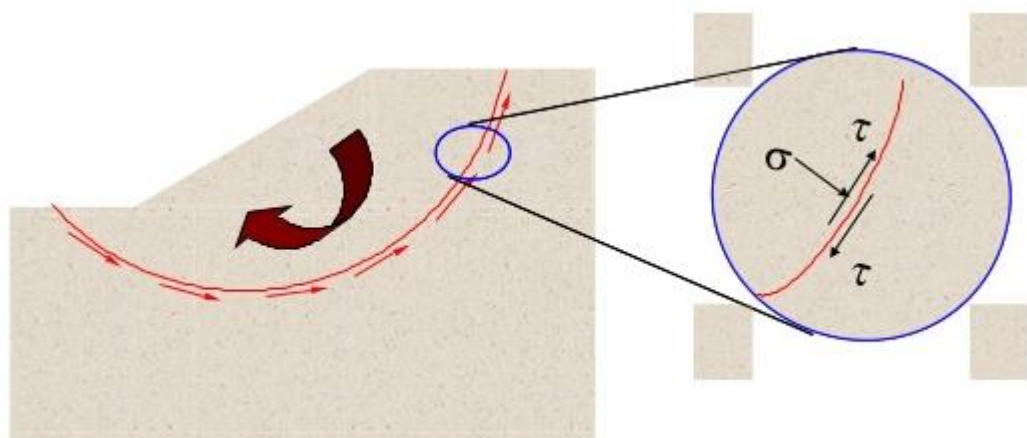
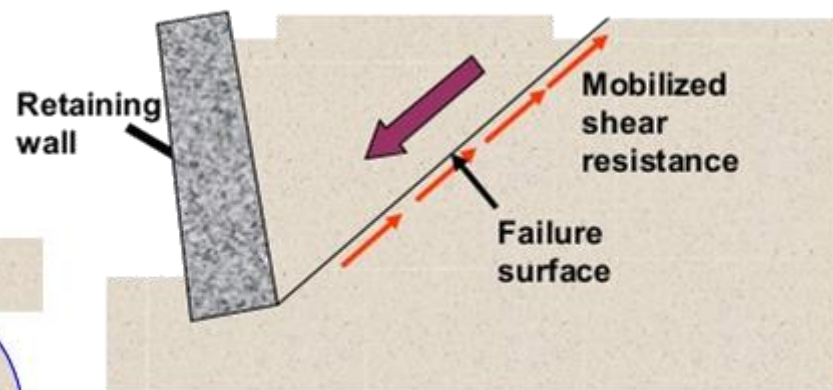
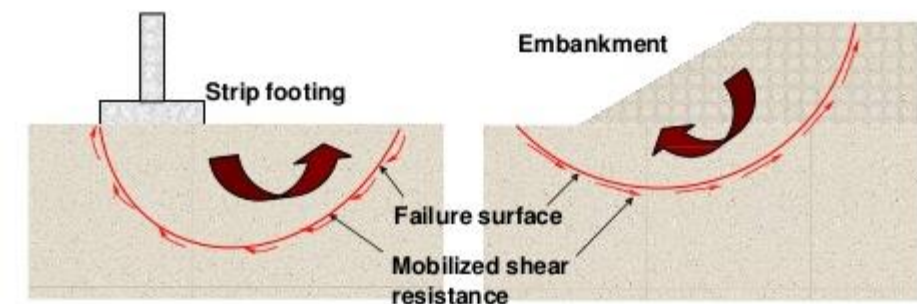


**فصل نهم**

**مقاومت برشی خاک**

**Shear strength of Soil**

مقاومت برشی توده خاک، مقاومت داخلی واحد سطح مقطع توده خاک در برابر گسیختگی و لغزش در امتداد هر صفحه داخلی است. برای تحلیل مسایل پایداری خاک مانند ظرفیت باربری، پایداری شیروانی خاکی و فشار جانبی وارد بر سازه‌های نگهدارنده خاک باید ماهیت مقاومت برشی را درک کرد.



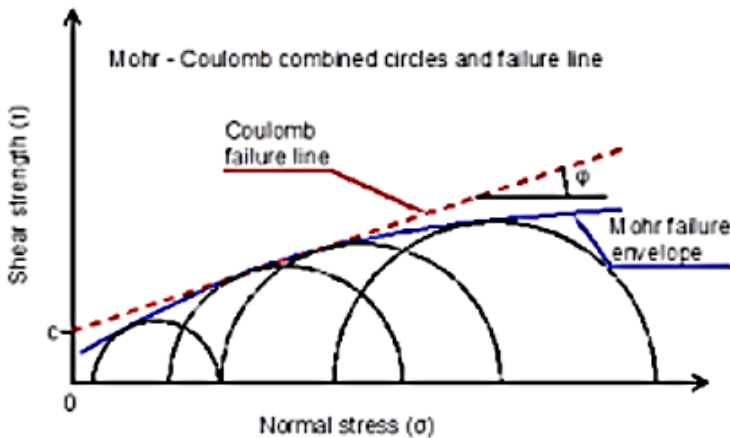
# معیار گسیختگی Mohr-Coulomb

Mohr (۱۹۰۰) نظریه‌ای را در مورد گسیختگی مصالح ارائه کرد که بر اساس آن گسیختگی مصالح به دلیل ترکیب تنش قائم و تنش برشی است و نه حداکثر تنش قائم یا برشی به تنهایی. بنابراین رابطه عملی میان تنش قائم و تنش برشی روی صفحه گسیختگی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\tau_f = f(\sigma) \quad (1-12)$$

پوش گسیختگی تعریف شده با معادله (۱-۱۲)، یک خط خمیده است. برای اکثر مسایل مکانیک خاک، تقریب زدن تنش برشی روی صفحه گسیختگی به صورت تابعی خطی از تنش قائم کافی است (Coulomb، ۱۷۷۶). این تابع خطی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (2-12)$$



که در این جا:  $c$  = چسبندگی

$\phi$  = زاویه اصطکاک داخلی

$\sigma$  = تنش قائم روی صفحه گسیختگی

$\tau_f$  = مقاومت برشی.

معادله پیش گفته را معیار گسیختگی Mohr-Coulomb می‌نامند.

در خاک اشباع، تنش قائم کل در یک نقطه برابر است با مجموع تنش مؤثر ( $\sigma'$ ) و فشار آب منفذی ( $u$ )، یا:

$$\sigma = \sigma' + u$$

تنش مؤثر  $\sigma'$  را بخش جامد خاک تحمل می‌کند. معیار گسیختگی Mohr-Coulomb بر حسب تنش مؤثر به شکل زیر خواهد بود:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (۳-۱۲)$$

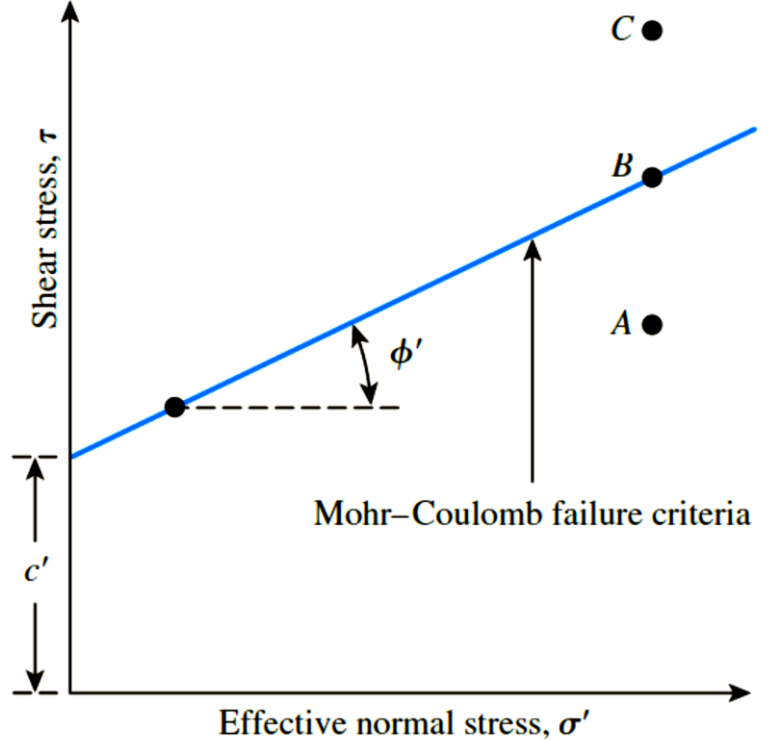
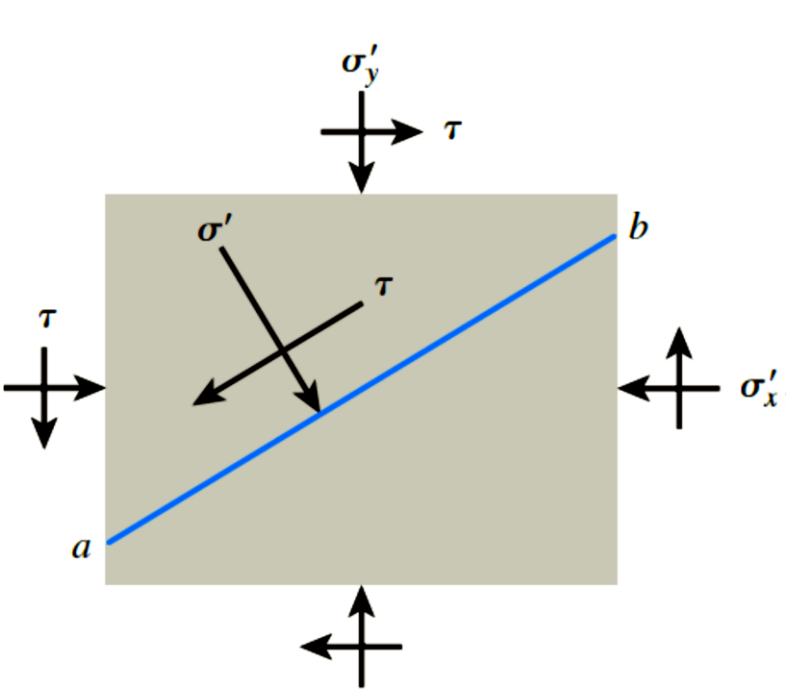
که در این جا:  $c'$  = چسبندگی و  $\phi'$  = زاویه اصطکاک بر اساس تنش مؤثر.

مقدار  $c'$  برای ماسه و لای غیرآلی صفر است. برای رس‌های عادی تحکیم یافته،  $c'$  را می‌توان صفر تقریب زد. مقدار  $c'$  رس‌های بیش تحکیم یافته از صفر بیشتر است. زاویه اصطکاک  $\phi'$  را گاهی زاویه اصطکاک زهکشی شده می‌نامند. در جدول ۱-۱۲ مقادیر نمونه  $\phi'$  برای برخی از خاک‌های دانه‌ای ارائه شده است.

جدول ۱-۱۲ مقادیر نمونه زاویه اصطکاک زهکشی شده ماسه‌ها و لای‌ها.

Soil type	$\phi'$ (deg)
<i>Sand: Rounded grains</i>	
Loose	27–30
Medium	30–35
Dense	35–38
<i>Sand: Angular grains</i>	
Loose	30–35
Medium	35–40
Dense	40–45
<i>Gravel with some sand</i>	34–48
<i>Silts</i>	26–35

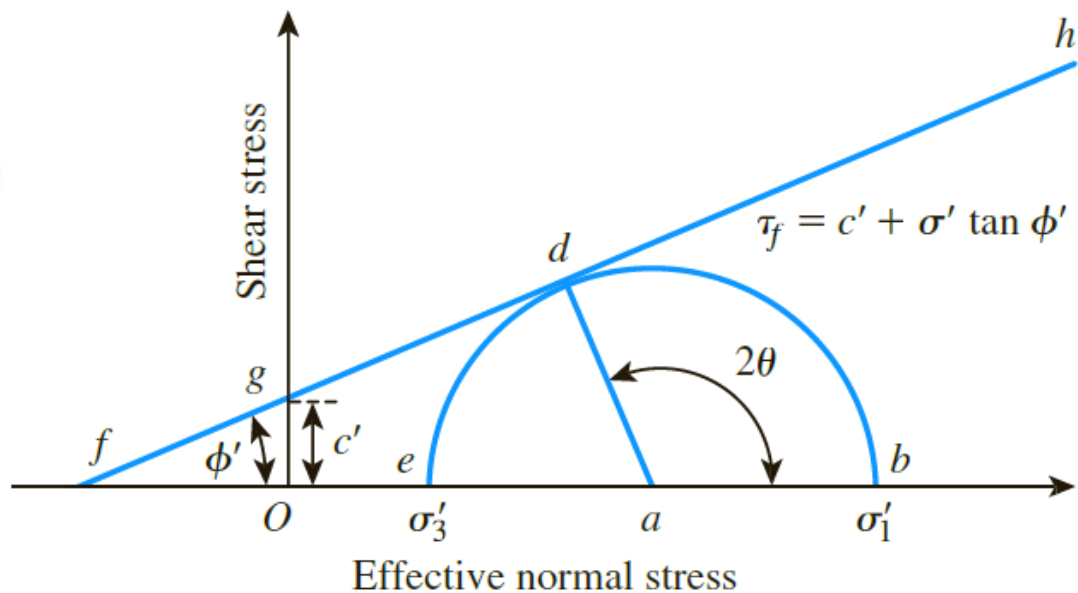
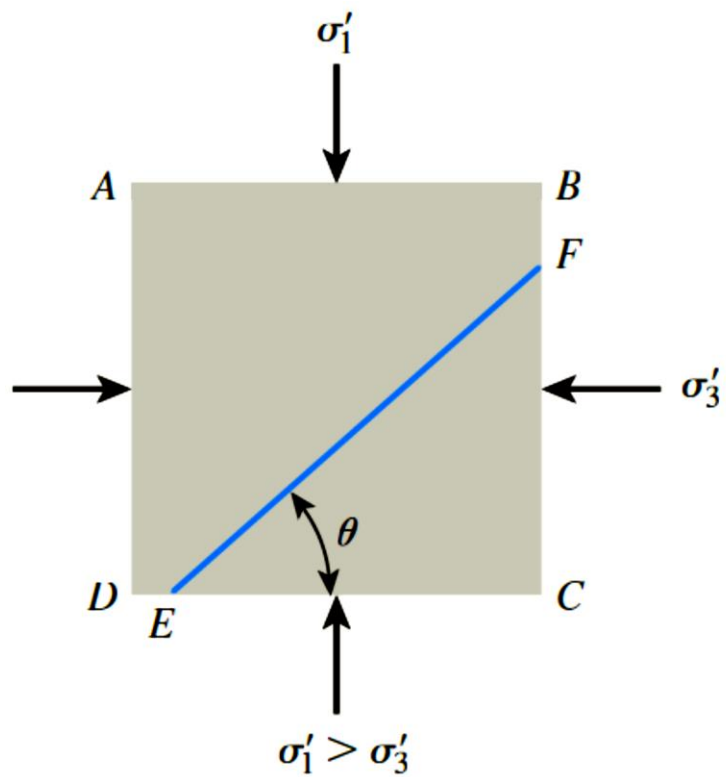
فرض کنید که تنش قائم و تنش برشی روی صفحه  $ab$  به ترتیب  $\sigma'$  و  $\tau$  باشد. در شکل ۱۲-۱ ب نمودار پوش گسیختگی تعریف شده با معادله (۱۲-۳) نشان داده شده است. چنانچه مقدار  $\sigma'$  و  $\tau$  روی صفحه  $ab$  نشانگر نقطه  $A$  بر روی شکل ۱۲-۱ باشد، در امتداد این صفحه گسیختگی برشی روی نخواهد داد. چنانچه تنش قائم مؤثر و تنش برشی روی صفحه  $ab$  نشانگر نقطه ای همچون  $B$  باشند (که بر روی پوش گسیختگی قرار دارد)، در امتداد آن صفحه گسیختگی برشی رخ خواهد داد. حالت برش متناظر با نقطه  $C$  نمی تواند وجود داشته باشد، زیرا این نقطه در بالای پوش گسیختگی قرار دارد و پیش از این خاک دچار گسیختگی برشی شده است.



