


آزمون‌های آزمایشگاهی تعیین مقاومت برشی خاک

محل ضرب مهرهای تحت کنترل- منسوخ							۰۳
							۰۲
							۰۱
				امیر ساعدی	وحید پاچیده	آزمون‌های آزمایشگاهی تعیین مقاومت برشی خاک	۰۰
	تاریخ انتشار	تصویب	تأیید	بررسی	تهیه	شرح	REV

آزمون های آزمایشگاهی تعیین مقاومت برشی خاک									
صفحه: ۲	DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV		پروژه:
مرداد ۹۴							۰۱		

فهرست مطالب

۳	۱-مقدمه
۳	۲-آزمایش برش مستقیم
۵	۳-آزمایش سه محوری
۷	۴-آزمایش های آزمایشگاهی خاص خاک

آزمون های آزمایشگاهی تعیین مقاومت برشی خاک								 گروه مهندسیین DARS	
صفحه: ۳	DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV		پروژه:
مرداد ۹۴							۰۱		

۱- مقدمه

در این نوشتار به طور خلاصه برخی از آزمون های آزمایشگاهی مرسوم در مورد تعیین مقاومت برشی خاک ها معرفی خواهد شد. برخی از آزمایش های نسبتاً پیچیده هستند و جزئیات بیشتر در مورد آنها را می توان در هندبوک های آزمایشگاهی و کتب مرجع یافت. برخی از این مراجع عبارتند از:

- آزمایش های خاک: U.S. Dept. of the Interior ، U.S. Army Corps of Engineers (1986) ، Bardet (1997) و Bardet (1997) ، (1990)
- آزمایش های سنگ: Goodman (1989) ، Wyllie (1999) ، Jaeger et al. (2007) و International Society for Rock Mechanics (ISRM) Blue Book of ISRM

۲- آزمایش برش مستقیم

آزمایش برش مستقیم را شاید بتوان قدیمی ترین آزمایش مقاومتی در خاک ها دانست. بیش از ۲۳۰ سال پیش، کولمب جهت تعیین پارامترهای لازم برای معادله مقاومت خود، از یک نوع آزمایش برش جعبه استفاده کرد. اساس این آزمایش بسیار ساده بود. اصولاً در این آزمایش، نمونه در ظرفی که «جعبه برشی» نام دارد، قرار داده می شود به گونه ای که این جعبه در جهت افقی به دو نیمه تقسیم می گردد. یک نیمه ی آن نسبت به نیمه ی دیگر، ثابت، و نیمه دوم کشیده یا هل داده می شود. با استفاده از یک کلاهک صلب، نیروی قائمی بر نمونه وارد می شود. مقدار نیروی قائم، تغییر شکل قائم و تغییر شکل افقی در طول آزمایش اندازه گیری می شود. با تقسیم کردن نیروی برشی و نیروی قائم بر مساحت اسمی نمونه، مقدار تنش برشی و تنش قائم در صفحه گسیختگی بدست می آید. باید توجه داشت که در این دستگاه صفحه گسیختگی در یک موقعیت تحمیلی در نمونه ایجاد می شود.

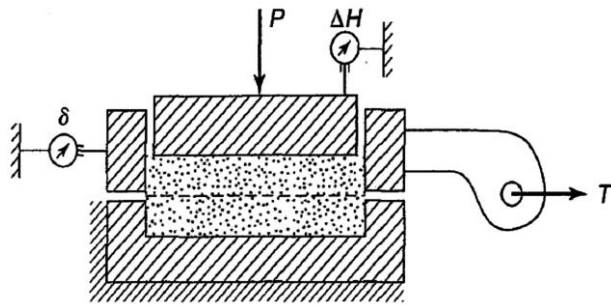
در شکل ۱-الف یک مقطع عرضی از مشخصات اصلی دستگاه و در شکل ۱-ب نتایج برخی آزمایش ها به عنوان نمونه نشان داده شده است. منحنی مور-کولمب در حالت گسیختگی در شکل ۱-ج نشان داده شده است. به عنوان مثال، اگر سه نمونه ماسه با چگالی نسبی برابر درست قبل از برش مورد آزمایش قرار دهیم، با افزایش تنش نرمال (σ_n)، طبق انتظار ما از دانسته های اصطکاک لغزشی، همزمان مقدار تنش برشی در صفحه گسیختگی در لحظه گسیختگی (مقاومت برشی) نیز افزایش می یابد. این شرایط در منحنی های معمول تنش برشی نسبت به تغییر شکل در یک ماسه متراکم در شکل ۱-ب برای حالت $\sigma_{n1} < \sigma_{n2} < \sigma_{n3}$ نشان داده شده است. با ترسیم این نتایج در منحنی مور، شکل ۱-ج، زاویه اصطکاک داخلی خاک می تواند بدست آید.

