



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

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

שלומי מנור , יוסי חצור, ויאצ'סלאב פלצ'יק

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

תודות:

- דר' ירון קציר – פטרוגרפיה
- דר' ולדימיר פריד – מדידת מהירויות

מוטיבציה

♦ התכונות המכניות של סלע מכתיבות את תגובת הסלע לשינויים בשדה הלחץ, הטמפרטורה, הרטיבות, וכדומה.

♦ מרבית המודלים במכניקת הסלע מתעלמים מהמרכיב המיקרוטקסטורלי בחיזוי ההתנהגות המכנית של סלעים.

♦ המיקרוטקסטורה מהווה תכונה מובהקת של הסלע ומאפיינת את מבנהו הפנימי ואת היחסים בין מרכיביו השונים.

♦ מחקרים שנעשו בשנים האחרונות מצאו כי המיקרוטקסטורה של סלע הינה הגורם השולט והמשפיע בצורה הדומיננטית ביותר על חוזקו המכני (Hatzor et al., 1997; Ersoy & Waller, 1995; Prikryl, 2001).

הנחת עבודה:

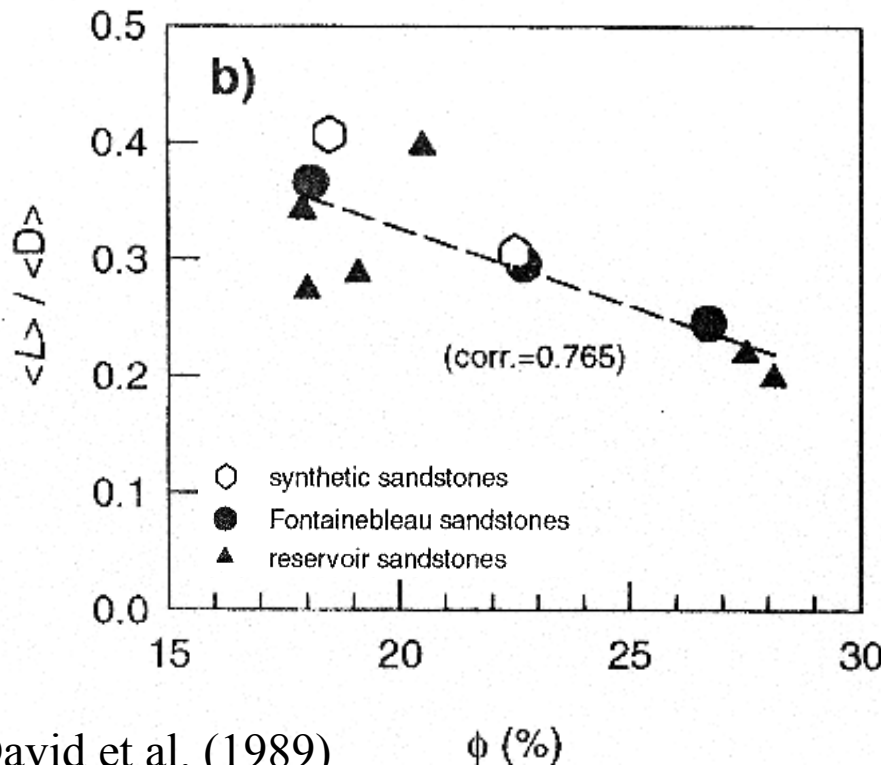
❖ אורך המגעים בין גבולות הגרמים מהווה ביטוי לתכונות מיקרוטקסטורליות אחרות ולכן ניתן להשתמש בערך זה לניסוח פרמטר "מגע" ובאמצעותו לחזות התנהגות מכנית של הסלע.

רקע תיאוריטי

גבולות הגרגר מהווים מסלול מועדף להתקדמות סדקים, כאשר נקודות המגע בין הגרגרים מהוות מכשול עבור התקדמות הכשל (Van de Steen et al., 2002).

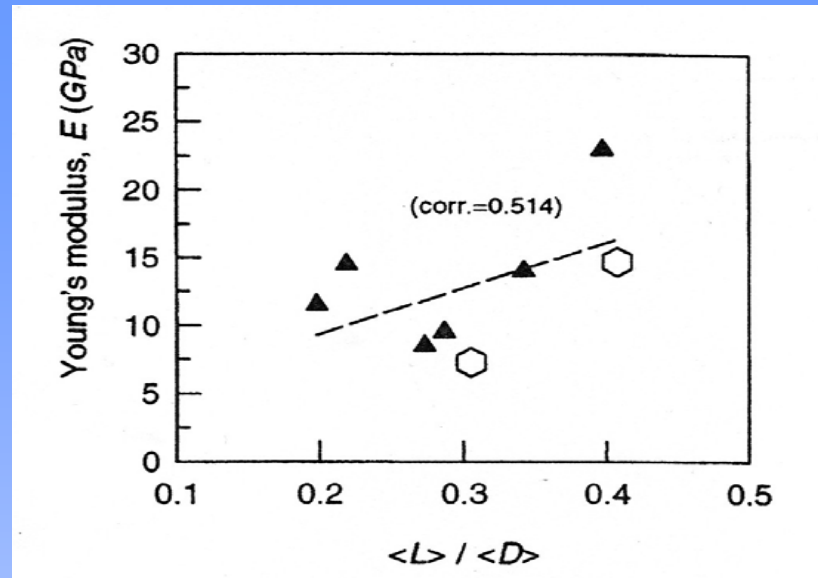
ירידה בנקבוביות עם העליה באורך המגעים (David et al., 1989).

ריכוז המאמצים בנקודות המגע שבין הגרגרים קטן עם העלייה ביחס L/D , מה שמאפשר לסלע לשאת יותר עומס.



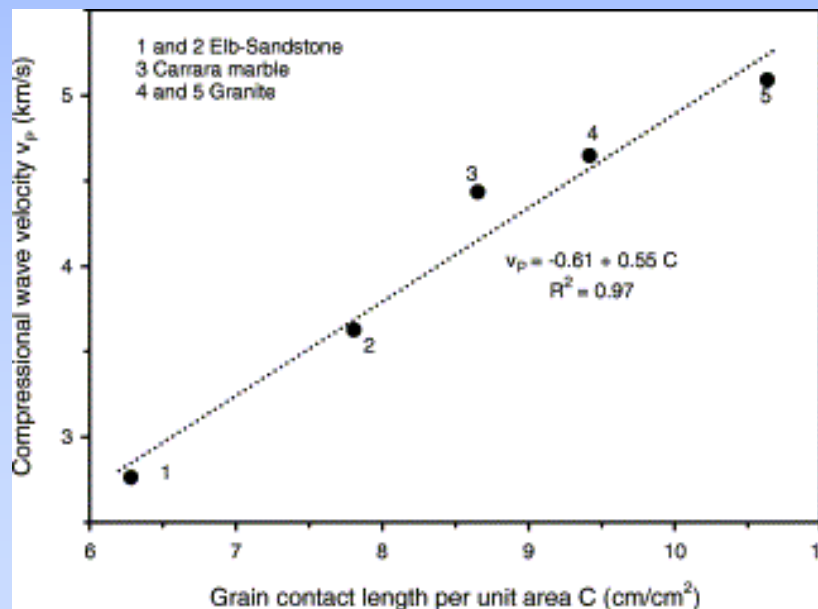
David et al. (1989)

רקע תיאוריטי



David et al. (1989)

מגמת עליה בקשיחות
הסלע עם העליה באורך
המגעים.
(David et al., 1989)

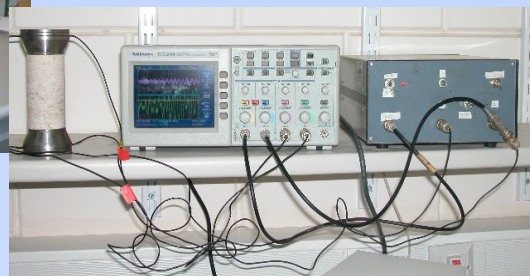


Alber & Brardt (2003)

יחס ליניארי חיובי בין
מהירות גלי P לאורך
המגעים.
(Alber & Brardt, 2003)

שיטות מחקר

השיטה באמצעותה בחנו את השפעת אורך המגעים בין הגרגרים על חוזק הסלע היא ע"י מדידת אורך ורציפות המגעים בסלעי חול וגיר, נירמולם (ביחס לגודל הגרגר) והשוואתם לחוזק הלחיצה החד-צירי ולמקדם האלסטיות של הסלעים.



