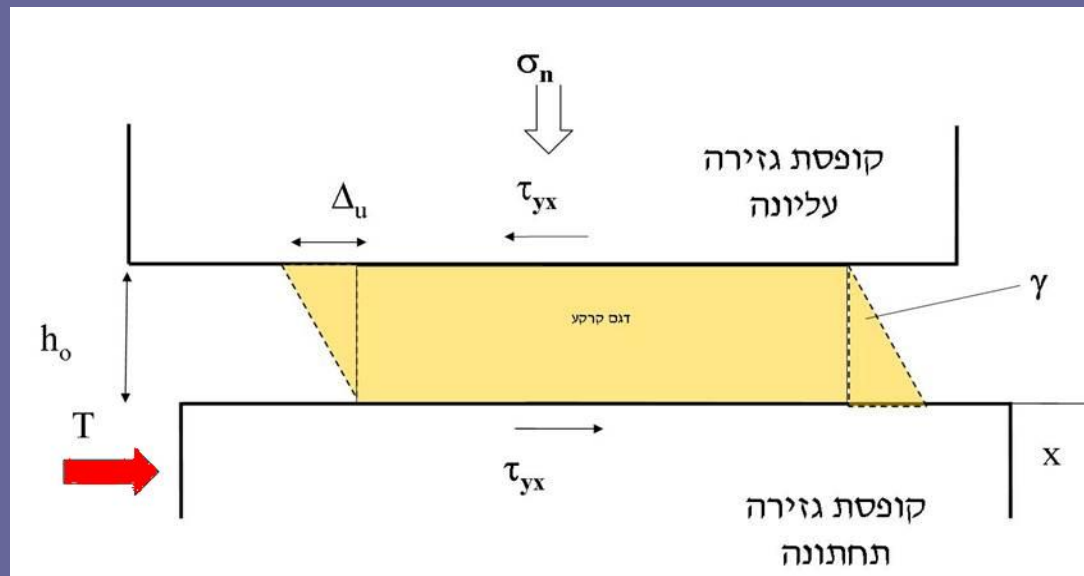
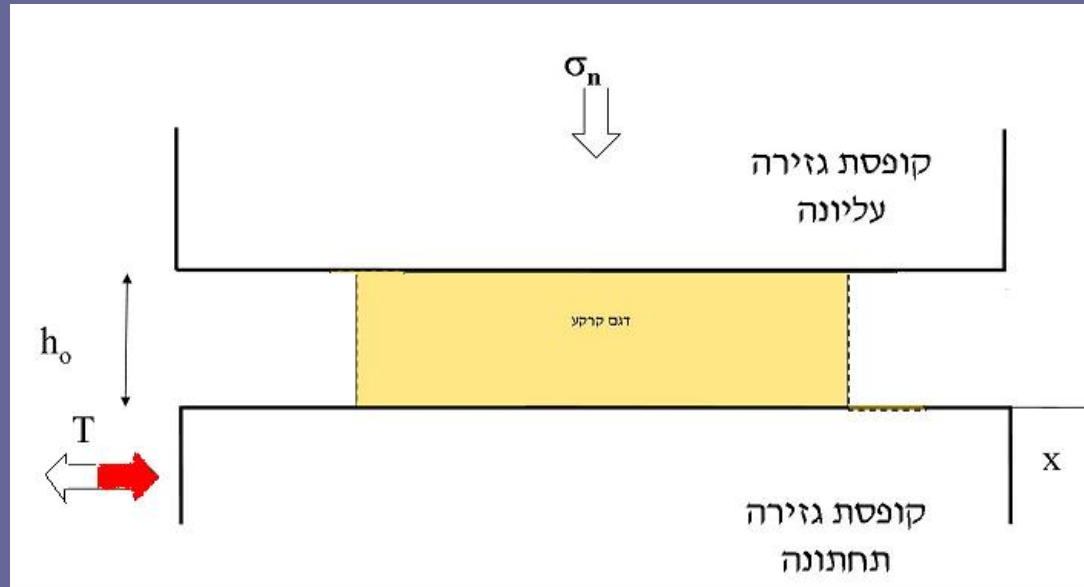


תרשים 18: התקצרות הדגם בציר האנכי (Δh) כתוצאה מהפעלת מאמץ נורמלי σ_y (ללא קנ"מ).



תרשים 19: מצב הדגם בסיום סגמנט הפריקה והתארכותו (Δh) בציר האנכי כתוצאה מפריקת המאמץ הנורמלי σ_y (ללא קנ"מ).

3. בדיקות גזירה מחזורית מונוטונית של דגמי קרקע מטיפוס SM- מודול גזירה (G) .



- בוכנת גזירה פועלת בבקרת תזוזה.

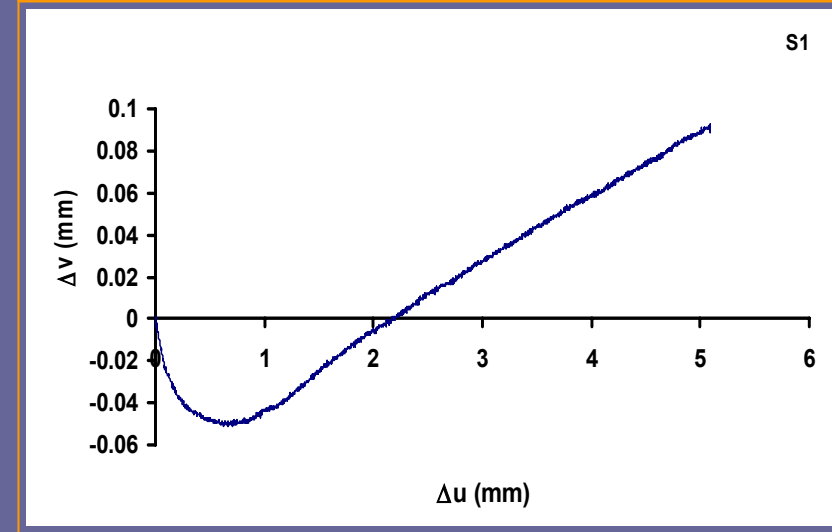
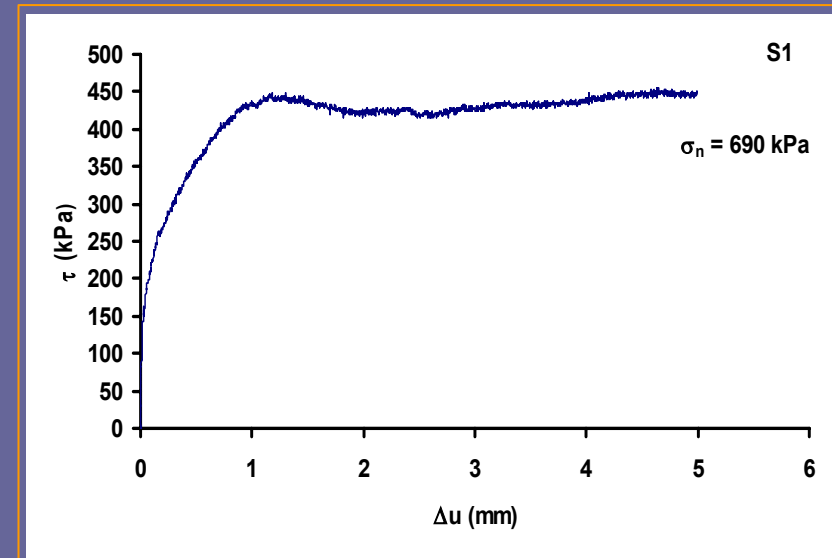
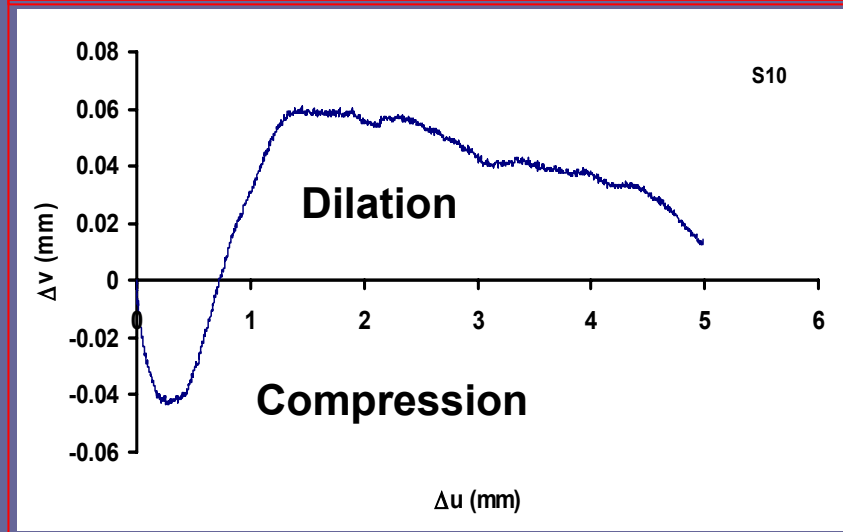
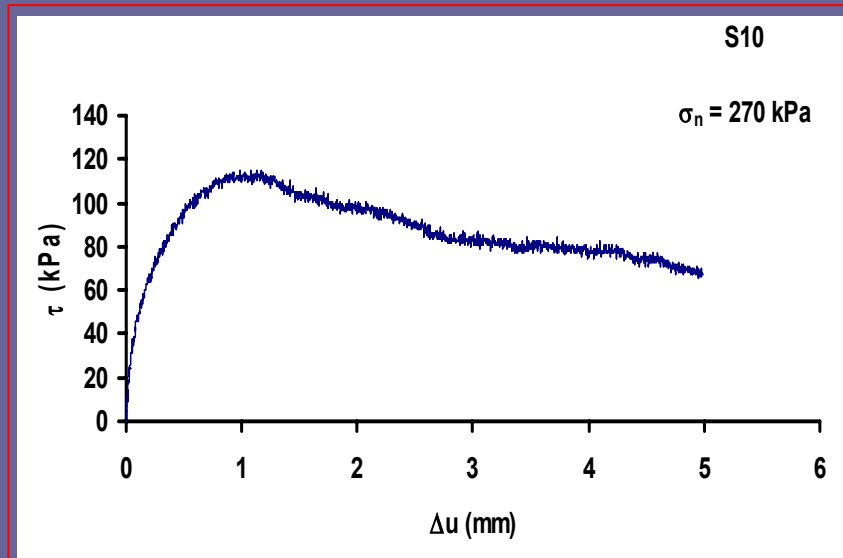
-מוגדר טווח התזוזה Δu

-כוח הגזירה משתנה, אין שליטה על מאמץ הגזירה τ

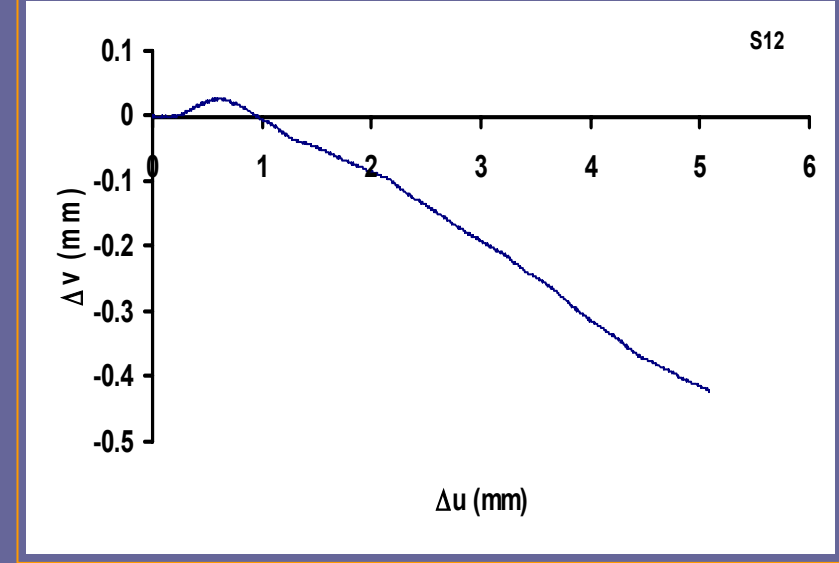
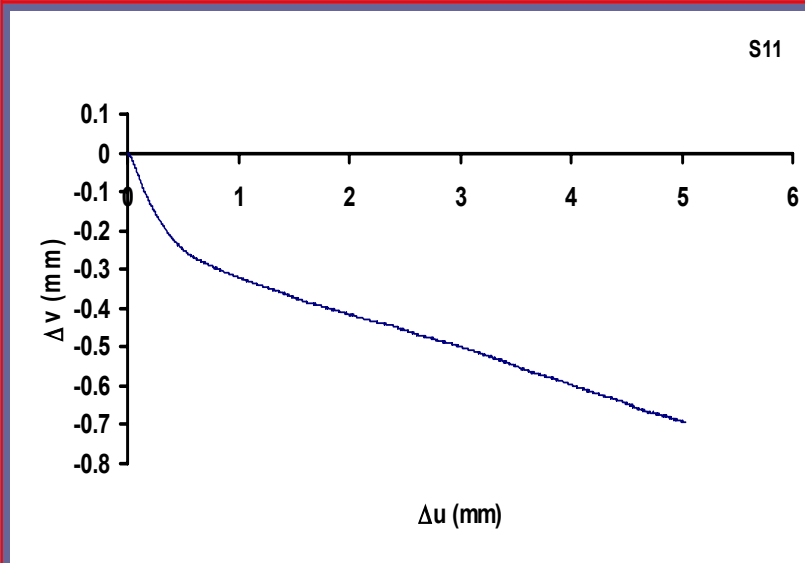
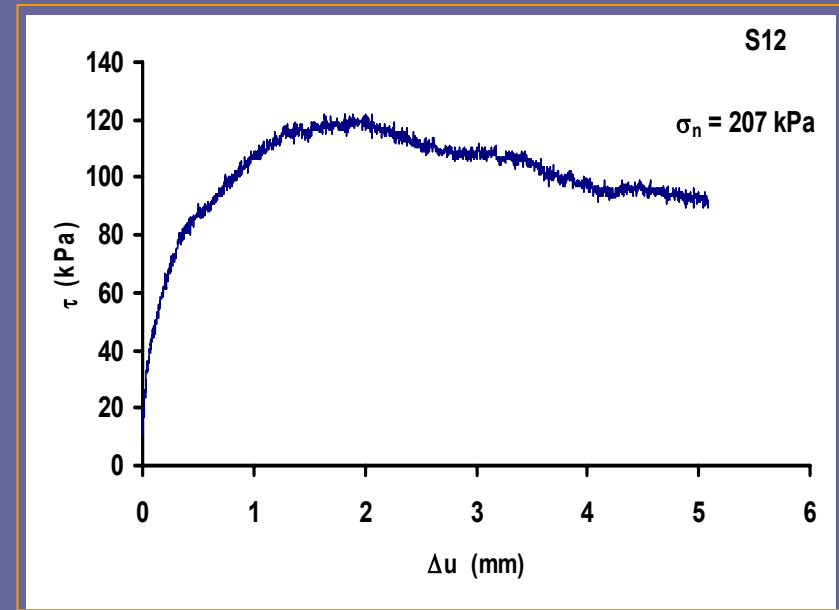
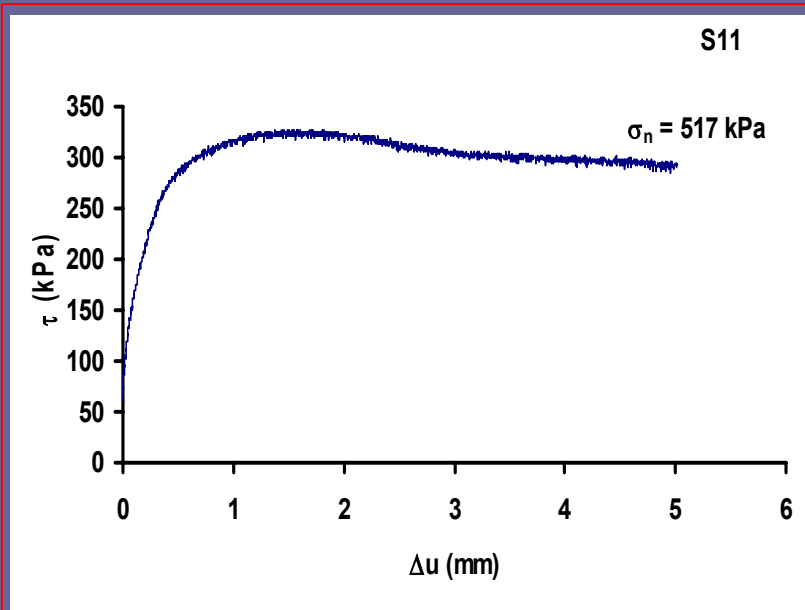
תרשים 20: המאמצים וכוחות הגזירה הפועלים על דגם קרקע במהלך בדיקת גזירה מחזורית .

