

دانشگاه مازندران  
دانشکده فنی و مهندسی - گروه عمران - گرایش مکانیک  
خاک و پی

موضوع درس:

## دینامیک خاک (Soil Dynamics)

دکتر علی عسگری (Dr. Ali Asgari)

نیمسال دوم تحصیلی ۹۴-۹۵

### دینامیک خاک (Soil Dynamics) فصل چهارم



## تعیین خصوصیات دینامیکی خاک با انجام آزمایش‌های دینامیکی

### مقدمه:

خرابی‌ها در اثر زلزله شدیداً به خصوصیات دینامیکی خاک محل دارد. مسائلی زیادی وجود دارد که برای حل آنها نیاز است که پارامترهای دینامیکی خاک تعیین شود. این مسائل شامل: طرفیت باربری دینامیکی پی، پاسخ پی تحت ارتعاش ماشین، اندرکنش خاک-سازه تحت بار زلزله و پایداری لرزه‌ای سدهای خاکی است.

خواص عمده‌ای که باید برای خاک‌ها تحت بارهای دینامیکی مورد مطالعه قرار گیرد:

- ۱- مقاومت برشی بر حسب سرعت تغییرشکل برشی و خصوصیات تنش-کرنش خاک
- ۲- پارامترهای مکانیکی- دینامیکی نظریه  $\nu$  ضریب پواسون،  $E$  مدول الاستیسیته،  $G$  مدول برشی،  $K$  مدول حجمی و  $M$  مدول مهار شده
- ۳- میرائی و یا استهلاک نوسانات در خاک
- ۴- پارامترهای سیلان خاک شامل نسبت تنش برشی سیکلی، تغییرشکل سیکلی، واکنش فشار حفره‌ای.



3

## تعیین خصوصیات دینامیکی خاک با انجام آزمایش‌های دینامیکی

### انواع آزمایش‌های تعیین مشخصات دینامیکی خاک:

- ۱- آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن
- ۲- آزمایش صحرایی و اندازه گیری‌ها

### دستگاه‌های تست دینامیکی خاک‌ها

- مشخصات کلی دستگاه‌ها و مقتضیات خاص آن‌ها و تفاوت با وسایل تست استاتیک متداول
- ۱- **تست استاتیک**  
بارهای واردہ با زمان بسیار کم تغییر کرده و وسایل متداول از قبیل گیچ‌ها و وسایل دستی قابل استفاده‌اند.
  - ۲- **تست دینامیک**  
بارهای واردہ با زمان تغییرات شدید داشته و لذا فرائت‌ها باید سریع‌تر و دقیق‌تر انجام گیرد  
لذا وسایل اتوماتیک لازم است.

### نکته:

روش‌های مختلفی برای تعیین مشخصات دینامیکی خاک وجود دارد که برای استفاده از آنها مزایای و محدودیت‌هایی وجود دارد. بطور مثال برخی از این تست‌ها نیاز به تخصص دارد و به ابزارآلات بسیار گران نیازمند است و برخی دیگر در محدوده خاصی از کرنشها قابل استفاده هستند ...

4

## تعیین خصوصیات دینامیکی خاک با انجام آزمایش‌های دینامیکی

۱- انواع آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن

۲- انواع آزمایش صحرایی و اندازه گیری ها

۳- تخمین پارامترهای دینامیکی مدول برشی  
و میرایی با استفاده از روابط تجربی

تقسیم بندی  
فصل چهارم

5

## تعیین خصوصیات دینامیکی خاک با انجام آزمایش‌های دینامیکی

۱- انواع آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن

مقاومت برشی خاک رس اشباع و ماسه خشک تحت بارگذاری سریع  
Unconsolidated-Undrained Triaxial Test

مقاومت برشی خاک رس و ماسه تحت بارگذاری گذرا  
Unconfined & Confined Compression Test

آزمایش زمان طی شده مسیر موج Travel-Time Test

ستون تشدید Resonant Column Test

تست برش ساده سیکلی Cyclic Simple Shear Test

تست پیچشی ساده سیکلی Cyclic Simple Shear Test

تست سه محوره سیکلی Cyclic Triaxial Tests

6

## ۱- انواع آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن

مقاومت برشی خاک رس اشباع و ماسه خشک تحت بارگذاری سریع  
Unconsolidated-Undrained Triaxial Test

مقاومت برشی خاک رس و ماسه تحت بارگذاری گذرا  
Unconfined & Confined Compression Test

آزمایش زمان طی شده مسیر موج Travel-Time Test

ستون تشدید Resonant Column Test

تست برش ساده سیکلی Cyclic Simple Shear Test

تست پیچشی ساده سیکلی Cyclic Simple Shear Test

تست سه محوره سیکلی Cyclic Triaxial Tests

7

## ۱- انواع آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن

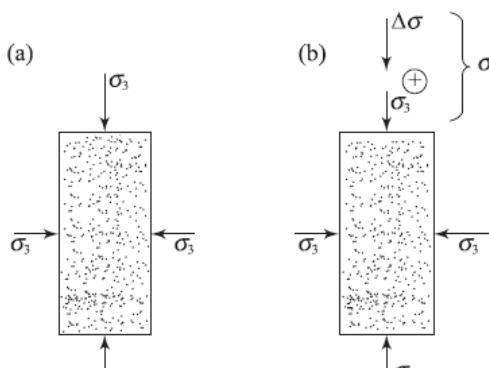
مقاومت برشی خاک رس اشباع و ماسه خشک تحت بارگذاری سریع:

unconsolidated-undrained triaxial tests

الف) خاک رس اشباع

Major principal stress (total) =  $\sigma_{1(f)} = \sigma_3 + \Delta\sigma_{max}$

Minor principal stress (total) =  $\sigma_3$



$$\phi = 0$$
$$c_u = \frac{\Delta\sigma_{max}}{2} = \frac{\sigma_{1(f)} - \sigma_3}{2}$$

اگر نرخ کرنش کوچک باشد.

static loading condition, or  $c_u = c_{u(static)}$

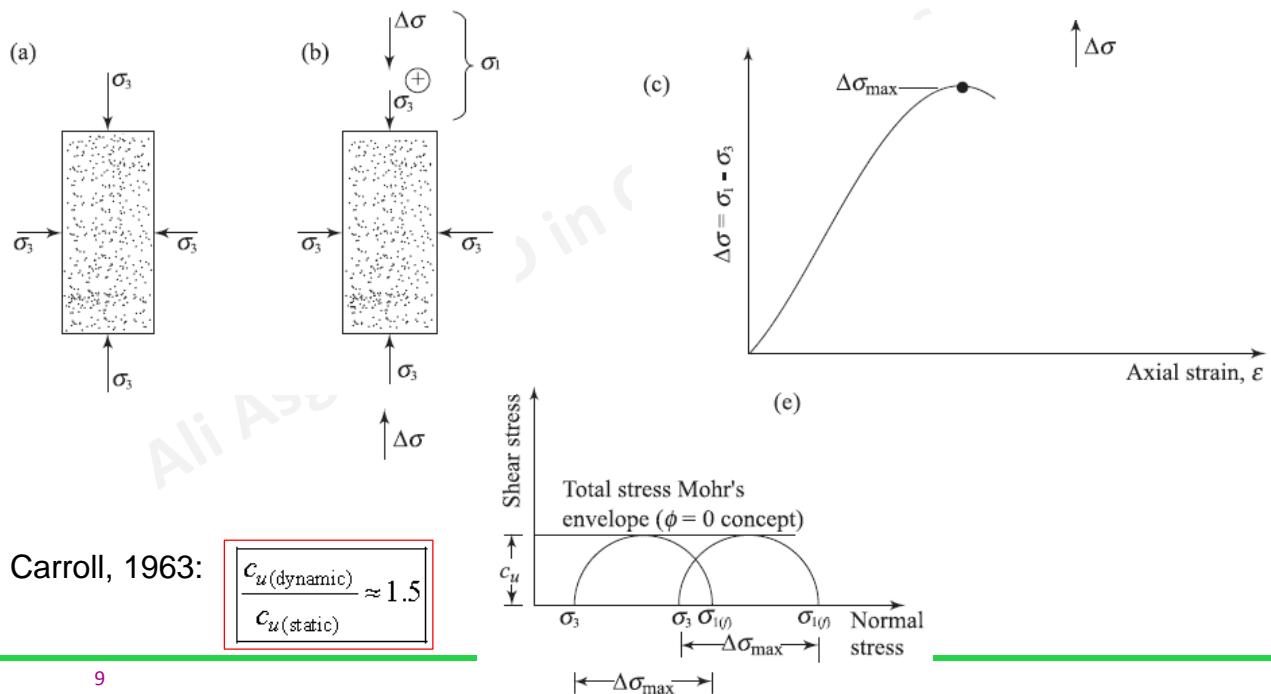
اگر نرخ کرنش بزرگ باشد.

dynamic undrained shear strength, or  $c_u = c_{u(dynamic)}$

8

*unconsolidated-undrained triaxial tests*

الف) خاک رس اشباع



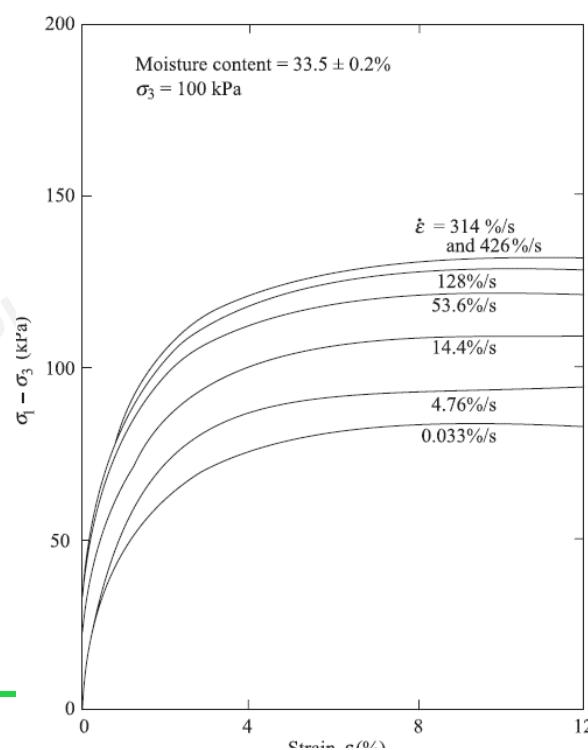
9

*unconsolidated-undrained triaxial tests*

الف) خاک رس اشباع

Carroll, 1963:

$$\frac{c_u(\text{dynamic})}{c_u(\text{static})} \approx 1.5$$

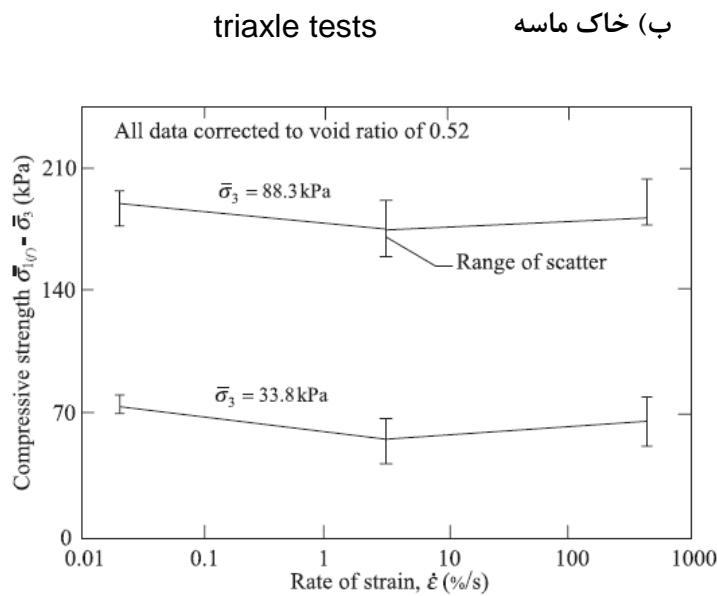


10

$$\phi = \sin^{-1} \left( \frac{\bar{\sigma}_{1(f)} - \bar{\sigma}_3}{\bar{\sigma}_{1(f)} + \bar{\sigma}_3} \right)$$

(Vesic, 1973)

$$(\phi_{dyn})_{\min} = \phi_{static} - 2$$



تاثیر نرخ کرنش بر روی زاویه اصطکاک داخلی ماسه خشک اوتاوا (Whitman and Healy, 1963)

11

## ۱- انواع آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن

## مقاومت برشی خاک رس اشباع و ماسه خشک تحت بارگذاری سریع Unconsolidated-Undrained Triaxial Test

## مقاومت برشی خاک رس کمپرسیون و ماسه منچستر تحت بارگذاری گذرا Unconfined & Confined Compression Test

## آزمایش زمان طی شده مسیر موج Travel-Time Test

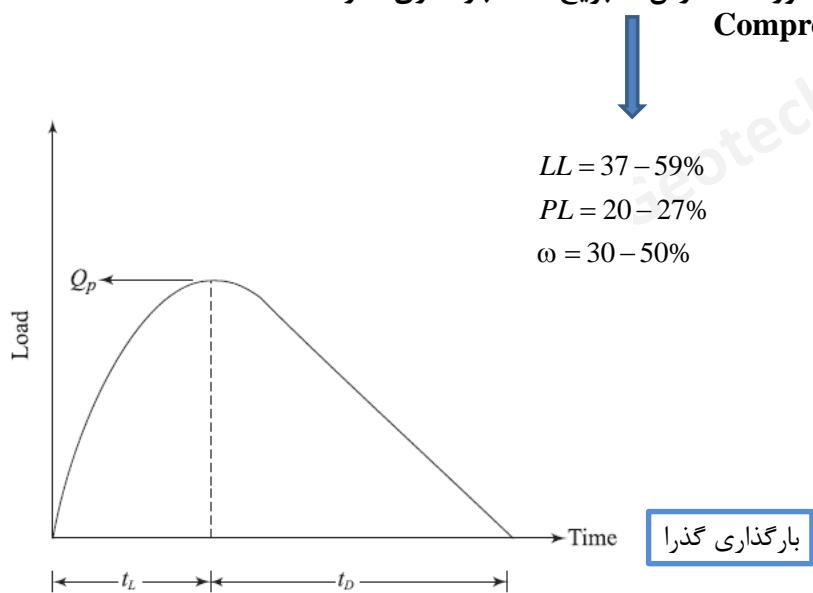
## ستون: تشدید Resonant Column Test

## تست پرس ساده سیکلی

## تست ساده سکلی (Cyclic Simple Shear Test)

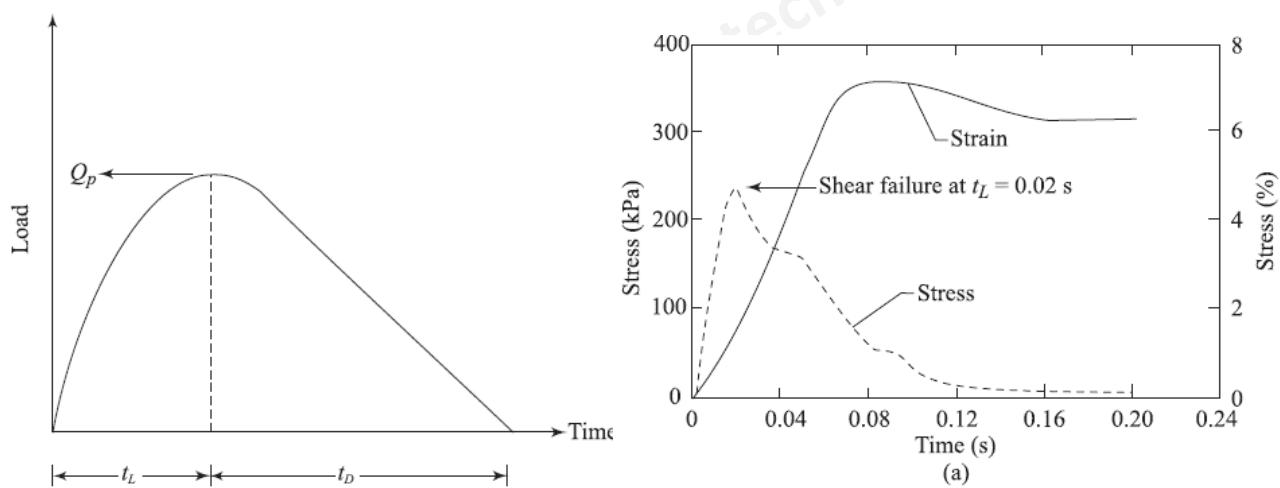
## Cyclic Triaxial Tests تест سہ محوہ سکلے

الف) مقاومت تک محوره خاک رس کمپریج تحت بارگذاری گذرا  
Unconfined Compression Strength



13

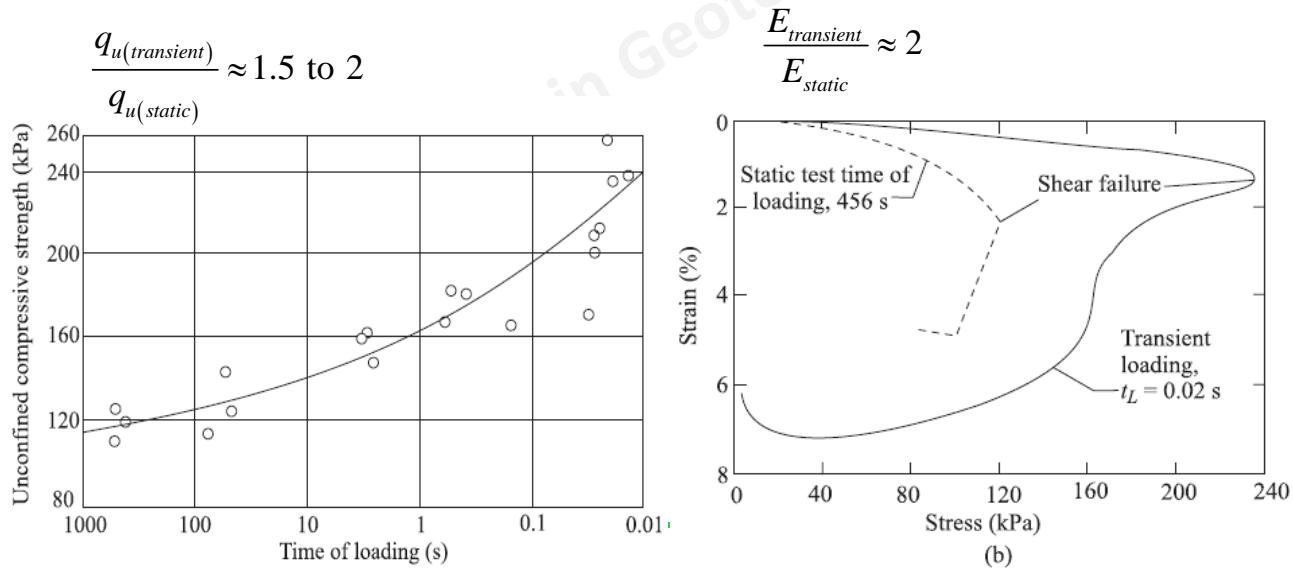
الف) مقاومت تک محوره خاک رس کمپریج تحت بارگذاری گذرا  
Unconfined Compression Strength



14

### الف) مقاومت تک محوره خاک رس کمپریج تحت بارگذاری گذرا Unconfined Compression Strength

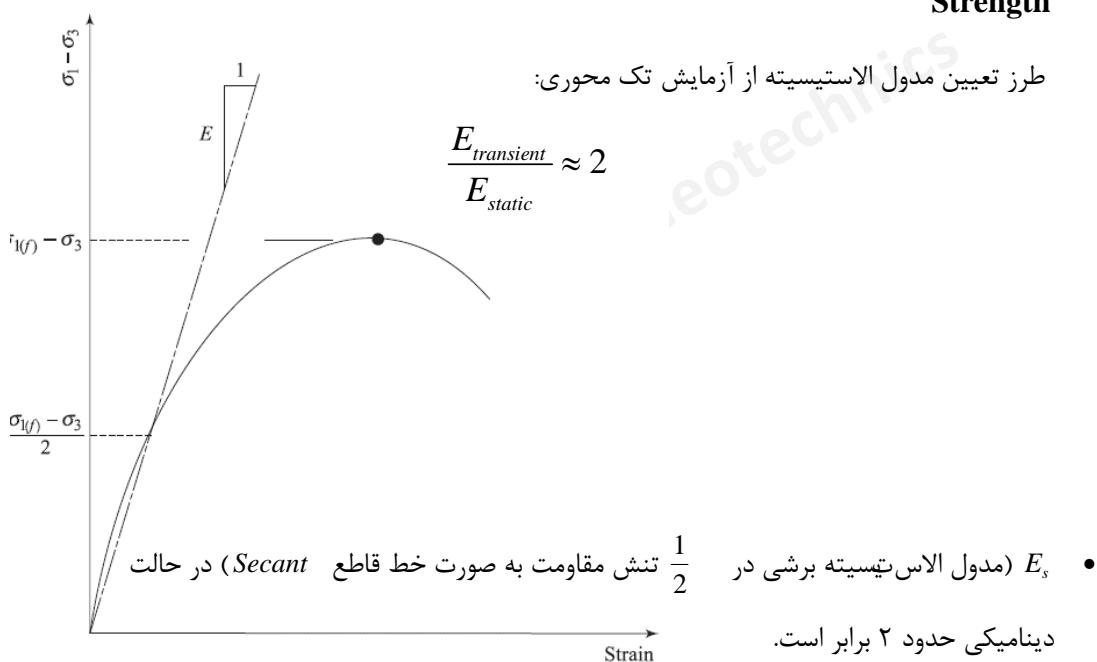
مطابق با شکل زیر می توان نتیجه گرفت:



### مقاومت تک محوره خاک رس کمپریج تحت بارگذاری گذرا Unconfined Compression Strength

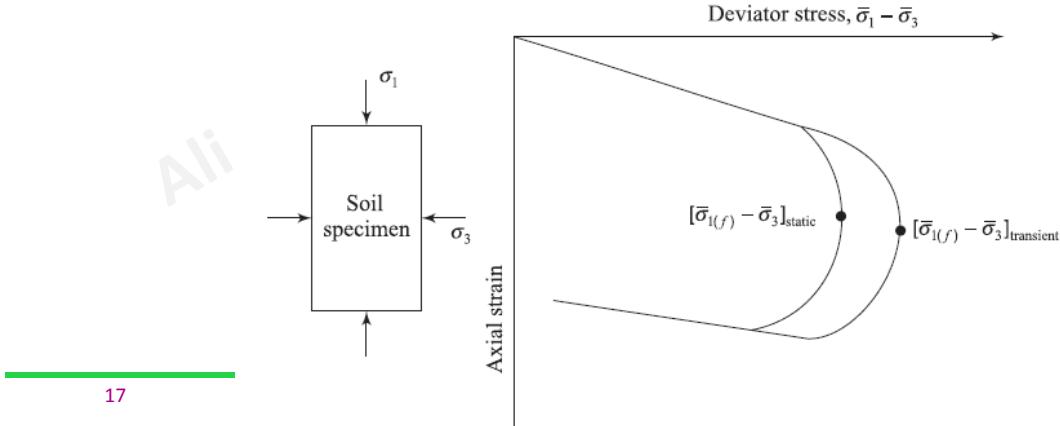
طرز تعیین مدول الاستیسیته از آزمایش تک محوری:

$$\frac{E_{\text{transient}}}{E_{\text{static}}} \approx 2$$



## نتایج تست فشاری مخصوصه Confined Compression Test بر روی خاک ماسه ای منچستر با $e_{\max} = 0.88$ , $e_{\min} = 0.61$ تحت بارگذاری گذرا

- مقاومت ماسه برخلاف رس فقط در استاتیک و در دینامیک با میدان بار گذرا یکسان و مستقل از زمان باحدود ۱۰٪ افزایش یافته است.
- $$\frac{[\bar{\sigma}_{1(f)} - \bar{\sigma}_3]_{\text{transient}}}{[\bar{\sigma}_{1(f)} - \bar{\sigma}_3]_{\text{static}}} \approx 1.1$$
- مدول تغییر شکل برخلاف رس چه در آزمایش استاتیک و در دینامیک با میدان بار گذرا یکسان و مستقل از زمان بارگذاری است.
- $$E_{\text{transient}} \approx E_{\text{static}}$$



17

### نقاط ضعف آزمایشات گفته شده:

- در محیط طبیعی بارهای استاتیکی و دینامیکی تؤام هستند در حالی که در آزمایش فوق به صورت خالص دینامیکی بارگذاری وجود دارد.
- فقط یک سیکل بارگذرا بر نمونه وارد شده است، در حالی که در یک زلزله ممکن است ۱۰۰ سیکل و بیشتر بارگذاری وجود داشته باشد.
- نمونه‌های ماسه ای همگی خشک وغیر متراکم آزمایش شده‌اند در حالی که اثر بار دینامیکی روی ماسه‌ی غیرمتراکم و اشباع متفاوت است.
- ماسه‌های غیرمتراکم و اشباع در اثر بارهای دینامیکی روان گردیده و مقاومت برشی آن‌ها صفر می‌شود که باعث وقوع خرابی‌های بسیار زیاد می‌گردد (روانگرایی در آزمایش گفته شده مدل نمی‌شود).

18

## ۱- انواع آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن

مقاومت برشی خاک رس اشباع و ماسه خشک تحت بارگذاری سریع  
 Unconsolidated-Undrained Triaxial Test

مقاومت برشی خاک رس و ماسه تحت بارگذاری گذرا  
 Unconfined & Confined Compression Test

آزمایش زمان طی شده مسیر موج Travel-Time Test

ستون تشدید Resonant Column Test

تست برش ساده سیکلی Cyclic Simple Shear Test

تست پیچشی ساده سیکلی Cyclic Simple Shear Test

تست سه محوره سیکلی Cyclic Triaxial Tests

19

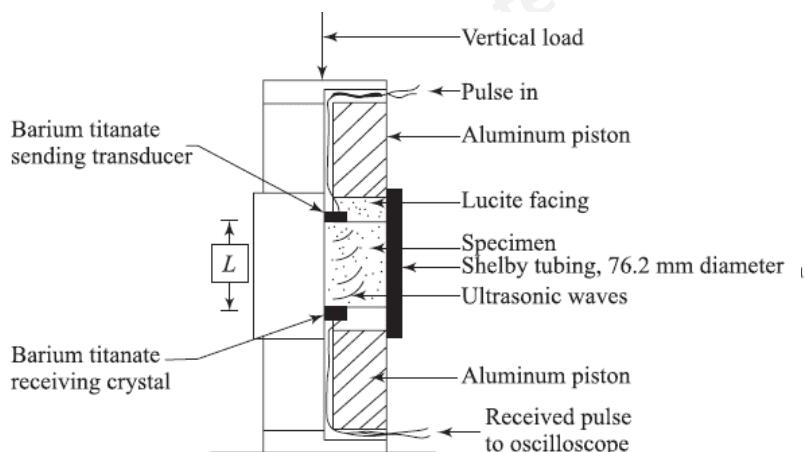
### آزمایش زمان طی شده مسیر موج Travel-Time Test برای تعیین سرعت طولی و عرضی

با تجهیزات الکتریکی زمان طی شده موج ( $t_c$ ) در نمونه ای به ارتفاع  $L$  قابل اندازه گیری است.  
 بنابراین می توان سرعت موج طولی را از رابطه زیر تعیین کرد:

$$v_c = \frac{L}{t_c}$$

$$v_c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$$E = \rho v_c^2 = \rho \frac{L^2}{t_c^2}$$



(b)

20

## آزمایش زمان طی شده مسیر موج Travel-Time Test برای تعیین سرعت طولی و عرضی

دیاگرام شماتیک وسایل اندازه‌گیری سرعت موج موسوم  
به دستگاه Lawrence & Whitman

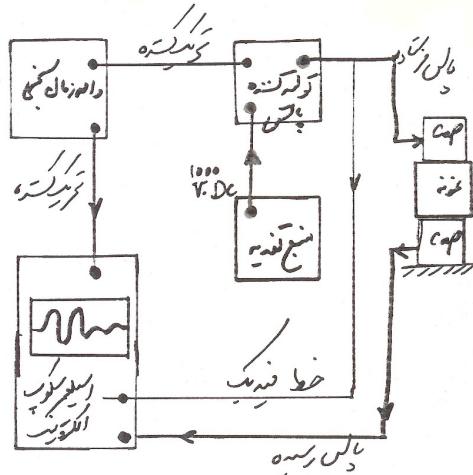
مدول مقید شده و سرعت موج طولی برای نمونه محصور شده را می‌توان از رابطه زیر تعیین کرد:

$$v_c = L/t'_c \quad M = \rho \frac{L^2}{t'_c^2}$$

مدول برشی و سرعت موج عرضی برای نمونه را می‌توان از رابطه زیر تعیین کرد:

$$v_s = L/t_c,$$

$$G = \rho v_s^2 = \rho \frac{L^2}{t_c^2}$$

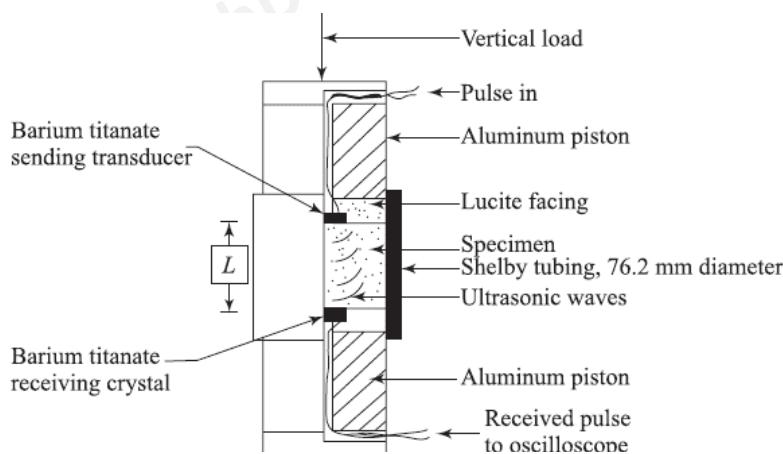


21

## آزمایش زمان طی شده مسیر موج Travel-Time Test برای تعیین سرعت طولی و عرضی

در این روش آزمایش امکان این وجود دارد که همراه با اندازه‌گیری‌های زمان و ... نیرویی را بر نمونه وارد نمود و به عبارتی فشار محوری را بر نمونه افزایش داد. نتایج آزمایش‌ها نشان داده‌اند که سرعت با افزایش فشار محوری افزایش می‌یابد.

این نکته قابل ذکر است که نمونه خاک در یک لوله شلبي به قطر ۳ اینچ پر شده است و نیروی عمودی به وسیله یک پیستون آلومینیومی اعمال می‌گردد. بنابراین نمونه در لوله شلبي از جوانب خود محدود شده است و اندازه‌گیری سرعت طولی محدود شده مبنی خواهد بود.