## شیب صفحه گسیختگی ناشی از برش

همان طور که با معیار Mohr-Coulomb بیان شده است، گسیختگی برشی زمانی رخ خواهد داد که تنش برشی روی صفحه به مقدار به دست آمده از معادله (۱۲-۳) برسد. برای تعیین شیب صفحه گسیختگی نسبت به صفحه تنش اصلی حداکثر به شکل ۱۲-۲ نگاه کنید که در آن  $\sigma'_1$  و  $\sigma'_3$  به ترتیب تنش‌های اصلی مؤثر حداکثر و حداقل‌اند. صفحه گسیختگی  $EF$  با صفحه تنش اصلی حداکثر زاویه  $\theta$  را تشکیل می‌دهد. برای تعیین زاویه  $\theta$  و رابطه میان  $\sigma'_1$  و  $\sigma'_3$  به شکل ۱۲-۳ نگاه کنید که نمودار دایره Mohr را برای حالت تنش ارائه شده در شکل ۱۲-۲ نشان می‌دهد (به فصل ۱۰ نگاه کنید). در شکل ۱۲-۳،  $fgh$  پوش گسیختگی تعریف شده با رابطه  $\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$  است. خط شعاعی  $ab$  نشانگر صفحه تنش اصلی حداکثر ( $CD$  در شکل ۱۲-۲) و خط شعاعی  $ad$  نشانگر صفحه گسیختگی ( $EF$  در شکل ۱۲-۲) است. می‌توان نشان داد که:  $\angle bad = 2\theta = 90 + \phi'$  و یا:

$$\theta = 45 + \frac{\phi'}{2} \quad (۱۲-۴)$$



شکل ۱۲-۲ شیب صفحه گسیختگی درون خاک نسبت به صفحه تنش اصلی حداکثر.

شکل ۱۲-۳ دایره Mohr و پوش گسیختگی.



باز هم از شکل ۱۲-۳ داریم:

$$\frac{\overline{ad}}{\overline{fa}} = \sin \phi' \quad (۱۲-۵)$$

$$\overline{fa} = fO + Oa = c' \cot \phi' + \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad (۱۲-۶-الف)$$

همچنین:

$$\overline{ad} = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \quad (۱۲-۶-ب)$$

با جایگزین کردن معادلات (۱۲-۶-الف) و (۱۲-۶-ب) در معادله (۱۲-۵) داریم:

$$\sin \phi' = \frac{\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}}{c' \cot \phi' + \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}}$$

یا

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \left( \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \right) + 2c' \left( \frac{\cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \right) \quad (۱۲-۷)$$

اما:

$$\frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} = \tan^2\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right)$$

و

$$\frac{\cos \phi'}{1 - \sin \phi'} = \tan\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right)$$

بدین ترتیب:

$$\sigma_1' = \sigma_3' \tan^2\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) + 2c' \tan\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) \quad (۸-۱۲)$$

با استفاده از معادله (۲-۱۲) (یعنی پارامترهای  $c$  و  $\phi$  تنش کل) می‌توان عبارتی مشابه با معادله (۸-۱۲) به دست آورد، یا:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) + 2c \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (۹-۱۲)$$

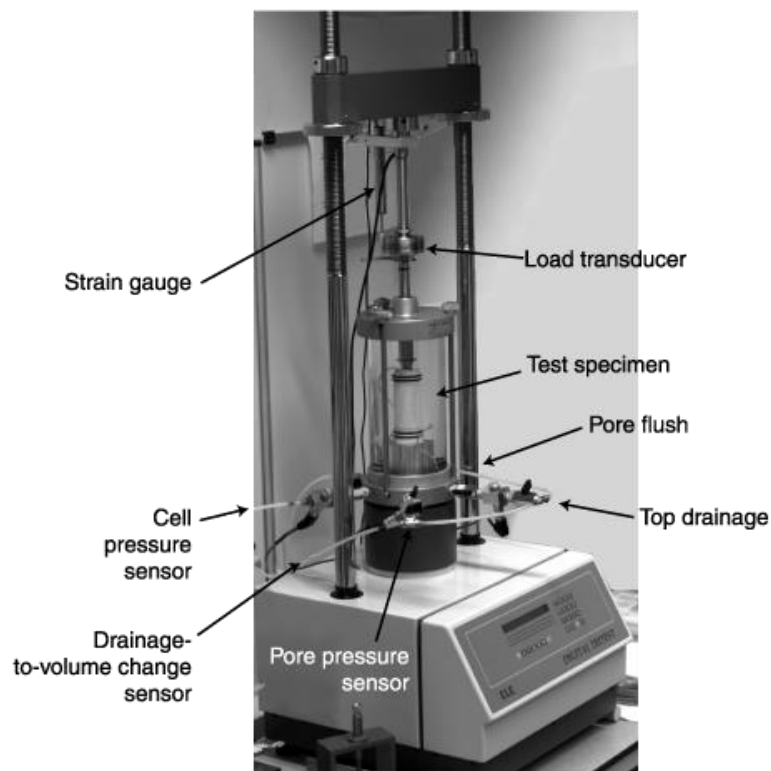
# آزمون آزمایشگاهی تعیین پارامترهای مقاومت برشی

در حال حاضر برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی (یعنی  $c$ ،  $\phi$ ،  $c'$  و  $\phi'$ ) نمونه خاک‌های مختلف چند روش آزمایشگاهی وجود دارد. این روش‌ها عبارتند از:

- آزمایش برش مستقیم
- آزمایش سه محوری

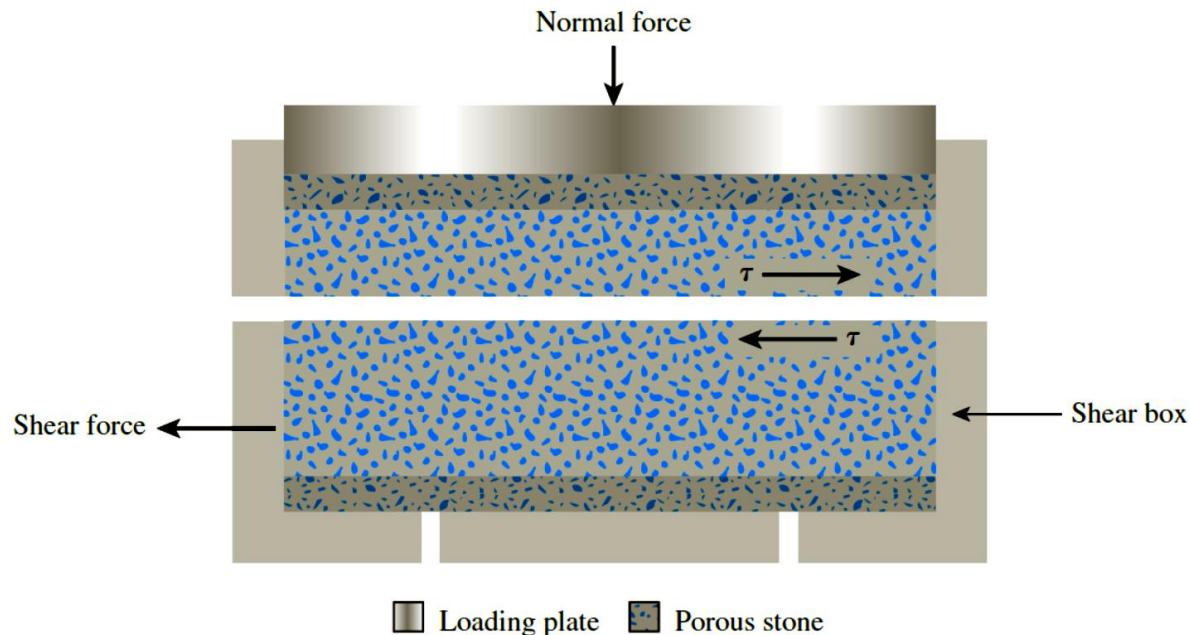
آزمایش برش مستقیم و آزمایش سه محوری دو روش مورد استفاده معمول برای تعیین پارامترهای

مقاومت برشی محسوب می‌شوند.



# آزمایش برش مستقیم Direct Shear Test

آزمایش برش مستقیم قدیمی‌ترین و ساده‌ترین شکل آزمایش برش است. در شکل ۱۲-۴ طرح دستگاه آزمایش برش مستقیم نشان داده شده است. دستگاه آزمایش شامل یک جعبه برش فلزی است که نمونه خاک در داخل آن قرار داده می‌شود. پلان نمونه خاک می‌تواند مربعی یا دایره‌ای باشد. سطح مقطع نمونه‌های مورد استفاده معمولاً در حدود  $51 \text{ mm} \times 51 \text{ mm}$  یا  $102 \text{ mm} \times 102 \text{ mm}$  و ارتفاع آنها در حدود  $25 \text{ mm}$  است. جعبه به صورت افقی دو نیمه می‌شود. نیروی قائم روی نمونه از بالای جعبه برش اعمال می‌شود. تنش عمودی روی نمونه می‌تواند به  $1050 \text{ kN/m}^2$  بالغ شود. نیروی برشی با حرکت دادن یک نیمه از جعبه نسبت به نیمه دیگر اعمال می‌شود که خود سبب گسیختگی نمونه خاک می‌شود.

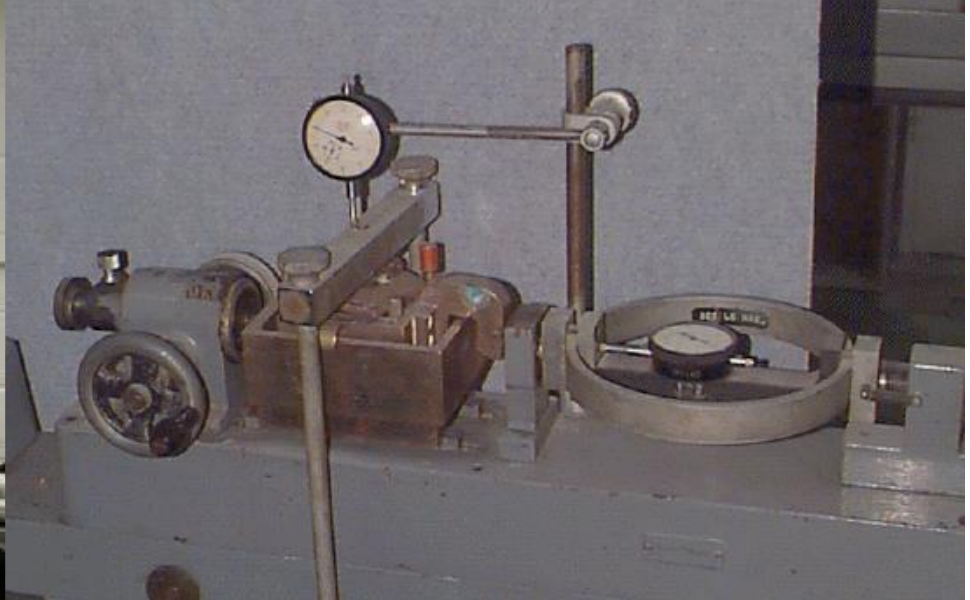


بسته به نوع دستگاه، آزمایش برش می‌تواند تحت کنترل تنش یا کرنش انجام شود. در آزمایش‌های تحت کنترل تنش، نیروی برشی با نمونه‌های یکسان تا گسیخته شدن نمونه اعمال می‌شود. گسیختگی در امتداد صفحه شکاف جعبه برش رخ می‌دهد. پس از اعمال هر نمونه بار، تغییر مکان برشی نیمه بالایی جعبه با عقربه اندازه‌گیری افقی اندازه‌گیری می‌شود. تغییر ارتفاع نمونه (و بنابراین تغییر حجم نمونه) در زمان آزمایش را می‌توان از روی قرائت‌های آن عقربه اندازه‌گیری به دست آورد که حرکت قائم صفحه بارگذاری بالایی را اندازه‌گیری می‌کند.

در آزمایش‌های با کنترل کرنش، به کمک نیروی موتوری که از طریق چرخ دنده‌ها عمل می‌کند، به یک نیمه از جعبه برش میزان ثابتی از جابه‌جایی برشی اعمال می‌شود. آهنگ ثابت تغییر مکان برشی با عقربه اندازه‌گیری افقی اندازه‌گیری می‌شود. نیروی برشی مقاوم متناظر با هر تغییر مکان برشی را می‌توان به کمک یک نیروسنج حلقه‌ای افقی یا بارسنج اندازه‌گیری کرد. تغییر حجم نمونه در ضمن آزمایش به روشی مشابه با آزمایش‌های با کنترل تنش صورت می‌گیرد. در شکل ۱۲-۵ تصویر از دستگاه آزمایش برش مستقیم با کنترل کرنش نشان داده شده است. شکل ۱۲-۶ تصویر گرفته شده از بالای دستگاه آزمایش برش مستقیم را همراه با عقربه اندازه‌گیری و نیروسنج حلقه‌ای نصب شده نشان می‌دهد.



شکل ۱۲-۵ دستگاه آزمایش برش  
مستقیم با کنترل کرنش.



شکل ۱۲-۶ در این تصویر عقربه‌های  
اندازه‌گیری و نیروسنج حلقه‌ای  
نصب شده دیده می‌شوند.

مزیت آزمایش‌های با کنترل کرنش آن است که در مورد ماسه متراکم، مقاومت برشی بیشینه (یعنی در زمان گسیختگی) و همچنین مقاومت برشی کمینه (یعنی پس از گسیختگی که مقاومت نهایی نامیده می‌شود) را می‌توان مشاهده و ترسیم کرد. در آزمایش‌های با کنترل تنش تنها مقاومت برشی بیشینه را می‌توان مشاهده و ترسیم کرد. توجه داشته باشید که مقاومت برشی بیشینه در آزمایش‌های با کنترل تنش را تنها می‌توان تقریب زد، زیرا گسیختگی در مقدار تنشی بین نمو بار پیش از گسیختگی و نمو بار گسیختگی رخ می‌دهد. با این وجود آزمایش‌های با کنترل تنش در مقایسه با آزمایش‌های با کنترل کرنش احتمالاً شرایط صحرایی واقعی را بهتر مدل می‌کنند.