◆ דוגמאות הומוגניות ואיזוטרפיות -

Indiana limestone ו- Berea sandstone

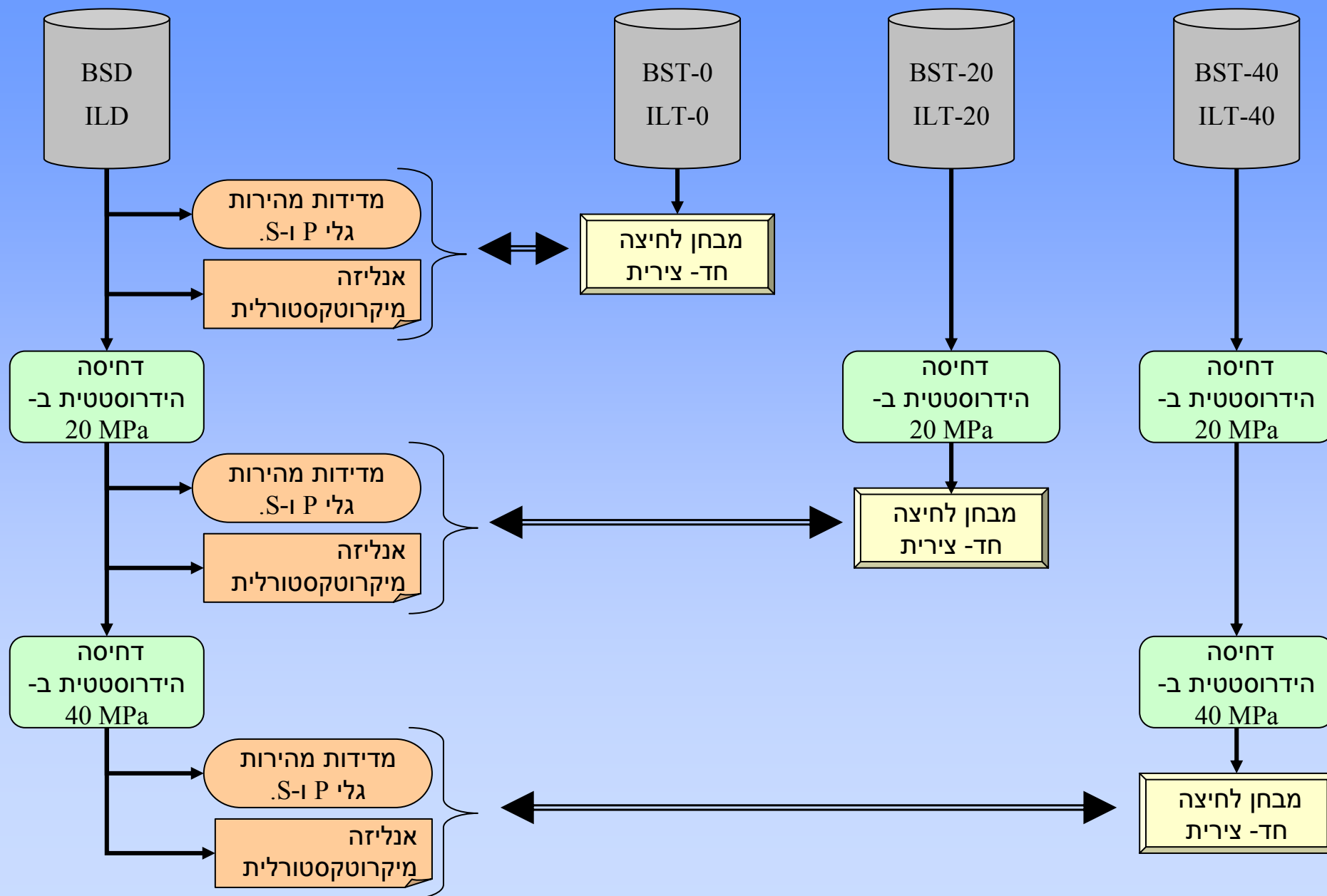
◆ דחיסות הידרוסטטיות

◆ אנליזות מיקרו-טקסטורליות

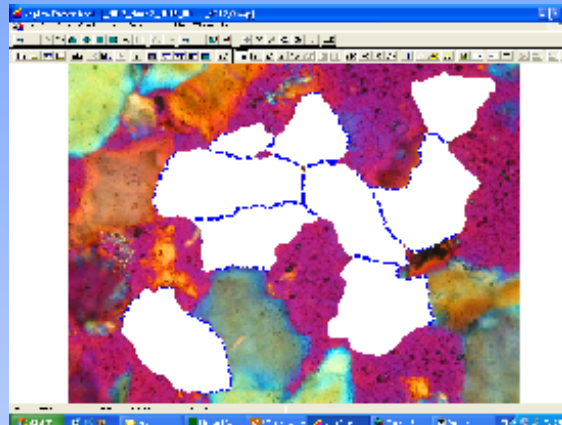
◆ מדידות אולטרסוניות

◆ מבחני לחיצה חד-צירית

שיטת העבודה



אנליזות מיקרו-טקסטורליות



מדידת פרמטרים
מיקרוטקסטורליים
באמצעות
GIS
(Geographical
Information System)



צילומים

צילום שקפים
ממיקרוסקופ

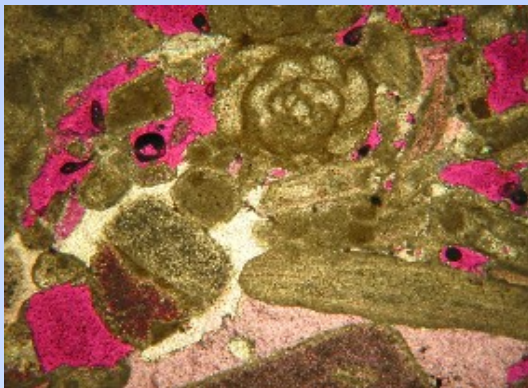
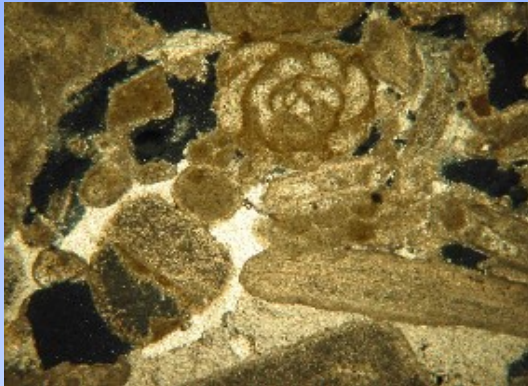
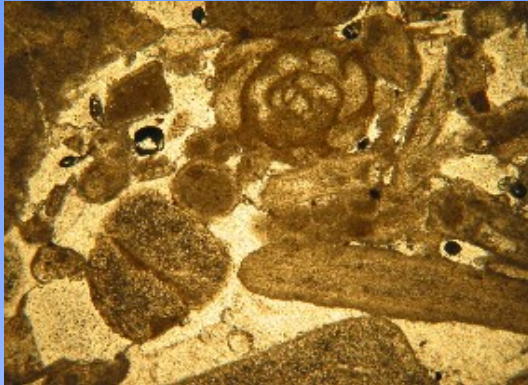
שקפים



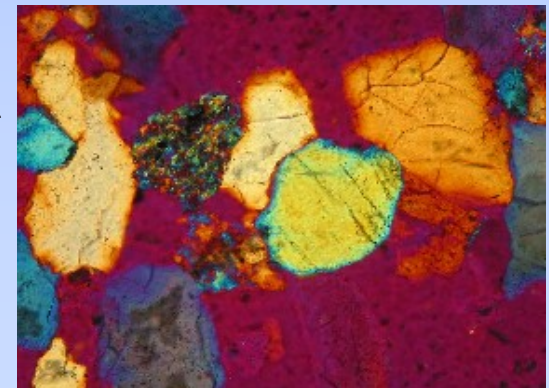
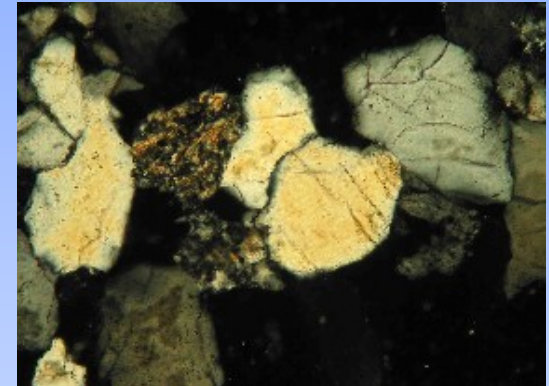
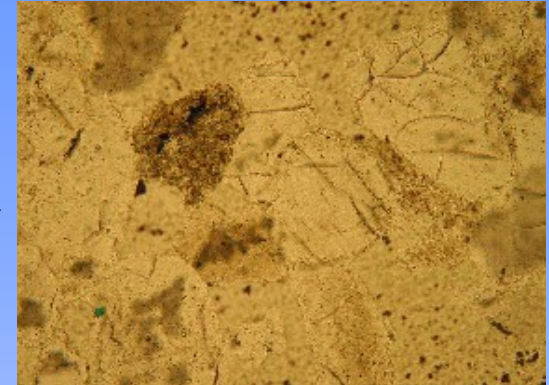
דוגמת דמה
(ILD או BSD)

אנליזות מיקרו-טקסטורליות

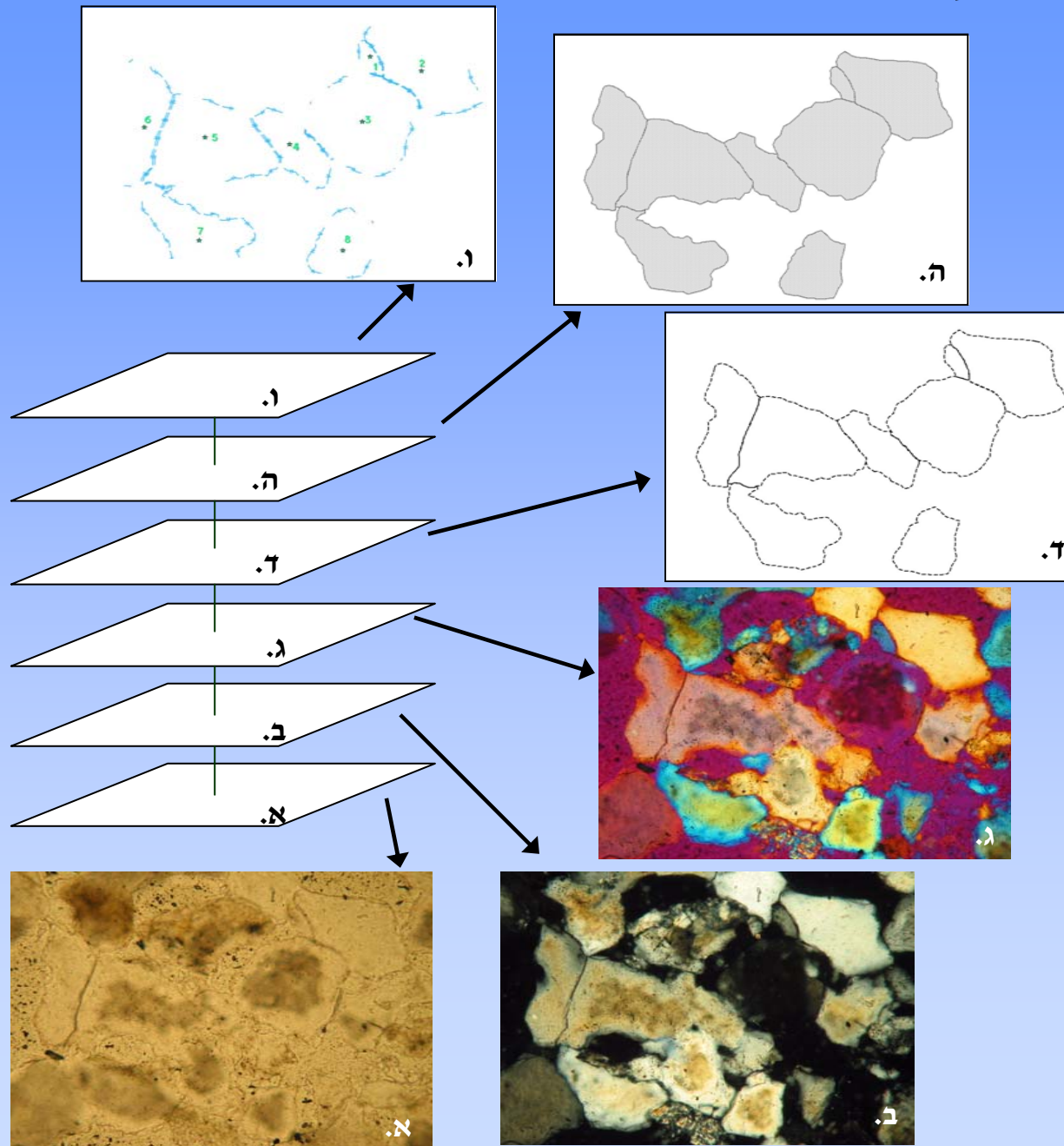
Indiana limestone



Berea sandstone



אופן העבודה עם מערכת ה-GIS:



א. שכבת צילום שקף
עם ניקולים
פתוחים.

ב. שכבת צילום שקף
עם ניקולים
סגורים.

ג. שכבת צילום שקף
עם ניקולים
סגורים ופלטת
קוורץ.