תרשים 21: מצב דגם קרקע לאחר סגמנט גזירה ראשון , מאמצים ומעוותי גזירה המתפתחים בחומר.

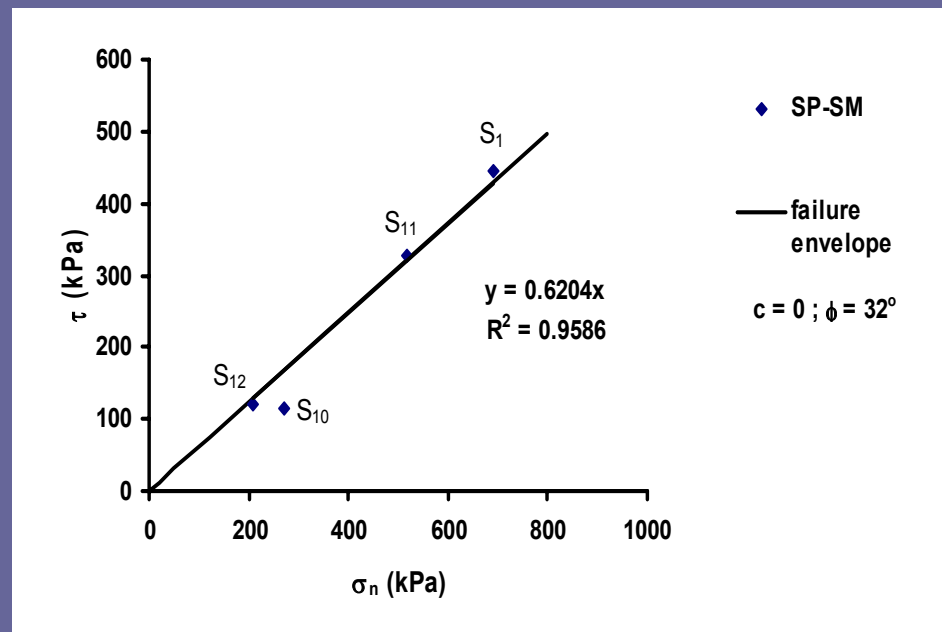
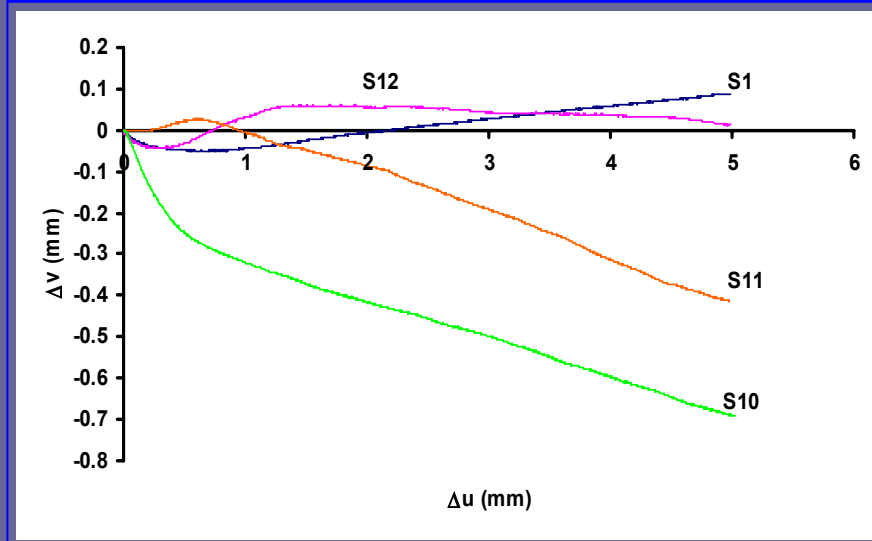
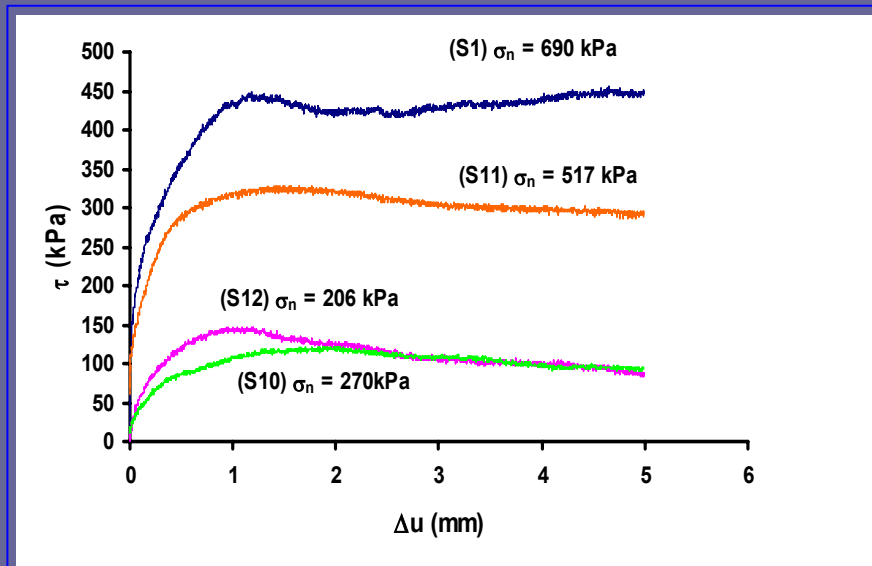
מבחני גזירה ישירה בקרקע מטיפוס SM



תרשים 22: התנהגות מאמץ הגזירה והדילטציה של דגמי קרקע מטיפוס SM בגזירה ישירה תחת מאמץ נורמלי קבוע.

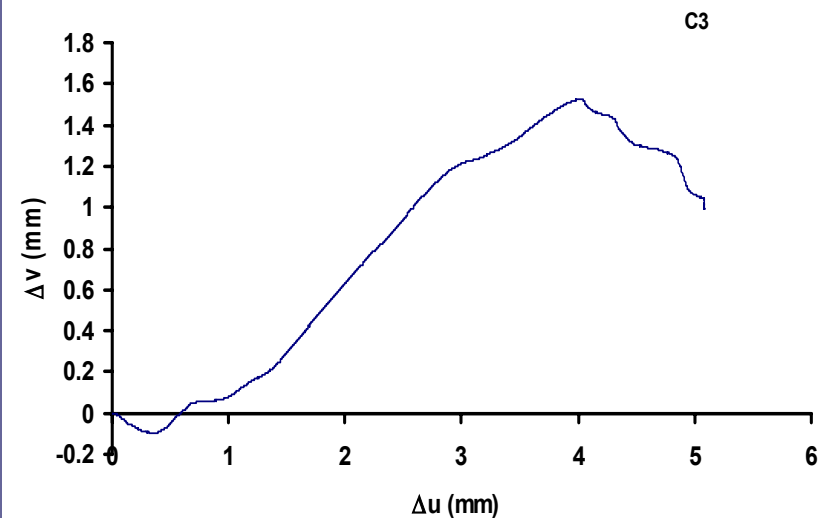
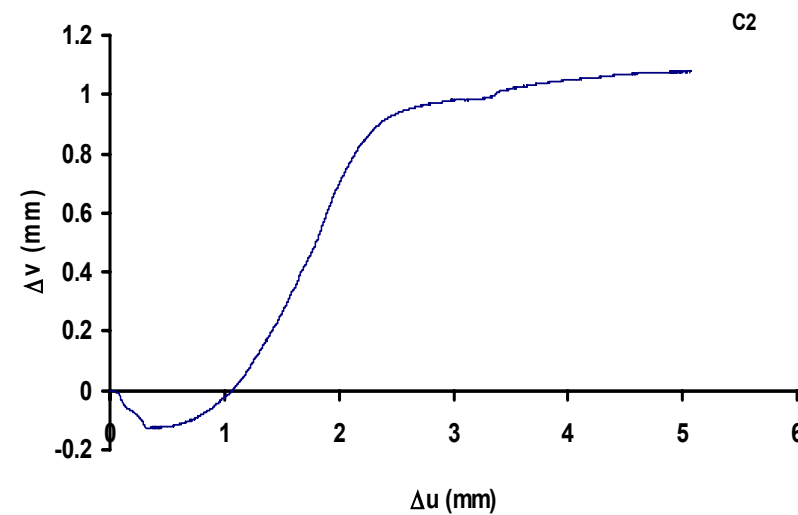
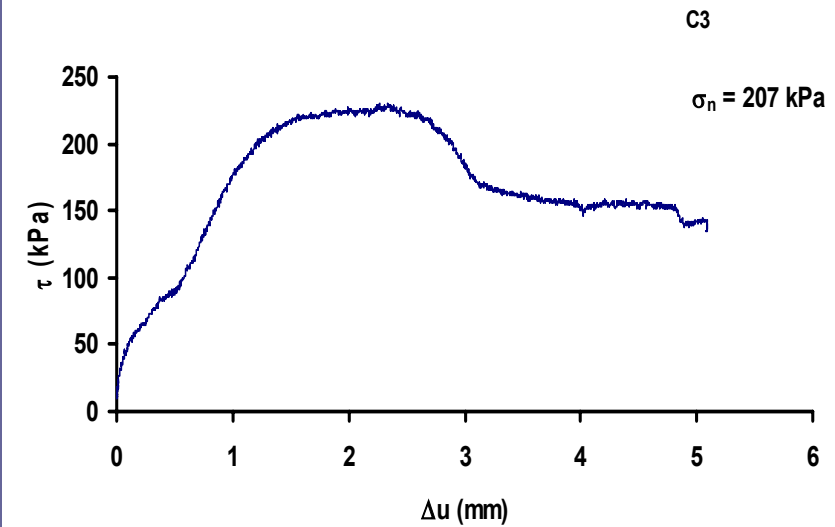
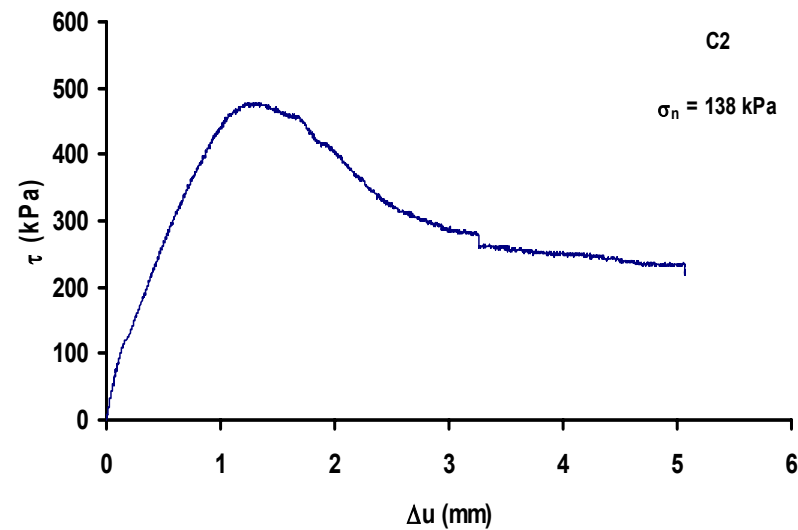


תרשים 23: התנהגות מאמץ הגזירה והדילטציה של דגמי קרקע מטיפוס SM בגזירה ישירה תחת מאמץ נורמלי קבוע.