نتایج معمول تغییر شکل قائم (ΔH) برای یک ماسه متراکم در قسمت پائینی شکل ۱-ب نشان داده شده است. در ابتدا یک کاهش نسبی در ارتفاع یا حجم نمونه ایجاد می شود، و با اتساع یا افزایش در ارتفاع یا حجم نمونه ادامه می یابد. با افزایش تنش نرمال (σ_n)، امکان اتساع در حین برش برای خاک مشکل خواهد شد که به نظر می رسد منطقی باشد.

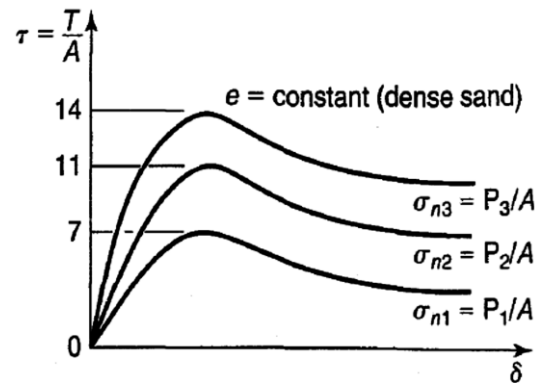
آزمون های آزمایشگاهی تعیین مقاومت برشی خاک



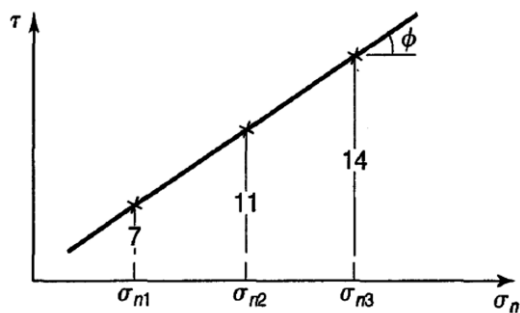
صفحه: ۴	DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV	پروژه:
مرداد ۹۴							۰۱	



(الف)



(ب)




(ج)



شکل ۱: (الف) نمای شماتیک مقطع عرضی دستگاه برش مستقیم؛ (ب) نتایج آزمایش های معمول (ماسه متراکم) و (ج) منحنی مور برای نمونه های با تراکم نسبی برابر



شکل ۲: دستگاه آزمایش برش مستقیم

آزمون های آزمایشگاهی تعیین مقاومت برشی خاک									
صفحه: ۵	DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV		پروژه:
مرداد ۹۴							۰۱		

در آزمایش برش مستقیم، امکان بدست آوردن مقادیر تنش های اصلی به طور مستقیم وجود ندارد. لکن در صوت نیاز می توان با رسم پوش گسیختگی مور-کولمب به این هدف رسید. لذا زاویه چرخش تنش های اصلی می تواند تعیین شود. حال سوال اینجاست که چرا زاویه ی چرخش تنش های اصلی؟ زیرا در ابتدا صفحه افقی (صفحه گسیختگی بالقوه) یک صفحه ی (نه تنش برشی) اصلی است، امام بعد از اعمال تنش برشی و وقوع گسیختگی، طبق تعریف دیگر این صفحه نمی تواند صفحه تنش های اصلی باشد. بنابراین صفحه تنش های اصلی در آزمایش برش مستقیم خواهد چرخید. میزان چرخش چرخ میزان خواهد بود؟ این به شیب پوش گسیختگی مور-کولمب بستگی دارد، اما با برخی فرضیات ساده کننده، به راحتی قابل تعیین است.