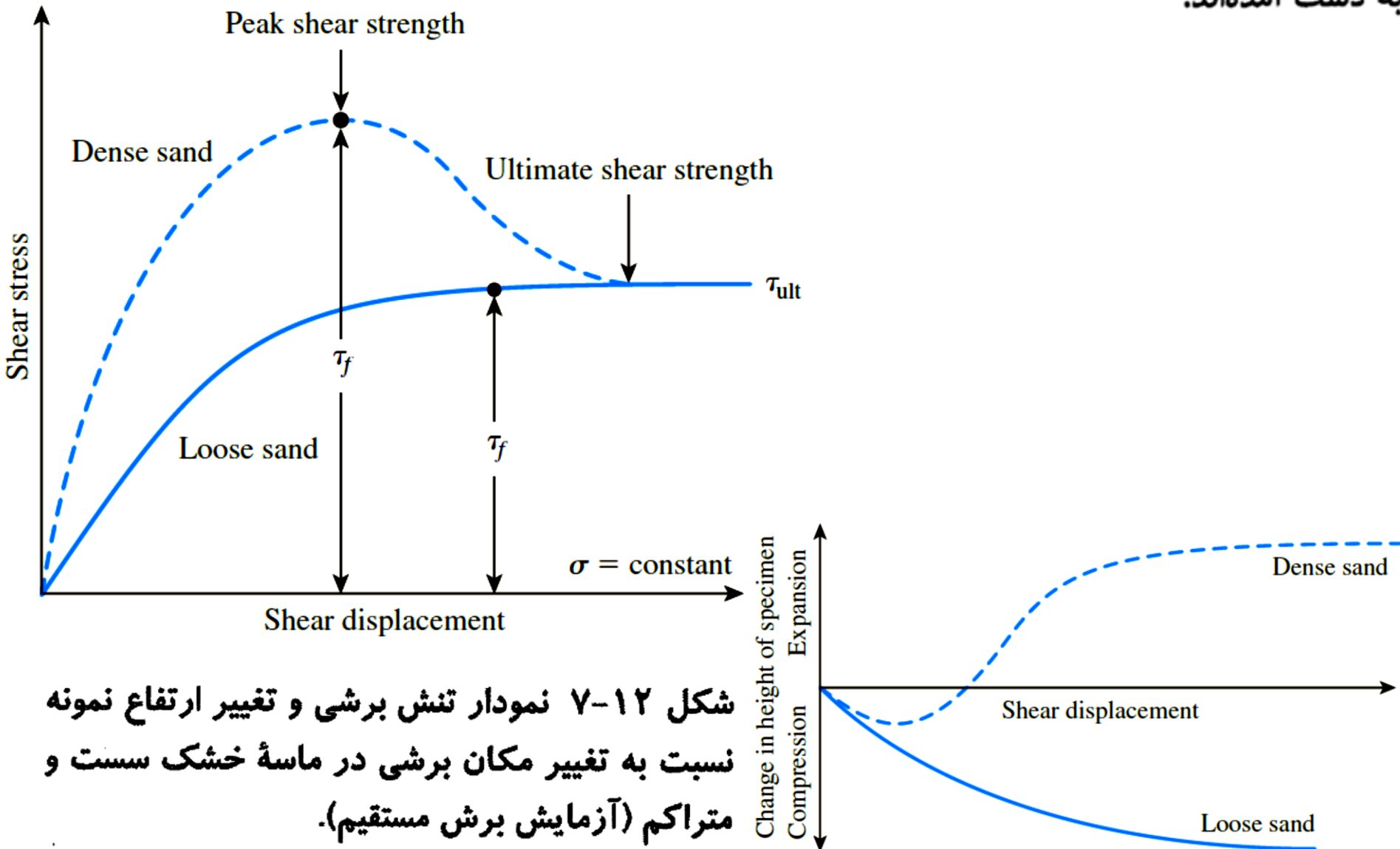
برای یک آزمایش معین، تنش قائم را می‌توان به صورت زیر حساب کرد:

$$\sigma = \text{تنش قائم} = \frac{\text{نیروی قائم}}{\text{سطح مقطع نمونه}} \quad (10-12)$$

تنش برشی مقاوم مربوط به هر جابه‌جایی برشی را می‌توان به صورت زیر حساب کرد:

$$\tau = \text{تنش برشی} = \frac{\text{نیروی برشی مقاوم}}{\text{سطح مقطع نمونه}} \quad (11-12)$$

در شکل ۷-۱۲ نمونه‌ای از نمودار تنش برشی و تغییر ارتفاع نمونه نسبت به تغییر مکان برشی در ماسه‌های خشک سست و متراکم نشان داده شده است. این نتایج با استفاده از آزمایش با کنترل کرنش به دست آمده‌اند.



شکل ۷-۱۲ نمودار تنش برشی و تغییر ارتفاع نمونه نسبت به تغییر مکان برشی در ماسه خشک سست و متراکم (آزمایش برش مستقیم).

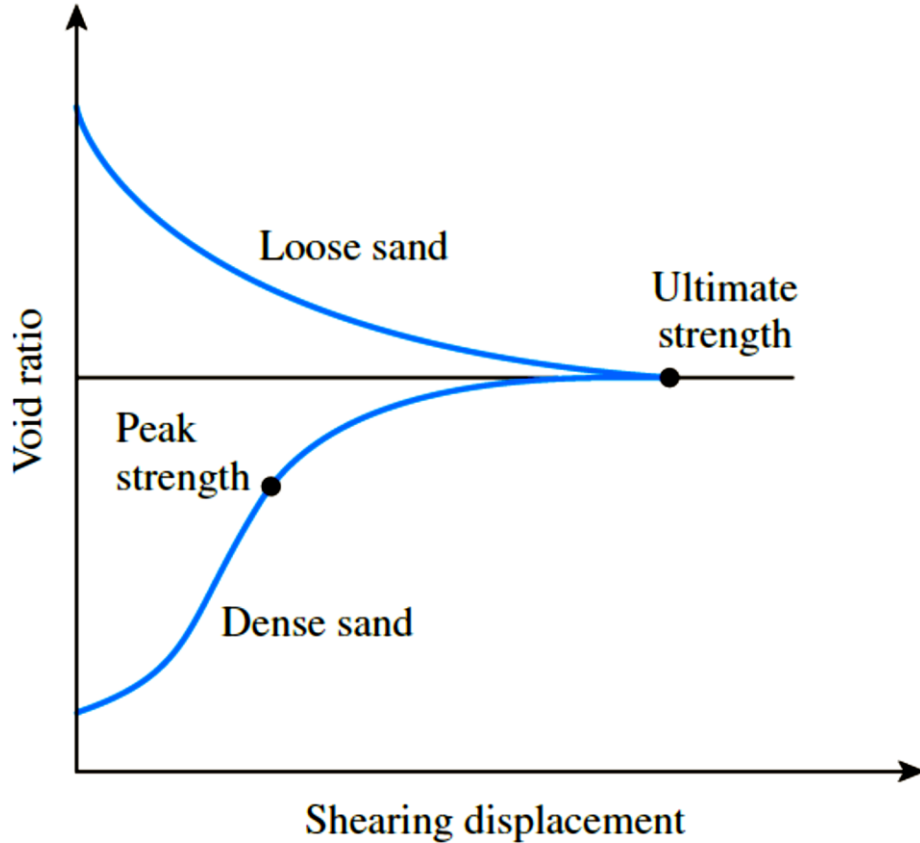


از روی شکل ۱۲-۷ می‌توان در ارتباط با تغییرات تنش برشی مقاوم نسبت به تغییر مکان برشی نتیجه‌گیری‌های کلی زیر را انجام داد:

۱- در ماسه سست، تنش برشی مقاوم تا رسیدن به تنش برشی گسیختگی  $\tau_r$  همراه با تغییر مکان برشی افزایش می‌یابد. پس از این مرحله، مقاومت برشی با افزایش بیشتر تغییر مکان برشی تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

۲- در ماسه متراکم، تنش برشی مقاوم تا رسیدن به تنش گسیختگی  $\tau_r$  همراه با تغییر مکان برشی افزایش می‌یابد. این  $\tau_r$  را مقاومت برشی بیشینه می‌نامند. پس از دستیابی به تنش گسیختگی، تنش برشی مقاوم به تدریج همراه با افزایش تغییر مکان برشی کاهش پیدا می‌کند تا در نهایت به مقدار ثابتی می‌رسد که آن را مقاومت برشی نهایی می‌نامند.

در تغییر مکان‌های برشی بزرگ، نسبت تخلخل ماسه‌های سست و متراکم عملاً یکسان می‌شود و آن را نسبت تخلخل بحرانی می‌نامند.



شکل ۸-۱۲ ماهیت تغییرات نسبت تخلخل نسبت به تغییر مکان برشی.

آزمایش‌های برش مستقیم با اعمال تنش‌های قائم متفاوت بر روی نمونه‌های مشابه تکرار می‌شوند. تنش‌های قائم و مقادیر متناظر  $\tau_f$  حاصل از تعدادی آزمایش بر روی یک نمودار ترسیم می‌شوند و از روی آن پارامترهای مقاومت برشی تعیین می‌گردند. در شکل ۹-۱۲ نمونه‌ای از این نمودار برای آزمایش‌های انجام شده بر روی ماسه خشک نشان داده شده است. معادله میانگین حاصل از نتایج آزمایش عبارت است از:

$$\tau_f = \sigma' \tan \phi' \quad (12-12)$$

بنابراین زاویه اصطکاک را می‌توان به صورت زیر تعیین کرد:

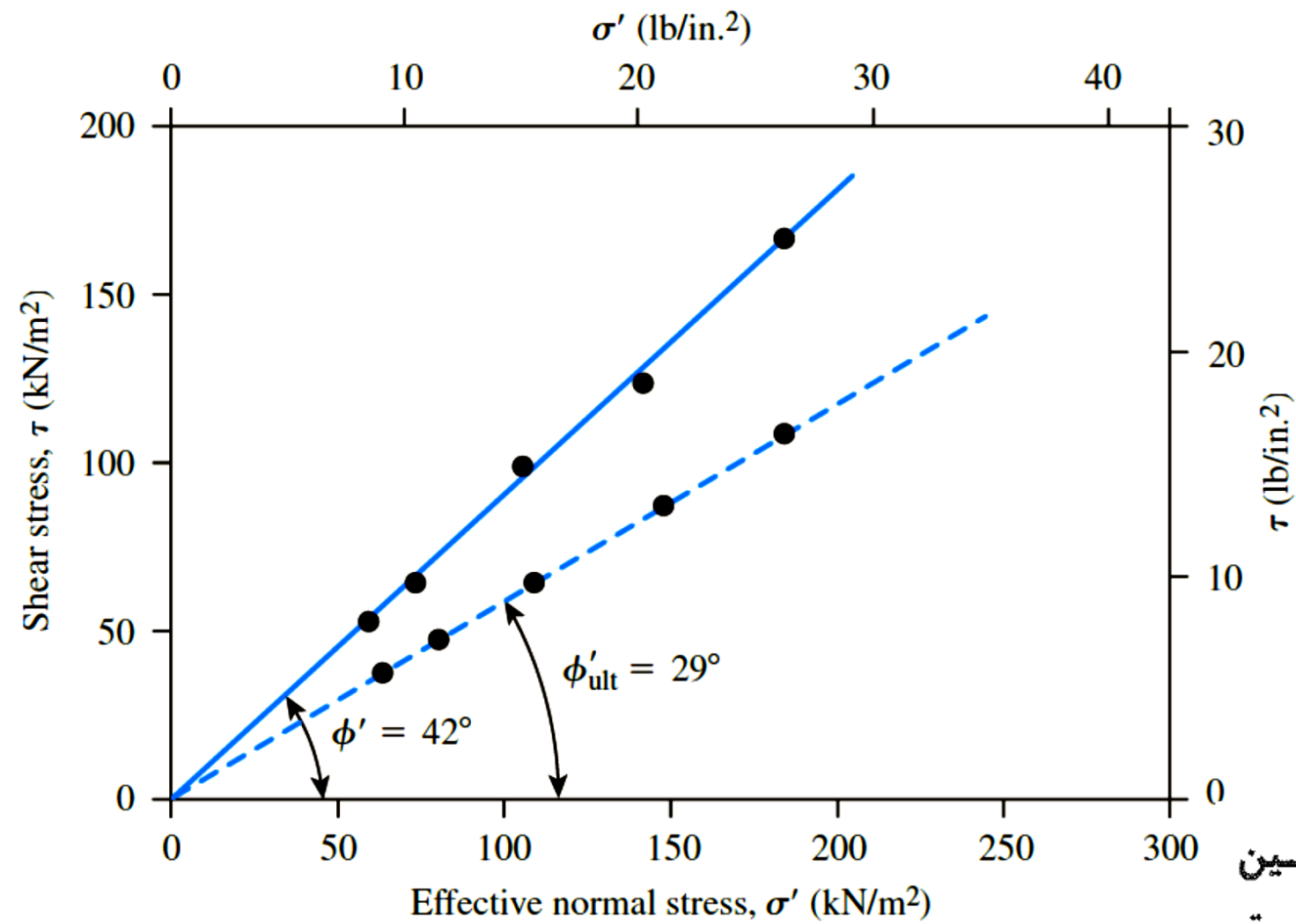
$$\phi' = \tan^{-1} \left( \frac{\tau_f}{\sigma'} \right) \quad (13-12)$$

ذکر این نکته مهم است که ماسه‌های سیمانی شده درجا ممکن است عرض از مبدأ  $c'$  نیز داشته باشند. در صورت معلوم بودن تغییرات مقاومت برشی نهایی ( $\tau_{ult}$ ) نسبت به تنش قائم، آن را می‌توان به صورت نشان داده در شکل ۹-۱۲ ترسیم کرد. نمودار میانگین را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\tau_{ult} = \sigma' \tan \phi'_{ult} \quad (14-12)$$

یا:

$$\phi'_{ult} = \tan^{-1} \left( \frac{\tau_{ult}}{\sigma'} \right) \quad (15-12)$$



شکل ۹-۱۲ تعیین پارامترهای مقاومت برشی ماسه خشک با استفاده از نتایج آزمایش‌های برش مستقیم.

# آزمایش برش مستقیم زهکشی شده بر روی ماسه و رس اشباع

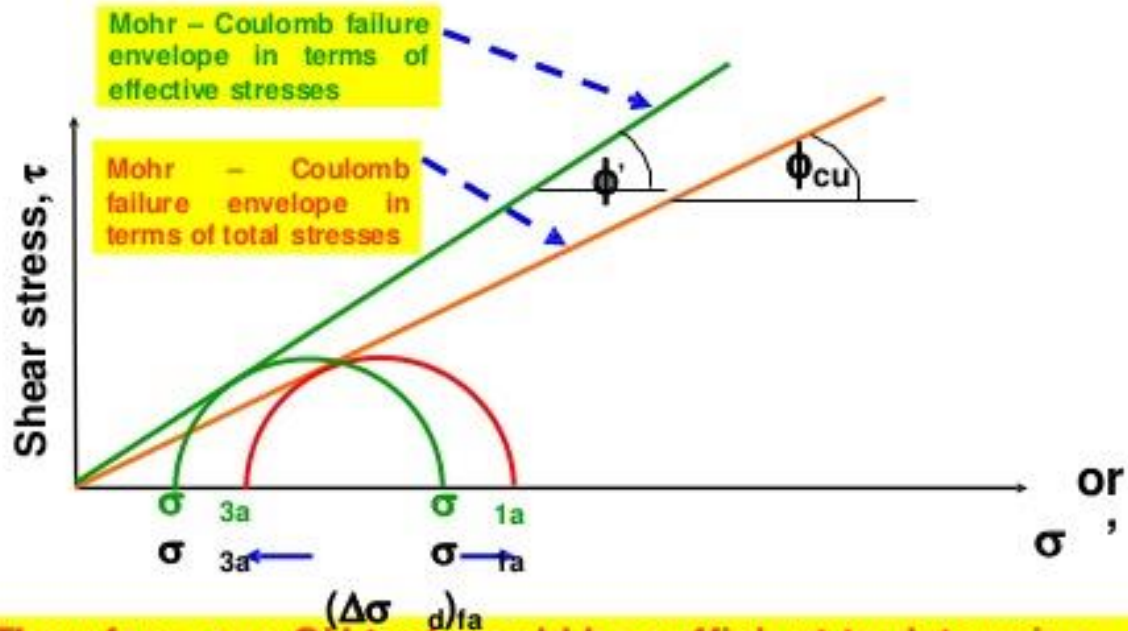
در آزمایش برش مستقیم، جعبه برش حاوی نمونه خاک معمولاً جهت اشباع شدن نمونه، در داخل یک ظرف پر از آب نگه داشته می‌شود. آزمایش زهکشی شده بر روی نمونه خاک اشباع و با حفظ آهنگ بارگذاری به قدر کافی آهسته‌ای انجام می‌شود تا امکان استهلاک کامل اضافه فشار آب منفذی ایجاد شده در خاک از طریق زهکشی میسر گردد. آب منفذی خارج شده از نمونه از طریق دو سنگ متخلخل زهکشی می‌شود.

