مقاومت برشی خاک‌ها

یکی از عوامل مؤثر و بسیار مهم در پایداری سدهای خاکی، مقاومت برشی [1] مصالح خاکی موجود در بدنه و پی سد است. مقاومت برشی خاک‌ها تابع اندازهٔ ذرات، دانه‌بندی، تراکم، ساختمان، رطوبت و شرایط زهکشی در حین برش، سرعت برش و در مورد خاک‌های چسبنده، تاریخچهٔ بارگذاری است. در این خصوص حتی انجام آزمایش برشی نیز بر نتایج حاصله تأثیر می گذارد.

۹-۴- آزمایش‌های مقاومت برشی خاک

روش‌های تعیین مقاومت برشی خاک‌ها به دو گروه کلی آزمایش‌های صحرایی و آزمایش‌های آزمایشگاهی تقسیم می‌شود که در این قسمت با توجه به اهمیت هریک و چگونگی کاربرد در طراحی سدهای خاکی به‌طور مختصر تشریح می‌شوند.

۹-۴-۱- آزمایش‌های صحرایی

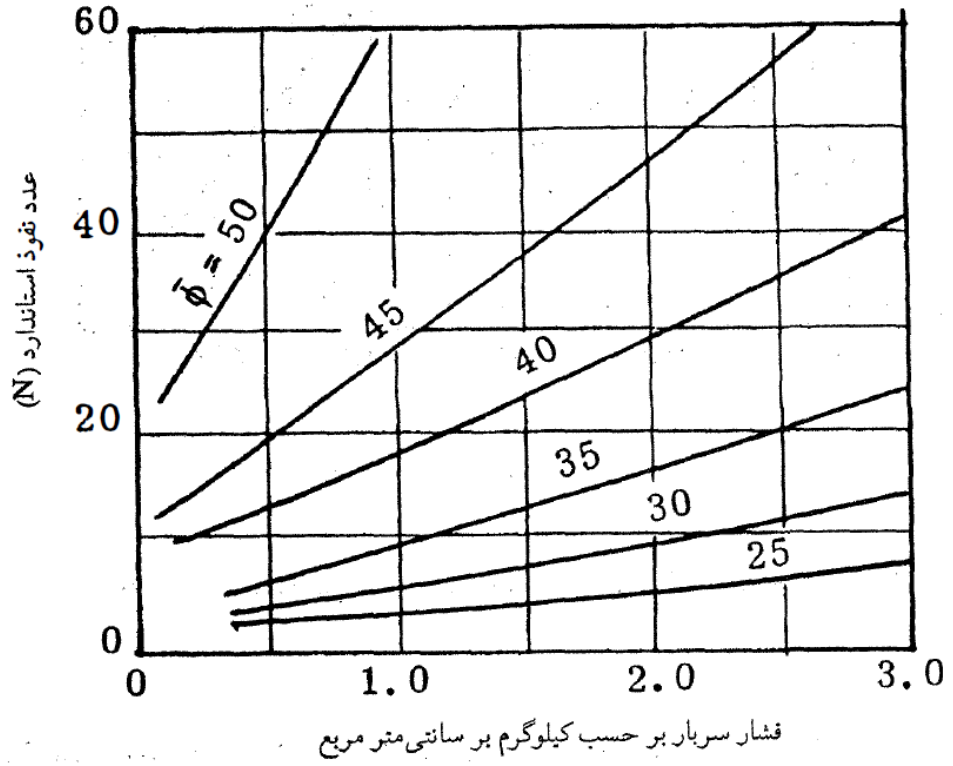
این گروه از آزمایش‌ها به‌منظور ارزیابی مقاومت برشی خاک درجا و با روش‌های مختلف انجام می‌شوند که از این میان سه آزمایش زیر اهمیت و کاربرد بیشتری دارند:

الف) آزمایش نفوذ استاندارد [۱] (SPT)

ب) آزمایش نفوذ مخروط هلندی [۲] (DCPT)

ج) آزمایش برش پره‌ای [۳]

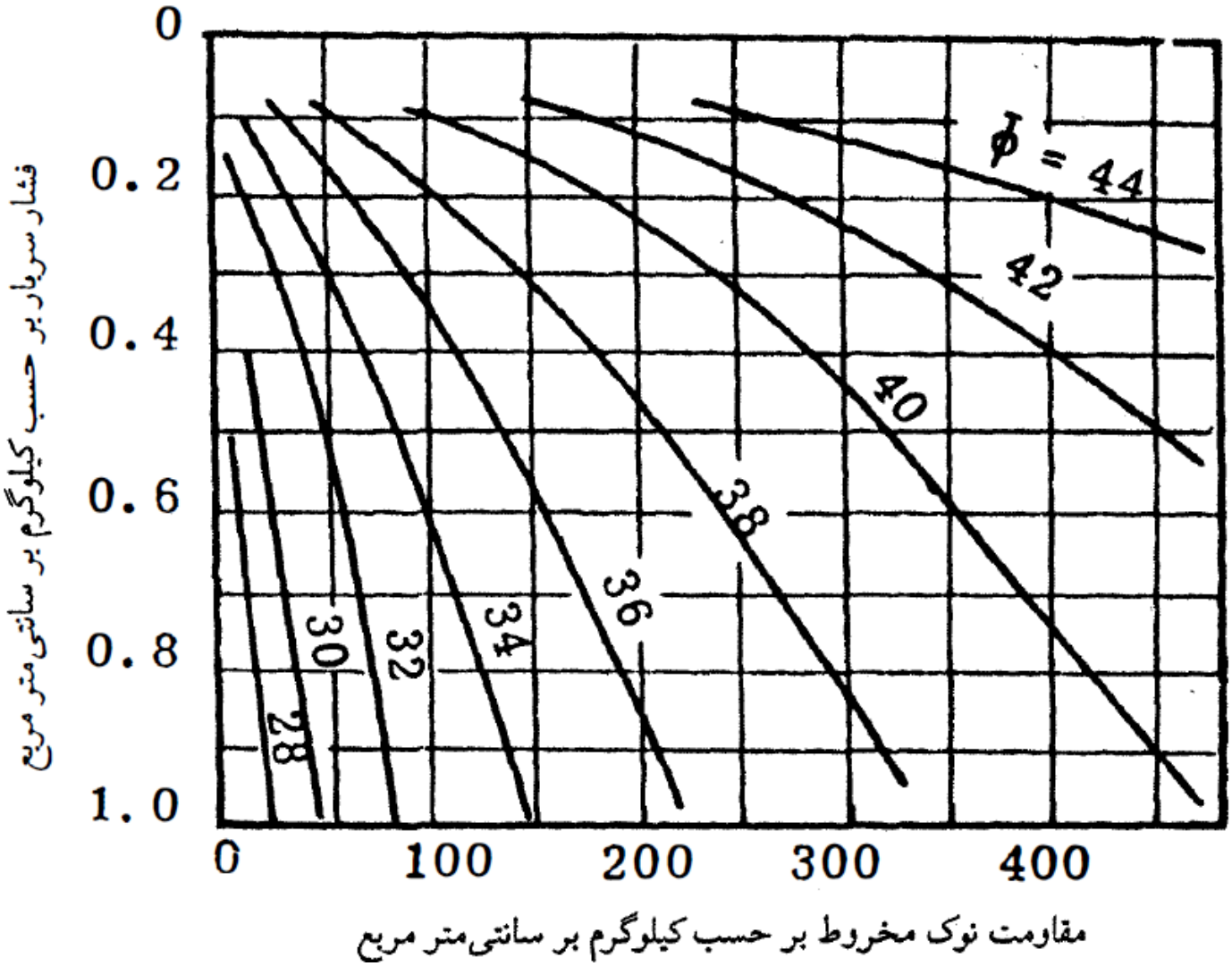
در آزمایش نفوذ استاندارد، تعداد ضربات لازم برای فرو شدن یک میلهٔ استاندارد به ابعاد معین، تحت تأثیر سقوط آزاد یک وزنهٔ ۶۳/۵ کیلوگرمی (۱۴۰ پوند)، از ارتفاع ۳۰/۴۸ سانتی‌متر (یک فوت)، به میزان ۳۰ سانتی‌متر، به‌عنوان مقاومت نسبی خاک درجا تلقی شده و با حرف N نمایش داده می‌شود. محققان سعی کرده‌اند تا عدد N را به پارامترهای مقاومت برشی خاک، از جمله ϕ، مربوط سازند. اشمرتمن [1] در سال ۱۹۷۵، رابطهٔ بین عدد N، عمق لایهٔ خاک و زاویهٔ اصطکاک درونی را مطابق شکل ۹-۴ ارائه کرده است [۳].