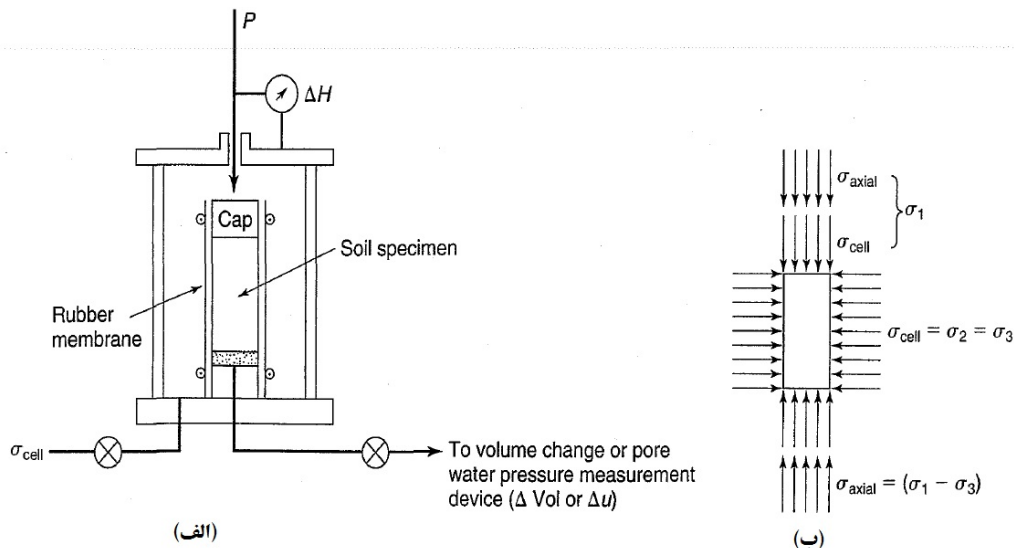
مسلماً آزمایش برش مستقیم مزایا و معایب متعددی دارد. در درجه اول، این آزمایش مخصوصاً برای مصالح دانه ای، ارزان، سریع و ساده است. در طبیعت می توان صفحه برشی و ناحیه ی نازک گسیختگی را مشاهده کرد، اما در این آزمایش می توان به خوبی برش واقعی را در یک صفحه در نمونه بادانستن تنش ها در آن صفحه مشاهده کرد. معایب آن شامل مشکل کنترل زهکشی در آزمایش می شود، اگرچه ناممکن نیست اما مخصوصاً بای خاک-های ریزدانه بسیار سخت است. در نتیجه، این آزمایش برای شرایطی غیر از زهکشی کامل، مناسب نیست. چطور می توان مطمئن بود که صفحه گسیختگی تحمیلی بر نمونه دقیقاً همان صفحه ضعیف یا همان جهت بحرانی نمونه در طبیعت است؟ پاسخ این است که نمی توان به این اطمینان رسید و این یکی از نقاط ضعف این آزمایش است. یکی از معایب دیگر آزمایش برش مستقیم وجود شرایط تمرکز تنش در مرزهای نمونه است که منجر به توزیع غیر یکنواخت تنش ها در خود نمونه می شود.

۳- آزمایش سه محوری

در طی دوره های اخیر تاریخ مکانیک خاک، آزمایش برش مستقیم یکی از شناخته شده ترین آزمایش های تعیین مقاومت برشی خاک بوده است. بعدها، حدود سال ۱۹۳۰، تحقیقاتی را در دانشگاه MIT جهت ابداع یک آزمایش فشاری استوانه ای در جهت کاهش برخی اشکالات جدی آزمایش برش مستقیم، شروع کرد. حال این آزمایش، که عموماً «آزمایش سه محوری» نامیده می شود، به عنوان عمومی ترین آزمایش در بین این دو شده است. این آزمایش علاوه بر بسیار پیچیده بودن، چند کاربردی نیز می باشد. در این آزمایش امکان کنترل زهکشی نسبتاً خوب است و چرخشی در جهت تنش های σ_1 و σ_2 نیز ایجاد نمی شود. در این آزمایش نیز تمرکز تنش همچنان وجود دارد، اما مقدار آن از آنچه در برش مستقیم وجود دارد، به میزان قابل توجهی کمتر است. همچنین برخلاف آزمایش برش مستقیم، در این آزمایش سطح گسیختگی تحمیلی نبوده و در هر موقعیتی می تواند ایجاد شود. به عنوان یک مزیت دیگر، در آزمایش سه محوری می توان مسیرهای تنش را به صورت منطقی تا رسیدن به گسیختگی کنترل کرد، کهاین بدان معناست که مسیرهای تنش پیچیده واقعی را به صورت مؤثری در این آزمایش مدل سازی کرد.