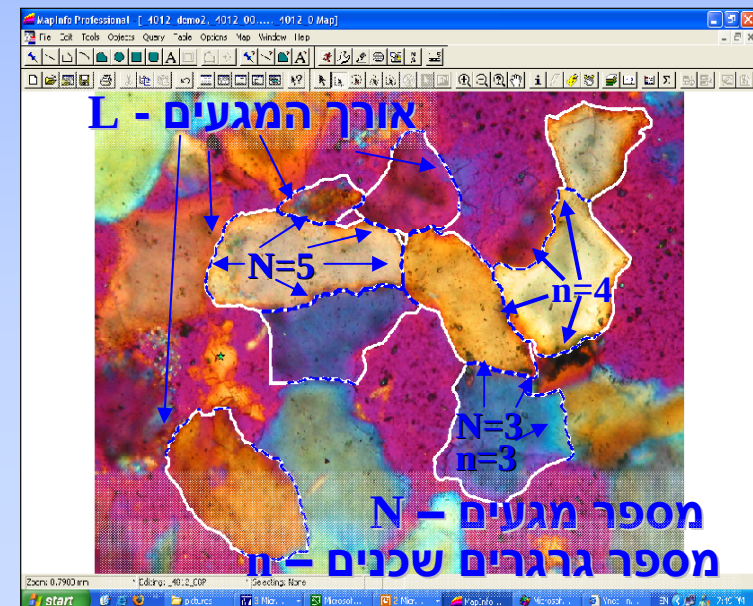
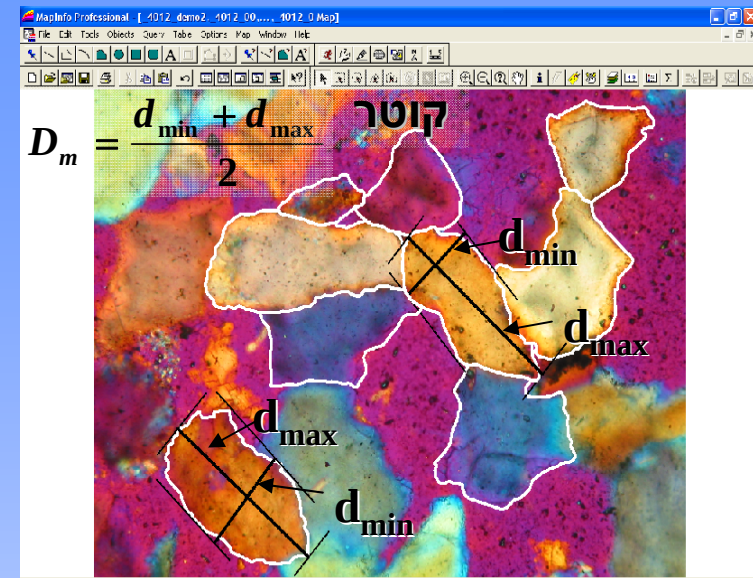
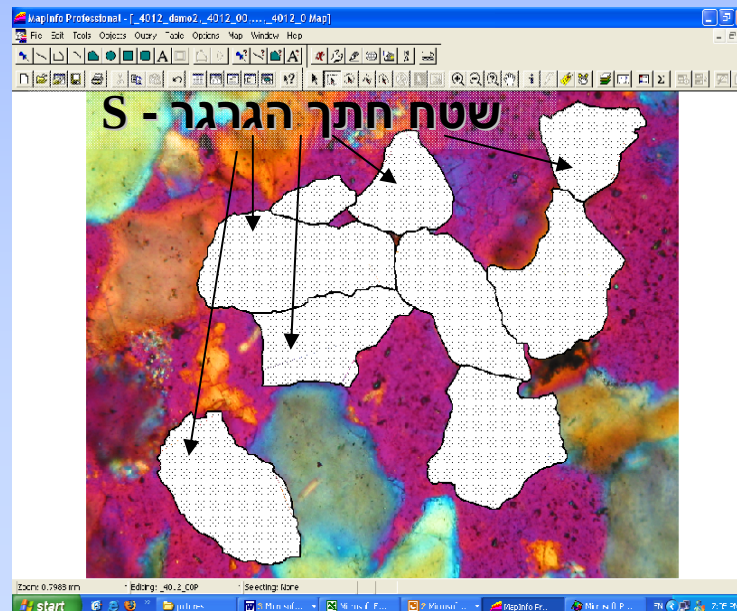
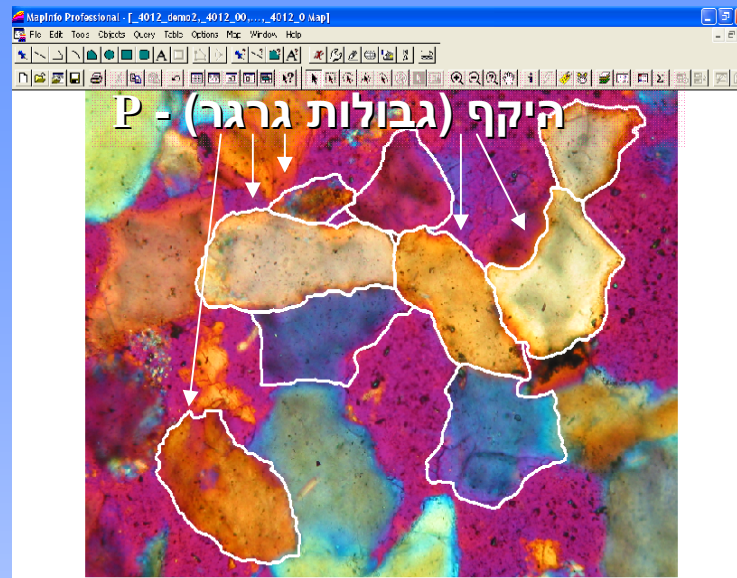
ד. שכבת היקף
והגדרת גבולות
הגרגר.

ה. שכבת שטח חתך
הגרגר.

ו. שכבת המגעים
בין הגרגרים.

שיטות מחקר

אופן מדידת הפרמטרים המיקרו-טקסטורליים:



סה"כ הפרמטרים שנמדדו:

◆ גודל גרגר:

◆ היקף (P).

◆ קוטר (D_m).

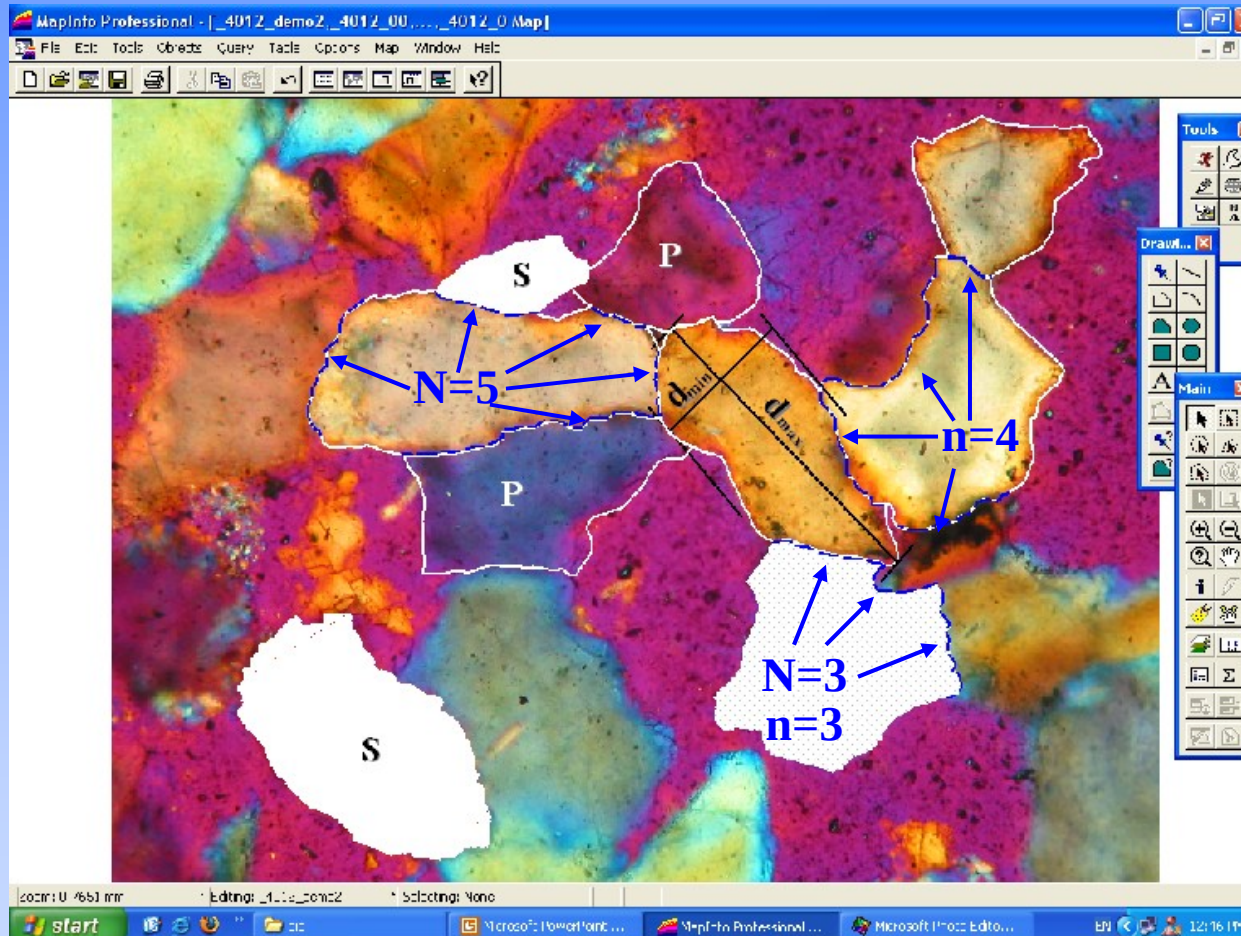
◆ שטח (S).

◆ אורך המגעים בין גרגרים (L).

◆ רציפות המגעים

◆ מספר מגעים (N).

◆ מספר גרגרים שונים לגרגר (n).



תוצאות

השפעת הלחץ ההידרוסטטי על הדוגמאות:

◆ שינויים מיקרו-טקסטורליים.

◆ שינויים בנקבוביות וצפיפות המדגמים.

◆ שינויים במהירות גלי P ו-S.

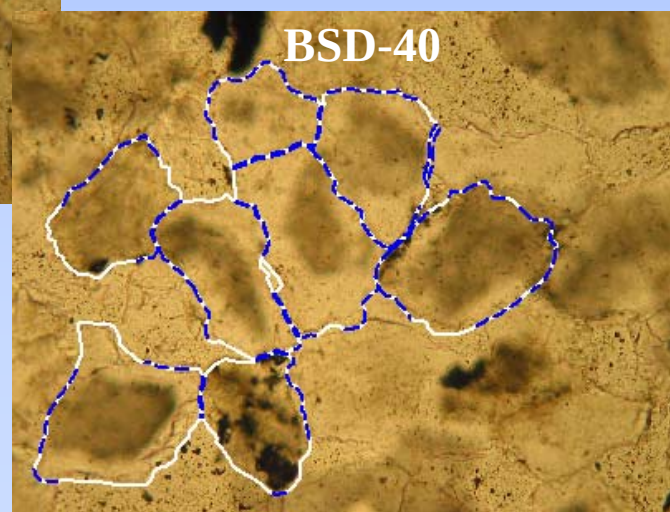
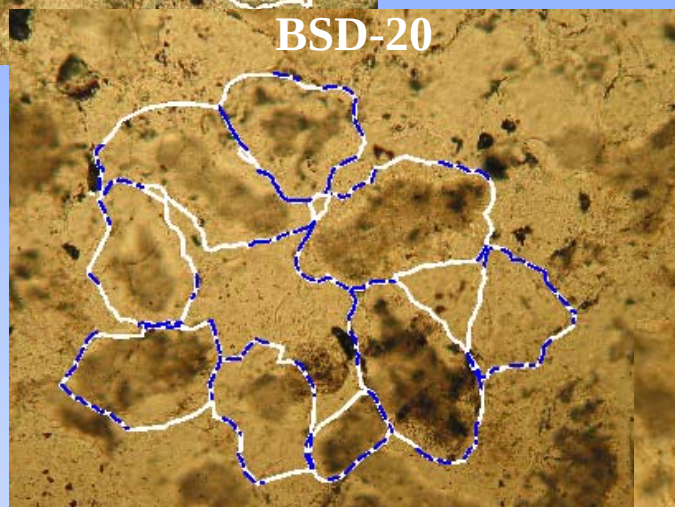
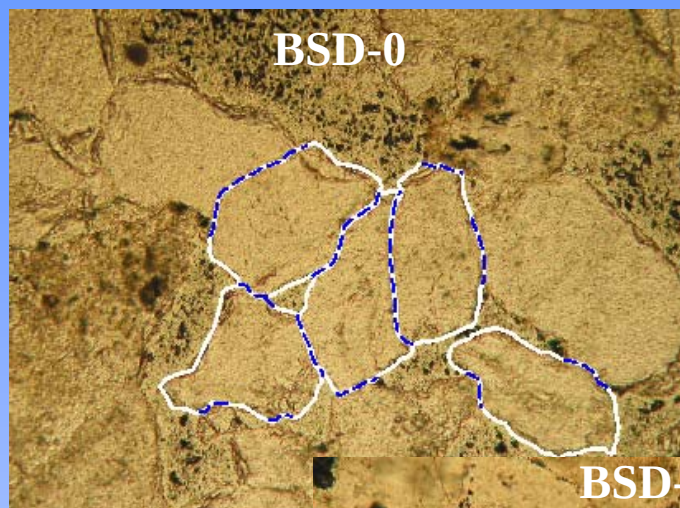
◆ שינויים בחוזק הלחיצה החד-צירי
ובקשיחות (E).