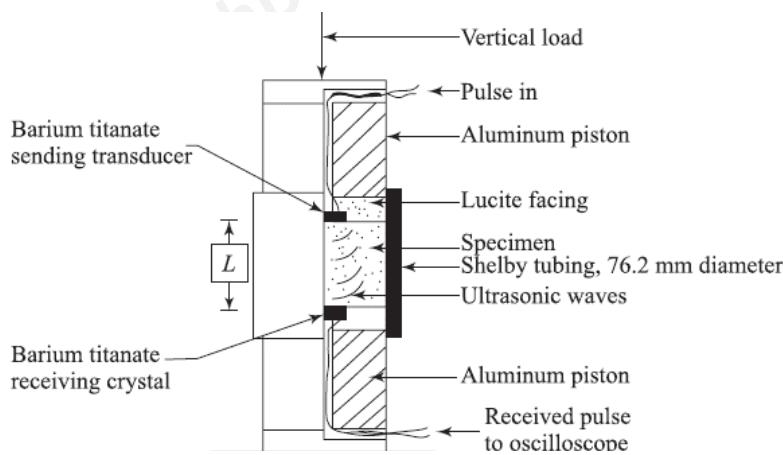


22

## آزمایش زمان طی شده مسیر موج Travel-Time Test برای تعیین سرعت طولی و عرضی

در این روش آزمایش امکان این وجود دارد که همراه با اندازه‌گیری‌های زمان و ... نیرویی را بر نمونه وارد نمود و به عبارتی فشار محوری را بر نمونه افزایش داد. نتایج آزمایش‌ها نشان داده‌اند که سرعت با افزایش فشار محوری افزایش می‌یابد.

این نکته قابل ذکر است که نمونه خاک در یک لوله شلبي به قطر ۳ اینچ پر شده است و نیروی عمودی به وسیله یک پیستون آلومینیومی اعمال می‌گردد. بنابراین نمونه در لوله شلبي از جوانب خود محدود شده است و اندازه‌گیری سرعت طولی محدود شده مبنا خواهد بود.



23

### ۱- انواع آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن

مقاومت برشی خاک رس اشباع و ماسه خشک تحت بارگذاری سریع Unconsolidated-Undrained Triaxial Test

مقاومت برشی خاک رس و ماسه تحت بارگذاری گذرا Unconfined & Confined Compression Test

آزمایش زمان طی شده مسیر موج Travel-Time Test

ستون تشدید Resonant Column Test

تست برش ساده سیکلی Cyclic Simple Shear Test

تست پیچشی ساده سیکلی Cyclic Simple Shear Test

تست سه محوره سیکلی Cyclic Triaxial Tests

24

---

### انواع دستگاه‌های ستون تشدید:

۱- ویلسون و دیتریش ۲- هارдин و ریچارت ۳- هال و ریچارت

### دستگاه ویلسون و دیتریش

دیاگرام شماتیک دستگاه نکات زیر را دربردارد:

#### ۱- برای ارتعاش طولی

- ۱- ارتعاش توسط مولد فرکانس صوتی ۲- مولد فرکانس صوتی و تقویت امواج توسط Amplifier معمولی ۳- پرده متحرک نوسان‌ساز و اتصال آن به یک گیره آلومینیومی حلقوی ۴- گیره حلقوی آلومینیومی فرکانس طبیعی بسیار بزرگ‌تر از فرکانس خاک مورد آزمایش. ۵- نمونه encased در یک محفظه لاستیکی و قبلاً در سلول سه محوری تحکیم یافته ۶- دستگاه نگاشت صدا (صدانگار) جهت دریافت ارتعاشات توسط نوک سوزن واقع در کلاهک نمونه ۷- ثبت نتایج آزمایش بر روی صفحه‌ی نوسان سنج و ترسیم نتایج ۲- برای ارتعاش پیچشی

- ۱- اتصال پرده متحرک از طریق میله آلومینیومی به گیره آلومینیومی که باعث پیچش در انتهای نمونه می‌شود.
- ۲- نمونه خاک درون غشاء لاستیکی و پس از تحکیم در سلوله سه محوری ۳- کلاهک سبک بر بالای نمونه ۴- دستگاه صدانگار نتایج حاصله را ثبت می‌کند.

---

25

---

### انواع دستگاه‌های ستون تشدید:

۱- ویلسون و دیتریش ۲- هارдин و ریچارت ۳- هال و ریچارت

### دستگاه ویلسون و دیتریش

دیاگرام شماتیک دستگاه نکات زیر را دربردارد:

#### ۱- برای ارتعاش طولی

- ۱- ارتعاش توسط مولد فرکانس صوتی ۲- مولد فرکانس صوتی و تقویت امواج توسط Amplifier معمولی ۳- پرده متحرک نوسان‌ساز و اتصال آن به یک گیره آلومینیومی حلقوی ۴- گیره حلقوی آلومینیومی فرکانس طبیعی بسیار بزرگ‌تر از فرکانس خاک مورد آزمایش. ۵- نمونه encased در یک محفظه لاستیکی و قبلاً در سلول سه محوری تحکیم یافته ۶- دستگاه نگاشت صدا (صدانگار) جهت دریافت ارتعاشات توسط نوک سوزن واقع در کلاهک نمونه ۷- ثبت نتایج آزمایش بر روی صفحه‌ی نوسان سنج و ترسیم نتایج ۲- برای ارتعاش پیچشی

- ۱- اتصال پرده متحرک از طریق میله آلومینیومی به گیره آلومینیومی که باعث پیچش در انتهای نمونه می‌شود.
- ۲- نمونه خاک درون غشاء لاستیکی و پس از تحکیم در سلوله سه محوری ۳- کلاهک سبک بر بالای نمونه ۴- دستگاه صدانگار نتایج حاصله را ثبت می‌کند.

---

26

## یادآوری

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \quad v_c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad 2 - \text{میله با شرایط انتهاهای گیردار- آزاد}$$

$$u(x,t) = F(t) \times U(x) = \{A_1 \sin \omega_n t + A_2 \cos \omega_n t\} \times \left\{ B_1 \sin \frac{\omega_n x}{v_c} + B_2 \cos \frac{\omega_n x}{v_c} \right\}$$

برای این حالت محاسبات مشابه شرایط انتهاهای آزاد- آزاد انجام می شود جابجایی در انتهای گیردار صفر است و کرنش در انتهای آزاد صفر است. بنابراین داریم:

$$x=0 \Rightarrow U(x)=0 \Rightarrow B_2=0$$

$$x=L \Rightarrow \frac{dU(x)}{dx}=0 \Rightarrow \frac{B_1 \cdot \omega_n}{V_c} \cos\left(\frac{\omega_n \cdot L}{V_c}\right)=0$$

$$\text{or } \frac{\omega_n \cdot L}{V_c} = (2n-1)\frac{\pi}{2}, n=1,2,3,\dots$$

$$\text{or } \omega_n = \frac{1}{2}(2n-1)\frac{\pi V_c}{L}$$

$$U(x) = B_1 \sin\left(\left(\frac{2n-1}{2}\right)\frac{\pi x}{L}\right)$$

مسئله و

تئوری ارتعاشات

امواج در محیط های ...

خصوصیات دینامیکی ...

ارتعاشات شالوده و پی

ظرفیت باربری دینامیکی

پاسخ لرزه ای زمین

فسارلرزه ای جانبی خاک

تراکم دینامیکی ...

روانگرایی

ماشین مر تعش برروی شمع

پایداری لرزه ای شیروانی

27

## دستگاه ویلسون و دیتریش

### نحوه انجام آزمایش

- ۱- نمونه تحت خلاً قرار داده می شود.
- ۲- نوسان کننده به صورت تدریجی تنظیم می گردد.
- ۳- ارتعاشات در انتهای آزاد نمونه اندازه گیری شده
- ۴- فرکانس تشدید خاک به دست آورده می شود.
- ۵- ارتعاش نمونه معادل ارتعاش یک میله با وضعیت گیردار- آزاد (پایین گیردار- بالا آزاد) می باشد.

$$\omega_n = \frac{1}{2}(2n-1)\frac{\pi V_c}{L} \xrightarrow{n=1} \omega_n = \frac{\pi}{2} \frac{V_c}{L}$$

$$\omega_n = 2\pi f_n$$

$$V_c = 4f_n \cdot L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad E = 16\rho f_n^2 L^2$$

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1$$

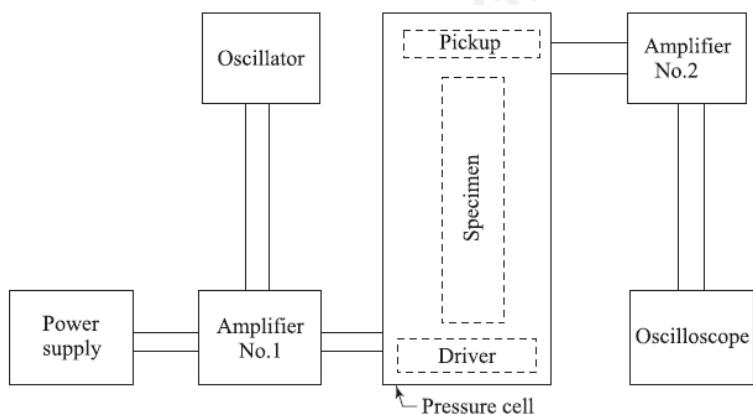
28

### انواع دستگاه‌های ستون تشدید:

۱- ویلسون و دیتریش ۲- هاردین و ریچارت ۳- هال و ریچارت

### دستگاه آزمایش هاردین و ریچارت

دیاگرام شماتیک دستگاه نکات زیر را دربردارد:



29

### دستگاه آزمایش هاردین و ریچارت

۱- مولد نیرو و Amplifier No.1 برای تقویت علائم سینوسی

۲- وارد شدن علائم تقویت شده در یک نوسان‌کننده Oscilator

۳- ایجاد ارتعاش دلخواه توسط Oscilator

۴- نمونه در داخل سلول فشار

۵- وارد نمودن ارتعاش پس از تقویت توسط Amplifier No.1 به پایین نمونه

۶- گرفتن پاسخ در بالای آزاد نمونه و وارد نمودن آنها به Amplifier No.2

۷- تجزیه و تحلیل امواج فرستاده و رسیده توسط Oscilloscope

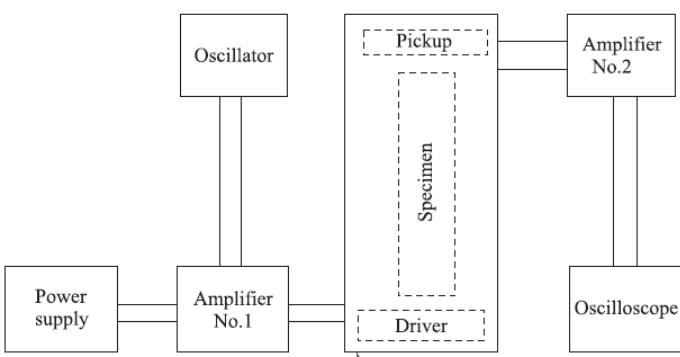
۸- نمونه در داخل سلول فشار به صورت شرایط انتهایی آزاد-آزاد یک تیر مدل می‌شود:

$$V_C = \omega_n \cdot L / n\pi$$

$$V_c = \omega_n \cdot L / \pi = 2\pi f_n L / \pi, \quad n = 1$$

$$V_c = 2f_n \cdot L \Rightarrow V_c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 2f_n \cdot L$$

$$E = 4f_n^2 \rho L^2$$



30

---

## دستگاه آزمایش هارдин و ریچارت

$$V_c = 2f_n \cdot L \Rightarrow V_c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 2f_n \cdot L$$

$$E = 4f_n^2 \rho L^2$$

برای ارتعاشات طولی داریم:

$$V_s = 2f_n \cdot L$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = 2f_n \cdot L \Rightarrow G = 4f_n^2 \rho L^2$$

برای ارتعاشات پیچشی داریم:

---

31

---

## دستگاه آزمایش ستون تشدید



---

32

---

### انواع دستگاه‌های ستون تشدید:

۱- ویلسون و دیتریش ۲- هاردین و ریچارت ۳- هال و ریچارت

### دستگاه آزمایش هال و ریچارت

- ۱- طرح کلی شبیه دستگاه قبلی با این تفاوت که از مگنت‌های القایی با قرارگیری وضعیت‌های مختلف (Different Configuration) برای ایجاد نوسانات پیچشی و یا طولی به کار رفته است.
- ۲- نمونه در پایین گیردار و در بالا آزاد بوده است.
- ۳- گیرنده و نوسان‌کننده هر دو در بالای نمونه هستند.
- ۴- کوپل القایی بین گیرنده و نوسان‌کننده ایجاد می‌شود که خطای ایجاد می‌کند ولی قابل اصلاح است.
- ۵- قرارگیری کوپل‌ها در وضعیت‌های مختلف می‌تواند ارتعاش پیچشی و یا طولی به وجود آورد.
- ۶- از آنجایی که وسایل متعلقه در بالای نمونه خاک دارای جرم می‌گردند معادله کلی حرکت دستخوش تغییر می‌شود و باید برای جرم اضافی بالای نمونه معادله دیفرانسیل جدید نوشته شود.

---

33

---

### دستگاه آزمایش هال و ریچارت

در آزمایش ستون تشدید شده در حالت گیردار- آزاد وسایل تحریک و ایجاد ارتعاش باید به بالای نمونه وصل شوند و این شرایط مفروض را که منجر به تعیین  $\omega_n = (2n-1)\pi V_c / (2L)$  گردید تغییر می‌دهد در نتیجه معادلاتی که برای وضعیت گیردار- آزاد نوشته شده باید اصلاح گردد. فرض: آنچه که به بالای نمونه متصل می‌شوند را با جرم  $m$  معادل سازیم

$$u(x, t) = U(x)(A_1 \sin \omega_n t + A_2 \cos \omega_n t)$$

$$U(x) = B_1 \sin\left(\frac{\omega_n \cdot x}{V_c}\right) + B_2 \cos\left(\frac{\omega_n \cdot x}{V_c}\right)$$

$$x = 0 \Rightarrow U(x) = 0 \Rightarrow B_2 = 0 \Rightarrow U(x) = B_1 \sin\left(\frac{\omega_n \cdot x}{V_c}\right)$$

$$u(x, t) = B_1 \sin\left(\frac{\omega_n \cdot x}{V_c}\right)(A_1 \sin \omega_n t + A_2 \cos \omega_n t)$$

اما در  $x = L$  نیروی اینرسی  $F$  از جرم  $m$  بر روی ستون خاک اثر می‌کند و به صورت:

$$F = -m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{F}{AE}$$

---

34

## دستگاه آزمایش هال و ریچارت

$$u(x,t) = B_1 \sin\left(\frac{\omega_n \cdot x}{V_c}\right)(A_1 \sin \omega_n t + A_2 \cos \omega_n t)$$

$$\begin{cases} F = -m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{F}{AE} \end{cases} \Rightarrow \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{m}{AE} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

سطح مقطع نمونه  $E$  ضریب ارتجاعی نمونه:  $A$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \left( \frac{B_1 \cdot \omega_n}{V_c} \right) \left[ \cos\left(\frac{\omega_n \cdot x}{V_c}\right) \right] (A_1 \sin \omega_n t + A_2 \cos \omega_n t)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\omega_n^2 B_1 \sin\left(\frac{\omega_n \cdot x}{V_c}\right) (A_1 \sin \omega_n t + A_2 \cos \omega_n t)$$

جاگذاری  $\rightarrow$   $\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{m}{AE} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$

$$\frac{A \cdot E}{V_c} \cos\left(\frac{\omega_n \cdot x}{V_c}\right) = m \cdot \omega_n \cdot \sin\left(\frac{\omega_n \cdot x}{V_c}\right) \Rightarrow A \cdot E = m \cdot \omega_n \cdot V_c \cdot \tan\left(\frac{\omega_n \cdot L}{V_c}\right)$$

35

## دستگاه آزمایش هال و ریچارت

$$\frac{A \cdot E}{V_c} \cos\left(\frac{\omega_n \cdot x}{V_c}\right) = m \cdot \omega_n \cdot \sin\left(\frac{\omega_n \cdot x}{V_c}\right) \Rightarrow A \cdot E = m \cdot \omega_n \cdot V_c \cdot \tan\left(\frac{\omega_n \cdot L}{V_c}\right)$$

$$\frac{E = \frac{V^2}{\rho}}{\alpha = \frac{\omega_n \cdot L}{V_c}} \Rightarrow A \cdot V_c^2 \cdot \rho = m \cdot \omega_n \cdot V_c \cdot \tan\left(\frac{\omega_n \cdot L}{V_c}\right) \Rightarrow \frac{A \cdot L \cdot \gamma}{W} = \frac{A \cdot L \cdot \rho}{m} = \alpha \tan \alpha$$

$$\alpha = \frac{\omega_n \cdot L}{V_c} = \frac{2\pi f_n \cdot L}{V_c} \Rightarrow V_c = \frac{2\pi f_n \cdot L}{\alpha}, E = 39.48 \left( \frac{f_n^2 \cdot L^2}{\alpha^2} \right) \rho$$

$(AL\gamma)/W$	$\alpha$ (radians)	که در آن $m$ جرم ملحقات بالای نمونه خاک و $\rho$ جرم مخصوص خاک است. مقدار آلفا از جدول رویرو یا روش صحیح الخطا قابل تعیین است.
0.1	0.32	
0.3	0.53	
0.5	0.66	
0.7	0.75	
1	0.86	
2	1.08	
4	1.27	
10	1.43	

36

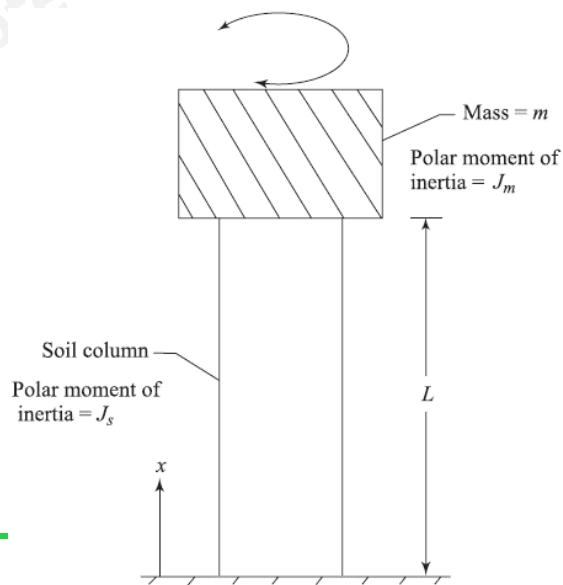
## دستگاه آزمایش هال و ریچارت

با تحلیل مشابه برای تشیدید پیچشی و آزمایش ستون تشیدید هرگاه نمونه‌ای با شرایط انتهایی گیردار آزاد تشیدید پیچش گردد، جرم قسمت‌های نوسان‌کننده و حرکتزا را می‌توان در نظر گرفت و در تحلیلی مشابه می‌توان به دست آورد:

$$\frac{J_s}{J_m} = \frac{\omega_n \cdot L}{V_s} \tan\left(\frac{\omega_n \cdot L}{V_s}\right) = \alpha \tan \alpha$$

که در آن  $J_s$  ممان اینرسی قطبی نمونه خاک و  $J_m$  ممان اینرسی قطبی ملحقات با جرم برابر  $m$  است.

$$V_s = \frac{\omega_n L}{\alpha} = \frac{2\pi f_n L}{\alpha} \Rightarrow G = \rho V_s^2 = 39.48 \left( \frac{f_n^2 \cdot L^2}{\alpha^2} \right) \rho$$

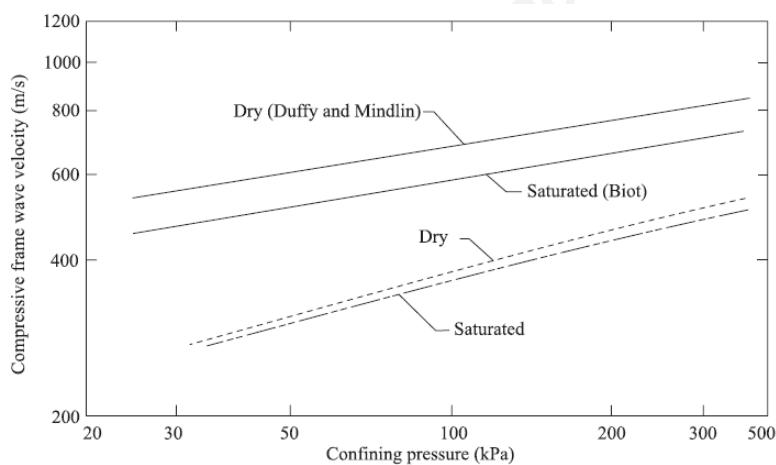


37

## بحث روی نتایج آزمایشگاهی ستون تشیدید

ستون تشیدید با شرایط آزاد-آزاد و گیردار-آزاد، ساخت هارдин و ریچارت و هال و ریچارت. نتایج کلی به دست آمده از گراف شکل زیر عبارتند از:

الف- مقادیر  $V_c$ ,  $V_s$  خاک با افزایش فشار مؤثر متوسط اعمال شده  $\bar{\sigma}_0$  افزایش می‌یابد.



38

## امواج در محیط های ارتجاعی پیوسته

### یادآوری

چند نکته اساسی:

۶- امواج در محیط های خاک اشباع از دو طریق دانه های خاک و آب داخل حفرات انتشار می یابد. تحقیقات کاملی توسط بایوت در سال ۱۹۵۶ در این رمینه انجام گرفت. در آن مطالعه نشان میدهد که دو موج فشاری و یک نوع موج برشی در محیط اشباع وجود دارد. برخی پژوهشگران اشاره کردند که یک موج فشاری از طریق سیال انتقال می یابد و موج دیگر از طریق بخش جامد خاک. مسلمان انتشار این دو موج بطور مجزا نیست و حرکت بصورت همبسته است. در مورد انتشار موج برشی فقط بسته به مشخصات دانه های خاک دارد و مرتبط به سیال بین حفرات نیست.

تئوری ارتعاشات

امواج در محیط های ...

خصوصیات دینامیکی ...

ارتعاشات شالوده و پی

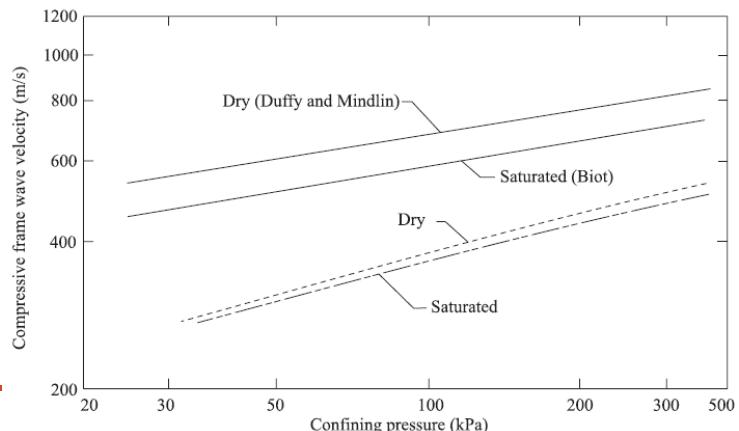
ظرفیت باربری دینامیکی

مقایسه سرعت موج فشاری در خاک ماسه ای اوتاوا  
به صورت خشک و اشباع در دو حالت تئوری و  
آزمایشگاهی Hardin and Richart, 1963

$$v_c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

حالت تئوری:

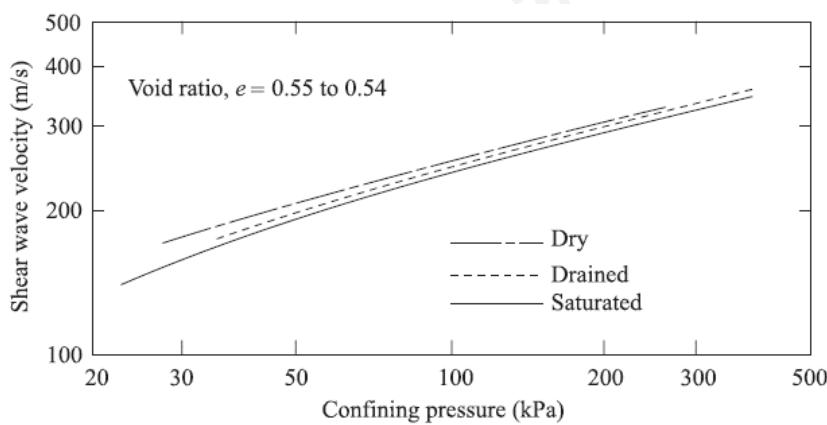
39



### بحث روی نتایج آزمایشگاهی ستون تشدید

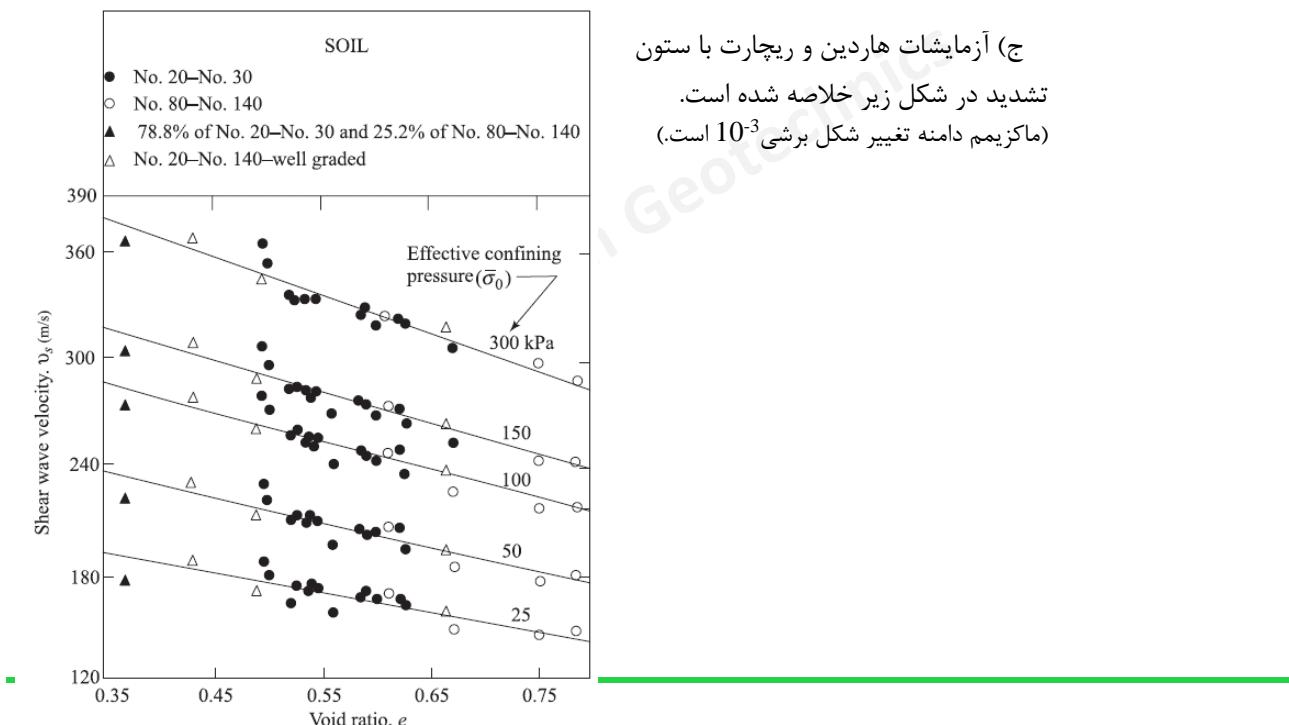
ب- مقادیر  $V_s$ ,  $V_c$  خاک اشباع شده اندکی کمتر از مقادیر مشابه خاک خشک است.

دلیل آن این است که به علت پر شدن فضای خالی خاک با آب دانسیته افزایش پیدا نموده است در نتیجه سرعتها در حالت اشباع کمتر است.



40

## بحث روی نتایج آزمایشگاهی ستون تشدید



### ۱- انواع آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن

مقاومت برشی خاک رس اشباع و ماسه خشک تحت بارگذاری سریع  
Unconsolidated-Undrained Triaxial Test

مقاومت برشی خاک رس و ماسه تحت بارگذاری گذرا  
Unconfined & Confined Compression Test

آزمایش زمان طی شده مسیر موج Travel-Time Test

ستون تشدید Resonant Column Test

تست برش ساده سیکلی Cyclic Simple Shear Test

تست پیچشی ساده سیکلی Cyclic Simple Shear Test

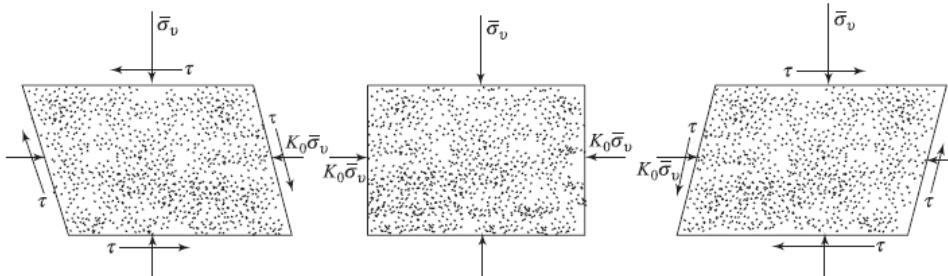
تست سه محوره سیکلی Cyclic Triaxial Tests

## آزمایش برش ساده سیکلی

### عمل لروم انجام آزمایش

شرایط تنش‌ها در آزمایش سه‌محوری نمی‌تواند به خوبی وضعیت واقعی تنش‌ها در عمل را مدل‌سازی نماید سهم عمدۀ تغییر‌شکل‌های حاصله در خاک ممکن است در اثر انتشار رو به بالای امواج برشی ناشی از لایه‌های زیرین است مطابق شکل زیر، یک المان خاک ممکن است تحت اثر تعداد قابل ملاحظه‌ای از تنش‌ها یا تغییر‌شکل‌های نوسانی قرار گیرد.

هنگام زلزله المان فوق تحت اثر یک تنش نرمال مشخص و ثابت تنش‌های برشی بر روی نمونه تغییر جهت داده و در نتیجه تنش‌های اصلی بر نمونه خاک نیز به طور سیکلی تغییر جهت می‌دهند و به اندازه  $\theta$  به چپ و راست دوران می‌کنند.



43

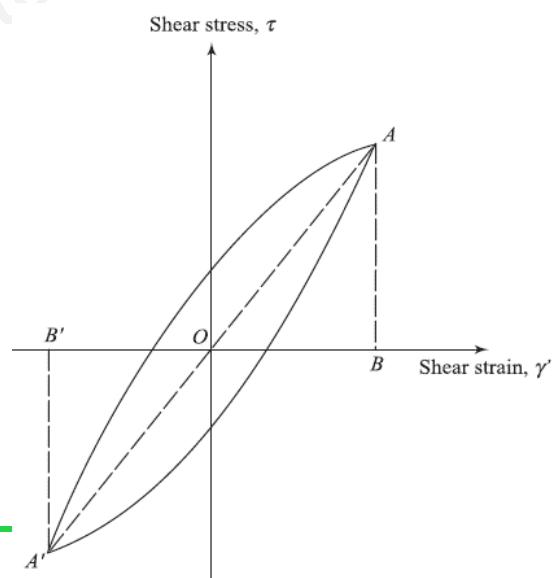
## آزمایش برش ساده سیکلی

ارتفاع قالب دستگاه آزمایش برش ساده معمولاً بین ۲۰ تا ۳۰ میلیمتر و به اضلاع ۶۰ تا ۸۰ میلیمتر است. نمونه خاک ابتدا تنش قائم اعمال می‌شود و سپس تحت تنش برشی سیکلی قرار می‌گیرد. مسلماً محل زوایای قالب با استفاده از لو لاها بهم متصل شده‌اند.