صفحه: ۶	DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV	پروژه:
مرداد ۹۴							۰۱	

اصول آزمایش سه محوری در شکل های ۳-الف و ۴ نشان داده شده است. نمونه خاک در یک غشاء لاستیکی ساخته می شود تا از نفوذ مایع تحت فشار سلول سه محوری (معمولاً آب) به درون منافذ خاک جلوگیری کند. بار محوری بوسیله یک پیستون بر نمونه وارد می شود، و معمولاً تغییرات حجم نمونه در طول آزمایش زهکشی شده یا افزایش فشار آب حفره ای در طول آزمایش زهکشی نشده، اندازه گیری و ثبت می شود. همانطور که قبلاً نیز بیان شد، می توان زهکشی به دورن نمونه یا از دورن آن را تحت کنترل قرار داد و با در گفتن فرضیاتی، این امکان وجود دارد که مسیرهای تنش وارد بر نمونه کنترل گردد. اصولاً فرض بر این است که تنش های موجود در مرزهای نمونه، تنش های اصلی هستند (شکل ۳-ب). این فرض از نظر واقعیت به دلیل وجود برخی تنش های برشی موجود در انتهای نمونه، صحیح نیست. همچنین، همانطور که قبلاً نیز بیان شد، صفحه گسیختگی تحمیلی نبوده و نمونه می تواند آزادانه در هر صفحه ی ضعیفی گسیخته، یا آنگونه که بعضاً مشاهده می شود، متورم گردد.



شکل ۳: (الف) نمای شماتیک دستگاه آزمایش سه محوری (ب) شرایط تنشی مفروض بر نمونه سه محوری



شکل ۴: دستگاه آزمایش سه محوری و تجهیزات مربوط به آن

آزمون های آزمایشگاهی تعیین مقاومت برشی خاک									
صفحه: ۷	DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV		پروژه:
مرداد ۹۴							۰۱		

باید توجه شود که σ_{axial} در شکل ۳-ب با تنش های حداقل و حداکثر اصلی متفاوت می باشد؛ به این تنش «تنش اصلی اختلافی» (یا بعضاً به طور ناصحیح، تنش انحرافی) گفته می شود. همچنین این نکته نیز قابل توجه است که برای شرایط نشان داده شده در شکل، $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{cell}$ می باشد. بعضاً برای برخی از مسیرهای تنش خاص، فرض می شود که $\sigma_{cell} = \sigma_1 = \sigma_2$ است.

شرایط زهکشی شده در آزمایش سه محوری، مدلی از شرایط بحرانی خاص طراحی است که برای آنالیز پایداری در مسائل مهندسی ژئوتکنیک ضروری است. در این مورد معمولاً از یک نشانه دوحرفی استفاده می شود. حرف اول مربوط به آنچه است که قبل از برش وجود دارد که آیا نمونه تحکیم یافته است یا نه. حرف دوم مربوط به شرایط زهکشی در طی برش می باشد. سه گونه مسیر زهکشی مجاز در آزمایش سه محوری عبارتند از:

مسیر زهکشی	نشانه
قبل از برش - در حین برش	
زهکشی شده - تحکیم نیافته	UU
تحکیم یافته - زهکشی نشده	CU
تحکیم یافته - زهکشی شده	CD

البته حالت تحکیم نیافته - زهکشی شده را نیز می توان در نظر گرفت، لکن به دلیل آنکه عملاً چنین حالتی امکان پذیر و منطقی نیست، به حساب نمی آید.

۴- آزمایش های آزمایشگاهی خاص خاک

انواع دیگر آزمایش های مقاومتی نیز وجود دارند، شامل آزمایش سیلندر توخالی^۱، آزمایش های کرنش صفحه ای^۲ و آزمایش های به اصطلاح سه محوری واقعی^۳ یا آزمایش های برش مکعبی^۴. ای آزمایش ها به صورت شماتیک در شکل ۵ نشان داده شده اند. در آزمایش سه محوری معمولی، تنش اصلی میانگین می تواند تنها برابر با یکی از تنش های اصلی حداکثر یا حداقل باشد، و نه بین آنها. بر این اساس در سایر آزمایش ها این امکان وجود دارد که مقدار σ_2 متغیر باشد، که این موضوع قابلیت مدلسازی شرایط تنشی در مسائل واقعی را به صورت دقیق تر فراهم می کند. این آزمایش ها عمدتاً برای کارهای تحقیقاتی و پژوهشی مورد استفاده قرار می گیرد و کمتر در کاربردهای مهندسی به کار می رود.