شکل ۹-۴- رابطهٔ مقادیر N، ϕ و عمق خاک [۳]

در آزمایش نفوذ مخروط هلندی، مقاومت نسبی لایه‌های زمین بر حسب نیروی لازم برای فرو شدن ممتد یک میلهٔ مخروطی به قطر ۳۵/۶ میلی‌متر و زاویهٔ مخروط ۶۰ درجه در خاک به‌عنوان معیار سنجش مقاومت خاک تعیین می‌شود. در این آزمایش علاوه بر سنجش مقاومت در مقابل فرو شدن نوک مخروط، مقاومت خاک در مقابل نفوذ غلاف استوانه‌ای متصل به آن نیز قابل تعیین است.

در مورد این آزمایش نیز محققان سعی کرده‌اند تا نتایج را به سایر پارامترهای مقاومت برشی خاک از جمله زاویهٔ اصطکاک درونی مرتبط سازند. تروفیمکوف [1] رابطهٔ بین مقاومت مخروط، زاویهٔ اصطکاک درونی و عمق لایهٔ خاک را مطابق شکل ۹-۵ ارائه کرده است [۷].



شکل ۹-۵- رابطهٔ بین مقادیر مقاومت مخروط ، ϕ و عمق خاک [۷]

جدول ۹-۱- رابطهٔ بین نتایج آزمایش‌های نفوذ استاندارد و مخروط هلندی با سایر مشخصات فنی خاک‌ها

خاک‌های ماسه ای				خاک‌های رسی - سیلتی		
عدد SPT N	مقاومت نفوذ مخروط kg/cm^2	دانسیته نسبی (D_r)	زاویهٔ اصطکاک درونی (درجه)	درجه تراکم	عدد SPT N	مقاومت فشاری تک محوری kg/cm^2	میزان سفتی
<۴	<۲۰	<۰/۲	<۳۰	خیلی سست	۲	۰/۲۵	خیلی نرم
۴-۱۰	۲۰-۴۰	۰/۲-۰/۴	۳۰-۳۵	سست	۴	۰/۲۵-۰/۵۰	نرم
۱۰-۳۰	۴۰-۱۲۰	۰/۴-۰/۶	۳۵-۴۰	تراکم متوسط	۴-۸	۰/۵-۱/۰	نیمه نرم
۳۰-۵۰	۱۲۰-۲۰۰	۰/۶-۰/۸	۴۰-۴۵	متراکم	۸-۱۵	۱/۰-۲/۰	سفت
>۵۰	>۲۰۰	۰/۸-۱/۰	۴۵	خیلی متراکم	۱۵-۳۰	۲/۰-۴/۰	خیلی سفت
-	-	-	-	-	>۳۰	۴/۰-۸/۰	سخت

در آزمایش برش پره‌ای که به‌منظور تعیین مقاومت برشی زهکشی‌نشدهٔ خاک‌های رسی به‌صورت درجا انجام می‌شود، یک پرهٔ چهار تیغه‌ای (به‌صورت دو صفحهٔ نازک عمود بر هم) توسط میله‌ای به داخل خاک فرو برده می‌شود و پس از رسیدن به عمق مورد نظر، توسط یک موتور الکتریکی یا یک اهرم دستی پیچانیده می‌شود تا خاک در سطح جانبی استوانه محیط بر پره‌ها برش یابد. مقدار گشتاور لازم برای چرخش پره و برش دادن خاک متناسب با مقاومت آن بوده و با تعیین این کمیت و ابعاد پره، مقاومت برشی خاک قابل محاسبه است.

۹-۴-۲- آزمایش‌های آزمایشگاهی

آزمایش‌های آزمایشگاهی معمولاً مکمل آزمایش‌های صحرایی است و معمولاً برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی و سایر خصوصیات مهندسی خاک دست‌خورده یا دست‌نخورده مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌علاوه در آزمایش‌های آزمایشگاهی این امکان وجود دارد تا خصوصیات و رفتار خاک را متناسب با شرایط طبیعی و آنچه درطرح مورد نیاز است، تغییرداد که این‌امر از جمله مزایای‌ویژهٔ آزمایش‌های آزمایشگاهی محسوب می‌شود. برای نمونه، ساخته شدن بدنهٔ یک سد خاکی بر روی پی، شرایط تنش‌ها در پی را تغییر می‌دهد، درحالی‌که آزمایش‌های صحرایی به‌عمل آمده روی پی قبل از احداث بدنهٔ سد نمی‌تواند نشان‌دهندهٔ رفتار پی پس از ساخت سد باشد. در آزمایش‌های آزمایشگاهی با اتخاذ یک الگوی مناسب، امکان پیش‌بینی این رفتار وجود خواهد داشت. در حال حاضر، آزمایش‌های آزمایشگاهی مختلفی برای تعیین مقاومت برشی خاک‌ها به‌شرح زیر ابداع شده است:

- آزمایش برش مستقیم [۱]
- آزمایش فشار سه‌محوری [۲]
- آزمایش فشار تک‌محوری [۳]
- آزمایش برش پره‌ای