**محاسبه مدول برشی و ضریب میرایی:**

$$G = \frac{\text{amplitude of cyclic shear stress, } \tau}{\text{amplitude of cyclic shear strain, } \gamma'}$$

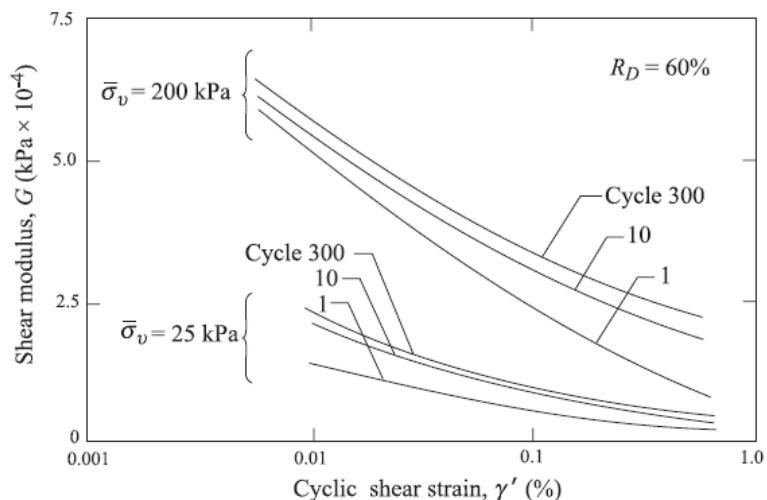
$$D = \frac{1}{2\pi} \frac{\text{area of the hysteresis loop}}{\text{area of triangle } OAB \text{ and } OA'B'}$$



44

## نتایج آزمایش برش ساده (Silver and Seed, 1971) بر روی ماسه نیمه متراکم

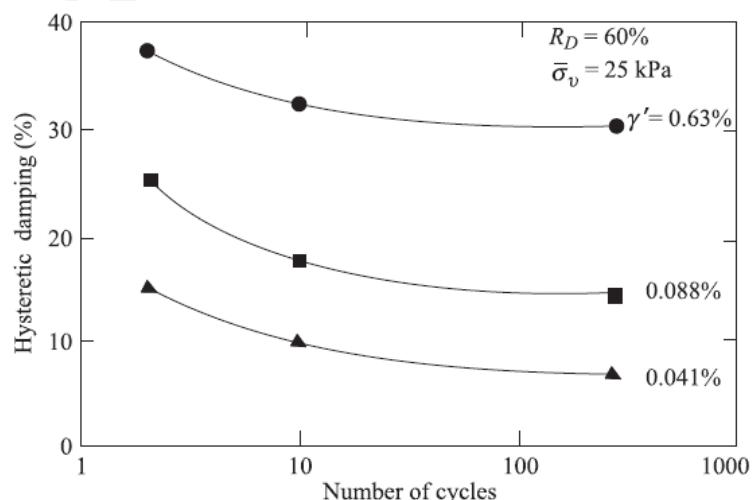
- ۱- در یک مقدار مشخصی از کرنش برشی و تنش موثر قائم، مدول برشی با افزایش تعداد سیکل، افزایش می یابد. این افزایش در ۱۰ سیکل ابتدایی چشمگیرتر است.
- ۲- در یک مقدار مشخصی از تنش موثر قائم و تعداد سیکل یکسان، با افزایش کرنش برشی، مدول برشی کاهش می یابد.
- ۳- در یک مقدار مشخصی از کرنش برشی و تعداد سیکل یکسان، با افزایش تنش موثر قائم، مدول برشی نیز افزایش می یابد.



45

## نتایج آزمایش برش ساده (Silver and Seed, 1971) بر روی ماسه نیمه متراکم

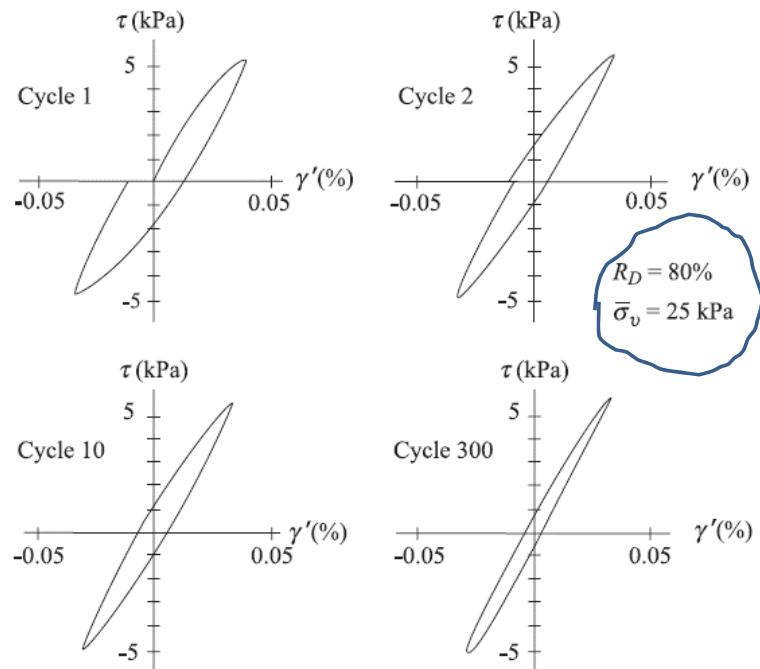
- ۱- در یک مقدار مشخصی از کرنش برشی و تنش موثر قائم، ضریب میرایی با افزایش تعداد سیکل، کاهش می یابد.
- ۲- در یک مقدار مشخصی از تنش موثر قائم و تعداد سیکل یکسان، با کاهش کرنش برشی، ضریب میرایی کاهش می یابد.
- ۳- در یک مقدار مشخصی از کرنش برشی و تعداد سیکل یکسان، با افزایش تنش موثر قائم، ضریب میرایی نیز کاهش می یابد.



46

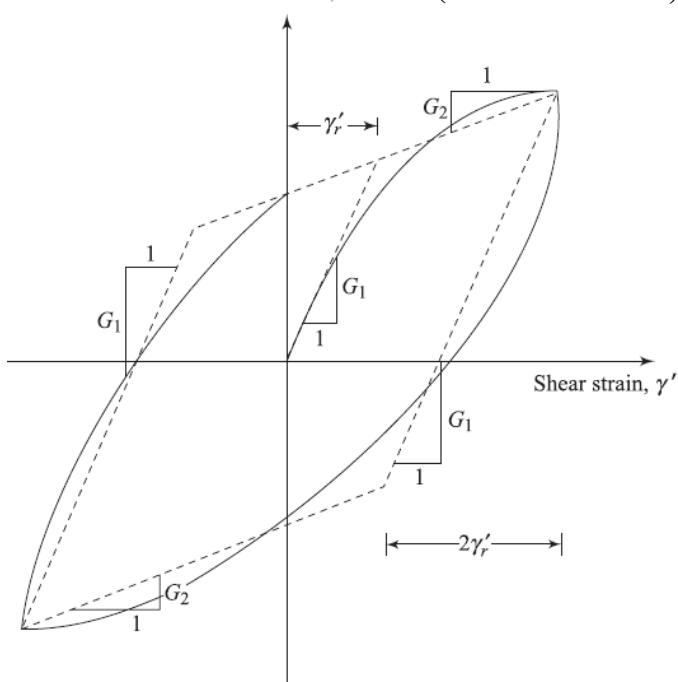
## نتایج آزمایش برش ساده (Silver and Seed, 1971) بر روی ماسه نیمه متراکم

نتایج قبلی برای ماسه متراکم نیز برقرار است. همچنین میتوان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد سیکل در یک کرنش یکسان، میرایی کاهش می‌یابد.



47

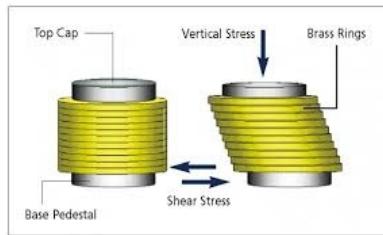
## مدل دوخطی ایده آل (Thiers and Seed, 1968)



48

## مزیت آزمایش برش ساده سیکلی

- شرایط آزمایش در این سیستم به مراتب واقعی‌تر از دستگاه ستنی با قالب صلب است.
- (ماکریم) دامنه تغییر شکل برشی در آزمایش ستون تشدید برابر با  $10^3$  است. در صورتی که در آزمایش برش ساده سیکلی محدوده قابل قبول کرنش در رنج  $10^{-2}$  تا ۵٪ است.
- در این آزمایش اضافه فشار آب حفره‌ای نیز قابل اندازه گیری است.
- اعمال تنش‌های برشی سیکلی امکان‌پذیر است. پتانسیل سیلان خاک‌ها قابل بررسی است.



49

### ۱- انواع آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن

مقاومت برشی خاک رس اشباع و ماسه خشک تحت بارگذاری سریع  
Unconsolidated-Undrained Triaxial Test

مقاومت برشی خاک رس و ماسه تحت بارگذاری گذرا  
Unconfined & Confined Compression Test

آزمایش زمان طی شده مسیر موج  
Travel-Time Test

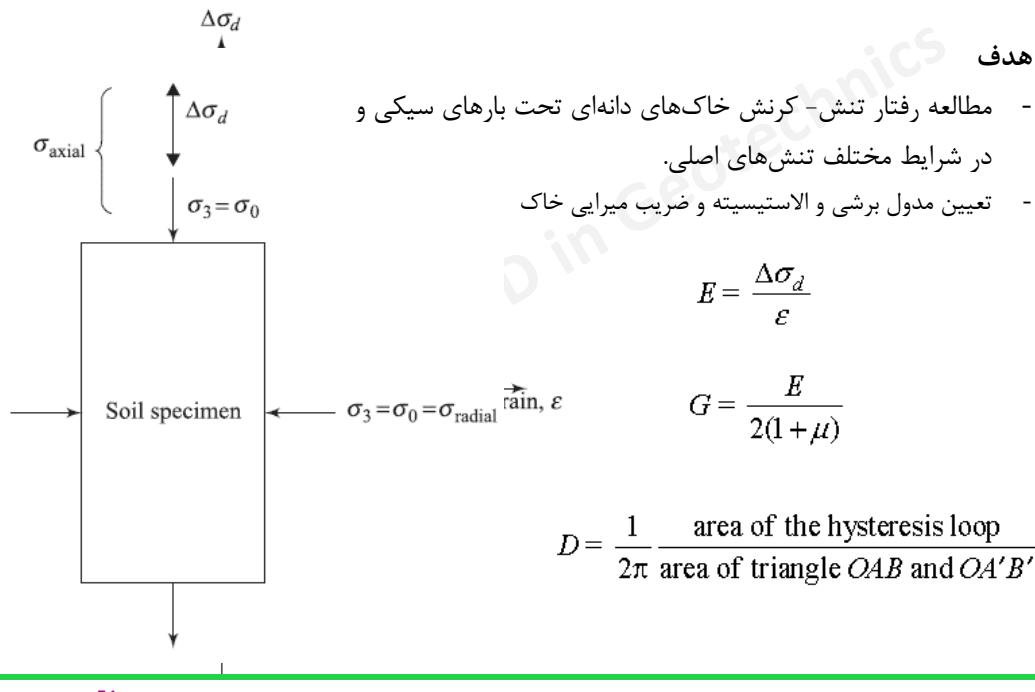
ستون تشدید  
Resonant Column Test

تست برش ساده سیکلی  
Cyclic Simple Shear Test

تست پیچشی ساده سیکلی  
Cyclic Simple Shear Test

تست سه محوره سیکلی  
Cyclic Triaxial Tests

## آزمایش سه محوری سیکلی



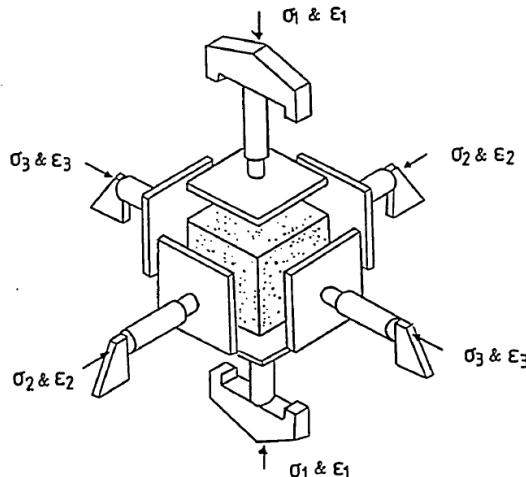
51

نواقص دستگاه آزمایش فشاری سه محوری معمولی در تست‌های استاتیک و دینامیک شامل:

- امکان استفاده از دستگاه آزمایش فشاری سه محوری معمولی برای بارهای سیکلی وجود دارد اما چنین دستگاهی حتی در تست‌های معمول و استاتیک نیز دارای نواقص متعدد هستند.
- محور (شاфт) بارگذاری دارای اصطکاک با بدنه سلول می‌باشد و مقداری از انرژی و نیروی تحمیلی بدنه را جذب می‌کند.
- صفحات صلب بالایی و پایینی که نمونه خاک را دربرمی‌گیرند اصطکاک دارند و موجب گیرداری بین نمونه و صفحات و محور بالایی شده که تنش برشی روی Upper & lower flatten ها می‌نمایند.
- چرخش محورهای اصلی به میزان (چرخش محور تنش‌های اصلی) دلخواه غیرممکن بوده و برای سنگ و خاکهای غیرایزوتوپ قابل استفاده نیست.
- دوتای از تنش‌های اصلی ناچارا مساوی بوده ( $\sigma_3 = \sigma_2$ ) و مطالعه شرایط نامتقارن مرکزی و نیز تأثیر تنش اصلی متوسط بر رفتار نمونه غیرممکن است.
- کاربرد عملی دستگاه محدود به تعداد محدودی از موارد عملی می‌باشد.

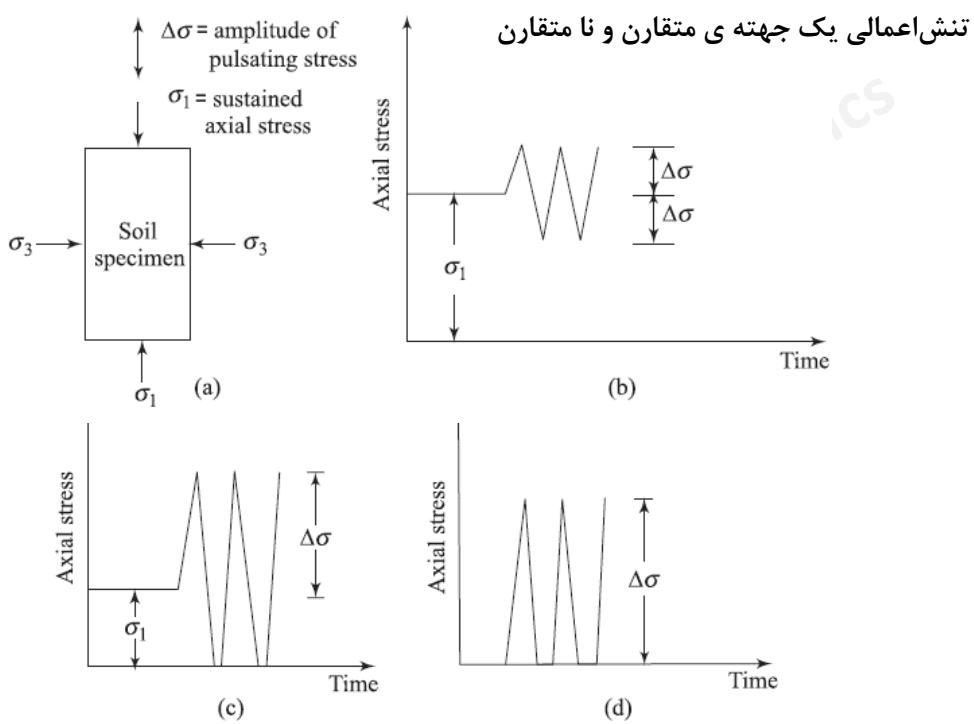
52

## وضعیت تنش‌های سه‌محوری واقعی - آزمایش سه‌محوری واقعی



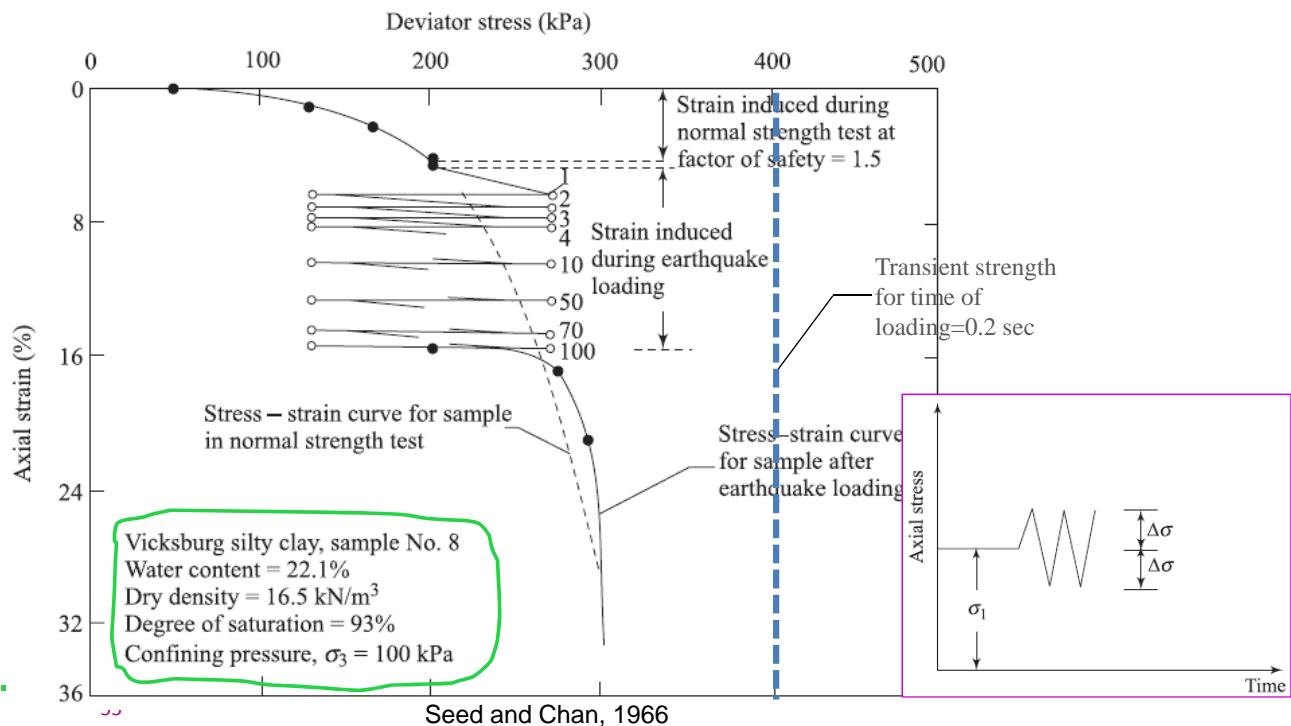
وضعیت کلی سه‌محوری  $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$  دستگاهی که قادر به اعمال تنش‌ها و تغییرشکل‌های اصلی مستقل و متفاوت از یکدیگر مطابق شکل بر نمونه خاک باشد دستگاه آزمایش سه‌محوری واقعی می‌باشد.  
بر پایه چنین مطالبی ساخت دستگاه‌های تست فشاری بر روی نمونه‌های کاملاً معکبی و متعلقات و ضمائم در دستور مطالعه محققان از سه دهه قبل بوده است. یک نمونه جدید از این دستگاه‌ها، دستگاه SCTA (SimpLe Cubic TriaxiaL Apparatus) می‌باشد که قادر به اعمال تنش‌های استاتیکی و دینامیکی در شرایط مختلف از نظر تقيید جانبی نمونه بوده و رفتار تنش-کرنش خاک‌ها در حالات متفاوت مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

53

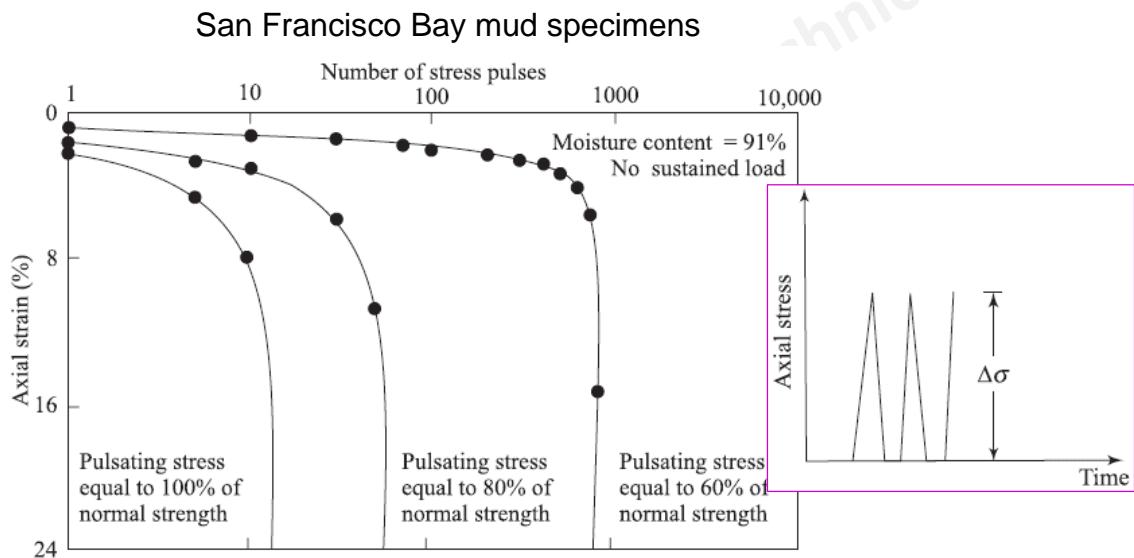


54

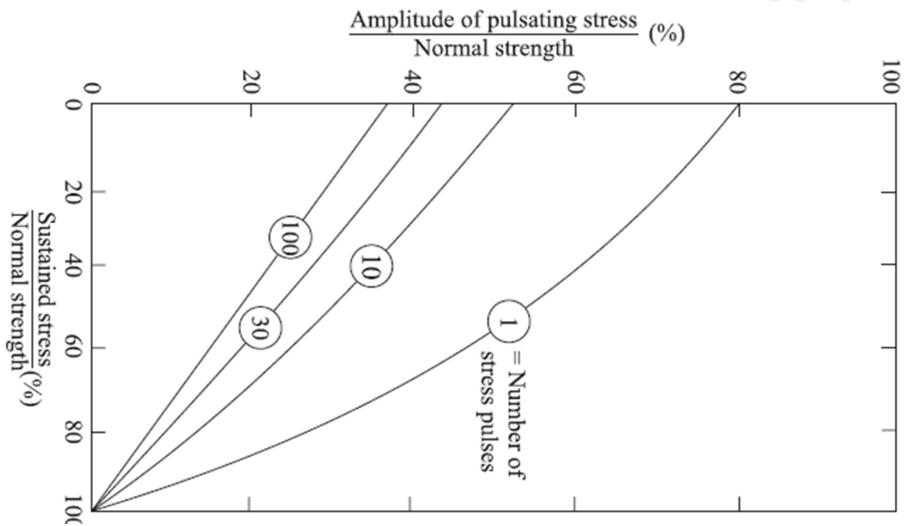
### نتایج آزمایش سه محوری سیکلی بر روی رس سیلت دار Vicksburg silty clay



### نتایج آزمایش سه محوری سیکلی بر روی مات San Francisco Bay mud



## نتایج آزمایش سه محوری سیکلی بر روی مات



57

Seed and Chan, 1966

### ۱- انواع آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن

مقاومت برشی خاک رس اشباع و ماسه خشک تحت بارگذاری سریع  
Unconsolidated-Undrained Triaxial Test

مقاومت برشی خاک رس و ماسه تحت بارگذاری گذرا  
Unconfined & Confined Compression Test

آزمایش زمان طی شده مسیر موج

Travel-Time Test

ستون تشدید

Resonant Column Test

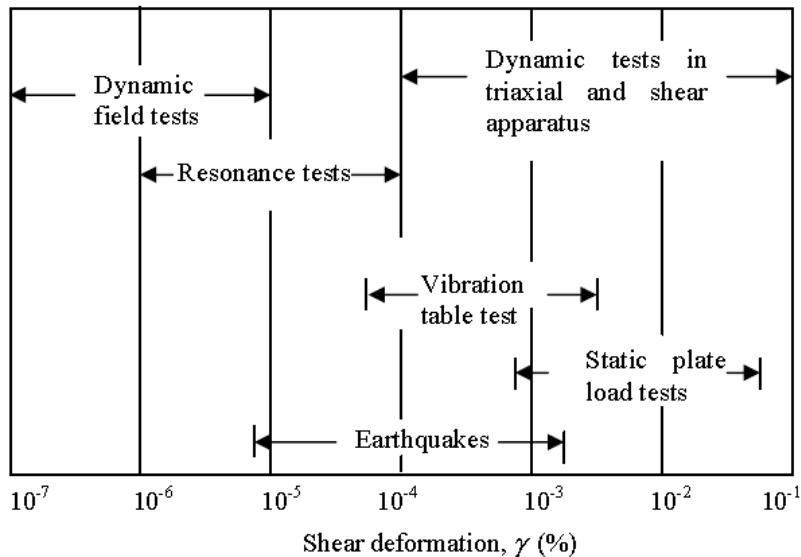
تست برش ساده سیکلی

تست پیچشی ساده سیکلی

تست سه محوره سیکلی

### جمع بندی و خلاصه آزمایش های سیکلی

ما باید بدانیم که کدام تست برای تعیین مشخصات دینامیکی خاک مناسب تر است و تغییرات کرنشها در چه اندازه ای قرار دارند.



59

### جمع بندی و خلاصه آزمایش های سیکلی

کیفیت نسبی خصوصیات تعیین شده از تست های آزمایشگاهی:

	Relative Quality of Test Results				
	Shear modulus	Young's modulus	Material damping	Effect of number of cycles	Attenuation
Resonant column with application	Good -	Good -	Good -	Good -	- Fair
Ultrasonic pulse	Fair	Fair	-	-	Poor
Cyclic triaxial	-	Good	Good	Good	-
Cyclic simple shear	Good	-	Good	Good	-
Cyclic torsional shear	Good	-	Good	Good	-

a After Silver (1981)

## جمع بندی و خلاصه آزمایش های سیکلی

خصوصیات قابل اندازه گیری در تست های آزمایشگاهی:

	Cyclic simple			
Load	Resonant column	Cyclic triaxial	shear	Torsional shear
Deformation				
Axial	Vertical displacement	Vertical displacement	Vertical displacement	Vertical displacement
Shear	Acceleration	Not measured	Horizontal displacement	Rotation
Lateral	Not usually measured	Not usually measured	Often controlled	Not usually measured
Volumetric	None for undrained tests Volume of fluid moving into or out of the sample for drained tests			
Pore water pressure	Not usually measured	Measured at boundary	Measured at boundary	Measured at boundary

<sup>a</sup>After Silver (1981)

61

۱- انواع آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن

۲- انواع ارما و صحرایی و اندازه گیری های محلی

۳- تخمین پارامترهای دینامیکی سدا، برشی و میرایی با استفاده از روابط تبری

تقسیم بندی  
فصل چهارم

## ۲- انواع آزمایش صحرایی و اندازه گیری های محلی

روش شکست امواج Seismic Refraction Surveys

روش انعکاس امواج Seismic Reflection Surveys

روش انتشار امواج سطحی Subsoil Exploration by Steady-State Vibration

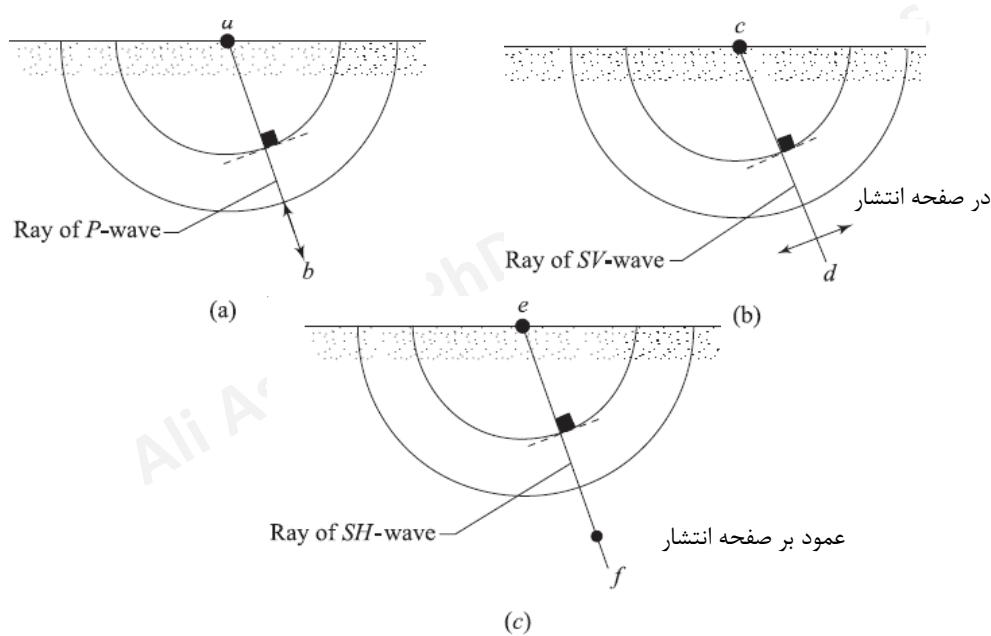
روش گمانه با انتشار امواج به صورت نزولی و یا صعودی Shooting Up/Down the Hole