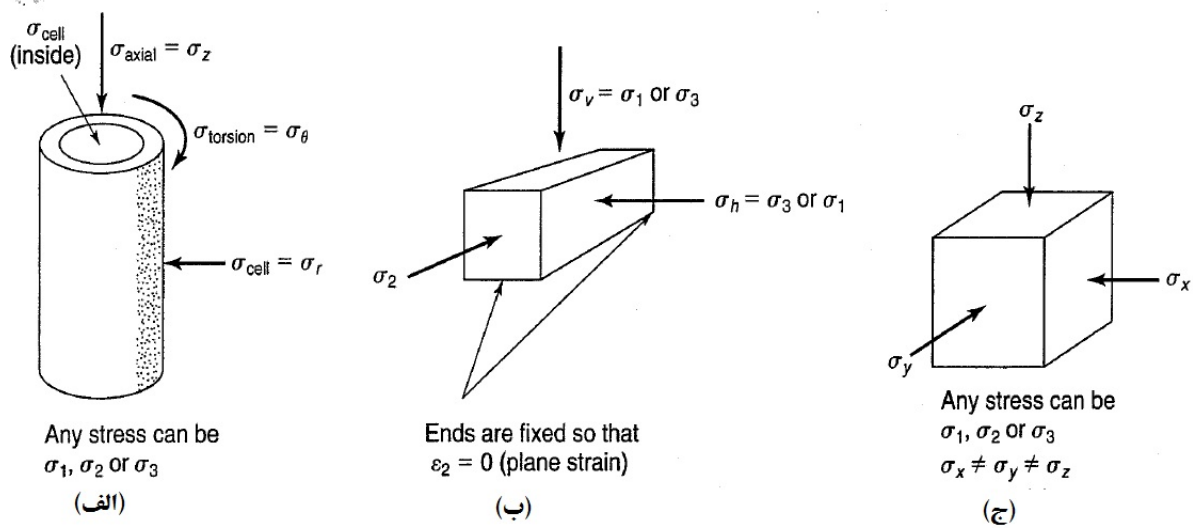
^۱ hollow cylinder tests

^۲ Plane strain tests

^۳ true triaxial

^۴ cuboidal shear tests

صفحه: ۸	DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV	پروژه:
مرداد ۹۴							۰۱	



شکل ۵: نمای شماتیک: (الف) آزمایش سیلندر توخالی (ب) آزمایش کرنش صفحه‌ای و (ج) آزمایش سه محوری واقعی یا برش مکعبی

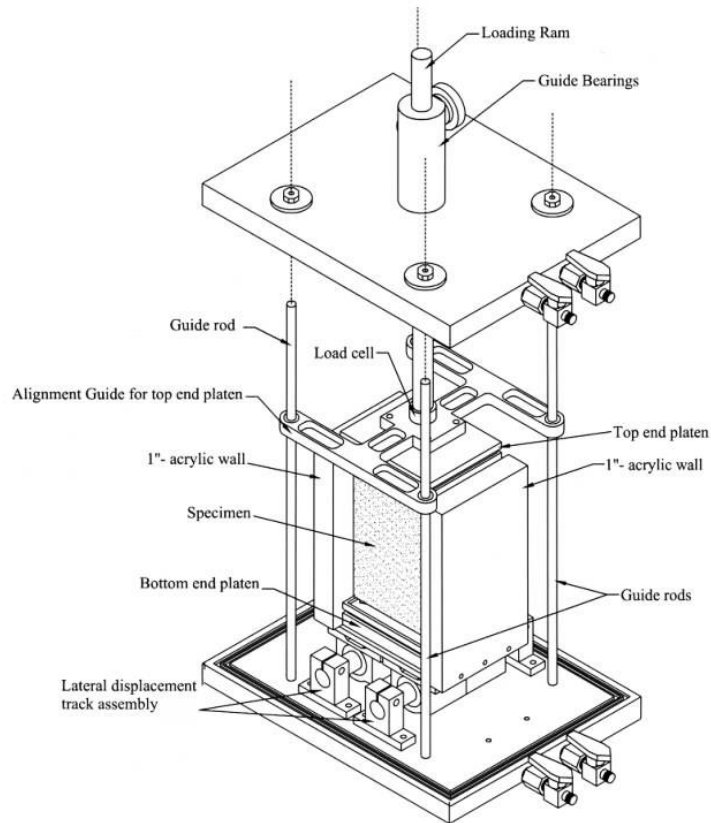


شکل ۶: دستگاه آزمایش سیلندر توخالی

آزمون های آزمایشگاهی تعیین مقاومت برشی خاک



صفحه: ۹	DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV	پروژه:
مرداد ۹۴							۰۱	