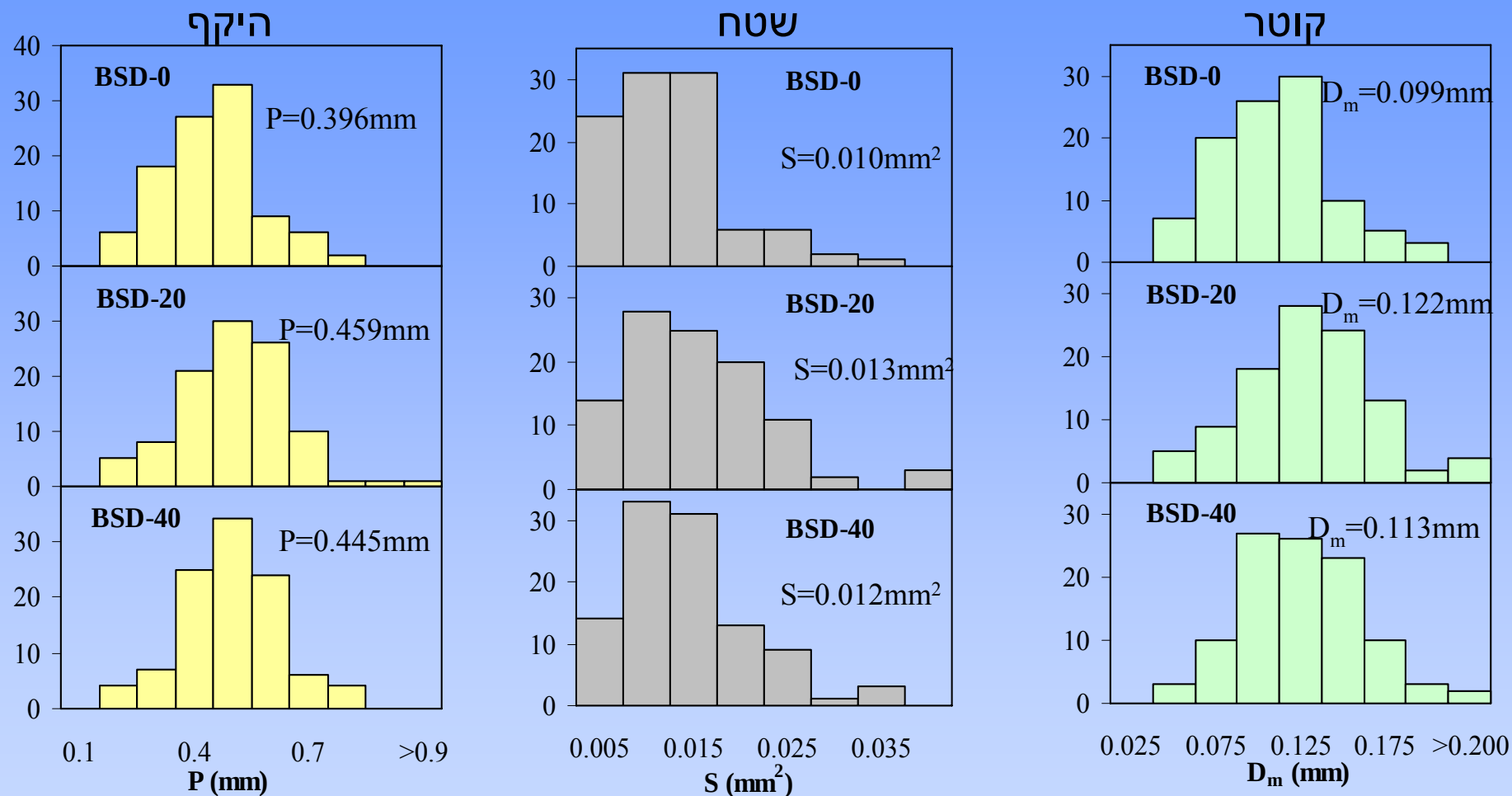
השפעת הלחץ ההידרוסטטי על דוגמאות ה-

:Berea sandstone

שינויים מיקרו-טקסטורליים:

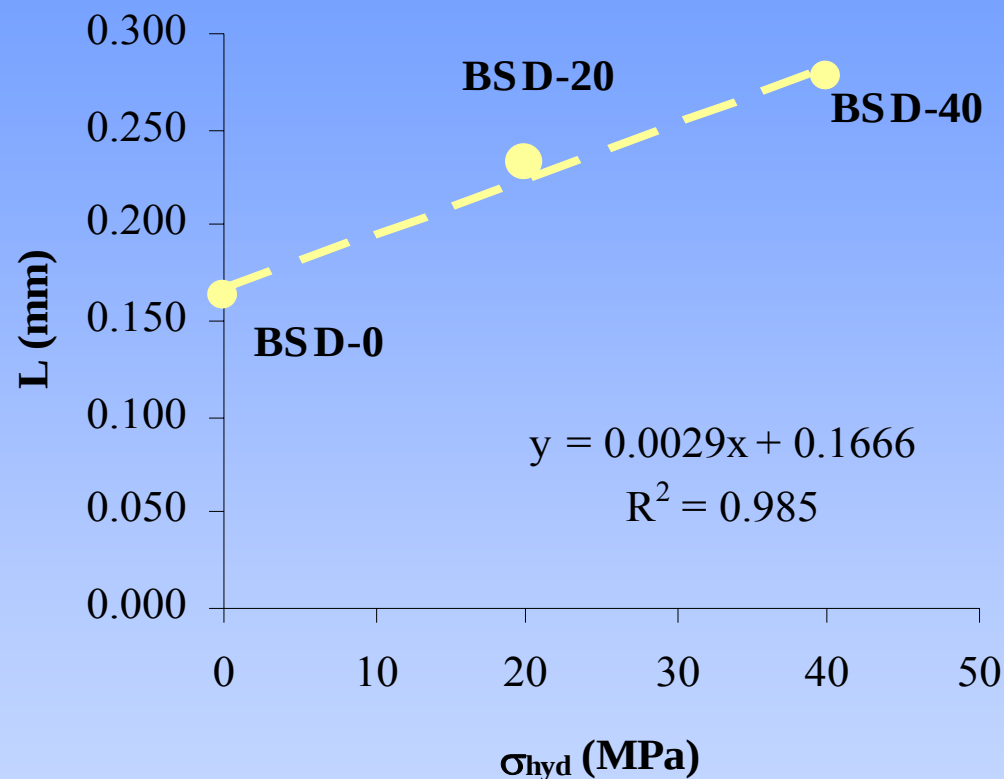
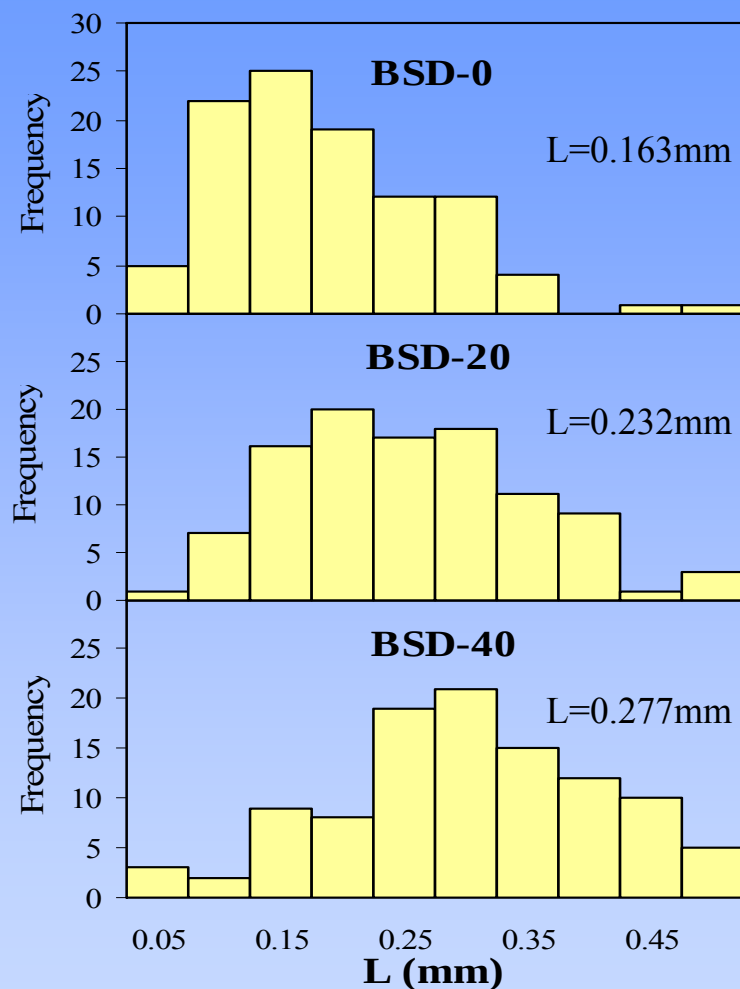


שינויים בגודל הגרגר ב- Berea sandstone:



ב- Berea sandstone גודל הגרגר נשאר קבוע ואינו משתנה. 🍀

שינויים באורך המגעים ב- Berea sandstone:

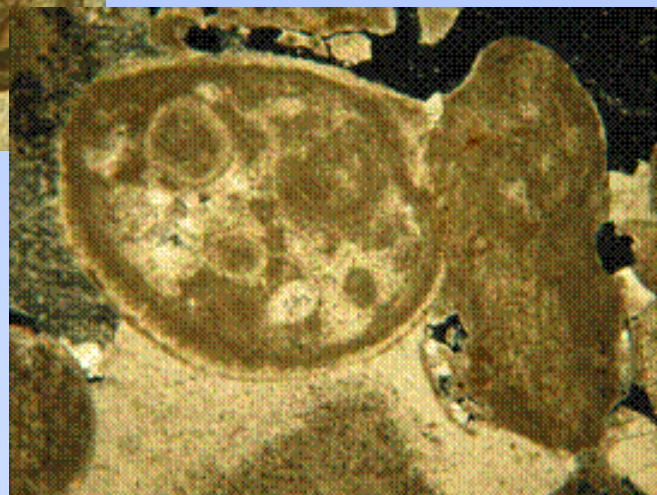
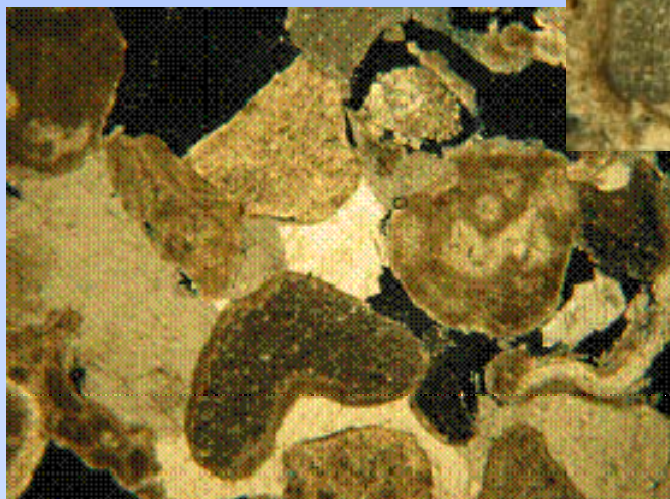
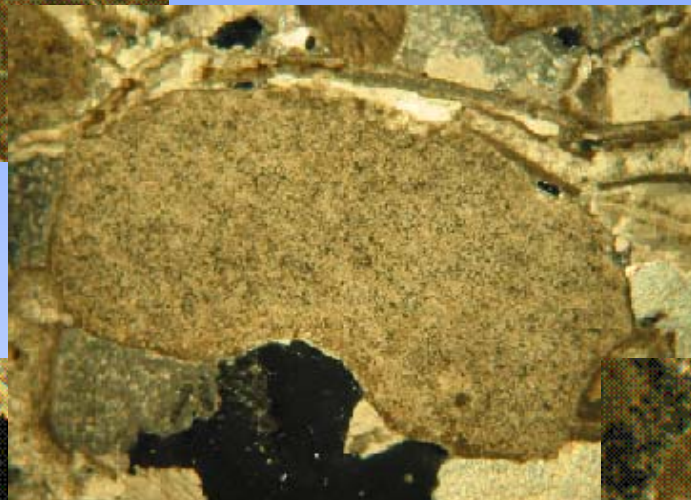
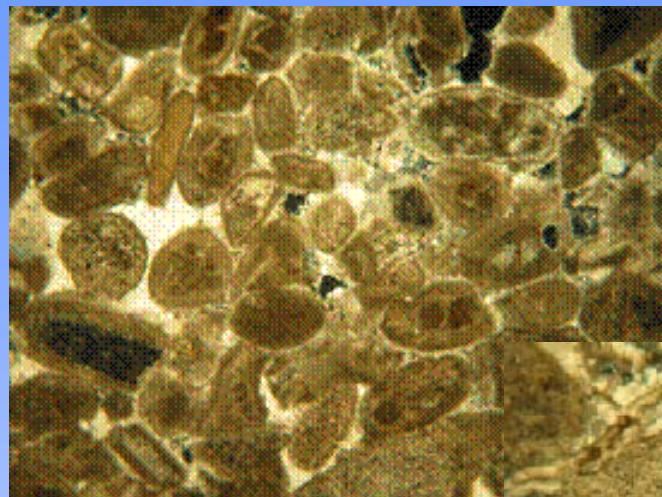


רואים מגמה ברורה של עליה באורך המגעים עם העליה
בלחץ הכליאה הראשוני.

השפעת הלחץ ההידרוסטטי על דוגמאות ה-

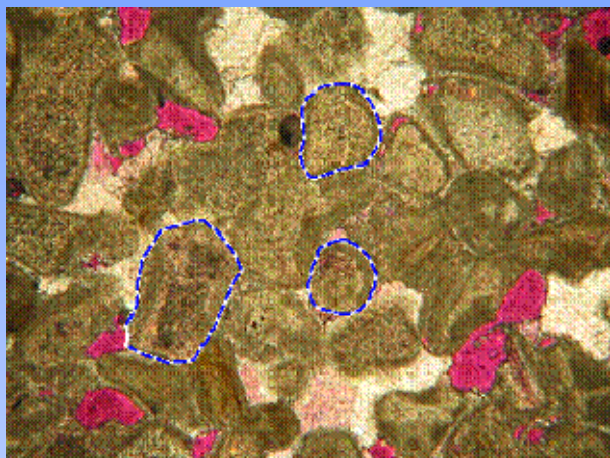
Indiana limestone

שינויים מיקרו-טקסטורליים:



שינויים מיקרו-טקסטורליים ב-Indiana limestone:

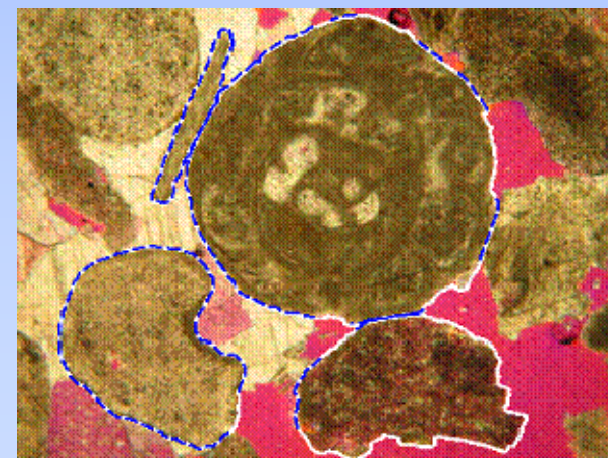
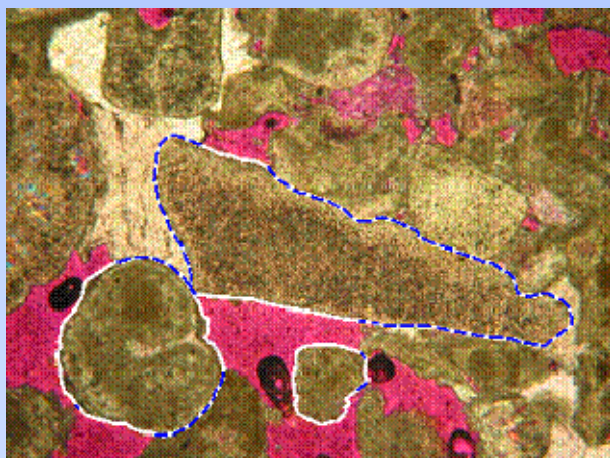
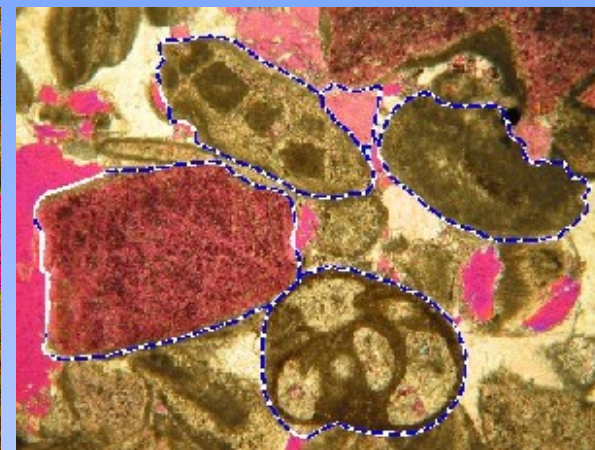
ILD-0



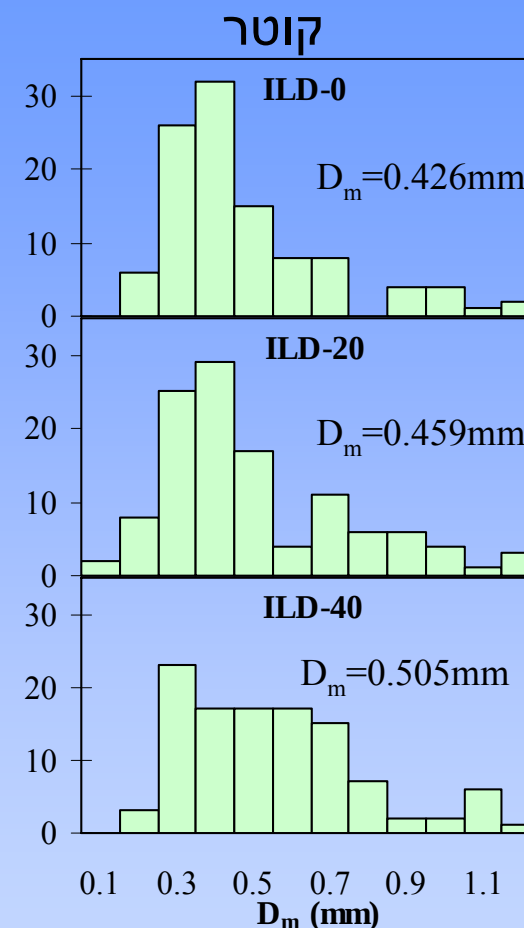
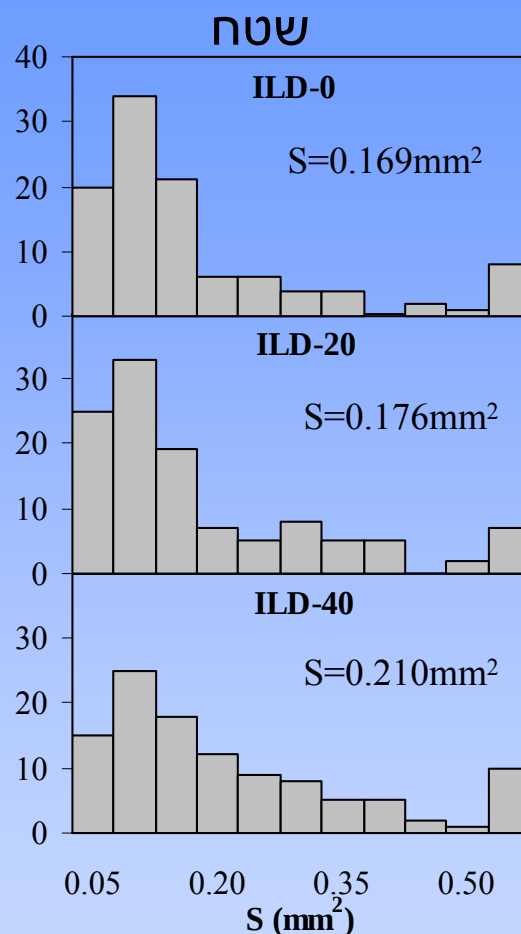
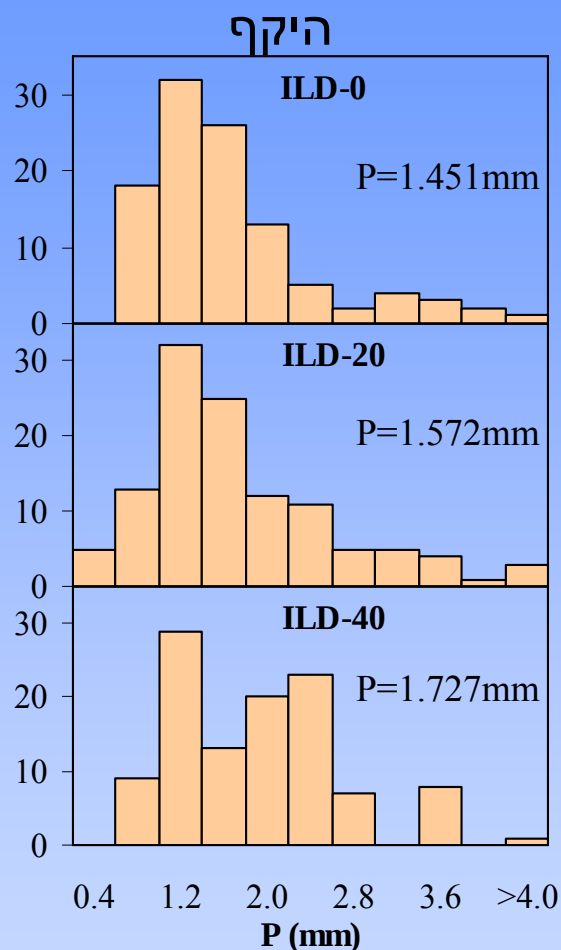
ILD-20