از آن جا که ضریب نفوذپذیری ماسه زیاد است، اضافه فشار آب منفذی ناشی از بارگذاری (قائم و برشی) به سرعت مستهلک می‌شود. به همین دلیل برای آهنگ بارگذاری معمولی، اصولاً شرایط زهکشی کامل وجود دارد. زاویه اصطکاک  $\phi'$  حاصل از آزمایش برش مستقیم زهکشی شده ماسه اشباع با نتیجه حاصل از نمونه مشابهی از ماسه خشک یکسان است.

## CU tests

### Failure envelopes

For sand and NC Clay,  $c_{cu}$  and  $c' = 0$



Therefore, one CU test would be sufficient to determine  $\phi_{cu}$  and  $\phi' (= \phi_d)$  of sand or NC clay

ضریب نفوذپذیری رس در مقایسه با ماسه بسیار کم است. زمانی که بر روی نمونه خاک رس بار قائم اعمال می‌شود، برای تحکیم کامل باید مدت زمان طولانی کافی سپری شود - یعنی برای استهلاک اضافه فشار آب منفذی. به همین دلیل بار برشی باید بسیار آهسته اعمال شود. این آزمایش ممکن است ۲ تا ۵ روز به طول انجامد. در شکل ۱۰-۱۲ نتایج آزمایش برش مستقیم زهکشی شده بر روی رس بیش تحکیم یافته نشان داده شده است. شکل ۱۱-۱۲ نمودار  $\tau_r$  نسبت به  $\sigma'$  حاصل از تعدادی آزمایش برش مستقیم زهکشی شده بر روی رس عادی تحکیم یافته و رس بیش تحکیم یافته را نشان می‌دهد. توجه داشته باشید که برای رس عادی تحکیم یافته  $c' \cong 0$  است.

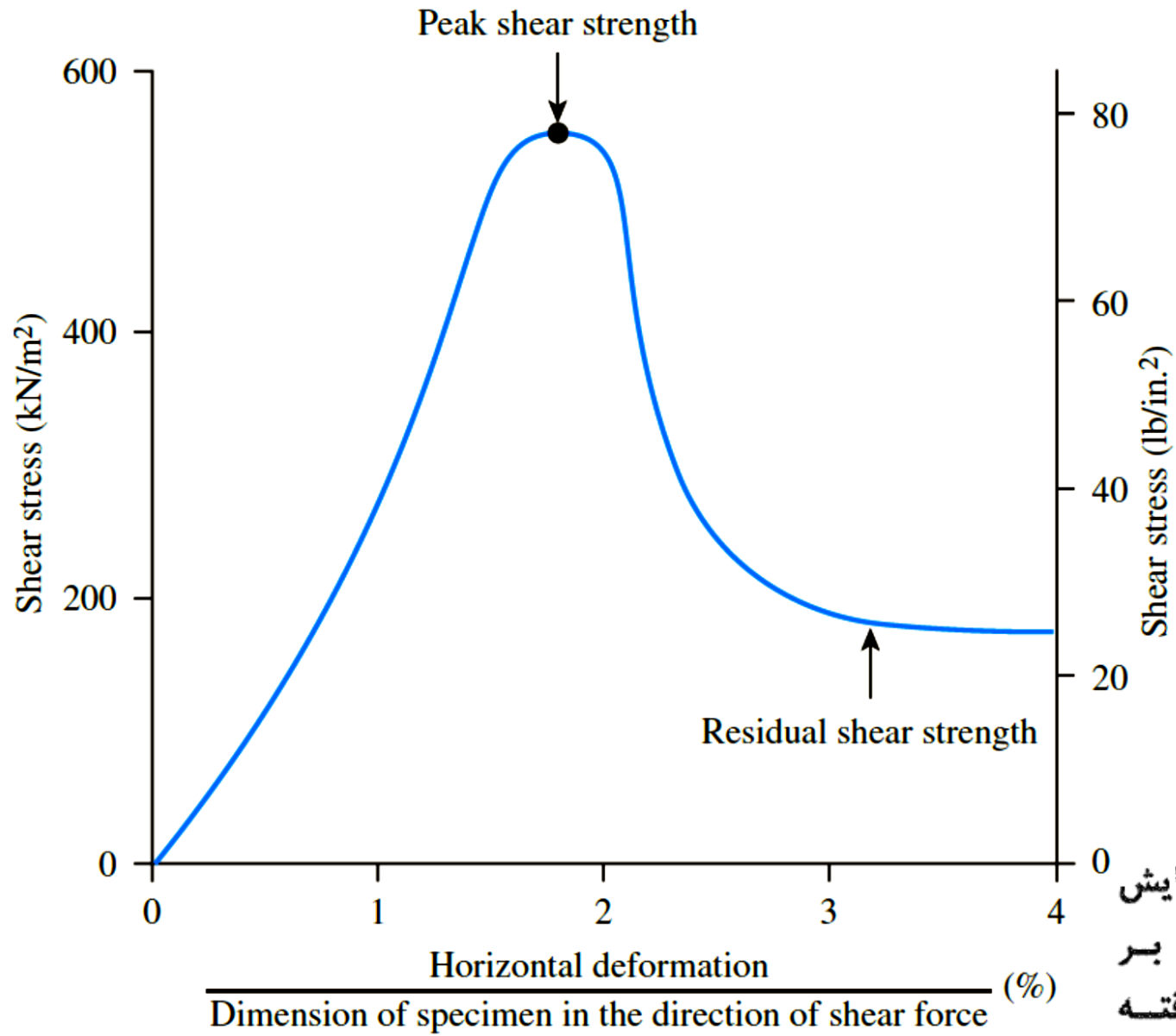
همانند مقاومت برشی نهایی ماسه (شکل ۸-۱۲)، در تغییر مکان‌های برشی بزرگ می‌توان مقاومت برشی پسماند ماسه ( $\tau_r$ ) را در آزمایش زهکشی شده به دست آورد. این موضوع در شکل ۱۰-۱۲ نشان داده شده است. شکل ۱۱-۱۲ نمودار  $\tau_r$  نسبت به  $\sigma'$  را نشان می‌دهد. خط متوسط از مبدأ عبور می‌کند و آن را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\tau_r = \sigma \tan \phi'_r$$

یا

$$\phi'_r = \tan^{-1} \left( \frac{\tau_r}{\sigma'} \right)$$

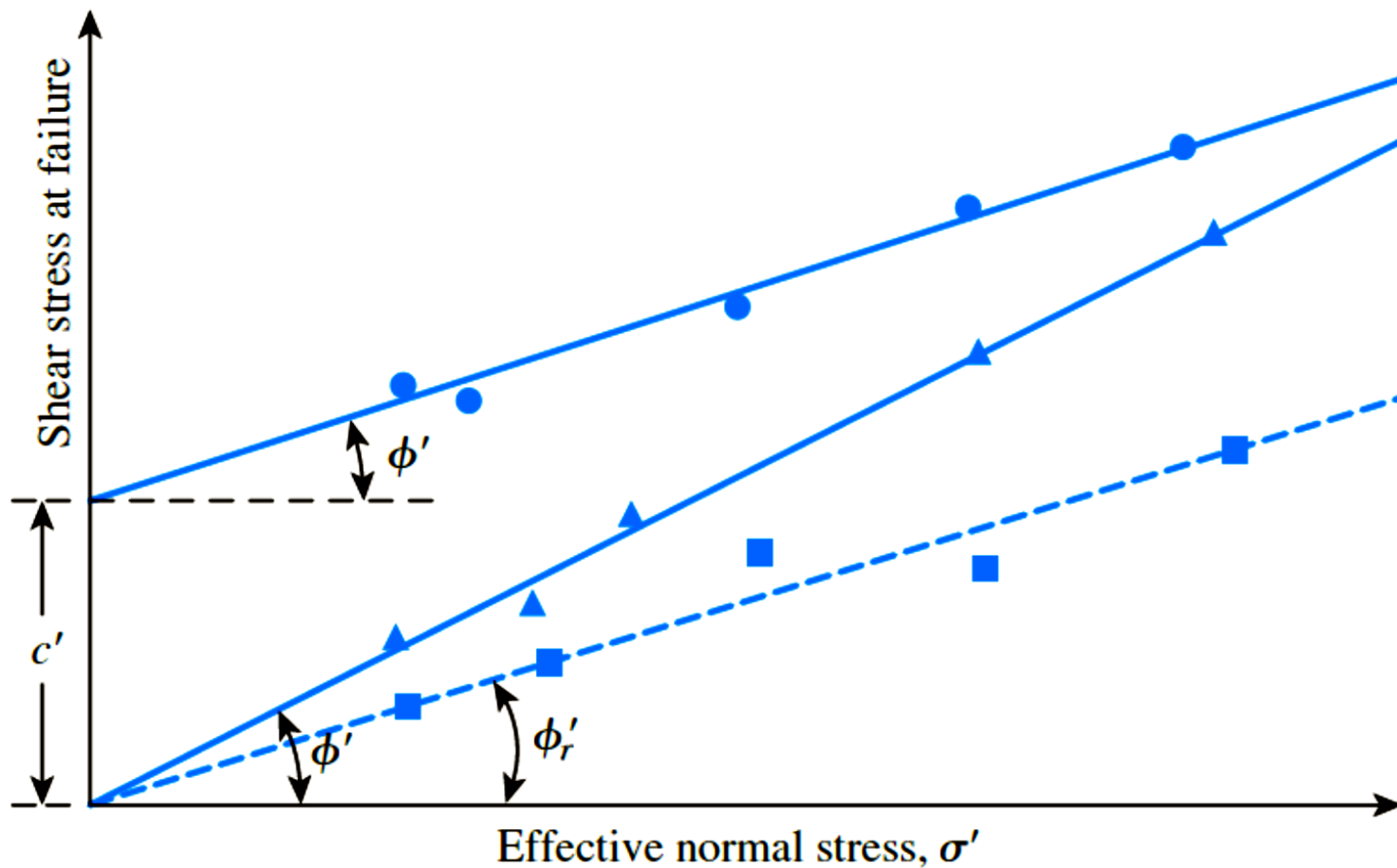
(۱۶-۱۲)



Dimension of specimen in the direction of shear force (%)

شکل ۱۰-۱۲ نتایج آزمایش  
برش مستقیم زهکشی شده بر  
روی رس بیش تحکیم یافته  
[توجه: مقاومت برشی پسماند  
ماسه شبیه مقاومت برشی نهایی  
در ماسه است



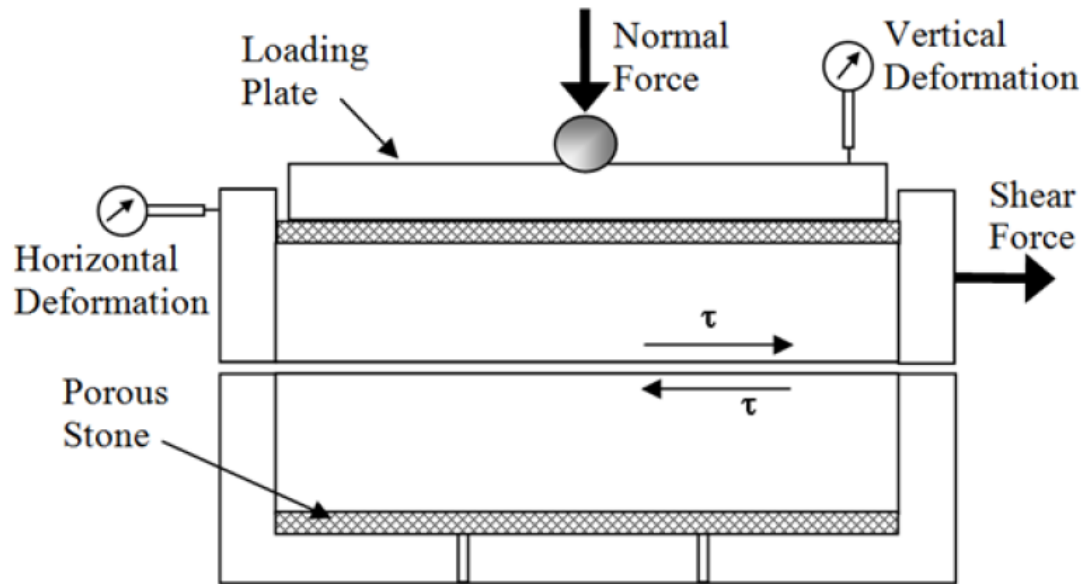


- Overconsolidated clay  $\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$  ( $c' \neq 0$ )
- ▲ Normally consolidated clay  $\tau_f = \sigma' \tan \phi'$  ( $c' \approx 0$ )
- Residual strength plot  $\tau_r = \sigma' \tan \phi_r'$

شکل ۱۱-۱۲ پوش گسیختگی حاصل از انجام آزمایش‌های برش مستقیم زهکشی شده بر روی رس.

# توضیحات کلی درباره آزمایش برش مستقیم

انجام آزمایش برش مستقیم آسان است، اما در این نوع آزمایش نقایصی ذاتی وجود دارد. اعتبار نتایج این آزمایش قابل تردید است، زیرا امکان گسیخته شدن خاک در امتداد ضعیف‌ترین صفحه وجود ندارد، بلکه گسیختگی به صورت اجباری در امتداد صفحه شکاف جعبه برش صورت می‌گیرد. همچنین توزیع تنش برشی بر روی سطح برش نمونه یکنواخت نیست. علیرغم این نقایص، آزمایش برش مستقیم ساده‌ترین و اقتصادی‌ترین آزمایش برای خاک ماسه‌ای خشک یا اشباع است.