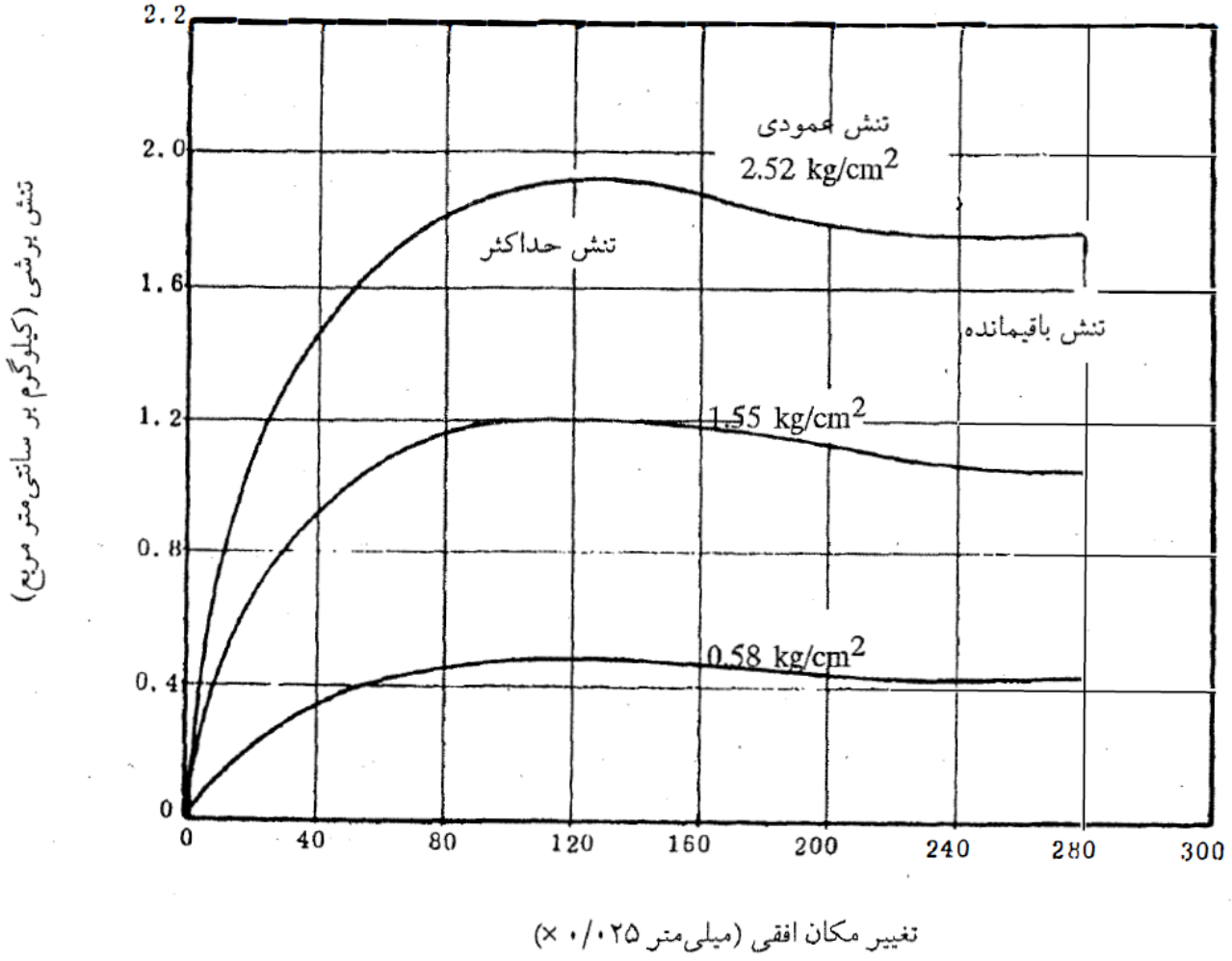
آزمایش برش مستقیم به‌دلیل سادگی دستگاه و سهولت انجام، تاکنون به میزان زیادی مورد استفاده قرار گرفته است. در این آزمایش چنانچه نمونه از نوع درشت دانه یا دارای ضخامت کم باشد، شرایط زهکشی‌شده برقرار است، مقاومت برشی خاک بر حسب تنش مؤثر به‌دست می‌آید. البته در مورد نمونه‌های ضخیم خاک‌های رسی با خمیرایی بالا، به‌دلیل عدم امکان زهکشی، شرایط تنش کل برقرار است. در آزمایش سه‌محوری با توجه به جامعیت دستگاه و وجود امکان برقراری شرایط مختلف، می‌توان مقاومت برشی را در هریک از شرایط تنش مؤثر و تنش کل به‌دست آورد. در آزمایش‌های تک‌محوری و برش پره‌ای، به‌دلیل عدم امکان زهکشی نمونه در حین آزمایش، تعیین مقاومت برشی تنها در شرایط زهکشی‌نشده (تنش کل) انجام می‌گیرد.

از نظر چگونگی انجام، آزمایش تک‌محوری را می‌توان نوع خاصی از آزمایش سه‌محوری محسوب کرد که در آن فشار جانبی صفر است و در حین برش امکان زهکش شدن نمونه وجود ندارد، ازاین‌رو این آزمایش با کمک دستگاه‌های ساده‌تری قابل انجام است.

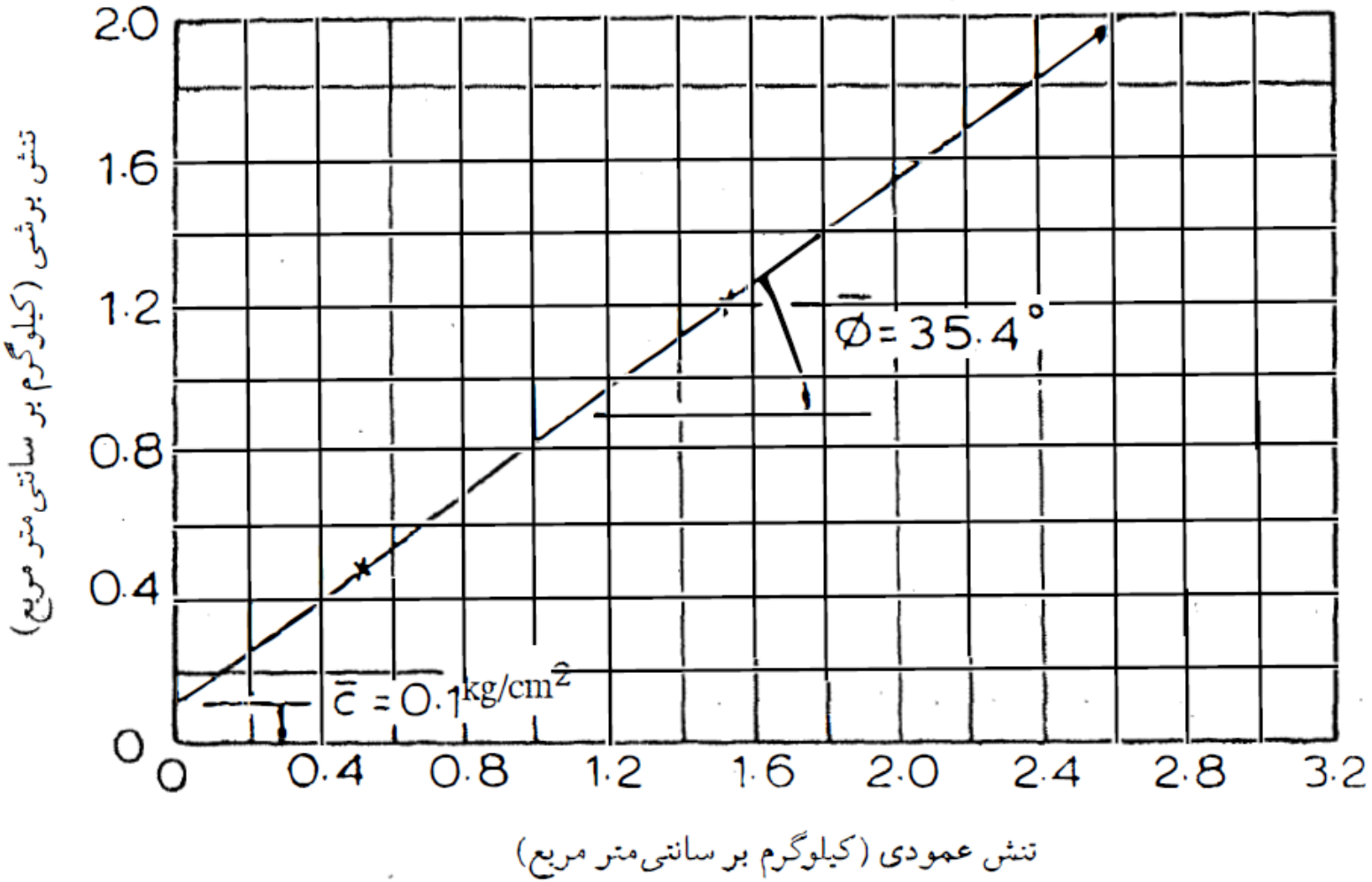
الف- آزمایش برش مستقیم

در آزمایش برش مستقیم، نمونهٔ خاک به‌طور مستقیم و روی یک صفحهٔ از پیش تعیین‌شده با افزایش نیروی برشی تحت بار عمودی [1] معین برش داده می‌شود. بنابراین اشکال اصلی این روش، پیشرونده بودن گسیختگی و وقوع برش روی یک صفحهٔ از پیش‌تعیین‌شده و نه روی ضعیف‌ترین سطح، است. به‌علاوه جلوگیری کامل از زهکشی در حین برش و اندازه‌گیری فشار منفذی طی آزمایش نیز مقدور نیست. در مجموع، این آزمایش برای تعیین مقاومت برشی خاک‌های غیرچسبندهٔ خشک در شرایط زهکشی‌شده مناسب است.