روش گمانه با انتشار امواج عبوری در خاک Cross-Hole Shooting

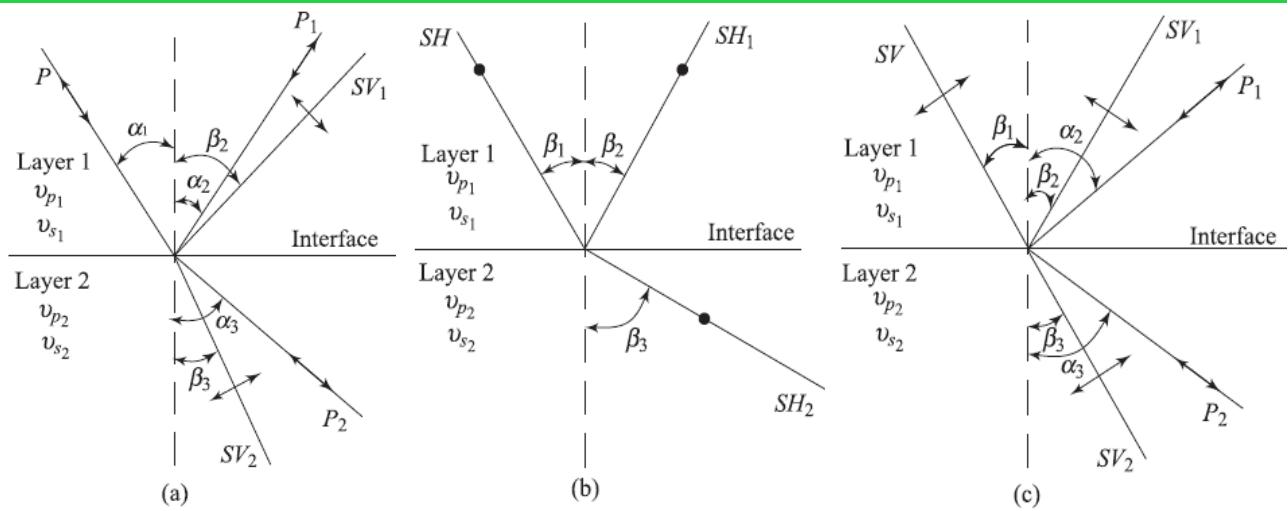
آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی Cyclic Field Plate Load Test

63

انواع امواج حجمی: موج طولی p و برشی S

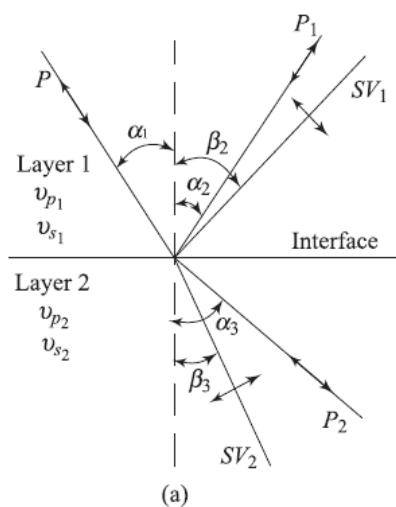


64



موج انكسار یافته			موج انعکاس یافته			موج برخوردي		
شكل مربوطه	نامگذاري موج در شكل	نوع موج	نامگذاري موج در شكل	نوع موج	Incident (i)			
a	SV <sub>2</sub> , P <sub>2</sub>	SV, P	SV <sub>1</sub> , P <sub>1</sub>	SV, P	P			
b	SH <sub>2</sub>	SH	SH <sub>1</sub>	SH	SH			
c	SV <sub>2</sub> , P <sub>2</sub>	SV, P	SV <sub>1</sub> , P <sub>1</sub>	SV, P	SV			

65

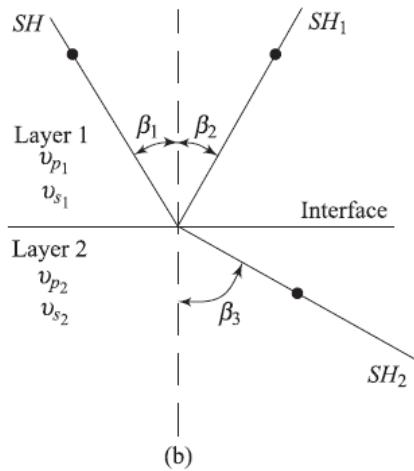


## پدیده انعکاس و انكسار امواج حجمی در مصالح

امواج تنشی ارجاعی هنگامی که به مرز بین دو لایه از مصالح مختلف برخورد نمایند، می‌شکنند و منعکس می‌شوند. اگر امواج تنشی برخوردي از نوع P فشاری باشند آنگاه بصورت امواج P و SV هم منعکس پیدا می‌کنند و هم می‌شکنند.

$$\alpha_1 = \alpha_2, \quad \frac{\sin \alpha_1}{V_{p1}} = \frac{\sin \alpha_2}{V_{p2}} = \frac{\sin \beta_2}{V_{s1}} = \frac{\sin \alpha_3}{V_{p2}} = \frac{\sin \beta_3}{V_{s2}}$$

## پدیده انعکاس و انكسار امواج حجمی در مصالح

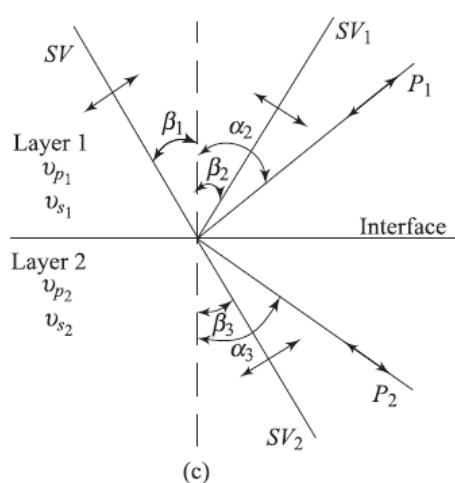


اگر امواج تنشی برخوردی از نوع SH باشند آنگاه بصورت همان امواج SH هم منعکس پیدا می کنند و هم می شکنند.

$$\beta_1 = \beta_2, \quad \frac{\sin \beta_1}{V_{s1}} = \frac{\sin \beta_3}{V_{s2}}$$

67

## پدیده انعکاس و انكسار امواج حجمی در مصالح



اگر امواج تنشی برخوردی از نوع SV باشند آنگاه بصورت امواج P و SV هم منعکس پیدا می کنند و هم می شکنند.

$$\beta_1 = \beta_2, \quad \frac{\sin \beta_1}{V_{s1}} = \frac{\sin \alpha_2}{V_{p1}} = \frac{\sin \beta_2}{V_{s1}} = \frac{\sin \beta_3}{V_{s2}} = \frac{\sin \alpha_3}{V_{p2}}$$

68

## ۲- انواع آزمایش صحرایی و اندازه گیری های محلی

روش شکست امواج Seismic Refraction Surveys

روش انعکاس امواج Seismic Reflection Surveys

روش انتشار امواج سطحی Subsoil Exploration by Steady-State Vibration

روش گمانه با انتشار امواج به صورت نزولی و یا صعودی Shooting Up/Down the Hole

روش گمانه با انتشار امواج عبوری در خاک Cross-Hole Shooting

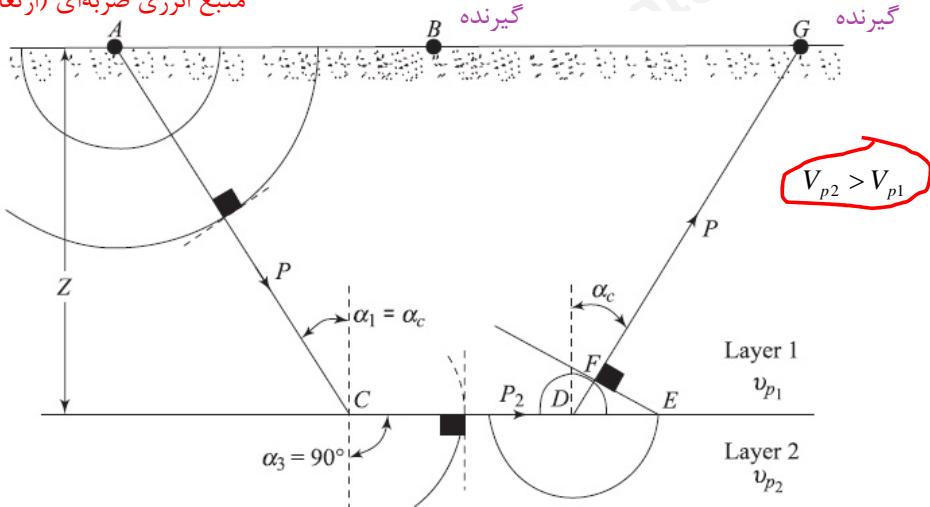
آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی Cyclic Field Plate Load Test

69

### بررسی انكسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی

این بررسی‌ها بیشتر به منظور تعیین سرعت امواج ارتعاشی و نیز مشخصات مکانیکی مصالح و همچنین برای تعیین ضخامت لایه‌ها به کار می‌روند.

منبع انرژی ضربه‌ای (ارتعاش)



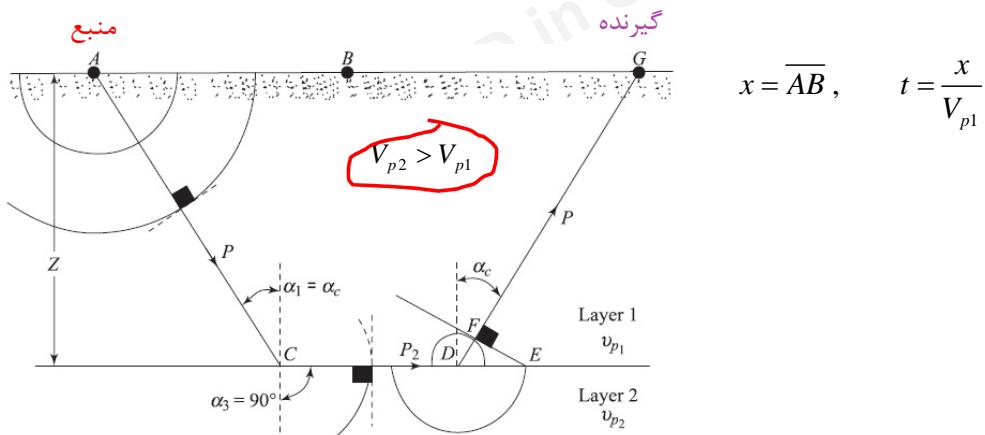
70

## بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی

### فرضیات

نقطه‌ی A منبع انرژی ضربه‌ای (ارتعاش) گیرنده در نقطه B یا هر نقطه دلخواه دیگر در فاصله  $x$ .

زمان حرکت موج P از طریق غیرمستقیم و از طریق لایه بالا:



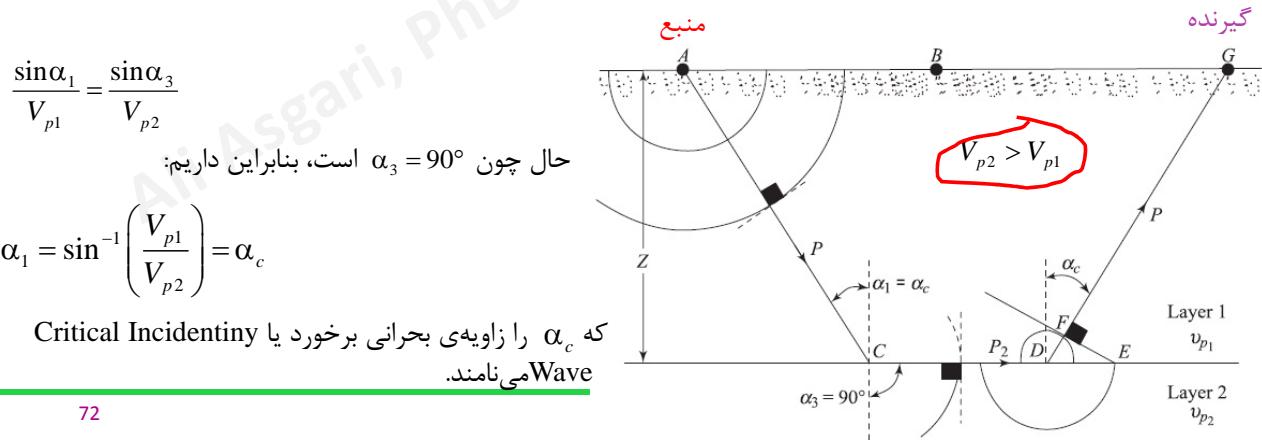
71

$$x = \overline{AB}, \quad t = \frac{x}{V_{p1}}$$

## بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی

اما زمان حرکت موج P که از طریق غیرمستقیم به نقطه G که در فاصله‌ای دورتر از B قرار دارد چگونه به دست می‌آید؟

موج کروی P که در A تولید شده به فصل مشترک دولایه می‌خورد از میان جبهه امواج نقطه C در مرز دو لایه را می‌توان چنان یافت که موج شکسته شده در راستای فصل مشترک دو لایه قرار گیرد و در موازات آن حرکت نماید (موج P) این موج سرعت  $V_{p2} > V_{p1}$  حرکت می‌کند و بنابراین سریع‌تر است از معادلات گفته شده قبل.



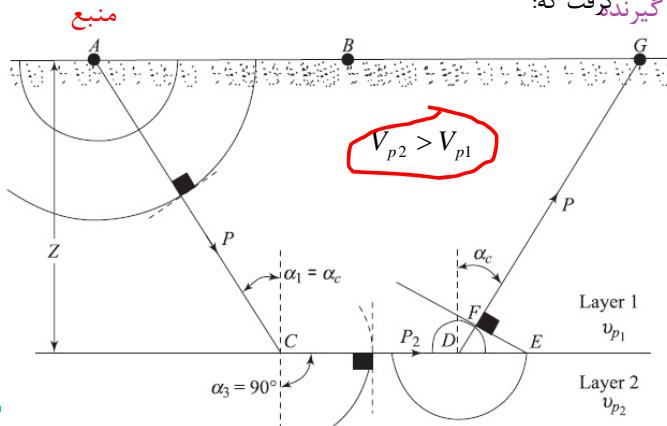
72

## بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی

$$x = \overline{AB}, \quad t = \frac{x}{V_{p1}} \quad \alpha_1 = \sin^{-1} \left( \frac{V_{p1}}{V_{p2}} \right) \alpha_c$$

حال این جبهه موج که با سرعتی معادل  $V_{p2}$  در موازات مرز دو لایه حرکت می‌کند باعث به وجود آمدن تنش‌هایی ارتقای در محل برخورد می‌شود که به نوبه خود جبهه‌هایی از امواج را به سمت لایه بالایی منتشر می‌نماید که این امواج نیز با سرعت  $V_{p1}$  پخش می‌شوند. حال نقطه‌ای مانند  $D$  را در مرز مشترک دو لایه در نظر می‌گیریم که جبهه امواج کروی منتشر می‌کند (در لایه ۱ و ۲) و این امواج کروی بعد از زمان  $dt$  که به سمت بالا حرکت می‌کند دارای شعاع مساوی  $DF$  می‌شوند در حالی که در همین زمان  $dt$  امواج به سمت پایین دارای شعاع  $DE$  هستند. در نتیجه برآیند جبهه امواج در لایه بالایی بر راستای خط  $EF$  قرار می‌گیرد حال از همین شکل می‌توان نتیجه گیرنده‌گرفت که:

**گیرنده‌گرفت که:**



يعني شعاع موج  $DFG$  با امتداد قائم زاویه‌ی  $i_c$  را می‌سازد.

می‌توان نشان داد که برای  $x > x_c$  امواج  $P$  که از مسیر ACDG حرکت می‌کنند اولین موجی هستند که به نقطه می‌رسند.

73

$$x = \overline{AB}, \quad t = \frac{x}{V_{p1}} \quad \alpha_1 = \sin^{-1} \left( \frac{V_{p1}}{V_{p2}} \right) \alpha_c$$

$$\frac{v_{p1} \cdot \Delta t}{v_{p2} \cdot \Delta t} = \frac{DF}{DE} = \sin i_c$$

## بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی

$$\alpha_1 = \sin^{-1} \left( \frac{V_{p1}}{V_{p2}} \right) \alpha_c$$

مدت زمان طی مسافت توسط امواج  $ACDG$  از مسیر  $P$  برابر است با:

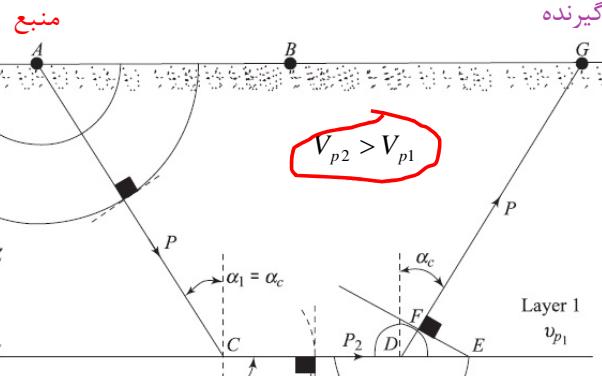
$$t = t_{AC} + t_{CD} + t_{DG}$$

$$t = \left( \frac{Z}{\cos i_c} \right) \frac{1}{V_{p1}} + \frac{x - 2Z \tan i_c}{V_{p2}} + \left( \frac{Z}{\cos i_c} \right) \frac{1}{V_{p1}} = \frac{x}{V_{p2}} - \frac{2Z \sin i_c}{V_{p2} \cos i_c} + \frac{2Z}{V_{p1} \cos i_c}$$

در این روابط  $V_{p2} = V_{p1} / \sin i_c$  و  $x = \overline{AG}$  میباشد، پس:

$$t = \frac{x}{V_{p2}} - \frac{2Z \sin^2 i_c}{V_{p1} \cos i_c} + \frac{2Z}{V_{p1} \cos i_c} = \frac{x}{V_{p2}} + \frac{2Z}{V_{p1}} \left( \frac{1 - \sin^2 i_c}{\cos i_c} \right)$$

$$t = \frac{x}{V_{p2}} + \frac{2Z}{V_{p1}} \cos i_c$$



74

## بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی

$$x = \overline{AB}, \quad t = \frac{x}{v_{p1}}$$

$$\alpha_1 = \sin^{-1} \left( \frac{v_{p1}}{v_{p2}} \right) \alpha_c$$

$$\frac{v_{p1} \cdot \Delta t}{v_{p2} \cdot \Delta t} = \frac{DF}{DE} = \sin i_c$$

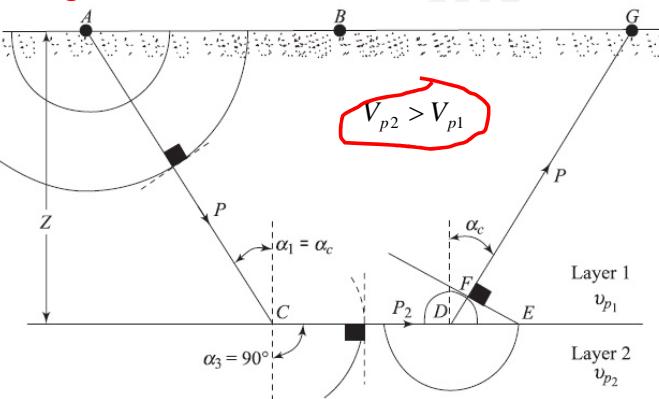
$$t = t_{AC} + t_{CD} + t_{DG}$$



$$t = \frac{x}{v_{p2}} + \frac{2Z}{v_{p1}} \cos i_c, \quad x = \overline{AG}$$

$$\sin i_c = \frac{v_{p1}}{v_{p2}} \Rightarrow \cos i_c = \sqrt{1 - \sin^2 i_c} = \sqrt{1 - \left( \frac{v_{p1}}{v_{p2}} \right)^2}$$

منبع

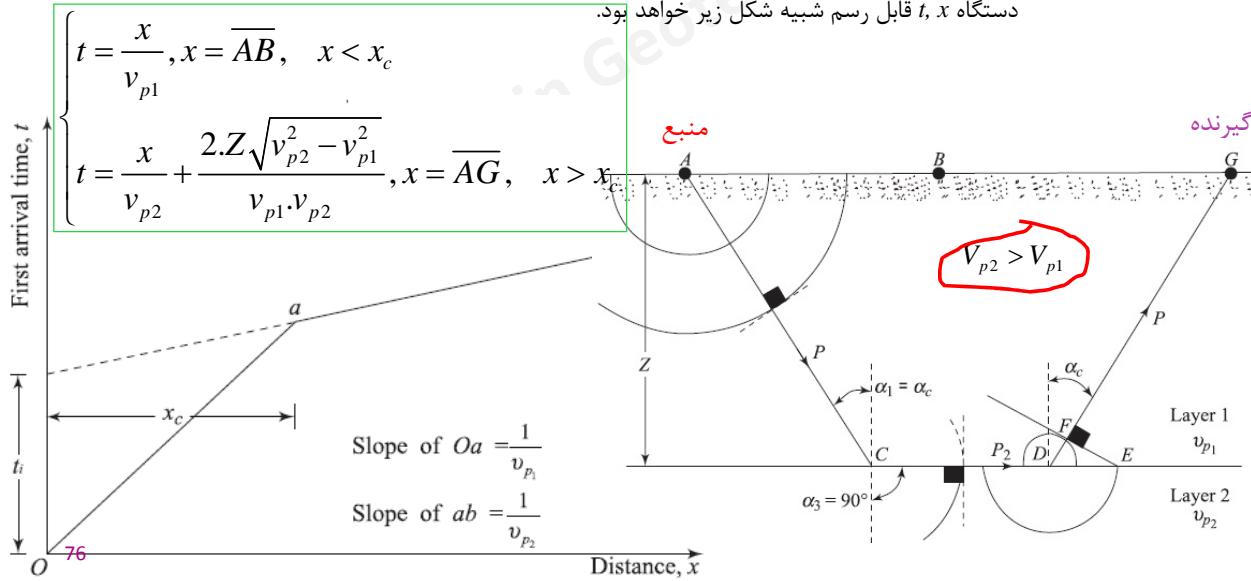


$$t = \frac{x}{v_{p2}} + \frac{2Z\sqrt{v_{p2}^2 - v_{p1}^2}}{v_{p1} \cdot v_{p2}}$$

## بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی

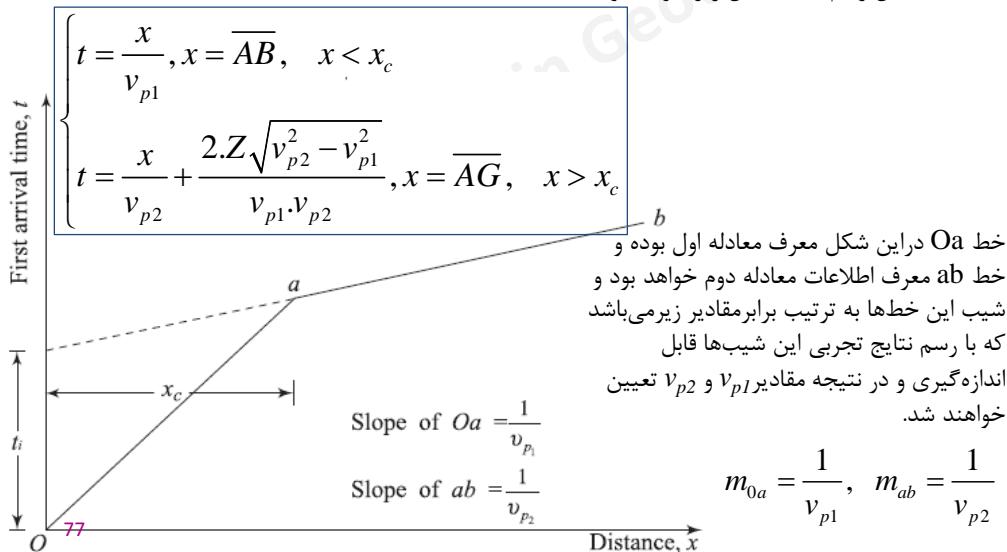
حال اگر فرض گردد که نقطه  $G$  جایه‌جا گردد در آن صورت بدان معنی است که دستگاه گیرنده در فواصل مختلف از منبع  $A$  قرار بگیرد در این صورت اگر در این فواصل مختلف زمان رسیدن اولین موج را اندازه گرفته و عمل را برای مسافت‌های مختلف تکرار نماییم زوج نقاط (فاصله، زمان رسیدن اولین موج) چنین به دست می‌آید که در يك

دستگاه  $t$ ,  $x$  قابل رسم شبیه شکل زیر خواهد بود.

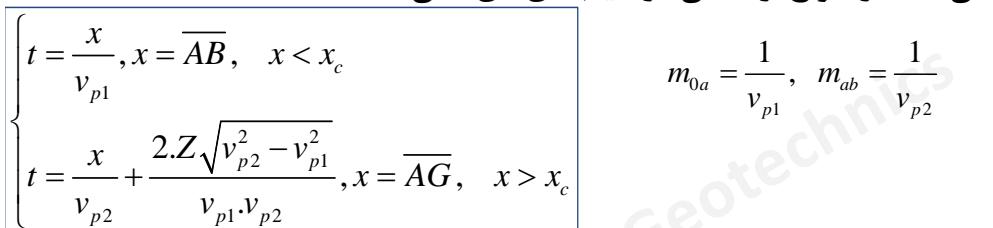


## بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی

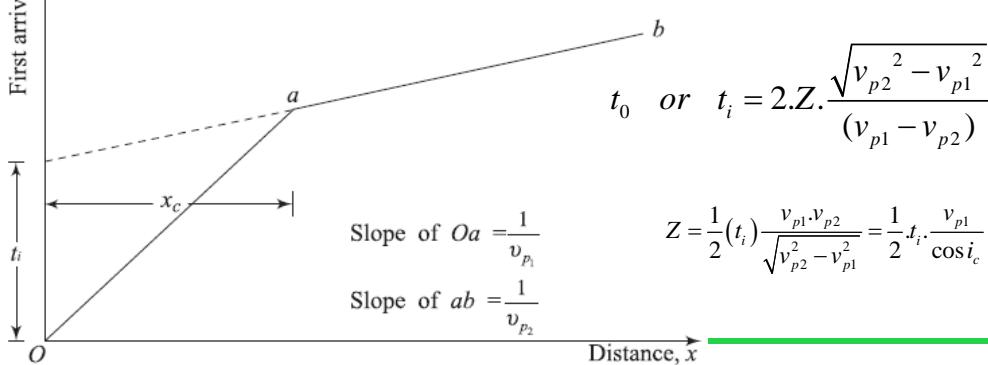
حال اگر فرض گردد که نقطه  $G$  جابه‌جا گردد در آن صورت بدان معنی است که دستگاه گیرنده در فواصل مختلف از منبع  $A$  قرار بگیرد در این صورت اگر در این فواصل مختلف زمان رسیدن اولین موج را اندازه گرفته و عمل را برای مسافت‌های مختلف تکرار نماییم زوج نقاط (فاصله، زمان رسیدن اولین موج) چنین به دست می‌آید که در یک دستگاه  $x, t$  قابل رسم شبیه شکل زیر خواهد بود.



## بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی



اگر خط ab به عقب تصویر گردد تا عرض از مبدأ آن یعنی  $t_i$  در تعیین شود ان گاه:

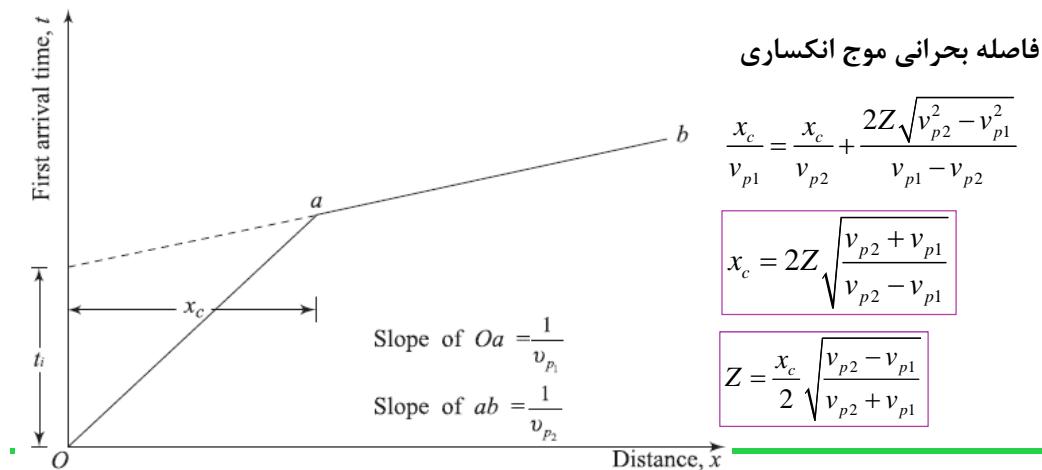


### بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی

$$\begin{cases} t = \frac{x}{v_{p1}}, x = \overline{AB}, \quad x < x_c \\ t = \frac{x}{v_{p2}} + \frac{2Z\sqrt{v_{p2}^2 - v_{p1}^2}}{v_{p1} \cdot v_{p2}}, x = \overline{AG}, \quad x > x_c \end{cases}$$

$$t_0 \quad or \quad t_i = 2Z \cdot \frac{\sqrt{v_{p2}^2 - v_{p1}^2}}{(v_{p1} - v_{p2})}$$

$$Z = \frac{1}{2} \cdot t_i \cdot \frac{V_{p1}}{\cos i_c}$$

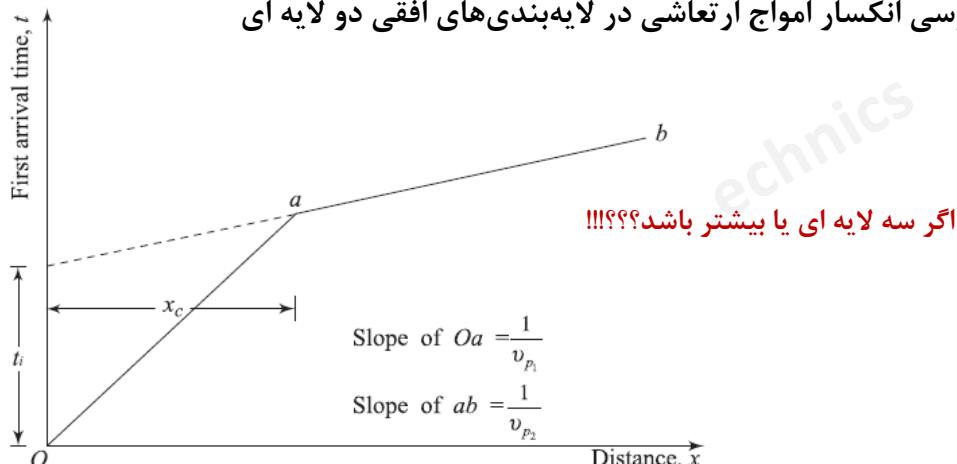


$$\frac{x_c}{v_{p1}} = \frac{x_c}{v_{p2}} + \frac{2Z\sqrt{v_{p2}^2 - v_{p1}^2}}{v_{p1} - v_{p2}}$$

$$x_c = 2Z \sqrt{\frac{v_{p2} + v_{p1}}{v_{p2} - v_{p1}}}$$

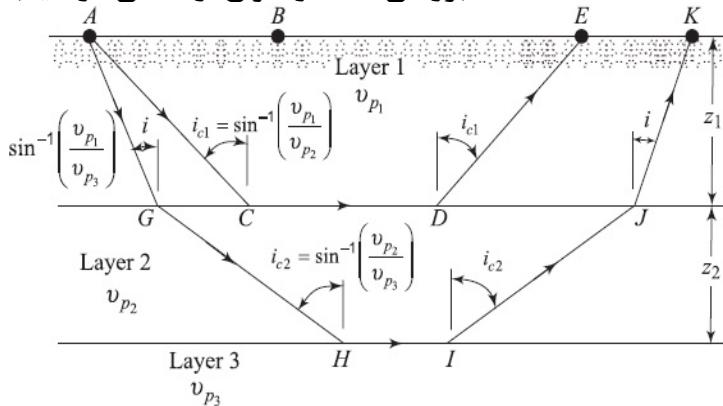
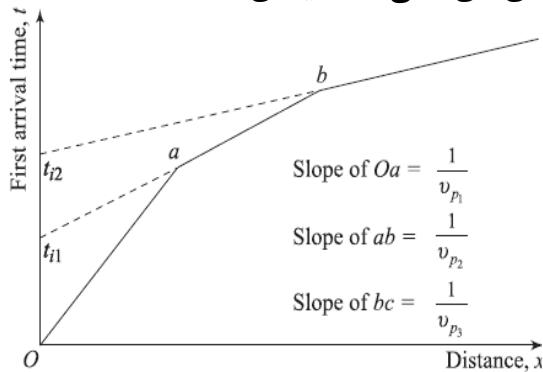
$$Z = \frac{x_c}{2} \sqrt{\frac{v_{p2} - v_{p1}}{v_{p2} + v_{p1}}}$$

### بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی دو لایه‌ای



$$\begin{cases} t = \frac{x}{v_{p1}}, x = \overline{AB}, \quad x < x_c \\ t = \frac{x}{v_{p2}} + \frac{2Z\sqrt{v_{p2}^2 - v_{p1}^2}}{v_{p1} \cdot v_{p2}}, x = \overline{AG}, \quad x > x_c \end{cases}$$

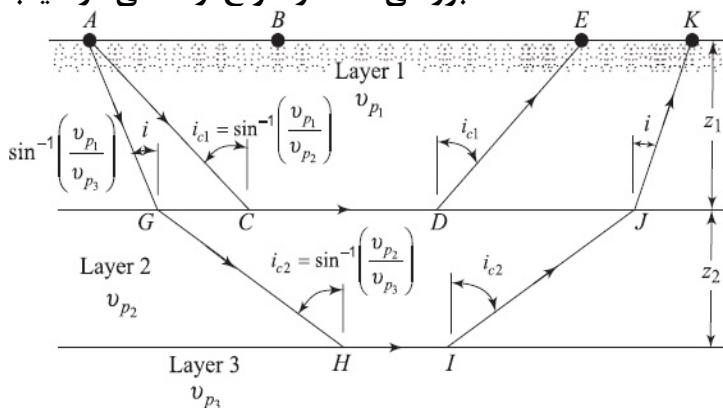
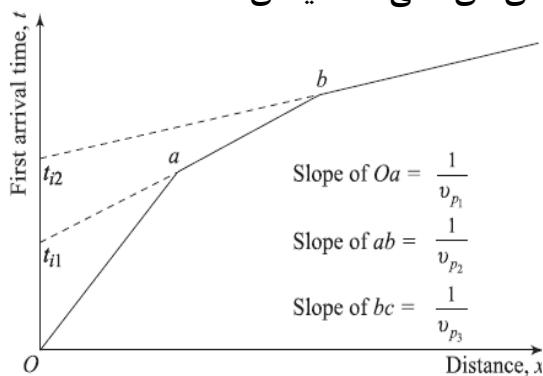
### بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی سه لایه‌ای



$$\left\{ \begin{array}{l} t = \frac{x}{v_{p1}}, x = \overline{AB}, \quad x < x_{c1} \\ t = \frac{x}{v_{p2}} + \frac{2z_1\sqrt{v_{p2}^2 - v_{p1}^2}}{v_{p1} \cdot v_{p2}}, x = \overline{AE}, \quad x_{c1} < x < x_{c2} \\ t = \frac{x}{v_{p3}} + \frac{2z_1\sqrt{v_{p3}^2 - v_{p1}^2}}{v_{p3} \cdot v_{p1}} + \frac{2z_2\sqrt{v_{p3}^2 - v_{p2}^2}}{v_{p3} \cdot v_{p2}}, x = \overline{AK}, \quad x_{c2} < x \end{array} \right.$$

81

### بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی سه لایه‌ای



$$z_1 = \frac{(t_{i1})(v_{p1})(v_{p2})}{2\sqrt{v_{p2}^2 - v_{p1}^2}}$$

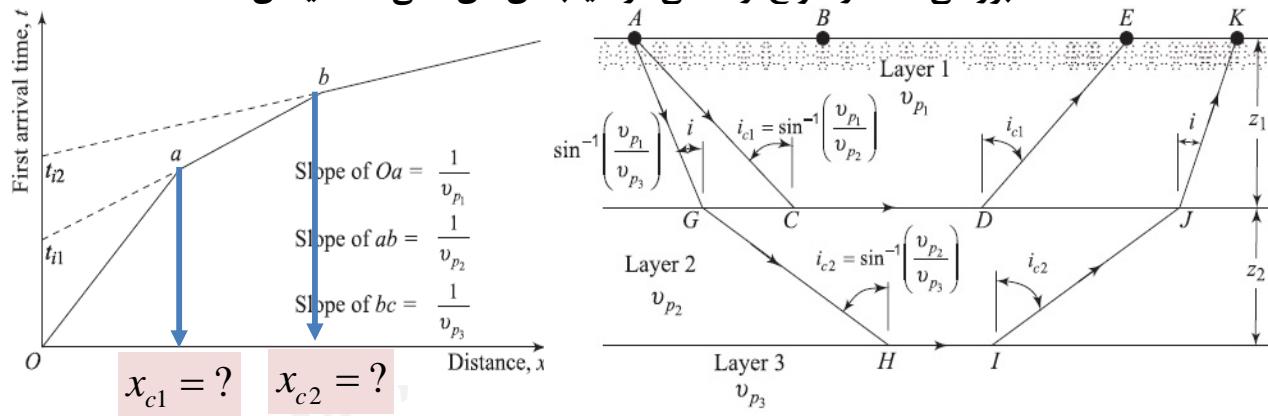
$$t = t_{i2} = \frac{2z_1\sqrt{v_{p3}^2 - v_{p1}^2}}{(v_{p3})(v_{p1})} + \frac{2z_2\sqrt{v_{p3}^2 - v_{p2}^2}}{(v_{p3})(v_{p2})}$$



$$z_2 = \frac{1}{2} \left[ t_{i2} - \frac{2z_1\sqrt{v_{p3}^2 - v_{p1}^2}}{(v_{p3})(v_{p1})} \right] \frac{(v_{p3})(v_{p2})}{\sqrt{v_{p3}^2 - v_{p2}^2}}$$

82

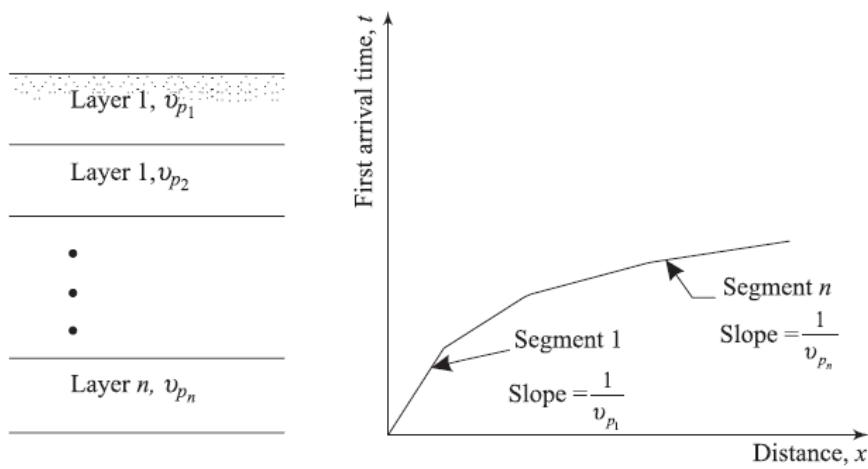
### بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی سه لایه‌ای



83

### بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی چند لایه‌ای

اطلاعات بیشتر در کتاب‌های ژئوفیزیک



84

## مثال انكسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی

نتایج پیمایش انكسار موج P بصورت جدول زیر است. مطلوب است تعیین سرعت امواج طولی و ضخامت لایه‌ها باشد.

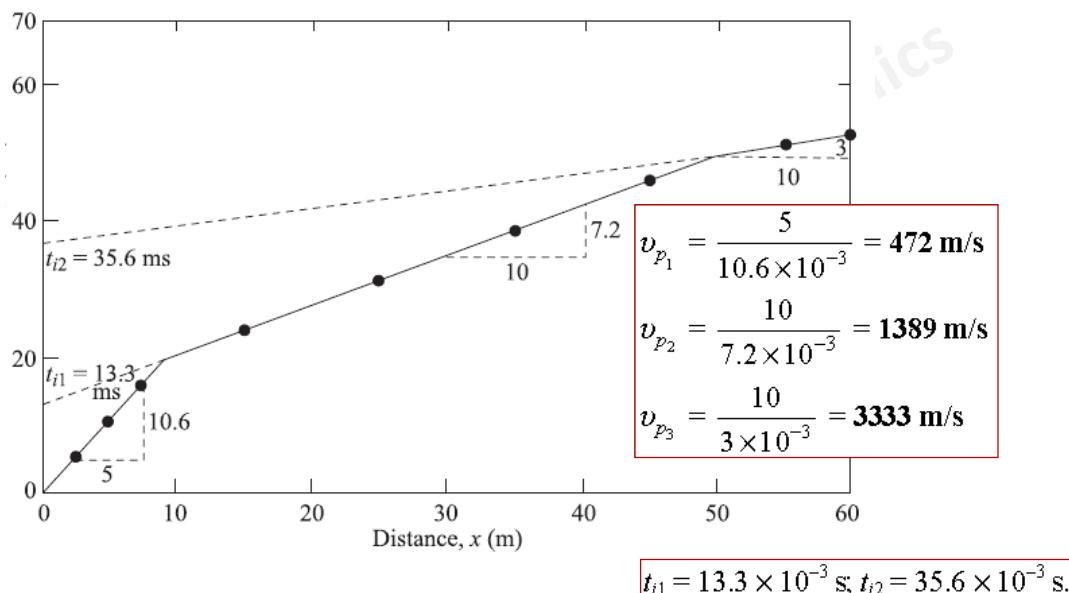
Distance (m)	Time of first arrival (ms)
2.5	5.5
5.0	11.1
7.5	16.1
15.0	24.0
25.0	30.8
35.0	38.2
45.0	46.1
55.0	51.3
60.0	52.8

حل:

ابتدا نمودار فاصله-زمان را ترسیم می‌کنیم.

85

حل: ابتدا نمودار فاصله-زمان را ترسیم می‌کنیم.



86

حل: ابتدا نمودار فاصله-زمان را ترسیم می کنیم.

$$z_1 = \frac{(t_{i1})(v_{p_1})(v_{p_2})}{2\sqrt{v_{p_2}^2 - v_{p_1}^2}} = \frac{(13.3 \times 10^{-3})(472)(1389)}{2\sqrt{(1389)^2 - (472)^2}} \\ = 3.39 \text{ m}$$

$$v_{p_1} = \frac{5}{10.6 \times 10^{-3}} = 472 \text{ m/s}$$

$$v_{p_2} = \frac{10}{7.2 \times 10^{-3}} = 1389 \text{ m/s}$$

$$v_{p_3} = \frac{10}{3 \times 10^{-3}} = 3333 \text{ m/s}$$

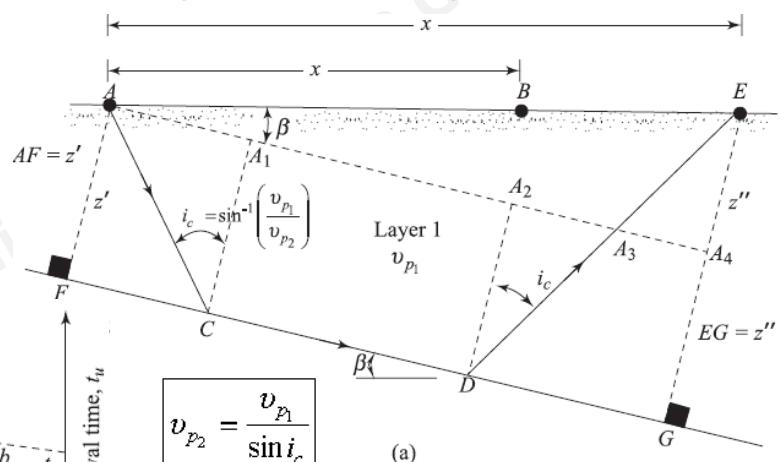
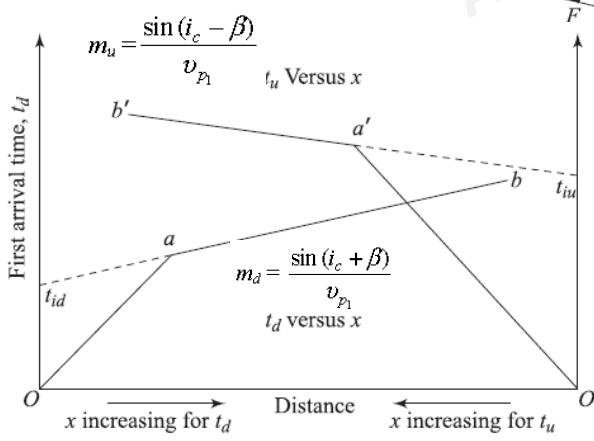
$$z_2 = \frac{1}{2} \left[ t_{i2} - \frac{2z_1 \sqrt{v_{p_3}^2 - v_{p_1}^2}}{(v_{p_3})(v_{p_1})} \right] \frac{(v_{p_3})(v_{p_2})}{\sqrt{v_{p_3}^2 - v_{p_2}^2}} \\ = \frac{1}{2} \left[ 35.6 \times 10^{-3} - \frac{(2)(3.39) \sqrt{(3333)^2 - (472)^2}}{(3333)(472)} \right] \\ \times \frac{(3333)(1389)}{\sqrt{(3333)^2 - (1389)^2}} \\ = \frac{1}{2} (0.02138) (1528) = 16.33 \text{ m}$$

87

### بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های شیبدار

$$i_c = \frac{1}{2} [\sin^{-1}(v_{p_1} m_d) + \sin^{-1}(v_{p_1} m_u)]$$

$$\beta = \frac{1}{2} [\sin^{-1}(v_{p_1} m_d) - \sin^{-1}(v_{p_1} m_u)]$$



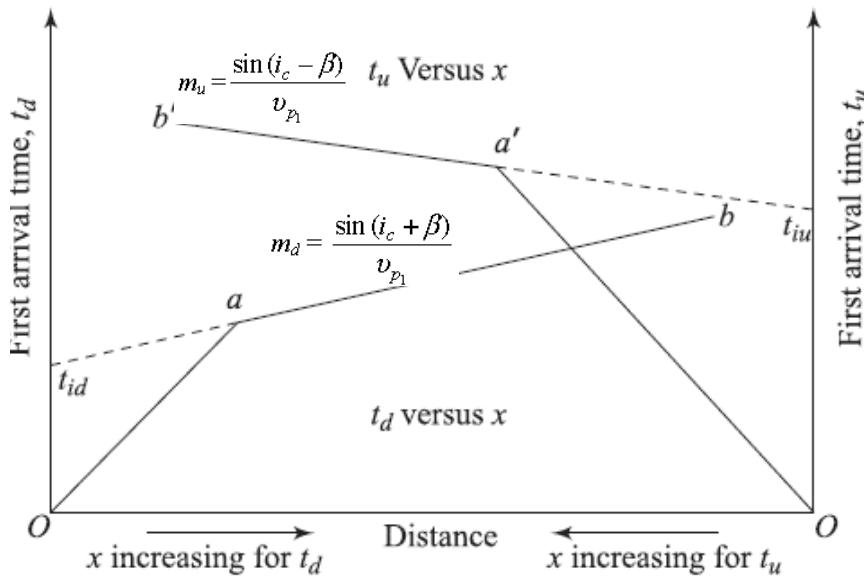
$$t_{id} = \frac{2z' \cos i_c}{v_{p_1}}$$

$$z' = \frac{(t_{id}) v_{p_1}}{2 \cos i_c}$$

$$z'' = \frac{(t_{iu}) v_{p_1}}{2 \cos i_c}$$

88

## بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های شیبدار



89

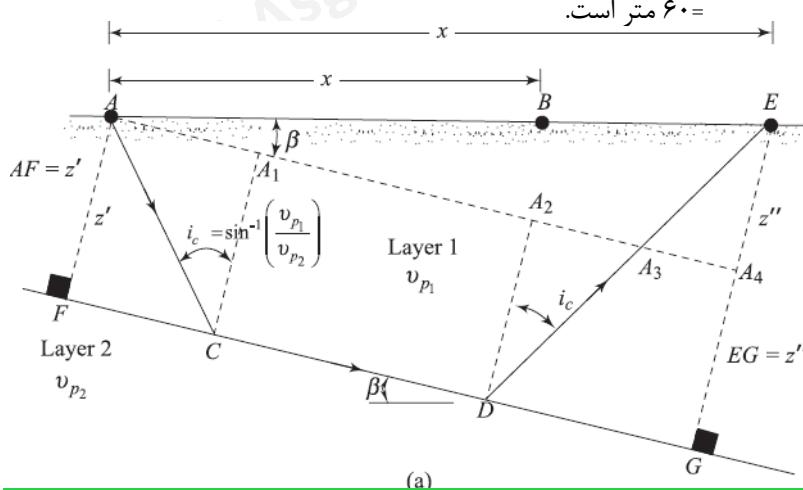
## مثال انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های شیبدار

نتایج پیمایش انکسار موج  $P$  بصورت جدول زیر است.

مطلوبست تعیین: (الف) سرعت امواج طولی در دو لایه و (ب)

ضخامت لایه در محل  $A$  و  $E$  (ج) شیب لایه زیرین؟ فاصله

$AE = 60$  متر است.



90

Point of disturbance $A$	
Distance from $A$ (m)	Time of first arrival (ms)
5	12.1
10	25.2
15	35.3
20	48.0
30	60.2
40	68.5
50	76.8
60	85.1

Point of disturbance $E$	
Distance from $E$ (m)	Time of first arrival (ms)
5	11.5
10	22.8
15	34.5
20	44.8
30	69.1
40	78.1
50	82.8
60	87.7

از شاخه  $oa$

$$v_{p_1} = \frac{10}{25 \times 10^{-3}} = 400 \text{ m/s}$$

از شاخه  $o'a'$

$$v_{p_1} = \frac{10}{22 \times 10^{-3}} = 454 \text{ m/s}$$

متوسط دو مقدار بالا

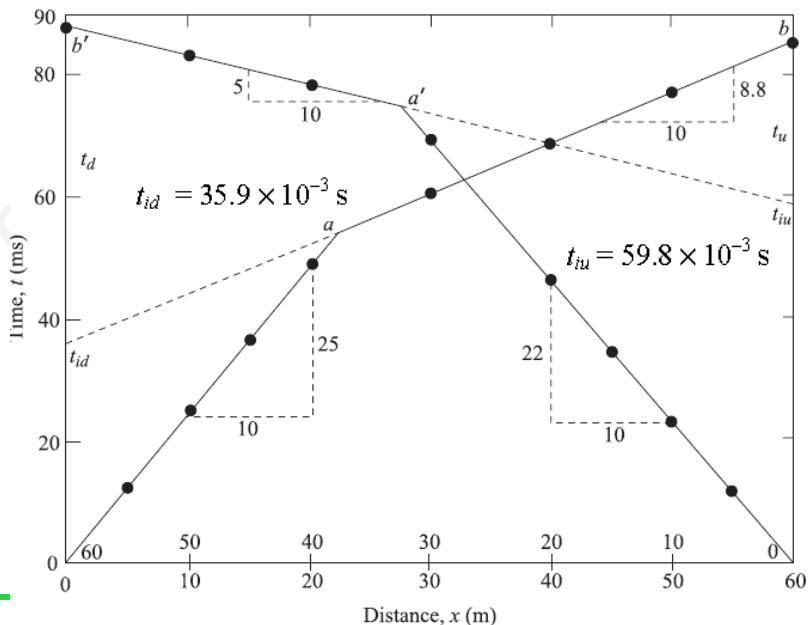
$$v_{p_1} = 427 \text{ m/s}$$

$$m_d = \frac{8.8 \times 10^{-3}}{10} = 0.88 \times 10^{-3}$$

$$m_u = \frac{5 \times 10^{-3}}{10} = 0.5 \times 10^{-3}$$

### مثال انكسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های شبیدار

**حل الف:** ابتدا نمودار فاصله-زمان را ترسیم می‌کنیم.



91

$$v_{p_1} = 427 \text{ m/s}$$

### مثال انكسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های شبیدار

**حل الف:**

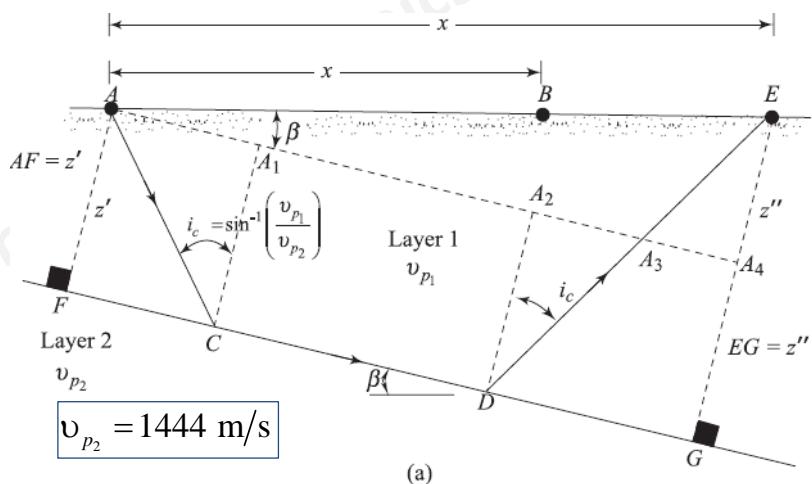
$$m_d = \frac{8.8 \times 10^{-3}}{10} = 0.88 \times 10^{-3}$$

$$m_u = \frac{5 \times 10^{-3}}{10} = 0.5 \times 10^{-3}$$

$$i_c = \frac{1}{2} [\sin^{-1}(v_{p_1} m_d) + \sin^{-1}(v_{p_1} m_u)]$$

$$i_c = \frac{1}{2} (22.07^\circ + 12.33^\circ) = 17.2^\circ$$

$$v_{p_2} = \frac{v_{p_1}}{\sin i_c} = \frac{427}{\sin (17.2)} = 1444 \text{ m/s}$$



92

### مثال انكسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های شیبدار

$$v_{p_1} = 427 \text{ m/s}$$

$$v_{p_2} = 1444 \text{ m/s}$$

حل ب و ج:

$$m_d = \frac{8.8 \times 10^{-3}}{1\Omega} = 0.88 \times 10^{-3}$$

$$m_u = \frac{5 \times 10^{-3}}{10} = 0.5 \times 10^{-3}$$

$$i_c = \frac{1}{2}(22.07^\circ + 12.33^\circ) = 17.2^\circ$$

$$z' = \frac{(t_{id})(v_{p_1})}{2 \cos i_c} \quad t_{id} = 35.9 \times 10^{-3} \text{ s}$$

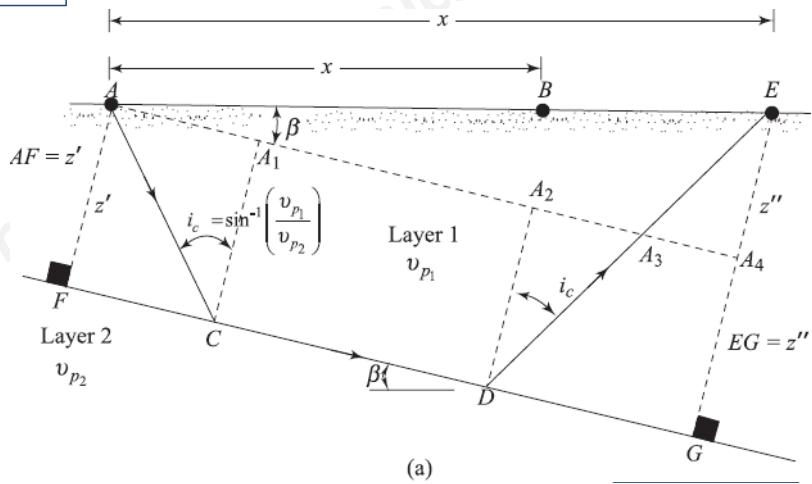
$$z' = \frac{(35.9 \times 10^{-3})(427)}{2 \cos(17.2)} = 8.03 \text{ m}$$

$$z'' = \frac{(t_{iu})(v_{p_1})}{2 \cos i_c} \quad t_{iu} = 59.8 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$$z'' = \frac{(59.8 \times 10^{-3})(427)}{2 \cos(17.2)} = 13.37 \text{ m}$$

93

$$\beta = \frac{1}{2} [\sin^{-1}(v_{p_1} m_d) - \sin^{-1}(v_{p_1} m_u)] = \frac{1}{2} (22.07^\circ - 12.33^\circ) = 4.87^\circ$$



(a)

### ۲- انواع آزمایش صحرایی و اندازه گیری های محلی

روش شکست امواج Seismic Refraction Surveys

روش انعکاس امواج Seismic Reflection Surveys

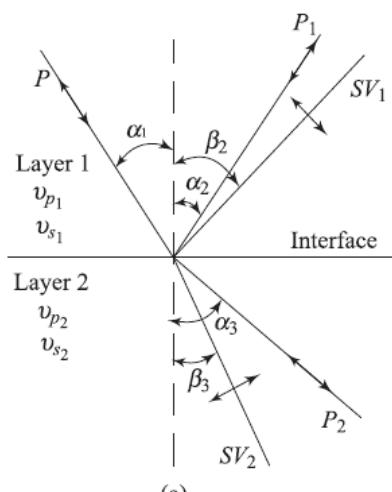
روش انتشار امواج سطحی Subsoil Exploration by Steady-State Vibration

روش گمانه با انتشار امواج به صورت نزولی و یا صعودی Shooting Up/Down the Hole

روش گمانه با انتشار امواج عبوری در خاک Cross-Hole Shooting

آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی Cyclic Field Plate Load Test

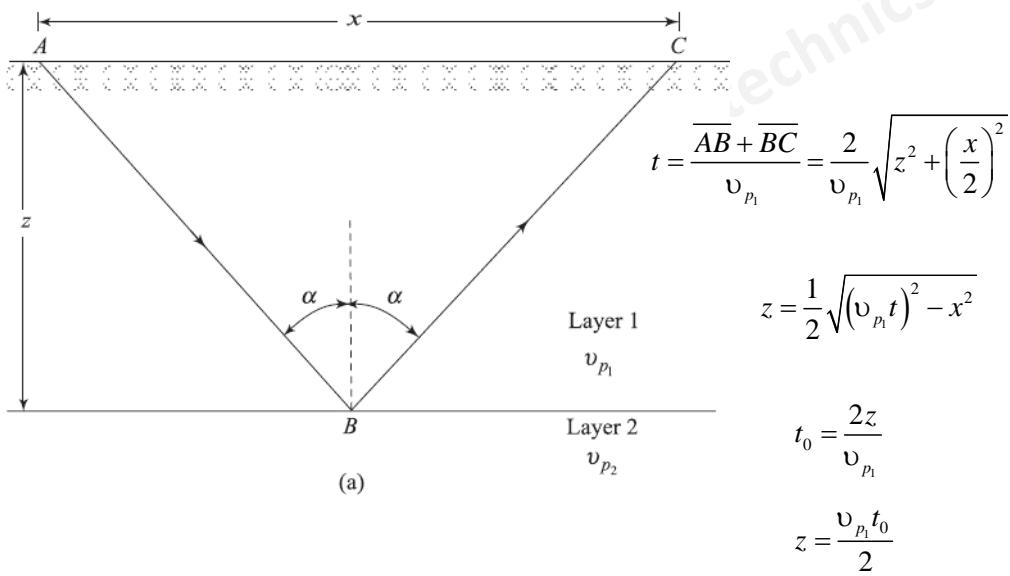
## پدیده انعکاس امواج حجمی در مصالح



$$\alpha_1 = \alpha_2, \quad \frac{\sin \alpha_1}{V_{p1}} = \frac{\sin \alpha_2}{V_{p2}} = \frac{\sin \beta_2}{V_{s1}} = \frac{\sin \alpha_3}{V_{p2}} = \frac{\sin \beta_3}{V_{s2}}$$

95

## پدیده انعکاس امواج حجمی در مصالح

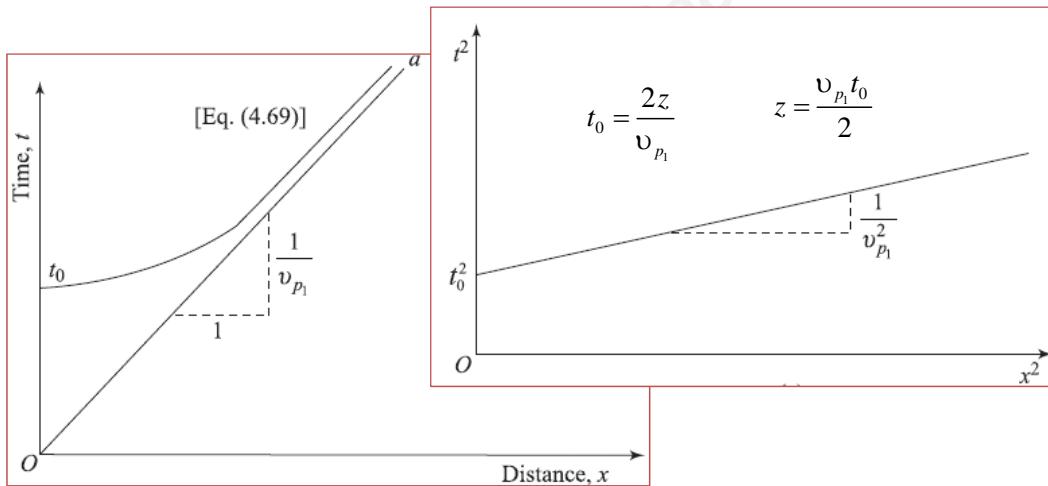


96

## پدیده انعکاس امواج حجمی در مصالح

$$z = \frac{1}{2} \sqrt{(v_{p_1} t)^2 - x^2}$$

دو روش ترسیم برای تعیین سرعت موج  $v_{p_1}$  وجود دارد که در شکل زیر می بینید.