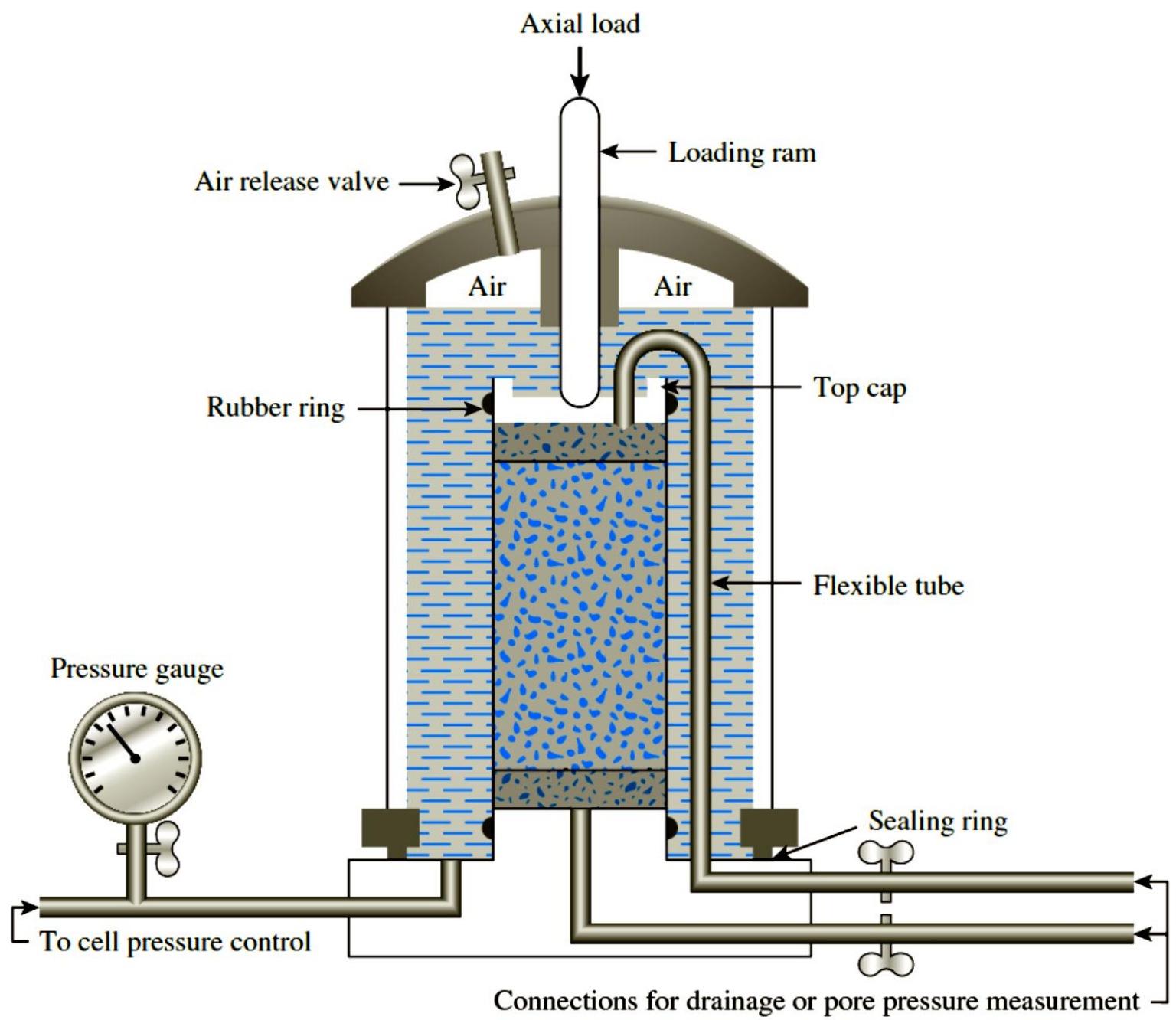
# آزمایش برش سه محوری

آزمایش برش سه محوری یکی از معتبرترین روش‌های تعیین پارامترهای مقاومت برشی است. از این آزمایش به وسعت برای تحقیقات و کارهای معمول استفاده می‌شود. در شکل ۱۲-۱۹ طرحی از چگونگی انجام آزمایش سه محوری نشان داده شده است.

در این آزمایش معمولاً از نمونه خاکی با قطر تقریباً ۳۶ mm و ارتفاع ۷۶ mm استفاده می‌شود. پس از محصور کردن نمونه با یک غشای لاستیکی نازک، آن را در داخل یک محفظه استوانه‌ای پلاستیکی قرار می‌دهند که معمولاً از آب یا گلیسرین پر می‌شود. با متراکم ساختن سیال درون محفظه، نمونه تحت فشار محدودکننده قرار می‌گیرد. (توجه: گاهی برای ایجاد فشار از هوا استفاده می‌شود). برای ایجاد گسیختگی برشی در نمونه، باید از طریق میله بارگذاری قائم، تنش محوری اعمال کرد (گاهی تنش انحرافی نامیده می‌شود). این تنش را می‌توان به یکی از دو روش زیر اعمال کرد:

۱- با اعمال بار مرده یا فشار هیدرولیکی با نمونه‌های یکسان تا گسیخته شدن نمونه. (تغییر شکل محوری نمونه در اثر بار اعمال شده از طریق میله بارگذاری به کمک عقربه اندازه‌گیری برداشت می‌شود).

۲- اعمال تغییر شکل محوری با آهنگ ثابت از طریق پرس هیدرولیکی یا چرخ دنده‌ای بارگذاری. این آزمایشی با کنترل کرنش است.



Water
  Porous disc
  Specimen enclosed in a rubber membrane

همچنین برای اندازه‌گیری آب ورودی یا خروجی نمونه یا فشار آب منفذی (بر اساس شرایط آزمایش) نیز اتصالاتی در نظر گرفته می‌شود. معمولاً سه نوع آزمایش سه محوری استاندارد انجام می‌شود:

۱- آزمایش تحکیم یافته - زهکشی شده یا آزمایش زهکشی شده (آزمایش CD)

۲- آزمایش تحکیم یافته - زهکشی نشده (آزمایش CU)

۳- آزمایش تحکیم نیافته - زهکشی نشده (آزمایش UU).

1. Consolidated-drained test or drained test (CD test)
2. Consolidated-undrained test (CU test)
3. Unconsolidated-undrained test or undrained test (UU test)

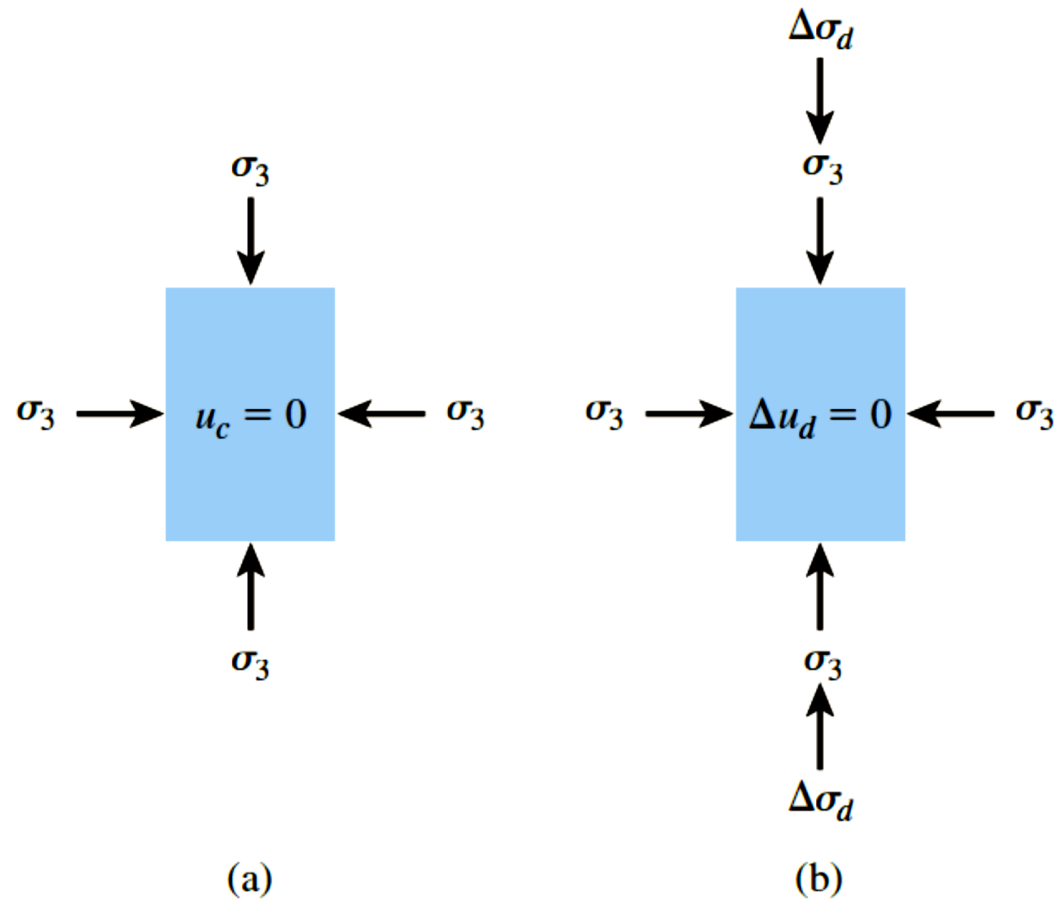
# آزمایش سه محوری تحکیم یافته - زهکشی شده

در آزمایش CD، نخست با متراکم ساختن سیال درون محفظه، نمونه اشباع تحت فشار محدودکننده همه جانبه  $\sigma_3$  قرار می‌گیرد (شکل ۱۲-۲۰-الف). با اعمال فشار محدودکننده، فشار آب منفذی نمونه  $u_c$  افزایش می‌یابد (در صورت جلوگیری از زهکشی). این افزایش فشار آب منفذی را می‌توان به صورت یک پارامتر بی بعد به شکل زیر بیان کرد:

$$B = \frac{u_c}{\sigma_3} \quad (12-18)$$

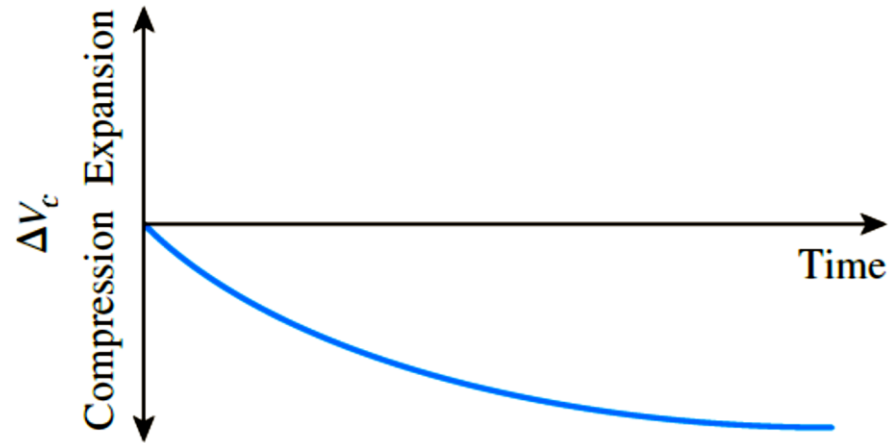
که در این جا:  $B =$  پارامتر فشار منفذی Skempton (Skempton، ۱۹۵۴).

برای خاک‌های نرم اشباع،  $B$  تقریباً برابر با یک است. اما برای خاک‌های سفت اشباع، اندازه  $B$  می‌تواند از یک کمتر باشد.



شکل ۱۲-۲۰ آزمایش سه محوری تحکیم یافته - زهکشی شده: (الف) نمونه تحت فشار محدودکننده محفظه‌ای، و (ب) اعمال تنش انحرافی.

حال چنانچه اتصال زهکشی باز شود، اضافه فشار آب منفذی مستهلک می‌شود و بدین ترتیب تحکیم صورت می‌گیرد. با گذشت زمان،  $u_c$  صفر می‌شود. در خاک اشباع، تغییر حجم نمونه  $(\Delta V_c)$  در ضمن تحکیم را می‌توان از روی حجم آب منفذی زهکشی شده به دست آورد (شکل ۱۲-۲۱-الف). سپس تنش انحرافی  $\Delta \sigma_d$  روی نمونه به آهستگی افزایش داده می‌شود (شکل ۱۲-۲۰-ب). اتصال زهکشی باز نگه داشته می‌شود و آهنگ آهسته اعمال تنش انحرافی امکان مستهلک شدن کامل هر گونه فشار آب منفذی ایجاد شده را فراهم می‌سازد ( $\Delta u_d = 0$ ).



(a)



در شکل ۱۲-۲۱-ب نمونه نمودار تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش در ماسه سست و رس عادی تحکیم یافته نشان داده شده است. شکل ۱۲-۲۱-ج نمودار مشابهی را برای ماسه متراکم و رس بیش تحکیم یافته نشان می‌دهد. تغییر حجم  $\Delta V_d$  نمونه خاک‌های مختلف در اثر اعمال تنش انحرافی نیز در شکل‌های ۱۲-۲۱-د و ۱۲-۲۱-ه نشان داده شده است.

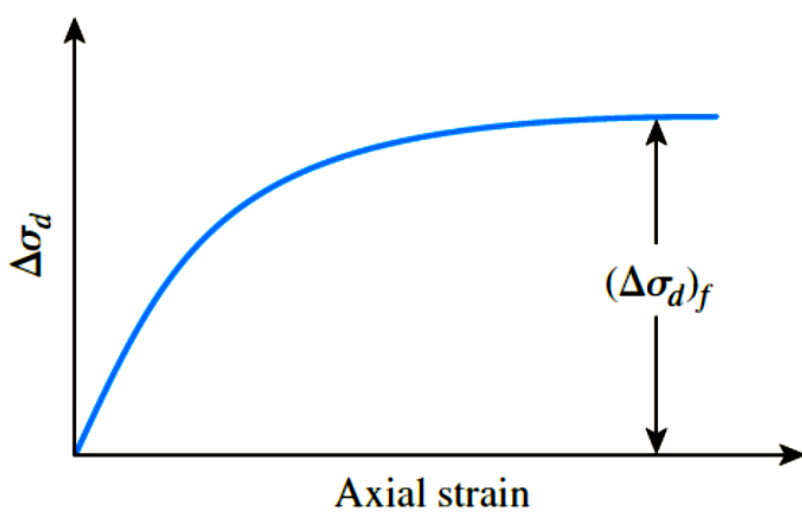
به دلیل مستهلک شدن کامل فشار آب منفذی ایجاد شده در ضمن آزمایش داریم:

$$\sigma'_p = \sigma_p = \text{تنش محدودکننده مؤثر}$$

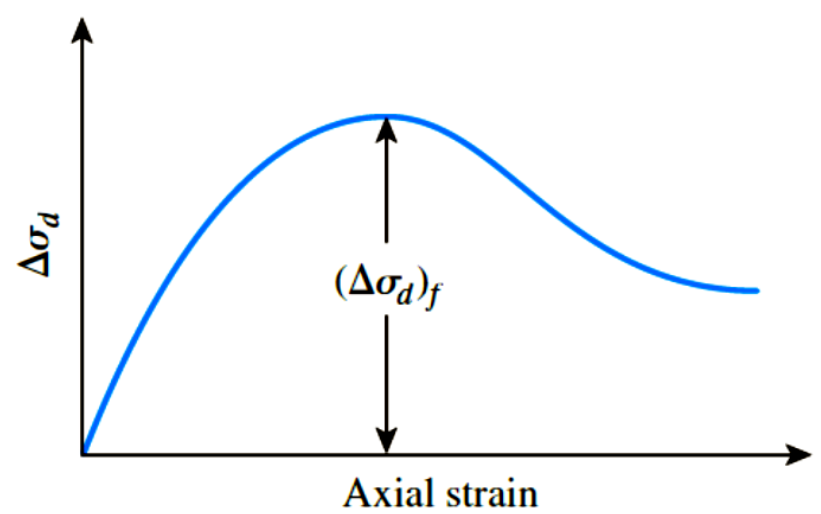
9

تنش کل و تنش محوری مؤثر در زمان گسیختگی  $\sigma'_1 = \sigma_1 = \sigma_p + (\Delta\sigma_d)_f =$

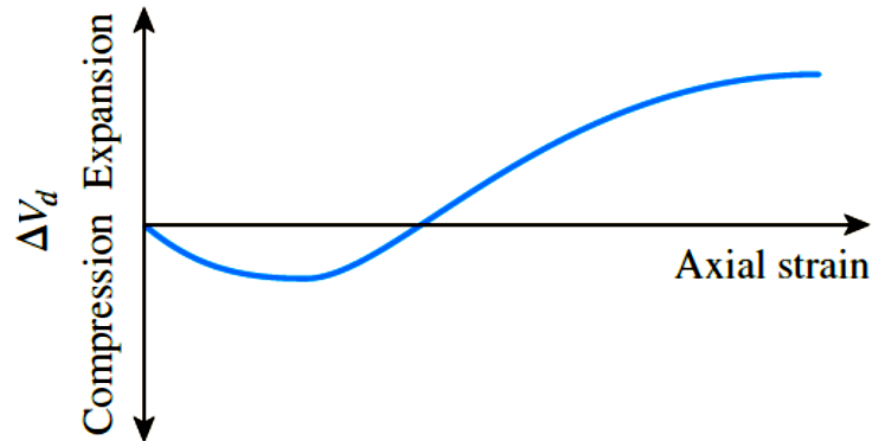
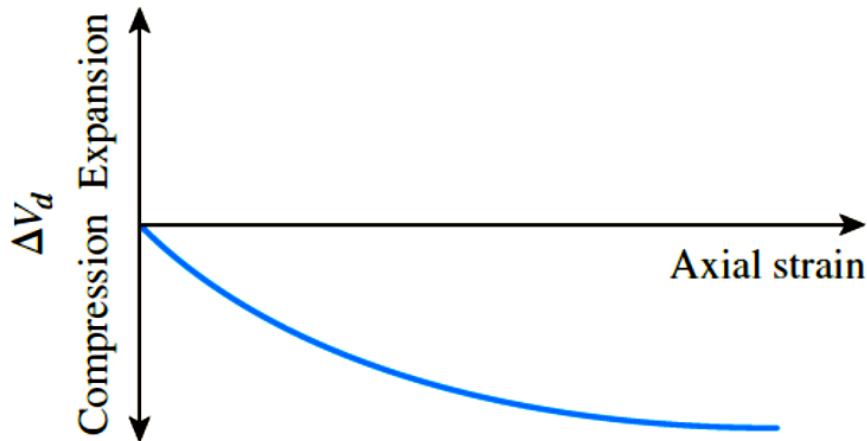
در آزمایش سه محوری،  $\sigma'_1$  تنش مؤثر اصلی حداکثر در زمان گسیختگی و  $\sigma'_p$  تنش مؤثر اصلی حداقل در زمان گسیختگی است.