در شکل‌های ۹-۷ و ۹-۸ نمونه‌ای از منحنی های به‌دست آمده در یک آزمایش برش مستقیم نشان داده شده است.



شکل ۹-۷- تغییرات تنش برشی بر حسب تغییر مکان افقی در آزمایش برش مستقیم



شکل ۹-۸- تنش برشی بر حسب تنش عمودی (آزمایش برش مستقیم)

ب - آزمایش فشار سه‌محوری

آزمایش فشار سه‌محوری در واقع کامل‌ترین و دقیق‌ترین نوع آزمایش آزمایشگاهی برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک‌هاست. همان‌طورکه از نام این آزمایش مشهود است، بارگذاری نمونهٔ خاک در سه جهت مقدور است و علاوه بر امکان اندازه‌گیری تنش و کرنش در سه جهت، اندازه‌گیری فشار منفذی داخل نمونهٔ خاک، ناشی از بارگذاری نیز در هر مرحله از آزمایش امکان‌پذیر است که این امر یکی از مزایای قابل توجه این آزمایش به‌شمار می‌رود.

به‌طور کلی، آزمایش سه‌محوری متناسب با شرایط نمونه و شرایط بارگذاری واقعی به سه صورت زیر قابل انجام است:

الف) آزمایش سریع [۲] (Q)، یا آزمایش بدون تحکیم و بدون زهکشی [۳] (UU)

ب) آزمایش نیمه‌سریع [۴] (R)، یا آزمایش با تحکیم و بدون زهکشی [۵] (CU)

ج) آزمایش آهسته [۶] (S)، یا آزمایش با تحکیم و با زهکشی [۷] (CD)

تفاوت اصلی سه آزمایش فوق، در سرعت اعمال هریک از تنش‌های همه‌جانبه و محوری و ایجاد امکان برای خروج آب منفذی یا عدم آن است. در آزمایش سریع یا آزمایش بدون تحکیم و بدون زهکشی، تنش‌های همه‌جانبه و محوری بسرعت اعمال می‌شود و درحالی‌که شیرهای زهکشی دستگاه بسته است، امکان خروج آب منفذی از نمونه در هیچ‌یک از مراحل بارگذاری وجود ندارد، به‌گونه‌ای که فشار منفذی به‌طور کامل بسیج می‌شود.

در آزمایش نیمه‌سریع یا آزمایش با تحکیم و بدون زهکشی، تنش همه‌جانبه به کندی و درحالی‌که شیر زهکش نمونه باز است، انجام می‌شود و تحت این تنش، نمونه فرصت تحکیم یافتن را دارد. پس از تحکیم تحت تنش همه‌جانبه، شیر زهکش بسته شده و تنش محوری ($\Delta\sigma_a$) با سرعت اعمال می‌شود، به‌گونه‌ای‌که تحت تنش اخیر نمونه امکان تحکیم یافتن نخواهد داشت. در آزمایش آهسته یا آزمایش با تحکیم و زهکشی، اعمال تنش‌های همه‌جانبه و محوری به کندی صورت می‌گیرد و شیر خروج آب منفذی از نمونه در تمام مراحل باز است، به‌گونه‌ای‌که در آزمایش اول، یعنی (UU) پارامترهای مقاومت برشی در حالت تنش کل و در آزمایش سوم، یعنی (CD) پارامترهای مقاومت برشی در شرایط تنش مؤثر به‌دست خواهند آمد و در آزمایش دوم، یعنی (CU) حالتی بینابین وجود دارد و ازاین‌رو کاربرد هریک از روش‌ها متناسب با شرایط واقعی بارگذاری سازه صورت خواهد گرفت که در ذیل تشریح می‌گردد.

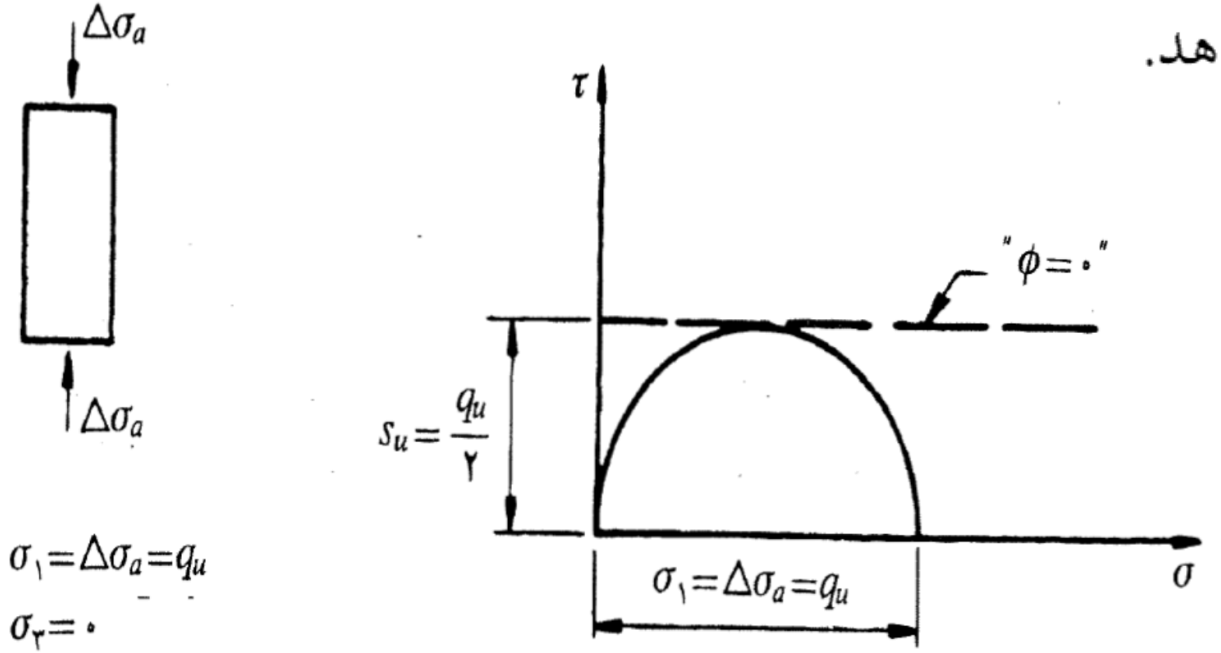
۹-۴-۳-کاربرد آزمایش‌های تعیین مقاومت برشی [۸]

همان‌طورکه اشاره شد، هریک از روش‌های آزمایشگاهی تعیین مقاومت برشی خاک با توجه به روش اعمال تنش، شرایط زهکشی نمونه و محدودیت‌های موجود کاربردهای خاصی دارند که در این قسمت با توجه به کاربردشان در ارزیابی پایداری سدهای خاکی تشریح می‌شوند.