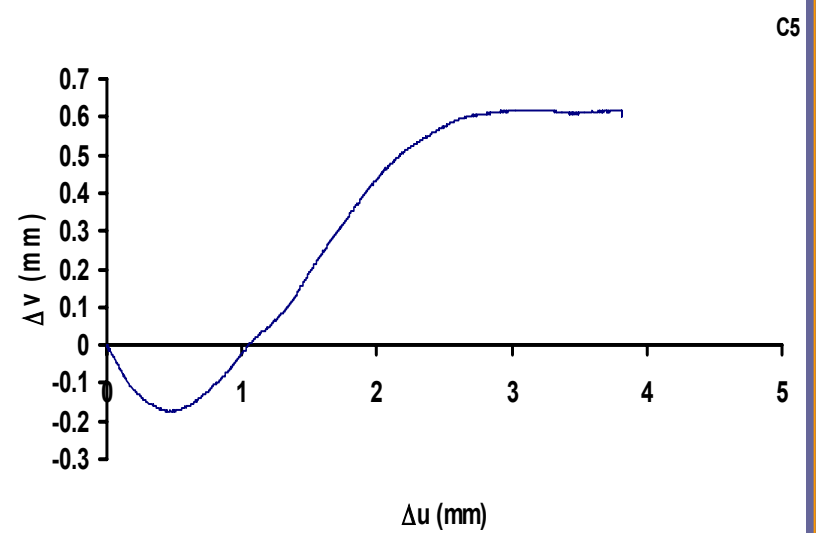
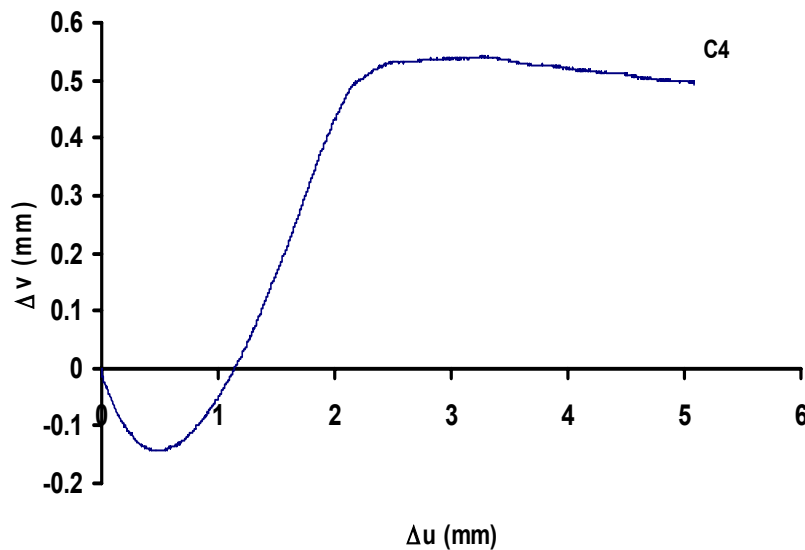
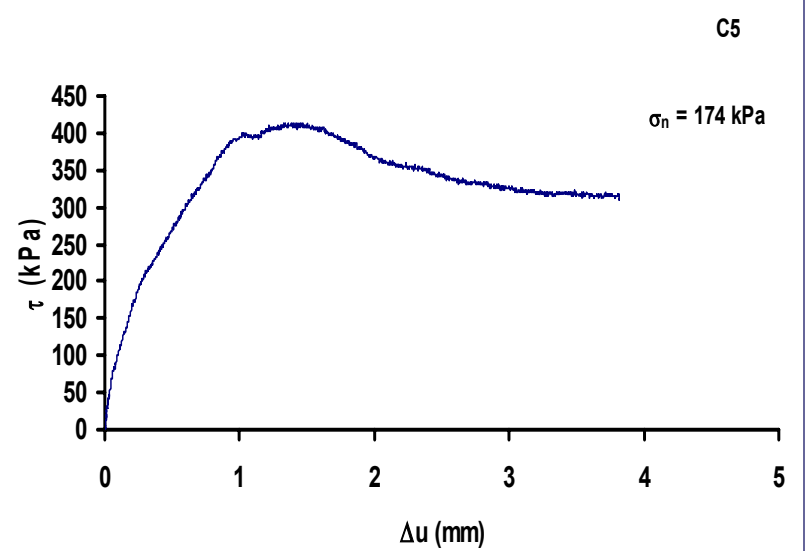
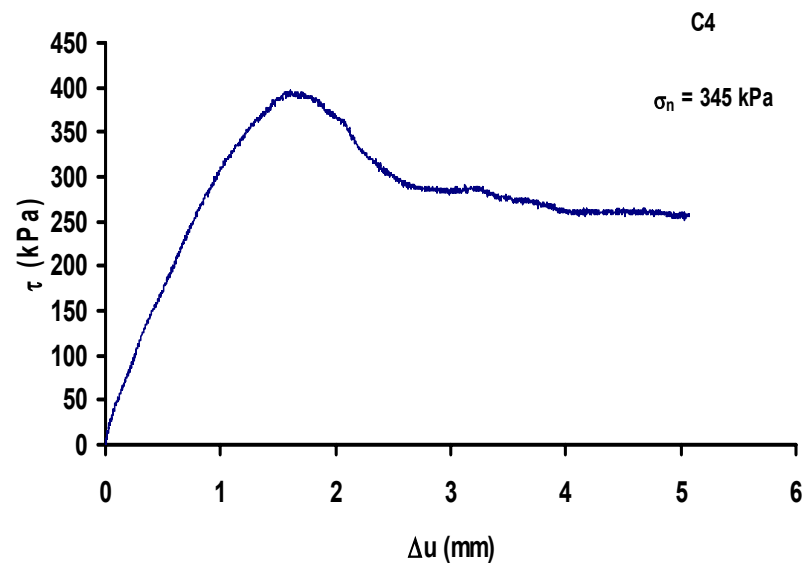
תרשים 24 מימין : מישור גזירה אופייני של דגם ומעטפת הכשל של קרקע מטיפוס SM. משמאל : התנהגות מאמץ הגזירה והדילטציה בכל הבדיקות של קרקע מטיפוס זה.

מבחני גזירה ישירה בקרקע מטיפוס SC

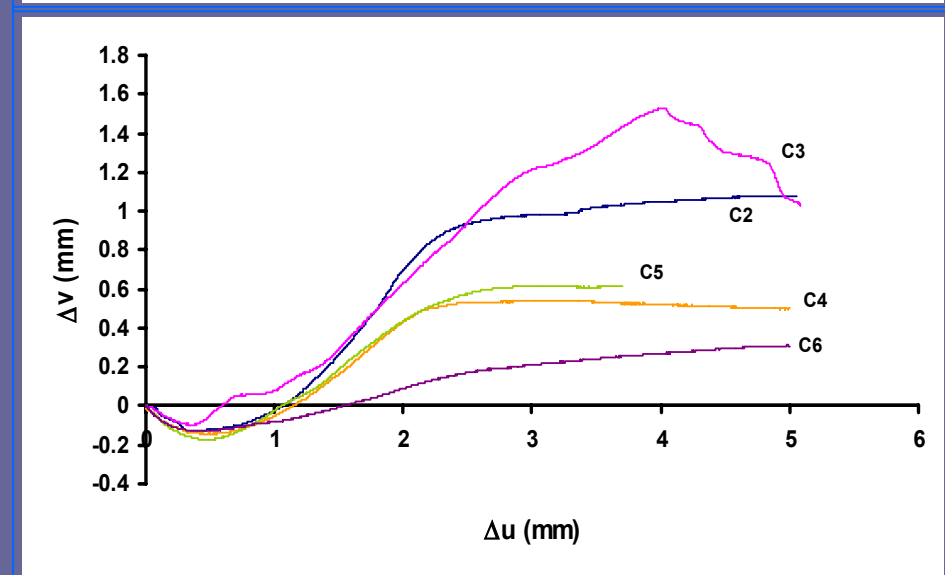
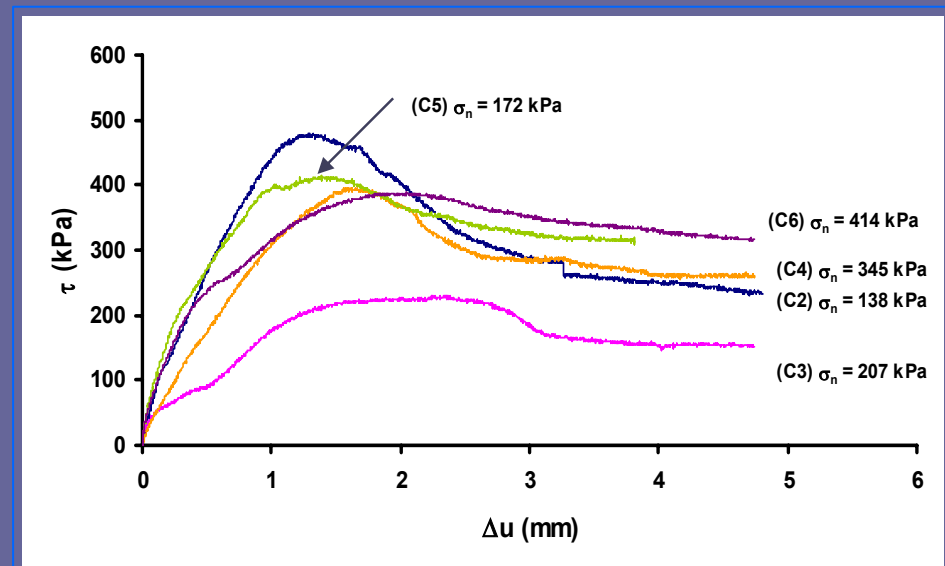
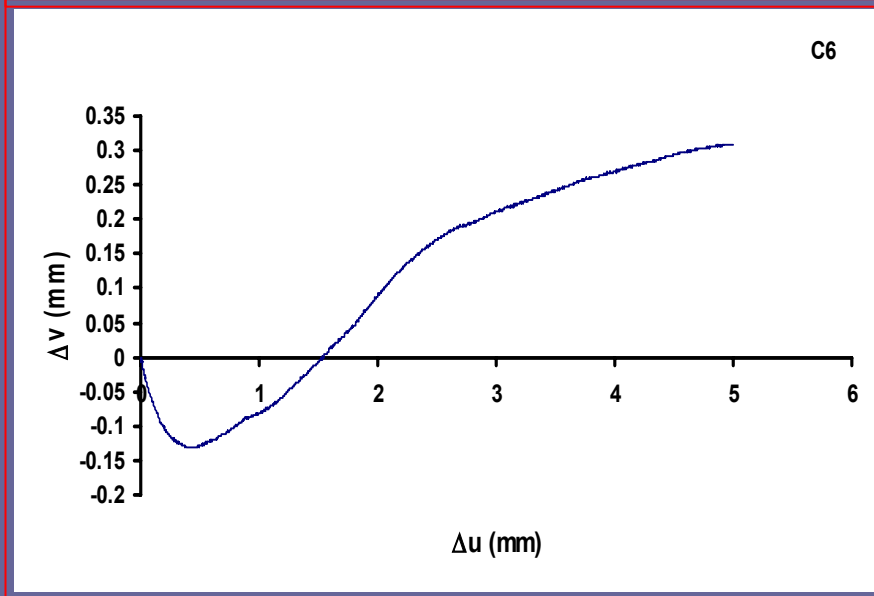
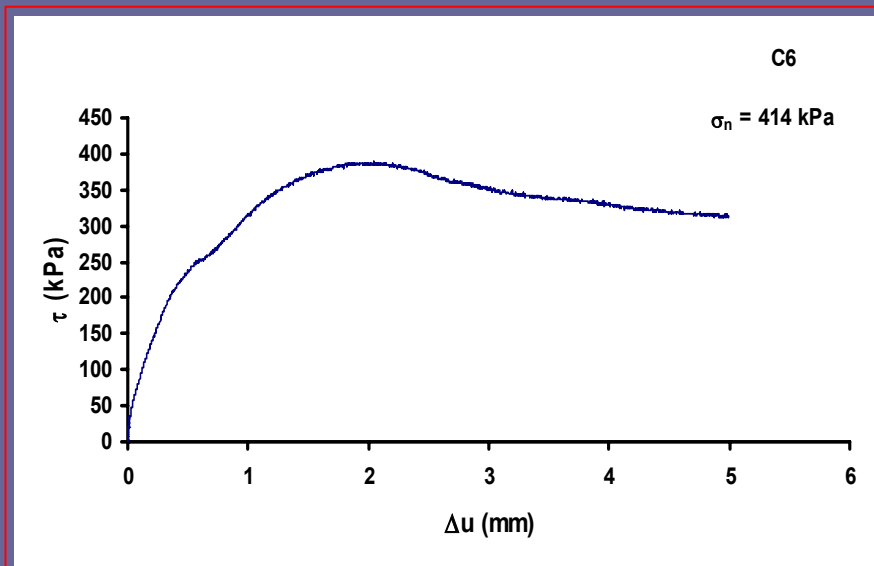


תרשים 25 : התנהגות מאמץ הגזירה והדילטציה של דגמי קרקע מטיפוס SC בגזירה ישירה תחת מאמץ נורמלי קבוע.

תוצאות

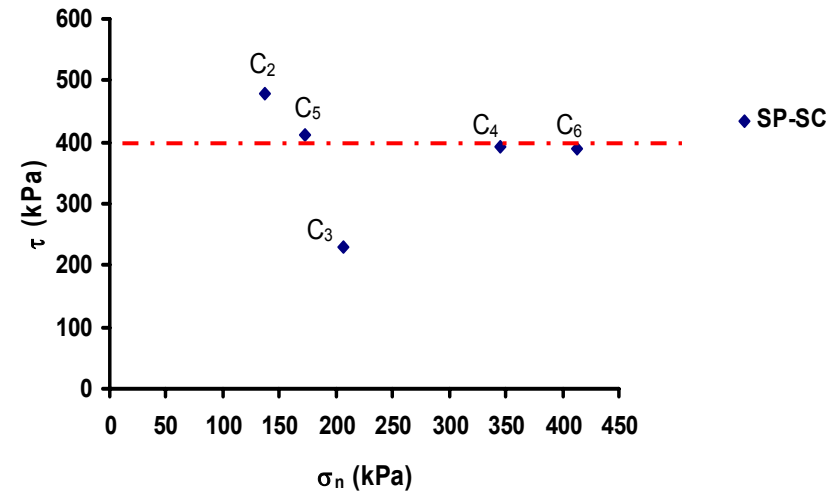


תרשים 26: התנהגות מאמץ הגזירה והדילטציה של דגמי קרקע מטיפוס SC בגזירה ישירה תחת מאמץ נורמלי קבוע.