ILD-40

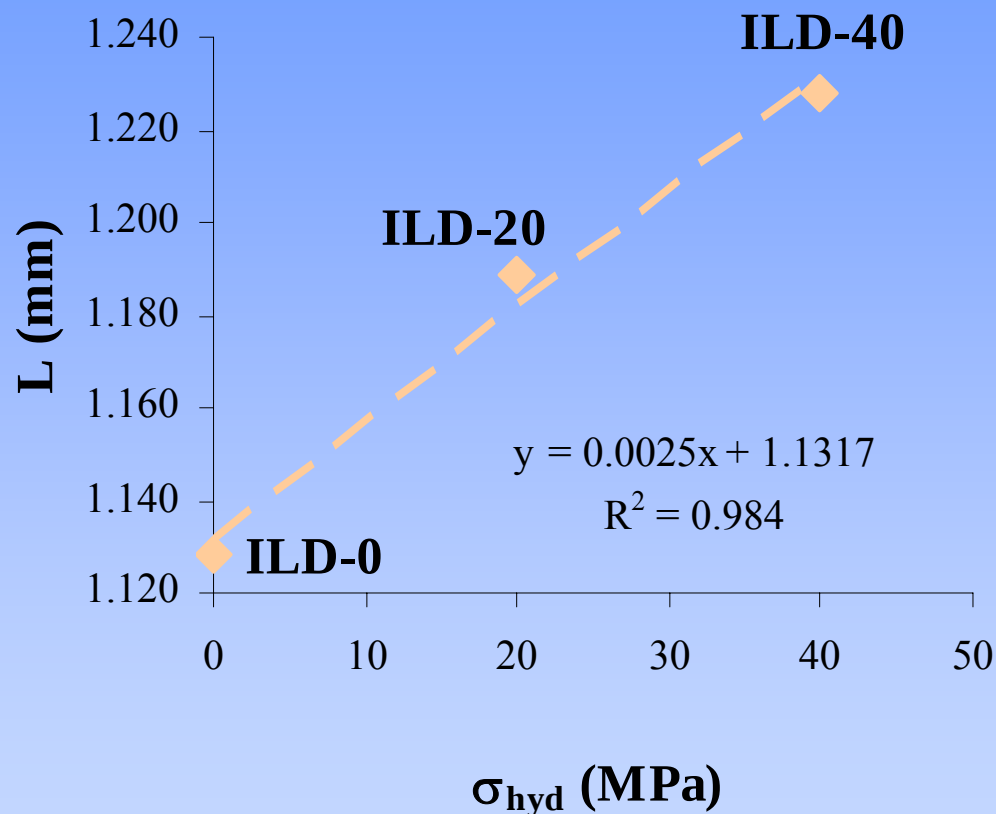
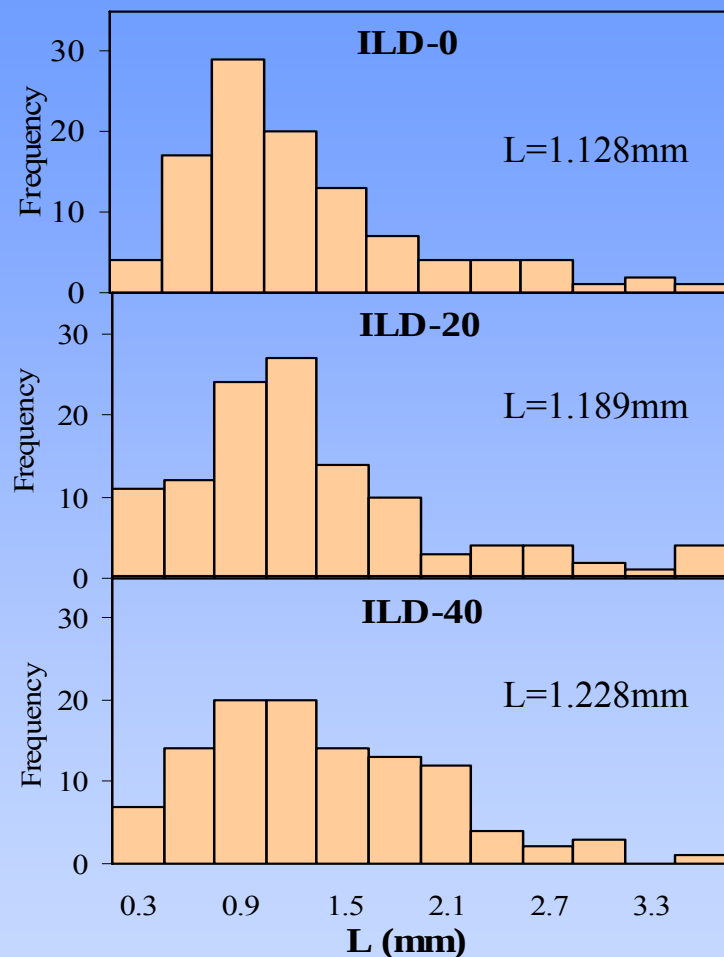


שינויים בגודל הגרגר ב- Indiana limestone



ב- Indiana limestone קיימת שונות ראשונית בגודל הגרגר (הטרוגניות ברמת המיקרו).

שינויים באורך המגעים ב-Indiana limestone



רואים מגמה של עליה באורך המגעים עם העליה בלחץ
הכליאה הראשוני.

השפעת הלחץ ההידרוסטטי על נקבוביות המדגמים ב- :Berea sandstone

Test	σ_{hyd} (MPa)	ρ (gr/cm ³)	$\Delta\rho$ (gr/cm ³)	ϕ (%)	$\Delta\phi$ (%)	ε_V^f (%)
BSD-0	0	2.17	0	19.65	0	0
BSD-20	20	2.17	0.003	19.53	0.12	0.112
BSD-40	40	2.18	0.005 (0.008)	19.43	0.10 (0.22)	0.242

רואים מגמה ברורה של ירידה בנקבוביות עם העלאת לחץ
הכליאה הראשוני

השפעת הלחץ ההידרוסטטי על נקבוביות המדגמים ב- Indiana limestone

Test	σ_{hyd} (MPa)	ρ (gr/cm ³)	$\Delta\rho$ (gr/cm ³)	ϕ (%)	$\Delta\phi$ (%)	ε_V^f (%)
ILD-0	0	2.27	0	15.80	0	0
ILD-20	20	2.27	0.0002	15.79	0.01	0.077
ILD-40	40	2.28	0.0106 (0.0108)	15.53	0.26 (0.27)	0.149

רואים מגמה ברורה של ירידה בנקבוביות עם העלאת לחץ
הכליאה הראשוני

השפעת הלחץ ההידרוסטטי על חוזק הלחיצה החד- צירי וקשיחות (E) המדגמים:

ב- Berea sandstone

Sample	σ_{hyd} (MPa)	E_s (GPa)	ν_d	σ_c (MPa)
BST-0	0	17.26	0.37	81.46
BST-20	20	18.49	0.42	85.87
BST-40	40	18.69	0.36	86.04

ב- Indiana limestone

Sample	σ_{hyd} (MPa)	E_s (GPa)	ν_d	σ_c (MPa)
ILT-0	0	21.60	0.23	45.41
ILT-20	20	23.76	0.28	46.85
ILT-40	40	25.02	0.35	48.14

בשני הסלעים נראית מגמה ברורה של עליה בחוזק הלחיצה החד-צירי (σ_c) ובקשיחות (E_s) המדגמים עם העליה בלחץ הכליאה הראשוני. 

השפעת הלחץ ההידרוסטטי על מהירות גלי P ו-S:

ב-Berea sandstone:

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

ב-Indiana limestone:

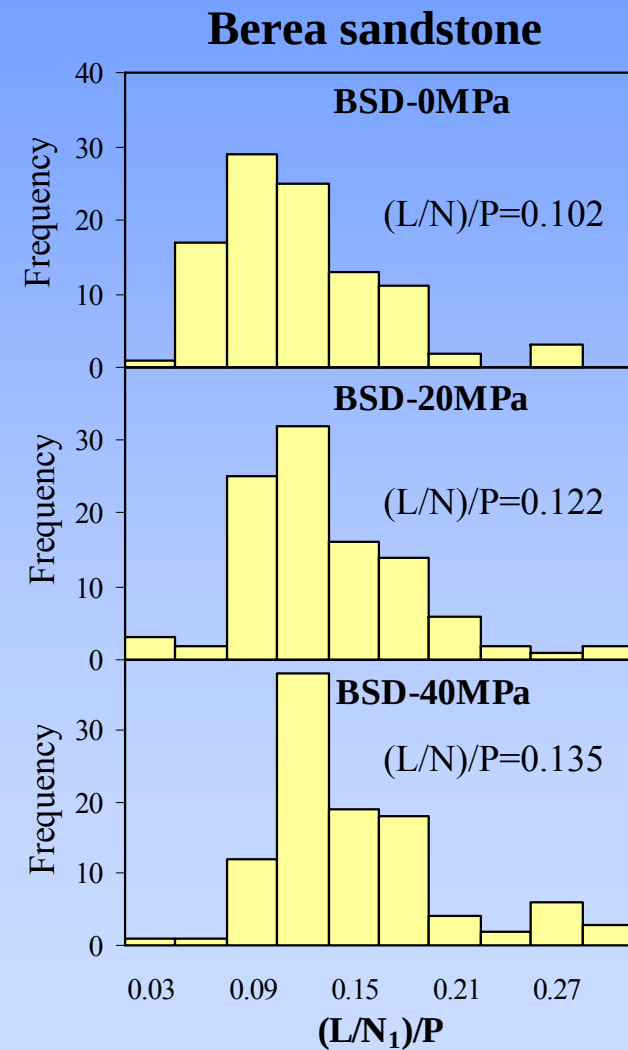
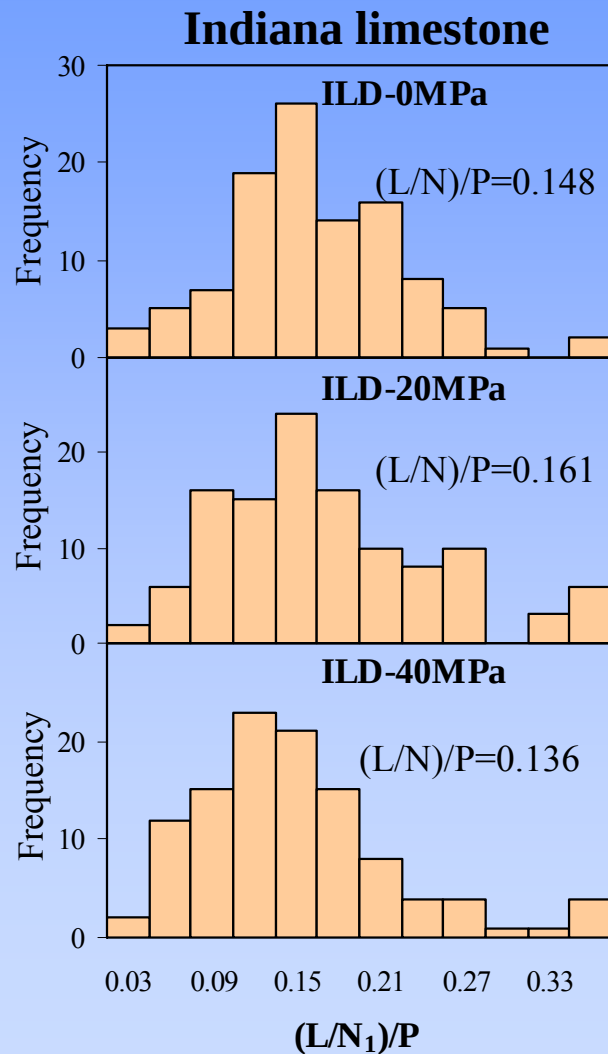
Test	σ_{hyd} (MPa)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	E_d (GPa)	ν_d	G_d (GPa)	K_d (GPa)	ρ (gr/cm ³)	ϕ (%)
ILD-0	0	3503	1934	21.79	0.28	8.51	16.55	2.27	15.80
ILD-20	20	3277	2019	22.14	0.19	9.27	12.06	2.27	15.79
ILD-40	40	3219	1984	21.43	0.19	8.97	11.67	2.28	15.53