(b)



(c)



شکل ۱۲-۲۱ آزمایش سه محوری تحکیم یافته - زهکشی شده: (الف) تغییر حجم نمونه در اثر فشار محدودکننده محفظه‌ای، (ب) نمودار تنش انحرافی نسبت به کرنش در امتداد قائم برای ماسه سست و رس عادی تحکیم یافته، (ج) نمودار تنش انحرافی نسبت به کرنش در امتداد قائم برای ماسه متراکم و رس بیش تحکیم یافته، (د) تغییر حجم ماسه سست و رس عادی تحکیم یافته در ضمن اعمال تنش انحرافی، و (ه) تغییر حجم ماسه متراکم و رس بیش تحکیم یافته در ضمن اعمال تنش انحرافی.

در شکل ۱۲-۲۲ نوع پوش گسیختگی تنش مؤثر حاصل از انجام

آزمایش بر روی ماسه و رس عادی تحکیم یافته نشان داده شده است. مختصات نقطه تماس پوش گسیختگی با دایره Mohr (یعنی نقطه A)، مقدار تنش‌های (قائم و برشی) روی صفحه گسیختگی نمونه مورد آزمایش را به دست می‌دهد.

با توجه به شکل ۱۲-۲۲، برای رس عادی تحکیم یافته داریم:

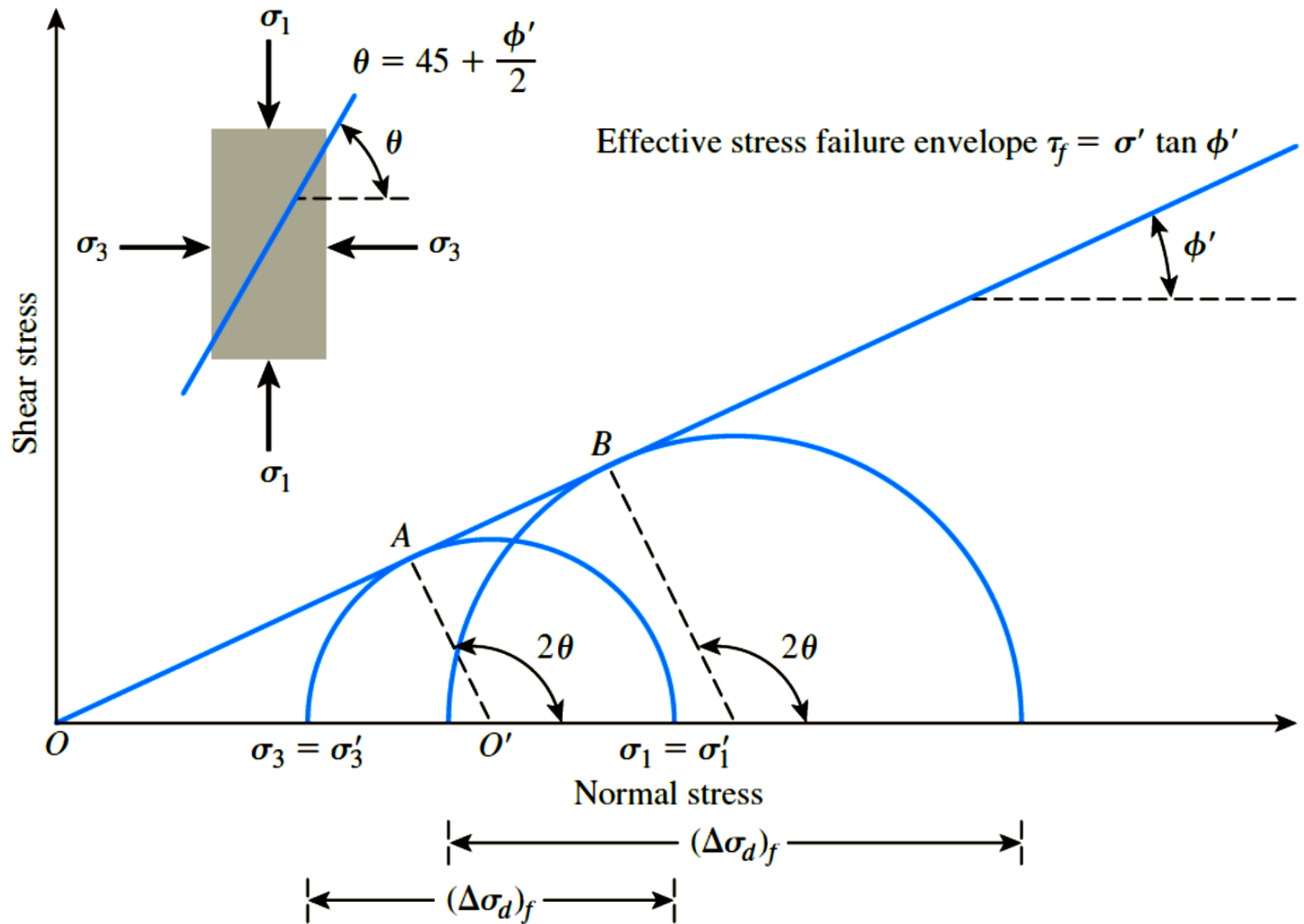
$$\sin \phi' = \frac{AO'}{OO'}$$

یا

$$\sin \phi' = \frac{\left( \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \right)}{\left( \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \right)}$$

$$\phi' = \sin^{-1} \left( \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \right) \quad (۱۲-۱۹)$$

همچنین زاویه تمایل صفحه گسیختگی با صفحه تنش اصلی حداکثر برابر با  $\theta = 45 + \frac{\phi'}{2}$  خواهد بود (شکل ۱۲-۲۲).

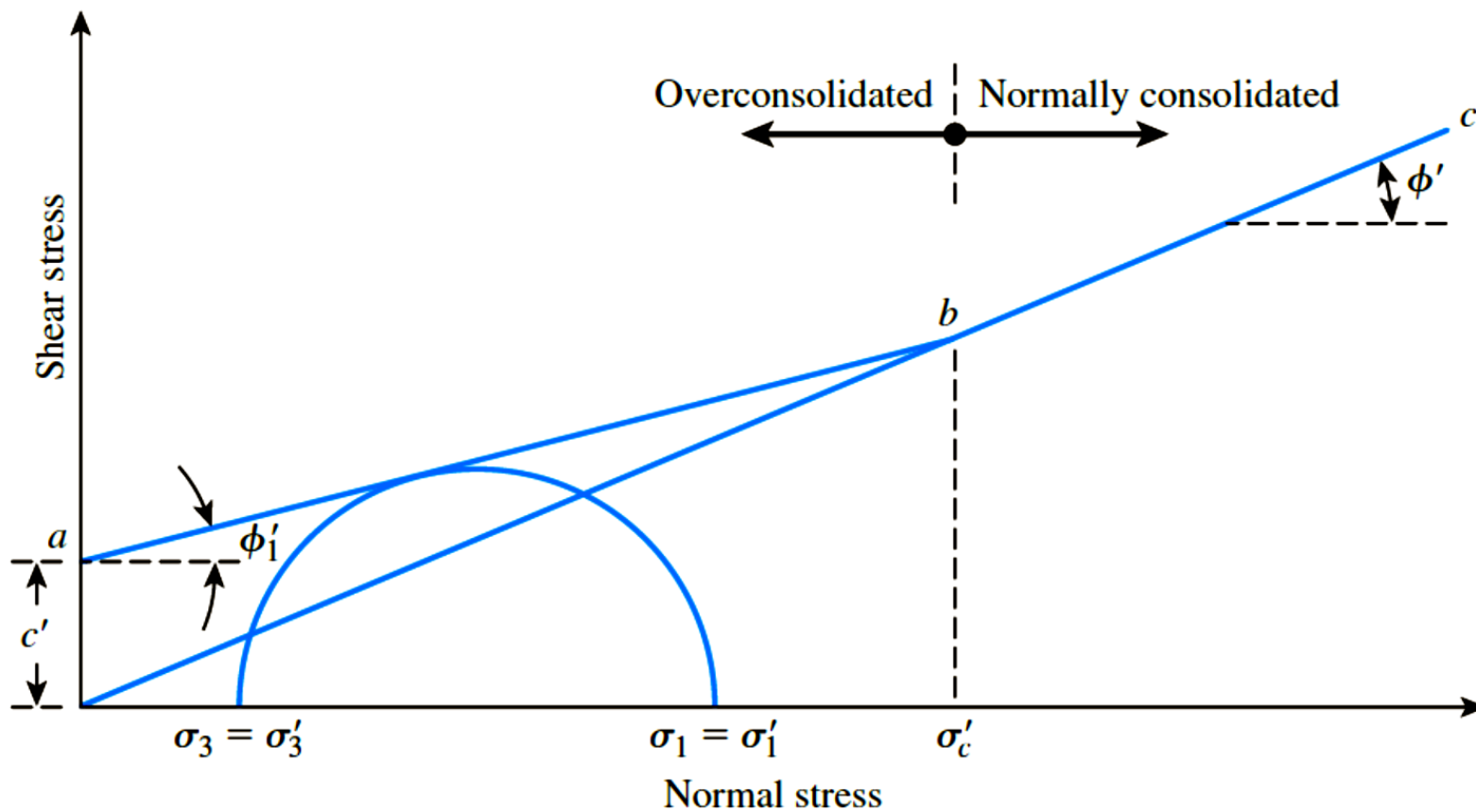


شکل ۱۲-۲۲ پوش گسیختگی تنش مؤثر حاصل از آزمایش‌های زهکشی شده بر روی ماسه و رس عادی تحکیم یافته.

بیش تحکیمی زمانی حاصل می‌شود که رس نخست تحت فشار همه جانبه  $\sigma_e (= \sigma'_e)$  قرار گیرد و با کاهش فشار محفظه‌ای  $\sigma_p (= \sigma'_p)$ ، امکان متورم شدن پیدا کند. پوش گسیختگی حاصل از آزمایش‌های سه محوری زهکشی شده بر روی چنین نمونه‌هایی از رس بیش تحکیم یافته، دو شاخه مشخص را نشان می‌دهد ( $bc$  و  $ab$  در شکل ۱۲-۲۳). بخش  $ab$  دارای شیبی کمتر با عرض از مبدای معادل چسبندگی است و معادله مقاومت برشی این شاخه را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (12-20)$$

بخش  $bc$  از پوش گسیختگی نشانگر مرحله عادی تحکیم یافته بودن خاک است و معادله آن به صورت  $\tau_f = \sigma' \tan \phi'$  بیان می‌شود.



شکل ۱۲-۲۳ پوش گسیختگی تنش مؤثر برای رس بیش تحکیم یافته.

در صورت در اختیار داشتن نتایج آزمایش سه محوری انجام شده بر روی دو نمونه خاک بیش تحکیم یافته، مقدار  $\phi'_1$  و  $c'$  را می‌توان به شکل زیر تعیین کرد. از معادله (۸-۱۲) برای نمونه ۱ داریم:

$$\sigma'_{1(1)} = \sigma'_{3(1)} \tan^2(45 + \phi'_1/2) + 2c' \tan(45 + \phi'_1/2) \quad (۲۱-۱۲)$$

و برای نمونه ۲:

$$\sigma'_{1(2)} = \sigma'_{3(2)} \tan^2(45 + \phi'_1/2) + 2c' \tan(45 + \phi'_1/2) \quad (۲۲-۱۲)$$

یا

$$\sigma'_{1(1)} - \sigma'_{1(2)} = [\sigma'_{3(1)} - \sigma'_{3(2)}] \tan^2(45 + \phi'_1/2)$$

بنابراین:

$$\phi'_1 = 2 \left\{ \tan^{-1} \left[ \frac{\sigma'_{1(1)} - \sigma'_{1(2)}}{\sigma'_{3(1)} - \sigma'_{3(2)}} \right]^{0.5} - 45^\circ \right\} \quad (۲۳-۱۲)$$

با معلوم شدن مقدار  $\phi'_1$  می‌توان  $c'$  را به صورت زیر به دست آورد:

$$c' = \frac{\sigma'_{1(1)} - \sigma'_{3(1)} \tan^2\left(45 + \frac{\phi'_1}{2}\right)}{2 \tan\left(45 + \frac{\phi'_1}{2}\right)} \quad (۲۴-۱۲)$$

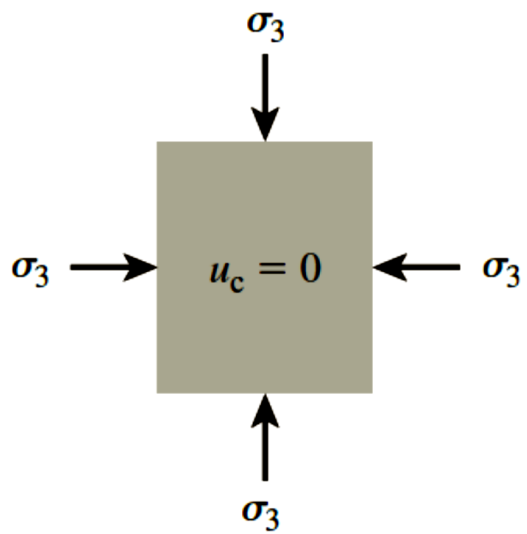
# آزمایش سه محوری تحکیم یافته - زهکشی نشده

آزمایش تحکیم یافته - زهکشی نشده متداولترین نوع آزمایش سه محوری است. در این آزمایش نخست نمونه خاک اشباع از طریق فشار همه جانبه سیال درون محفظه  $\sigma_p$  تحکیم می شود که این به زهکشی نمونه منجر می گردد (شکل های ۱۲-۲۶-الف و ۱۲-۲۶-ب). پس از استهلاک فشار آب منفذی ناشی از اعمال فشار محدودکننده، تنش انحرافی  $\Delta\sigma_d$  روی نمونه تا گسیختگی برشی افزایش داده می شود (شکل ۱۲-۲۶-ج). در طول این مرحله از آزمایش، لوله خروج آب زهکشی شده از نمونه بسته نگه داشته می شود. به دلیل امکان پذیر نبودن زهکشی، فشار آب منفذی  $\Delta u_d$  افزایش می یابد. در طول آزمایش، همزمان  $\Delta\sigma_d$  و  $\Delta u_d$  اندازه گیری می شوند. افزایش فشار آب منفذی  $\Delta u_d$  را می توان به شکل بی بعد به صورت زیر بیان کرد:

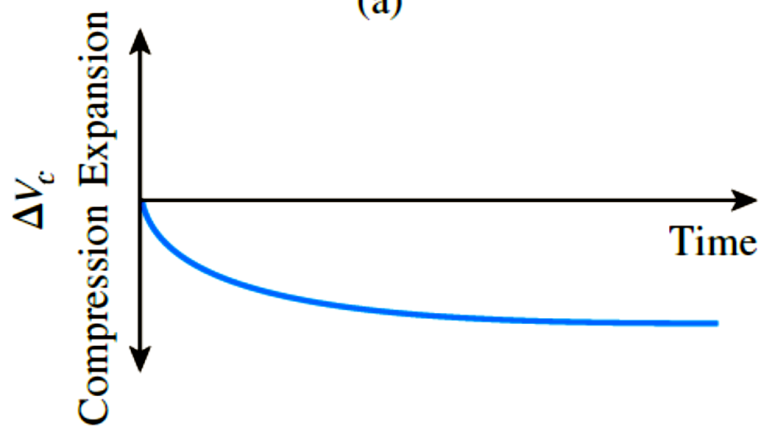
$$\bar{A} = \frac{\Delta u_d}{\Delta\sigma_d} \quad (12-25)$$

که در این جا:  $\bar{A}$  = پارامتر فشار منفذی Skempton (Skempton, 1954).