97

## مثال انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های شیبدار

نتایج پیمایش انعکاس موج  $P$  در یک شل بر روی گرانیت بصورت جدول زیر است. مطلوبست تعیین سرعت موج طولی در شل؟

Distance from point of disturbance (m)	Time for first reflection (s)
30	1.000
90	1.002
150	1.003
210	1.007
270	1.011
330	1.017
390	1.023

**حل:** ابتدا نمودار مجدد فاصله-مجدود زمان را ترسیم می کنیم.

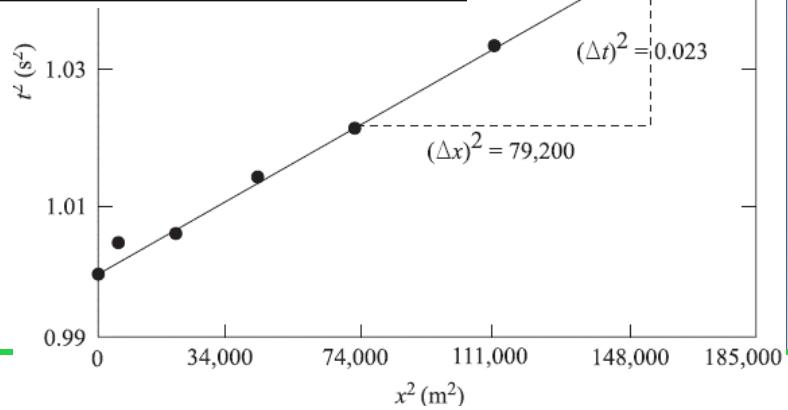
98

## تعیین خصوصیات دینامیکی خاک با انجام آزمایش‌های دینامیکی

**مثال انكسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های شیبدار حل :**

x (m)	$x^2$ (m <sup>2</sup> )	t (s)	$t^2$ (s <sup>2</sup> )
30	900	1.000	1.000
90	8,100	1.002	1.004
150	22,500	1.003	1.006
210	44,100	1.007	1.014
270	72,900	1.011	1.022
330	108,900	1.017	1.034
390	152,100	1.023	1.046

$$v_{p_1} = \sqrt{\frac{(\Delta x)^2}{(\Delta t)^2}} = \sqrt{\frac{79200}{0.024}} = 1816.6 \text{ m/s}$$



99

مقدمه و کلیات

تئوری ارتعاشات

امواج در محیط‌های ...

### ۲- انواع آزمایش صحرایی و اندازه گیری‌های محلی

روش شکست امواج Seismic Refraction Surveys

روش انعکاس امواج Seismic Reflection Surveys

روش انتشار امواج سطحی Subsoil Exploration by Steady-State Vibration

روش گمانه با انتشار امواج به صورت نزولی و یا صعودی Shooting Up/Down the Hole

روش گمانه با انتشار امواج عبوری در خاک Cross-Hole Shooting

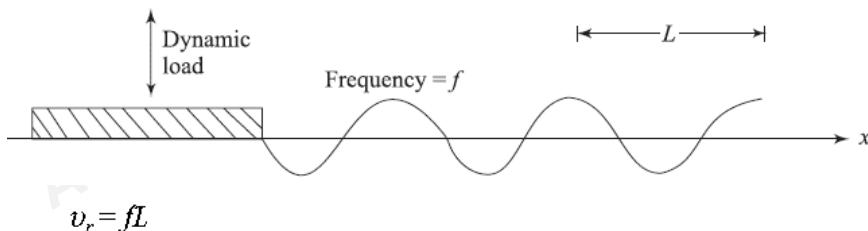
آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی Cyclic Field Plate Load Test

## ۲- روش انتشار امواج سطحی

در نواحی نزدیک به سطح زمین جهت تعیین مدول برشی خاک‌ها مورد استفاده است.

### اساس روش

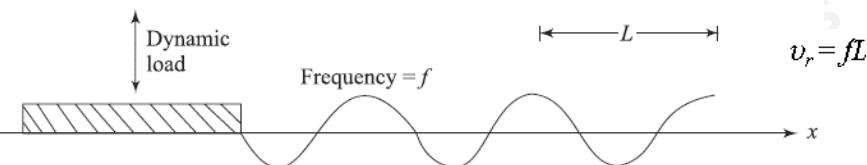
مطابق شکل زیر اندازه‌گیری فواصل بین نقاطی که با اختلاف فاز نسبت به منبع نوسان می‌کنند می‌تواند جهت محاسبه‌ی طول موج به کار رود.



امواج رایلی اثراتی سطحی داشته و بنابراین تا حد اکثر عمق برابر نصف طول موج فرستاده شده اطلاعات قابل قبول عمق را می‌دهد. برای تعیین اطلاعات عمیق‌تر فرکانس کوچکتری انتخاب می‌شود.

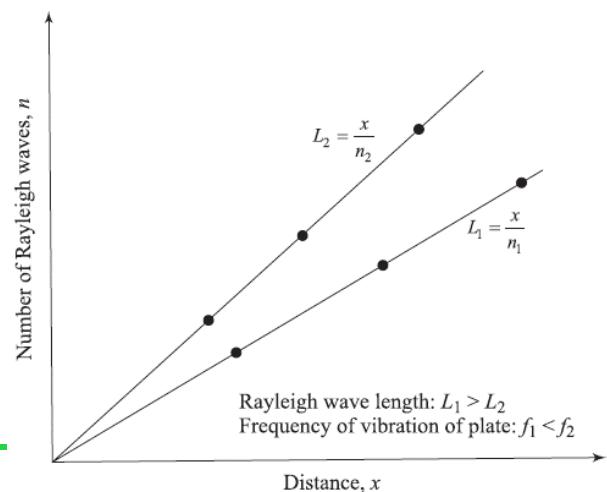
101

## ۲- روش انتشار امواج سطحی



مطابق شکل بالا، یک ارتعاش کننده مکانیکی وجود دارد اما اگر نیروی ارتعاش کننده مکانیکی آن قدر بزرگ باشد ممکن است باعث جدایی ارتعاش کننده از زمین گردد. لذا ارتعاش کننده را روی یک بلوك قرار می‌دهند و یا در غیاب آن از تعدادی وزنه بر روی ارتعاش کننده استفاده می‌شود ابعاد بلوك در استانداردهای کشورهای مختلف آمده است.

با تعیین سرعت موج رایلی می‌توان موج  
برشی و مدول موج بر پایهٔ را تعیین کرد.



102

## یادآوری

موج رایلی:

$$\alpha^2 = \frac{v_s^2}{v_p^2} \quad v_p^2 = (\lambda + 2G)/\rho \quad \alpha^2 = \frac{v_s^2}{v_p^2} = \frac{G}{\lambda + 2G} = \frac{(1-2\mu)}{(2-2\mu)}$$

$$\frac{v_r^2}{v_s^2} = V^2, \quad v_r = V \cdot v_s, \quad v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}},$$

$$v_r = V \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{VE}{2(1+\nu)\rho}}$$

$$V^6 - 8V^4 - (16\alpha^2 - 24)V^2 - 16(1-\alpha^2) = 0$$

$\mu$	$V = v_r/v_s$
0.25	0.919
0.29	0.926
0.33	0.933
0.4	0.943
0.5	0.955

مقدار و

تئوری ارتعاشات

امواج در محیط های ...

خصوصیات دینامیکی ...

ارتعاشات شالوده و پی

ظرفیت باربری دینامیکی

پاسخ لرزه ای زمین

فسارلرزه ای جانبی خاک

تراکم دینامیکی ...

روانگرایی

ماشین مر تعش بروزی شمع

پایداری لرزه ای شیرواوی

103

## ۲- انواع آزمایش صحرایی و اندازه گیری های محلی

روش شکست امواج Seismic Refraction Surveys

روش انعکاس امواج Seismic Reflection Surveys

روش انتشار امواج سطحی Subsoil Exploration by Steady-State Vibration

روش گمانه با انتشار امواج به صورت نزولی و یا صعودی Shooting Up/Down the Hole

روش گمانه با انتشار امواج عبوری در خاک Cross-Hole Shooting

آزمایش بارگذاری صفحه های سیکلی Cyclic Field Plate Load Test

104

## ۲- روش گمانه با انتشار امواج به صورت صعودی و یا نزولی

در هر دو روش‌های فوق، به یک گمانه بیشتر نیاز نیست و این از مزایای روش است. در روش امواج صعودی دو منبع ایجاد امواج در نقاط مختلف (عمق مختلف) از گمانه قرار گرفته و یک منبع در سطح زمین قرار می‌گیرد.

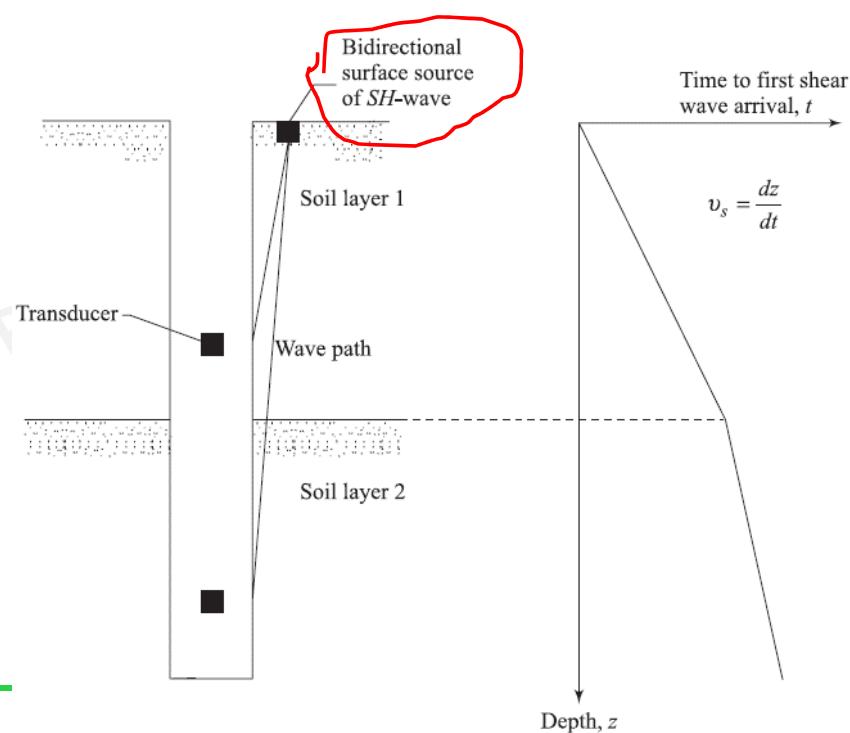
در روش امواج نزولی دو گیرنده در اعماق مختلف گمانه قرار می‌گیرند.

در هر دو روش فوق سرعت متوسط امواج بین منبع تولید و گیرنده و بین دو گیرنده را اندازه‌گیری و محاسبه می‌کنند.

مزیت: سرعت امواج بر پیش تعیین می‌شود.

در روش انکسار و انعکاس امواج، سرعت امواج طولی قبل تعیین است.

105



## ۲- روش گمانه با انتشار امواج به صورت صعودی و یا نزولی

لارکن و تیلور در سال ۱۹۷۹ با استفاده از دو روش امواج نزولی و روش آزمایشگاهی، سرعت امواج بر پیش تعیین کردند و با مقایسه آن دو سرعت امواج (SH) را تعیین کردند و با مقایسه آن دو سرعت امواج بر پیش تعیین کردند و رابطه زیر برای

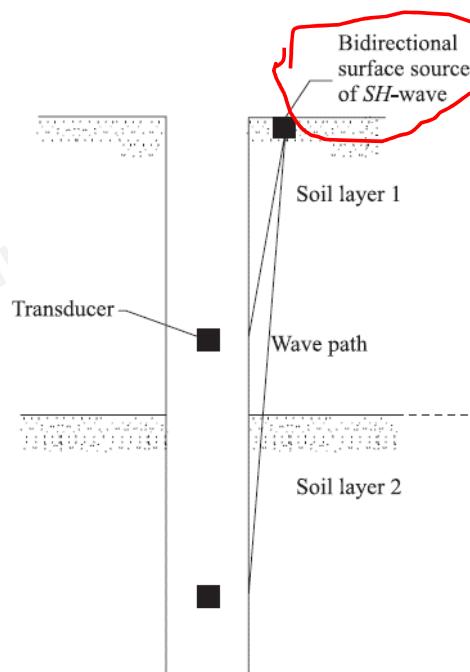
$$v_s(\text{lab}) \approx 0.25 v_s(\text{field}) + 83$$

کاهش سرعت امواج بر پیش تعیین شده به دستخوردگی نمونه

آزمایشگاهی است.

$$S_D = \left[ \frac{v_s(\text{field})}{v_s(\text{lab})} \right]^2 = \frac{G_{\text{field}}}{G_{\text{lab}}}$$

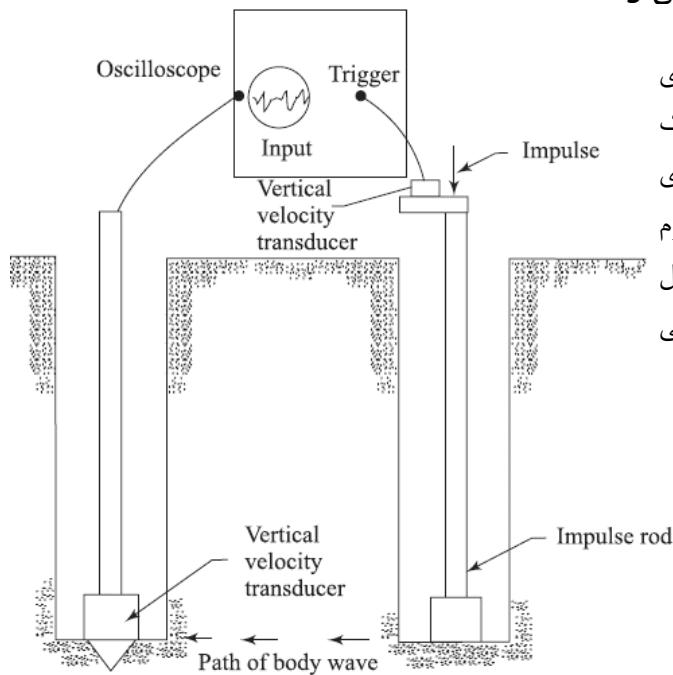
لارکن و تیلور میزان  $S_D$  را برای نمونه با سرعت موجه‌ای بر پیش تعیین کردند.  $v_s(\text{field}) = 400 \text{ m/s}$  و  $v_s(\text{lab}) = 140 \text{ m/s}$  به ترتیب برابر با ۴ و  $S_D = 1$  تعیین کردند.



106

Larkin and Taylor (1979)

### ۳- روش گمانه با انتشار امواج عبوری



در این روش سرعت موج عبوری فرستاده شده (SV) از انتهای یک گمانه تا انتهای گمانه دیگر اندازه‌گیری می‌شود و حداقل دو گمانه مورد لزوم است. این یک روش متداول و قابل اطمینان برای تعیین مدول برشی خاک است.

$$v_s = \frac{L}{t}$$

107

### ۲- انواع آزمایش صحرایی و اندازه گیری های محلی

روش شکست امواج Seismic Refraction Surveys

روش انعکاس امواج Seismic Reflection Surveys

روش انتشار امواج سطحی Subsoil Exploration by Steady-State Vibration

روش گمانه با انتشار امواج به صورت نزولی و یا صعودی Shooting Up/Down the Hole

روش گمانه با انتشار امواج عبوری در خاک Cross-Hole Shooting

آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی Cyclic Field Plate Load Test

---

### ۳- روش گمانه با انتشار امواج عبوری *Cross-Hole Shooting*

- ارسال موج از انتهای یک گمانه و دریافت آن در انتهای یک یا چند گمانه دیگر و اندازه‌گیری سرعت موج
- پارامترهای عمدۀ عبارت از گمانه‌ها منبع تأمین نیروی دینامیکی، گیرنده ارتعاشات، زمان سنج، اندازه‌گیر و ثبات همه نقش مهم حساس دارند.
- نتایج دقیق‌تر با تعداد گمانه بیشتر.
- در صورتی که گمانه‌های چندتایی در امتداد یک خط مستقیم باشند سرعت انتشار موج بین گمانه اول و آخر و یا بین هر دو زوج از گمانه‌ها محاسبه می‌شود و اندازه‌گیری زمان شروع (ضربه) لزومی ندارد.
- فاصله مناسب گمانه‌ها بین ۲ تا ۳ متر است.
- در خاکهای ضعیف اگر نیاز به غلاف یا لوله محافظ باشد، برای کاهش تاثیرات آن از غلاف آلومینیوم یا PVC بجای فولادی استفاده شود.

---

109

---

### ۳- روش گمانه با انتشار امواج عبوری *Cross-Hole Shooting*

- ارسال موج از انتهای یک گمانه و دریافت آن در انتهای یک یا چند گمانه دیگر و اندازه‌گیری سرعت موج
- پارامترهای عمدۀ عبارت از گمانه‌ها منبع تأمین نیروی دینامیکی، گیرنده ارتعاشات، زمان سنج، اندازه‌گیر و ثبات همه نقش مهم حساس دارند.
- نتایج دقیق‌تر با تعداد گمانه بیشتر.
- در صورتی که گمانه‌های چندتایی در امتداد یک خط مستقیم باشند سرعت انتشار موج بین گمانه اول و آخر و یا بین هر دو زوج از گمانه‌ها محاسبه می‌شود و اندازه‌گیری زمان شروع (ضربه) لزومی ندارد.
- فاصله مناسب گمانه‌ها بین ۲ تا ۳ متر است.
- در خاکهای ضعیف اگر نیاز به غلاف یا لوله محافظ باشد، برای کاهش تاثیرات آن از غلاف آلومینیوم یا PVC بجای فولادی استفاده شود.

---

110

---

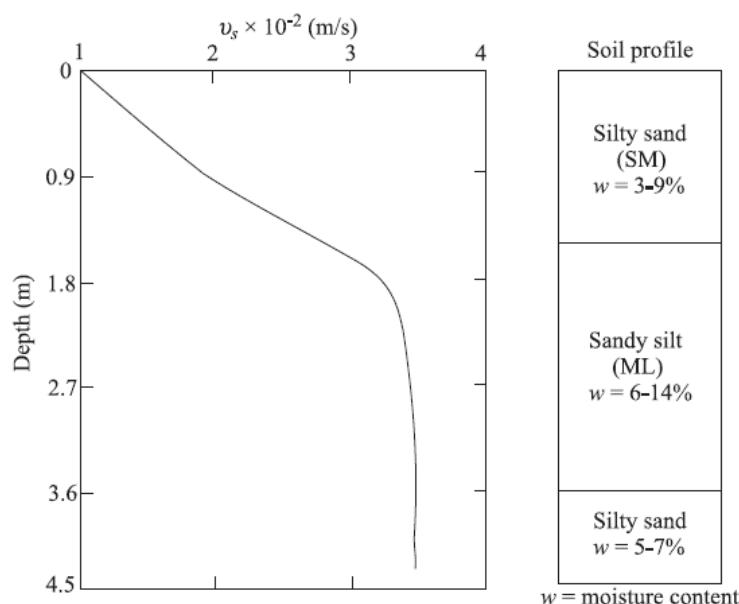
### ۳- روش گمانه با انتشار امواج عبوری

- گمانه‌ها مخصوصاً گمانه‌های عمیق باید قائم باشند و گرنه اندازه‌گیری فواصل گمانه بر مبنای فاصله آن‌ها در سطح زمین دقیق نیست. در این صورت از شبیه سنج استفاده شود.
- به جای چکش و ایجاد ضربه می‌توان از دستگاه‌های ایجاد کننده لرزش یکنواخت استفاده نمود ولي دستگاه ضربه متداول تر است.
- ژئوفون‌های با فرکانس طبیعی بین 4-15 Hz جهت دریافت امواج برشی مناسب هستند و باید به صورت مطمئن به دیواره گمانه نصب گردند.
- دستگاه‌های ثبت نوسانات، باید قادر به تفکیک فواصل زمانی (دقت زمانی) ۰.۲ میلی‌ثانیه و یا٪ زمان عبور موج باشند برای این منظور اسیلوسکوپ‌های حافظه‌دار مناسب هستند.



111

### ۳- روش گمانه با انتشار امواج عبوری



Stokoe and Woods. 1972

112

## ۲- انواع آزمایش صحرایی و اندازه گیری های محلی

روش شکست امواج Seismic Refraction Surveys

روش انعکاس امواج Seismic Reflection Surveys

روش انتشار امواج سطحی Subsoil Exploration by Steady-State Vibration

روش گمانه با انتشار امواج به صورت نزولی و یا صعودی Shooting Up/Down the Hole

روش گمانه با انتشار امواج عبوری در خاک Cross-Hole Shooting

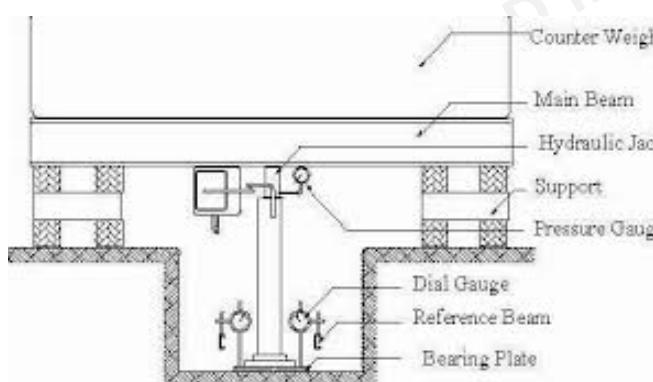
آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی Cyclic Field Plate Load Test

113

### آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی Cyclic Field Plate Load Test

در اغلب کتب مرجع خاک و پی این آزمایش، تشریح گردیده است و در اینجا اشاره‌ای به آن می‌گردد.

آزمایش بارگذاری صفحه‌ای غیرسیکلی جهت تعیین ظرفیت باربری خاک‌ها به کار رفته و نشست خاک نیز با استفاده از نتایج آن قابل پیش‌بینی است.



آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی جهت تعیین ثوابت خاک- فنر و نیز واکنش بسترهای ثوابت سختی و میرائی در مودهای مختلف ارتعاش پی‌ها به کار می‌رود.

114

---

### **Cyclic Field Plate Load Test**

---

- ۱- تنظیم دستگاه و قرار دادن صفحه (ضخامت صفحه ۲۵ میلیمتر و قطر یا ضلع آن بین ۱۵ تا ۷۶.۲ سانتیمتر متغیر است)
- ۲- قرائت اولیه گیج‌ها یا صفر نمودن آن‌ها
- ۳- تحمیل اولین بار استاتیکی به صفحه که حدوداً یک پنجم یا یک چهارم بار نهایی است. تحمیل بار به صورت تقریباً تدریجی است زیرا جک توانایی بار سریع را ندارد.
- ۴- افزایش بار به صفحه تا مقدار ماکزیمم تعیین شده و سپس ثابت نگه داشتن آن تا زمانی که سرعت نشست ناچیز گردد.
- ۵- قرائت نهایی بار و تغییرشکل در قسمت ۴ بالا.
- ۶- باربرداری از صفحه به طور کامل و اجازه دادن به خاک برای ظهور تغییرشکل‌های برگشت‌پذیر و ادامه عمل تا رسیدن به وضعیت ثبات در گیج.
- ۷- قرائت گیج مجدعاً انجام می‌گیرد.

---

115

---

---

### **Cyclic Field Plate Load Test**

---

- ۸- بارگذاری مجدد با تحمیل بار ماکزیمم بیشتر نسبت به دفعه (سیکل) قبل.
- ۹- ادامه مراحل ۴ تا ۷ فوق برای سیکل جدید.
- ۱۰- سیکل‌های باربرداری و بارگذاری آن قدر تکرار می‌شوند تا به مقدار ماکزیمم یعنی مقاومت تخمینی خاک برسیم.
- ۱۱- تجربه نشان داده است مقدار افزایش بارها طوری باشد که بعداز ۵ تا ۶ سیکل به مقدار ماکزیمم نهایی بار برسیم.
- ۱۲- رسم نتایج تغییرشکل الاستیک متناظر با شدت بارگذاری.
- ۱۳- تعیین ضریب فشار یکنواخت الاستیک خاک از رابطه زیر و شکل زیر.

$$q = \frac{\text{load on the plate, } Q}{\text{area of the plate, } A}$$

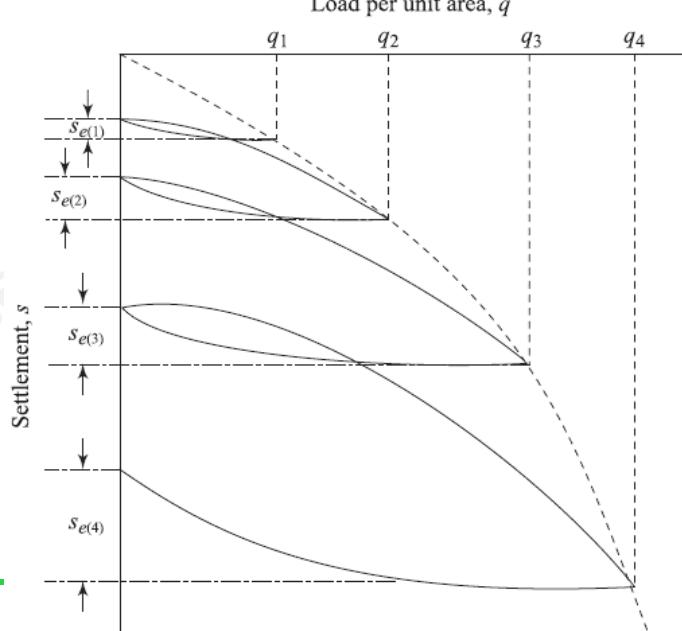
---

116

### خلاصه‌ای از نحوه انجام آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی

$$q = \frac{\text{load on the plate, } Q}{\text{area of the plate, } A}$$

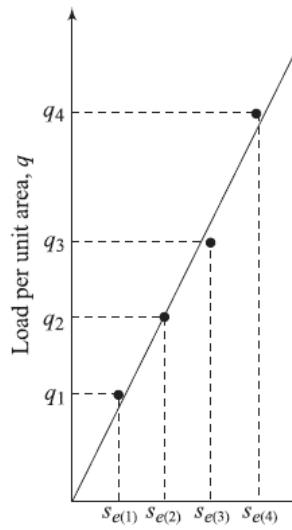
۱۲- رسم نتایج تغییرشکل با شدت بارگذاری:



117

### خلاصه‌ای از نحوه انجام آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی

۱۳- رسم نتایج تغییرشکل الاستیک متناظر با شدت بارگذاری و تعیین ضریب سختی خاک:



$$k_{\text{plate}} = \frac{qA}{s_e}$$

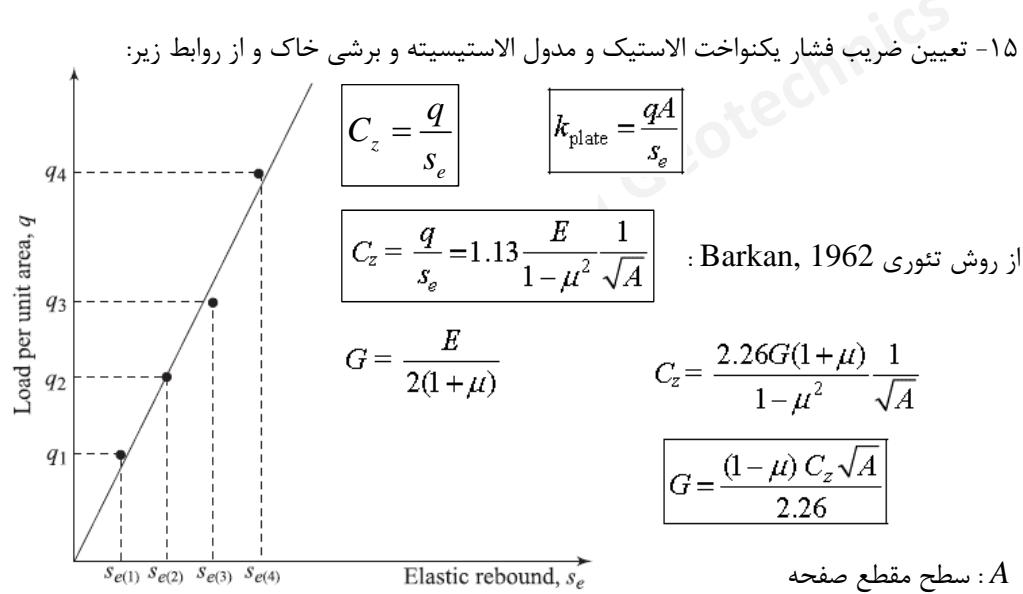
۱۴- تعیین ضریب سختی خاک چسینده و غیرچسینده (به ترتیب از بالا به پایین) با توجه به شالوده واقعی (Terzaghi, 1955):

$$k_{\text{foundation}} = k_{\text{plate}} \left( \frac{\text{foundation width}}{\text{plate width}} \right)$$

$$k_{\text{foundation}} = k_{\text{plate}} \left( \frac{\text{foundation width} + \text{plate width}}{2 \times \text{plate width}} \right)^2$$

118

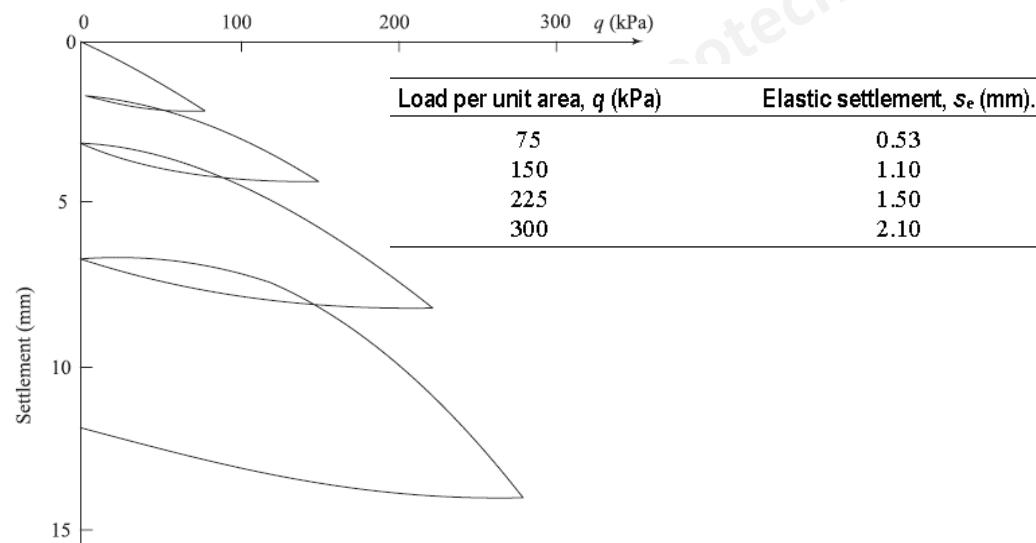
### خلاصه‌ای از نحوه انجام آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی



119

### مثالی از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی

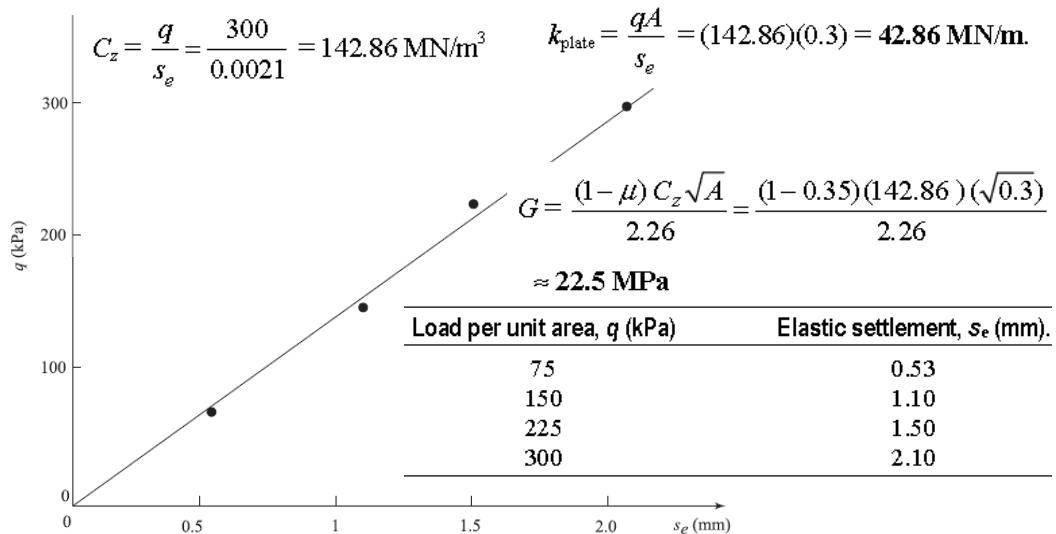
نتایج آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی بصورت شکل زیر است. سطح مقطع صفحه برابر با  $3.0 \times 3.5 = 10.5 \text{ متر مربع}$  است. مطلوبست تعیین الف)  $k_{\text{plate}}$  (ب) مدول برشی با فرض ضریب پواسون  $\mu = 0.3$ .