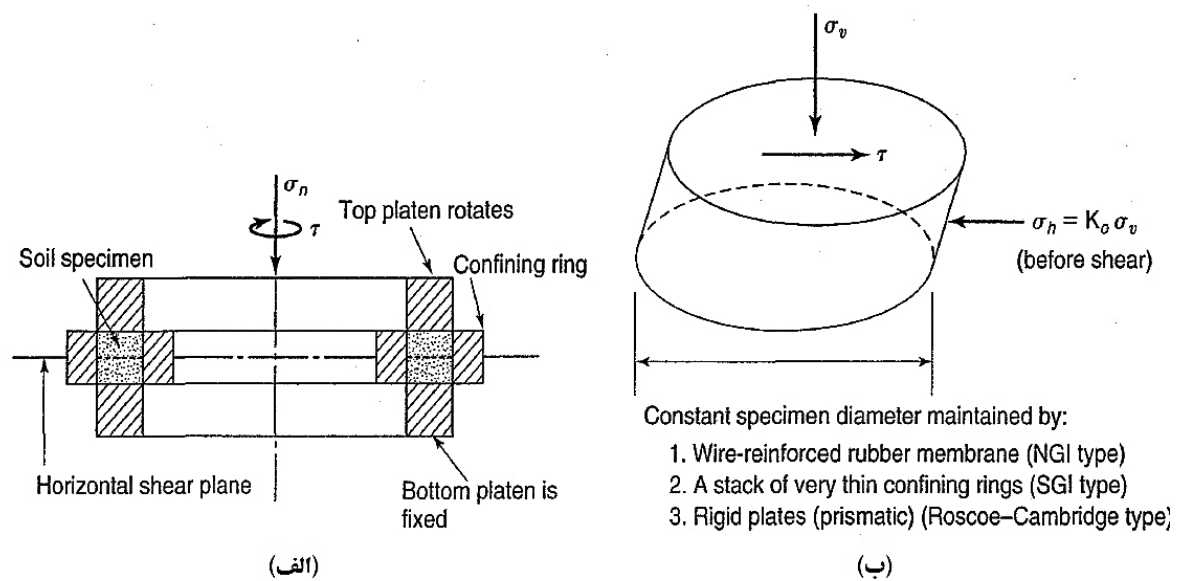
شکل ۷: نمای شماتیک کل دستگاه آزمایشگاهی کرنش صفحه‌ای



شکل ۸: باکس آزمایش سه محوری واقعی

یک نوع دیگر از انواع آزمایش برش مستقیم نیز وجود دارد که با عنوان آزمایش «پیچشی» یا «برش حلقه» شناخته می‌شود (شکل ۹- الف) که در این آزمایش نمونه خاک ممکن است تحت تغییر شکل‌های بزرگی قرار

گیرد. از این نوع آزمایش بعضاً جهت تعیین مقاومت برشی نهایی یا باقیمانده یک مصالح خاص استفاده می شود، و استفاده از یک دستگاه برشی حلقوی نسبت به باکس های معکوس در آزمایش برش مستقیم معمولی، ساده تر خواهد بود. آزمایش پر کاربرد مورد استفاده در کشورهای اسکانندیناوی، ژاپن و آمریکای شمالی جهت انجام آزمایش های استاتیکی و دینامیکی، آزمایش برش مستقیم ساده (DSS^۱) است (شکل ۹-ب). در این آزمایش یک حالت نسبتاً همگن تنش برشی اعمال می شود که در نتیجه مسئله ی تمرکز تنش که در دستگاه آزمایش برش مستقیم معمولی وجود دارد، ایجاد نمی شود.



شکل ۹: شکل شماتیک: (الف) دستگاه برش حلقه یا پیچشی و (ب) برش مستقیم ساده

^۱ Direct simple shear