الف- کاربرد آزمایش تک‌محوری (UC)

از آزمایش‌های تک‌محوری برای برآورد مقاومت برشی زهکشی‌نشدهٔ خاک‌های ریزدانه در پی سدهای خاکی استفاده می‌شود. استفاده از این روش برای تحلیل پایداری سد خاکی در انتهای مرحلهٔ ساخت، معمولاً محافظه‌کارانه خواهد بود. از آنجا که مقاومت برشی زهکشی‌نشده عموماً با عمق ثابت نیست، ازاین‌رو آزمایش تک‌محوری را باید روی نمونه‌های به‌دست آمده از عمق‌های مختلف پی که در محدودهٔ دارای پتانسیل گسیختگی قرار دارند، انجام داد. پس از انجام تعدادی آزمایش می‌توان منحنی تغییرات مقاومت برشی زهکشی‌نشدهٔ مصالح رابر حسب عمق در داخل پی سد ترسیم و سپس از آن برای برآورد مقاومت برشی موجود در امتداد سطح گسیختگی استفاده کرد.

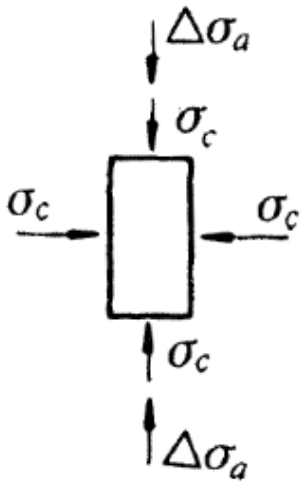
از نظر نوع خاک، انجام آزمایش تک‌محوری باید صرفاً به خاک‌های ریز دانه با طبقه‌بندی CL , CH , ML , MH یا CL-ML محدود شود. خاک‌های ریزدانه بسیار سفت، اغلب دارای درز و ترک‌اند، بنابراین انجام آزمایش تک‌محوری روی این خاک‌ها منجر به مقاومت‌های کم تا خیلی کم می‌شود که این نتیجه عموماً نادرست است. در این‌گونه موارد، استفاده از آزمایش سه‌محوری از نوع بدون تحکیم - بدون زهکشی (UU) ارجح است. شکل ۹-۹ نتیجهٔ آزمایش تک‌محوری را به‌صورت یک دایرهٔ مهر نشان می‌دهد.



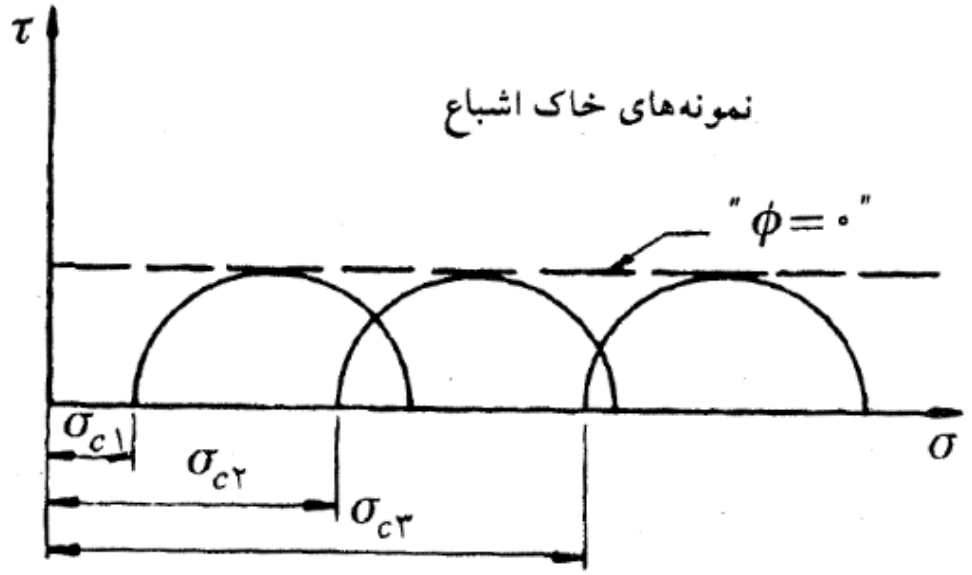
شکل ۹-۹- آزمایش تک‌محوری و دایرهٔ مهر مربوطه

ب - کاربرد آزمایش سه‌محوری UU

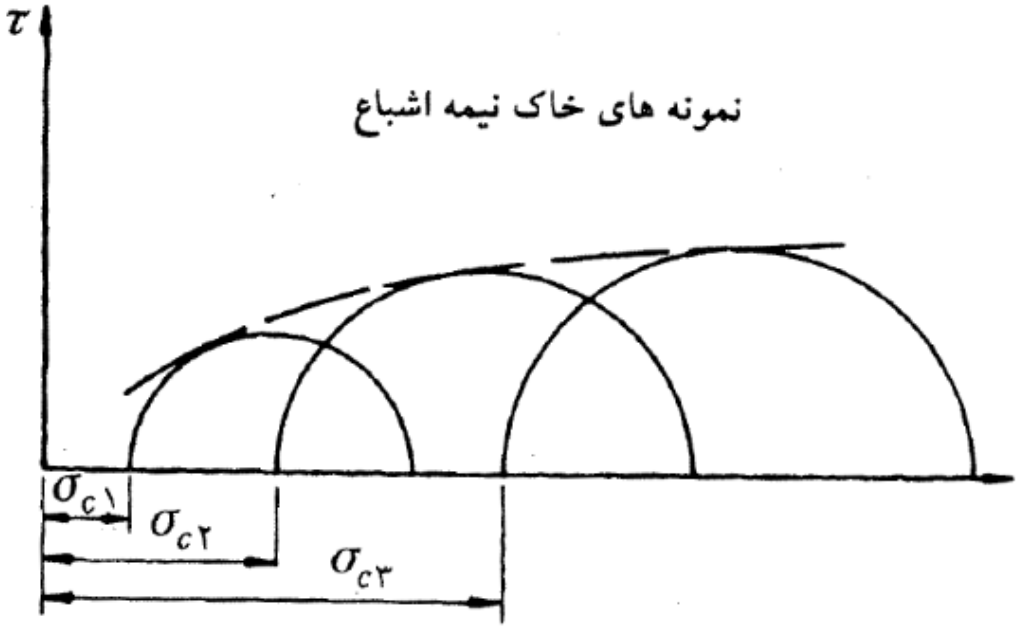
نتایج آزمایش سه‌محوری بدون تحکیم - بدون زهکشی برای ارزیابی رفتار قسمت‌های ریزدانه و نفوذناپذیر سدهای خاکی (که در آنها به‌علت کمی نفوذپذیری، سرعت خروج آب و زهکش شدن بسیار کند است)، در انتهای مرحلهٔ ساخت در شرایطی‌که سرعت عملیات خاکریزی بیشتر از سرعت تحکیم است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. فشار همه‌جانبهٔ مورد استفاده در این آزمایش باید دربرگیرندهٔ محدودهٔ تنش نرمال (عمودی) کل اعمال‌شده در سطح دایرهٔ لغزش محتمل عبوری از قسمت نفوذناپذیر بدنهٔ سد باشد. نتایج آزمایش UU به میزان زیادی وابسته به دانسیتهٔ خشک خاک متراکم شده و رطوبت تراکم است، بنابراین آزمایش باید روی نمونه‌های متراکم شده در قالب‌های تراکم استاندارد و تحت محدودهٔ رطوبتی ارائه‌شده در مشخصات فنی انجام گیرد. شکل ۹-۱۰ چگونگی انجام آزمایش سه‌محوری UU و نتیجهٔ حاصل از آن را به‌صورت دایرهٔ مهر نشان می‌دهد.



$$\sigma_3 = \sigma_c$$
$$\sigma_1 = \sigma_c + \Delta\sigma_a$$



توجه: با نزدیک شدن درجه اشباع نمونه به ۱۰۰ درصد، پوش گسیختگی دوایر مهر به سمت افق میل می‌کند.