תרשים 27: התנהגות מאמץ הגזירה והדילטציה של דגמי קרקע מטיפוס SC בגזירה ישירה תחת מאמץ נורמלי קבוע.

חוזק הגזירה של הקרקע מטיפוס SC



תרשים 28: פיזור תוצאות מבחני גזירה בקרקע מטיפוס SC
וחוזק הגזירה האופייני לקרקע זו.

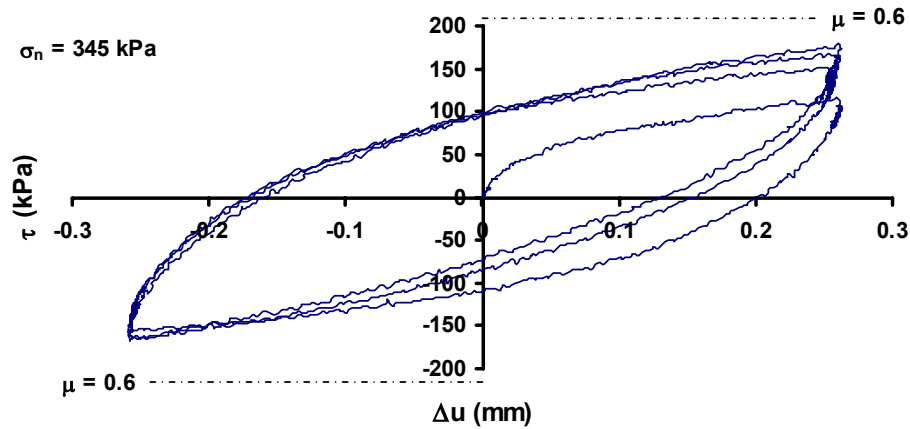


תרשים 29: מישור גזירה אופייני של דגם קרקע מטיפוס SC.

בדיקות גזירה מחזורית מונוטונית בקרקע מטיפוס SM

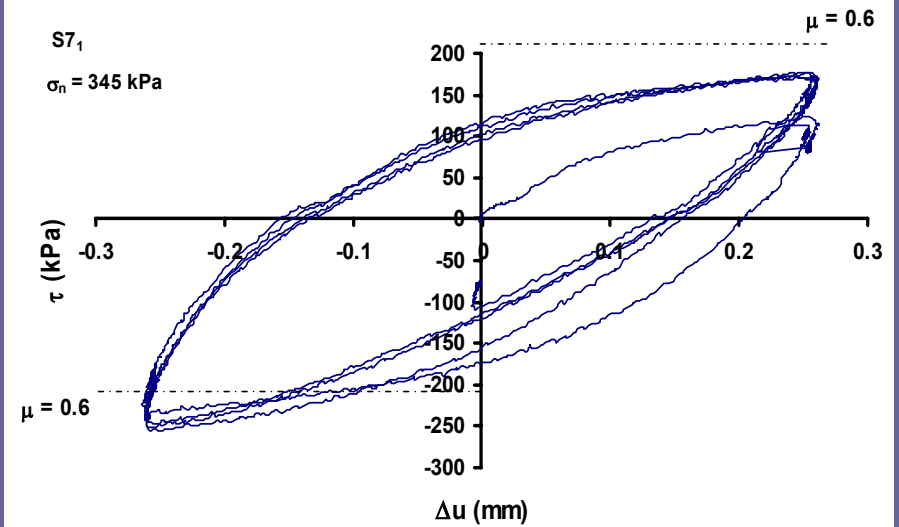
S6

$\sigma_n = 345 \text{ kPa}$

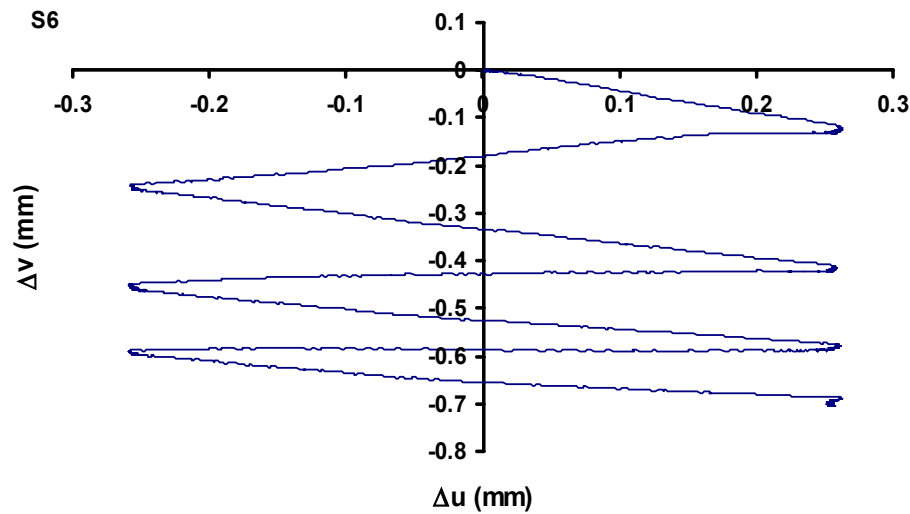


S7₁

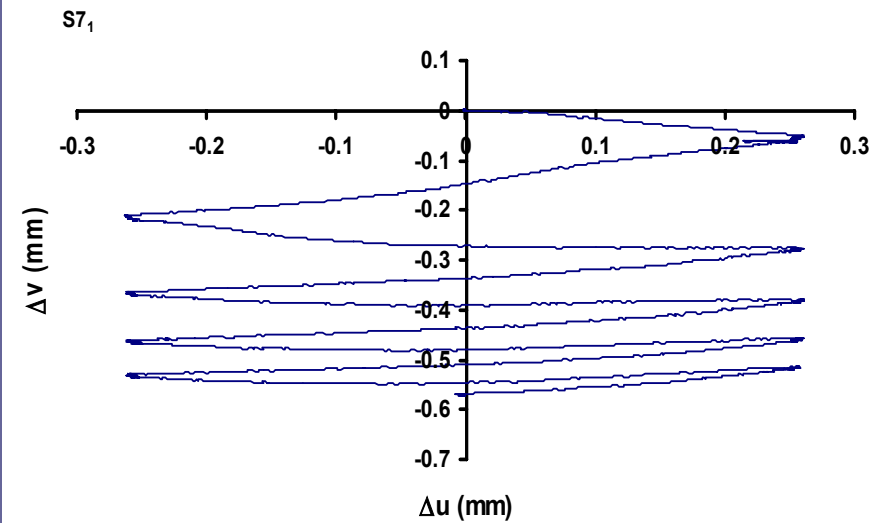
$\sigma_n = 345 \text{ kPa}$



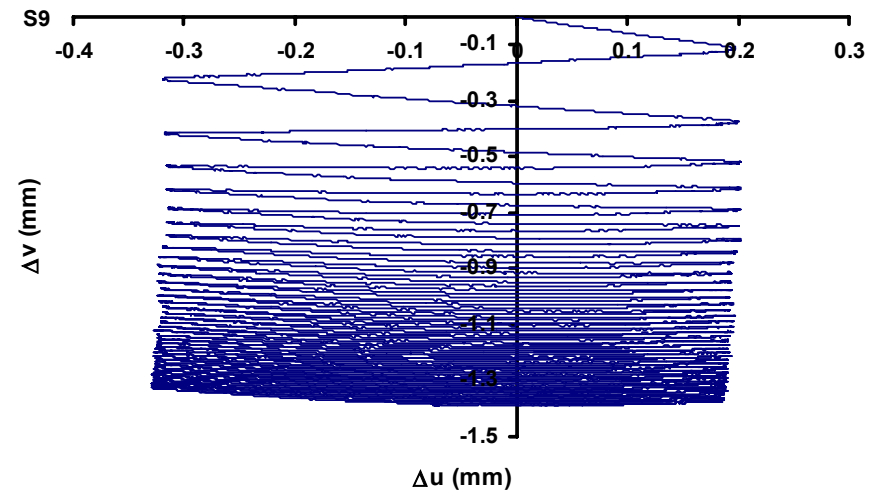
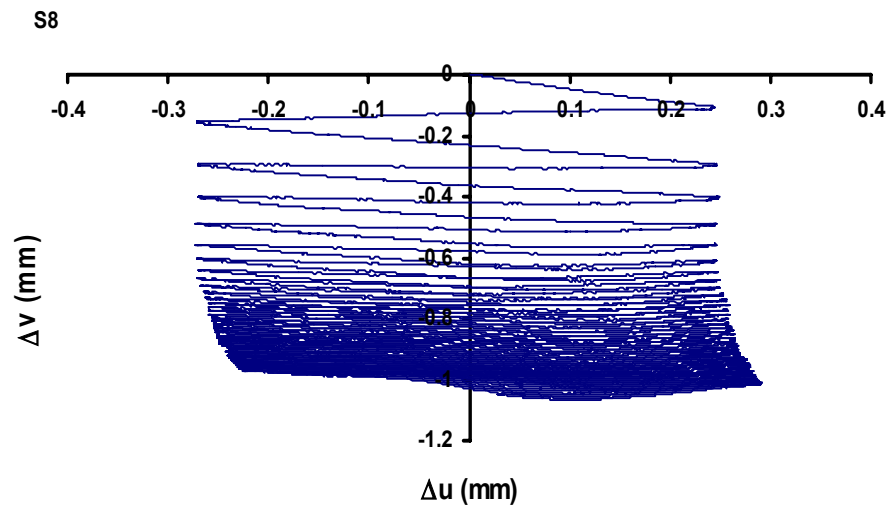
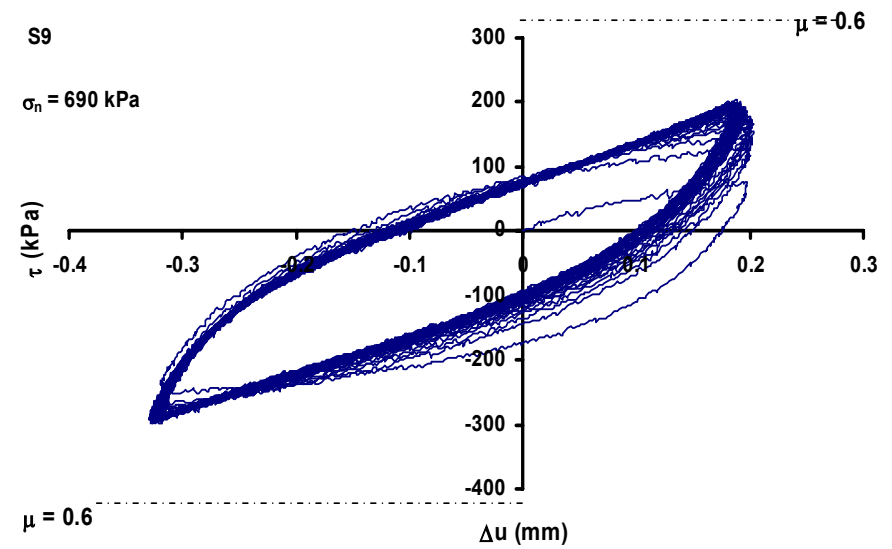
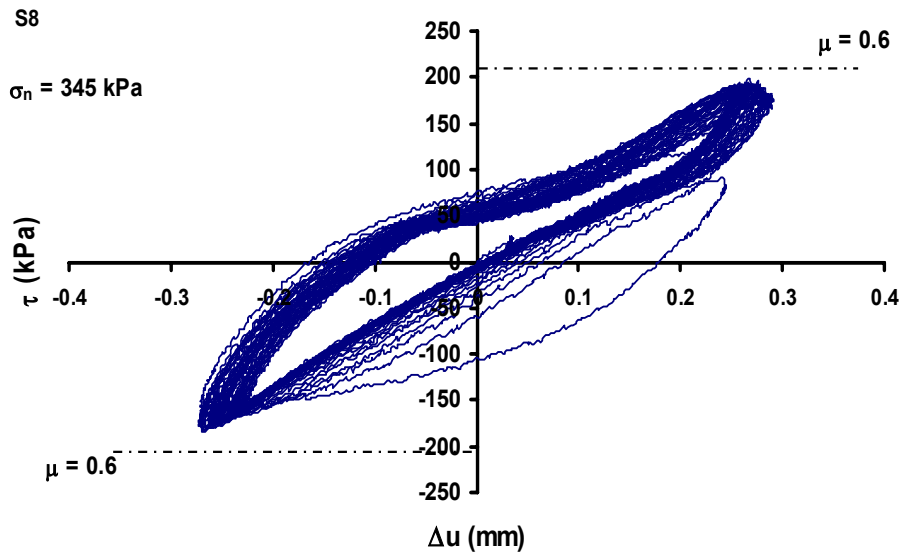
S6