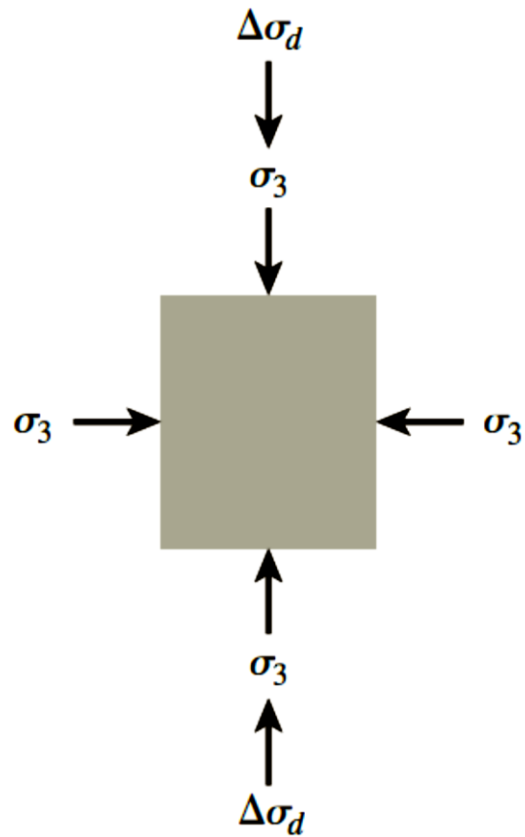




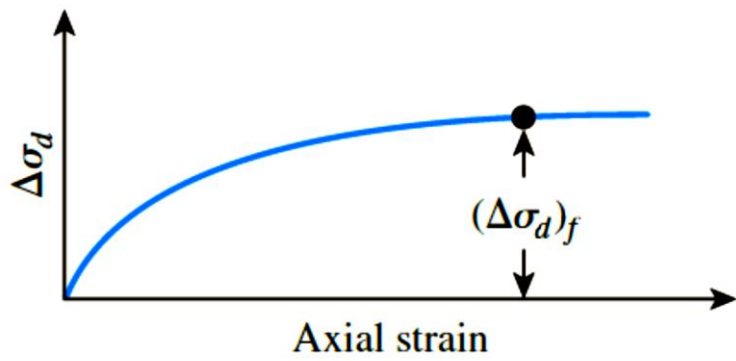
(a)



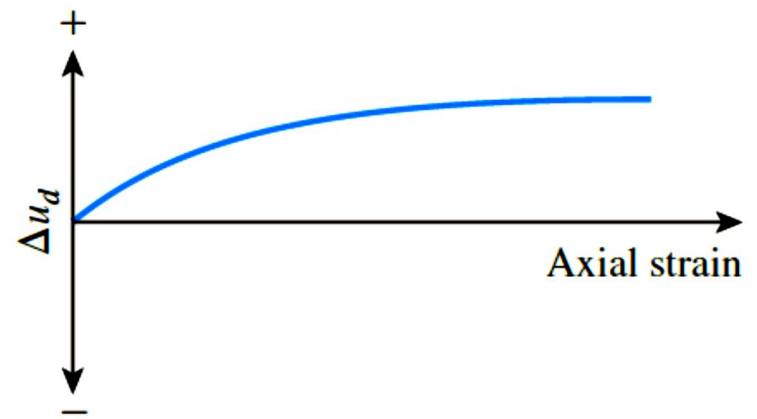
(b)



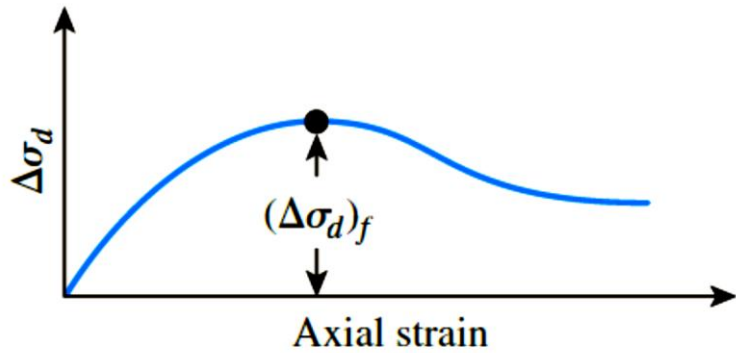
(c)



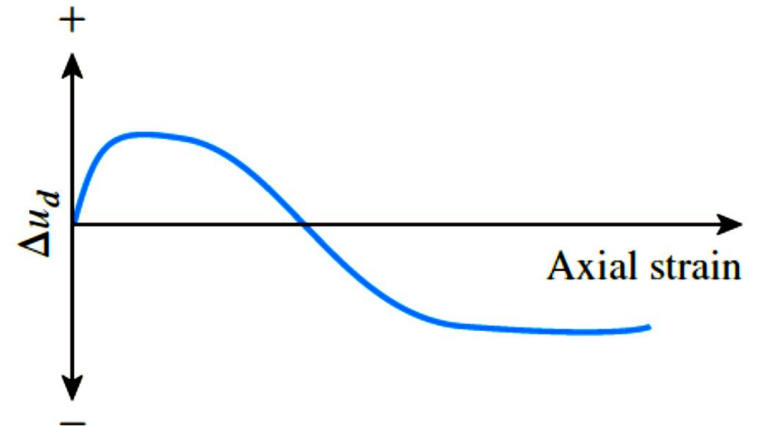
(d)



(f)



(e)



شکل ۱۲-۲۶ آزمایش تحکیم یافته - زهکشی نشده: (الف) نمونه تحت فشار محدودکننده محفظه‌ای، (ب) تغییر حجم نمونه در اثر فشار محدودکننده، (ج) اعمال تنش انحرافی، (د) نمودار تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری برای ماسه سست و رس عادی تحکیم یافته، (ه) نمودار تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری برای ماسه متراکم و رس بیش تحکیم یافته، (و) تغییرات فشار آب منفذی نسبت به کرنش محوری برای ماسه سست و رس عادی تحکیم یافته، و (ز) تغییرات فشار آب منفذی نسبت به کرنش محوری برای ماسه متراکم و رس بیش تحکیم یافته.

در شکل‌های ۱۲-۲۶-د تا ۱۲-۲۶-ز الگوی کلی تغییرات  $\Delta\sigma_d$  و  $\Delta u_d$  نسبت به کرنش محوری برای ماسه و خاک‌های رس نشان داده شده است. در ماسه سست و رس عادی تحکیم یافته، فشار آب منفذی با افزایش کرنش افزایش می‌یابد. در ماسه متراکم رس بیش تحکیم یافته، فشار آب منفذی با افزایش کرنش تا حد معینی افزایش پیدا می‌کند و فراتر از آن کاهش یافته و منفی می‌شود (نسبت به فشار جو). این کاهش به دلیل تمایل خاک به اتساع است.

برخلاف آزمایش تحکیم یافته - زهکشی شده، در آزمایش تحکیم یافته - زهکشی نشده، تنش‌های اصلی کل و مؤثر یکسان نیستند. از آن جا که در این آزمایش فشار آب منفذی زمان گسیختگی اندازه‌گیری می‌شود، تنش‌های اصلی را می‌توان به صورت زیر تحلیل کرد:

- تنش اصلی حداکثر در زمان گسیختگی (کل):  $\sigma_1 + (\Delta\sigma_d)_f = \sigma_1$

- تنش اصلی حداکثر در زمان گسیختگی (مؤثر):  $\sigma_1 - (\Delta u_d)_f = \sigma'_1$

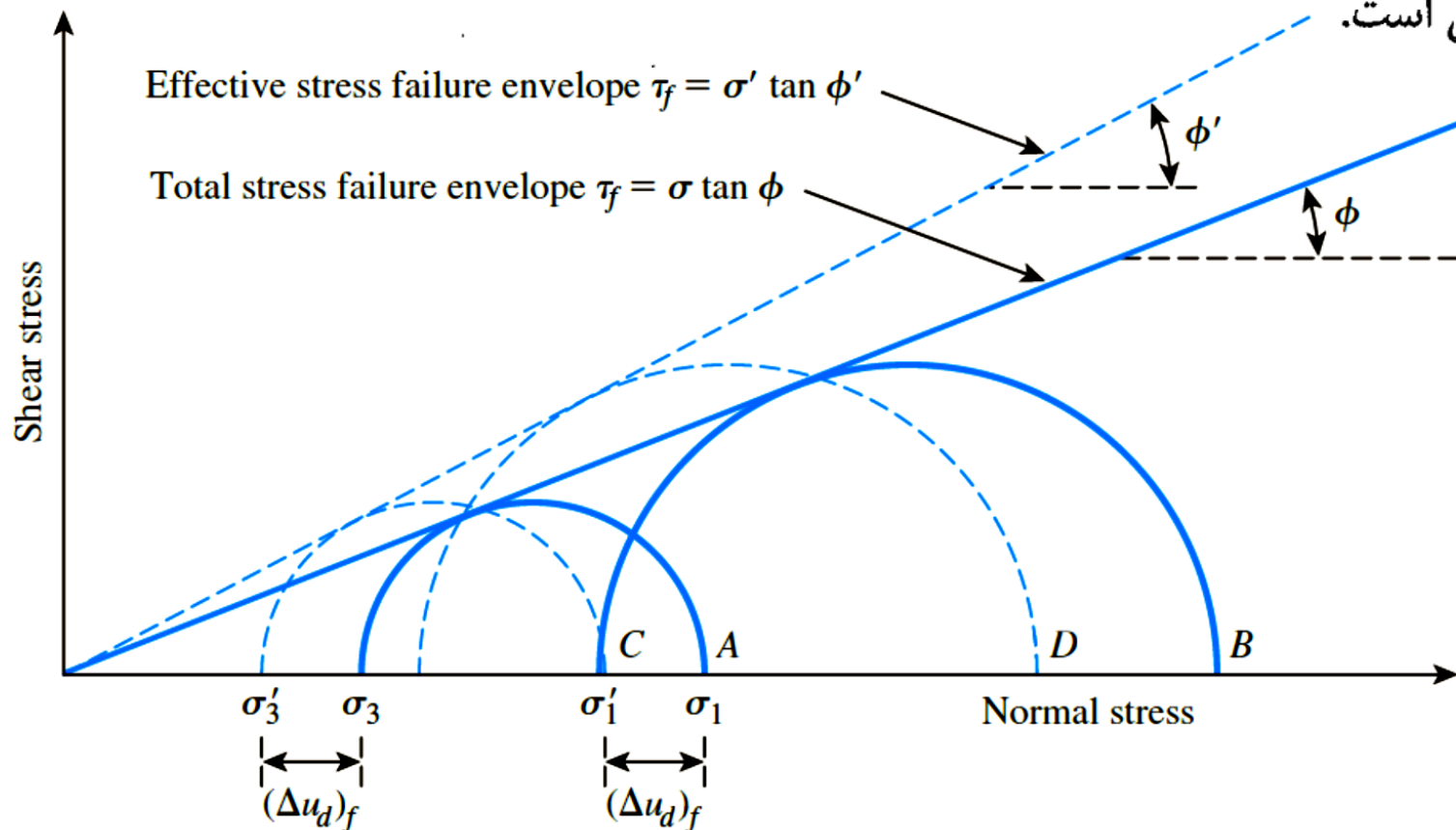
- تنش اصلی حداقل در زمان گسیختگی (کل):  $\sigma_3$

- تنش اصلی حداقل در زمان گسیختگی (مؤثر):  $\sigma_3 - (\Delta u_d)_f = \sigma'_3$

در این معادلات  $(\Delta u_d)_f =$  فشار آب منفذی در زمان گسیختگی. از روابط پیش گفته نتیجه می‌شود:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma'_1 - \sigma'_3$$

برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی می‌توان روی چند نمونه مشابه با فشارهای محدودکننده مختلف آزمایش‌هایی انجام داد. در شکل ۱۲-۲۷ دایره Mohr تنش کل و مؤثر زمان گسیختگی حاصل از آزمایش‌های سه محوری تحکیم یافته - زهکشی نشده بر روی ماسه و رس عادی تحکیم یافته نشان داده شده‌اند. توجه داشته باشید که  $A$  و  $B$  دو دایره Mohr تنش کل حاصل از دو آزمایش‌اند.  $C$  و  $D$  به ترتیب دایره Mohr تنش مؤثر متناظر با دایره تنش کل  $A$  و  $B$  اند. قطر دایره  $A$  و  $C$  و همین‌طور قطر دایره  $B$  و  $D$  یکسان است.



شکل ۱۲-۲۷ پوش‌های گسیختگی تنش کل و مؤثر حاصل از آزمایش‌های سه محوری تحکیم یافته - زهکشی نشده.

در شکل ۱۲-۲۷ پوش گسیختگی تنش کل را می‌توان با ترسیم خط مماس بر دوائر Mohr تنش کل به دست آورد. برای ماسه و رس‌های عادی تحکیم یافته، این خط تقریباً خط مستقیم گذرا از مبدأ است که با معادله زیر بیان می‌شود:

$$\tau_f = \sigma \tan \phi \quad (۱۲-۲۶)$$

که در این جا:  $\sigma$  = تنش کل

$\phi$  = زاویه‌ای که پوش گسیختگی تنش کل با محور تنش قائم تشکیل می‌دهد و زاویه

مقاومت برشی تحکیم یافته - زهکشی نشده نامیده می‌شود.