شکل ۹-۱۰- آزمایش سه‌محوری UU و دایره‌های مهر حاصل از آن

در مورد پی‌های متشکل از مصالح سفت و درز و ترکدار، انجام آزمایش تحت شرایط زهکشی‌نشده منجر به بروز خطا می‌شود، بنابراین نمی‌تواند بیانگر رفتار خاک در انتهای مرحلهٔ ساخت باشد. ازاین‌رو برای چنین مصالحی تحلیل بر اساس تنش مؤثر با فرض صفر بودن فشار منفذی حاصل از برش محافظه‌کارانه‌تر است و باید جایگزین روش UU شود.

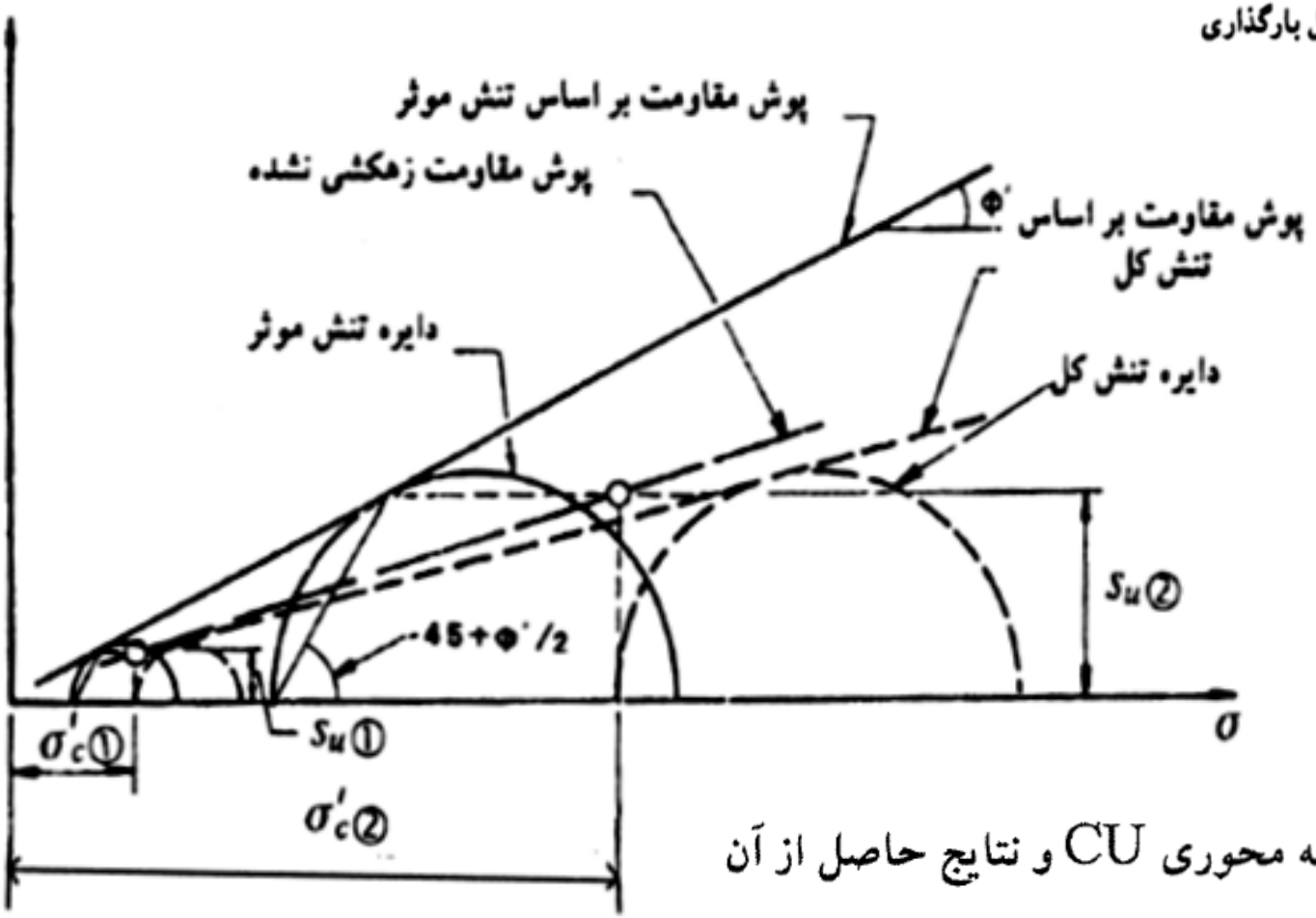
ج - کاربرد آزمایش سه‌محوری CU

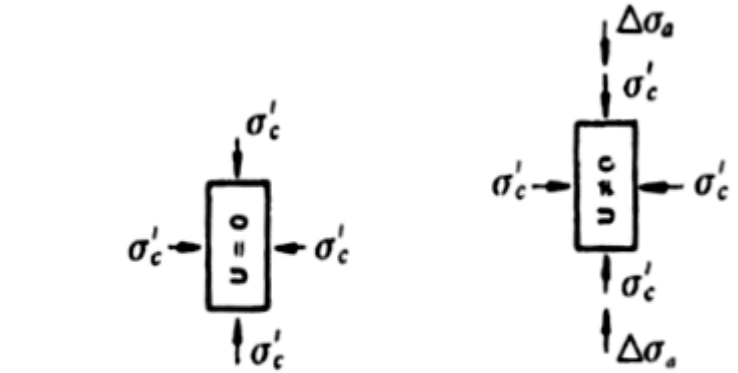
در تحلیل پایداری سدهای خاکی، آزمایش سه‌محوری در شرایط با تحکیم و بدون زهکشی (CU) همراه با اندازه گیری فشار منفذی دارای دو کاربرد اساسی زیر است :

۱- پارامترهای مقاومت برشی در حالت تنش مؤثر، ϕ' و c'، را جهت کاربرد در تحلیل پایداری سد در حالت نشت مداوم یا سایر شرایط بارگذاری که در آن فشار منفذی ناشی از برش را بتوان صفر فرض کرد (مانند مناطق نفوذپذیر بدنه در حالت افت ناگهانی سطح آب یا انتهای مرحلهٔ ساخت) به‌دست می‌دهد.

۲- مقاومت برشی زهکشی‌نشده را به‌صورت تابعی از فشار تحکیم مؤثر برای تحلیل پایداری در شرایط افت ناگهانی سطح آب ارائه می‌کند.

شایان ذکر است که به‌طور متعارف در تحلیل پایداری سدهای خاکی در شرایط افت ناگهانی سطح آب، باید از پارامترهای مقاومت برشی به‌دست آمده از ترکیب پوش‌های مقاومت حاصله از تنش مؤثر و شرایط زهکشی‌نشده استفاده کرد. تنش عمودی مورد استفاده در این حالت، باید معادل تنش تحکیم مؤثر وارد بر قاعدهٔ قطعهٔ مورد نظر قبل از افت ناگهانی سطح آب باشد (برابر تنش عمودی منهای فشار منفذی به‌دست آمده از شبکهٔ جریان نشت دائم منطبق با سطح آب مخزن قبل از افت).