S7₁



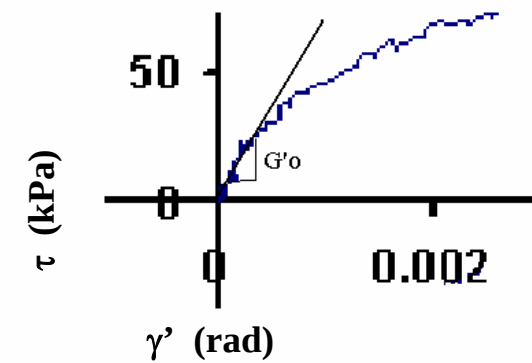
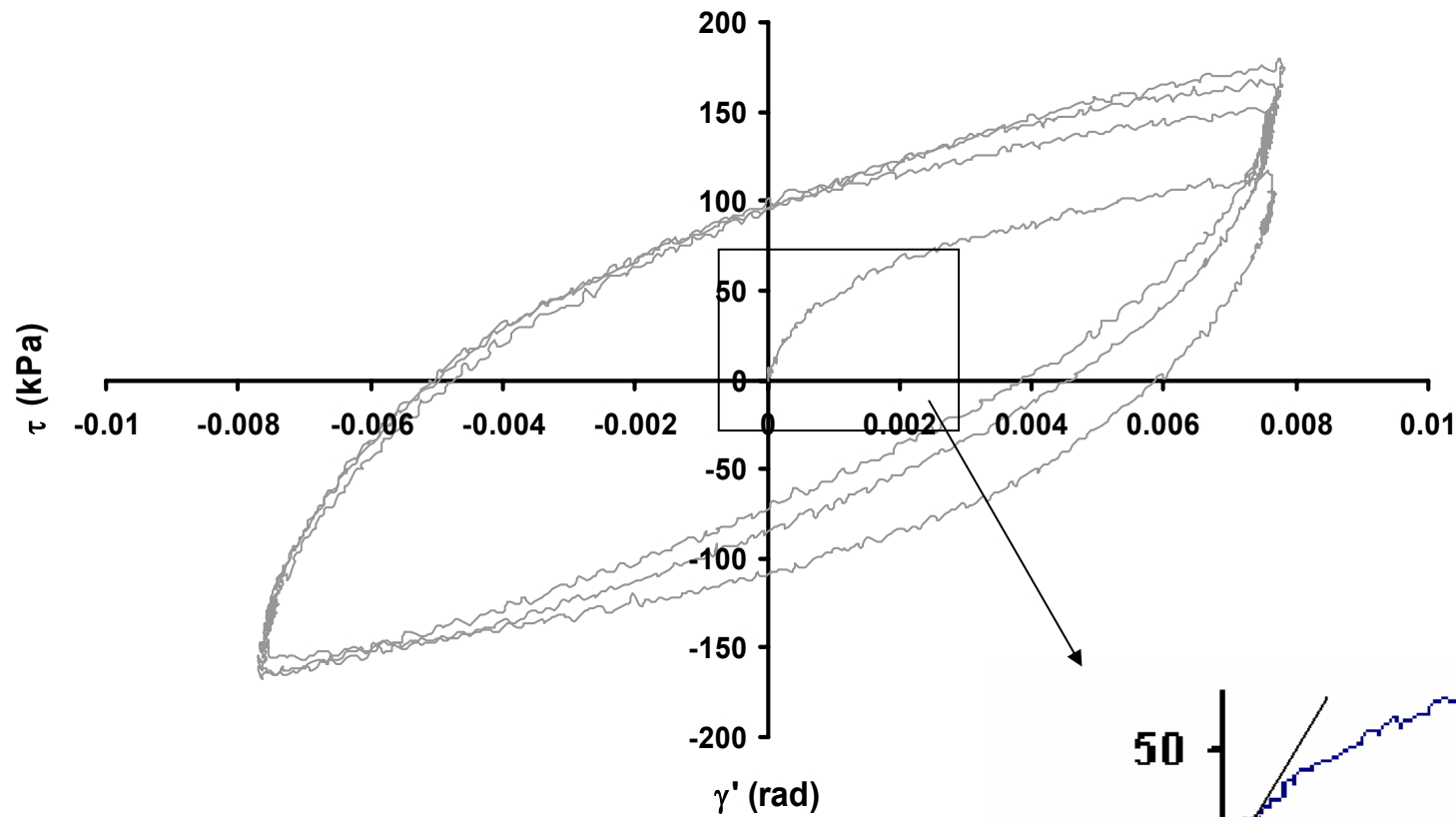
תרשים 30: עקומות מאמץ - תזוזה גזירה והתנהגות התפיחה בבדיקת גזירה מחזורית מונוטונית של קרקע מטיפוס SM תחת מאמץ נורמלי קבוע.



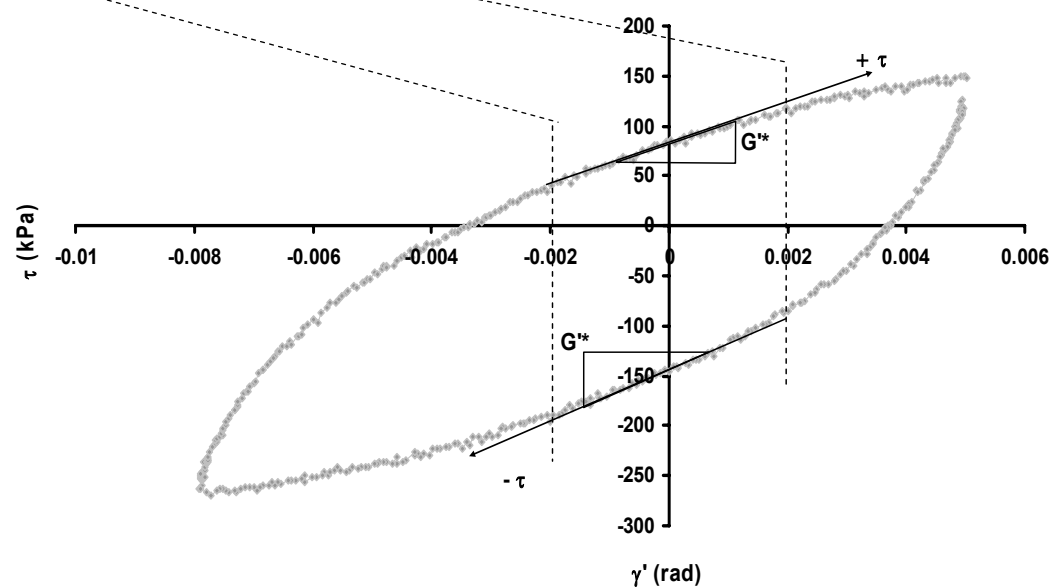
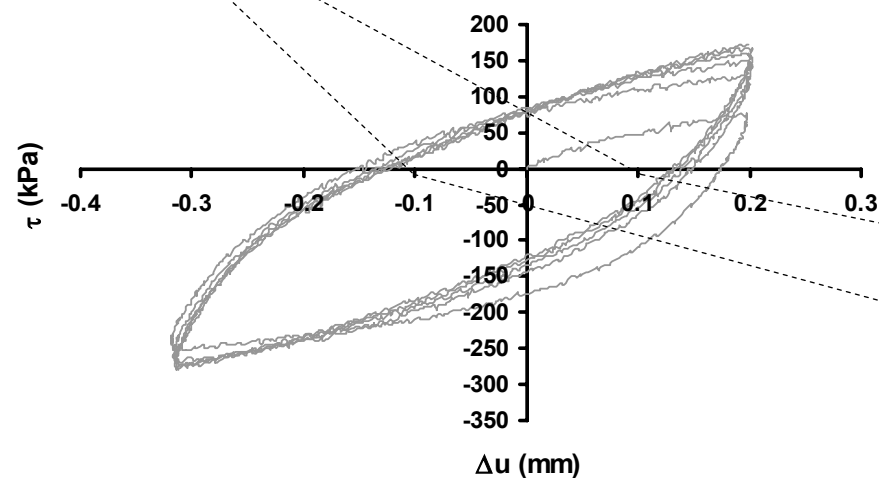
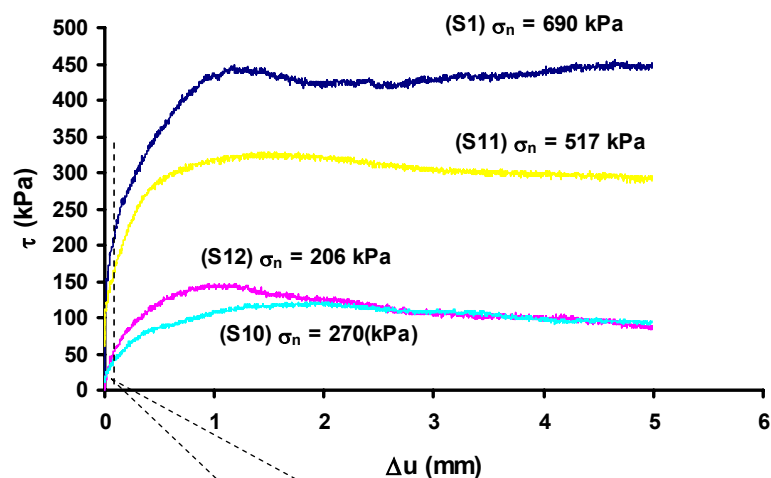
תרשים 31: עקומות מאמץ - תזוזה גזירה והתנהגות התפיחה בבדיקת גזירה מחזורית מונוטונית של קרקע מטיפוס SM תחת מאמץ נורמלי קבוע.

מודול גזירה של קרקע מטיפוס SM

G'_0 - מודול גזירה ראשוני

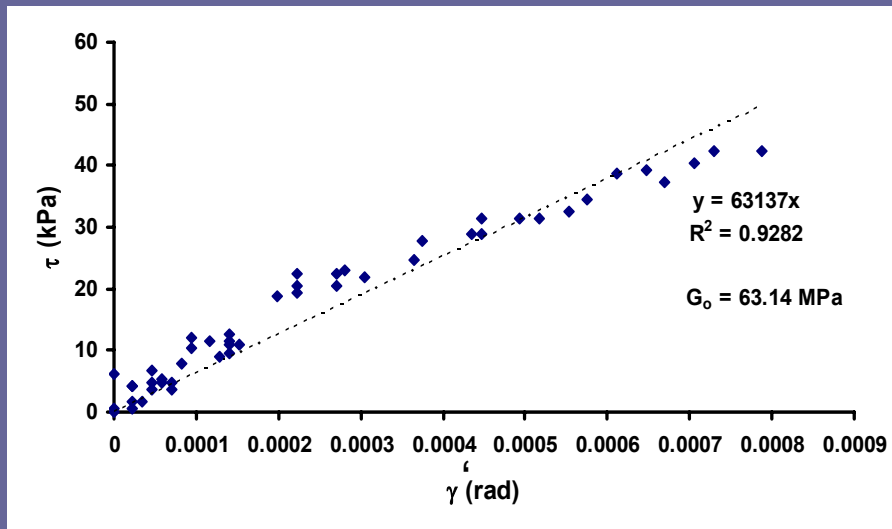
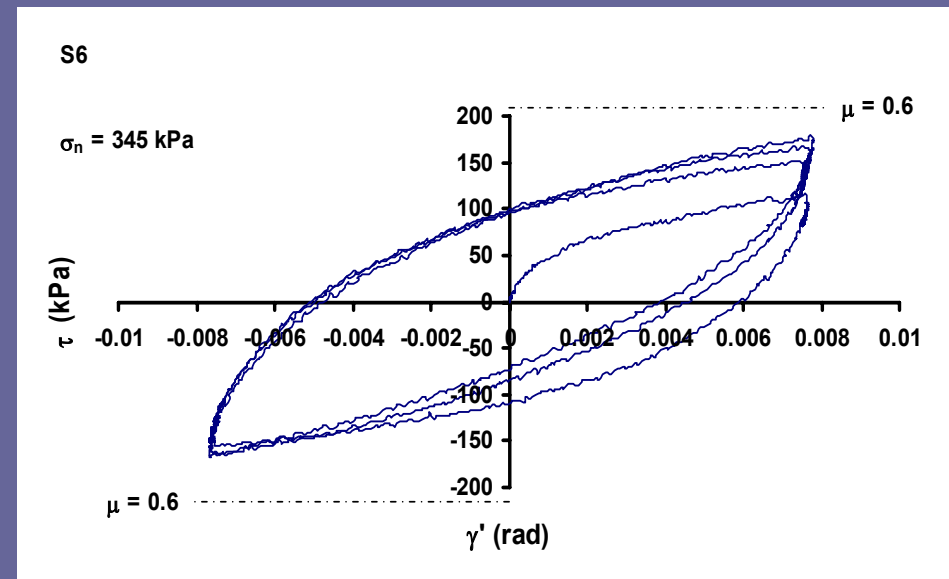
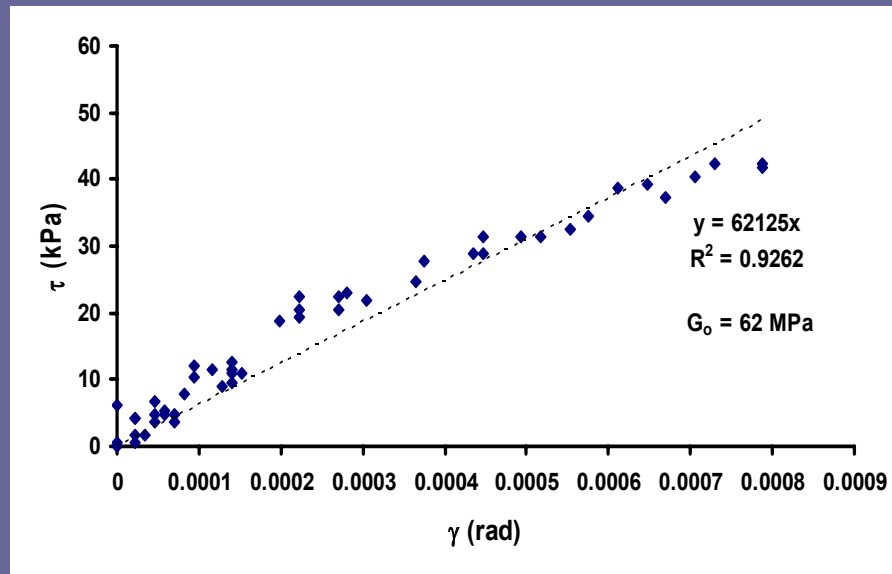


G^* - מודול גזירה מחזורי (אקוויוולנטי)



תרשים 32: תחום תזוזת הגזירה ומעוות הגזירה
בקטע לינארי אלסטי בבדיקות גזירה
מחזורית.