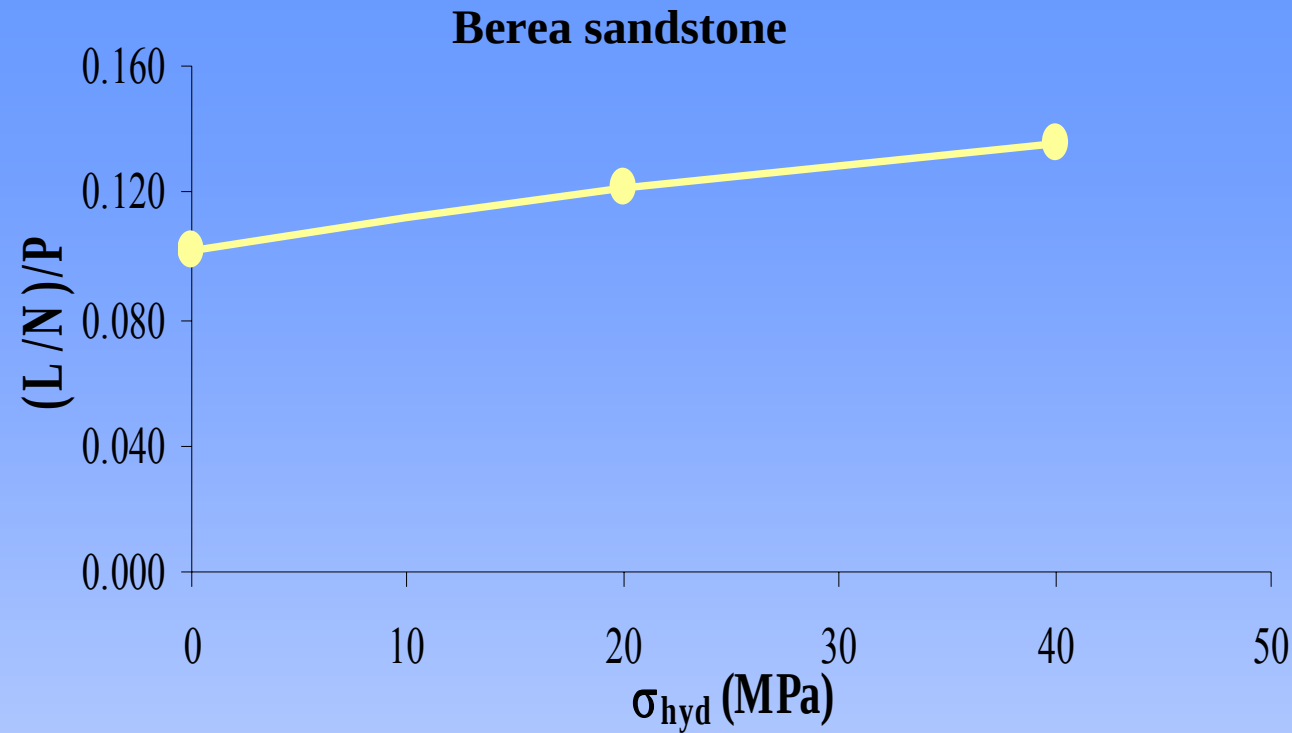
בשני הסלעים לא נמצאה שום מגמה ברורה במהירויות הגלים
בעקבות עלית לחץ הכליאה הראשוני.

$$\frac{\left(\frac{L}{N}\right)}{P}$$

פרמטר המגע:

השפעת הלחץ ההידרוסטטי:

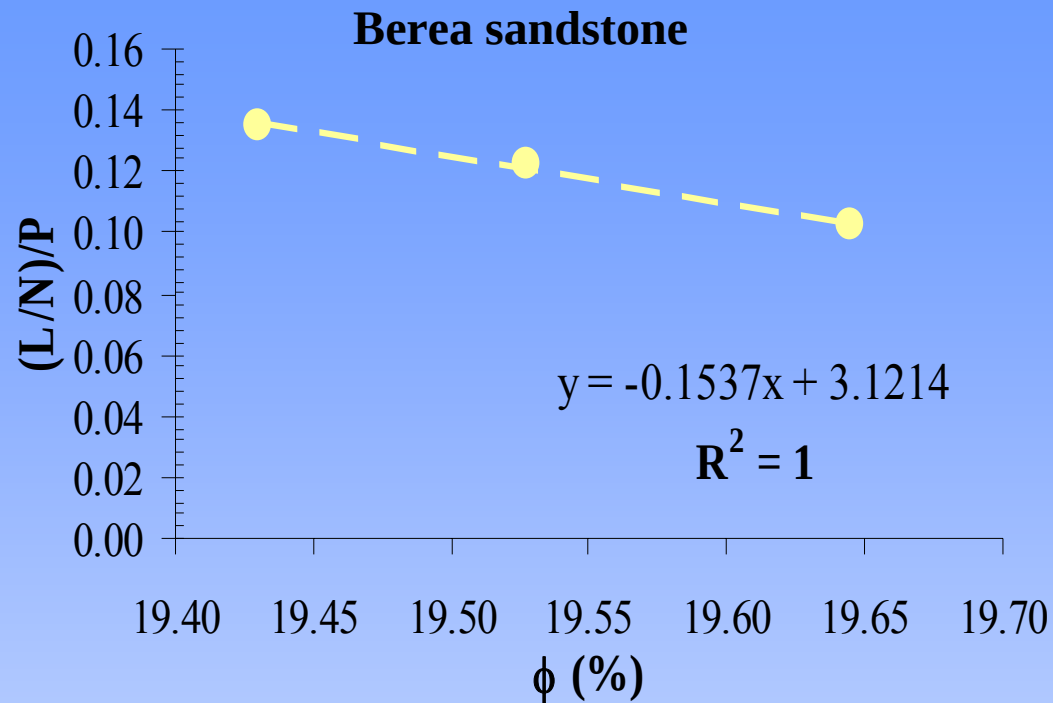




ב- Berea sandstone נראית מגמת עליה בפרמטר המגע עם העליה בלחץ ההידרוסטטי.

ב- Indiana limestone לא נראית מגמת שינוי ברורה בפרמטר המגע, כנראה בגלל השונות הראשונית.

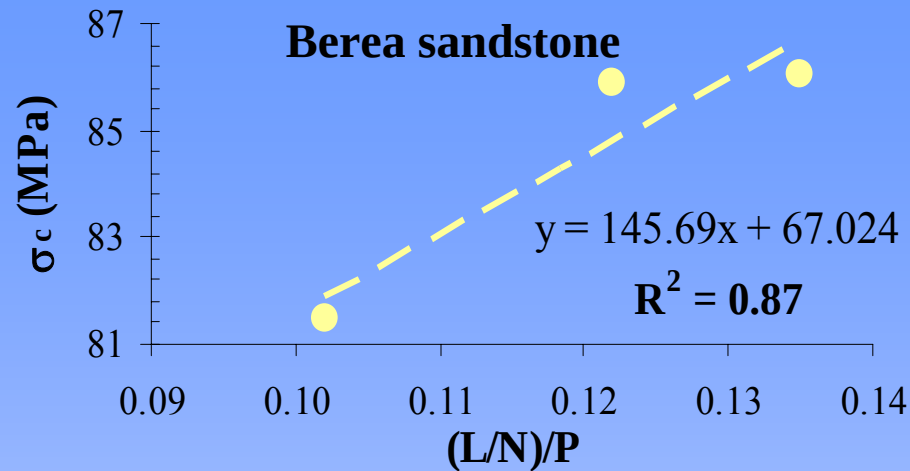
יחס $(L/N)/P$ – נקבוביות (ϕ)



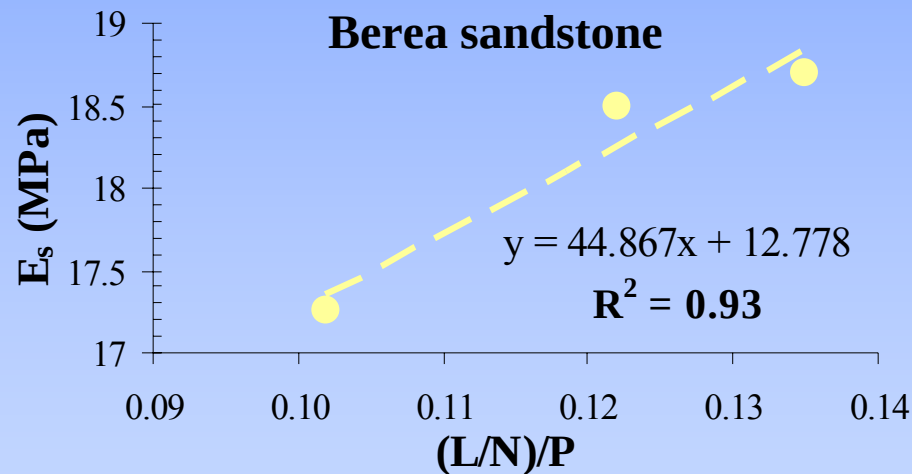
◆ נמצא כי פרמטר המגע, $(L/N)/P$, בעל קורלציה ליניארית שלילית טובה מאוד עם הנקבוביות.

◆ מגעי גבולות הגרגרים הם הגורם הדומיננטי ביותר לירידה בנקבוביות בתהליך הדחיסה של אבן-החול.

השפעת (L/N)/P על חוזק (σ_c) וקשיחות הסלע (E):



נמצא כי ערכי פרמטר המגע, (L/N)/P, עולים עם העליה בחוזק הלחיצה החד-צירי.



נמצא כי ערכי פרמטר המגע, (L/N)/P, עולים עם העליה במודול האלסטי של הסלע (קשיחות הסלע).

לרציפות המגעים יחד עם אורכם תפקיד חשוב בקביעת התכונות המכניות של סלע נקבובי, ויש לקחת את שניהם בחשבון בניסוח מודל מיקרוטקסטורלי.