شکل ۹-۱۱- آزمایش سه محوری CU و نتایج حاصل از آن

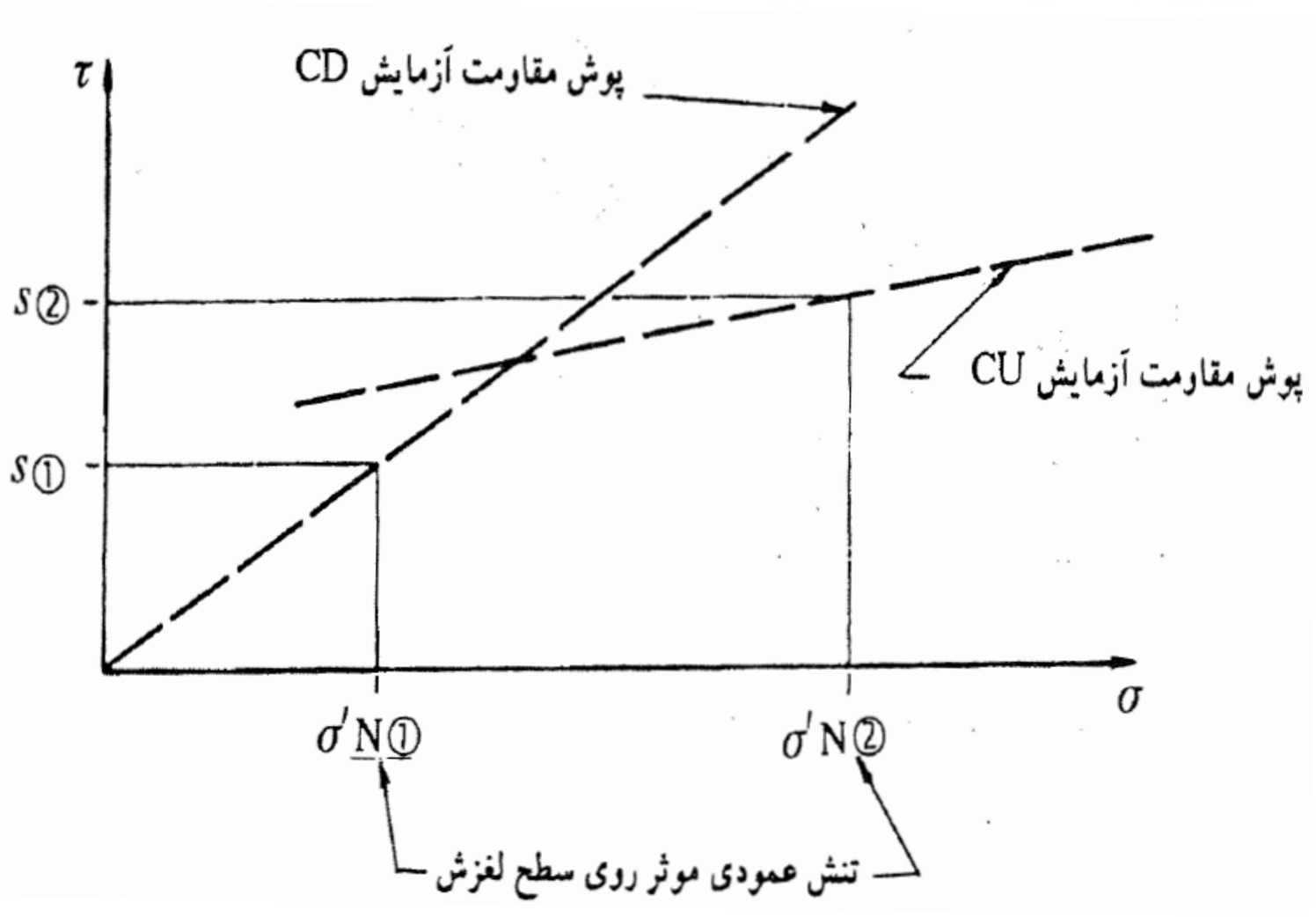
فشار تحکیم مورد استفاده در آزمایش‌های CU باید دربرگیرندهٔ محدودهٔ تنش‌های عمودی مؤثر وارد بر سطوح لغزش محتمل قبل از افت سطح آب باشد. نظر به اینکه مقاومت برشی زهکشی‌نشدهٔ به‌دست آمده از آزمایش‌های CU بشدت تابع دانسیتهٔ خشک خاک در حالت متراکم شده و نیز رطوبت تراکم است، ازاین‌رو تهیهٔ نمونه‌های مورد آزمایش برای این روش باید با دقت انجام گردیده و نکات ذکرشده برای تهیهٔ نمونه در آزمایش UU در اینجا نیز مورد توجه قرار گیرد.

از آنجاکه تعیین پارامترهای مقاومت برشی تنش مؤثر بر اساس آزمایش‌های CU تابع اندازه‌گیری دقیق فشار منفذی ناشی از برش است، ازاین‌رو نمونهٔ مورد آزمایش باید به‌طور کامل اشباع شود. برای اطمینان از اشباع کامل نمونه می‌توان درحالی‌که شیر زهکشی نمونه بسته است، فشار همه‌جانبه را به میزان معینی اضافه و فشار منفذی حاصله را اندازه گیری کرد و بر اساس آن، مقدار ضریب B را که برابر با نسبت فشار منفذی اندازه‌گیری‌شده به افزایش فشار همه‌جانبه است، محاسبه کرد. در این صورت، مقدار ضریب B باید قبل از اعمال بارگذاری محوری حداقل برابر ۰/۹۸ باشد.

د - کاربرد آزمایش سه‌محوری CD

آزمایش سه‌محوری با تحکیم و زهکشی (CD) به‌منظور تعیین پارامترهای مقاومت برشی بر اساس تنش مؤثر، یعنی ϕ' و c' انجام می‌شود. این پارامترها در تحلیل پایداری در حالت تنش مؤثر مورد استفاده قرار می‌گیرند. نتایج این آزمایش برای تحلیل پایداری سدهای خاکی و پی آنها در شرایط نشت دائم (بجز در مواردی‌که مصالح پی متشکل از رس فوق تحکیم یافته [1] یا شیل [2] که ممکن است در گذشته در معرض تغییر شکل‌های برشی قرار گرفته و در مورد آنها استفاده از مقاومت برشی باقیمانده حاصل از آزمایش برش مستقیم ارجح است) یا در شرایط انتهای مرحلهٔ ساخت یا افت ناگهانی سطح آب در خاک‌های نفوذپذیر به‌کار می‌رود. از پارامترهای مقاومت برشی تنش مؤثر حاصل از آزمایش CD، می‌توان به‌جای پارامترهای به‌دست آمده از آزمایش CU به‌منظور تهیهٔ پوش مهر - کولمب مرکب برای تحلیل افت ناگهانی سطح آب نیز استفاده کرد.

شکل ۹-۱۲ نتیجهٔ یک آزمایش سه‌محوری CD را در مقایسه با نتیجهٔ حاصل از آزمایش CU نشان می‌دهد.