120

### Cyclic Field Plate Load Test

نتایج آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی بصورت شکل زیر است. سطح مقطع صفحه برابر با  $0.3 \times 0.35 = 0.35$  متر مربع است. مطلوبست تعیین (الف)  $k_{plate}$  (ب) مدول برشی با فرض ضریب پواسون  $0.35$



121

۱- انواع آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن

۲- انواع ارما در صحراهای و اندازه گیری های محلی

۳- تخمین پارامترهای دینامیکی سدا، برشی و میرایی با استفاده از روابط تجزیی

تقسیم بندی  
فصل چهارم



122

---

### ۳- تخمین پارامترهای دینامیکی مدول برشی و میرایی با استفاده از روابط تجربی

عوامل موثر بر مدول برشی دینامیکی و ضریب میرایی

قوانين ساختاری بین تنش-کرنش برشی

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه

مدول برشی و ضریب میرایی در شن

مدول برشی و ضریب میرایی در رس

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه سیمانته شده

---

123

---

### عوامل مؤثر بر مدول برشی دینامیکی و ضریب میرایی

- ۱- نوع خاک و خواص آن ( وزن مخصوص خشک، درجه اشباع، دستخوردگی، تراکم و ...)
- ۲- مقدار تنش استاتیکی اولیه
- ۳- مقدار تنش دینامیکی وارد
- ۴- مقدار سیکل های بار دینامیکی
- ۵- فرکانس بار دینامیک
- ۶- شکل و نوع بار دینامیک
- ۷- یکطرفه و یا دوطرفه بودن بار دینامیک

---

124

## روش های تعیین مدول برشی دینامیکی و ضریب میرایی

General procedure	Test condition	Approximate strain range	Properties determined
Determination of hysteretic stress-strain relationships	Triaxial compression	$10^{-2}$ to 5%	Modulus; damping
	Simple shear	$10^{-2}$ to 5%	Modulus; damping
	Torsional shear	$10^{-2}$ to 5%	Modulus; damping
Forced vibration	Longitudinal vibrations	$10^{-4}$ to $10^{-2}\%$	Modulus; damping
	Torsional vibrations	$10^{-4}$ to $10^{-2}\%$	Modulus; damping
	Shear vibrations—lab	$10^{-4}$ to $10^{-2}\%$	Modulus; damping
	Shear vibration—field	$10^{-4}$ to $10^{-2}\%$	Modulus
Free vibration tests	Longitudinal vibrations	$10^{-3}$ to 1%	Modulus; damping
	Torsional vibrations	$10^{-3}$ to 1%	Modulus; damping
	Shear vibration—lab	$10^{-3}$ to 1%	Modulus; damping
	Shear vibration—field	$10^{-3}$ to 1%	Modulus
Field wave velocity measurements	Comparison waves	$\approx 5 \times 10^{-4}\%$	Modulus
	Shear waves	$\approx 5 \times 10^{-4}\%$	Modulus
	Rayleigh waves	$\approx 5 \times 10^{-4}\%$	Modulus
Field seismic response	Measurement of motions at different levels in deposit		Modulus; damping

125

### ۳- تخمین پارامترهای دینامیکی مدول برشی و میرایی با استفاده از روابط تجربی

عوامل موثر بر مدول برشی دینامیکی و ضریب میرایی

قوانين ساختاری بین تنש-کرنش برشی

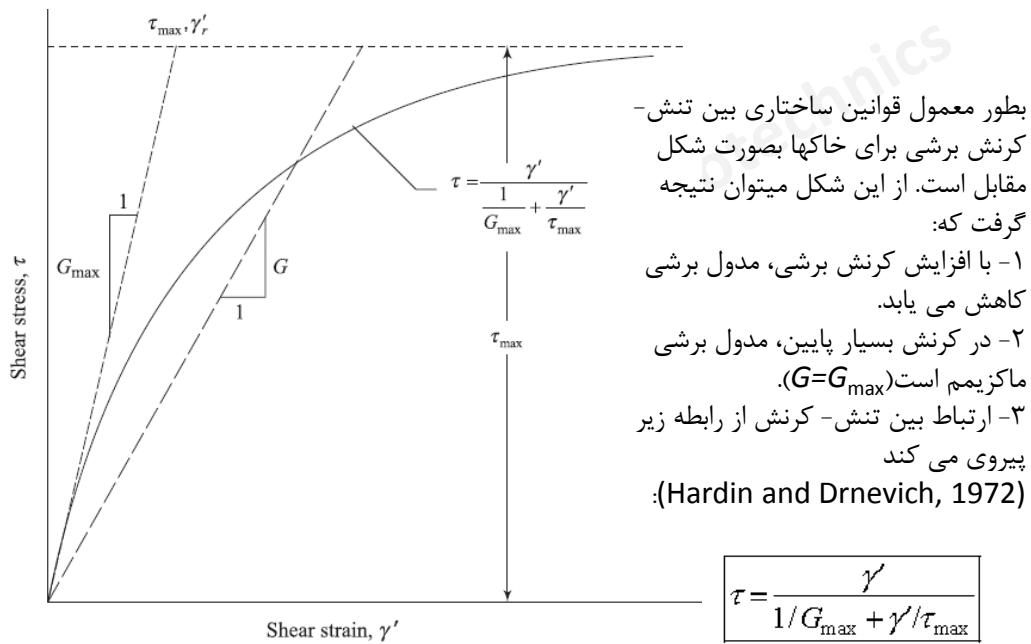
مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه

مدول برشی و ضریب میرایی در شن

مدول برشی و ضریب میرایی در رس

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه سیمانته شده

## قوانين ساختاری بین تنش-کرنش برشی



127

۳- تخمین پارامترهای دینامیکی مدول برشی و میرایی با استفاده از روابط تجربی

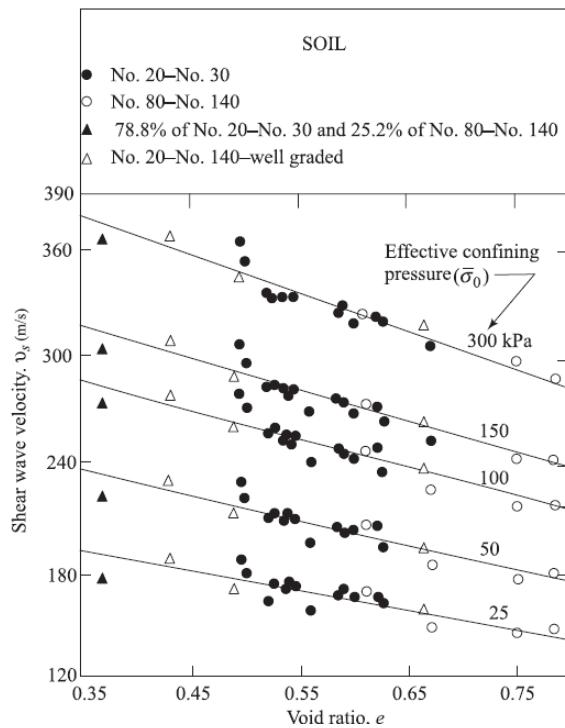
عوامل موثر بر مدلر ز پیشی دینامیکی و ضریب میرایی

قوانين ساختاری بین تنش-کرنش برشی

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه

مدول برشی و ضریب میرایی در رس

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه سیمانته شده



### مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه

آزمایشات هارдин و ریچارت با ستون تشدید در شکل زیر خلاصه شده است.  
 (ماکریم دامنه تغییر شکل برشی  $10^{-3}$  رادیان بوده است).  
 ممکن است (شاید) از شکل بتوان دریافت که مقدار  $v$  مستقل از دانه‌بندی، نحوه توزیع دانه‌ها و نیز تراکم نسبی خاک کوپیده شده باشد یعنی اگر دیاگرام‌هایی نظیر ۱۱ برای متغیرهای فوق الذکر ترسیم گردد، منحنی‌ها عدم ارتباط  $v$  با متغیرهای فوق الذکر را نشان بدهند.  
 اما اگر جواب‌های آزمایشی برای دو پارامتر  $e$  و  $\bar{\sigma}_0$  رسم گردند بیشترین ارتباط را نشان می‌دهند چنان که در شکل زیر مشخص گردیده است.

129

### مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه گردگوشه اوتاوا

در سیستم SI:

$$v_s \text{ (m/s)} = (19.7 - 9.06e) \bar{\sigma}_0^{-\frac{1}{4}} \text{ (N/m}^2\text{)}, \quad \bar{\sigma}_0 \geq 95.8 \text{ kN/m}^2$$

$$v_s = (11.36 - 5.35e) \bar{\sigma}_0^{-0.3}, \quad \bar{\sigma}_0 < 95.8 \text{ kN/m}^2$$

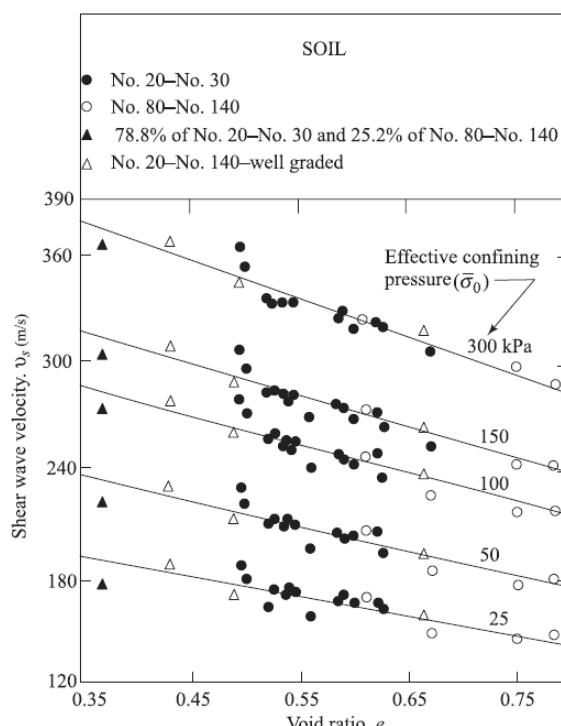
$$G_{\max} \text{ (kPa)} = \frac{6908(2.17 - e)^2 \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}} \text{ (kPa)}}{1 + e}$$

در سیستم انگلیسی:

$$v_s \text{ (ft/s)} = \left( 170 - \frac{78}{2e} \right) \bar{\sigma}_0^{-\frac{1}{4}} \text{ (lb/ft}^2\text{)}, \quad \bar{\sigma}_0 > 2000 \text{ lb/ft}^2$$

$$v_s = (119 - 56e) \bar{\sigma}_0^{-0.3}, \quad \bar{\sigma}_0 < 2000 \text{ lb/ft}^2$$

$$G_{\max} = \frac{2630(2.17 - e)^2 \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}}}{1 + e}$$



130

## مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه کوارتزی تیزگوشه اوتاوا

گراف نشان داده شده در روبرو و معادلات رگرسیون شده مورد بحث برای ماسه خشک گردگوشه از منطقه اتاوا به دست آمده است. اما برای ماسه تیزگوشه از روابط زیر تعییت می کند:

در سیستم SI:

$$v_s (\text{m/s}) = (18.43 - 6.2e) \bar{\sigma}_0^{-\frac{1}{4}} (\text{N/m}^2)$$

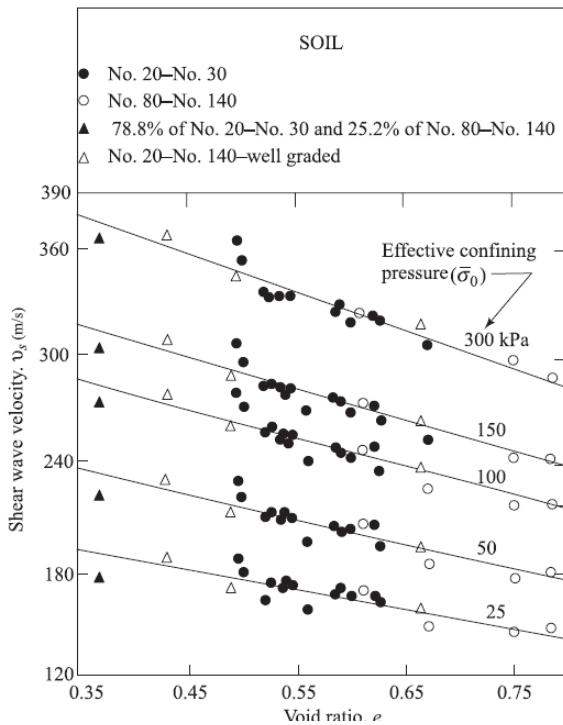
$$G_{\max} = \frac{3230(2.97-e)^2 \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}}}{1+e}$$

در سیستم انگلیسی:

$$v_s (\text{ft/s}) = (159 - 53.5e) \bar{\sigma}_0^{-\frac{1}{4}} (\text{lb/ft}^2)$$

$$G_{\max} = \frac{1230(2.97-e)^2 \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}}}{1+e}$$

$\bar{\sigma}_0 = ?$



131

تعیین مقدار تنش متوسط اکتاہیدرال  $\bar{\sigma}_0 = ?$

برای نمونه خاکی که تحت تأثیر شرایط تنش کلی مانند  $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$  قرار می گیرد، میانگین فشار مؤثر جانبی برابر است با:

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3}I_1 = \sigma_{oct}$$

$I_1$  نا متغیر تنش اول،  $\sigma_{oct} \leftarrow$  تنش اکتاہیدرال

$\bar{\sigma}_1 = \text{effective vertical stress} = \bar{\sigma}_v$

$\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_3 = K_0 \bar{\sigma}_v$

$$K_0 = 1 - \sin(\phi)$$

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{1}{3} [\bar{\sigma}_v + 2\bar{\sigma}_v (1 - \sin \phi)] = \frac{\bar{\sigma}_v}{3} (3 - 2 \sin \phi)$$

## مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه

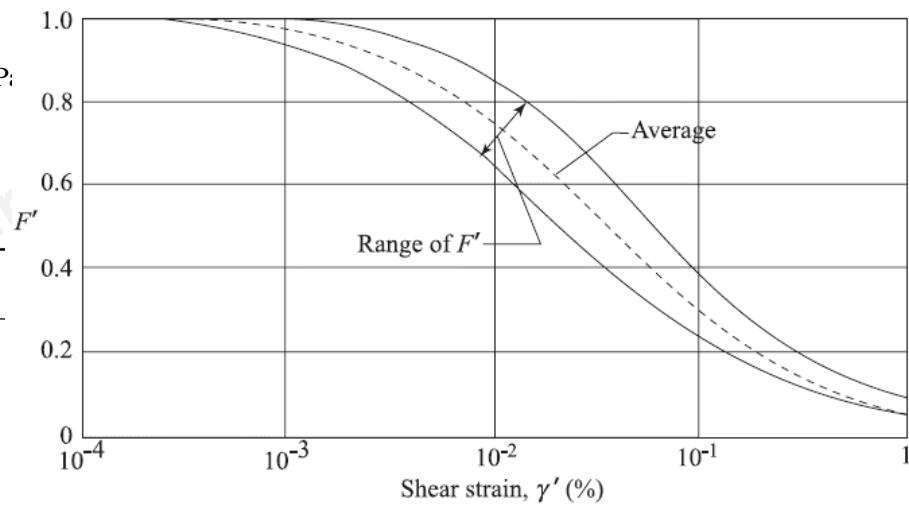
محققان برای تعیین مدول برشی و ضریب میرایی از آزمایشات مختلفی استفاده و ارائه کردند. با استفاده از نتایج آزمایشات روابط تجربی توسط سید و ادريس در سال ۱۹۷۰ پیشنهاد شد:

$$G(\text{kPa}) = 218.82 K_2 \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}} (\text{kPa})$$

$$G_{\max}(\text{kPa}) = 218.82 K_{2(\max)} \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}} (\text{kPa})$$

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{K_2}{K_{2(\max)}} = F'$$

Relative density, $R_D$ (%)	$K_{2(\max)}$
30	34
40	40
45	43
60	52
75	61
90	70



133

Soil	Location	Depth ft.	$K_2$
Loose moist sand	Minnesota	10	34
Dense dry sand	Washington	10	44
Dense saturated sand	So. California	50	58
Dense saturated sand	Georgia	200	60
Dense saturated silty sand	Georgia	60	65
Dense saturated sand	So. California	300	72
Extremely dense silty sand	So. California	125	86
Dense dry sand (slightly cemented)	Washington	65	166
Moist clayey sand	Georgia	30	119

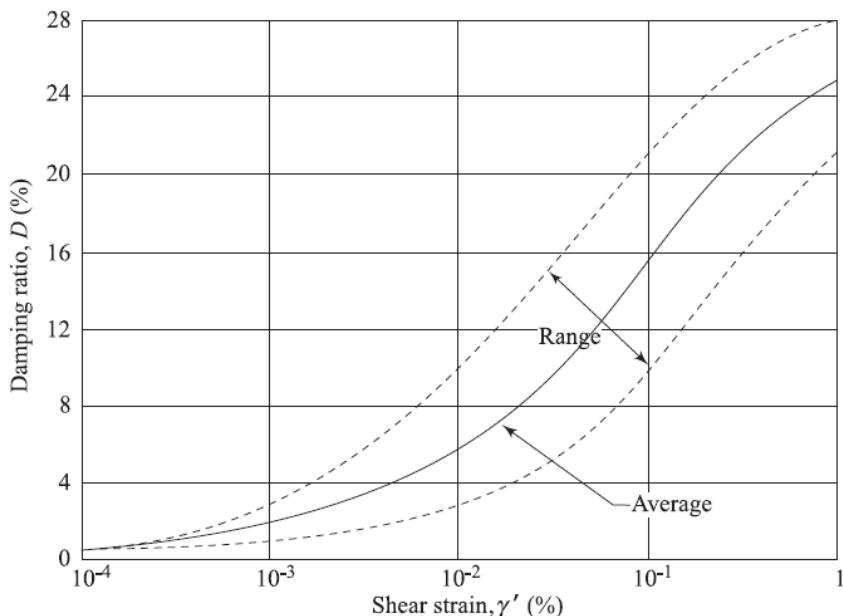
$$^* \text{Shear modulus, } G = 1000 K_2 (\sigma_m')^{\frac{1}{2}} \text{ psf}$$

134

## مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه

همچنین مطالعات سید و ادريس در سال ۱۹۷۰ و هاردين و درنویج ۱۹۷۲ نشان می دهد که میرایی به پارامترهای زیر وابسته است:

- ۱- نوع خاک و خواص آن ( ضریب تخلخل ، درجه اشباع و ... )
- ۲- ضریب جانبی سکون خاک
- ۳- زاویه اصطکاک داخلی خاک
- ۴- مقدار سیکل های بار دینامیکی
- ۵- فرکانس بار دینامیک
- ۶- سطح یا میزان کرنش برشی
- ۷- فشار محصور کننده



135

## مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه

بر مبنای مطالعات (Sherif, Ishibashi, Gaddah 1977) بر روی تست پیچشی ساده سیکلی نشان دادند که میرایی از رابطه زیر قابل تعیین است:

$$D = \frac{50 - 0.087 \bar{\sigma}_0}{38} (73.3F - 53.3)(\gamma')^{0.3} (1.01 - 0.046 \log N)$$

$$F = \frac{1}{\psi^2 C_g} \quad \psi = \frac{S'}{S}$$

$$C_g = \frac{D_{30}^2}{(D_{10})(D_{60})}$$

: تعداد سیکل  $N$

: فاکتور کروی  $F$

: قطربی که  $i$  درصد دانه ها از آن کوچکترند  $D_i$

: سطح جانبی دانه  $S$

: سطح جانبی کره هم حجم دانه  $S'$

: ضریب خمیدگی  $C_g$

136

مثال:

سطح آب زیر زمینی ۳ متر پایین تر از سطح زمین است. وزن مخصوص خاک بالای سطح آب ۱۵.۵ و زیر آن ۱۸.۵ کیلونیوتن بر مترمکعب است. اگر زاویه اصطکاک داخلی و ضریب تخلخل خاک به ترتیب برابر با  $36^\circ$  درجه و  $0.6$  باشد، مطلوبست تعیین مدول برشی و ضریب میرایی خاک در عمق ۷.۵ متری از سطح زمین و در سطح کرنش  $\% 12$ ؟

حل:

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{\bar{\sigma}_v}{3} (3 - 2 \sin \phi)$$

$$\bar{\sigma}_v = 3(15.5) + 4.5(18.5 - 9.81) = 85.61 \text{ kPa}$$

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{85.61}{3} [3 - (2)(\sin 36)] = 52.06 \text{ kPa}$$

$$\phi = 36^\circ \quad \rightarrow \quad R_D \approx 45\%, K_{2(\max)} \approx 43$$

Relative density, $R_D (\%)$	$K_{2(\max)}$
30	34
40	40
45	43
60	52
75	61
90	70

$$G_{\max} = 218.82 K_{2(\max)} \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}} = 218.82(43)\sqrt{52.06} = 67890 \text{ kPa} = 67.9 \text{ MPa}$$

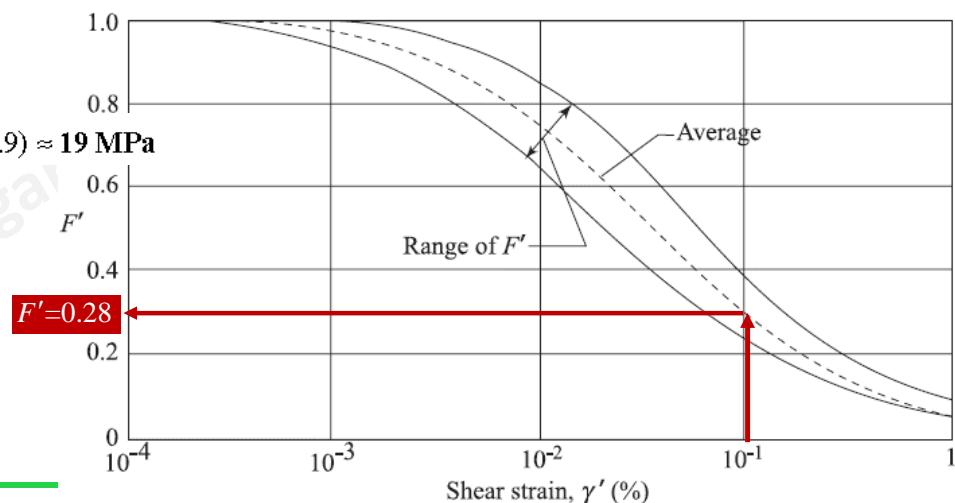
137

مثال:

سطح آب زیر زمینی ۳ متر پایین تر از سطح زمین است. وزن مخصوص خاک بالای سطح آب ۱۵.۵ و زیر آن ۱۸.۵ کیلونیوتن بر مترمکعب است. اگر زاویه اصطکاک داخلی و ضریب تخلخل خاک به ترتیب برابر با  $36^\circ$  درجه و  $0.6$  باشد، مطلوبست تعیین مدول برشی و ضریب میرایی خاک در عمق ۷.۵ متری از سطح زمین و در سطح کرنش  $\% 12$ ؟

$$G_{\max} = 67.9 \text{ MPa}$$

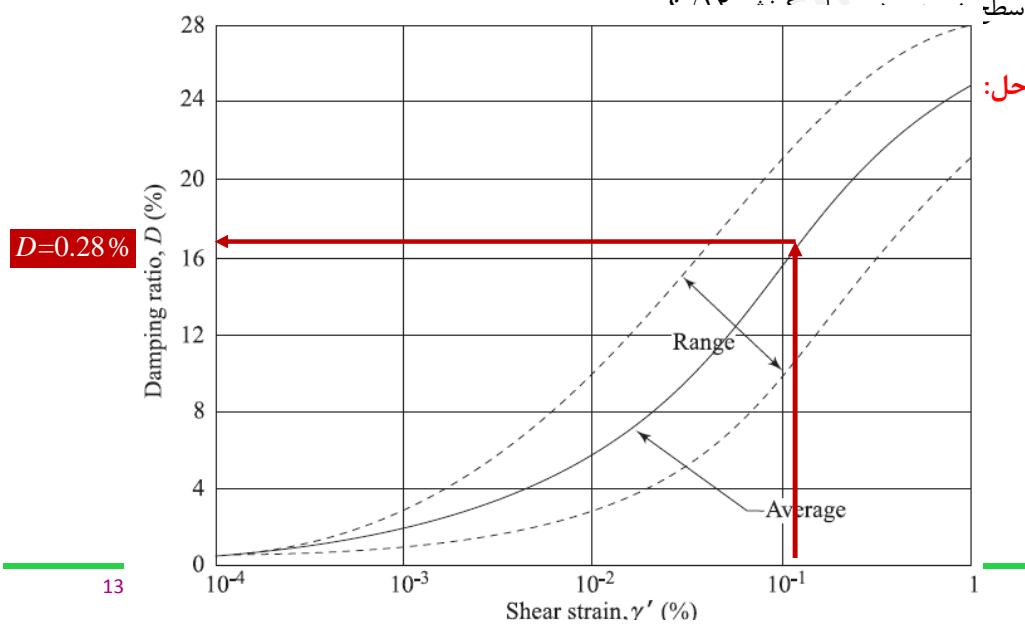
$$G = F' G_{\max} = (0.28)(67.9) \approx 19 \text{ MPa}$$



138

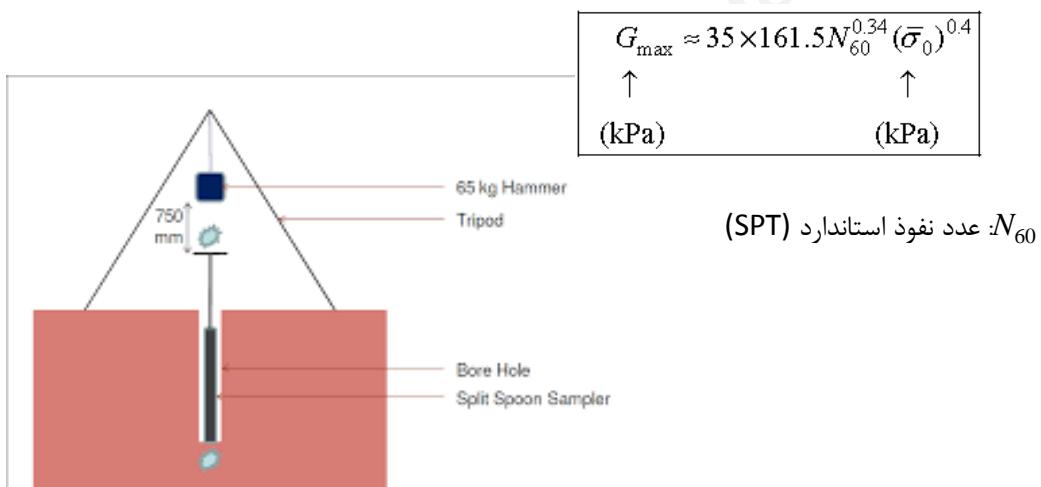
مثال:

سطح آب زیر زمینی ۳ متر پایین تر از سطح زمین است. وزن مخصوص خاک بالای سطح آب ۱۵.۵ و زیر آن ۱۸.۵ کیلونیوتن بر مترمکعب است. اگر زاویه اصطکاک داخلی و ضریب تخلخل خاک به ترتیب برابر با  $36^\circ$  و  $0.6$  باشد، مطلوبست تعیین مدول برشی و ضریب میرایی خاک در عمق ۷.۵ متری از سطح زمین.