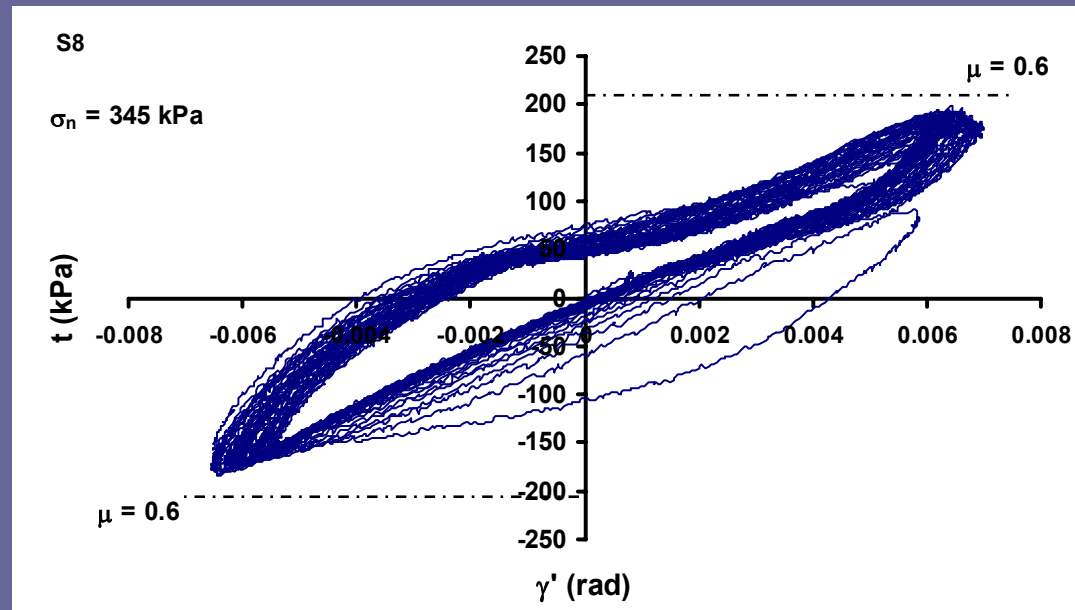
תוצאות



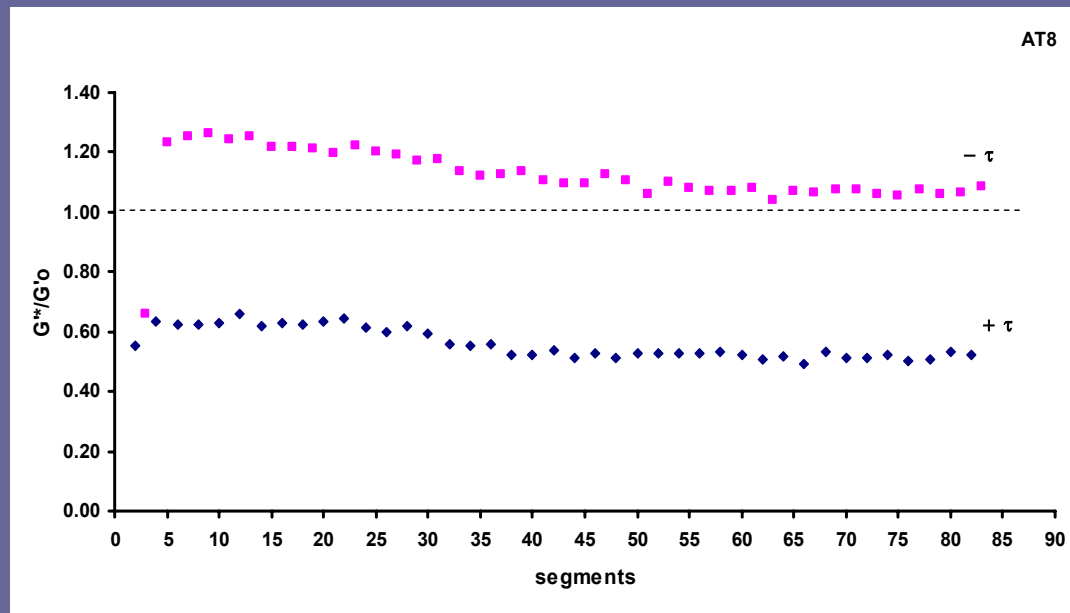
seg +	G^*	G^*/G_0	seg -	G^*	G^*/G_0	ללא תיקון
2	62.000	2.908	3	10.013	0.470	
4	12.073	0.566	5	15.443	0.724	
6	13.310	0.624	7	16.558	0.776	
8	15.010	0.704				
seg +	G''	G''/G'_0	seg -	G''	G''/G'_0	מתוקן
2	64.300	3.015	3	9.950	0.467	
4	11.956	0.561	5	15.244	0.715	
6	13.629	0.639	7	16.275	0.763	
8	14.724	0.690				

תרשים 34: מודול גזירה ראשוני של דגם S6 עבור סגמנט גזירה ראשון. למעלה: לא מתוקן (G_0) למטה: מתוקן (G'_0).

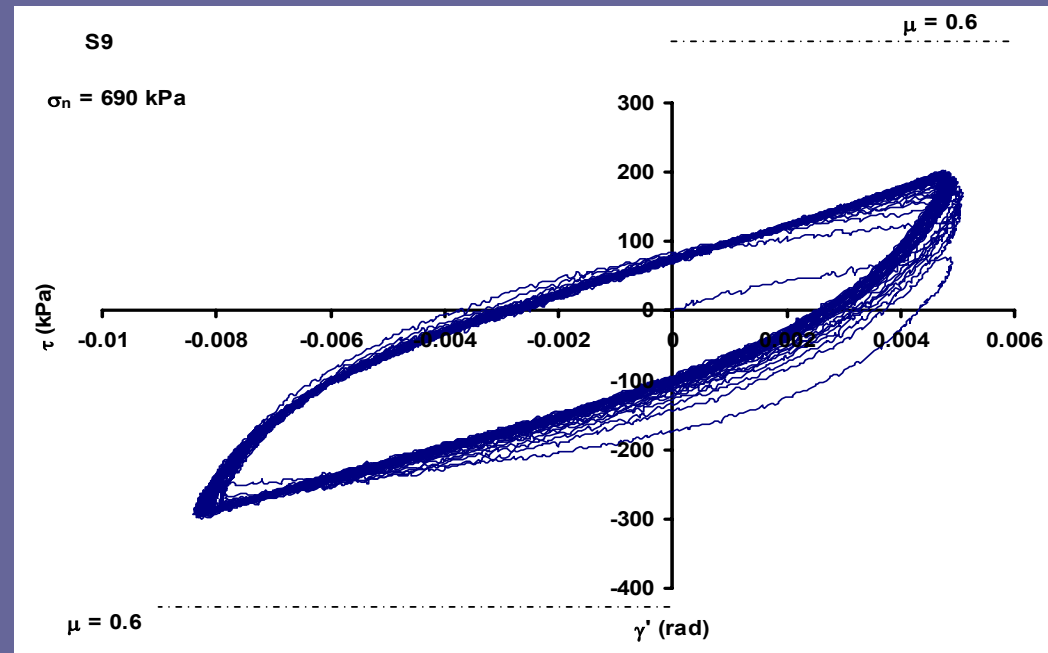
תרשים 33: עקומת מאמץ – מעוות בבדיקת גזירה מחזורית מונוטונית וטבלת ערכי מודול גזירה מנורמל בסגמנטים של גזירה מחזורית.



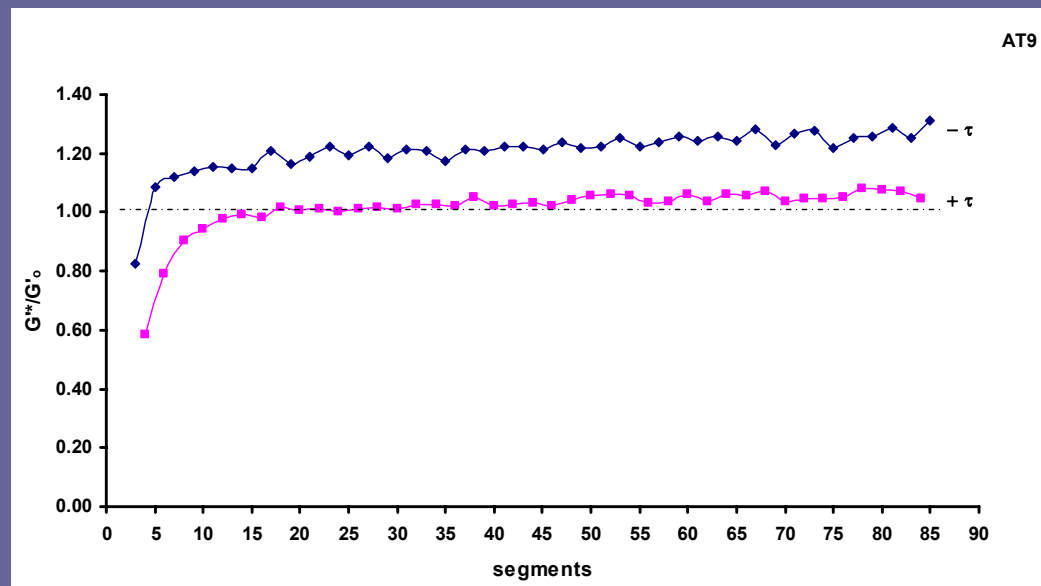
תרשים 35: עקומת מאמץ – מעוות בבדיקת גזירה מחזורית מונוטונית (40 מחזורי גזירה).



תרשים 36: השתנות מודול גזירה מנורמל ($G^*/G'0$) בסגמנטים של גזירה חיובית ושלילית.

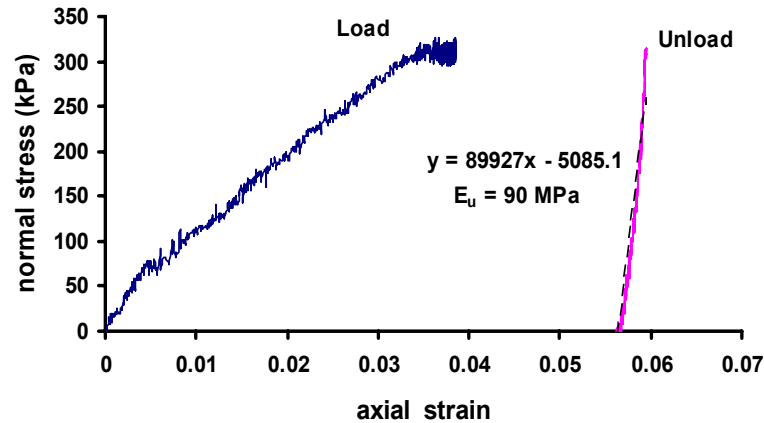


תרשים 37: עקומת מאמץ – מעוות בבדיקת גזירה מחזורית מונוטונית (40 מחזורי גזירה).



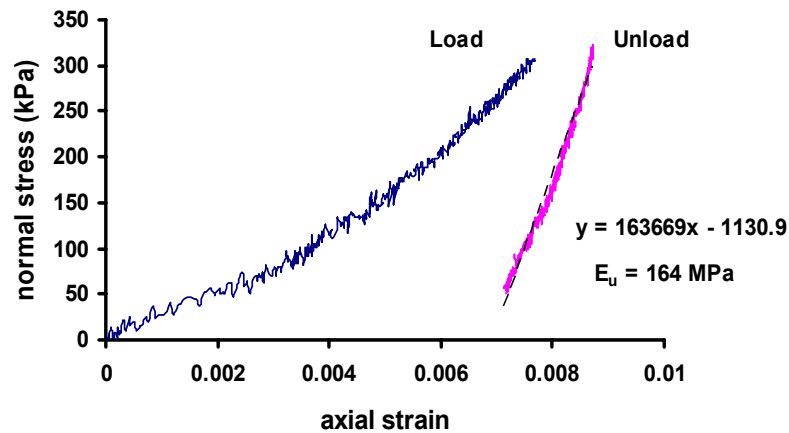
תרשים 38: השתנות מודול גזירה מנורמל (G^*/G'_o) בסגמנטים של גזירה חיובית ושלילית.

S6



תרשים 39: מודול אלסטיות* של קרקע מטיפוס SM מתוך סגמנט פריקה נורמלית, לאחר 3 מחזורי גזירה

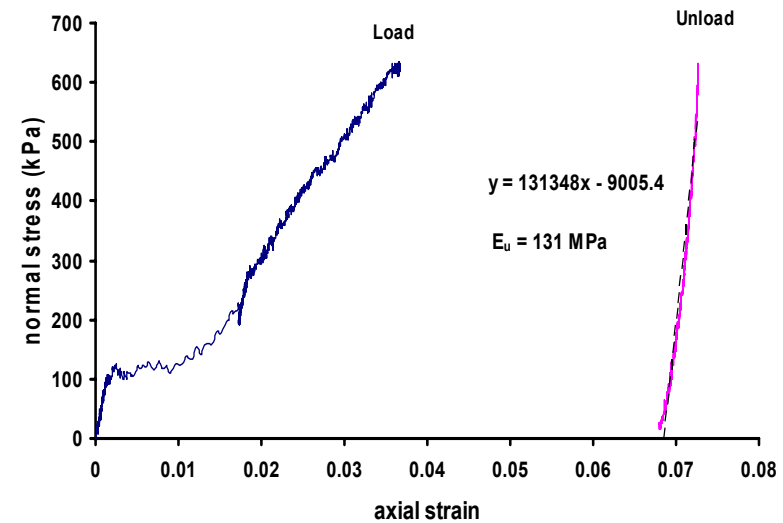
S8



תרשים 40: מודול אלסטיות* של קרקע מטיפוס SM מתוך סגמנט פריקה נורמלית, לאחר 40 מחזורי גזירה .