شکل ۹-۱۲- نتیجهٔ یک آزمایش سه‌محوری CD در مقایسه با آزمایش CU

هـ- کاربرد نتایج آزمایش برش مستقیم (DS)

در پی‌های متشکل از رس‌های بسیار فوق تحکیم یافته، ممکن است در گذشته تغییر شکل‌هایی در امتداد سطوح لایه‌بندی [1]، مناطق برشی [2] یا گسل‌ها [3] اتفاق افتاده باشد، به‌گونه‌ای‌که حداکثر مقاومت برشی موجود در امتداد این ناپیوستگی‌ها برابر مقاومت برشی باقیمانده خواهد بود. تحت چنین شرایطی بهترین روش برای تعیین مقاومت برشی باقیمانده، استفاده از آزمایش برش مستقیم (DS) است. در قرار دادن نمونه در دستگاه برای انجام آزمایش برش مستقیم در این موارد، باید به‌گونه‌ای عمل شود که برش در جهت موازی با سطوح ناپیوستگی رخ دهد تا اندازه‌گیری مقاومت برشی باقیمانده میسر شود. در صورت استفاده از مقاومت برشی باقیمانده در تحلیل پایداری، می‌توان ارقام کمتری را برای ضریب اطمینان مجاز پذیرفت.

۹-۵- مقاومت برشی خاک‌های مختلف

با توجه به مجموعه مباحث ارائه‌شده در قسمت‌های قبل، در این بخش ویژگی‌های مقاومت برشی خاک‌ها و مصالح مختلف مورد استفاده در ساخت سدهای خاکی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. بر اساس طبقه‌بندی‌های موجود و تنوع مصالح مورد استفاده، مقاومت برشی خاک‌ها در سه گروه خاک‌های غیرچسبنده (درشت دانه)، سنگریز و چسبنده (ریزدانه) تشریح می‌شود.

۹-۵-۱- ویژگی‌های مقاومت برشی خاک‌های غیر چسبنده

ویژگی اصلی خاک‌های غیرچسبنده یا درشت دانه شامل شن، ماسه و تا حدودی سیلت، این است که مقاومت برشی این خاک‌ها عمدتاً ناشی از اصطکاک بین ذرات بوده و پارامتر نشان‌دهندهٔ آن زاویهٔ اصطکاک درونی[۴]، ϕ است. از آنجا که این نوع خاک‌ها به‌علت درشت دانه بودن، نفوذپذیر نیز می‌باشند، ازاین‌رو برای تحلیل مسائل پایداری آنها فقط مقاومت برشی زهکش‌شدهٔ خاک مورد استفاده است، چرا که فشار منفذی تقریباً همزمان با مرحلهٔ اعمال بار تخلیه می‌شود. آزمایش مقاومت برشی روی خاک‌های غیرچسبنده را می‌توان در حالت کاملاً خشک یا کاملاً اشباع با باز بودن شیر زهکش انجام داد که هر دو روش منجر به نتایج تقریباً یکسان خواهد شد.

۹-۵-۳- ویژگی‌های مقاومت برشی خاک‌های چسبنده [۵]

خاک‌های چسبنده (ریزدانه) در سدهای خاکی ممکن است در پی سد، هسته، بعضاً پوسته یا در همهٔ این قسمت‌ها وجود داشته باشد که در این صورت، پس از آبگیری سد و برقراری نشت دائم، به‌صورت اشباع درمی‌آید، بنابراین مقاومت برشی آنها در چنین حالتی در بررسی پایداری سد نقش اساسی خواهد داشت.

عوامل مؤثر بر مقاومت برشی این نوع خاک‌ها را می‌توان به‌شرح زیر برشمرد.

الف- ساختمان خاک [۲]

در آزمایش‌های برش در شرایط زهکش‌شده، ممکن‌است مقاومت ماکزیمم بیشتری‌نسبت به مقاومت نهایی حاصل شود که این پدیده به‌دلیل شکسته شدن و تخریب ساختمان خاک در مقادیر کرنش برشی زیاد رخ می‌دهد.

ب - سرعت برش [1]

به‌طور کلی، در آزمایش‌های مقاومت برشی، با افزایش سرعت برش، معمولاً مقاومت بیشتری حاصل می‌شود. این پدیده در رس‌های سفت بیشتر مشهود است و در رس‌های نرم نمود کمتری دارد. البته اثر این پدیده را باید از اثر ناشی از شرایط مختلف زهکشی در آزمایش‌های UU ، CU یا CD که در آنها ممکن است شرایط زهکشی نمونه در مراحل مختلف بارگذاری متفاوت باشد، تفکیک کرد. معمولاً در آزمایش‌های با زهکشی باید سرعت برش را به‌قدری کم کرد که در تمام طول آزمایش نمونه قادر به زهکشی باشد و در داخل نمونه فشار منفذی ایجاد نشود.

ج - شرایط زهکشی

در قسمت‌های قبل، انواع آزمایش‌های مقاومت برشی بر حسب شرایط زهکشی، یعنی UU ، CU و CD مورد بحث قرار گرفت. بدیهی است که پوش منحنی‌های مقاومت حاصله در هریک از این روش‌ها متفاوت است.

جدول ۹-۴- رده بندی خاک‌ها برای کاربرد در قسمت‌های مختلف سدهای خاکی * [۱۰]

طبقه‌بندی یونیفاید	مشخصات فنی (پس از تراکم)				کاربرد در بدنهٔ سدهای همگن	کاربرددرهسته (سد غیرهمگن)	کاربرد در پوسته (سد
	نفوذپذیری	مقاومت برشی پس از اشباع	تحکیم‌پذیری پس از اشباع	کارائی			
GW	نفوذپذیر	عالی	قابل اغماض	عالی	-	-	۱
GP	خیلی‌نفوذپذیر	خوب	قابل اغماض	خوب	-	-	۲
GM	نیمه نفوذپذیر تا نفوذناپذیر	خوب	قابل اغماض	خوب	۲	۴	-
GC	نفوذناپذیر	خوب تا متوسط	خیلی کم	خوب	۱	۱	-
SW	نفوذپذیر	عالی	قابل اغماض	عالی	-	-	۳ (اگر همراه با شن باشد)
SP	نفوذپذیر	خوب	خیلی کم	متوسط	-	-	۴ (اگر همراه با شن باشد)

* عدد ۱ نشان‌دهندهٔ بهترین و عدد ۱۰ بیانگر بدترین حالت است.

جدول ۹-۴- رده بندی خاک‌ها برای کاربرد در قسمت‌های مختلف سدهای خاکی * [۱۰]

طبقه‌بندی یونیفاید	مشخصات فنی (پس از تراکم)				کاربرد در بدنهٔ سدهای همگن	کاربرددرهسته (سد غیرهمگن)	کاربرد در پوسته (سد
	نفوذپذیری	مقاومت برشی پس از اشباع	تحکیم‌پذیری پس از اشباع	کارائی			
SM	نیمه نفوذپذیر تا نفوذناپذیر	خوب	کم	متوسط	۴	۵	-
SC	نفوذ ناپذیر	خوب تا متوسط	کم	خوب	۳	۲	-
ML	نیمه نفوذپذیر تا نفوذناپذیر	متوسط	متوسط	متوسط	۶	۶	-
CL	نفوذ ناپذیر	متوسط	متوسط	خوب‌تامتوسط	۵	۳	-
OL	نیمه نفوذپذیر تا نفوذ ناپذیر	ضعیف	متوسط	متوسط	۸	۸	-
MH	نیمه نفوذپذیر تا نفوذ ناپذیر	متوسط تاضعیف	زیاد	ضعیف	۹	۹	-
CH	نفوذ ناپذیر	ضعیف	زیاد	ضعیف	۷	۷	-
OH	نفوذ ناپذیر	ضعیف	زیاد	ضعیف	۱۰	۱۰	-
Pt	نامناسب‌برای‌اجرای‌عملیات خاکی						

* عدد ۱ نشان‌دهندهٔ بهترین و عدد ۱۰ بیانگر بدترین حالت است.