סיכום ומסקנות

◆ הלחצים ההידרוסטטיים שהופעלו על הדוגמאות נמצאים בקצה התחתון של עקומת המאמץ-מעוות נפחי וגרמו למעוותים קטנים מאוד ובלתי הפיכים בדוגמאות.

◆ בשני סוגי הסלעים נמצאה מגמה ברורה של עליה בצפיפות המדגמים וירידה בנקבוביות עם העליה בלחץ ההידרוסטטי.

◆ מבחני לחיצה חד-צירית הראו מגמה ברורה של עליה בחוזק החד-צירי (σ_c) ובמקדם האלסטיות (E) עם העליה בלחץ ההידרוסטטי.

◆ נמצא שהגדלת לחץ הכליאה משפיעה ישירות על אורך המגעים בין גרגרים בסלעים גרנולרים.

סיכום ומסקנות

- ◆ נמצא כי ב- Berea sandstone פרמטר המגע $(L/N)/P$ עולה באופן עיקבי עם העליה בלחץ הכליאה הראשוני. לעומת זאת, עבור ב- Indiana limestone לא נמצאה מגמה כלשהי של פרמטרי המגע, ככל הנראה בשל השונות הראשונית.
- ◆ נמצא כי עבור ה- Berea sandstone התקבלה עליה בערכים של פרמטר המגע עם העליה בחוזק הלחיצה החד-צירי ובמקדם האלסטיות, וירידה עם העליה בנקבוביות.
- ◆ במחקר זה הודגם, בהתאם להנחת העבודה, שהעלאת אורך ורציפות המגעים בין גרגרים תורמת לעליה בחוזק וקשיחות הסלע.

תודה רבה

רקע תיאוריטי

◆ זיהוי המיקרוטקסטורה כגורם משפיע על התכונות המכניות של סלעים החל כבר במחצית המאה הקודמת.

◆ Williams et al., 1982 הגדירו את המונח טקסטורה כ"דרגת הקריסטליניות, גודל הגרגר או הגרנולריות, והמבנה-מארג או היחסים הגיאומטריים בין מרכיבי הסלע".

◆ מחקרים שנעשו בשנים האחרונות מצאו כי המיקרו-טקסטורה של סלע הינה הגורם השולט והמשפיע בצורה הדומיננטית ביותר על חוזקו המכני (Hatzor et al., 1997; Ersoy & Waller, 1995; Prikryl, 2001).

גודל גרגר

◆ Handin & Hager (1957) ו-Paterson (1958) מצאו כי בסלעי גיר ושיש חוזק הסלע גדל עם הירידה בגודל הגרגר.

◆ Olsson (1974) מצא את הקשר הבא עבור שיש:

$$\sigma_y = \sigma_i + kd^{-0.5}$$

◆ Hatzor & Palchik (1997, 1999, 2000, 2002):

- ❖ מחקרים אשר מצאו קורלציה טובה במיוחד בין גודל הגרגר בלבד וחוזק הסלע, חייבים היו להיעשות על סלעים מאוד הומוגנים ובעלי נקבוביות נמוכה מאוד (3-4%).
- ❖ בסלעים היותר נקבוביים יש לקחת בחשבון גם את הנקבוביות.

נקבוביות

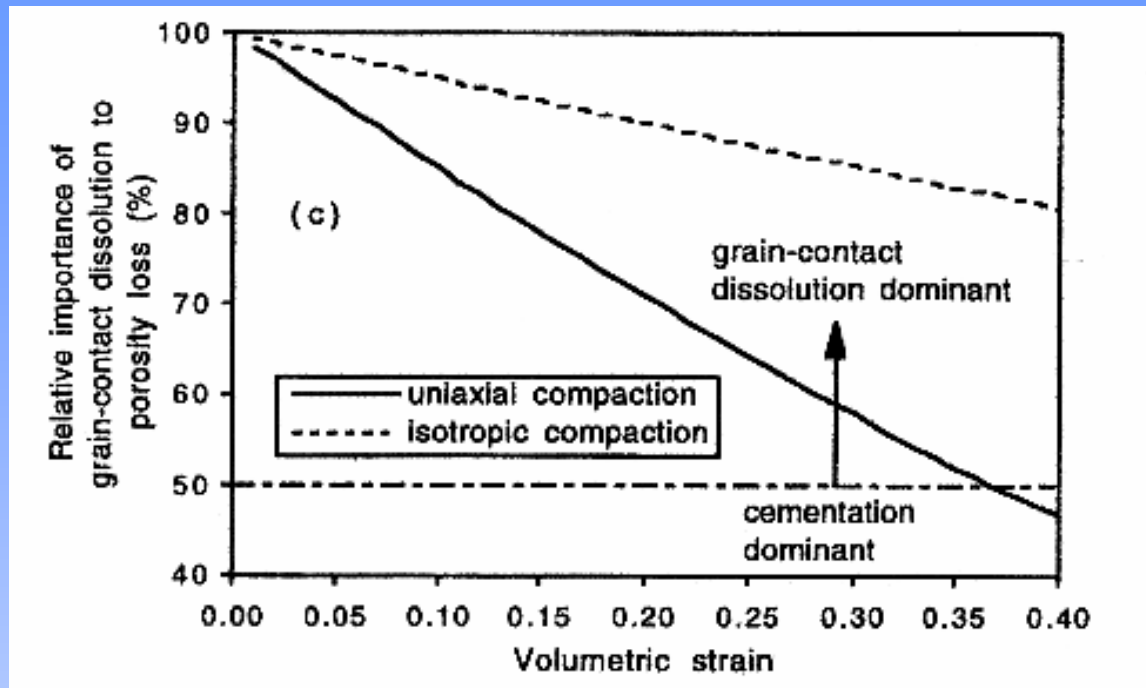
◆ מאפשרת ומקלה על התקדמות הסדקים.

◆ בסלעים סדימנטרים כל פרמטרי החוזק יורדים עם העליה בנקבוביות.

Howarth & Rowlands, 1987; Dunn et al., 1973;)
(Scott & Nielsen, 1991

◆ Hatzor & Palchik (1997, 1999, 2000, 2002): לא די
בגודל הגרגר והנקבוביות ויש להתחשב גם באופי המגעים
בין הגרגרים.

רקע תיאוריטי



He et al. (2002)

◆ (2002) He et al.: מגעי גבולות הגרגר הם הגורם הדומיננטי ביותר לירידה בנקבוביות בתהליך הדחיסה של אבן-החול.

◆ ההנחה היא כי הדחיסה ההידרוסטטית גורמת להגדלת אורך המגעים בין הגרגרים (Zhang et al., 1990; Digby, 1981; Sayers, 2001).

מודלים וקריטריונים משולבים

$$TC = CD \left[\left(\frac{N_0}{N_0 + N_1} \cdot \frac{1}{\overline{FF}_0} \right) + \left(\frac{N_1}{N_0 + N_1} \cdot \overline{AR}_1 \cdot AF_1 \right) \right]$$

Howarth & Rowlands (1986)

TC: Texture coefficient [-]

CD: clast density [mm²/mm²]

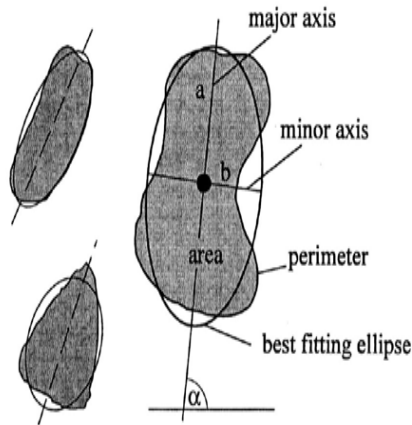
N₀: number of isometric clasts (aspect ratio < 2.0)

N₁: number of elongated clasts (aspect ratio > 2.0)

$\overline{FF}_0$: mean form factor of isometric clasts [mm²/mm²]

$\overline{AR}_1$: mean aspect ratio of elongated clasts [mm/mm]

AF₁: angular factor of elongated clasts [-]



$$\text{aspect ratio (AR)} = \frac{a}{b}$$

$$\text{form factor (FF)} = 4 \cdot \pi \cdot \frac{\text{clast area}}{\text{perimeter}^2}$$

$$\text{angular factor (AF)} = \sum_i \left[\frac{X_i}{\frac{N_1(N_1 - 1)}{2}} \right] \cdot i$$

X_i = number of angular differences Δα contained in the class i (width 10°), measured between elongated clasts

Howarth & Rowlands (1986, 1987)

(TC) "Texture Coefficient" של Howarth & Rowlands (1986, 1987)

TC גדל ← חוזק (UTS, UCS) וקשיחות (E) הסלע גדלים

Ersoy & Waller (1995):
לא די ב-TC להערכה מספיק
מדוייקת של כל התכונות
המכניות של הסלע.

רקע תיאוריטי

$$MC = \frac{R_L}{T_{Ld} \cdot \overline{T}_{LL}} \cdot \frac{1}{\delta}$$

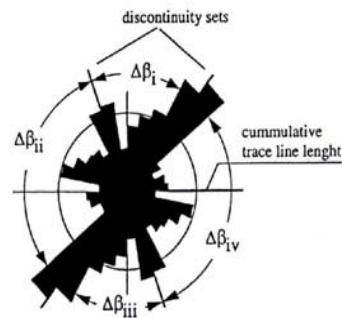
MC: Matrix Coefficient [-]

R_L : linear roughness [mm/mm]

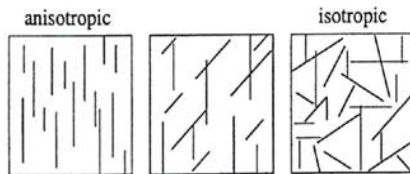
$\overline{T}_{LL}$: mean trace line length [mm]

T_{Ld} : trace line density [mm/mm²]

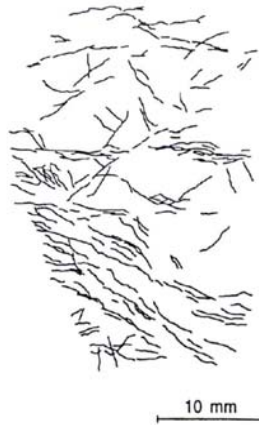
d: orientation factor [-]



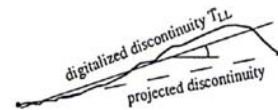
$$\delta = \frac{\log (\Delta\beta_1 \cdot \Delta\beta_2 \cdot \Delta\beta_{iii} \cdot \dots \cdot \Delta\beta_{2n})}{\log (360)}$$



n	1	2	9
$\Delta\beta_i$	180°	45°/135°	20°
δ	1.76	2.96	9.2



$$T_{Ld} = \frac{\sum T_{LL}}{\text{unit area}}$$



$$R_L = \frac{\text{discontinuity length } T_{LL}}{\text{projected discontinuity length}}$$

(MC) "Matrix Coefficient" של Burgi et al. (2001).

המודל מאפיין את אי-הרציפות בסלע.

MC גדל ← סלע חזק יותר

Burgi et al. (2001)

◆ MSI - Mineralogical and Structural Index (Burgi et al., 2001)

$$MSI = mwVh(MC + TC)$$

◆ קורלציה יפה של מדד ה-MSI עם חוזק הסלעים.

◆ מוגבלת לדוגמאות שכיוון האנאיזוטרופיה שלהן נמצא בניצב לכיוון המאמץ העיקרי (σ_1).