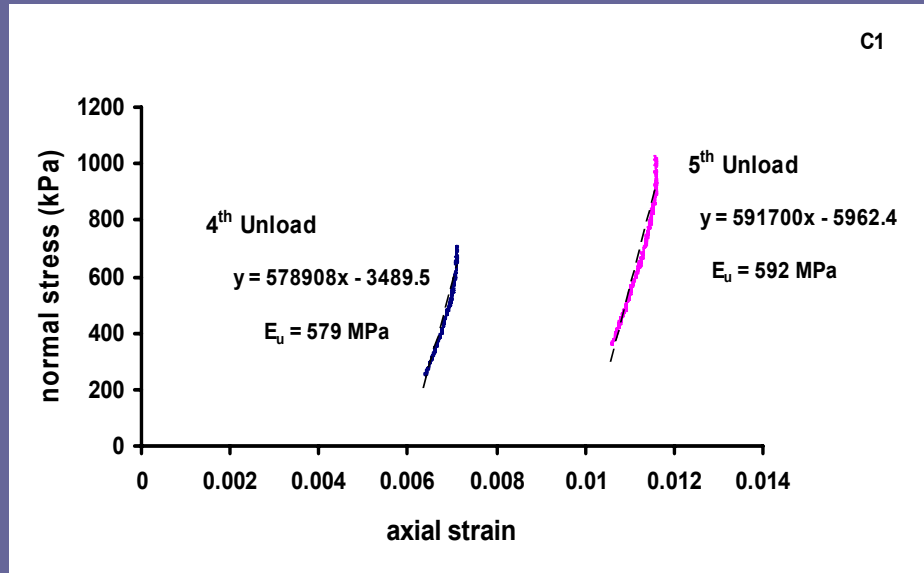
מודול יאנג (E) של הקרקע

S9

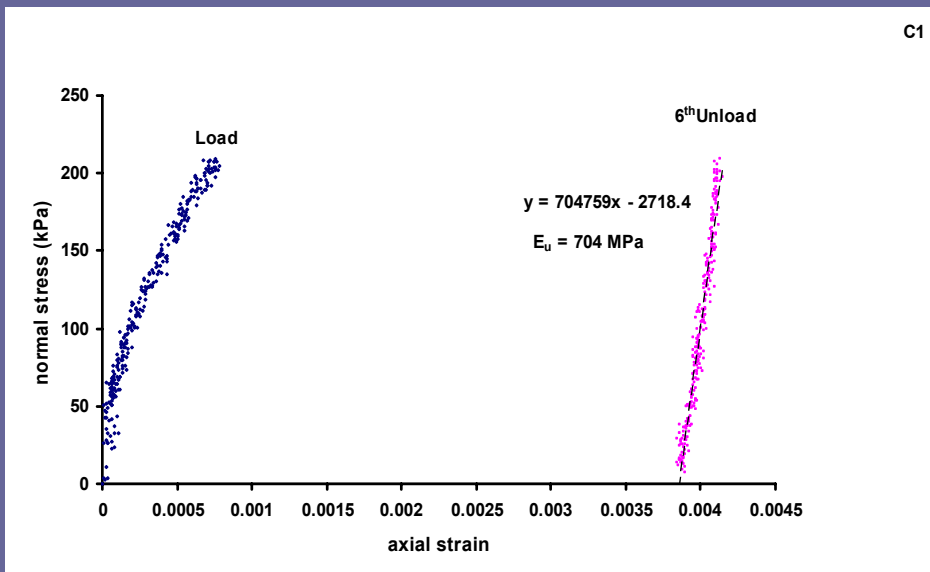


תרשים 41: מודול אלסטיות* של קרקע מטיפוס SM מתוך סגמנט פריקה נורמלית, לאחר 40 מחזורי גזירה .

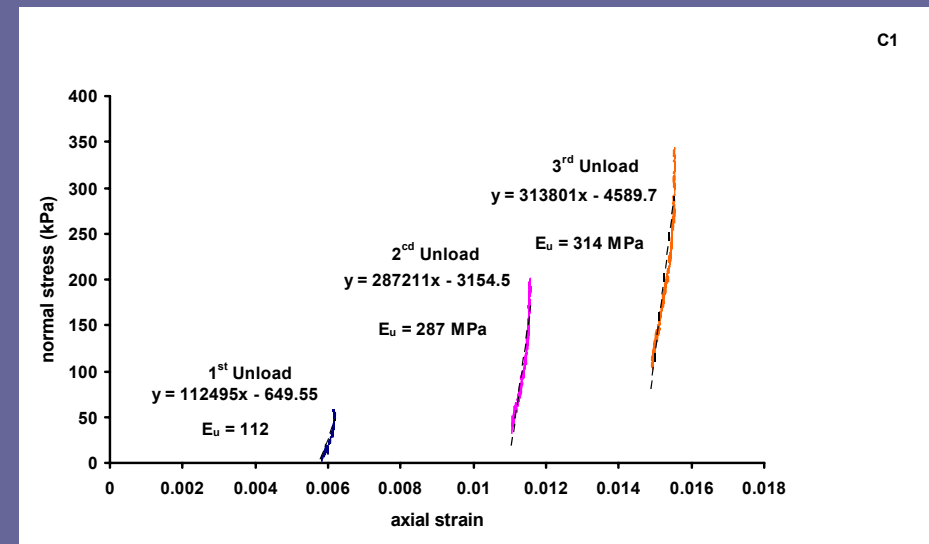
תוצאות



תרשים 43: מודול אלסטיות של דגם קרקע מטיפוס SC לאחר חמישה מחזורי לחיצה ופריקה נורמלית.

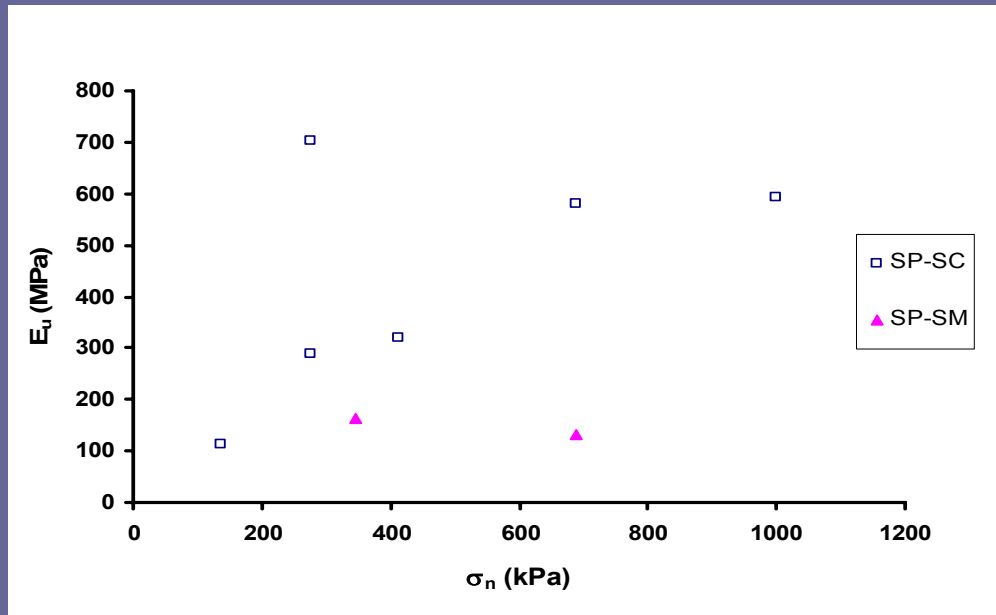


תרשים 44: מודול אלסטיות של דגם קרקע מטיפוס SC לאחר שישה מחזורי לחיצה ופריקה נורמלית



תרשים 42: מודול אלסטיות של דגם קרקע מטיפוס SC, לאחר שלושה מחזורי לחיצה ופריקה נורמלית

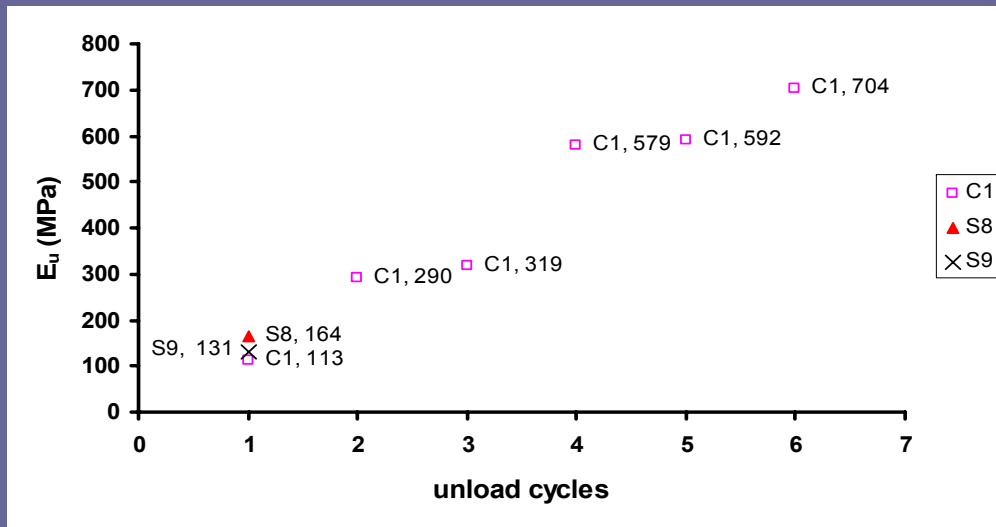
תוצאות



*תחת מאמצים נורמלים שונים מתקבלים ערכי מודול אלסטיות שונים עבור שני טיפוס הקרקע.

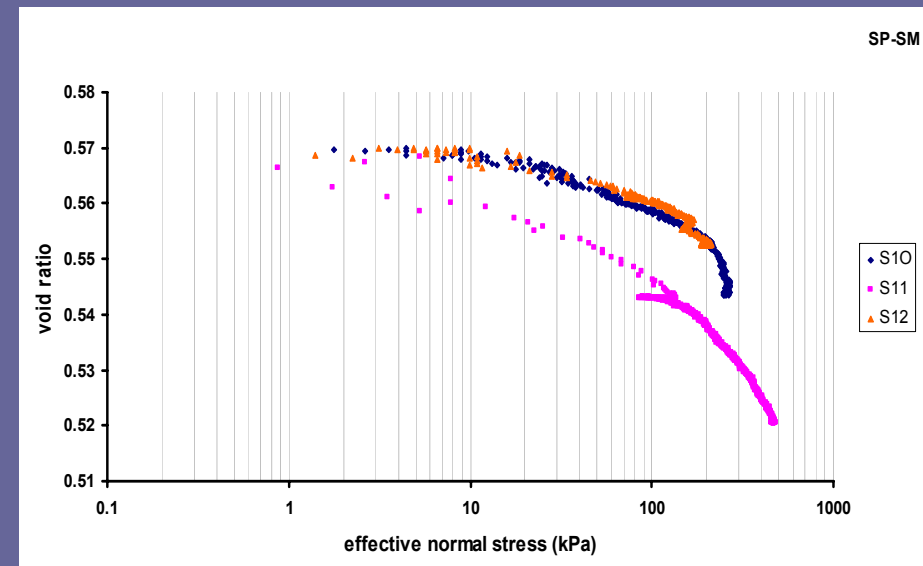
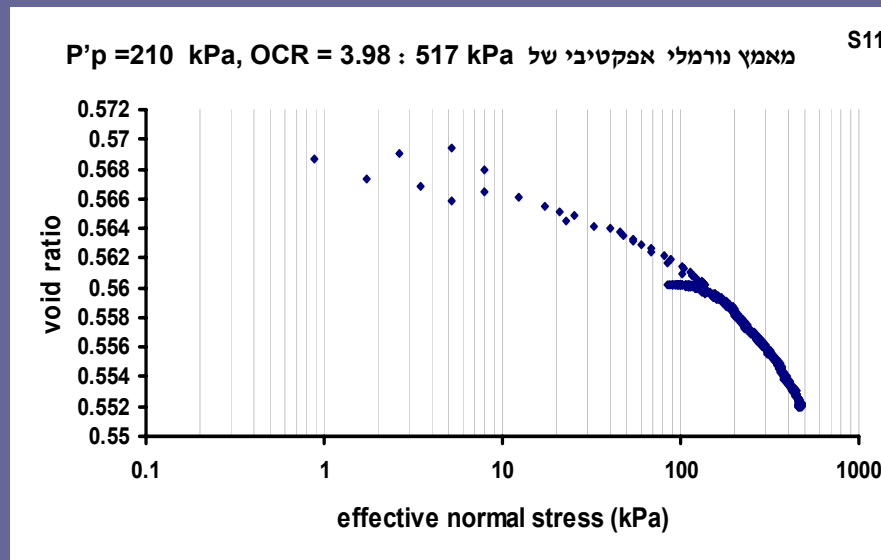
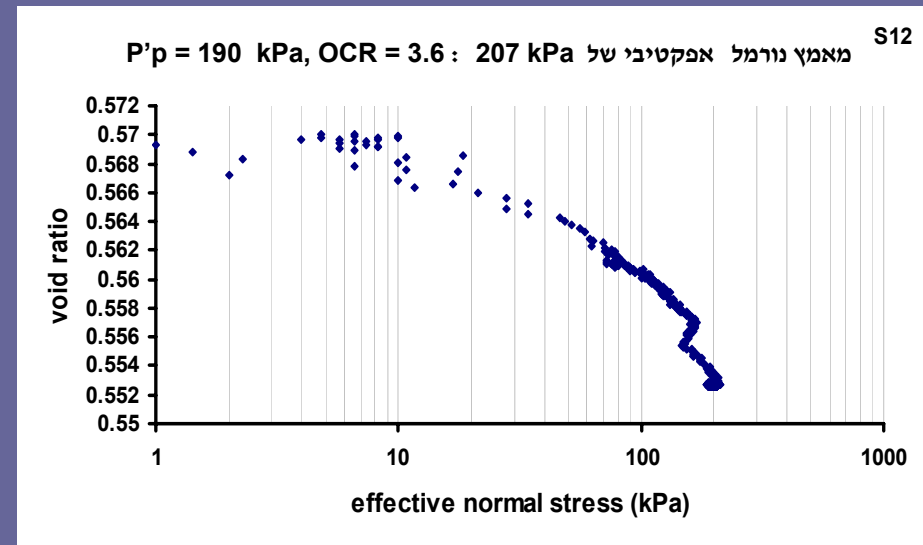
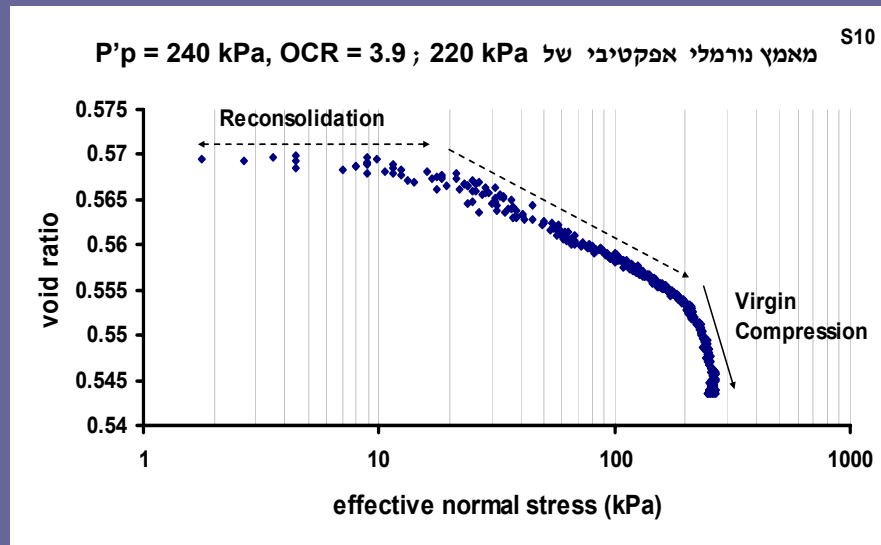
*העמסה חוזרת של דגם הקרקע מביאה לעלייה בערך מודול האלסטיות שלו עם העלייה במספר מחזורי העמסה נורמלית.