ارتباط بین ماکریم مدول برشی و عدد نفوذ استاندارد در ماسه

بر مبنای مطالعات Seed et al., 1986 نشان دادند که بیشینه مدول برشی از رابطه زیر قابل تعیین است:



### ۳- تخمین پارامترهای دینامیکی مدول برشی و میرایی با استفاده از روابط تجربی

عوامل موثر بر مدلر زیستی دینامیکی و ضریب میرایی

قوانين ساختاری بین تنش-گزند-برشی

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه

مدول برشی و ضریب میرایی در شن

مدول برشی و ضریب میرایی در رس

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه سیمانته شده

141

#### مدول برشی و ضریب میرایی در شن

نتایج مطالعات سید و همکارانش در سال ۱۹۸۶ بر روی شن خوب دانه بندی شده بصورت زیر است:

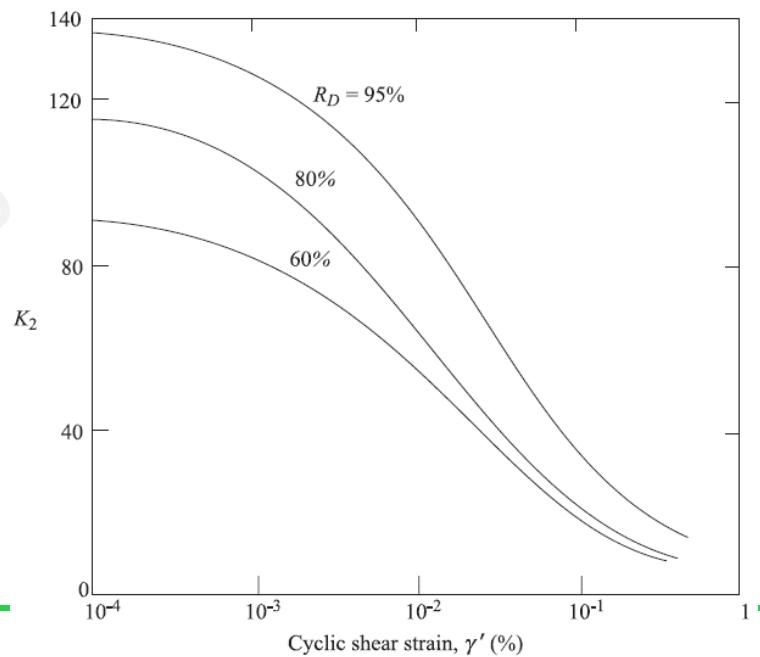
$$G_{\max} (\text{kPa}) = 218.82 K_{2(\max)} \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}} (\text{kPa})$$

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{K_2}{K_{2(\max)}} = F'$$

$$G (\text{kPa}) = 218.82 K_{2(\max)} F' \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}} (\text{kPa})$$

برای شن  $80 \leq K_{2(\max)} \leq 180$

برای ماسه  $30 \leq K_{2(\max)} \leq 75$



142

## مدول برشی و ضریب میرایی در شن

نتایج مطالعات سید و همکارانش در سال ۱۹۸۶ یک روی شن خوب دانه بندی شده بصورت زیر است:

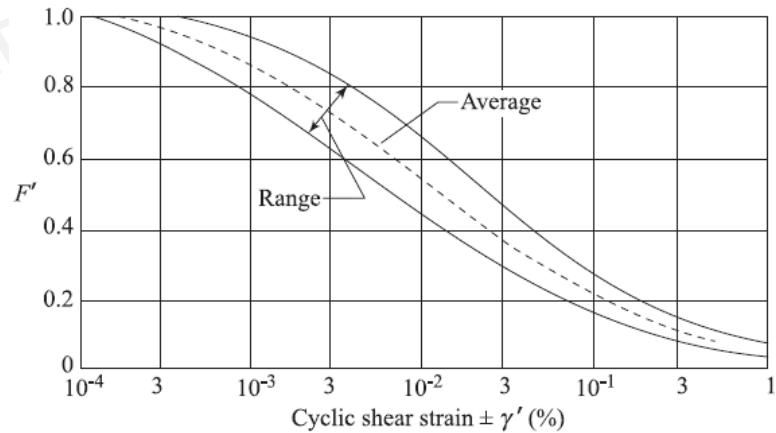
$$G_{\max} (\text{kPa}) = 218.82 K_{2(\max)} \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}} (\text{kPa})$$

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{K_2}{K_{2(\max)}} = F'$$

$$G (\text{kPa}) = 218.82 K_{2(\max)} F' \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}} (\text{kPa})$$

برای شن       $80 \leq K_{2(\max)} \leq 180$

برای ماسه       $30 \leq K_{2(\max)} \leq 75$



143

## مدول برشی و ضریب میرایی در شن

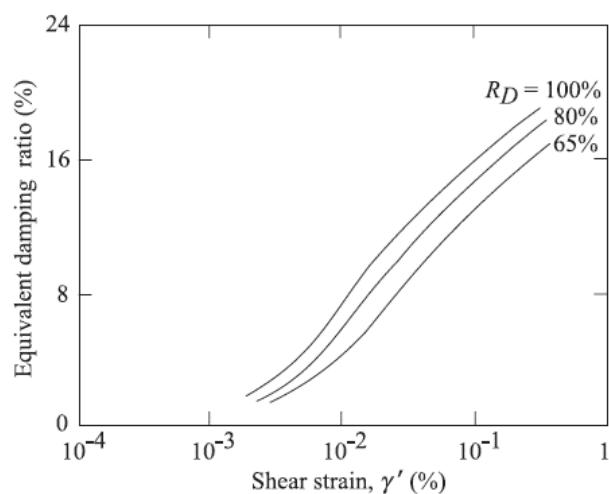
نتایج مطالعات سید و همکارانش در سال ۱۹۸۶ یک روی شن خوب دانه بندی شده بصورت زیر است:

ضریب میرایی شن از حلقه هیسترزیس در ۵ سیکل تعیین شده است.

۱- در یک کرنش مشخص، با افزایش تراکم، ضریب میرایی افزایش می یابد.

۲- ضریب میرایی چندان تحت تاثیر تعداد سیکل قرار نمی گیرد. در ۶۰ سیکل به  $\frac{3}{4}$  اندازه‌ی اولیه خود در یک سطح ثابتی از کرنش، کاهش می یابد.

۳- منحنی ضریب میرایی بر حسب کرنش شن شبیه ماسه است.



144

### ۳- تخمین پارامترهای دینامیکی مدول برشی و میرایی با استفاده از روابط تجربی

عوامل موثر بر مدلر پیشی دینامیکی و ضریب میرایی

قوانين ساختاری بین تنش-کرن-برشی

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه

مدول برشی و ضریب میرایی در شن

مدول برشی و ضریب میرایی در رس

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه سیمانته شده

145

### مدول برشی و ضریب میرایی در رس

بر اساس آزمایشات ستون تشدید افراد مختلفی گزارشات و داده‌های به دست آمده را ارائه کرده‌اند مثل لارنس در آزمایشات خود با نمونه‌های ستون خاک برای به دست آوردن ۷ زمان انتشار امواج را برای فرکانس‌های بالا اندازه گرفت و نشان داده شد که برای خاک‌های رسی تحکیم عادی یافته با حساسیت عادی و کم می‌توان از همان معادلات ماسه تیزگوشه استفاده کرد:

در سیستم انگلیسی: SI:

$$G_{\max} = \frac{3230(2.97-e)^2 \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}}}{1+e} \quad G_{\max} = \frac{1230(2.97-e)^2 \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}}}{1+e}$$

برخلاف خاک‌های رسی عادی تحکیم یافته مقدار  $G$  برای خاک‌های رسی فوق تحکیم تابعی از OCR می‌باشد.

در سیستم انگلیسی: SI:

$$G_{\max} = \frac{3230(2.97-e)^2 (\text{OCR})^K \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}}}{1+e} \quad G_{\max} = \frac{1230(2.97-e)^2 (\text{OCR})^K \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}}}{1+e}$$

146

## مدول برشی و ضریب میرایی در رس

برخلاف خاکهای رسی عادی تحکیم یافته مقدار  $G$  برای خاکهای رسی فوق تحکیم تابعی از OCR می‌باشد.

در سیستم SI:

$$G_{\max} = \frac{3230(2.97-e)^2 (\text{OCR})^K \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}}}{1+e}$$

در سیستم انگلیسی:

$$G_{\max} = \frac{1230(2.97-e)^2 (\text{OCR})^K \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}}}{1+e}$$

توان K در عبارات فوق بستگی به اندازه خمیری خاک دارد که در جدول رویرو آورده شده است.

*Plasticity index,*

PI (%)	K
0	0
20	0.18
40	0.30
60	0.41
80	0.48
$\geq 100$	0.5

:OCR

$$\text{OCR} = \frac{\bar{\sigma}_c}{\bar{\sigma}_0} \rightarrow \begin{array}{l} \text{تنش هیدرو استاتیکی که تحت} \\ \text{آن خاک تحکیم یافته} \end{array}$$

تنش هیدرو استاتیکی موجود

147

تعیین مقدار تنش متوسط اکتاہیدرال در رس  $\bar{\sigma}_0 = ?$

برای نمونه خاکی که تحت تأثیر شرایط تنش کلی مانند  $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$  قرار می‌گیرد، میانگین فشار مؤثر جانبی برابر است با:

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3}I_1 = \sigma_{oct}$$

$I_1$  نا متغیر تنش اول،  $\sigma_{oct} \leftarrow$  تنش اکتاہیدرال  
 $\bar{\sigma}_1 = \text{effective vertical stress} = \bar{\sigma}_v$   
 $\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_3 = K_0 \bar{\sigma}_v$

$$\boxed{\bar{\sigma}_0 = \frac{1}{3}(\bar{\sigma}_v + 2K_0 \bar{\sigma}_v)}$$

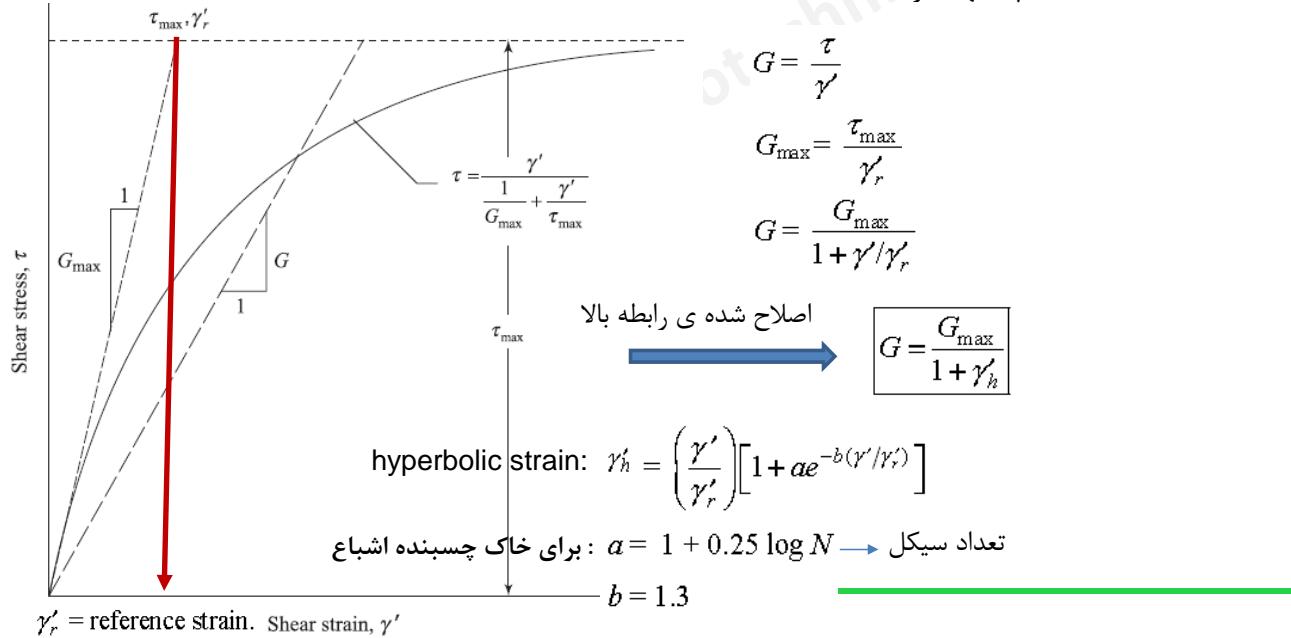
$$K_0 = 0.4 + 0.007(\text{PI}), \quad 0 \leq \text{PI} \leq 40\%$$

$$K_0 = 0.68 + 0.001(\text{PI} - 40), \quad 40\% \leq \text{PI} \leq 80\%$$

148

## مدول برشی و ضریب میرایی در رس

برای یافتن مدول برشی در کرنش های بزرگ Hardin and Drnevich 1972 روش زیر را پیشنهاد کردند:



## مدول برشی و ضریب میرایی در رس

برای یافتن مدول برشی در کرنش های بزرگ Hardin and Drnevich 1972 روش زیر را پیشنهاد کردند:

$$G = \frac{G_{\max}}{1 + \gamma'_h}$$

$$G_{\max} = \frac{\tau_{\max}}{\gamma'_r}$$

hyperbolic strain:

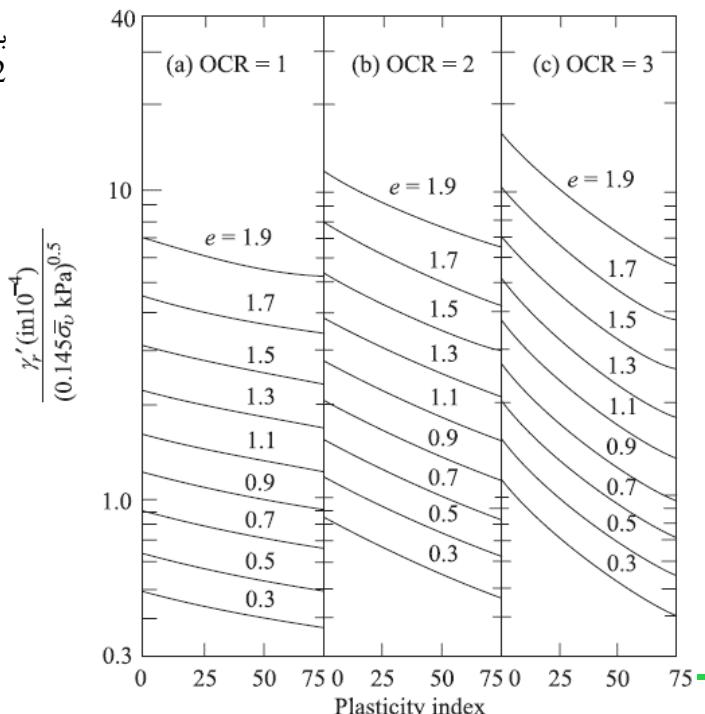
$$\gamma'_h = \left( \frac{\gamma'}{\gamma'_r} \right) \left[ 1 + ae^{-b(\gamma'/\gamma'_r)} \right]$$

: برای خاک چسبنده اشباع

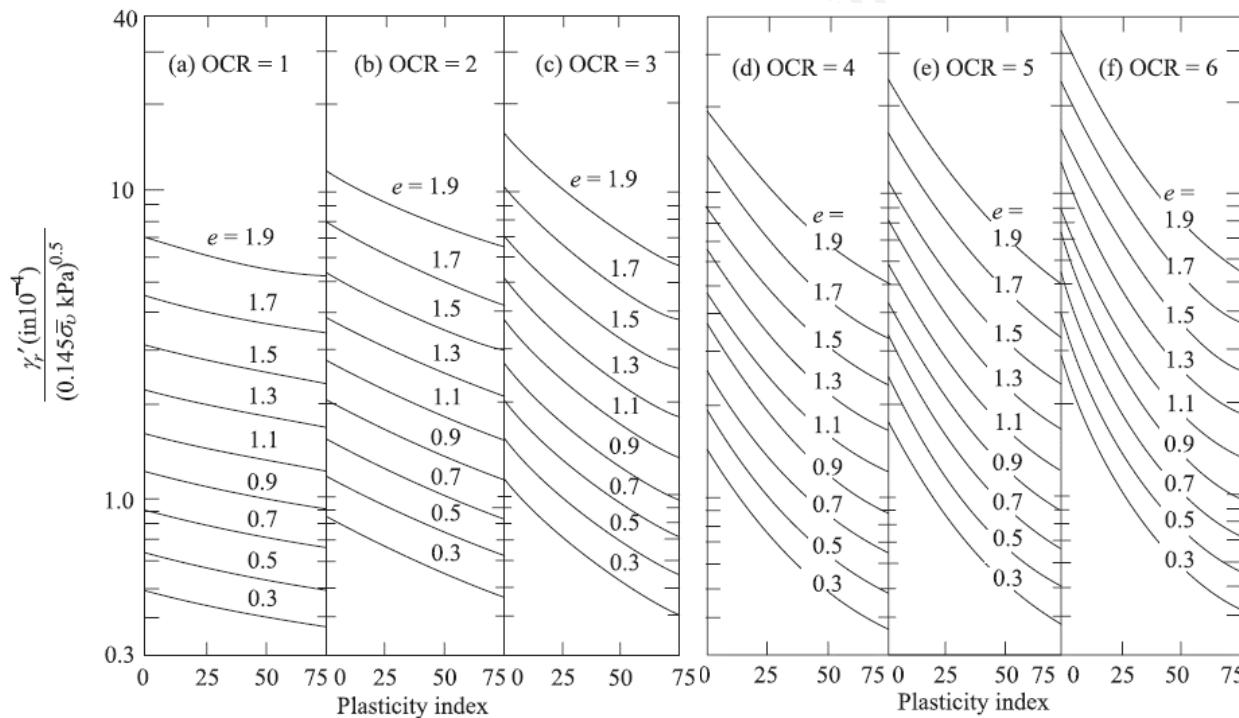
تعداد سیکل  $N \rightarrow a = 1 + 0.25 \log N$

$b = 1.3$

$\gamma'_r = \text{reference strain.}$



## مدول برشی و ضریب میرایی در رس



## مدول برشی و ضریب میرایی در رس

برای یافتن ضریب میرایی Hardin and Drnevich 1972 روش زیر را پیشنهاد کردند:

برای خاک چسبنده اشبع :

$$D = D_{\max} \left( 1 - \frac{G}{G_{\max}} \right) \quad D_{\max} (\%) = 31 - (0.3 + 0.003f) \bar{\sigma}_0^{1/2} + 1.5f^{1/2} - 1.5(\log N)$$

فرکانس (Hz)

تعداد سیکل

اصلاح شده ی رابطه بالا

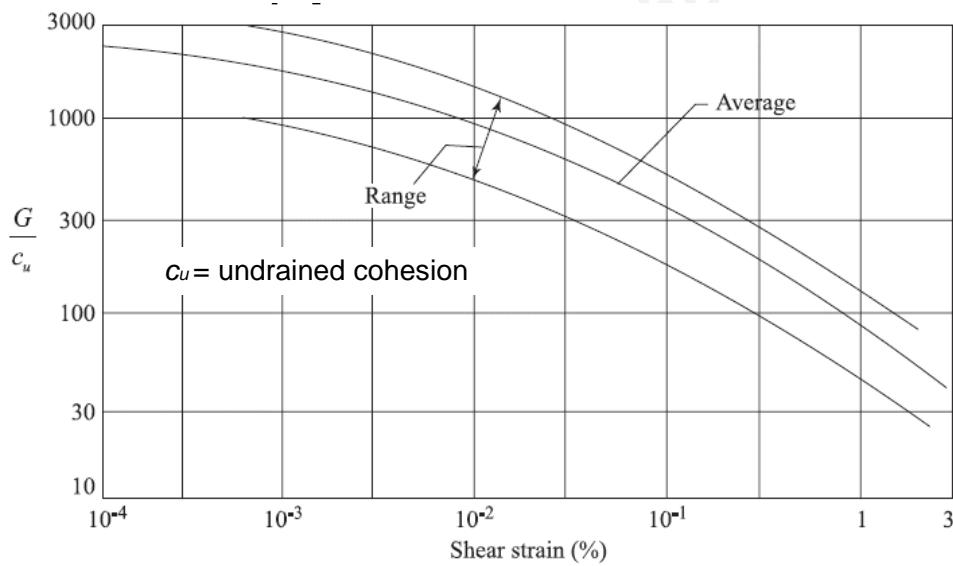
$$\frac{D}{D_{\max}} = \frac{\gamma''_h}{1 + \gamma''_h} \quad \gamma''_h = \left( \frac{\gamma'}{\gamma_r'} \right) \left[ 1 + a_1 e^{-b_1(\gamma'/\gamma_r')} \right] \quad a_1 = 1 + 0.2f^{1/2}$$

$$b_1 = 0.2f(e^{-0.01\bar{\sigma}_0}) + 0.023\bar{\sigma}_0 + 0.3\log N$$

ضریب میرایی به پارامترهایی نظری نشانه خمیری، تنش جانبی، ضریب پوکی، سن زمین شناسی، میزان سمنت بودن و ... وابسته است که برای جزئیات می توانید به منابع Vucetic and Dobry (1987) و Dobry and Vucetic (1991) رجوع کنید.

### تعیین مدول برشی و ضریب میرایی در رس به روش سید و ادريس(1970)

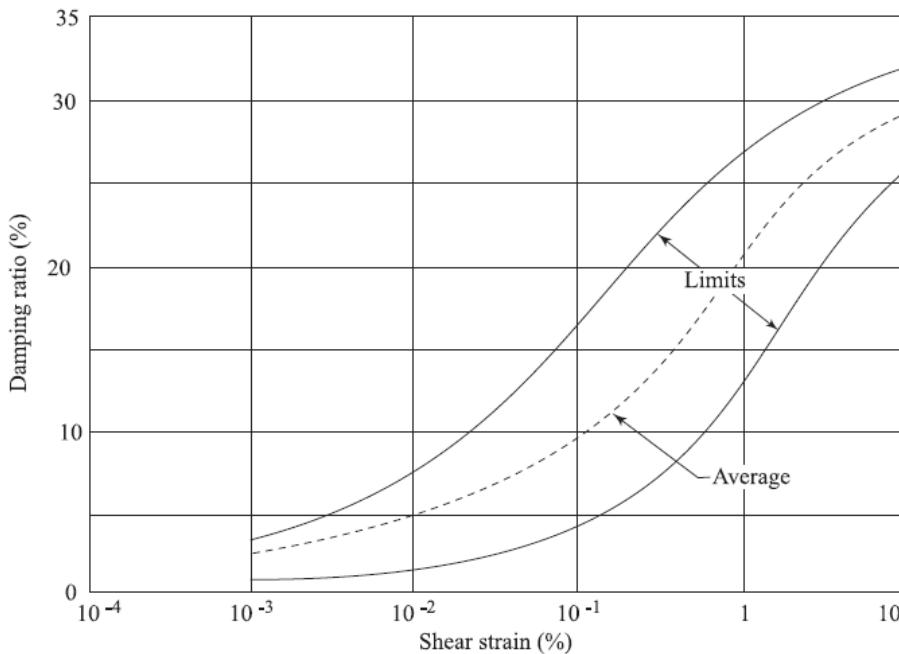
سید و ادريس با توجه به نتایج آزمایشات مختلف در سطوح مختلف کرنش ها منحنی زیر را برای خاکهای چسبنده اشباع پیشنهاد کردند:



153

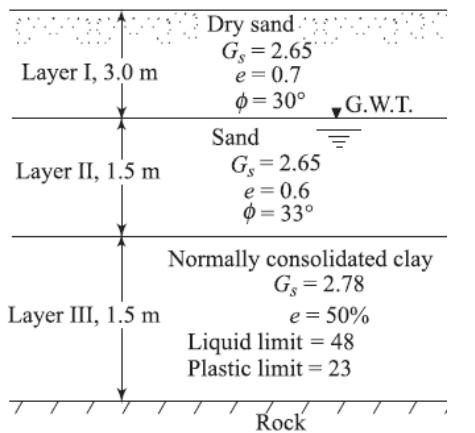
### تعیین مدول برشی و ضریب میرایی در رس به روش سید و ادريس(1970)

بطور مشابه برای یافتن ضریب میرایی منحنی زیر را پیشنهاد کردند:



15

مثال: پروفیل خاکی مطابق شکل داده شده است تغییرات ضریب برشی را در عمق رسم نمایید



حل:

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{1}{3}(\bar{\sigma}_v + 2K_0\bar{\sigma}_v)$$

$$\begin{aligned} \text{Layer (I)} \quad K_0 &= 1 - \sin \phi = 1 - \sin 30 = 0.5, \\ \text{Layer (II)} \quad K_0 &= 1 - \sin 33 = 0.455 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Layer (III)} \quad PI &= LL - PL = 48 - 23 = 25 \\ K_0 &= 0.4 + 0.007(PI), \quad PI \leq 40\% \\ K_0 &= 0.4 + 0.007(25) = 0.575 \end{aligned}$$

محاسبه وزن مخصوص موثر:

$$z = 0 - 3 \text{ m} \Rightarrow \gamma_{\text{eff}} = \gamma_{\text{dry}} = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} = \frac{(2.65)(9.81)}{1+0.7} = 15.29 \text{ kN/m}^3$$

$$z = 3 - 4.5 \text{ m} \Rightarrow \gamma_{\text{eff}} = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = \frac{(G_s - 1)}{1+e} \gamma_w = \frac{(2.65 - 1)(9.81)}{1+0.6} = 10.12 \text{ kN/m}^3$$

$$z = 4.5 - 6.0 \text{ m} \Rightarrow \gamma_{\text{eff}} = \frac{(G_s - 1)}{1+e} \gamma_w = \frac{(2.78 - 1)(9.81)}{1+1.22} = 7.87 \text{ kN/m}^3$$

155

$$\text{Layer (I)} \quad K_0 = 0.50, \quad \gamma_{\text{eff}} = 15.29 \text{ kN/m}^3$$

مثال:

$$\text{Layer (II)} \quad 0.455, \quad 10.12 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{Layer (III)} \quad 0.575, \quad 7.87 \text{ kN/m}^3$$

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{1}{3}(\bar{\sigma}_v + 2K_0\bar{\sigma}_v)$$

حل:

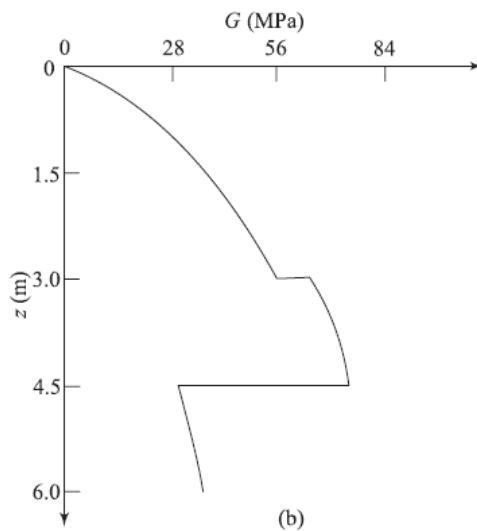
$$\text{برای ماسه: } G_{\max} (\text{kPa}) = \frac{6908(2.17-e)^2 \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}} (\text{kPa})}{1+e} \quad \text{برای رس: } G_{\max} = \frac{3230(2.97-e)^2 \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}}}{1+e}$$

Depth z (m)	$\bar{\sigma}_1$ (kPa)	$\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_3 = K_0 \bar{\sigma}_1$ (kPa)	$\bar{\sigma}_0$ (kPa)	e	$G = G_{\max}$ (MPa)
0	0	0	0	0.7	0
1.5	$15.29 \times 1.5$ $= 22.94$	11.47	15.29	0.7	34.34 <sup>a</sup>
3.0 (in layer I)	$15.29 \times 3$ $= 45.87$	22.94	30.58	0.7	48.56 <sup>a</sup>
3.0 (in layer II)	45.87	20.87	29.20	0.6	57.51 <sup>a</sup>
4.5 (in layer II)	$45.87 + 10.12 \times 1.5$ $= 61.05$	27.78	38.87	0.6	66.35 <sup>a</sup>
4.5 (in layer III)	61.05	35.10	43.75	1.22	29.47 <sup>b</sup>
6.0	$61.05 + 7.87 \times 1.5$ $= 72.86$	41.89	52.21	1.22	32.20 <sup>b</sup>

مثال:

حل:

Depth $z$ (m)	$G = G_{\max}$ (MPa)
0	0
1.5	34.34 <sup>a</sup>
3.0 (in layer I)	48.56 <sup>a</sup>
3.0 (in layer II)	57.51 <sup>a</sup>
4.5 (in layer II)	66.35 <sup>a</sup>
4.5 (in layer II)	29.47 <sup>b</sup>
6.0	32.20 <sup>b</sup>



۳- تخمین پارامترهای دینامیکی مدول برشی و  
میرایی با استفاده از روابط تجربی

عوامل موثر بر مدول برشی دینامیکی و ضریب میرایی

قوانين ساختاری بین تنش-کرنش برشی

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه

مدول برشی و ضریب میرایی در شن

مدول برشی و ضریب میرایی در رس

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه سیمانته شده

مدول پرشی و ضریب میرایی در ماسه سیمانته شده

کربنات کلسیم در ماسه باعث سیمانته شدن آن می‌شود. با ترکیب سیمان پرتلند و ماسه می‌توان این نوع ماسه را بوجود آورد. آزمایشات بر روی این نوع ماسه سیمانته سبک نشان می‌دهد که مدول برشی از رابطه تجربی زیر پیروی می‌کند (Saxena, Avramidis, and Reddy, 1988):

ماکریم مدول برشی ماسه سیمانته شده

$$G_{\max(CS)} = G_{\max(S)} + \Delta G_{\max(C)} \quad \text{ماکریم مدول برشی ناشی از اثر سیمانته}$$

ماکریم مدول برشی ماسه تنها

در صد سیمانته

$$G_{\max(S)} = \frac{428.2}{0.3 + 0.7e^2} (P_a)^{0.426} (\bar{\sigma}_0)^{0.574}$$

↑	↑	↑
(kPa)	(kPa)	(kPa)

$$\frac{\Delta G_{\max(C)}}{P_a} = \frac{172}{(e - 0.5168)} (CC)^{0.88} \left( \frac{\bar{\sigma}_0}{P_a} \right)^{0.515e - 0.13CC + 0.285}$$

(for  $CC < 2\%$ )

$$\frac{\Delta G_{\max(C)}}{P_a} = \frac{773}{e} (CC)^{1.2} \left( \frac{\bar{\sigma}_0}{P_a} \right)^{0.698e - 0.04CC - 0.2}$$

(for  $2\% \leq CC \leq 8\%$ )

فشار اتمسفر

159

مدول پرشی و ضریب میرایی در ماسه سیمانته شده

کربنات کلسیم در ماسه باعث سیمانته شدن آن می‌شود. با ترکیب سیمان پرتلند و ماسه می‌توان این نوع ماسه را بوجود آورد. آزمایشات بر روی این نوع ماسه سیمانته سبک نشان می‌دهد که مدول برشی از رابطه تجربی زیر پیروی می‌کند (Saxena, Avramidis, and Reddy, 1988):

$$D_{CS} = D_S + \Delta D_C \quad (\gamma' \leq 10^{-3}\%)$$

ضریب میرایی ناشی از اثر سیمانته

ضریب میرایی ماسه تنها

$$D_S = 0.94 \left( \frac{\bar{\sigma}_0}{P_a} \right)^{-0.38}$$

$$\Delta D_C = 0.49(CC)^{1.07} \left( \frac{\bar{\sigma}_0}{P_a} \right)^{-0.36}$$

160

### مثالی از مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه سیمانته شده

اگر نمونه ای از خاک ماسه ای سیمانته شده سبک تحت تنش موقت محصور شده برابر با ۹۸ kPa قرار بگیرد، مطلوبست تعیین  $G_{\max(CS)}$  در صورتی که  $e = 0.7$  و  $CC = 3\%$  است.

$$G_{\max(S)} = \frac{428.2}{0.3 + 0.7e^2} (P_a)^{0.426} (\bar{\sigma}_0)^{0.574} = \frac{428.2}{0.3 + (0.7)(0.7)^2} (100)^{0.426} (98)^{0.574} \\ = 65,805 \text{ kPa} = 0.066 \text{ GPa}$$

$$\frac{\Delta G_{\max(C)}}{P_a} = \frac{773}{e} (CC)^{1.2} \left( \frac{\bar{\sigma}_0}{P_a} \right)^{0.698e - 0.04CC - 0.2} \quad \frac{\Delta G_{\max(C)}}{100} = \frac{773}{0.7} (3)^{1.2} \left( \frac{98}{100} \right)^{[0.698(0.7) - 0.04(3) - 0.2]} \\ = (1104.3)(3.737)(0.994) \\ = 416,067 \text{ kPa} = 0.416 \text{ GPa}$$

**تمرین**

$$D_{CS} = ?$$

161

$$G_{\max(CS)} = G_{\max(S)} + \Delta G_{\max(C)} \\ = 0.066 + 0.416 = 0.482 \text{ GPa} = 482 \text{ MPa}$$