از معادله (۱۲-۲۶) به ندرت برای کارهای عملی استفاده می‌شود. مشابه با معادله (۱۲-۱۹) برای ماسه و رس عادی تحکیم یافته می‌توان نوشت:

$$\phi = \sin^{-1} \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \right) \quad (۱۲-۲۷)$$

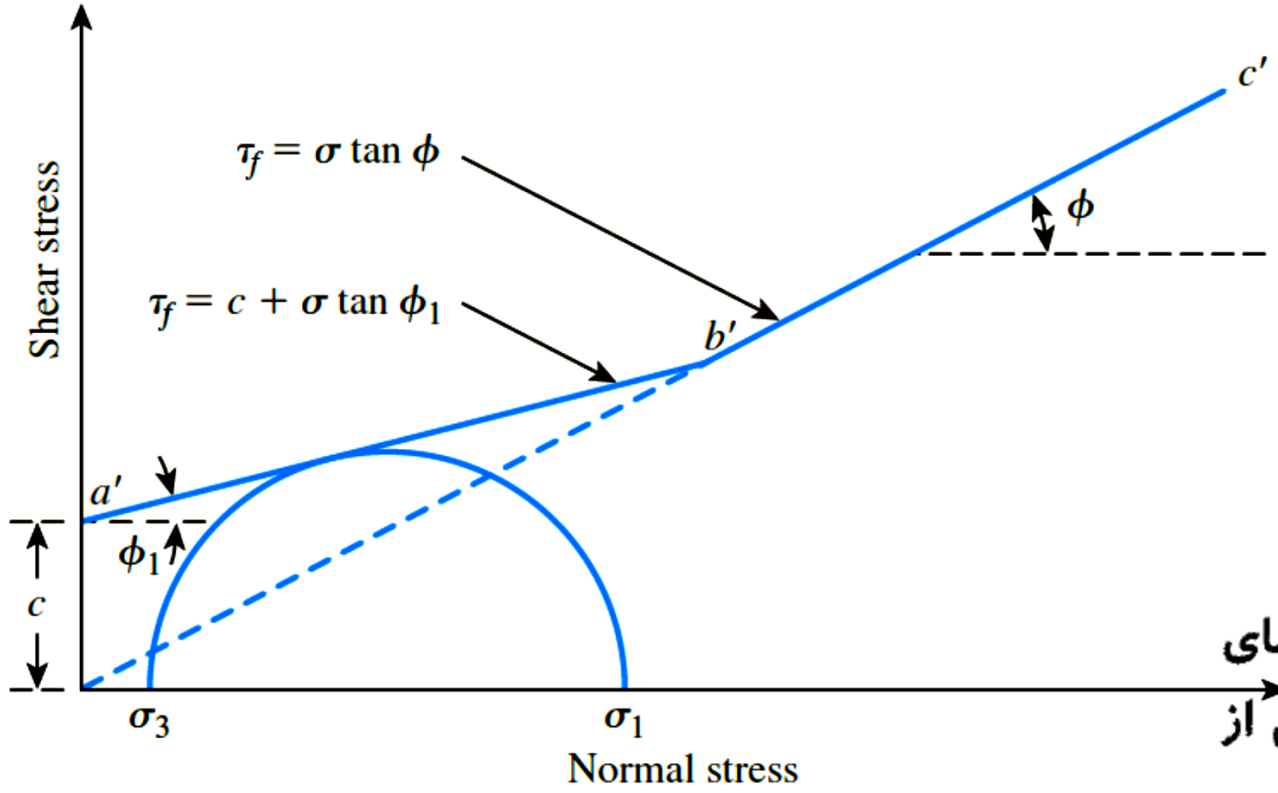
$$\phi' = \sin^{-1} \left( \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \right) \quad 9$$

$$= \sin^{-1} \left\{ \frac{[\sigma_1 - (\Delta u_d)_f] - [\sigma_3 - (\Delta u_d)_f]}{[\sigma_1 - (\Delta u_d)_f] + [\sigma_3 - (\Delta u_d)_f]} \right\}$$

$$= \sin^{-1} \left[ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 - 2(\Delta u_d)_f} \right] \quad (۱۲-۲۸)$$

در رس‌های بیش تحکیم یافته، پوش گسیختگی تنش کل حاصل از آزمایش‌های تحکیم یافته - زهکشی نشده همانند شکل ۱۲-۲۸ خواهد بود. خط مستقیم  $a'b'$  با معادله زیر بیان می‌شود:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi_1 \quad (۱۲-۲۹)$$



شکل ۱۲-۲۸ پوش‌های گسیختگی تنش کل حاصل از آزمایش‌های تحکیم یافته - زهکشی نشده بر روی رس بیش تحکیم یافته.

در معادله (۱۲-۲۵) پارامتر فشار آب منفذی Skempton ( $\bar{A}$ ) تعریف شده است. در زمان گسیختگی، پارامتر  $\bar{A}$  را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\bar{A} = \bar{A}_f = \frac{(\Delta u_d)_f}{(\Delta \sigma_d)_f} \quad (۱۲-۳۰)$$

محدوده عمومی مقادیر  $\bar{A}_f$  در اکثر خاک‌های رس به صورت زیر است:

- رس‌های عادی تحکیم یافته: ۰/۵ تا ۱
- رس‌های بیش تحکیم یافته: ۰/۵- تا ۰

# آزمایش سه محوری تحکیم نیافته - زهکشی نشده

در آزمایش‌های تحکیم نیافته - زهکشی نشده اجازه زهکشی نمونه خاک در ضمن اعمال فشار محفظه‌ای  $\sigma_3$  داده نمی‌شود. گسیختگی نمونه خاک مورد آزمایش با اعمال تنش انحرافی  $\Delta\sigma_d$  و جلوگیری از زهکشی صورت می‌گیرد. از آن جا که در هیچ مرحله‌ای از آزمایش اجازه زهکشی داده نمی‌شود، آزمایش را می‌توان به سرعت انجام داد. به دلیل اعمال فشار محدودکننده محفظه‌ای  $\sigma_3$ ، فشار آب منفذی در داخل نمونه خاک به مقدار  $u_c$  افزایش پیدا می‌کند. افزایش بیشتر فشار آب منفذی  $u$  در نمونه در هر مرحله‌ای از اعمال تنش انحرافی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$u = u_c + \Delta u_d \quad (۱۲-۳۱)$$

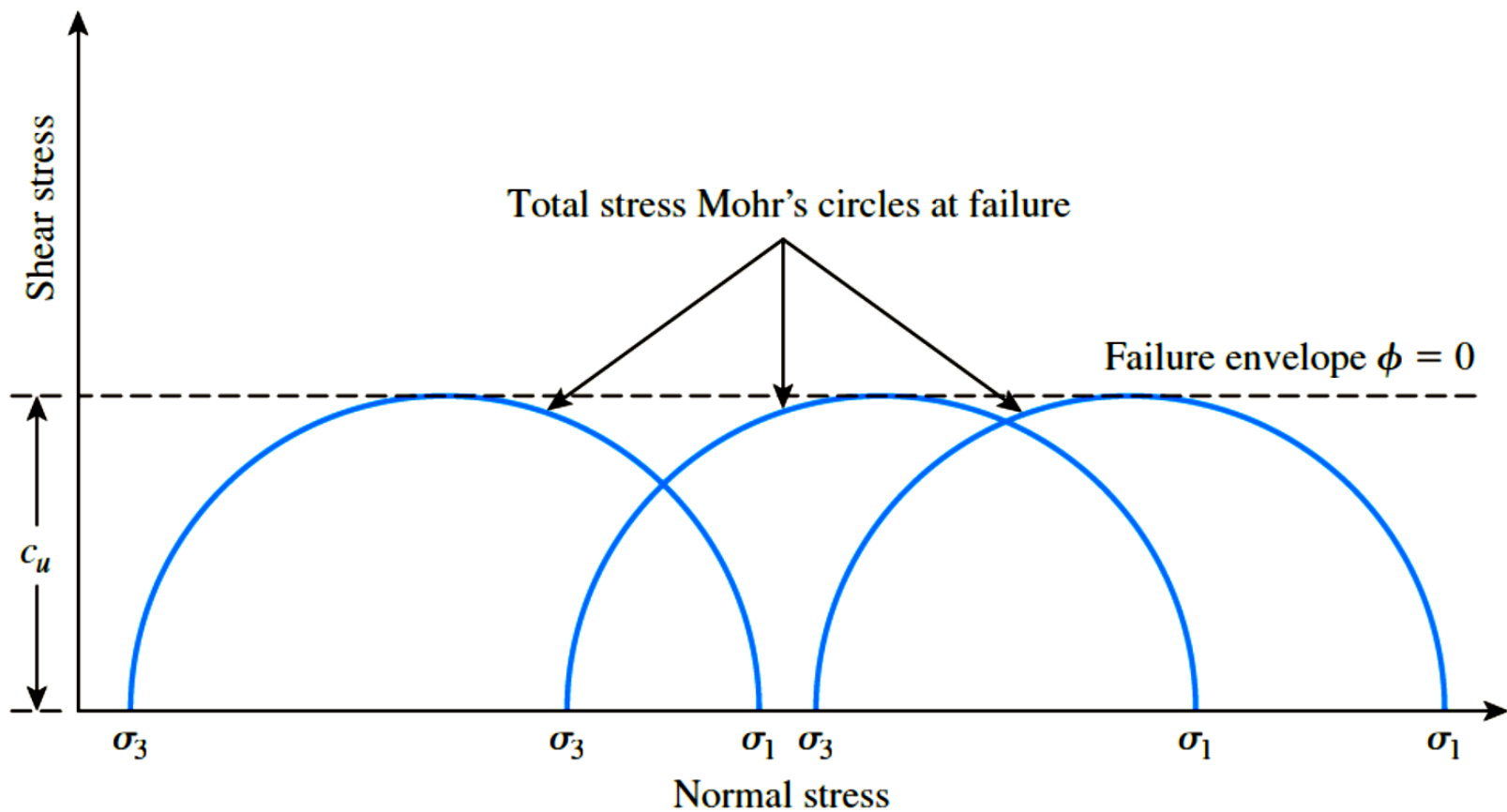
از معادلات (۱۲-۱۸) و (۱۲-۲۵) داریم:  $u_c = B\sigma_3$  و  $\Delta u_d = \bar{A}\Delta\sigma_d$ ، بنابراین:

$$u = B\sigma_3 + \bar{A}\Delta\sigma_d = B\sigma_3 + \bar{A}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (۱۲-۳۲)$$

این آزمایش معمولاً بر روی نمونه‌های رس انجام می‌شود و در خاک‌های چسبنده و کاملاً اشباع مفهوم مقاومتی بسیار مهمی دارد. تنش محوری اضافی در زمان گسیختگی  $(\Delta\sigma_d)_f$  صرف نظر از فشار محدودکننده محفظه‌ای عملاً یکسان است. این خصوصیت در شکل ۱۲-۳۱ نشان داده شده است. پوش گسیختگی دواير Mohr تنش کل به یک خط افقی تبدیل می‌شود و به همین دلیل آن را شرایط  $\phi = 0$  می‌نامند. از معادله (۱۲-۹) با  $\phi = 0$  نتیجه می‌شود:

$$\tau_f = c = c_u \quad (۱۲-۳۳)$$





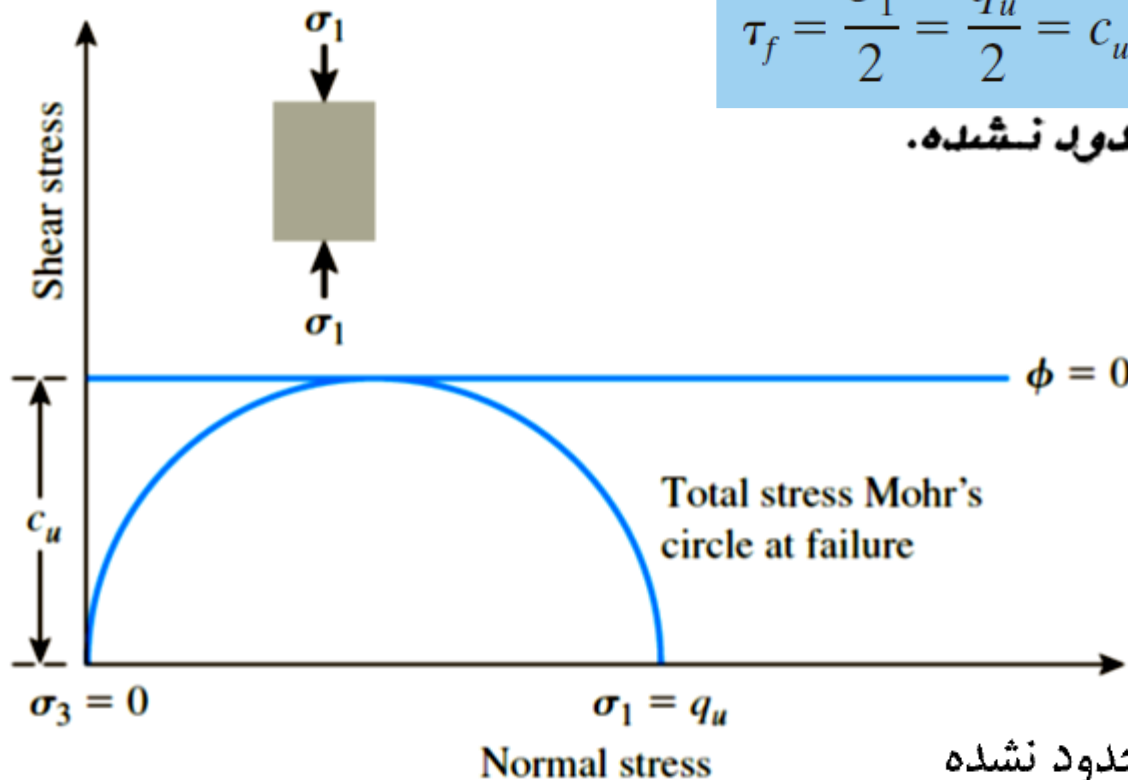
شکل ۱۲-۳۱ دوائر Mohr تنش کل و پوش گسیختگی ( $\phi = 0$ ) حاصل از آزمایش‌های سه محوری

# آزمایش فشاری محدود نشده بر روی رس اشباع

آزمایش فشاری محدود نشده نوع ویژه‌ای از آزمایش تحکیم نیافته - زهکشی نشده است که معمولاً برای نمونه‌های رس مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این آزمایش، فشار محدودکننده  $\sigma_p$  صفر است. بار محوری تا ایجاد گسیختگی در نمونه به سرعت اعمال می‌شود. در زمان گسیختگی، تنش اصلی حداقل کل صفر و تنش اصلی حداکثر کل  $\sigma_1$  است (شکل ۱۲-۳۳). از آن جا که تا زمان اشباع بودن کامل خاک و زهکشی نبودن کامل خاک، مقاومت برشی زهکشی نشده مستقل از فشار محدودکننده است، داریم:

$$\tau_f = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{q_u}{2} = c_u \quad (۱۲-۳۴)$$

که در این جا:  $q_u$  = مقاومت فشاری محدود نشده.



شکل ۱۲-۳۳ آزمایش فشاری محدود نشده



شکل ۱۲-۳۴ دستگاه آزمایش فشاری  
محدود نشده.



شکل ۱۲-۳۵ گسیختگی برشی نمونه خاک در  
آزمایش فشاری محدود نشده.



شکل ۱۲-۳۶ گسیختگی نمونه خاک در اثر شکم  
دادگی یا باد کردگی در آزمایش فشاری محدود  
نشده.