תרשים 45: פיזור ערכי מודול אלסטיות עבור שני טיפוס הקרקע תחת מאמצים נורמלים שונים.



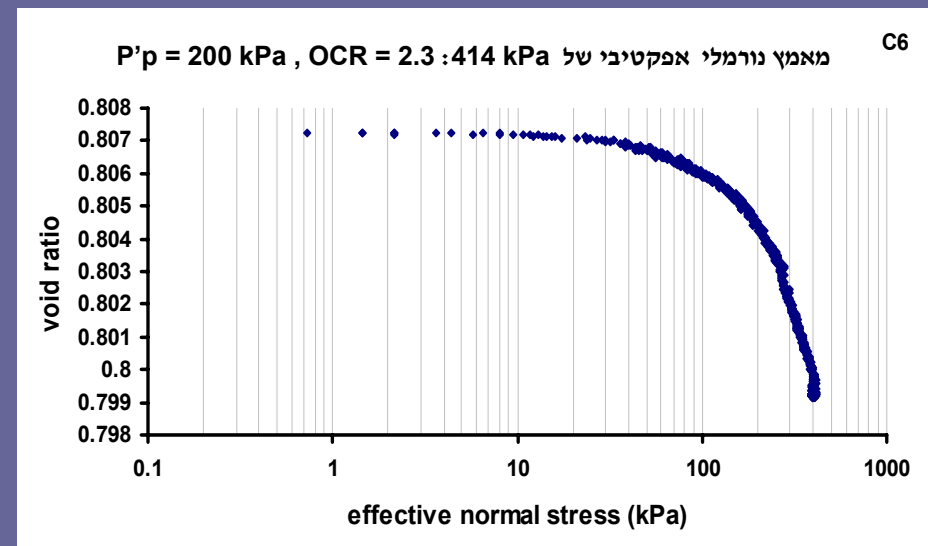
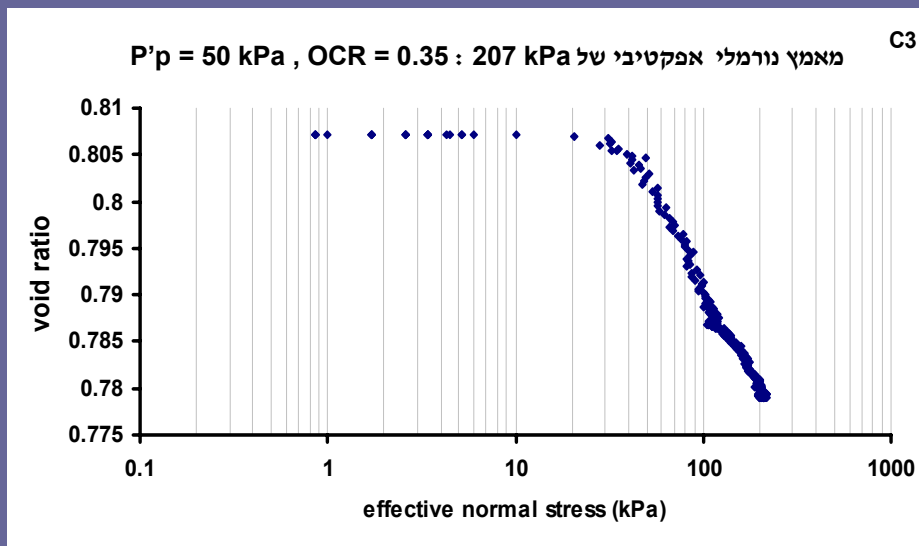
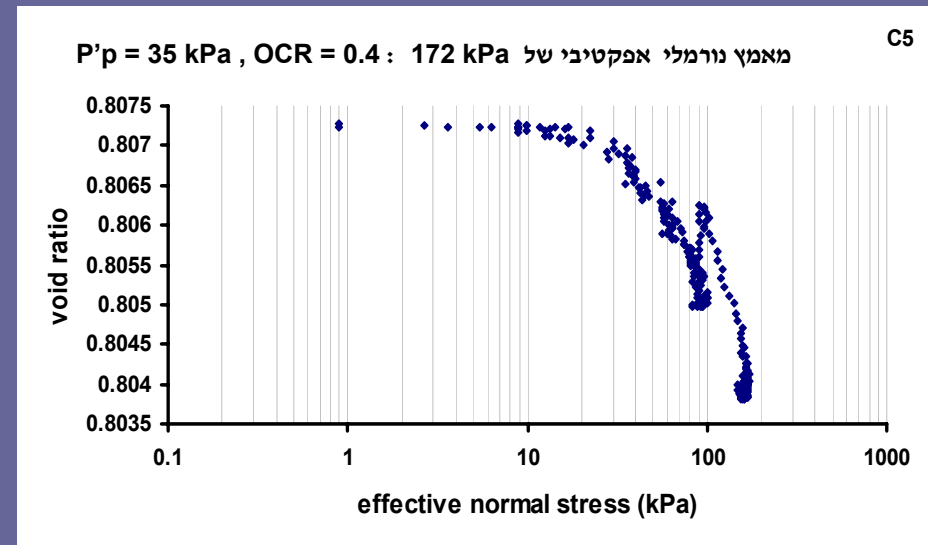
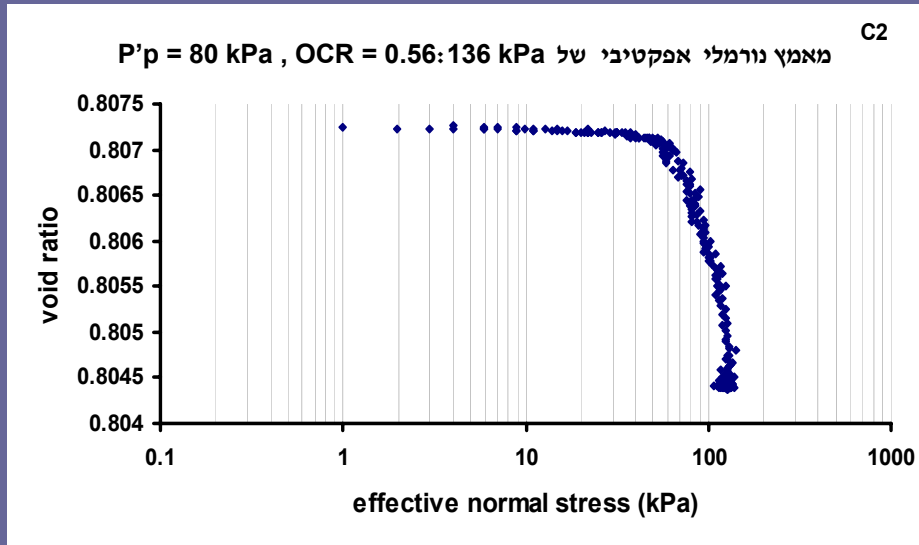
תרשים 46: השינוי בערכי מודול אלסטיות של דגמי הקרקע לאחר מספר מחזורי פריקה (Unload).

התנהגות קרקע מטיפוס SM תחת מאמצי לחיצה



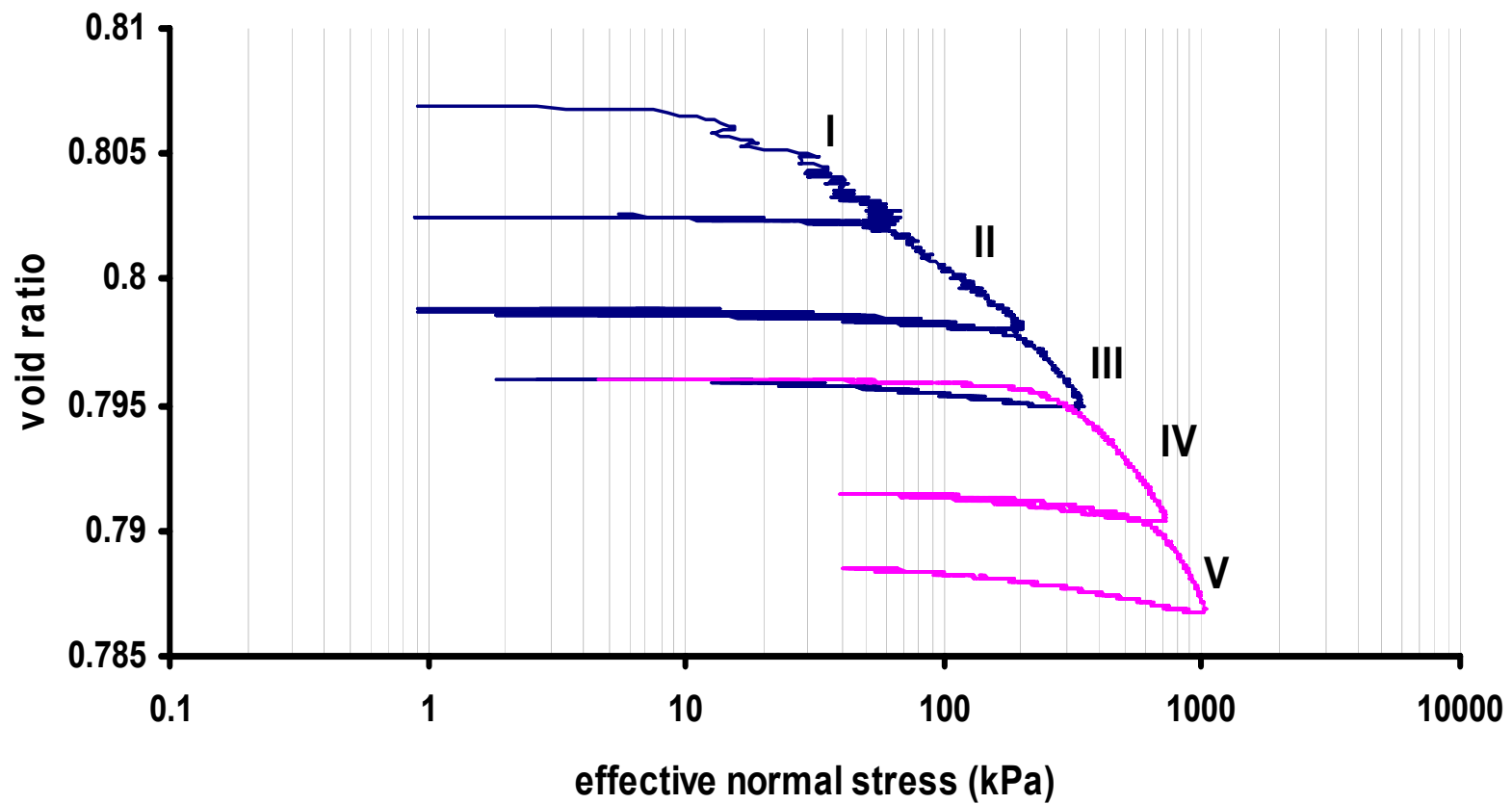
תרשים 47: עקומות דחיסה אופייניות לקרקע מטיפוס SM: השינוי במנת החללים תחת מאמצים נורמלים אפקטיביים משתנים.

התנהגות קרקע מטיפוס SC תחת מאמצי לחיצה



תרשים 48: עקומות דחיסה אופייניות לקרקע מטיפוס SC: השינוי במנת החללים תחת מאמצים נורמלים אפקטיביים משתנים.

C1



תרשים 49: עקומת דחיסה מחזורית של דגם קרקע מטיפוס 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.

**השוואה בין פרמטרים אלסטיים דינמיים
וסטטיים מבדיקות שדה ובדיקות מעבדה.**

Soil Type	Parameter	Dynamic			Static			
		Seismic wave velocity			PMT (pressuremeter)			Lab (shear load frame)
		L ₁	L ₂	L ₃	B ₂	B ₃	B ₅	
SP-SM	v	0.32	-----	0.23	0.33	0.33	0.33	-----
	E (MPa)	513	-----	848- 935	72.6	28	61.5	90 - 164
	G (MPa)	194- 173	-----	334- 380	27.3	10.5	23	21 – 64
SP-SC	v	-----	0.19	-----	0.33	0.33	0.33	-----
	E (MPa)	-----	707- 776	-----	48.2	93.4	110	113
	G (MPa)	-----	297- 326	-----	18.1	35	41.6	-----

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

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

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

סיכום ומסקנות

במחקר זה נלמדו התכונות וההתנהגות המכנית של שני טיפוסי קרקע שנמצאו בחתך של אזור המחקר בכרם שלום – אמיתי באמצעות בדיקות שדה ובדיקות מעבדה .

בבדיקות אלו אופיינה ההתנהגות המכנית של הקרקע תחת מאמצי לחיצה, גזירה וגזירה מחזורית מונוטונית.

כמו כן אופיינו הפרמטרים האלסטיים הדינמיים והסטטיים של שני טיפוסי הקרקע הנחקרים ונערכה השוואה בין תוצאות הבדיקות השונות.

להלן המסקנות העולות ממחקר זה :

מסקנות:

1. חתך הקרקע באזור המחקר (עד לעומק של 20 מ') בנוי משכבות של חול סילטי (SM), חול חרסיתי המכיל תלכידי 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, 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. קיים הבדל של סדר גודל בין הפרמטרים האלסטיים הדינמיים והפרמטרים האלסטיים הסטטיים (ע"פ טבלה).
5. הקרקע מטיפוס SM לא נוטה לפתח דגרדציה של מודול הגזירה תחת גזירה מחזורית בתנאים מנוקזים כל עוד יחס המאמצים המחזורי (τ/σ_h) קטן ממקדם החיכוך של קרקע זו (0.6).

A photograph of a field of yellow flowers, possibly corn marigolds, with a dense forest in the background. The text is overlaid on the left side of the image.

למנחה העבודה פרופ' יוסי חצור

איליה ווינשטיין

רוני קמאי – לוי

שלומי מנור

לחבר השופטים על השיפוט וההקשבה...

תודות !